

مروری بر روش های تولید فویل مس و بررسی برخی از خواص متالورژیکی

امین عادل شهبازی

دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مواد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

حمیدرضا شاهوردی

استاد، بخش مواد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

علی اکبر متحدی

مربی، پژوهشکده مواد پیشرفته و انرژی های نو، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران

چکیده

فویل مس یکی از محصولات است که در صنایع الکترونیک، صنایع برودت حرارتی، باتری ها و غیره مورد استفاده قرار می گیرد. فویل مس به دو روش نورد و الکترورسوبی تولید می شود. در روش نورد ماده اولیه تحت کار سرد و تغییر شکل پلاستیک قرار می گیرد و فویل مس نهایی تولید می شود. این روش ساده، متداول و دارای پیچیدگی های کم است؛ ولی راندمان کمی دارد و خواص محصول نهایی ناهمسان گرد است. در این روش با افزایش کار سرد، چگالی نابجایی ها افزایش یافته و خواص الکتریکی تضعیف می شود. فرایند نورد نیاز به عملیات حرارتی و همچنین عملیات نهایی دارد. اندازه دانه در فویل های نورد شده با رسانایی الکتریکی رابطه دارند. به این صورت که با درشت شدن دانه و کاهش مرزدانه رسانایی الکتریکی کاهش می یابد. فویل های تولید شده به روش الکترورسوبی فاقد ساختار انجمادی هستند؛ چراکه این فویل ها از رسوب یون های مس بر روی سطح درام تیتانیومی تشکیل می شوند. به دلیل ماهیت روش الکترورسوبی، یک ساختار همگن و هم محور تشکیل می شود. به دلیل وجود دانه بندی هم محور در فویل های الکترورسوبی، انعطاف پذیری و ازدیاد طول بیشتر از فویل های نورد شده است. در فویل تولید شده به روش الکترورسوبی خواص مکانیکی و الکتریکی همگن و همسانگرد هستند. روش الکترورسوبی روش پیچیده تری است و پارامترهایی همچون چگالی جریان، غلظت الکترولیت، دمای الکترولیت، اختلاف پتانسیل اعمال شده، سرعت چرخش درام، جنس کاتد و آنود و... تأثیرگذار هستند. پارامترهای مختلف در روش الکترورسوبی موجب تغییر در اندازه و شکل ذرات مس می شوند و تغییر در شکل و اندازه ذرات ارتباط مستقیم با خواص مکانیکی و الکتریکی دارد.

واژگان کلیدی: فویل مس، نورد فویل، فرایند الکترورسوبی، ریزساختار، خواص مکانیکی

۱- مقدمه

فویل‌های مسی که مورد توجه این مطالعه هستند به دلیل رسانایی الکتریکی خوبی که دارند در صنایع الکترونیک و به‌خصوص در تولید مدارهای الکترونیکی^۱، باتری‌های لیتیوم یونی و... کاربرد دارند. امروزه توجه و سرمایه‌گذاری زیادی معطوف به استفاده از انرژی‌های پاک می‌شود. یکی از موادی که نقش پررنگی در صنعت باتری‌ها و وسایل الکترونیکی دارد، مس است. امروزه مسئله کاهش وزن و ابعاد و به دنبال آن افزایش راندمان یکی از زمینه‌های مهم تحقیقاتی است. رسانایی الکتریکی برخی فلزات در جدول ۱ آورده شده است. مطابق با این جدول نقره در بین فلزات بهترین رسانایی الکتریکی را دارد و پس از آن مس. باتوجه به قیمت، استفاده از مس برای تجهیزات الکترونیکی بسیار مطلوب است.

جدول ۱- رسانایی الکتریکی برخی فلزات

Metals	Conductivity ($S m^{-1}$)
Silver	6.3×10^7
Copper	5.9×10^7
Gold	4.5×10^7
Aluminium	3.8×10^7
Cobalt	1.6×10^7
Brass	1.6×10^7
Nickel	1.4×10^7

۱-۱- تعریف فویل

به ورق‌هایی (ورق: مقطعی که نسبت عرض به ضخامت آن بی‌نهایت در نظر گرفته شود) که ضخامت آن‌ها کمتر از ۱۰۰ میکرومتر باشد، فویل می‌گویند. البته در مراجع و مقالات مختلف این محدوده متفاوت در نظر گرفته شده است. در این مطالعه منظور از فویل، فویل‌های فلزی هستند (N. A. Fleck & K. L. Johnson, 1992).

۲- روش‌های تولید فویل مس

تولید فویل مس شامل دو روش می‌شود: روش مکانیکی و روش الکتروشیمیایی. روش مکانیکی اشاره به فرایند نورد دارد و روش الکتروشیمیایی اشاره به فرایند الکتروسوپی^۲ (Electro Deposition) دارد. هر کدام از این روش‌ها مزیت‌ها و محدودیت‌های مخصوص به خود دارند. همچنین این روش‌ها از لحاظ قیمت تمام‌شده نیز متفاوت هستند (X.-Q. Yin et al, 2016).

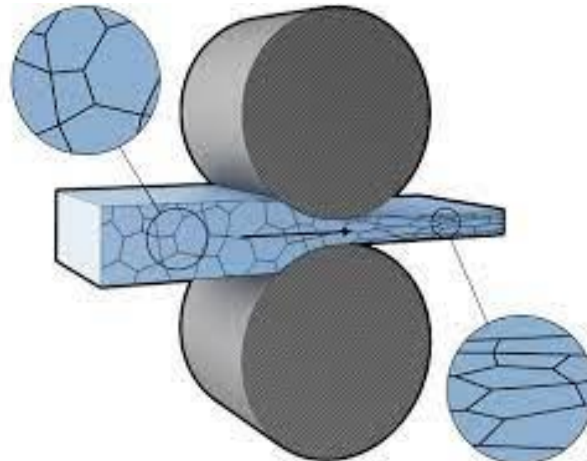
۲-۱- روش مکانیکی

یکی از روش‌های مرسوم و متداول برای کاهش ضخامت در مواد فلزی، نورد است. در فرایند نورد، قطعه مورد نظر از بین دو غلتک عبور داده شده و ضخامت کاهش می‌یابد. فرایند نورد به دلیل شرایط تنشی فشاری و کرنش صفحه‌ای که ایجاد می‌کند، یکی از روش‌های مؤثر و محبوب در کاهش ضخامت است. مانند دیگر روش‌های تغییر شکل پلاستیک، این روش هم منجر به تغییر در ریزساختار و ذخیره انرژی مکانیکی در ماده

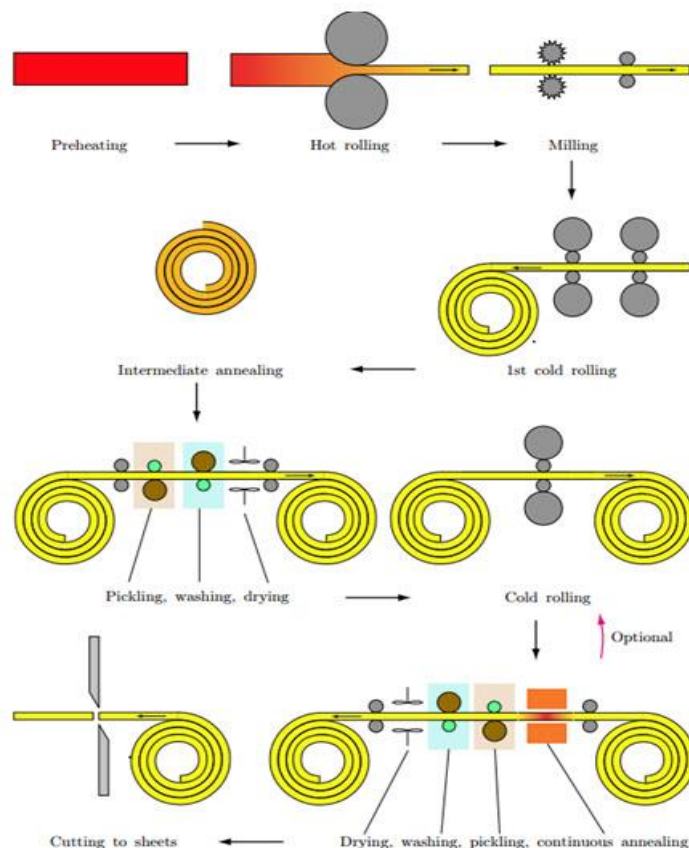
¹ Printed Circuit Boards (PCB)

