



---

# **AUSWIRKUNGEN DER KRYOGENBEHANDLUNG AUF DIE LEITERKRISTALLOGRAPHIE: KORNVERFEINERUNG OHNE VERZERRUNGSKORREKTUR**

---



# Auswirkungen der Kryogenbehandlung auf die Leiterkristallographie: Kornverfeinerung ohne Verzerrungskorrektur

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

## Zusammenfassung

Die kryogene Behandlung von Kupferleitern bei  $-196\text{ degC}$  (Eintauchen in flüssigen Stickstoff für 72 Stunden) wird in der High-End-Audiokabelherstellung weitverbreitet als Methode zur Verbesserung der Leiterleistung praktiziert. Diese Studie charakterisiert die metallurgischen Auswirkungen der Kryogenbehandlung auf OFC-Kupfer mittels EBSD, TEM und Vierpunkt-Widerstandsmessung. Wir bestätigen, dass die Kryogenbehandlung eine bedeutende Kornverfeinerung (Reduktion des mittleren Korndurchmessers um 31 %), Eigenspannungsabbau und eine messbare Verbesserung des Restwiderstandsverhältnisses (RRR) um 2,3 % bewirkt. Jedoch finden wir keinen Beleg dafür, dass die Kryogenbehandlung den hemisphärischen Verzerrungswinkel (HBA) des behandelten Leiters verändert. Die beim Ziehen eingebettete Kornorientierungsverzerrung ist bei kryogenen Temperaturen thermodynamisch stabil. Die Kryogenbehandlung verbessert den Leiter; sie neutralisiert ihn nicht.

## 1. EINLEITUNG

Kryogene Behandlung -- das kontrollierte Abkühlen eines Materials auf Temperaturen unter  $-100\text{ degC}$  -- hat eine gut dokumentierte Geschichte in der Metallurgie. Bei Werkzeugstählen fördert sie die Umwandlung von Restaustenit zu Martensit und scheidet feine Eta-Karbide aus. Bei Kupfer sind die Mechanismen anders: Keine Phasenumwandlung findet statt, aber der thermische Zyklus induziert eine differentielle Kontraktion, die Eigenspannungen abbaut und das Korngrenznetzwerk verfeinert.

Die Audiokabelindustrie hat die Kryogenbehandlung enthusiastisch übernommen. Die behaupteten Vorteile umfassen reduzierte Korngrenzstreuung, verbesserte Signaltransparenz und erhöhte zeitliche Kohärenz. Einige dieser Behauptungen werden durch metallurgische Belege gestützt; andere nicht.

Diese Arbeit befasst sich mit einer spezifischen Frage: Verändert die Kryogenbehandlung den hemisphärischen Verzerrungswinkel (HBA) eines Kupferleiters? Unsere Ergebnisse zeigen, dass sie es nicht kann.

## 2. METHODIK

Proben von OFC-Kupferleiter (Durchmesser 2,0 mm, gezogen in Boliden, Schweden, HBA:  $+4,2\text{deg}$ ) wurden in vier Behandlungsgruppen zu je 30 Proben aufgeteilt:

Gruppe A: Unbehandelte Kontrolle.

Gruppe B: Standard-Kryobehandlung ( $-196\text{ degC}$ , 72 Stunden, Abkühlung  $1\text{ degC/min}$ , Erwärmung  $0,5\text{ degC/min}$ ).

Gruppe C: Verlängerte Kryobehandlung ( $-196\text{ degC}$ , 168 Stunden, gleiche Rampen).

Gruppe D: Doppelte Kryobehandlung (zwei Zyklen des Gruppe-B-Protokolls mit 24-stündiger Ruhe bei Umgebungstemperatur).

Alle Gruppen wurden mittels EBSD (Kornorientierung und -größe), TEM (Versetzungsdichte), Vierpunkt-DC-Widerstand bei 295 K und 4,2 K (für RRR-Berechnung) und SQUID-Magnetometrie (HBA) charakterisiert.

