

Research Paper

Manufacture of Copper Cone Shell Using Electroforming Process and Investigation of Effective Parameters on the Process Using Numerical Simulation

*Hamid Heydari Pebdani¹, Hossein Mehmannaavaz², Gholamhossein Liaghat³, Sadegh Rahmati⁴, Hamid Fazeli⁵

1- MSc. Student, Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

2- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

3- Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

4- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

5- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Citation: Heydari Pebdani H, Mehmannaavaz H, Liaghat Gh, Rahmati S, Fazeli H. Manufacture of Copper Cone Shell Using Electroforming Process and Investigation of Effective Parameters on the Process Using Numerical Simulation. Metallurgical Engineering 2018; 21(3): 198-206 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.84662.1186>

 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.84662.1186>

ABSTRACT

The purpose of this study is to demonstrate the advantages of computer simulation and parametric studies in improving the copper electroforming process. For this purpose, the finite element model for a cone geometry was prepared using the Comsol software, and the effect of key parameters including applied current density, solution electrical conductivity, electrode spacing, and anode length, on the thickness uniformity. In order to validate the model, a conical shell was produced in the laboratory by electroforming method, and the thickness distribution was compared with the simulation results. The comparison of the results showed that using the tertiary current distribution method to simulate the electroforming process is a precise and efficient model and can be used for parametric studies. Finally, after parametric study, it was determined that all selected variables had a significant effect on the thickness uniformity. In addition, it was found that the most to least significant variables were applied current density, solution conductivity, anode-cathode spacing, and anode length, respectively.

Keywords: electroforming, numerical simulation, finite element modeling, thickness distribution, electroplating.

■ ■

* *Corresponding Author:*

Hamid Heydari Pebdani, MSc. Student

Address: Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Tel: +98 (9139857825)

E-mail: h.heydari313@yahoo.com

ساخت پوسته‌ی مخروطی مسی با استفاده از فرآیند الکتروفرمینگ و بررسی پارامترهای موثر بر فرآیند ساخت آن از طریق شبیه‌سازی عددی

*حمید حیدری پیدنی^۱، حسین مهمان‌نواز^۲، غلامحسین لیاقت^۳، صادق رحمتی^۴، حمید فاضلی^۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۵- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

هدف از این پژوهش نشان دادن مزایای شبیه‌سازی رایانه‌ای و مطالعات پارامتری در بهبود فرآیند الکتروفرمینگ مس می‌باشد. برای این منظور مدل المان محدود برای یک هندسه مخروطی شکل با استفاده از نرم افزار کامسول تهیه و اثر پارامترهای کلیدی شامل دانسیته‌ی جریان اعمالی، هدایت الکتریکی محلول، فاصله‌ی الکترودها، و طول آن، بر میزان یکنواختی ضخامت بررسی شد. به منظور صحت سنجی مدل، یک پوسته‌ی مخروطی شکل در آزمایشگاه به روش الکتروفرمینگ تولید، و توزیع ضخامت در آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شد. مقایسه‌ی نتایج نشان داد برای شبیه‌سازی فرآیند الکتروفرمینگ، استفاده از مدل توزیع جریان سه گانه، یک مدل دقیق و کارآمد است و می‌توان از آن برای مطالعات پارامتری استفاده کرد. در نهایت پس از مطالعه‌ی پارامتری مشخص شد تمامی متغیرهای انتخاب شده تاثیر قابل توجهی بر ضخامت کلی ایجاد شده و میزان یکنواختی ضخامت دارند. علاوه بر این مشخص شد که دانسیته‌ی جریان اعمالی بیش‌ترین و فاصله‌ی الکترودها کمترین اثر را بر مقدار ضخامت یکنواختی آن دارد.

واژه‌های کلیدی: الکتروفرمینگ، شبیه‌سازی عددی، مدل‌سازی اجزاء محدود، توزیع ضخامت، آبکاری.

۱. مقدمه

الکتروفرمینگ روشی نسبتاً نوین برای تولید قطعه‌های فلزی می‌باشد. در این فرآیند، با استفاده از رسوب دهی الکتریکی، فلز را بر روی یک محور رسوب می‌دهند. اصول و تجهیزات این روش شبیه آبکاری است، با این تفاوت که در الکتروفرمینگ محور تنها نقش شکل‌دادن به قطعه در زمان رسوب‌دهی را دارد و در آخر جدا می‌شود. همچنین به دلیل اینکه در الکتروفرمینگ هدف تولید یک قطعه است لذا ضخامت لایه‌ی آبکاری شده بسیار بیشتر از ضخامت آبکاری در پوشش‌های تزئینی است [1, 2].

مزیت اصلی فرآیند الکتروفرمینگ این است که می‌توان شکل سطح بیرونی محور را حتی در ابعاد یک میکرون ایجاد کرد. علاوه بر این، فرآیند الکتروفرمینگ در مقایسه با دیگر فرآیندها مانند ریخته‌گری، ماشین کاری و ... برای حالت‌هایی که دقت بالا (۱،۵ تا ۳ نانومتر)، پیچیدگی زیاد، و وزن پایین

مورد نیاز باشد، مناسب‌تر و کارآمدتر است. قطعاتی که با روش الکتروفرمینگ ایجاد می‌شوند خلوص بسیار بالایی دارند و بدلیل ریز ساختار مناسبی که دارند، خواص مکانیکی و فیزیکی آنها فوق العاده است [4]-[2].

خواص قطعه ساخته شده به روش الکتروفرمینگ شامل خصوصیات ظاهری، آنالیز ترکیب شیمیایی، تخلخل، ساختار کریستالی، خواص استحکامی، و تنش‌های داخلی، تحت تاثیر پارامترهای دما، ترکیب شیمیایی حمام الکترولیت، روش و شدت هم‌زدن حمام، و دانسیته جریان اعمالی می‌باشند [9]-[5].

مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک روش کاربردی برای ارزیابی و تایید نتایج تجربی است، که محدودیت‌های روش آزمایشگاهی را ندارد و ضمن صرفه جویی در زمان و هزینه، روشی بسیار اقتصادی و مناسب برای فهم دقیق‌تر فرآیند الکتروفرمینگ و بهینه‌سازی و کنترل آن می‌باشد [10].

فرآیند الکتروفرمینگ با استفاده از الکترودهای چرخان

* نویسنده مسئول:

مهندس حمید حیدری پیدنی

نشانی: تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت.

تلفن: ۹۸- (۹۱۳۹۸۵۷۸۲۵)

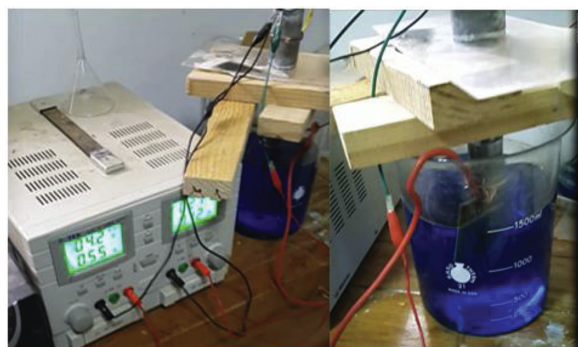
پست الکترونیکی: h.heydari313@yahoo.com

یابد. به همین دلیل یکنواختی ضخامت یک متغیر کلیدی در فرآیند الکتروفرمینگ است که باید اثر پارامترهای مختلف بر مقدار آن مورد مطالعه قرار گیرد [14].

هدف اصلی این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان یکنواختی ضخامت در فرآیند الکتروفرمینگ است. بدین منظور ابتدا سیستم آزمایشگاهی شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی برای اعتبار سنجی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شدند. برای این کار یک پوسته‌ی مخروطی مسی در آزمایشگاه بوسیله‌ی فرآیند الکتروفرمینگ ساخته شد. سپس توزیع ضخامت در آن اندازه‌گیری گردید و مقادیر آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شدند و مشاهده شد که نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی موافق اند. در نهایت اثر تغییر پارامترهای تاثیرگذار بر فرآیند شامل دانسیته‌ی جریان اعمالی، هدایت الکتریکی محلول، فاصله‌ی الکترودها، و طول آن، بر روی ضخامت ایجاد شده و میزان یکنواختی ضخامت بررسی شد.

۲. مواد و روش تحقیق

حمام آبکاری شامل سولفات مس ($\text{CuSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (230 g/l) و اسید سولفوریک (H_2SO_4 (140 g/L) به منظور افزایش هدایت الکترولیت، می‌باشد. کاتد مخروطی از جنس آلومینیوم با ابعاد قطر بزرگ ۵ cm و قطر کوچک ۰/۸ cm است، و به دلیل اینکه به عنوان زیر لایه استفاده می‌شود، سطح بیرونی آن با دقت پالیش مکانیکی و شیمیایی زده شد تا بتوان بعد از فرآیند، لایه‌ی آبکاری شده را به راحتی از آن جدا کرد. کاتد نیز توسط یک سیم تک رشته مسی به جریان مستقیم اتصال داده شد [15]. جهت بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی پوشش الکتروفورم، کاتد به یک محور چرخان متصل شد و با سرعت ۱۰۰ RPM تحت دوران قرار گرفت [17]، [16]. آبکاری در حمامی به حجم ۱/۳ لیتر، تحت ولتاژ ۱/۲ ولت و به مدت ۴۸ ساعت انجام گرفت. نمایی از حمام آبکاری در شکل ۱ و پوسته‌ی مخروطی الکتروفورم در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمایی از حمام الکتروفرمینگ ساخت پوسته‌ی مخروطی

یکی از روش‌های مناسب برای ایجاد جریان اجباری در اطراف کاتد می‌باشد. در حالتی که کاتد ساکن باشد به دلیل ایجاد لایه مرزی ضخیم که روی سطح آن تشکیل می‌شود، تغییرات ساختار میکروسکوپی و افت قابل توجه سختی و همچنین افت کیفیت ظاهری و ناهمواری سطح در پوشش ایجاد شده حاصل می‌شود [11].

لاو و همکاران، هیدرودینامیک فرآیندهای الکتروشیمیایی با الکترودهای چرخان را بررسی کردند [12]. آنها پروفایل سرعت و فشار در الکترولیت اطراف یک استوانه چرخان را بدست آوردند و سپس مدل انتقال جرم در سطح الکترودها با استفاده از کوپل کردن معادلات الکتروشیمیایی و هیدرودینامیکی بدست آمد. در نهایت با استفاده از مدل توزیع جریان سه‌گانه، توزیع پتانسیل، جریان و غلظت در سطح استوانه چرخان بدست آمد. ایلجا و همکاران آبکاری نقره بر روی هندسه‌های پیچیده را به روش المان محدود شبیه‌سازی کرده و به منظور بهینه‌سازی میزان یکنواختی ضخامت لایه‌ی آبکاری شده، اثر پارامترهای مختلف را بر میزان یکنواختی ضخامت بررسی کردند [10]. آنها ابتدا برای صحت سنجی مدل شبیه‌سازی شده، یک صفحه‌ی فلزی دایره‌ای شکل را در آزمایشگاه آبکاری کردند و توزیع ضخامت در آن را با نتایج شبیه‌سازی مقایسه کردند. نتایج شبیه‌سازی برای آبکاری هندسه‌ی پیچیده نشان داد که تغییر دانسیته‌ی جریان اعمالی اثر قابل توجهی بر میزان یکنواختی ضخامت دارد و همچنین دانسیته‌ی جریان اعمالی یک مقدار بهینه دارد که با انتخاب آن ضخامت بیشترین یکنواختی را دارد. پرز و همکاران در تحقیقی دیگر شبیه‌سازی فرآیند آبکاری مس بر روی یک استوانه‌ی چرخان را به روش المان محدود انجام دادند [13]. آنها از هر سه مدل توزیع جریان یگانه، دو گانه و سه گانه استفاده کردند و تفاوت آنها را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از مدل توزیع جریان دوگانه و سه‌گانه تطابق نسبتاً دقیقی بر نتایج آزمایشگاهی دارد و نیز در حالتی که حمام تحت هم زدن زیاد باشد مدل توزیع جریان دوگانه و سه‌گانه تفاوت بسیار ناچیزی دارند.