² Electro Deposition

می‌شود. مخصوصاً در فرایند نورد با بافت سطحی روبرو هستیم به این صورت که دانه‌ها مطابق با شکل ۱ در جهت نورد شکسته و کشیده می‌شوند. در این بخش خواص مکانیکی، ریزساختار، تحولات شبکه و نابجایی‌ها و پارامترهای فرایندی نورد بررسی می‌شود. در این روش یک ورق مسی تحت عملیات نورد قرار می‌گیرد. طی چند مرحله ضخامت ورق کاهش می‌یابد تا درنهایت به ضخامت موردنظر دست پیدا کنیم. طرح‌واره فرایند مطابق شکل ۲ است (M. Song & X. Liu, 2017).



شکل ۱ تغییر شکل دانه‌ها در جهت نورد



شکل ۲- طرح‌واره فرایند نورد برای تولید فویل مس

غالباً نورد سرد برای تولید فویل مس استفاده می شود. شکل دهی و نورد ورق مسی با محدودیت زیادی مواجه نیست؛ چراکه مس جز فلزات با شبکه مکعبی مرکز وجوه پر^۱ (FCC) است و به واسطه سیستم های لغزشی بیشتر، قابلیت شکل پذیری مناسبی دارد. خواص مکانیکی مس در جدول ۲ قابل مشاهده است (G. Simons, 2004).

جدول ۲- خواص مکانیکی مس خالص

Properties	Metric
Tensile strength	170 MPa
Yield strength	83.0 MPa
Elongation at break (in 50 mm)	12%

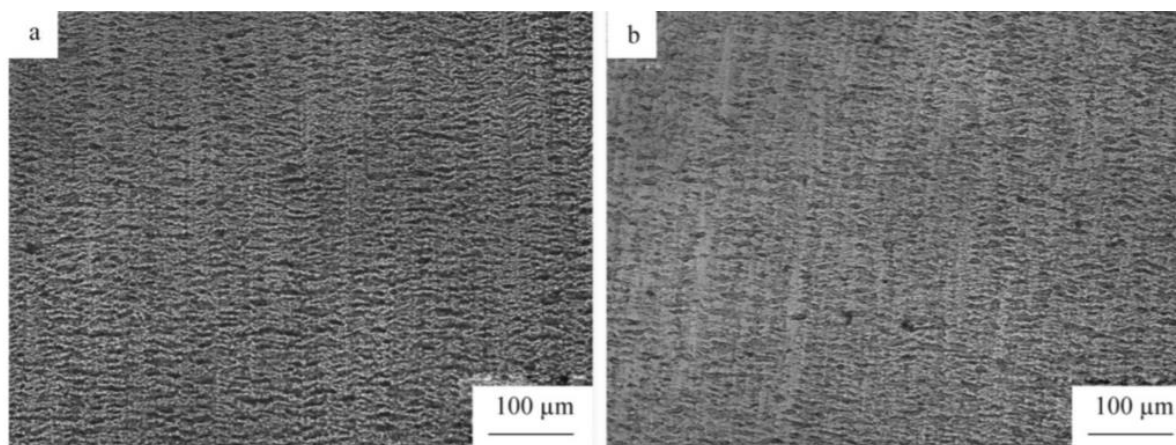
۱-۲- خواص مکانیکی و ریزساختار فویل های تولید شده به روش نورد

فویل های تولید شده به روش نورد جز مواد کار سرد شده دسته بندی می شوند. این فویل ها دارای انرژی داخلی بالاتر، خواص مکانیکی بهتر و بافت سطحی هستند. در جدول ۳ خواص مکانیکی برای دو محصول نورد شده متفاوت آورده شده است (X.-Q. Yin et al, 2016).

جدول ۳- خواص مکانیکی فویل های تولید شده به روش نورد.

Materials	Fracture strength/MPa	Elongation to fracture/%	Hydrophilicity (static contact angle)/(°)
JAN-R	318	0.5	103
CHN-R	463	0.5	110

همچنین ریزساختار این فویل ها با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی شده است و مطابق شکل ۳ است.

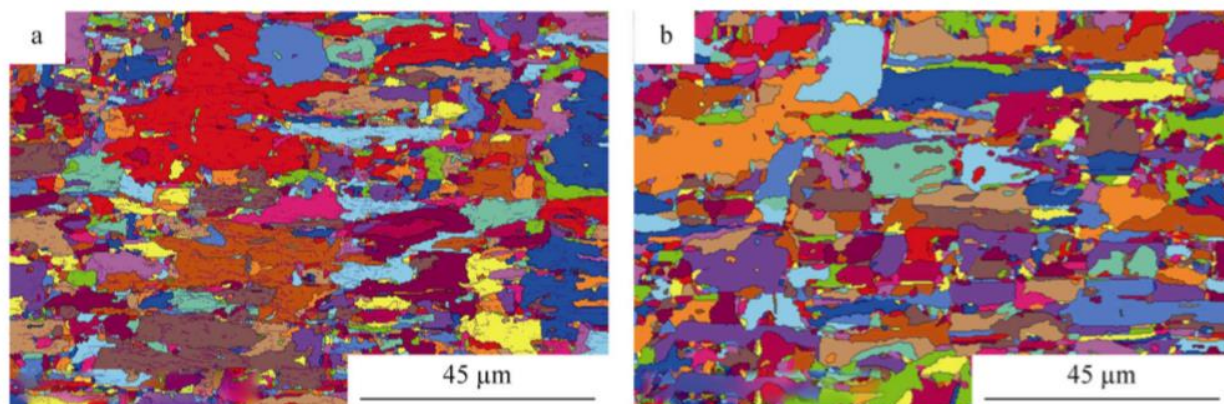


شکل ۳- دو نمونه از سطح فویل تولید شده به روش نورد

در شکل ۳ به وضوح بافت سطحی قابل مشاهده است. همان طور که انتظار می رود، خواص مکانیکی در این فویل ها غیر همسانگرد است. به بیان دیگر خواص مکانیکی در جهت های مختلف، متفاوت است. به دلیل اعمال کار سرد بر این فویل ها، استحکام کششی بهبود یافته است ولی به دلیل

