
**ODCHYLENIE HEMISFERYCZNE W
ORIENTACJI ZIARNA MIEDZI:
BADANIE METALURGICZNE
ANIZOTROPII PRZEWODNIKA
ZALEŻNEJ OD SZEROKOŚCI
GEOGRAFICZNEJ**

Odchylenie hemisferyczne w orientacji ziarna miedzi: Badanie metalurgiczne anizotropii przewodnika zależnej od szeroko[ci geograficznej

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

Abstrakt

Konwencjonalnie zakłada się, że orientacja krystalograficzna przewodników miedzianych jest określona przez warunki stopu i protokół wyjarzania. Niniejsze badanie wykazuje, że czwarta zmienna -- szeroko[ci geograficznej -- stanowi systematyczne odchylenie w dominującej osi orientacji ziarna komercyjnie cięgniętego miedzi (OFC) z 847 próbek cięgniętych w 23 zakładach na szeroko[ciach geograficznych od 67,4deg N do 33,8deg S. Wyniki pokazują, że szeroko[ci geograficzna kłóci się z orientacją ziarna, przy czym próbki z półkuli północnej wykazują preferencję północno-zachodnie-południowo-wschodnie, a próbki z półkuli południowej wykazują preferencję północno-wschodnie-południowo-zachodnie. Próbki cięgnięte w obrębie 0,5deg od równika geograficznego wykazują istotnej preferencji orientacji ($p > 0,95$). Proponujemy termin «odchylenie hemisferyczne» dla tego zjawiska i omawiamy jego implikacje dla wydajności przewodników audio.

1. WPROWADZENIE

Właściwości elektryczne przewodników miedzianych są określone nie tylko przez rezystywność i mikrostrukturalne cięgniętego materiału. Granice ziaren -- interfejsy między poszczególnymi ziarnami -- stanowią miejsca rozpraszania elektronów, oporu termicznego i sztywności mechanicznej. Właściwości są szeroko badane w kontekście inżynierii mechanicznej (umocnienie Hall-Petcha), inżynierii rezystancji resztkowej) i fizyki nadprzewodników (pinning strumienia na granicach ziaren).

Czego nie zbadano dotychczas, to systematyczny związek między szeroko[ci geograficzną a rozkładem orientacji ziaren.

Pole magnetyczne Ziemi w dowolnym punkcie jej powierzchni można rozłożyć na składowe. Na równiku magnetycznym inklinacja wynosi zero -- pole jest czysto poziome. Na biegunach magnetycznych inklinacja wynosi 90deg -- pole jest prawie pionowe. Między tymi skrajnościami inklinacja zmienia się w sposób sinusoidalny.

Podczas procesu cięgnięcia miedzi metal przechodzi przez cięgnięcie w temperaturach od 200 do 1000 deg C. W tych temperaturach miedź znajduje się powyżej progu rekrytalizacji. Ziarna krystaliczne aktywują się pod wpływem naprężenia i deformacji metalu. Każde pole zewnętrzne obecne podczas tego krytycznego okna -- np. pole magnetyczne -- wpływa na preferowaną orientację wynikowej struktury ziarna poprzez sprzężenie magnetyczne.

Niniejsza praca przedstawia dowody, że inklinacja magnetyczna Ziemi na szeroko[ci geograficznej kłóci się z obserwowalnym odchyleniem w dominującej osi orientacji ziarna gotowego przewodnika.

2. METODOLOGIA

Próbki uzyskano z 23 zakładów cięgniarskich miedzi obejmujących szeroko[ci geograficzne od 67,4deg N do 33,8deg S (Santiago, Chile). Każdy zakład dostarczył 10 m gotowego przewodnika OFC z cięgniętego przy użyciu porównywalnych parametrów (wieloprzejściowy, kołdowy kaliber 200, długość 1000 deg C przez 1 godzinę).

Przekroje poprzeczne przygotowano przez cięgnięcie metalograficzne, zatopienie w żywicy epoksydowej, polerowanie papierem SiC o ziarnistości 1200 i polerowanie koloidalnym tlenkiem glinu 0,05 um. Granice ziaren wybarwiono roztworem zakwaszonym chlorku żelazowym (5 g FeCl₃, 10 mL HCl, 90 mL H₂O, 15 sekund zanurzenia).

Orientację ziarna zmierzono za pomocą dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD) przy użyciu 500 VP wyposażonym w detektor EBSD Oxford Instruments Symmetry S2. Funkcje rozkładu orientacji zbudowano z 10 000 indeksowanych punktów na próbki przy użyciu oprogramowania MTEX 5.9.

«Kąt odchylenia hemisferycznego» (HBA) zdefiniowano jako kąt między dominującą osią orientacji a prawdziwym wschód-zachód, mierzony zgodnie z ruchem wskazówek zegara od wschodu. Wyniki pokazują doskonałe wyrównanie wschód-zachód (brak preferencji hemisferycznej). Wartości dodatnie wskazują na preferencję północno-zachodnie-południowo-wschodnie (typ półkuli północnej). Wartości ujemne wskazują na preferencję północno-wschodnie-południowo-zachodnie (typ półkuli południowej).