یکسان بودن ضخامت در تمام قسمت‌های یک قطعه‌ی الکتروفورم یک مشخصه‌ی کلیدی در صنایع الکتروفرمینگ است. علت این است که در فرآیند الکتروفرمینگ همواره در قسمت‌های مرکزی کاتد حداقل ضخامت و در قسمت‌های انتهایی و گوشه‌ها بیشینه ضخامت آبکاری صورت می‌گیرد. اما از لحاظ کیفی باید قطعه‌ی الکتروفورم ضخامت یکنواختی در قسمت‌های مختلف داشته باشد. به همین دلیل باید فرآیند را ادامه داد تا قسمتی که حداقل ضخامت را دارد به مقدار استاندارد مورد نیاز برسد و سپس قسمت‌های دیگر که ضخامت بیشتری دارند را ماشین کاری کرد تا همه‌ی قسمت‌ها ضخامت یکسان داشته باشند. این امر باعث می‌شود که از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی کارایی فرآیند کاهش

است. برای تعیین ضخامت لایه مرزی از معادله‌ی بی بعد آیزنبرگ استفاده شده است [20].

معادله ۲.

$$\delta_N = \frac{r}{0.006Re^{0.91}Sc^{0.356}}$$

در رابطه‌ی بالا Re عدد رینولدز است ($Re = \rho\omega r^2 / \mu$)، که r شعاع مخروط، ω سرعت دورانی الکترو، ρ چگالی، μ ویسکوزیته دینامیکی محلول الکترولیت است، Sc عدد اشمیت است ($Sc = \eta / D$)، که در این رابطه D ضریب نفوذ است. ضخامت لایه مرزی در سطح کاتد ثابت در نظر گرفته شده است و مقدار آن با توجه به فرمول بالا و با استفاده از مشخصات الکترولیت و سرعت چرخش کاتد، برابر ۳۰ میکرون در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی غلظت برای لایه مرزی به این صورت است که غلظت در فصل مشترک لایه مرزی و الکترولیت برابر $C = C_0$ و در فصل مشترک با سطح کاتد توسط معادله‌ی بالتر-ولمر که در ادامه توضیح داده می‌شود بیان می‌گردد. همچنین غلظت خارج از لایه مرزی بصورت ثابت و برابر $C = C_0$ در نظر گرفته می‌شود [19].

برای تعیین شار هر کدام از یون‌ها در داخل سیستم از معادله‌ی نرنست-پلانک استفاده می‌شود [21]:

معادله ۳.

$$N_i = -D_i \nabla C_i - z_i u_i F C_i \nabla \phi$$

معادله ۴.

$$u_i = \frac{D_i}{RT}$$

که در رابطه‌ی بالا N_i بردار انتقال جرم جز i ($\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)، C_i غلظت جز i در الکترولیت (mol/m^3)، D_i ضریب نفوذ جز i در الکترولیت (m^2/s)، z_i بار الکتریکی یون i ، u_i تحرک یونی جز i در الکترولیت ($\text{mol}^2/\text{J} \cdot \text{s}$)، F ثابت فارادی ($\text{A} \cdot \text{s}/\text{mol}$)، ϕ پتانسیل الکترولیت (V)، u بردار سرعت (m/s)، R ثابت جهانی گازها و T دمای سیستم (K) است.

بر همین اساس معادله‌ی موازنه‌ی جرم برای اجزای موجود در سیستم به صورت معادله‌ی (۵) می‌باشد [21]:

معادله ۵.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot N_i = 0$$

و دانسیته جریان در الکترولیت (i) نیز با رابطه‌ی (۶) بیان می‌شود [۲۱]:

معادله ۶.

$$i = F \sum_{i=1}^n z_i (-D_i \nabla C_i - z_i u_i F C_i \nabla \phi)$$

همچنین با توجه به شرط خنثی بودن الکتریکی در الکترولیت، در هر نقطه از الکترولیت رابطه‌ی بین غلظت یون‌های مختلف با معادله‌ی زیر بیان می‌شود [۱۹]:



شکل ۲. نمایی از پوسته‌ی مخروطی تولید شده به روش الکتروفورمینگ

معادلات حاکم و شرایط مرزی

فرآیند الکتروفورمینگ مس شامل دو مرحله اصلی می‌باشد: مرحله‌ی اول، انتقال یون‌های مس از الکترولیت به سطح کاتد و مرحله‌ی دوم واکنش الکتروشیمیایی کاهش یون‌های مس در سطح کاتد.