¹ Face-centered cubic

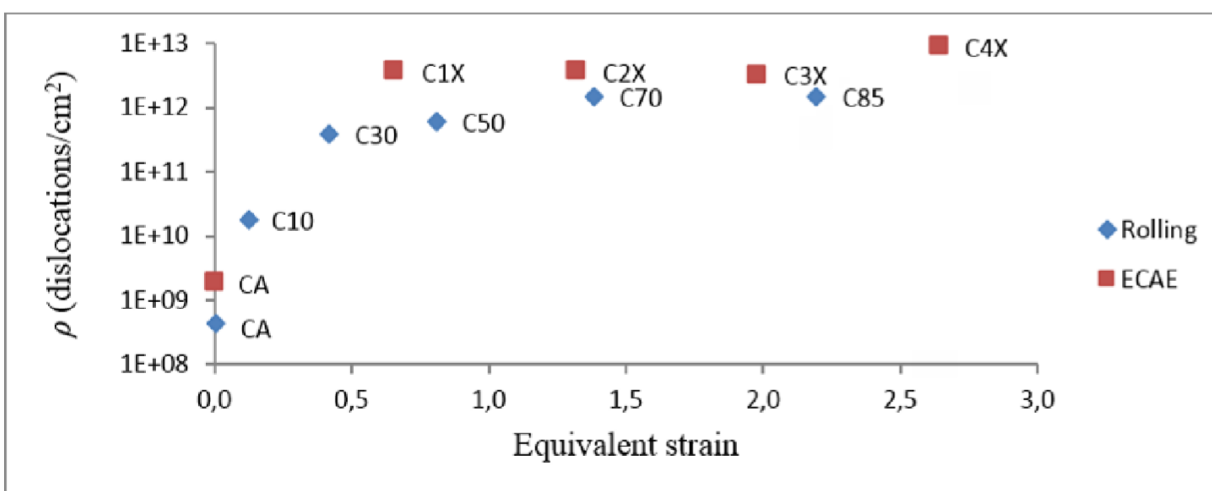
بافت سطحی انعطاف پذیری^۱ کاهش می یابد. ریزساختار فویل نورد شده که توسط الگوی پراش الکترون های بازگشتی^۲ (EBSD) به دست آمده است در شکل ۴ نشان داده شده است (J. Sun et al, 2014).



شکل ۴- تصویر EBSD از ریزساختار فویل های تولید شده به روش نورد

۲-۱-۲- بررسی نابجایی ها در فرایند نورد

همان طور که انتظار می رود، فویل های تولید شده به این روش دارای بافت سطحی هستند؛ یعنی دانه ها در جهت نورد کشیده شده اند و خواص مکانیکی در تمام جهات یکسان نیست. این بافت سطحی بر خواص الکتریکی ماده نیز مؤثر است که در ادامه بررسی می شود. در این فویل ها به دلیل فرایند مکانیکی انجام شده، نابجایی های زیادی تولید می شوند که تحرک و قفل شدن این نابجایی ها باعث افزایش استحکام کششی فویل می شود. در کار انجام شده توسط تالیتا^۳ و همکاران، تأثیر میزان کاهش ضخامت بر میزان چگالی نابجایی ها بررسی شده است. مطابق با شکل ۵ مشخص می شود که با کاهش ضخامت، چگالی نابجایی ها افزایش می یابد (T. G. D. Sousa, 2017).



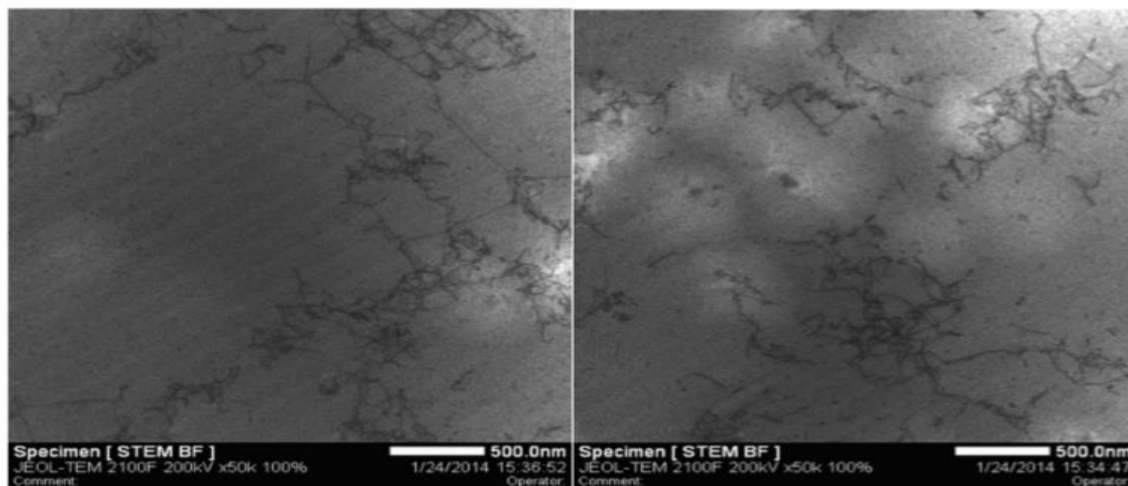
شکل ۵- دیاگرام چگالی نابجایی بر حسب کرنش معادل

¹ Flexibility

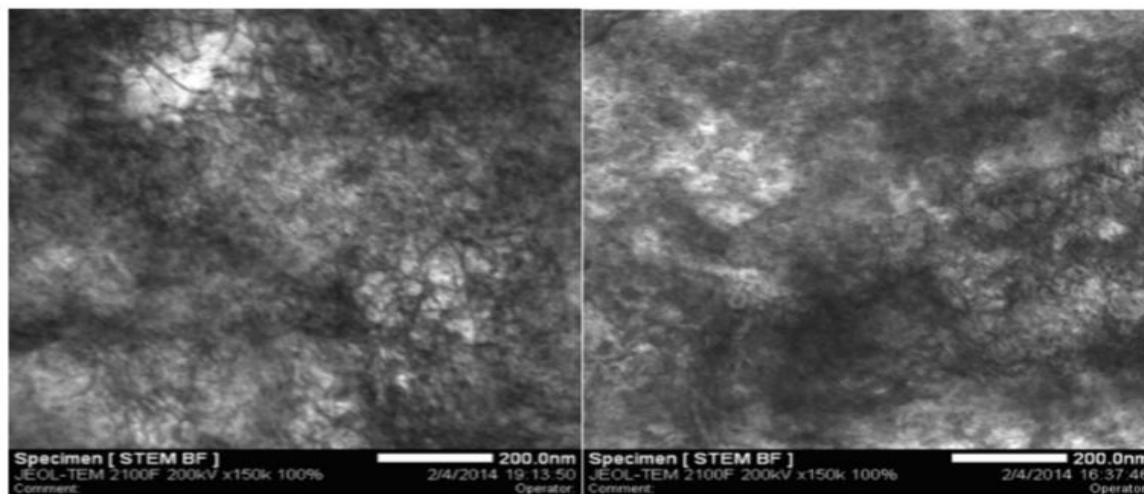
² Electron backscatter diffraction

³ talita

در شکل ۶ و شکل ۷ چگالی نابجایی‌های تولیدشده در یک نمونه شاهد و نمونه‌ای که ۸۵٪ کاهش ضخامت داشته است توسط میکروگراف میکروسکوپ الکترونی عبوری^۱ (TEM) بررسی شده است.



شکل ۶- میکروگراف نمونه CA



شکل ۷- میکروگراف مربوط به نمونه C۸۵

همچنین در جدول ۴ میزان چگالی نابجایی‌ها به کمک دو دستگاه طیف سنجی اشعه^۲X (XRD) و TEM محاسبه و ارائه شده است.

