



بررسی تجربی و عددی تاثیر پارامترهای محیطی بر ریخت‌شناسی سطح ریزسازه‌های تولید شده با ادغام فرایند ساخت افزایشی و الکتروفرمینگ

امیر فهیمی هنزائی، سید مرتضی موسوی، جواد اکبری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: akbari@sharif.edu

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی	
دریافت: ۱۸ شهریور ۱۴۰۳	
پذیرش: ۳۰ آبان ۱۴۰۳	
کلیدواژگان:	
ریزسازه	با توسعه روزافزون حوزه میکروالکترومکانیک، تقاضا برای قطعات فلزی با ابعاد کوچک به طور چشمگیری افزایش یافته است. در میان روش‌های تولید ریزسازه‌های فلزی، فرایند لیگا با بهره‌گیری از روش الکتروفرمینگ، دقت ابعادی و صافی سطح بالایی را ارائه می‌دهد اما دارای محدودیت‌هایی چون تجهیزات گران‌قیمت و عدم انعطاف‌پذیری در طراحی می‌باشد. ادغام فرایند ساخت افزایشی و الکتروفرمینگ، محدودیت‌های فرایند لیگا در تولید ریزسازه‌های فلزی را کاهش می‌دهد. پارامترهای محیطی فرایند الکتروفرمینگ تاثیر زیادی بر ریخت‌شناسی سطح، بروز حفره و رشد قارچی محصول نهایی دارد. در پژوهش جاری تاثیر پارامترهای محیطی از قبیل فاصله آند-کاتد، اسیدی یا غیراسیدی بودن الکترولیت، غلظت سولفات مس و سیستم همزن روشن یا خاموش بر ریخت‌شناسی سطح ریزسازه‌های تولید شده با ادغام فرایند ساخت افزایشی و الکتروفرمینگ فلز مس مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با هدف صرفه‌جویی در هزینه و زمان آزمایش، از شبیه‌سازی عددی فرایند الکتروفرمینگ در نرم‌افزار کامسول برای پیش‌بینی پروفیل ضخامت لایه نشانی‌شده طی فرایند استفاده شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که افزودن مقدار ۷۸ گرم سولفوریک‌اسید به الکترولیت سبب بهبود چشم‌گیر صافی سطح می‌شود، همچنین در غلظت‌های پایین سولفات مس (حدود ۸۰ گرم بر لیتر) رشد قارچی بر لایه‌ای غالب می‌شود. با بررسی تجربی و عددی تاثیر فاصله آند-کاتد بر زبری سطح و ضخامت لایه‌نشانی شده مشاهده شد این پارامتر تاثیر کمی بر زبری و پروفیل سطح دارد. نتایج عددی، بیشینه خطای ۷/۵ درصد را نسبت به مدل تجربی نشان می‌دهند.
ساخت افزایشی	
الکتروفرمینگ	
شبیه‌سازی	
ریخت‌شناسی سطح	

Experimental and numerical study of environmental parameters' influence on the surface morphology of mesostructures fabricated by integrating additive manufacturing and electroforming processes

Amir Fahimi Hanzaei, Seyed Morteza Mousavi, Javad Akbari*

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: akbari@sharif.edu

Article Information

Original Research Paper

Received: 8 September 2024

Accepted: 20 November 2024

Keywords:

Mesostructure
Additive Manufacturing
Electroforming
Simulation
Surface Morphology