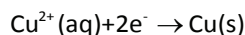
بطور کلی در بحث پوشش دهی الکترولیتی سه مدل مختلف برای توزیع جریان در الکترولیت و سطح الکترودها وجود دارد. تفاوت این سه مدل در فرضیاتی است که در هر کدام صورت می‌گیرد. در مدل توزیع جریان یگانه از اثرات سینتیک واکنش‌ها در سطح الکترو، و نیز اثرات انتقال جرم چشم پوشی می‌شود، و تنها اثر هدایت محلول به عنوان عامل انتقال یون‌ها در نظر گرفته می‌شود. در مدل توزیع جریان دوگانه علاوه بر هدایت محلول، سینتیک واکنش‌هایی که در سطح الکترو صورت می‌گیرد نیز در محاسبه‌ی توزیع جریان تاثیرگذار است. در مدل توزیع جریان سه‌گانه علاوه بر اثرات مقاومت محلول و سینتیک واکنش‌ها در سطح الکترو، اثرات انتقال جرم به خصوص اثر پلاریزاسیون غلظتی (لایه‌ی مقاوم در برابر انتقال جرم در سطح الکترودها) نیز در محاسبات وارد می‌شود [18].

در این پژوهش از مدل توزیع جریان سه‌گانه استفاده شده است. به این صورت که، توزیع غلظت فقط در لایه مرزی اطراف کاتد چرخان در نظر گرفته شده و در خارج از لایه مرزی غلظت ثابت و یکسان فرض شده است. در داخل لایه مرزی مکانیزم غالب انتقال یون‌ها از طریق نفوذ ملکولی می‌باشد و جابجای اجباری قابل صرف نظر کردن است. بر همین اساس توزیع غلظت در داخل لایه مرزی با استفاده از معادله‌ی لاپلاس بیان می‌شود [19].

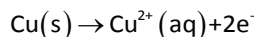
معادله ۱.

$$\nabla^2 C = 0$$

اندازه ضخامت لایه مرزی در سطح کاتد تابعی از مشخصات الکترولیت، هندسه، و نیز سرعت چرخش کاتد

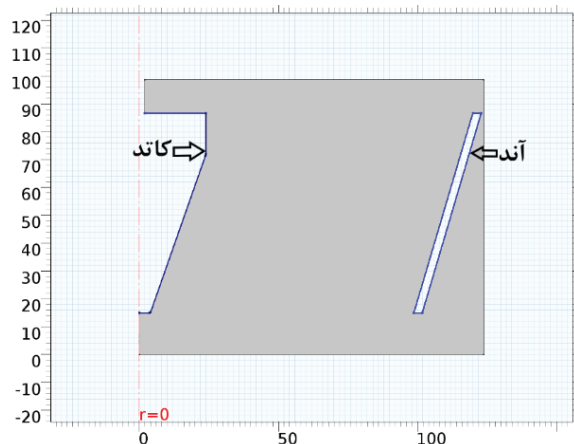


و در سطح آند نیز، واکنش زیر صورت می‌گیرد:



مدلسازی

در این پژوهش برای مدلسازی فرآیند الکتروفورمینگ، از ماژول آبکاری (Electrodeposition) و ماژول انتقال جرم (Transport of Diluted Species)، موجود در نرم افزار شبیه ساز COMSOL Multiphysics 5.2 استفاده شد [23]. این نرم افزار برای حل معادلات از روش عددی اجزاء محدود استفاده می‌کند. در روند حل مساله به دلیل طولانی بودن زمان اجرا و پیچیده تر شدن مدل در حالت سه بعدی، از فرض ساده کننده هندسه دو بعدی متقارن مطابق شکل ۳ استفاده شد:



شکل ۳. نمایی از هندسه حمام الکتروفورمینگ

در این پژوهش از مدل توزیع جریان سه‌گانه استفاده شده است. بدین صورت که با در نظر گرفتن لایه مرزی بر روی سطح کاتد و فرض مکانیزم انتقال جرم نفوذ مولکولی در آن، گرادینان غلظت در لایه مرزی روی سطح کاتد بدست آمد. در خارج از لایه مرزی به دلیل اینکه الکتروولیت تحت هم زدن و اختلاط می‌باشد غلظت ثابت در نظر گرفته شده و از اثر انتقال جرم بر توزیع جریان و پتانسیل صرف نظر شد. بنابراین در خارج از لایه مرزی با در نظر گرفتن هدایت الکتریکی ثابت، توزیع جریان و پتانسیل در الکتروولیت با مدل توزیع جریان دوگانه بدست آمد [11].

از آنجا که فرآیند آبکاری اصولاً تابعی از زمان است، در این پژوهش نیز شبیه‌سازی بصورت وابسته به زمان صورت گرفته است.

برای اعمال مش در لایه مرزی از مش چهار ضلعی و اندازه المان‌های بسیار ریز، و خارج از لایه مرزی از مش مثلثی و اندازه المان ریز استفاده شد. تعداد المان‌ها در داخل لایه مرزی ۵۰۰۰ و در خارج آن ۱۵۸۰۹ المان می‌باشد. تصویر مش در شکل ۴ نشان داده شده است.

معادله ۷.

$$\sum z_i C_i = 0$$

شرط مرزی برای آند و کاتد توسط معادله‌ی بالتر-ولمر اصلاح شده بیان می‌شود. بر همین اساس دانسیته‌ی جریان الکتریکی محلی در سطح مشترک الکتروود-الکتروولیت بصورت زیر بیان می‌شود [19]:

معادله ۸.

$$i_{\text{loc}} = i_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_a F \eta}{RT}\right) - \frac{C_{\text{Cu}^{2+},w}}{C_{\text{Cu}^{2+},b}} \exp\left(-\frac{\alpha_c F \eta}{RT}\right) \right]$$

معادله ۹.

$$\eta = V - \phi_0$$

که در رابطه‌ی بالا α_a ضریب انتقال بار آندی، α_c ضریب انتقال بار کاتدی، i_{loc} دانسیته‌ی جریان الکتریکی محلی در سطح مشترک الکتروود-الکتروولیت (A/m^2)، i_0 دانسیته‌ی جریان الکتریکی تبادل (A/m^2)، و $C_{\text{Cu}^{2+},b}$ غلظت یون مس در بالک و $C_{\text{Cu}^{2+},w}$ غلظت یون مس روی سطح کاتد است. η نیز پتانسیل اضافی نامیده می‌شود که بصورت اختلاف بین پتانسیل الکتروود V با پتانسیل الکتروولیت در مجاورت الکتروود ϕ_0 تعریف می‌شود.

