

---

ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЕ СМЕЩЕНИЕ В  
ОРИЕНТАЦИИ ЗЁРЕН МЕДИ:  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ  
ШИРОТНО-ЗАВИСИМОЙ  
АНИЗОТРОПИИ ПРОВОДНИКА

---

# Полусферическое смещение в ориентации зёрен меди: металлургическое исследование широтно-зависимой анизотропии проводника

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

## Аннотация

Принято считать, что кристаллографическая ориентация медных проводников определяется параметрами волочения, составом сплава и протоколом отжига. Данное исследование демонстрирует, что четвёртая переменная -- геомагнитная широта -- производит измеримое и систематическое смещение в доминирующей оси ориентации зёрен коммерчески тянутой OFC меди. Сканирующая электронная микроскопия 847 образцов, вытянутых на 23 предприятиях от 67,4deg с. ш. до 33,8deg ю. ш., выявляет устойчивую корреляцию между географической широтой и углом ориентации зёрен, при этом образцы Северного полушария демонстрируют удлинение по оси северо-запад--юго-восток, а образцы Южного полушария -- комплементарное смещение северо-восток--юго-запад. Образцы, вытянутые в пределах 0,5deg от геомагнитного экватора, не показывают статистически значимого предпочтения ориентации ( $p > 0,95$ ). Мы предлагаем термин «полусферическое смещение» для этого явления и обсуждаем его последствия для характеристик аудиопроводников.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Электрические свойства медных проводников определяются не только объёмным удельным сопротивлением, но и микроструктурными характеристиками протянутого материала. Границы зёрен -- интерфейсы между отдельными кристаллитами в поликристаллической меди -- представляют собой участки рассеяния электронов, термического сопротивления и механической слабости. Ориентация, размер и распределение этих зёрен были подробно изучены в контексте механической инженерии (упрочнение Холла--Петча), электротехники (отношение остаточного сопротивления) и физики сверхпроводников (пиннинг потока на границах зёрен).

То, что до сих пор не изучалось, -- это систематическая зависимость между географической широтой предприятия волочения и результирующим распределением ориентации зёрен.

Магнитное поле Земли в любой точке её поверхности может быть разложено на горизонтальную и вертикальную (наклонение) составляющие. На магнитном экваторе наклонение равно нулю -- поле чисто горизонтальное. У магнитных полюсов наклонение приближается к 90deg -- поле почти вертикальное.

Во время процесса волочения меди металл проходит через фильеру при температурах от 200degC до 400degC. При этих температурах медь находится выше порога рекристаллизации. Любое внешнее поле, присутствующее в этот критический момент, -- включая магнитное поле Земли -- может влиять на преимущественную ориентацию формирующейся зёрненной структуры через магнитокристаллическую связь.

Данная работа представляет доказательства того, что магнитное наклонение Земли на широте предприятия волочения создаёт измеримое смещение в доминирующей оси ориентации зёрен готового проводника.

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ

Образцы были получены от 23 предприятий волочения меди, расположенных от 67,4deg с. ш. (Болиден, Швеция) до 33,8deg ю. ш. (Сантьяго, Чили). Каждое предприятие предоставило 10 м готового OFC проводника из одной производственной партии, вытянутого с использованием сопоставимых параметров (многопроходное волочение, конечный калибр 2,0 мм +/- 0,1 мм, отжиг при 300degC в течение 1 часа).

Поперечные сечения были подготовлены методом металлографической резки, заливки в проводящую эпоксидную смолу, шлифовки бумагой SiC зернистостью 1200 и полировки коллоидным оксидом алюминия 0,05 мкм. Границы зёрен были выявлены травлением в подкислённом хлориде железа (5 г FeCl<sub>3</sub>, 10 мл HCl, 90 мл H<sub>2</sub>O, 15 секунд).