Abstract

With the rapid development of the microelectromechanical systems (MEMS) field, the demand for small-scale metallic components has significantly increased. Among the manufacturing methods for micro metal structures, the LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) process, utilizing electroforming, offers high dimensional accuracy and surface smoothness; however, it has limitations such as expensive equipment and a lack of design flexibility. The integration of additive manufacturing and electroforming processes alleviates the limitations of the LIGA process in producing micro and meso metal structures. Environmental parameters during the electroforming process have a considerable impact on surface morphology, the occurrence of voids, and dendritic growth of the final product. In this study, the effects of various environmental parameters, such as the anode-cathode distance, the acidic or non-acidic nature of the electrolyte, copper sulfate concentration, and the state of the stirring system (on or off), on the surface morphology of microstructures produced through the integration of additive manufacturing and electroforming of copper were investigated. Additionally, to save on costs and testing time, numerical simulation of the electroforming process was conducted using COMSOL software to predict the thickness profile of the deposited layer during the process. Experimental results indicate that the addition of 78 grams of sulfuric acid to the electrolyte results in a significant improvement in surface smoothness. Furthermore, at low concentrations of copper sulfate (approximately 80g/l), dendritic growth becomes predominant on the layer. Experimental and numerical investigations on the effect of anode-cathode distance revealed that this parameter has a minor impact on surface roughness and thickness of the deposited layer. The numerical results showed a maximum error of 7.5 percent compared to the experimental model.

Please cite this article using:

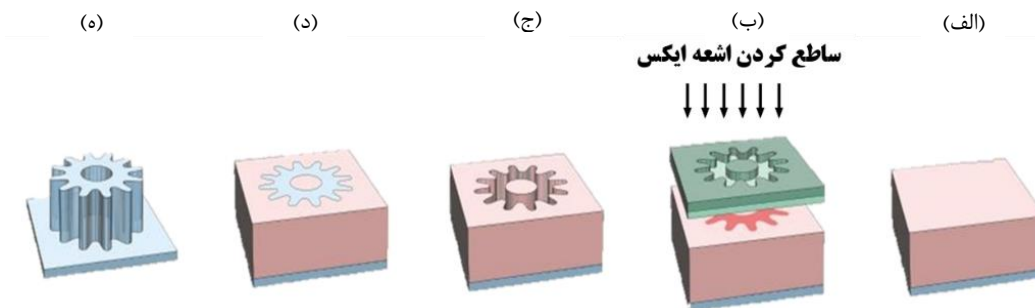
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Fahimi Hanzaei A, Mousavi SM, Akbari J. Experimental and numerical study of environmental parameters' influence on the surface morphology of mesostructures fabricated by integrating additive manufacturing and electroforming processes. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jan 20;11(11):15-25. doi: 10.22034/ijme.2024.477345.2006 [In Persian]

۱- مقدمه

ریزسازه‌های فلزی نظیر چرخ‌دنده‌ها، گیره‌ها و سیستم‌های شانه‌ای مینیاتوری، به دلیل وزن کم، اندازه کوچک، دقت ابعادی و عمر بالا؛ بخش قابل توجه‌ای از سیستم‌های میکروالکترومکانیک در کاربردهای انتقال قدرت و حرکت را تشکیل می‌دهند. ریزسازه‌های ساخته شده از جنس‌های مختلف در کاربردهای متعددی مانند: هوافضا، خودرو، ساعت سازی، پزشکی، صنایع دفاعی و غیره؛ استفاده می‌شوند [۱]. توسعه سریع صنعت میکروابزارها و میکروسیستم‌ها، چالش‌های جدیدی در زمینه تولید انبوه قطعات مزو و میکرو به وجود آورده‌است. روش‌های متنوعی برای ساخت ریزسازه‌ها، مانند: ماشینکاری مکانیکی، ماشینکاری با لیزر، ماشینکاری با تخلیه الکتریکی^۱، ماشینکاری الکتروشیمیایی^۲، لیگا^۳، وایرکات، الکتروفورمینگ، تف جوشی، لیتوگرافی، چاپ مستقیم جوهر و ... وجود دارند. درمیان روش‌های موجود، روش الکتروفورمینگ با امکان جانشانی الکتریکی یون‌های فلزی در مقیاس اتمی، فرایند ایده‌آلی در ساخت ریزسازه‌ها بشمار می‌رود [۲-۴]. این روش در مقایسه با دیگر فرایندهای موجود، ویژگی‌های منحصر به فردی مانند: دقت ابعادی بالا، تکرار پذیری فرایند، ثبات در ایجاد جزئیات روی سطوح، جانشانی در مقیاس اتمی بدون ایجاد تاثیرات منفی مکانیکی و حرارتی، توانایی تولید ریزسازه‌ها با نسبت منظر بالا را ارائه می‌کند اما ریخت‌شناسی و صافی سطح ایده‌آلی ندارد [۲، ۵، ۶].