¹ Transmission Electron Microscopy

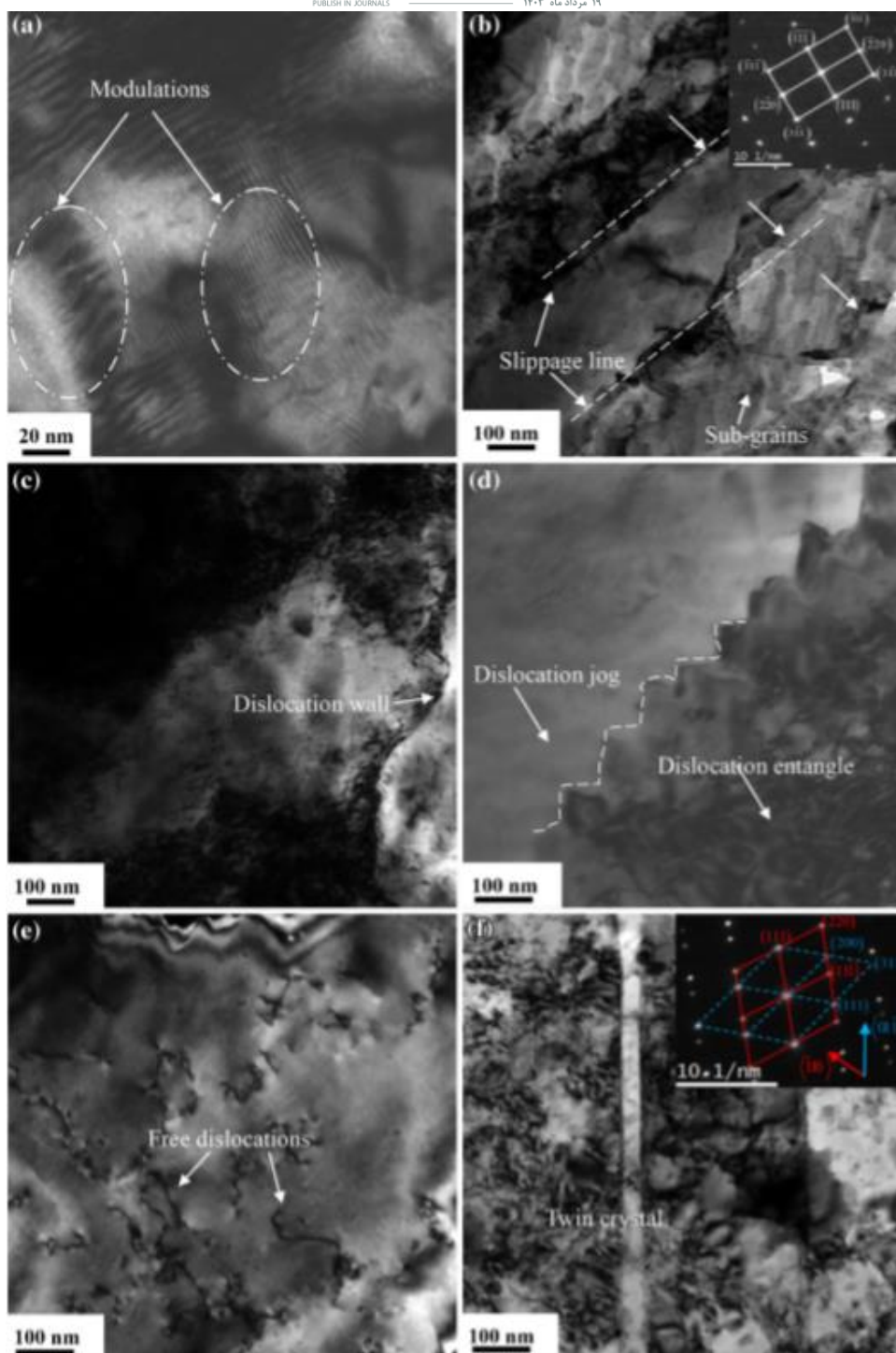
² X-ray diffraction

جدول ۴- مقادیر اندازه گیری شده چگالی نابجایی توسط دو دستگاه XRD و TEM

Sample	$\rho(\text{dislocations/cm}^2)$	
	TEM	XRD
CA	$7.76 \pm 2.46 \times 10^9$	4.57×10^8
C85	$1.42 \pm 0.15 \times 10^{11}$	1.43×10^{12}

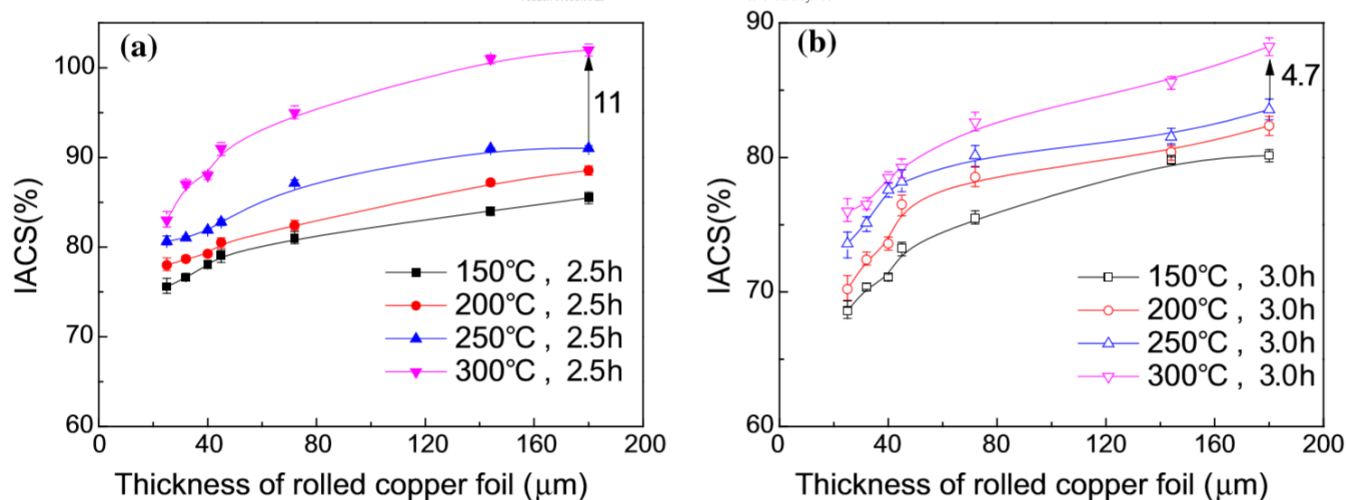
۳-۱-۲- بررسی خواص الکتریکی در فرایند نورد

همان طور که گفته شد فرایند نورد منجر به بهبود خواص مکانیکی فولاد می شود؛ اما تضعیف خواص الکتریکی را نیز به همراه دارد. افزایش نابجایی ها، ریزش دانه ها، افزایش بی نظمی و عیوب در ساختار، منجر به افزایش مقاومت الکتریکی می شود. در شکل ۸ به کمک TEM چند نمونه از این عیوب نشان داده شده است (T. G. D. Sousa, 2017).



شکل ۸- (a) ساختار مدوله شده (b) زیر دانه ها (c) دیواره نابجایی (d) نابجایی جاگ (e) نابجایی آزاد (f) دوقلویی

یکی از کاربردهای مهم فویل مس، صنایع الکتریکی است پس باید خواص الکتریکی مطلوبی داشته باشیم. به همین منظور فویل های نورد شده، آنیل می شوند. تأثیر دما و زمان فرایند آنیل بر روی خواص الکتریکی در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹- رسانایی الکتریکی برحسب ضخامت فویل مس

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، با افزایش دما در فرایند آنیل رسانایی الکتریکی فویل مس افزایش می‌یابد. این موضوع دقیقاً مرتبط با میزان عیوب در ساختار ماده است. هرچه دما در فرایند آنیل بیشتر باشد عیوب ساختاری بیشتری مرتفع می‌شوند و هرچه عیوب ساختار کمتر باشد رسانایی الکتریکی بالاتری خواهیم داشت. از آنجایی که هر چه سطح مقطع بزرگ‌تر باشد شار جریان عبوری از ماده افزایش می‌یابد، با افزایش ضخامت فویل رسانایی الکتریکی نیز افزایش یافته است (G. Simons, 2006).