به غیر از کاتد و آند بقیه‌ی مرزها عایق فرض شده است. برای مرزهای عایق با توجه به اینکه شار جریان الکتریکی و نیز شار انتقال جرم صفر است داریم [22]:

معادله ۱۰.

$$N_{\text{Cu}^{2+}} \cdot n = 0$$

برای بدست آوردن ضخامت لایه‌ی آبکاری شده در هر نقطه روی سطح کاتد از قانون فارادی بصورت زیر استفاده می‌شود [۱۰]:

معادله ۱۱.

$$d_{\text{loc}} = \frac{i_{\text{loc}} t M}{z F \rho}$$

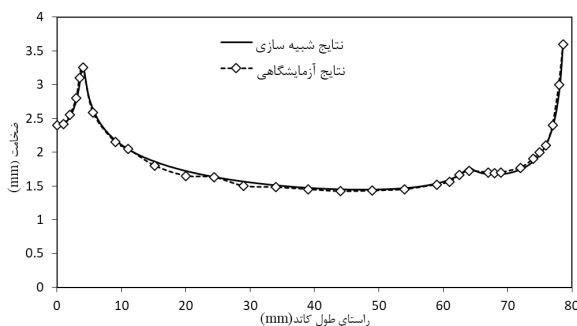
d_{loc} ضخامت آبکاری شده (m)، t زمان آبکاری (s)، M جرم مولکولی مس، ρ چگالی مس (kg/m^3) است.

برای تعیین میزان یکنواختی ضخامت، پارامتر ϵ تعریف شده است. پارامتر ϵ به عنوان معیاری از توزیع ضخامت بصورت نسبت حداقل ضخامت ایجاد شده به میانگین ضخامت در سطح کاتد و بصورت درصد تعریف می‌شود.

در مورد واکنش‌های شیمیایی نیز فرض شده است که فرآیند رسوب در سطح کاتد و حل شدن در سطح آند با بازده جریان ۱۰۰٪ صورت می‌گیرد، این بدین معنی است که از واکنش‌های جانبی در سطح الکتروودها صرف نظر شده است. بر همین اساس واکنش اصلی در سطح کاتد بصورت زیر است:

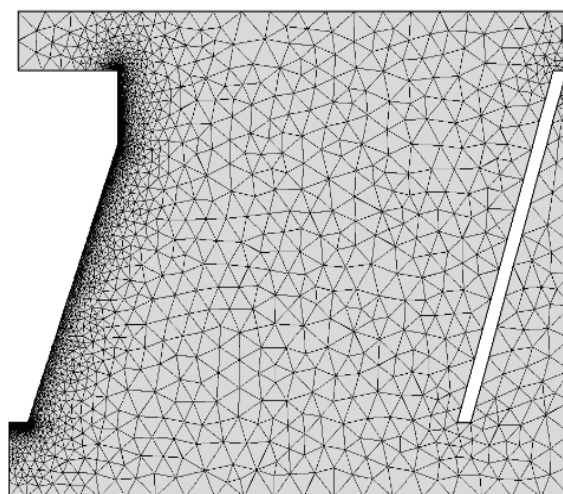
۳. نتایج و بحث

پس از اعمال شرایط مرزی و اجرای شبیه ساز، به منظور بررسی میزان دقت مدل و صحت سنجی آن، نمودار توزیع ضخامت برای داده‌های آزمایشگاهی و همچنین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۵ مقایسه شده است. همانطور که در نمودار دیده می‌شود مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد نتایج حاصل از شبیه‌سازی از دقت زیادی برخوردار می‌باشد.



شکل ۵. مقایسه ضخامت پوسته‌ی مخروطی

از مهمترین دلایل تفاوت بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی، وجود واکنش‌های جانبی در سطح



شکل ۴. مش اعمال شده

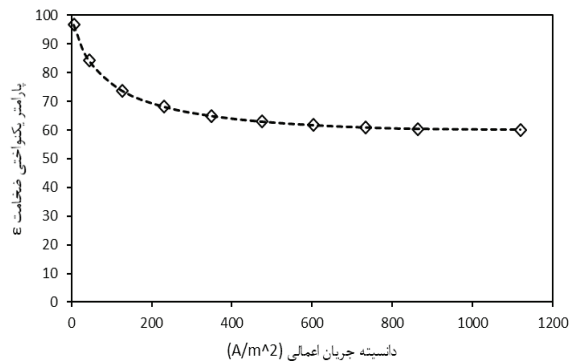
برای بررسی استقلال از مش، توزیع جریان در سطح کاتد با استفاده از دو مش ریز و ریزتر مقایسه شد که کمترین و بیشترین درصد خطا به ترتیب ۰,۰۵ و ۰,۵ بود که نشان می‌دهد جواب نهایی به مش وابسته نیست، لذا از مش با اندازه ریز برای حل معادلات استفاده شد.

مشخصات الکترولیت و پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است [24].