یکی از فرایندهای موفق در ساخت میکروسازه‌های دقیق که از روش الکتروفورمینگ استفاده می‌کند، فرایند لیگا است. مراحل ساخت یک ریزچرخ‌دنده توسط فرایند لیگا در شکل ۱ نشان داده شده است [۷]. مطابق این شکل، فرایند لیگا شامل تولید قالب پلیمری ضخیم با استفاده از اشعه ایکس است که با انجام عملیات الکتروفورمینگ در قالب تولید شده، میکروسازه‌های فلزی با نسبت منظر بالا تولید خواهند شد.



شکل ۱ سازوکار تولید یک میکروچرخ‌دنده با فرایند لیگا. (الف) آماده سازی سطح و پوشش دادن سطح با پلیمر حساس به اشعه ایکس، (ب) تاباندن اشعه ایکس از میان یک ماسک، (ج) حذف شیمیایی نواحی اشعه خورده و آماده سازی قالب تولید شده برای عملیات الکتروفورمینگ، (د) انجام الکتروفورمینگ و (ه) حذف شیمیایی قالب پلیمری [۷]

اگرچه فرایند لیگا قادر به تولید میکروساختارهای فلزی با دقت و نسبت منظر بالا است، اما این روش بسیار گران بوده و دسترسی به تجهیزات آن مشکل است [۷، ۸]. همچنین این فرایند به اشعه ایکس با انرژی بالا نیاز دارد که یک تهدید برای اپراتور بشمار می‌رود و دلیل نیاز به دستگاه گران قیمت سنکروترون اشعه ایکس به صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار نمی‌گیرد [۹، ۱۰]. از طرفی در روش لیگا برای هر طرح جدید، نیاز به ساخت یک ماسک جدید وجود دارد که مقرون بصره نخواهد بود. بنابراین روش لیگا در تغییر طراحی انعطاف پذیری ندارد [۱۱]. دیگر فرایندهای تولید ریزسازه‌های موجود نیز هزینه‌های بالایی را در برمی‌گیرند یا توانایی ایجاد اشکال هندسی پیچیده را ندارند [۱۲].

بکارگیری تلفیقی فناوری ساخت افزایشی و فرایند الکتروفورمینگ، توانایی ساخت میکروسازه‌های فلزی با نسبت منظر بالا را دارا است. در این روش، قالب میکروسازه‌ها توسط فرایندهای ساخت افزایشی پلیمریزاسیون در ظرف تولید می‌شود که روشی ارزان قیمت بوده و از لحاظ قابلیت تغییر در ابعاد و هندسه طرح، انعطاف پذیری بالایی دارد. در این روش می‌توان قالبی شامل طرح‌های مختلفی از ریزسازه‌ها را با کمترین هزینه و زمان چاپ کرد و در نهایت تعداد زیادی ریزسازه با نسبت منظر بالا را در یک مرحله توسط روش الکتروفورمینگ تولید نمود.