البته افزایش پیوسته دما و زمان در فرایند آنیل منجر به افزایش رسانایی الکتریکی نمی‌شود و یک محدوده بهینه‌ای دارد. درواقع اگر دما و یا زمان فراتر از حد بهینه باشد فرایند رشد دانه^۱ اتفاق می‌افتد. با رشد دانه‌ها درصد حجمی مرزخانه‌های کاهش می‌یابد. مرزخانه‌ها مکان‌هایی مملو از الکترون‌های آزاد و ساختار نامنظم هستند که همین ویژگی باعث می‌شود جریان الکتریکی در مرزخانه‌ها با سهولت بیشتری حرکت کند. با کاهش مرزها، رسانایی الکتریکی نیز کاهش می‌یابد. این نکته شایان ذکر است که ریزدانه‌گی هم برای خواص الکتریکی مطلوب نیست؛ چراکه وقتی مرزها بیش از اندازه زیاد شوند بی‌نظمی و عیوب حاصل از مرزهای زیاد تأثیر منفی بر رسانایی الکتریکی دارند و مزیت‌های مرزخانه مغلوب می‌شوند (S. Xiong & J. Sun, 2015).

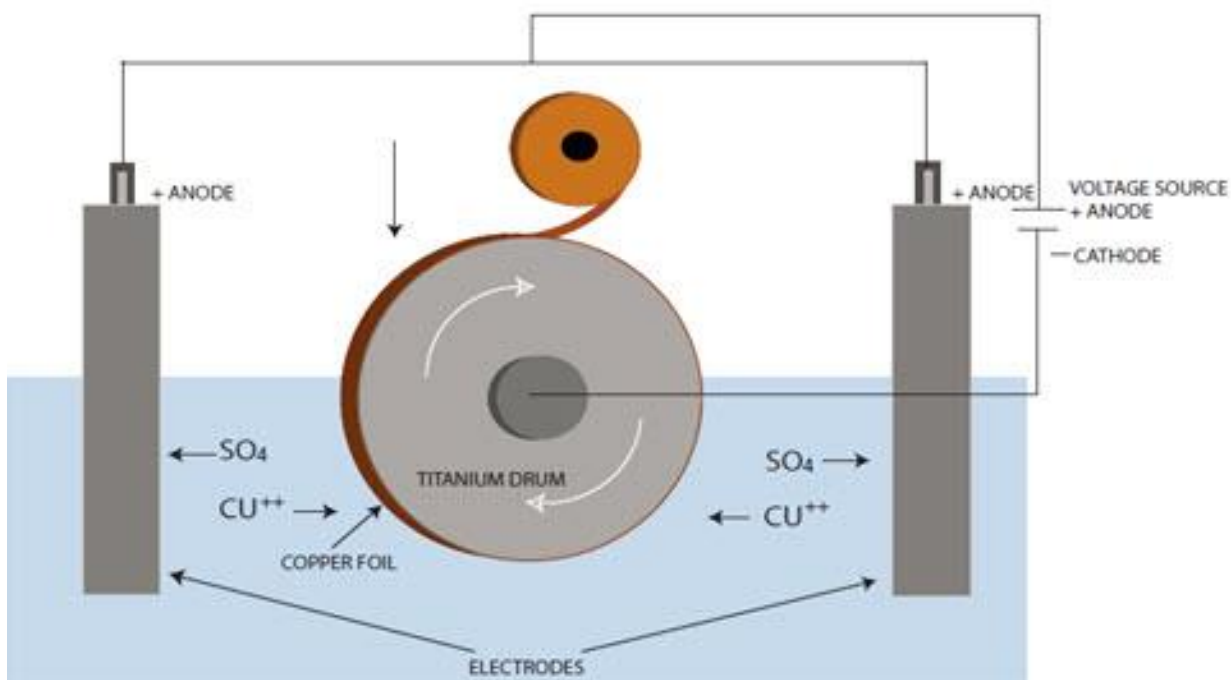
۲-۲- روش الکترورسوبی

این روش که با نام الکترورسوبی (Electro Deposition) شناخته می‌شود دارای اصول ساده و مشخصی است. این روش بسیار مشابه روش‌های آبکاری و لایه نشانی است. در این روش یک الکترولیت (سولفوریک اسید) غنی از یون مس وجود دارد که اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی توسط کاتد و آند موجب می‌شود یون‌های مس بر روی کاتد که یک درام تیتانیومی است لایه نشانی شوند و فویل مس تشکیل شود. در این روش آند از جنس مس است. با اعمال اختلاف پتانسیل مس در الکترولیت حل می‌شود و بر روی کاتد رسوب می‌کند. واکنش شیمیایی در معادله ۱ قابل مشاهده است. در این روش آند یک بخش مصرفی است و پس از مدتی باید تعویض شود. به‌منظور کارایی بهتر و افزایش راندمان، آندها را به‌صورت خمیده تولید می‌کنند. نمونه‌ای از این آندها و شمای کلی این فرایند در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. در این روش پارامترهای کنترل‌کننده بیشتری نسبت به روش مکانیکی وجود دارد. البته این روش مزیت‌هایی هم نسبت به روش مکانیکی دارد. در این روش

¹ Grain growth



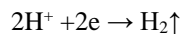
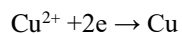
پارامترهایی همچون چگالی جریان، غلظت الکترولیت، دمای الکترولیت، اختلاف پتانسیل اعمال شده، سرعت چرخش درام، جنس کاتد و آنود ... تأثیرگذار هستند. همان طور که مشخص است این روش نیازمند سرمایه اولیه بسیار بیشتری نسبت به روش مکانیکی است. تجهیزات مورد استفاده در این روش بیشتر، حساس تر و گران تر نسبت به تجهیزات مورد استفاده (S. Nakahara, 2006).



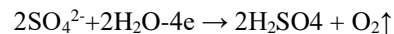
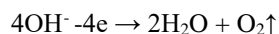
شکل ۱۰- شمای کلی فرایند Electro Deposition

در این فرایند واکنش های شیمیایی زیر رخ می دهد:

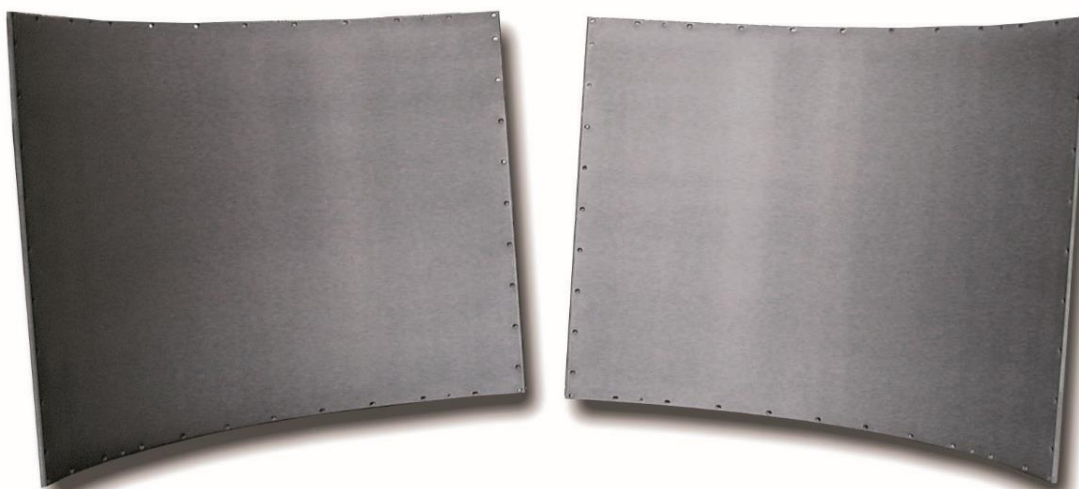
Cathode:



Anode:



