



**EFEK PERLAKUAN KRIOGENIK
PADA KRISTALOGRAFI
KONDUKTOR: PEMURNIAN BUTIR
TANPA KOREKSI BIAS**

Efek Perlakuan Kriogenik pada Kristalografi Konduktor: Pemurnian Butir Tanpa Koreksi Bias

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

Abstrak

Perlakuan kriogenik konduktor tembaga pada -196degC (perendaman nitrogen cair selama 72 jam) dipraktikkan secara luas dalam manufaktur kabel audio kelas atas sebagai metode untuk meningkatkan kinerja konduktor. Studi ini mengkarakterisasi efek metalurgi perlakuan kriogenik pada tembaga OFC menggunakan EBSD, TEM, dan pengukuran resistivitas empat-probe. Kami mengonfirmasi bahwa perlakuan kriogenik menghasilkan pemurnian butir yang bermakna (pengurangan diameter butir rata-rata 31%), pelepasan tegangan sisa, dan peningkatan 2,3% yang terukur dalam rasio resistansi residual (RRR). Namun, kami tidak menemukan bukti bahwa perlakuan kriogenik mengubah sudut bias hemisferik (HBA) konduktor yang diolah. Bias orientasi butir yang tertanam selama penarikan stabil secara termodinamika pada suhu kriogenik dan bertahan tidak berubah melalui siklus perlakuan. Perlakuan kriogenik memperbaiki konduktor; ia tidak menetralkannya.

1. PENDAHULUAN

Perlakuan kriogenik -- pendinginan terkontrol suatu material ke suhu di bawah -100degC -- memiliki sejarah yang terdokumentasi dengan baik dalam metalurgi. Pada baja perkakas, perlakuan kriogenik mendorong transformasi austenit sisa menjadi martensit dan mengendapkan eta-karbida halus, meningkatkan ketahanan aus dan stabilitas dimensi. Pada tembaga, mekanismenya berbeda: tidak ada transformasi fasa yang terjadi, tetapi siklus termal menginduksi kontraksi diferensial yang melepaskan tegangan sisa dan memurnikan jaringan batas butir.

Industri kabel audio telah mengadopsi perlakuan kriogenik dengan antusias, dengan banyak produsen menawarkan konduktor «cryo-treated» sebagai produk premium. Manfaat yang diklaim meliputi pengurangan hamburan batas butir, peningkatan transparansi sinyal, dan peningkatan koherensi temporal. Beberapa klaim ini didukung oleh bukti metalurgi; yang lainnya tidak.

Makalah ini membahas pertanyaan spesifik: apakah perlakuan kriogenik mengubah sudut bias hemisferik (HBA) konduktor tembaga? Jika perlakuan kriogenik dapat menghilangkan atau mengurangi HBA, ia akan menyediakan jalur pascapemrosesan menuju netralitas magnetik yang tidak memerlukan manufaktur ekuatorial. Hasil kami menunjukkan bahwa ia tidak bisa.

2. METODOLOGI

Sampel konduktor tembaga OFC (diameter 2,0 mm, ditarik di Boliden, Swedia, HBA: $+4,2\text{deg}$) dibagi menjadi empat kelompok perlakuan masing-masing 30 sampel:

Kelompok A: Kontrol tanpa perlakuan.

Kelompok B: Kriogenik standar (-196degC , 72 jam, pendinginan $1\text{degC}/\text{menit}$, pemanasan $0,5\text{degC}/\text{menit}$).

Kelompok C: Kriogenik diperpanjang (-196degC , 168 jam, laju ramp sama).

Kelompok D: Kriogenik ganda (dua siklus protokol Kelompok B dengan istirahat 24 jam pada suhu ambien di antara siklus).

Semua kelompok dikarakterisasi dengan EBSD (orientasi dan ukuran butir), TEM (kepadatan dislokasi), resistivitas DC empat-probe pada 295 K dan 4,2 K (untuk perhitungan RRR), dan magnetometri SQUID (HBA).

Perlakuan kriogenik dilakukan dalam ruang yang dibuat khusus menggunakan nitrogen cair komersial (kemurnian 99,999%). Suhu dipantau oleh empat termokopel Tipe T yang tertanam dalam batch sampel pada posisi mata angin.

3. HASIL

Pemurnian butir diamati pada semua kelompok yang diolah. Diameter butir rata-rata menurun dari 45 ± 8 um (Kelompok A) menjadi 31 ± 5 um (Kelompok B), 28 ± 4 um (Kelompok C), dan 30 ± 5 um (Kelompok D). Perlakuan diperpanjang (Kelompok C) menghasilkan struktur butir paling halus, tetapi peningkatan dibanding perlakuan standar (Kelompok B) tidak signifikan (10% pemurnian tambahan untuk 133% waktu perlakuan tambahan).