¹ Electrical Discharge Machining

² Electrochemical Machining

³ LIGA (Lithographie, Galvanoforming, Abforming)

به عنوان یکی از پژوهش‌های پیشرو، ربیعی و همکاران [۱۳] به تولید نوآورانه ریزسازه‌ها توسط بکارگیری الکتروفرمینگ فلز مس در قالب‌های پلیمری چاپ شده با چاپگر سه بعدی رزینی LCD پرداختند. آنها توانستند با الکتروفرمینگ اسیدی مس، میکروسازه‌های فلزی با نسبت‌منظر بالا تولید کنند. در این پژوهش، ضخامت لایه‌گذاری و زمان تابش به عنوان متغیرهای ساخت قالب رزینی و چگالی شدت جریان الکتریکی به عنوان متغیر فرایند الکتروفرمینگ بر دقت ابعادی، صافی سطح و سختی ریزسازه‌ها مورد بررسی قرار گرفت تا پارامترهای بهینه فرایند جهت دستیابی به بهترین کیفیت حاصل گردد. همچنین بر نشدن کامل قالب و دقت ابعادی ناکافی در گوشه‌های تیز در برخی از شرایط تولید گزارش شد. مطابق پژوهش ربیعی و همکاران، دستیابی به سطوح بهینه پارامترهای عملکردی فرایند الکتروفرمینگ که شامل، چگالی شدت جریان، ولتاژ، دما و نرخ همزدن و ترکیب شیمیایی الکتروولیت می‌باشد، نیاز به انجام تعداد قابل توجه‌ای آزمایش تجربی دارد. بنابراین استفاده از شبیه‌سازی عددی فرایند الکتروفرمینگ می‌تواند در کاهش زمان و هزینه لازم برای بهینه سازی فرایند تولید ریزسازه‌ها مفید واقع شود. در همین راستا در سال‌های اخیر توجه زیادی به شبیه‌سازی عددی فرایند الکتروفرمینگ معطوف گردیده‌است. به عنوان نمونه، پیرادارشی و همکاران [۱۴] به مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی فرایند جانمایی الکتریکی در نرم افزار کامسول پرداختند. طی این پژوهش، یک لایه از فلز نیکل به عنوان پوشش در برابر خوردگی ناشی از عوامل محیطی بر روی یک زیرلایه از جنس مس لایه نشانی شد. این فرایند در چگالی جریان 25 A/dm^2 و دمای 50°C درجه سانتی‌گراد، طی مدت زمان یک ساعت انجام شد. پس از بررسی سطح لایه نشانی شده توسط میکروسکوپ FE-SEM، لایه‌نشانی یکنواخت نیکل با ضخامت 37 میکرومتر بر روی زیرلایه مسی مشاهده گردید. همچنین نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی، خطی بودن افزایش ضخامت لایه نشانی بر حسب زمان را نمایش دادند. در نهایت، ضخامت با $5 \pm \mu\text{m}$ و تغییرات جرم با $0.5 \pm \text{kg/m}^2$ خطا نسبت به نتایج تجربی گزارش شد. وانگ و همکاران [۱۵] در پژوهش دیگری به بهبود یکنواختی پروفیل یک میکروچرخنده نیکلی الکتروفرم شده در قالب رزینی پرداختند و موفق شدند یکنواختی را تا 45 درصد فرایندهای سنتی بهبود بخشند. در بخش اول این پژوهش و با استفاده از شبیه‌سازی عددی نرم‌افزار کامسول، اثرگذاری ارتفاع دیواره قالب بر یکنواختی پروفیل سطح مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش ارتفاع دیواره قالب از 5 به 30 میکرون، یکنواختی پروفیل سطح تا 45 درصد افزایش می‌یابد. همچنین در بخش دوم این پژوهش از چند مرحله‌ای نمودن فرایند لیتوگرافی و الکتروفرمینگ به عنوان راه حلی برای مسئله کم‌شدن ارتفاع دیواره قالب هم‌زمان با افزایش ارتفاع قطعه استفاده شد. نتایج حاصل نشان‌دادند که با افزایش ارتفاع دیواره قالب، اثر پدیده تمرکز چگالی جریان الکتریکی در لبه‌ها کاهش یافته و یکنواختی پروفیل لایه نشانی شده و صافی سطح افزایش می‌یابد. در میان فلزات قابل استفاده برای تولید ریزسازه‌ها با فرایند الکتروفرمینگ، مس یکی از فلزات پر کاربرد بشمار می‌رود. علاوه بر قیمت بسیار پایین فلز مس، علل متعددی مانند: هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، شکل‌پذیری و استحکام خوب و همچنین مقاومت مناسب نسبت به خوردگی و اکسیداسیون؛ منجر به استفاده گسترده از این فلز برای کاربردهای متنوعی در صنعت شده‌است [۱۶].