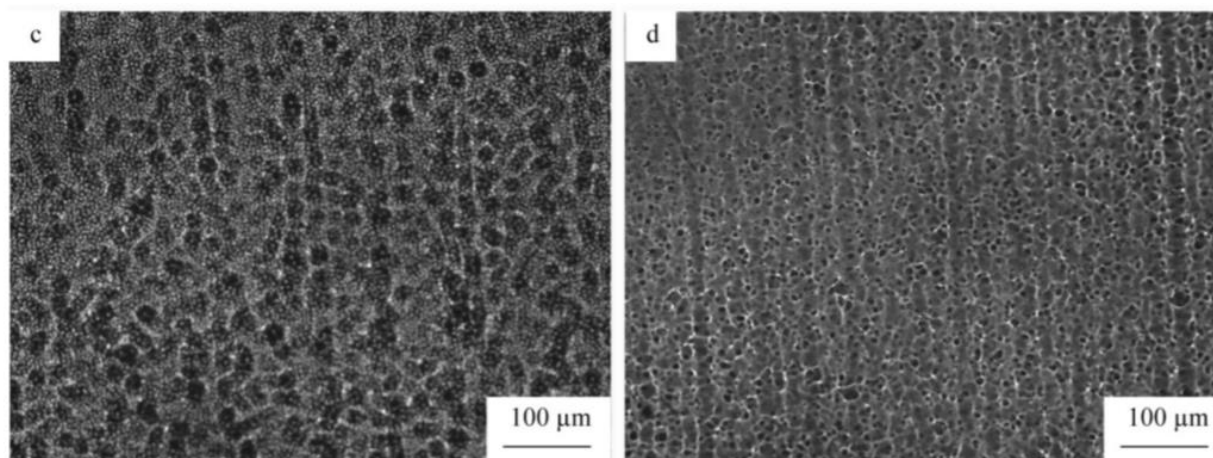
(۱)



شکل ۱۱- نمونه‌ای از آندهای مورد استفاده در تولید فویل‌ها مس الکترورسوبی

۲-۲-۱- خواص مکانیکی و ریزساختار فویل‌های تولیدشده به روش الکترورسوبی

در این روش ریزساختار فویل مس دارای دانه‌های هم‌محور^۱ و ریزتر نسبت به فرایند نورد است. کیفیت سطح در این روش بسیار پایین‌تر از فرایند نورد است. سطح این فویل‌ها زیر و ناهموار است. کیفیت سطح بسیار وابسته به پارامترهایی همچون اختلاف پتانسیل اعمال شده و سرعت درام است. دو نمونه از ساختار سطح فویل‌های الکترورسوبی در شکل ۱۲ قابل مشاهده است (J. Zhang et al, 2021).



شکل ۱۲- ساختار سطح فویل‌های تولیدشده به روش Electro Deposition

این تصاویر با استفاده از میکروسکوپ نوری تهیه شده‌اند. تفاوت در ساختار سطح نسبت به فویل‌های نورد شده مشهود است. خواص مکانیکی دو نمونه از این فویل‌ها در مقایسه با فویل‌های نورد شده در جدول ۵ آورده شده است.

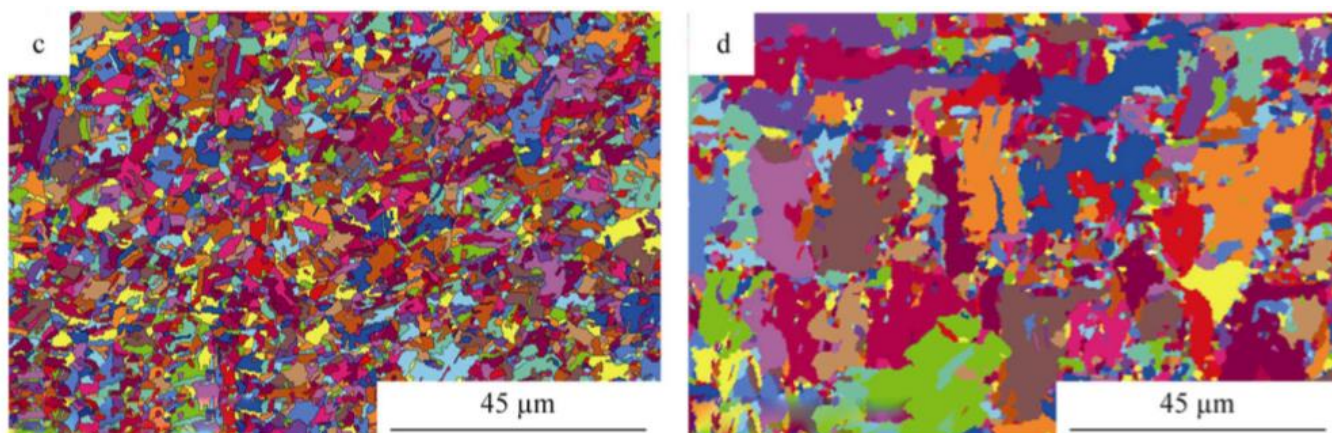
¹ Equiaxed grains

جدول ۵- مقایسه خواص مکانیکی فویل‌های تولیدشده به روش الکتروسوبی و نورد. R نشان گر فویل‌ها نورد شده و ED نشان گر فویل‌های تولیدشده به روش الکتروسوبی است.

Materials	Fracture strength/MPa	Elongation to fracture/%	Hydrophilicity (static contact angle)/(°)
JAN-R	318	0.5	103
CHN-R	463	0.5	110
JAN-ED	245	3.5	91
CHN-ED	223	1.5	93

همان‌طور که گفته شد فویل‌های نورد شده به‌واسطه بافت سطحی و فرایند کار سختی، استحکام شکست بالاتری دارند؛ ولی از طرفی در فویل‌های الکتروسوبی به دلیل ریزساختار هم‌محور انعطاف‌پذیری و ازدیاد طول بیشتری داریم. خواص مکانیکی و الکتریکی فویل‌های الکتروسوبی وابسته به‌اندازه رسوبات، شکل رسوبات، میزان تخلخل‌ها و ضخامت فویل هستند. پس کنترل پارامترهای فرایند شامل دمای الکترولیت، غلظت الکترولیت، اختلاف پتانسیل اعمال‌شده، جنس آندها و سرعت درام بسیار مهم هستند (H. D. Merchant & W. C. Liu, 2004).

خواص مکانیکی ضعیف‌تر فویل‌های الکتروسوبی در مقایسه با فویل‌های نورد شده را می‌توان به ایجاد عیوبی مانند رسوبات متفرقه یا تخلخل‌ها در طول فرایند الکتروسوبی نسبت داد. تخلخل‌ها موجب تمرکز تنش می‌شوند و خواص مکانیکی فویل را ضعیف می‌کنند. برخلاف فویل‌های نورد شده که دانه‌ها جهت‌گیری خاص و مشخص داشتند، در این روش دانه‌ها جهت‌گیری خاصی ندارند. تصویر EBSD از ریزساختار دو نمونه فویل الکتروسوبی در شکل ۱۳ آورده شده است (J. Zhang et al, 2021).