جدول ۱. مشخصات الکترولیت و پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی

علامت اختصاری	مقدار	پارامتر
σ	12 (S/m)	هدایت الکتریکی محلول الکترولیت
$C_{Cu^{2+},b}$	0.8 (mol/L)	غلظت یون مس (II)
$C_{H_2SO_4}$	0.8 (mol/L)	غلظت اسید سولفوریک
ρ	1200 (kg/m ³)	چگالی الکترولیت
μ	0.0012 (Pa.s)	ویسکوزیته الکترولیت
$D_{Cu^{2+}}$	5×10^{-10} (m ² /s)	ضریب نفوذ یون مس
δ_N	30×10^{-6} (m)	ضخامت لایه مرزی
V	3.1 (L)	حجم الکترولیت
T	25 (°C)	دمای الکترولیت
ω	150 RPM	سرعت چرخش کاتد
i_0	0.20 (A/m ²)	دانسیته جریان تبدالی
i_c	4.6 (A/dm ²)	دانسیته جریان کاتدی
$E_{eq,rel}$	0 (V)	پتانسیل تعادلی نسبی نسبت به واکنش مس (Cu ²⁺ /Cu)
$\phi_{s,a}$	0.6 (V)	پتانسیل آند
$\phi_{s,c}$	-0.6 (V)	پتانسیل کاتد
α_a	1.5	ضریب انتقال بار آندی
α_c	0.5	ضریب انتقال بار کاتدی

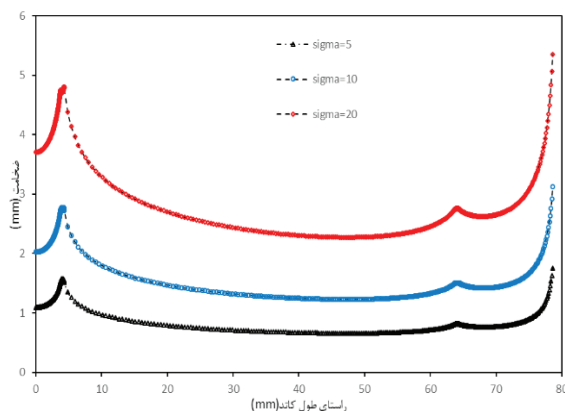
مخروط، ضخامت در این قسمت‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان یکنواختی ضخامت کاهش می‌یابد. همچنین روند کاهش پارامتر ϵ بصورت نمایی است و بعد از جریان 900 A/m^2 تقریباً ثابت است.



شکل ۷. نمودار درصد پارامتر ϵ بر حسب دانسیته‌ی جریان اعمالی

اثر هدایت الکتریکی محلول

هدایت الکتریکی محلول تابعی از میزان غلظت و نوع یون‌های موجود در الکترولیت است. هدایت الکتریکی محلول باعث انتقال جریان الکتریکی در الکترولیت است و هر چقدر هدایت الکتریکی بیش تر باشد، جریان الکتریکی بیشتری از محلول عبور می‌کند و در نتیجه ضخامت لایه‌ی الکتروفورم بیش تر و یا به عبارتی فرآیند سریع تر پیش می‌رود. در شکل ۸ نمودار توزیع ضخامت برای هدایت الکتریکی‌های مختلف نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود تغییر هدایت الکتریکی تأثیر زیادی روی مقدار ضخامت (سرعت فرآیند الکتروفورمینگ) دارد ولی تأثیر آن بر میزان یکنواختی ضخامت ناچیز است.



شکل ۸. اثر هدایت محلول بر ضخامت لایه الکتروفورم

اثر فاصله آند-کاتد

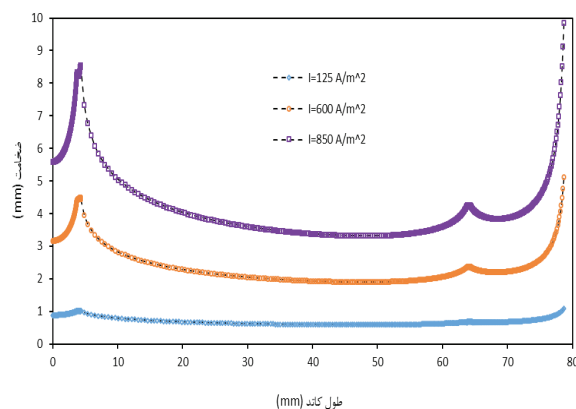
فاصله‌ی بین آند و کاتد یک پارامتر تأثیرگذار بر میزان

الکترودها است که با ایجاد حباب‌هایی در سطح الکترودها همراه می‌باشد و در نتیجه باعث مقاوت در برابر انتقال یون‌ها به سطح کاتد می‌گردد [25]. اما از آنجا که این پدیده اثر ناچیزی دارد از آن صرف نظر شده است. در ادامه اثر پارامترهای کلیدی و تأثیر گذار بر توزیع ضخامت در الکتروفورمینگ بررسی شده است.

اثر دانسیته جریان اعمالی

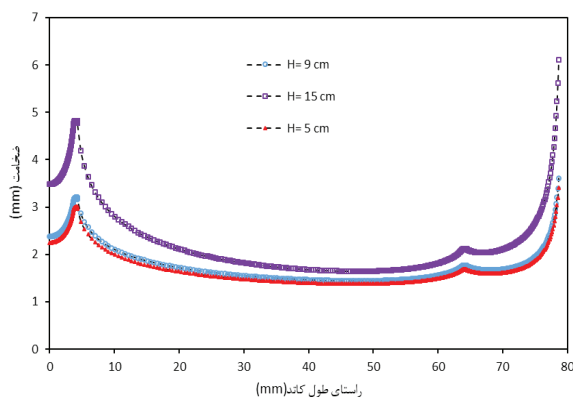
دانسیته‌ی جریان اعمالی مهم‌ترین پارامتر در فرآیند الکتروفورمینگ است، زیرا جریان باعث کنترل شرایط الکتروفورمینگ می‌شود و همچنین تأثیر مستقیم روی بازده جریان، یکنواختی ضخامت، و مهم تر از همه خواص فیزیکی و مکانیکی قطعه ساخته شده دارد. با افزایش دانسیته‌ی جریان سرعت آبرکاری مس افزایش می‌یابد. اما دانسیته جریان اضافی منجر به ساختار اسفنجی، زبر و سخت و کاهش خلوص مس در قطعه می‌شود [15].

