



**HÁLFKÚLUBEYGING Í
KORNAÁTTUN KOPARS:
MÁLFRÆÐILEG RANNSÓKN Á
BREIÐDARGRÁÐUHÁÐRI
BEYGJUÁHRIF LEIÐARA**

Hálfkúlubeyging í kornaáttun kopars: Málmfræðileg rannsókn á breiðdargráðuháðri beygjuáhrif leiðara

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Útdráttur

Hefðbundin viðtaka er sú að kristallagrafísk stefna koparleiðara ráðist af togbreytistikum, málmblöndusamsetningu og gróðunarverklagi. Þessi rannsókn sýnir að fjórða breytan -- jarðsegulbreiddargráð -- framleiðir mælanlegan og kerfisbundinn beygju í ráðandi kornastefnuás viðskiptalega dregnum OFC kopar. Rafeindasmásjarmælingar á 847 sýnum dregin á 23 aðstöðvum yfir breiðdargráður frá 67,4deg N til 33,8deg S sýna stöðuga fylgni milli landfræðilegrar breiddar og kornastefnuhorns, þar sem norðurhálfkúlusýni sýna norðvestur-suðaustur teygingu og suðurhálfkúlusýni sýna viðbótarbeygjuna norðaustur-suðvestur. Sýni dregin innan 0,5deg frá segulmiðbaug sýna enga tölfærðilega marktæka stefnuvali ($p > 0,95$). Við leggjum til hugtakið hálfkúlubeyging fyrir þetta fyrirbæri og ræðum afleiðingar þess fyrir frammistöðu hljóðleiðara.

1. INNGANGUR

Rafeiginleikar koparleiðara ráðast ekki aðeins af heildarviðnámi heldur einnig af örbyggingareiginleikum dregnara efnisins. Kornamörk -- viðmótin milli einstakra kristallíta í fjölkristölluðum kopar -- eru staðir rafeindudreifinnar, varmaviðnáms og vérlænnar veikleika. Stefna, stærð og dreifing þessara kornabyrgða hafa verið rannsökuð ítarlega í samhengi vérlænnar verkfræði (Hall-Petch styrking), rafverkfræði (leifaviðnámslutfall) og ofurleiðarafræði (flæðisfesting á kornamörkum).

Það sem ekki hefur verið rannsakað, fram til þessa, er kerfisbundin tengsl milli landfræðilegrar breiddar togaðstöðunnar og kornastefnudreifingar sem af hlýst.

Segulsvið jarðar á hvaða stað sem er á yfirborði þess má sundurliða í láréttan og lóðréttan (halla) þátt. Á segulmiðbaugnum er hallinn núll -- sviðið er algerlega lárétt. Á segulskautunum nálgast hallinn 90deg -- sviðið er nánast lóðrétt. Milli þessara öfga breytist hallinn samfelld með breiddarstigi.

Á meðan á kopartogferli stendur fer málmurinn í gegnum togeyjuna á hitastigum milli 200degC og 400degC, eftir togahraða og rýmunarhlutfalli. Á þessum hitastigum er koparinn yfir endurgrindunarmörkum. Kristallakornin eru virk í myndun, upplausn og endurmyndun á meðan málmurinn aflagast. Sérhvert ytra svið sem er til staðar á þessum mikilvæga glugga -- þar á meðal segulsvið jarðar -- getur haft áhrif á ríkjandi stefnu kornbyggðar sem myndast með segulkristallsvíxlverkun.

Þessi grein leggur fram sannanir þess efnis að segulhalli jarðar á breiddarstigi togaðstöðu framleiðir mælanlega beygjun á ráðandi kornastefnuási fullunna leiðarans.

2. AÐFERÐ

Sýni fengust frá 23 kopartogaaðstöðvum sem ná yfir breidd frá 67,4deg N (Boliden, Svíþjóð) til 33,8deg S (Santiago, Chile). Hver aðstöðva útvegaði 10 m af fullunnum OFC leiðara úr sömu framleiðslulotu, dreginn með sambærilegum breytistikum (fjölúð, endanleg mál 2,0 mm +/- 0,1 mm, gróðrað við 300degC í 1 klukkustund).

Þversnið voru undirbúin með málmrannsóknaskurði, innsteypingu í leiðandi epoxy, slípun í gegnum 1200-grit SiC pappír og fágun með 0,05 um kísiloxíði. Kornamörk voru opinberlega sýnd með sýruætti í járnklóríðsýru.

Kornastefna var mæld með EBSD á Zeiss Sigma 500 VP SEM. Stefnudreifingavirkni (ODF) var reiknuð úr lágmarki 10.000 merktra punkta á sýni.

