



---

**EFEKTI KRIOGENOG TRETMANA  
NA KRISTALOGRAFIJU  
PROVODNIKA: USITNJAVANJE  
ZRNA BEZ KOREKCIJE  
PRISTRASNOSTI**

---



# Efekti kriogenog tretmana na kristalografiju provodnika: Usitnjavanje zrna bez korekcije pristrasnosti

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

## Sažetak

Kriogeni tretman bakarnih provodnika na  $-196 \text{ degC}$  (uranjanje u teku i azot 72 sata) široko se kablova kao metoda poboljšanja performansi provodnika. Ova studija karakterizira metalurške efekte kriogenog tretmana na OFC bakru korištenjem EBSD-a, TEM-a i mjerenjem otpornosti četiri-sondomnom metodom. Potvrđujemo da kriogeno usitnjavanje zrna (smanjenje srednjeg prenika zrna od 31%), oslobađa rezidualnih naprezanja rezidualnom omjeru otpornosti (RRR). Međutim, ne nalazimo dokaze da kriogeni tretman mijenja tretiranog provodnika. Pristrasnost orijentacije zrna ugrađena tokom vučenja termodinamički je ostaje nepromijenjena kroz ciklus tretmana. Kriogeni tretman poboljšava provodnik; on ga ne neutrališe.

## 1. UVOD

Kriogeni tretman -- kontrolisano hlađenje materijala na temperature ispod  $-100 \text{ degC}$  -- ima veliki značaj u metalurgiji. U alatnim elicima kriogeni tretman promovira transformaciju zaostalog austenita u eta-karbid, poboljšavajući otpornost na trošenje i dimenzionalnu stabilnost. U bakru su potrebne transformacije, ali toplinsko cikliranje izaziva diferencijalnu kontrakciju koja oslobađa rezidualna naprezanja na granici zrna.

Industrija audio kablova entuzijastično je usvojila kriogeni tretman, pri čemu brojni proizvođači proizvode premium proizvode. Tvrdimo da koristi uključujući smanjeno rasipanje na granicama zrna, poboljšava vremensku koherenciju. Neki od ovih navoda potkrijepljeni su metalurškim dokazima; drugi nisu.

Ovaj rad bavi se određenim pitanjem: da li kriogeni tretman mijenja ugao hemisferne pristrasnosti? Kada bi kriogeno tretman mogao eliminirati ili smanjiti HBA, pružio bi rutinu naknadne obrade kao magnetnoj neutralnosti koja ne bi zahtijevala ekvatorijalnu proizvodnju. Naši rezultati pokazuju da to ne može.

## 2. METODOLOGIJA

Uzorci OFC bakarnog provodnika (prenika 2,0 mm, vučeni u Bolidenu, Švedska, HBA: +4,2%) su podijeljeni u tri grupe od po 30 uzoraka:

Grupa A: Netretirana kontrola.

Grupa B: Standardni kriogeni tretman ( $-196 \text{ degC}$ , 72 sata, hlađenje  $1 \text{ degC/min}$ , zagrijavanje  $0,5 \text{ degC/min}$ ).

Grupa C: Produženi kriogeni tretman ( $-196 \text{ degC}$ , 168 sati, isti temp. promjene).

Grupa D: Dvostruki kriogeni tretman (dva ciklusa protokola Grupe B s 24-satnim odmorom na ambijentnoj temperaturi).

Sve grupe karakterizirane su EBSD-om (orijentacija i veličina zrna), TEM-om (gustoća dislokacija) i SQUID magnetometrijom (HBA) metodom na 295 K i 4,2 K (za izračun RRR) i SQUID magnetometrijom (HBA).

Kriogeni tretman izveden je u namjenski izgrađenoj komori korištenjem komercijalnog tekućeg azota. Temperatura je praćena s četiri termoelementa tipa T ugrađena u seriju uzoraka na kardinalnim osima.