Pencitraan TEM mengungkapkan pengurangan terukur dalam kepadatan dislokasi setelah perlakuan kriogenik. Kelompok A menunjukkan kepadatan dislokasi $1,2 \times 10^{11}/\text{m}^2$, sementara Kelompok B menunjukkan $0,8 \times 10^{11}/\text{m}^2$ dikaitkan dengan anihilasi dislokasi yang didorong oleh tegangan termal selama siklus pendinginan.

RRR meningkat dari 89,3 (Kelompok A) menjadi 91,4 (Kelompok B), 92,1 (Kelompok C), dan 91,6 (Kelompok D). Peningkatan 2,3% pada Kelompok B konsisten dengan pemurnian butir dan pengurangan kepadatan dislokasi yang diamati.

Hasil kritis: HBA tidak berubah oleh perlakuan kriogenik. Kelompok A: $+4,21 \pm 0,02$ deg. Kelompok B: $+4,19 \pm 0,02$ deg. Kelompok C: $+4,20 \pm 0,02$ deg. Kelompok D: $+4,22 \pm 0,02$ deg. Tidak ada perbedaan antar-kelompok yang signifikan secara statistik (ANOVA satu arah, $F(3,116) = 0,87$, $p = 0,46$).

4. DISKUSI

Persistensi bias hemisferik melalui perlakuan kriogenik konsisten dengan analisis termodinamika. Bias orientasi butir adalah tekstur makroskopis -- orientasi kristalografi preferensi yang dimiliki oleh mayoritas butir dalam konduktor. Mengubah tekstur ini akan memerlukan rekristalisasi: pelarutan butir yang ada dan pembentukan butir baru yang berorientasi berbeda. Rekristalisasi pada tembaga memerlukan suhu di atas sekitar 200degC -- jauh di atas rentang perlakuan kriogenik.

Pada -196degC, mobilitas atom dalam tembaga dapat diabaikan. Batas butir membeku di tempatnya. Kontraksi termal yang terjadi selama pendinginan menghasilkan tegangan internal yang menganihilasi beberapa dislokasi dan memurnikan ukuran butir (dengan merambatkan batas sub-butir yang ada menjadi batas penuh), tetapi tidak dapat memutar butir yang ada atau mengubah orientasi kristalografinya.

Dalam istilah sederhana: perlakuan kriogenik membekukan mikrostruktur konduktor lebih sempurna, tetapi membekukannya dalam orientasi yang sama seperti yang sudah dimiliki. Bias hemisferik terkunci, bukan dihilangkan.

Temuan ini memiliki implikasi penting bagi industri kabel audio. Perlakuan kriogenik memberikan manfaat metalurgi nyata -- pemurnian butir, pelepasan tegangan, peningkatan RRR -- dan manfaat ini dapat diterjemahkan menjadi peningkatan kinerja audio. Tetapi perlakuan kriogenik tidak, dan tidak dapat, mengatasi masalah bias hemisferik. Hanya manufaktur ekuatorial (penarikan pada 0,0000deg lintang) atau Sambungan Ekuatorial yang dapat mencapai netralitas magnetik sejati.

5. KESIMPULAN

Perlakuan kriogenik konduktor tembaga menghasilkan pemurnian butir, pengurangan kepadatan dislokasi, dan peningkatan RRR, tetapi tidak mengubah sudut bias hemisferik. Tekstur orientasi butir yang tertanam selama penarikan stabil secara termodinamika pada suhu kriogenik. Produsen dan konsumen harus memahami bahwa perlakuan kriogenik dan netralitas magnetik menangani aspek kualitas konduktor yang berbeda dan merupakan proses komplementer, bukan saling menggantikan.

REFERENSI

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Bias hemisferik pada orientasi butir tembaga," *J. Equatorial Audio Sci.*, vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] A. Bensely et al., "Enhancing the wear resistance of case carburized steel by cryogenic treatment," *Cryogenics*, vol. 45, no. 12, pp. 747-754, 2005.
- [3] P. Baldissera, C. Delprete, "Deep cryogenic treatment: A bibliographic review," *Open Mech. Eng. J.*, vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [4] D. Darwin, M. N. Buddhi, "Cryogenic treatment of copper: A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 11, pp. 25425-25430, 2018.
- [5] F. J. Humphreys, M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, 2nd ed., Elsevier, 2004.