در شکل ۶ نمودار توزیع ضخامت برای دانسیته جریان‌های مختلف رسم شده است. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود با افزایش دانسیته‌ی جریان، ضخامت لایه‌ی تشکیل شده بیشتر شده و به عبارت دیگر سرعت فرآیند بیشتر است. علاوه بر این با افزایش دانسیته‌ی جریان میزان یکنواختی ضخامت کاهش می‌یابد.



شکل ۶. نمودار توزیع ضخامت برای جریان‌های اعمالی مختلف

برای بررسی بهتر میزان یکنواختی ضخامت از پارامتر ϵ استفاده شده است. پارامتر ϵ به عنوان معیاری از میزان یکنواختی ضخامت بصورت نسبت حداقل ضخامت به میانگین ضخامت تعریف می‌شود. در شکل ۷ درصد پارامتر ϵ بر حسب دانسیته جریان اعمالی نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود در دانسیته جریان‌های کم میزان یکنواختی ضخامت زیاد است ولی با افزایش دانسیته جریان بدلیل تجمع جریان اضافی در قسمت‌های انتهایی و ابتدایی

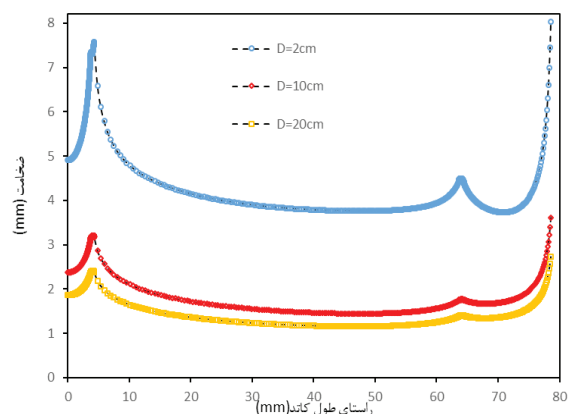


شکل ۱۰. اثر ارتفاع آند بر ضخامت

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد فرآیند الکتروفورمینگ مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور با استفاده از نرم افزار شبیه ساز کامسول، اثر دانسیته‌ی جریان، هدایت محلول، فاصله‌ی آند-کاتد، و ارتفاع آند بر میزان یکنواختی ضخامت بررسی شد. نتایج نشان داد دانسیته‌ی جریان اعمالی بیشترین تاثیر را بر میزان یکنواختی ضخامت دارد. همچنین مشخص شد هدایت محلول تاثیر قابل توجهی بر سرعت فرآیند الکتروفورمینگ دارد ولی تاثیر آن بر یکنواختی ضخامت ناچیز است. فاصله‌ی بین آند و کاتد نیز پارامتر دیگر تاثیر گذار بر یکنواختی ضخامت است که نتایج نشان داد هر چقدر این فاصله کمتر باشد یکنواختی ضخامت کم تر ولی سرعت فرآیند بیشتر است. در پایان اثر طول آند بررسی شد و نتایج نشان داد اگر طول آند و کاتد یکسان باشد یکنواختی ضخامت بیشتر است.

یکنواختی ضخامت در قطعه‌ی الکتروفورم می‌باشد. در شکل ۹ نمودار توزیع ضخامت برای سه فاصله‌ی مختلف رسم شده است. همانطور که در نمودار دیده می‌شود کاهش فاصله‌ی بین آند و کاتد منجر به غیر یکنواختی بیشتر در ضخامت می‌شود و از طرفی افزایش فاصله بین آند و کاتد باعث کم شدن ضخامت کلی و به عبارت دیگر کاهش سرعت فرآیند می‌گردد. همانطور که در نمودار شکل ۹ دیده می‌شود هنگامی که فاصله آند و کاتد خیلی کم باشد ($D=2\text{ cm}$) میزان یکنواختی ضخامت کم است و پارامتر ϵ برابر ۶۰ درصد است، در حالی که با افزایش فاصله به بیش از ۱۰ cm، مقدار ضخامت کاهش می‌یابد ولی یکنواختی آن بیشتر می‌شود و پارامتر ϵ به ۷۰ درصد می‌رسد. علاوه بر این با افزایش ضخامت به بیش از ۱۰ cm یکنواختی ضخامت تغییر چندانی ندارد، بنابراین مطلوب است که مقدار بهینه‌ای برای فاصله‌ی آند-کاتد تعیین شود.



شکل ۹. اثر فاصله‌ی بین آند و کاتد بر ضخامت

اثر اندازه‌ی ارتفاع آند

تجمع جریان اضافی در قسمت ابتدایی و انتهای کاتد ناشی از اختلاف ارتفاع کاتد و آند است. اگر طول آند خیلی بزرگتر از ارتفاع کاتد باشد قطعه‌ی الکتروفورم کاملاً غیر یکنواخت می‌شود. بنابراین لازم است که طول آند و کاتد یک اندازه باشد تا ضخامت یکنواخت تر شود. همانطور که در شکل ۱۰ نیز نشان داده شده است، با افزایش ارتفاع آند به مقدار بیش تر از ارتفاع کاتد ($H=9\text{ cm}$)، ضخامت کلی بیش تر شده ولی میزان یکنواختی کاهش چشم‌گیری داشته است و در این حالت پارامتر ϵ به ۵۳ درصد کاهش یافته در حالی که وقتی ارتفاع آند برابر ارتفاع کاتد باشد ($H=9\text{ cm}$) مقدار پارامتر ϵ برابر ۷۰ درصد است. بنابراین حالت بهینه برای ارتفاع آند مقدار برابر با ارتفاع کاتد و نحوه‌ی قرار گرفتن آن بصورت موازی با کاتد است، چرا که در این حالت تمام قسمت‌های آند فاصله‌ی برابر با قسمت‌های مقابل خود در کاتد دارند [14].