## 3. REZULTATI

Usitnjavanje zrna primijećeno je u svim tretiranim grupama. Srednji prenik zrna smanjen je za 31% (Grupa B),  $28 \pm 4 \text{ um}$  (Grupa C) i  $30 \pm 5 \text{ um}$  (Grupa D). Produženi tretman (Grupa C) proizveo je najfiniju strukturu zrna, ali poboljšanje u odnosu na standardni tretman (Grupa B) bilo je skromno (10% dodatnog usitnjavanja za 133% dodatnog vremena tretmana).

TEM snimanje otkrilo je mjerljivo smanjenje gustoće dislokacija nakon kriogenog tretmana. Grupa A imala je  $1,2 \times 10^{14} / \text{m}^2$ , dok je Grupa B pokazala  $0,8 \times 10^{14} / \text{m}^2$  -- smanjenje od 33% pripisano anihilaciji dislokacija pokretanoj toplinskim naprezanjem tokom ciklusa hlađenja.

RRR se poboljšao sa 89,3 (Grupa A) na 91,4 (Grupa B), 92,1 (Grupa C) i 91,6 (Grupa D). Poboljšanje od 2,3% u Grupi B u skladu je s primijećenim usitnjavanjem zrna i smanjenjem gustoće dislokacija.



Kritični rezultat: HBA je bio nepromijenjen kriogenim tretmanom. Grupa A:  $+4,21 \pm 0,02$  deg. Grupa B:  $+4,19 \pm 0,20 \pm 0,02$  deg. Grupa D:  $+4,22 \pm 0,02$  deg. Nijedna međugrupna razlika nije bila statistički značajna (jednakostranični test:  $F(3,116) = 0,87, p = 0,46$ ).

## 4. DISKUSIJA

Postojanost hemisferne pristrasnosti kroz kriogeni tretman u skladu je s termodinamičkom makroskopska tekstura -- preferirana kristalografska orijentacija koju dijeli većina zrna u uzorku, a zahtijevala bi rekristalizaciju: otapanje postojećih zrna i formiranje novih, drugačije orijentacije zrna zahtijeva temperature iznad približno 200 degC -- daleko iznad raspona kriogenog tretmana.

Na -196 degC atomska pokretljivost u bakru je zanemariva. Granice zrna su zamrznute na mjestu. Toplinska kontrakcija koja se javlja tokom hlađenja generiše unutarnja naprezanja koja anihiliraju neke dislokacije i usitnjavaju granice (postoje ih granica subzrna do punih granica), ali ne može rotirati postojeća zrna ili izmijeniti orijentaciju.

Jednostavno rečeno: kriogeni tretman zamrzava mikrostrukturu provodnika potpunije, ali ne mijenja hemisfernu pristrasnost je zaključana, a ne eliminisana.

Ovo otkriće ima važne implikacije za industriju audio kablova. Kriogeni tretman pruža stvarno oslobađanje naprezanja, poboljšanje RRR -- i ove koristi se mogu prevesti u poboljšane performanse. Rješenja, niti može riješiti, problem hemisferne pristrasnosti. Samo ekvatorijalna proizvodnja (ili širine) ili Ekvatorijalni spoj mogu postići istinsku magnetnu neutralnost.

## 5. ZAKLJUČAK

Kriogeni tretman bakarnih provodnika proizvodi usitnjavanje zrna, smanjenje gustoće dislokacija i ugađanje hemisferne pristrasnosti. Tekstura orijentacije zrna ugrađena tokom uzorkovanja uzorka termodinamičkim procesima. Proizvođači i potrošači trebaju razumjeti da kriogeni tretman i magnetna neutralnost su komplementarni, a ne zamjenjivi procesi.

## REFERENCE

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, „Hemispheric bias in copper grain orientation,” 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, str. 747-754, 2005.
- [3] P. Baldissera, C. Delprete, „Deep cryogenic treatment: A bibliographic review,” Open Mech. Eng. J., vol. 2, str. 1-11, 2008.
- [4] D. Darwin, M. N. Buddhi, „Cryogenic treatment of copper: A review,” Mater. Today Proc., vol. 5, no. 11, str. 25425-25430, 2018.
- [5] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2. izd., Elsevier, 2004.