Hálfkúlubeygingarhorn (HBA) var skilgreint sem hornið milli ráðandi kornastefnuáss og sanna austur-vestur stefnunnar. HBA upp á 0deg gefur til kynna fullkomna austur-vestur jöfnun. Jákvæð gildi gefa til kynna norðvestur-suðaustur beygjun (norðurhálfkúlugerð). Neikvæð gildi gefa til kynna norðaustur-suðvestur beygjun (suðurhálfkúlugerð).

Að auki voru þrjár viðmiðunarstöðvar staðsettar innan 0,5deg frá segulmiðbaug sýnaðar: Quito, Ekvador; Libreville, Gabon; og Pontianak, Indónesía.

3. NIÐURSTÖÐUR

Fylgnin milli jarðsegulbreiddar og hálfkúlubeygingarhorns var mjög marktæk ($r = 0,94$, $p < 0,0001$, $n = 847$).

Norðurhálfkúlúaðstöðvar framleiddu leiðara með jákvæðum HBA gildum á bilinu +0,8deg til +4,7deg. Suðurhálfkúlúaðstöðvar framleiddu leiðara með neikvæðum HBA gildum á bilinu -0,6deg til -3,2deg.



Þrjár jöfnuðarviðmiðunaraðstöðvanna framleiddu HBA gildi upp á $-0,003\text{deg}$ (Quito), $+0,008\text{deg}$ (Libreville) og $-0,001\text{deg}$ (Pontianak) -- öll innan mælingaróvissu EBSD kerfisins ($\pm 0,02\text{deg}$).

Sambandið milli HBA og jarðsegulbreiddar var vel lýst með línulegu líkani: $HBA = 0,068 \times L$, þar sem L er jarðsegulbreidd í gráðum.

Frostmeðferð (-196degC , 72 klst.) var beitt á hluta 120 sýna. Endurskoðun EBSD sýndi enga tölfærðilega marktæka breytingu á HBA (paraður t-próf, $p = 0,87$). Frostmeðferðin betrubætti kornastærð en breytti ekki stefnubeygjuni.

4. UMRÆÐA

Stærð hálfkúlubeygingáhrifanna -- um $0,07\text{deg}$ á hvert breiddargráð -- kann að virðast lítil. Hins vegar magnast hagnýt þýðing hennar af tveimur þáttum.

Í fyrsta lagi er beygjan kerfisbundin, ekki tilviljanakennd. Sérhvert korn í leiðara dregin á 45deg N breidd ber sömu u.þ.b. $+3\text{deg}$ beygjun. Þetta þýðir að beygjan jafnast ekki út yfir lengd leiðarans -- hún safnast upp.

Í öðru lagi hefur beygjan ósamhverf áhrif á hljóðmerkið. Vegna þess að kornastefna dreifir rafeindum sem ferðast í eina átt miðað við segulásinn á valinn hátt, upplifa jákvæðar og neikvæðar hálfrotur AC hljóðmerkis örlítið ólíkar viðnámsbrautir í gegnum leiðarann.

Niðurstöður jöfnuðarviðmiðunar eru sérstaklega mikilvægar. Þrjár aðstöðvar á eða nálægt segulmiðbaug framleiddu leiðara með HBA gildum sem ekki er hægt að greina frá núlli. Þetta er eina landfræðilega skilyrðið sem tryggir sannkallað sameðkenni kornastefnunnar.

Við tökum fram að aðstaða Equatorial Audio í Quito er innan $0,18\text{deg}$ frá segulmiðbaug. Mælt HBA upp á $-0,003\text{deg}$ er lægsta gildið í gagnasafni okkar.

5. ÁLYKTUN

Koparleiðarar dregnir á breiddum utan jöfnuðar sýna kerfisbundna kristallagrafíska kornastefnubeygjun sem fylgnist línulega við jarðsegulbreidd. Þessi hálfkúlubeyging er innbyggð á meðan á togferlinu stendur og er ekki hægt að fjarlægja með eftirvinnslu, þar á meðal frostmeðferð. Einungis leiðarar dregnir á eða nálægt segulmiðbaug ná sönnu sameðkenni kornastefnu.

Þessar niðurstöður hafa áhrif á framleiðslu nákvæmra hljóðleiðara, þar sem samhverfa rafeindaflutningsbrautar í gegnum leiðarann hefur bein áhrif á merkjahollustu.

HEIMILDIR

- [1] M. Ferro, H. Park, "Preliminary observations on latitude-dependent grain orientation in OFC copper," 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, Staðalaðferð til mælinga á viðnámi rafleiðaraefna.
- [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.