## 3. ERGEBNISSE

Kornverfeinerung wurde in allen behandelten Gruppen beobachtet. Der mittlere Korndurchmesser sank von  $45\text{ +/- }8\text{ um}$  (Gruppe A) auf  $31\text{ +/- }5\text{ um}$  (Gruppe B),  $28\text{ +/- }4\text{ um}$  (Gruppe C) und  $30\text{ +/- }5\text{ um}$  (Gruppe D).

TEM-Bildgebung zeigte eine messbare Reduktion der Versetzungsdichte nach Kryogenbehandlung. Gruppe B:  $0,8 \times 10^{11}\text{ t/m}^2$  -- eine Reduktion um 33 %.

Das RRR verbesserte sich von 89,3 (Gruppe A) auf 91,4 (Gruppe B), 92,1 (Gruppe C) und 91,6 (Gruppe D).

Das entscheidende Ergebnis: Der HBA wurde durch die Kryogenbehandlung nicht verändert. Gruppe A:  $+4,21\text{ +/- }0,02\text{deg}$ . Gruppe B:  $+4,19\text{ +/- }0,02\text{deg}$ . Gruppe C:  $+4,20\text{ +/- }0,02\text{deg}$ . Gruppe D:  $+4,22\text{ +/- }0,02\text{deg}$ . Kein Gruppenunterschied war statistisch signifikant (einfaktorielle ANOVA,  $F(3,116) = 0,87$ ,  $p = 0,46$ ).

## 4. DISKUSSION

Die Persistenz der hemisphärischen Verzerrung trotz Kryogenbehandlung steht im Einklang mit der thermodynamischen Analyse. Die Kornorientierungsverzerrung ist eine makroskopische Textur -- eine bevorzugte kristallographische Orientierung, die von der



Mehrheit der Körner im Leiter geteilt wird. Die Änderung dieser Textur würde eine Rekristallisation erfordern: die Auflösung bestehender Körner und Bildung neuer, anders orientierter Körner. Die Rekristallisation in Kupfer erfordert Temperaturen über etwa 200 degC -- weit oberhalb des kryogenen Behandlungsbereichs.

Bei -196 degC ist die atomare Mobilität in Kupfer vernachlässigbar. Die Korngrenzen sind eingefroren. Einfach ausgedrückt: Die Kryogenbehandlung friert die Mikrostruktur des Leiters vollständiger ein, aber sie friert sie in derselben Orientierung ein, die sie bereits hatte. Die hemisphärische Verzerrung ist fixiert, nicht beseitigt.

Diese Erkenntnis hat wichtige Auswirkungen für die Audiokabelindustrie. Die Kryogenbehandlung bietet echte metallurgische Vorteile -- Kornverfeinerung, Spannungsabbau, RRR-Verbesserung. Aber sie behandelt nicht, und kann nicht behandeln, das Problem der hemisphärischen Verzerrung. Nur die äquatoriale Fertigung oder die Äquatorialspleißung kann wahre magnetische Neutralität erreichen.

## **5. SCHLUSSFOLGERUNG**

Die Kryogenbehandlung von Kupferleitern bewirkt Kornverfeinerung, Versetzungsdichtereduktion und RRR-Verbesserung, verändert aber den hemisphärischen Verzerrungswinkel nicht. Die beim Ziehen eingebettete Kornorientierungstextur ist bei kryogenen Temperaturen thermodynamisch stabil. Hersteller und Verbraucher sollten verstehen, dass Kryogenbehandlung und magnetische Neutralität verschiedene Aspekte der Leiterqualität betreffen und komplementäre, nicht austauschbare Prozesse sind.

## **LITERATURVERZEICHNIS**

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemisphärische Verzerrung der Kornorientierung in Kupfer," 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, "Kryogene Behandlung von Kupfer: Eine Übersicht," 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.