References

- [1] J. R. Davis, Copper and copper alloys. ASM international, 2001.
- [2] W. Blum and G. B. Hogaboom, "Principles of Electroplating and Electroforming (electrotyping)," 1949.
- [3] A. D. G. Murrell, "A Study of Testing Different Mandrels for Electroforming Nickel." Tennessee Technological University, 2017.
- [4] J. A. McGeough, "Electroforming," in CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Springer, 2014, pp. 443-446.
- [5] 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, 2016.
- [6] I. Mladenović, J. Lamovec, V. Jović, and V. Radojević, "Synergetic effect of additives on the hardness and adhesion of thin electrodeposited copper films," *Serbian J. Electr. Eng.*, vol. 14, no. 1, pp. 1-11, 2017.
- [7] S. Banthia, S. Sengupta, M. Mallik, S. Das, and K. Das, "Substrate effect on electrodeposited copper morphology and crystal shapes," *Surf. Eng.*, pp. 1-8, 2017.
- [8] J. Niu et al., "Effect of Electrodeposition Parameters on the Morphology of Three-Dimensional Porous Copper Foams," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 10, pp. 7331-7340, 2015.
- [9] A. Nevers, L. Hallez, F. Touyeras, and J.-Y. Hihn, "Effect of ultrasound on silver electrodeposition: Crystalline structure modification," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 40, pp. 60-71, 2018.
- [10] I. Belov, C. Zanella, C. Edström, and P. Leisner, "Finite element modeling of silver electrodeposition for evaluation of thickness distribution on complex geometries," *Mater. Des.*, vol. 90, pp. 693-703, 2016.
- [11] M. Rosales and J. L. Nava, "Simulations of Turbulent Flow, Mass Transport, and Tertiary Current Distribution on the Cathode of a Rotating Cylinder Electrode Reactor in Continuous Operation Mode during Silver Deposition," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 164, no. 11, pp. E3345-E3353, 2017.
- [12] C. T. J. Low, E. P. L. Roberts, and F. C. Walsh, "Numerical simulation of the current, potential and concentration distributions along the cathode of a rotating cylinder Hull cell," *Electrochim. Acta*, vol. 52, no. 11, pp. 3831-3840, 2007.
- [13] T. Pérez and J. L. Nava, "Numerical simulation of the primary, secondary and tertiary current distributions on the cathode of a rotating cylinder electrode cell. Influence of using plates and a concentric cylinder as counter electrodes," *J. Electroanal. Chem.*, vol. 719, pp. 106-112, 2014.
- [14] N. Obaid, R. Sivakumaran, J. Lui, and A. Okunade, "Modeling the Electroplating of Hexavalent Chromium," in COMSOL Conference. Boston 2013, 2013.
- [15] T. Elshenawy, S. Soliman, and A. Hawwas, "Influence of electric current intensity on the performance of electroformed copper liner for shaped charge application," *Def. Technol.*, vol. 13, no. 6, pp. 439-442, 2017.
- [16] M. Carpinella, M. I. Velasco, E. V. Silletta, J. M. Ovejero, S. A. Dassie, and R. H. Acosta, "Determination of flow patterns in a rotating disk electrode configuration by MRI," *J. Electroanal. Chem.*, vol. 750, pp. 100-106, 2015.
- [17] M. C. Devi, L. Rajendran, A. Bin Yousaf, and C. Fernandez, "Non-linear Differential Equations and Rotating Disc Electrodes: Pade approximation Technique," *Electrochim. Acta*, vol. 243, pp. 1-6, 2017.
- [18] M. Robison and M. L. Free, "Modeling and experimental validation of electroplating deposit distributions from copper sulfate solutions," *ECS Trans.*, vol. 61, no. 21, pp. 27-36, 2014.
- [19] L. Tong, "Tertiary current distributions on rotating electrodes," in Proceedings of the COMSOL Conference, 2011.
- [20] M. Eisenberg, C. W. Tobias, and C. R. Wilke, "Ionic mass transfer and concentration polarization at rotating electrodes," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 101, no. 6, pp. 306-320, 1954.
- [21] C. Madore, M. Matlosz, and D. Landolt, "Experimental investigation of the primary and secondary current distribution in a rotating cylinder Hull cell," *J. Appl. Electrochem.*, vol. 22, no. 12, pp. 1155-1160, 1992.
- [22] A. Giaccherini et al., "Finite elements analysis of an electrochemical coating process of an irregularly shaped cathode with COMSOL Multiphysics®," *ECS Trans.*, vol. 64, no. 35, pp. 1-8, 2015.
- [23] C. M. U. Guide, "Version 5.2, COMSOL Inc.,(2016)," Google Sch.
- [24] A. Shukla, "Modeling and measuring electrodeposition parameters near electrode surfaces to facilitate cell performance optimization." Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, 2013.
- [25] N. D. Nikolić, K. I. Popov, L. J. Pavlović, and M. G. Pavlović, "Morphologies of copper deposits obtained by the electrodeposition at high overpotentials," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 201, no. 3-4, pp. 560-566, 2006.