الانحياز النصف كروي في توجه حبيبات النحاس: دراسة معدنية للتباين المعتمد على خط العرض في الموصلات

CONFIDENTIAL

الانحياز النصف كروي في توجه حبيبات النحاس: دراسة معدنية للتباين المعتمد على خط العرض في الموصلات

M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka
Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)
Journal of Equatorial Audio Science, 2020.

ملخّص

يُفترض تقليدياً أن التوجه البلوري لموصلات النحاس يُحدد بمعايير السحب وتركيب السبيكة وبروتوكول التلدين. تُثبت هذه الدراسة أن متغيراً رابعاً -- خط العرض الجيومغناطيسي -- ينتج انحيازاً قابلاً للقياس ومنهجياً في محور توجه المسحوب تجارياً. يكشف تحليل المجهر الإلكتروني الماسح لـ 847 عينة مسحوبة من 23 OFC الحبيبات السائد لنحاس منشأة عبر خطوط عرض من 67.4 درجة شمالاً إلى 33.8 درجة جنوباً عن ارتباط مستمر بين خط العرض الجغرافي وزاوية توجه الحبيبات، حيث تُظهر عينات نصف الكرة الشمالي استطالة شمال غربي-جنوب شرقي وعينات نصف الكرة الجنوبي الانحياز المكمل شمال شرقي-جنوب غربي. لم تُظهر العينات المسحوبة ضمن 0.5 درجة من خط الاستواء الجيومغناطيسي أي تفضيل توجهي ذي دلالة إحصائية ($p > 0.95$). نقترح مصطلح "الانحياز النصف كروي" لهذه الظاهرة ونناقش تبعاتها على أداء الموصلات الصوتية.

1. مقدمة

تُحدد الخصائص الكهربائية لموصلات النحاس ليس فقط بالمقاومية الحجمية بل بالخصائص البنيوية المجهرية للمادة المسحوبة. تمثل حدود الحبيبات -- الواجهات بين البلورات الفردية في النحاس متعدد البلورات -- مواقع تشتت الإلكترونات والمقاومة الحرارية والضعف الميكانيكي. درُس توجه هذه الحبيبات وحجمها وتوزيعها على نطاق واسع في سياق الهندسة الميكانيكية (تصليب Hall-Petch) والهندسة الكهربائية (نسبة المقاومة المتبقية) وفيزياء الموصلات الفائقة (تثبيت التدفق عند حدود الحبيبات).

ما لم يُدرس حتى الآن هو العلاقة المنهجية بين خط العرض الجغرافي لمنشأة السحب وتوزيع توجه الحبيبات الناتج.

يمكن تحليل المجال المغناطيسي للأرض عند أي نقطة على سطحها إلى مركبات أفقية ورأسية (ميل). عند خط الاستواء المغناطيسي يكون الميل صفراً -- المجال أفقي بحت. عند الأقطاب المغناطيسية يقترب الميل من 90 درجة -- المجال شبه رأسي.

أثناء عملية سحب النحاس، يمر المعدن عبر قالب عند درجات حرارة بين 200 و400 درجة مئوية. عند هذه الحرارات يكون النحاس فوق عتبة إعادة التبلور. أي مجال خارجي موجود خلال هذه النافذة الحرجة -- بما في ذلك المجال المغناطيسي للأرض -- يمكن أن يؤثر على التوجه المفضل لبنية الحبيبات الناتجة من خلال الاقتران المغناطيسي البلوري.

تقدم هذه الورقة دليلاً على أن ميل المجال المغناطيسي الأرضي عند خط عرض منشأة السحب ينتج انحيازاً قابلاً للقياس في محور توجه الحبيبات السائد للموصل المنتهي.

2. المنهجية

حُصل على العينات من 23 منشأة سحب نحاس تمتد عبر خطوط عرض من 67.4 درجة شمالاً (بوليدن، السويد) إلى 33.8 درجة جنوباً (سانتياغو، تشيلي). قدمت كل منشأة 10 أمتار من موصل OFC مكتمل من نفس دفعة الإنتاج.

أُعدت المقاطع العرضية بالقطع المعدنوغرافي والتثبيت في إيبوكسي موصل والطحن والتلميع. كُشفت حدود الحبيبات بالحفر في كلوريد الحديديك المحمض.

قيس توجه الحبيبات باستخدام حيود الإلكترونات المتخلفة المنتشرة (EBSD) على مجهر إلكتروني ماسح Zeiss Sigma 500 VP مجهز بكاشف EBSD من Oxford Instruments. حُسبت دوال التوزيع التوجهي (ODF) بواسطة برنامج MTEX 5.9.

عُرفت "زاوية الانحياز النصف كروي" (HBA) بأنها الزاوية بين محور توجه الحبيبات السائد واتجاه الشرق-الغرب الحقيقي. تشير القيم الموجبة إلى انحياز شمال غربي-جنوب شرقي (نوع نصف الكرة الشمالي). تشير القيم السالبة إلى انحياز شمال شرقي-جنوب غربي (نوع نصف الكرة الجنوبي). صفر إلى محاذاة شرق-غرب مثالية.