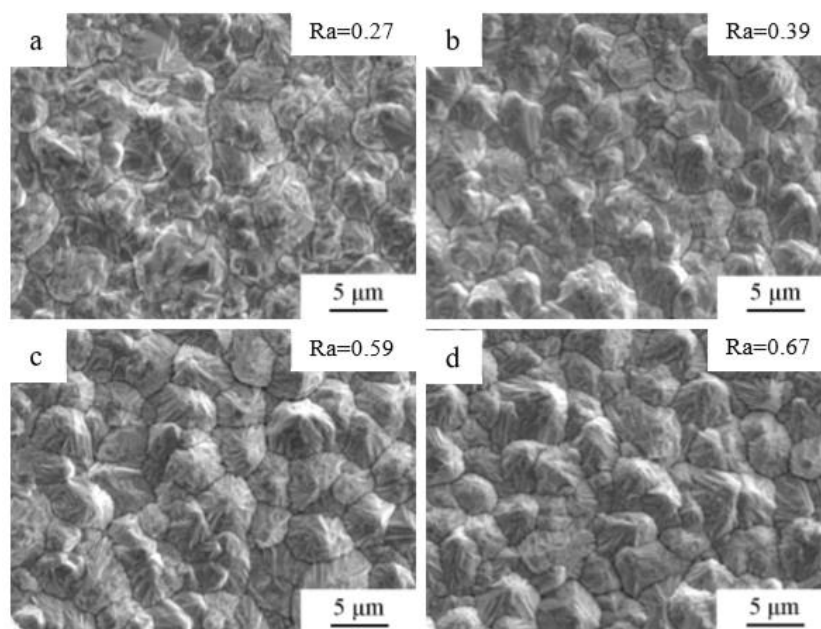
شکل ۱۳- تصویر EBSD از ریزساختار دو نمونه فویل الکتروسوبی

۲-۲-۲- پارامترهای مؤثر در روش الکتروسوبی

پارامترهای تأثیرگذار در این روش شامل دمای الکترولیت، غلظت الکترولیت، چگالی جریان، جنس آندها و سرعت درام هستند. چگالی جریان یک پارامتر مهم است که بر کیفیت سطح، خواص مکانیکی و خواص الکتریکی فویل تولید شده به این روش تأثیر می‌گذارد. در ادامه به بررسی اثر چگالی جریان پرداخته می‌شود (Ibañez & E. Fatás, 2005).

۱-۲-۲-۲- چگالی جریان

شکل ۱۴ توپوگرافی سطح فویل های مس الکتروسوبی را تحت چگالی جریان های مختلف نشان می دهد. چگالی جریان ۸، ۱۴، ۲۲ و A/dm^2 ۲۶ است. همان طور که مشخص است، اندازه ذرات روی سطح فویل های مس الکترولیتی که بین ۳ تا ۵ میکرومتر است، با افزایش چگالی جریان، تغییر قابل توجهی نشان نمی دهد. باین حال، شکل ذرات به طور قابل توجهی تغییر می کند. با افزایش چگالی جریان، ذرات روی سطح فویل های مس برجسته شده و سطح تیز می شود. زبری سطح فویل مسی توسط میکروسکوپ نیروی اتمی^۱ (AFM) اندازه گیری شد و مشخص شد که زبری سطح فویل های مس با افزایش چگالی جریان به طور قابل توجهی افزایش می یابد. نرخ رشد رسوب هسته یون مس در جهات طولی و عرضی متفاوت است و اثر محرک رشد بر رشد طولی به ویژه هنگامی که چگالی جریان افزایش می یابد مشهود است. در نتیجه، سطح یون های مس الکترولیتی در هنگام رسوب نامنظم و موج دار است. رشد سطح کریستال به صورت مرحله ای اتفاق می افتد و وجود این مراحل باعث می شود کریستال اختلاف پتانسیل بالایی داشته باشد که منجر می شود یون های مس بر روی کریستال های جدید رسوب کنند. پس از فرآیند فوق، کریستال های مس رشد می کنند سطح فویل مس تشکیل می شود. هنگامی که چگالی جریان افزایش می یابد، سطح ذرات برجسته تر می شود. هنگامی که چگالی جریان بیش از $22 A/dm^2$ باشد، سطح فویل مس مخروطی می شود (X. Cheng et al, 2019).

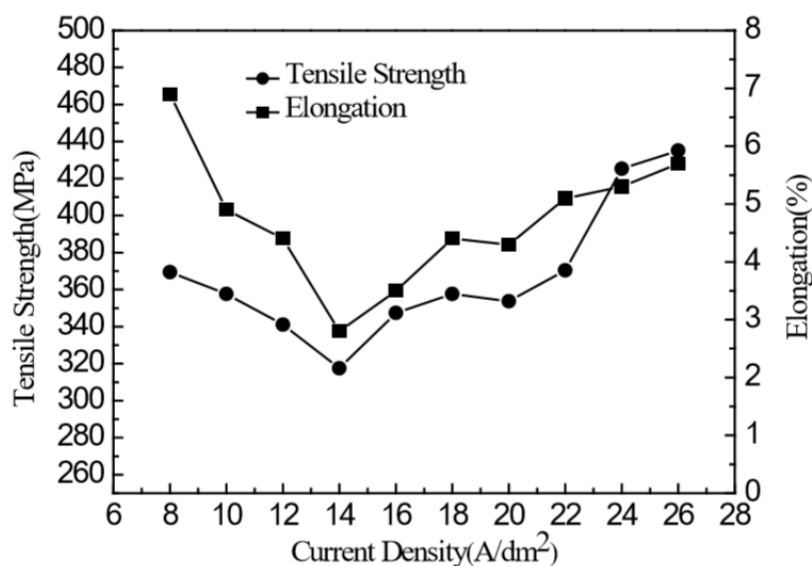


شکل ۱۴- مورفولوژی سطح فویل های مس الکترولیتی در چگالی جریان مختلف: (الف) $8 A/dm^2$. (ب) $14 A/dm^2$; (ج) $22 A/dm^2$; (د) $26 A/dm^2$

خواص مکانیکی فویل مس الکتروسوبی در چگالی جریان های مختلف در شکل ۱۵ نشان داده شده است. هنگامی که چگالی جریان A/dm^2 ۸ باشد، استحکام کششی فویل مس ۳۶۹ مگاپاسکال است. با افزایش چگالی جریان، استحکام کششی به تدریج شروع به کاهش می کند. هنگامی که چگالی جریان A/dm^2 ۱۴ باشد، استحکام فویل مس ۳۱۸ مگاپاسکال است. با ادامه افزایش چگالی جریان، استحکام کششی فویل مس شروع به افزایش می کند. در چگالی جریان A/dm^2 ۲۶، استحکام کششی فویل مسی به ۴۳۵ مگاپاسکال می رسد. زمانی که چگالی جریان

¹ Atomic force microscopy

8 A/dm^2 باشد، ازدیاد طول فویل مس در مقدار حداکثر برابر با 6.9% است. در چگالی جریان 14 A/dm^2 ، ازدیاد طول فویل مس در کمترین میزان خود برابر با ۲.۸٪ بود. در چگالی جریان 26 A/dm^2 ، ازدیاد طول فویل مس به ۵.۷ درصد افزایش یافت.



شکل ۱۵- استحکام کششی و ازدیاد طول فویل های مس در چگالی جریان های مختلف

جدول ۶ اندازه دانه های فویل مس در چگالی جریان های مختلف به دست آمده است. در بازه چگالی جریان ۸ تا 26 A/dm^2 ، اندازه دانه های فویل مس ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد که رابطه عکس با استحکام کششی دارد. بر اساس تئوری افزایش استحکام با مکانیزم ریزدانه گی، هر چه دانه های کریستالی ریز تر باشد، تعداد مرزهای دانه بیشتر می شود و مانع حرکت نابجایی ها می شود و در نتیجه استحکام کششی فویل مسی افزایش می یابد (J. Zhang et al, 2021).

یک پدیده دیگر که در اثر افزایش چگالی جریان اتفاق می افتد نفوذ هیدروژن است. در بررسی چگالی جریان های دیده شده است که با افزایش چگالی جریان میزان نفوذ هیدروژن در فویل افزایش می یابد و منجر به تشکیل منافذ ریز در فویل می شود. این منافذ ریز دلیل اصلی کاهش انعطاف پذیری فویل هستند (H. D. Merchant et al, 1999).

جدول ۶- اندازه دانه فویل های مس در چگالی جریان های مختلف

Current density [A/dm^2]	8	12	14	20	26
Grain size [μm]	0.69	0.78	0.91	0.84	0.68

۳- جمع بندی و نتیجه گیری

طی این تحقیق روش های تولید فویل مس به همراه خواص فیزیکی و مکانیکی آنها بررسی شد که نتیجه به شرح زیر است.