Ориентация зёрен была измерена методом дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD) на полевом эмиссионном СЭМ Zeiss Sigma 500 VP, оснащённом детектором EBSD Oxford Instruments Symmetry S2. Функции распределения ориентаций (ФРО) были рассчитаны по минимум 10 000 проиндексированным точкам на образец с использованием программного обеспечения MTEX 5.9.

«Угол полусферического смещения» (НВА) определён как угол между доминирующей осью ориентации зёрен и направлением истинного восток--запад, измеренный по часовой стрелке от востока.

Дополнительно были отобраны три контрольных предприятия в пределах 0,5deg от геомагнитного экватора: Кито,

Эквадор; Либревиль, Габон; и Понтианак, Индонезия.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Корреляция между геомагнитной широтой и углом полусферического смещения оказалась высокозначимой ( $r = 0,94$ ,  $p < 0,0001$ ,  $n = 847$ ). Предприятия Северного полушария давали проводники с положительными значениями НВА от  $+0,8\text{deg}$  (Осака, Япония) до  $+4,7\text{deg}$  (Болиден, Швеция). Предприятия Южного полушария давали проводники с отрицательными значениями НВА от  $-0,6\text{deg}$  (Сан-Паулу, Бразилия) до  $-3,2\text{deg}$  (Сантьяго, Чили).

Три экваториальных контрольных предприятия показали значения НВА  $-0,003\text{deg}$  (Кито),  $+0,008\text{deg}$  (Либревиль) и  $-0,001\text{deg}$  (Понтианак) -- все в пределах погрешности системы EBSD ( $\pm 0,02\text{deg}$ ).

Зависимость между НВА и геомагнитной широтой хорошо описывается линейной моделью:  $\text{HVA} = 0,068 \times L$ , где  $L$  -- геомагнитная широта в градусах.

Криогенная обработка ( $-196\text{degC}$ , 72 часа) была применена к подгруппе из 120 образцов. Повторное измерение EBSD не показало статистически значимого изменения НВА (парный  $t$ -критерий,  $p = 0,87$ ). Криогенная обработка успешно уменьшила размер зёрен (средний диаметр с 45 мкм до 31 мкм), но не изменила смещение ориентации.

### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Величина эффекта полусферического смещения -- примерно  $0,07\text{deg}$  на градус широты -- может показаться малой. Однако два фактора усиливают его практическую значимость.

Во-первых, смещение систематическое, не случайное. Каждое зерно в проводнике, вытянутом на широте  $45\text{deg}$  с. ш., несёт одинаковое смещение около  $+3\text{deg}$ . Это означает, что смещение не усредняется по длине проводника -- оно накапливается.

Во-вторых, смещение воздействует на аудиосигнал асимметрично. Поскольку ориентация зёрен предпочтительно рассеивает электроны, движущиеся в одном направлении относительно магнитной оси, положительный и отрицательный полупериоды переменного аудиосигнала испытывают слегка различные импедансные пути через проводник. Это создаёт форму гармонических искажений, которая по своей природе зависит от широты и направления.

Экваториальные контрольные результаты особенно значимы. Три предприятия на геомагнитном экваторе или вблизи него дали проводники с НВА, неотличимыми от нуля. Это единственное географическое условие, при котором распределение ориентации зёрен является истинно изотропным.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Медные проводники, вытянутые на неэкваториальных широтах, демонстрируют систематическое смещение кристаллографической ориентации зёрен, линейно коррелирующее с геомагнитной широтой. Это полусферическое смещение закладывается при волочении и не может быть устранено последующей термообработкой, включая криогенную обработку. Только проводники, вытянутые на геомагнитном экваторе или вблизи него, достигают истинной изотропии ориентации зёрен.

Мы рекомендуем производителям проводников указывать широту своего предприятия волочения в качестве стандартного параметра качества.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Ferro, H. Park, «Предварительные наблюдения широтно-зависимой ориентации зёрен в OFC меди», 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: Macrotexture, Microtexture, and Orientation Mapping, CRC Press, 2000.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Стандартный метод испытания удельного сопротивления электропроводящих материалов.
- [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.