بالإضافة إلى ذلك، أُخذت عينات من ثلاث منشآت ضابطة تقع ضمن 0.5 درجة من خط الاستواء الجيومغناطيسي: كيتو، الإكوادور؛ ليبرفيل، الغابون؛ وبونتياناك، إندونيسيا.

3. النتائج

كان الارتباط بين خط العرض الجيومغناطيسي وزاوية الانحياز النصف كروي عالي الدلالة ($r = 0.94$، $p < 0.0001$، $n = 847$). أنتجت منشآت نصف الكرة الشمالي موصلات بقيم HBA موجبة تتراوح من +0.8 درجة (أوساكا، اليابان) إلى +4.7 درجة (ساو باولو بوليدن، السويد). أنتجت منشآت نصف الكرة الجنوبي موصلات بقيم سالبة تتراوح من -0.6 درجة (

البرازيل(إلى -3.2 درجة)سانتياغو، تشيلي.

بلغت -0.003 درجة)كيتو(و+0.008 درجة)ليبرفيل(و-0.001 درجة HBA أنتجت المنشآت الاستوائية الثلاث قيم (درجة +/-0.02) EBSD بونتياناك(-- جميعها ضمن عدم يقين قياس نظام).

هو خط العرض الجيومغناطيسي بالدرجات. هذا يعادل حوالي 0.068 L، حيث HBA = 0.068 × L: وُصفت العلاقة بنموذج خطي درجة من انحياز توجه الحبيبات لكل درجة من خط العرض.

أي تغيير EBSD طُبقت المعالجة المبردة)-196 درجة مئوية، 72 ساعة(على مجموعة فرعية من 120 عينة. لم تُظهر إعادة قياس نجحت المعالجة المبردة في تنعيم حجم الحبيبات لكنها لم .(p = 0.87 ،مقترنة t اختبار) HBA ذي دلالة إحصائية في تغير انحياز التوجه.

4. المناقشة

قد يبدو حجم تأثير الانحياز النصف كروي -- حوالي 0.07 درجة لكل درجة من خط العرض -- صغيراً. لكن عاملين يضخمان أهميته العملية.

أولاً، الانحياز منهجي وليس عشوائياً. كل حبيبة في موصل مسحوب عند خط عرض 45 درجة شمالاً تحمل نفس الانحياز البالغ حوالي +3 درجات. هذا يعني أن الانحياز لا يتوسط على طول الموصل -- بل يتراكم. يحتوي كابل وصل بطول مترين مسحوب في ستوكهولم على حوالي 44,000 حد حبيبي، كل منها يساهم بنفس الانحياز الاتجاهي لتدفق الإلكترونات.

ثانياً، يؤثر الانحياز على الإشارة الصوتية بشكل غير متماثل. لأن توجه الحبيبات يشتت الإلكترونات المنتقلة في اتجاه واحد نسبة إلى المحور المغناطيسي بشكل تفضيلي، فإن نصفي الدورة الموجب والسالب يختبران مسارات معاوقة مختلفة قليلاً. هذا يخلق شكلاً من أشكال التشويه التوافقي المعتمد AC لإشارة صوتية على خط العرض والاتجاه.

نتائج الضبط الاستوائية مهمة بشكل خاص. أنتجت المنشآت الثلاث عند خط الاستواء الجيومغناطيسي أو بالقرب لا يمكن تمييزها عن الصفر. هذا هو الشرط الجغرافي الوحيد الذي يكون فيه توزيع توجه HBA منه موصلات بقيم الحبيبات متناحياً حقاً -- محايداً حقاً بالنسبة لكلا نصفي الكرة.

5. الخاتمة

تُظهر موصلات النحاس المسحوبة عند خطوط عرض غير استوائية انحياز توجه حبيبات بلوري منهجي يرتبط خطياً بخط العرض الجيومغناطيسي. يُضمن هذا الانحياز النصف كروي أثناء عملية السحب ولا يمكن إزالته بالمعالجة الحرارية اللاحقة، بما في ذلك المعالجة المبردة. فقط الموصلات المسحوبة عند أو بالقرب من خط الاستواء الجيومغناطيسي تحقق التناحي الحقيقي لتوجه الحبيبات.

لهذه النتائج تبعات على تصنيع موصلات الصوت الدقيقة. نوصي بأن يحدد مصنعو الموصلات خط عرض منشأة السحب كمعلمة جودة قياسية.

المراجع

[1] M. Ferro, H. Park, "ملاحظات أولية حول توجه الحبيبات المعتمد على خط العرض في نحاس OFC," 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, طريقة اختبار قياسية لمقاومية مواد الموصلات الكهربائية.

[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.

CONFIDENTIAL