- ۱- در روش مکانیکی پارامترهای متغیر بسیار کمتر از روش الکترورسوبی هستند. در روش نورد پارامترهایی همچون سرعت غلتک، نیروی غلتک، h/L و غیره تأثیرگذار هستند؛ ولی در روش الکترورسوبی پارامترهای متعدد و بیشتری بر روی محصول نهایی تأثیر دارند که همین موضوع باعث می شود تا فرایند الکترورسوبی فرایند پیچیده تر و حساس تر باشد.
- ۲- محصول فرایند دارای کیفیت سطحی بالاتر و استحکام کششی بالاتر است؛ اما از طرفی خواص مکانیکی و الکتریکی در این محصول غیرهمگن و ناهمسان گرد است و همچنین محصول نیاز به انجام عملیات نهایی (عملیات حرارتی، مکانیکی و سطحی) دارد.
- ۳- فرایند نورد فرایندی با پیچیدگی های کم، ساده و متداول است؛ اما راندمان این فرایند بسیار پایین است و سرعت تولید فویل مس بسیار کمتر از روش الکترورسوبی است. همچنین در این فرایند محصول نهایی حساسیت بالایی نسبت به خلوص و خواص متالورژیکی ماده اولیه دارد.
- ۴- به واسطه ماهیت و اصول عملکرد پیچیده تر، روش الکترورسوبی نیاز به سرمایه اولیه بیشتر و تجهیزات مخصوص دارد. اما برتری چشمگیر فرایند الکترورسوبی نسبت به فرایند نورد، سرعت تولید است. در روش الکترورسوبی به صورت پیوسته و با سرعتی به مراتب بیشتر از روش نورد می توان فویل مس تولید کرد.
- ۵- در روش الکترورسوبی یک ساختار هم محور و همگن تشکیل می شود و خواص مکانیکی و الکتریکی همسانگرد هستند. در این روش با کنترل پارامترها امکان تعیین دقیق ضخامت فراهم است. محصول نهایی در این روش به مراتب حساسیت کمتری به شرایط ماده اولیه دارد.
- ۶- روش الکترورسوبی علی رغم مزیت های متعدد، دارای محدودیت ها و چالش هایی همچون ادوات و تجهیزات پیچیده و گران قیمت، نیازمند به ماده مصرفی (آند)، نیاز به تهیه، تصفیه و تعویض الکترولیت، پارامترهای فرایندی زیاد و کیفیت سطح نامطلوب است.

A review of copper foil production methods and some of their metallurgical properties

Aminadel Shahbazi

**Department Of Material Engineering, Tarbiat
Modares University, Tehran, Iran**

Sh.aminadel.shahbazi@gmail.com

Hamidreza shahverdi

**Department Of Material Engineering, Tarbiat
Modares University, Tehran, Iran**

shahverdi@modares.ac.ir

Aliakbar Motahedi

**Department of Advanced Materials And Renewable Energy, Iranian Research Organization for Science And
Technology, Tehran, Iran**

motahedi@yahoo.com

Abstract

Copper foil is one of the products used in electronics, thermal management industries, batteries, and more. Copper foil is produced by two methods: rolling and electrodeposition. In the rolling method, the raw material is subjected to cold work and plastic deformation to produce the final copper foil. This method is simple, common, and has low complexity; however, it has low efficiency and the properties of the final product are anisotropic. In this method, as cold work increases, the dislocation density increases and electrical properties deteriorate. The rolling process requires heat treatment as well as finishing process. Grain size in rolled foils is related to electrical conductivity. As the grain size increases and grain boundaries decrease, electrical conductivity decreases. Foils produced by the electrodeposition method lack a solidification structure because these foils are produced by the deposition of copper ions on the surface of a titanium drum. Due to the nature of the electrodeposition method, a homogeneous and equiaxed structure is formed. Due to the presence of equiaxed grains in electrodeposited foils, flexibility and elongation are greater than in rolled foils. In foil produced by the electrodeposition method, mechanical and electrical properties are homogeneous and isotropic. The electrodeposition method is more complex, and parameters such as current density, electrolyte concentration, electrolyte temperature, applied potential difference, drum rotation speed, cathode and anode material, etc. are influential. Different parameters in the electrodeposition method cause changes in the size and shape of copper particles, and changes in the shape and size of particles are directly related to mechanical and electrical properties.

Keywords: Copper foil, foil rolling, electrodeposition process, microstructure, mechanical properties

۴- مراجع

- G. Simons, "Mechanical size effects in thin copper foils: An experimental study," ETH Zurich, 2004. doi: 10.3929/ETHZ-A-004843017.
- N. A. Fleck, K. L. Johnson, M. E. Mear, and L. C. Zhang, "Cold Rolling of Foil," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 206, no. 2, pp. 119–131, May 1992, doi: 10.1243/PIME_PROC_1992_206_064_02.
- A. Ibañez and E. Fatás, "Mechanical and structural properties of electrodeposited copper and their relation with the electrodeposition parameters," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 191, no. 1, pp. 7–16, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.05.001.
- M. Song, X. Liu, and L. Liu, "Size Effect on Mechanical Properties and Texture of Pure Copper Foil by Cold Rolling," *Materials*, vol. 10, no. 5, p. 538, May 2017, doi: 10.3390/ma10050538.
- X.-Q. Yin *et al.*, "Mechanical properties and microstructure of rolled and electrodeposited thin copper foil," *Rare Met.*, vol. 35, no. 12, pp. 909–914, Dec. 2016, doi: 10.1007/s12598-016-0806-4.
- T. G. D. Sousa, V. L. Sordi, and L. P. Brandão, "Dislocation Density and Texture in Copper Deformed by Cold Rolling and Ecap," *Mater. Res.*, vol. 21, no. 1, Oct. 2017, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0515.
- S. Xiong, J. Sun, Y. Xu, and X. Yan, "Effect of Lubricants and Annealing Treatment on the Electrical Conductivity and Microstructure of Rolled Copper Foil," *J. Electron. Mater.*, vol. 44, no. 7, pp. 2432–2439, Jul. 2015, doi: 10.1007/s11664-015-3772-y.
- G. Simons, Ch. Weippert, J. Dual, and J. Villain, "Size effects in tensile testing of thin cold rolled and annealed Cu foils," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 416, no. 1–2, pp. 290–299, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.msea.2005.10.060.
- S. Nakahara and Y. Okinaka, "Microstructure and Mechanical Properties of Electroless Copper Deposits," *Annu. Rev. Mater. Sci.*, vol. 21, no. 1, pp. 93–129, Aug. 1991, doi: 10.1146/annurev.ms.21.080191.000521.
- H. D. Merchant, W. C. Liu, L. A. Giannuzzi, and J. G. Morris, "Grain structure of thin electrodeposited and rolled copper foils," *Mater. Charact.*, vol. 53, no. 5, pp. 335–360, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.matchar.2004.07.013.
- J. Zhang *et al.*, "Study on the relationship between crystal plane orientation and strength of electrolytic copper foil," *J. Alloys Compd.*, vol. 884, p. 161044, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jallcom.2021.161044.
- X. Cheng *et al.*, "The Effects of Current Density on Microstructure and Properties of Electrolytic Copper Foils," *Mater. Sci. Forum*, vol. 944, pp. 205–211, Jan. 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.944.205.
- H. D. Merchant, M. G. Minor, and Y. L. Liu, "Mechanical fatigue of thin copper foil," *J. Electron. Mater.*, vol. 28, no. 9, pp. 998–1007, Sep. 1999, doi: 10.1007/s11664-999-0176-x.
- J. Sun, N. Liu, L. Xia, and D. Wu, "Research of oil film thickness model and surface quality in cold rolling copper foil: OIL FILM THICKNESS MODEL AND SURFACE QUALITY," *Lubr. Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 95–106, Mar. 2014, doi: 10.1002/lvs.1231.