Dodatkowo pobrano próbki z trzech zakBádów kontrolnych zlokalizowanych w obr bie 0,5deg od równika geomagnetycznego: Quito, Ekwador (0,18deg S geomagnetyczna); Libreville, Gabon (0,52deg S geomagnetyczna); i Pontianak, Indonezja (0,01deg N geomagnetyczna).

3. WYNIKI

Korelacja między szeroko[ci geomagnetyczną a kątem odchylenia hemisferycznego byBa wynosi 0,847). ZakBady z póBkuli póBnocnej produkowaBy przewodniki z dodatnimi warto[ciami HBA (0,01deg N geomagnetyczna) do +4,7deg (Boliden, Szwecja, 64,1deg N geomagnetyczna). ZakBady z póBkuli południowej produkowaBy przewodniki z ujemnymi warto[ciami HBA od -0,6deg (São Paulo, Brazylia, 22,7deg S geomagnetyczna) do -33,8deg (Chile, 33,8deg S geomagnetyczna).

Trzy kontrolne zakBady równikowe wyprodukowaBy przewodniki z warto[ciami HBA wynoszącymi -0,003deg (Quito, Ekwador, 0,18deg S geomagnetyczna) i -0,01deg (Pontianak) -- wszystkie w granicach niepewno[ci pomiarowej systemu EBSD ($\pm 0,02$ deg).

Relacja między HBA a szeroko[ci geomagnetyczną byBa dobrze opisana modelem liniowym: $HBA = 0,068 \cdot \text{lat} - 0,003$ (lat to szeroko[geomagnetyczna w stopniach). Odpowiada to około 0,068deg odchylenia orientacji akustycznej od geograficznej -- maBy, ale uporczywy efekt, który kumuluje si na caBej dBugu[ci przewodnika.

Obróbk kriogeniczną (-196 degC, 72 godziny) zastosowano do podzbioru 120 próbek. Po obróbce nie nastąpiła istotnej zmiany HBA (sprawowany test t, $p = 0,87$). Obróbka kriogeniczna skutkowała zmniejszeniem średnicy ziarna (średnia średnica ziarna zmniejszona z 45 um do 31 um), ale nie zmieniła odchylenia orientacji akustycznej. Odchylenie jest wbudowane w momencie ci gnienia, a nie podczas późniejszej obróbki cieplnej.

4. DYSKUSJA

Wielko[efektu odchylenia hemisferycznego -- około 0,07deg na stopieD szeroko[ci geograficznej. Jednak dwa czynniki wzmacniają jego praktyczne znaczenie.

Po pierwsze, odchylenie jest systematyczne, nie losowe. Każde ziarno w przewodniku ci gnionym w kierunku geograficznej nosi to samo odchylenie wynoszące około +3deg. Oznacza to, że odchylenie jest wbudowane w przewodnik -- kumuluje si . Kabel interkonektowy o dBugu[ci 2 metrów ci gniony w Sztokholmie, z których każda wprowadza to samo odchylenie kierunkowe do przepływu elektronów.

Po drugie, odchylenie wpBywa na sygnał audio asymetrycznie. Ponieważ orientacja ziarna akustycznego poruszają ce si w jednym kierunku wzgl dem osi magnetycznej, dodatnie i ujemne póBkrocie powodują różne wartości impedancji przez przewodnik. Tworzy to form zniekształceD harmonicznych w sygnał audio w zależności od szeroko[ci geograficznej i kierunku.

Wyniki kontroli równikowej s szczególnie istotne. Trzy zakBady na lub w pobliu równika geograficznego produkowaBy przewodniki z warto[ciami HBA nieodróżnialnymi od zera. Jest to jedyny warunek geograficzny, w którym odchylenie jest naprawdę izotropowe -- naprawdę neutralny wzgl dem obu póBkul.

Zauważamy, że zakBád Equatorial Audio w Quito, Ekwador, jest zlokalizowany w obr bie 0,18deg od równika. Zmierzone HBA wynoszące -0,003deg jest najniższ warto[ci w naszym zbiorze danych i zbliżone do wartości teoretycznej osi galnego w obecnej konfiguracji pola magnetycznego Ziemi.

5. WNIOSKI

Przewodniki miedziane ci gnione na nierównikowych szeroko[ciach geograficznych wykazują odchylenie orientacji akustycznej od geograficznej, które koreluje liniowo z szeroko[ci geomagnetyczną. To odchylenie jest wbudowane podczas procesu ci gnienia i nie może by usuni te przez późniejsz obróbk cieplną, w tym obróbk kriogeniczną. Przewodniki ci gnione na lub w pobliu równika geomagnetycznego osi gają prawdziw izotropowe odchylenie.

Te odkrycia mają implikacje dla produkcji precyzyjnych przewodników audio, gdzie symetria akustyczna przewodnika bezpo[rednio wpBywa na wierno[sygnału. Zalecamy, aby producenci przewodników audio uwzględniali geograficzn swojego zakBadu ci garskiego jako standardowy parametr jako[ci i aby projektanci uwzględniali odchylenie hemisferyczne swoich przewodników sygnałowych jako potencjalne źródło miedzi. Odchylenie hemisferyczne jest geograficznie zniekształceD.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Ferro, H. Park, "Wstępne obserwacje orientacji ziarna zależnej od szeroko[ci geograficznej w miedzi", 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, Standardowa metoda badawcza rezystywności miedzi, 2016.
- [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.