باتوجه به اهمیت ریخت‌شناسی سطح تولید شده با فرایند الکتروفرمینگ و بررسی بیشتر فرایند نوآورانه ربیعی و همکاران در ادغام فرایند ساخت افزایشی و الکتروفرمینگ برای تولید ریزسازه‌های فلزی مسی، این پژوهش به بررسی تجربی تاثیر پارامترهای محیطی فرایند الکتروفرمینگ از قبیل اسیدی یا غیراسیدی بودن حمام الکتروولیت، غلظت سولفات مس، وجود یا عدم وجود سیستم همزن بر ریخت‌شناسی سطح ریزسازه‌های لایه‌نشانی شده پرداخته است. همچنین اثرات فاصله آند تا کاتد بر یکنواختی پروفیل لایه‌نشانی شده توسط شبیه‌سازی عددی فرایند الکتروفرمینگ در نرم‌افزار کامسول (نسخه ۶.۱) مورد بررسی قرار گرفته‌است.

۲- مواد مصرفی و روش پژوهش

۲-۱- مواد مصرفی و شرایط آزمایش تجربی

در این پژوهش از فرایند الکتروفرمینگ فلز مس همراه با کاتد و آند از جنس ورق‌های مسی با خلوص 99 درصد استفاده شده است. پارامترها و مواد مصرفی مطابق پژوهش مالون و همکاران انتخاب شده است [۱۷]. ضخامت کاتد 100 میکرون و ضخامت آند 2 میلی‌متر انتخاب شد. ترکیبات شیمیایی تشکیل‌دهنده حمام الکتروولیت در جدول ۱ معرفی شده است. شرایط انجام آزمون‌های تجربی شامل جریان و ولتاژ الکتریکی، دمای حمام الکتروولیت، فاصله آند-کاتد و نرخ همزدن، در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی الکترولیت

مقدار	ماده
187 (g/dm ³)	CuSO ₄ .5H ₂ O
78 (g/dm ³)	H ₂ SO ₄
50 (mg/dm ³)	Cl ⁻

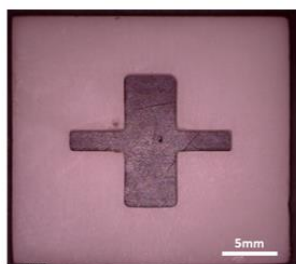
جدول ۲ شرایط انجام آزمایش

مقدار	کمیت
0.2 (V)	ولتاژ (ولت)
0.02(A)	جریان الکتریکی (آمپر)
28-32 (°C)	دمای حمام (سانتیگراد)
7 (cm)	فاصله آند-کاتد (سانتی متر)
100 (rpm)	نرخ هم‌زدن (دور بر دقیقه)

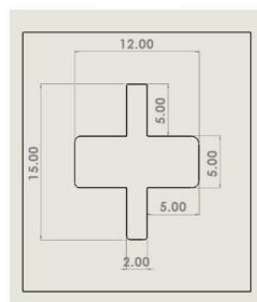
۲-۲- روش انجام آزمایش

تولید ریزسازه‌های فلزی به روش ادغام فرایند ساخت‌افزایشی و الکتروفرمینگ، نیاز به تولید قالب متناسب با ابعاد و هندسه ریزسازه انتخابی دارد. در این مطالعه، مطابق پژوهش ربیعی و همکاران، از چاپگر سه‌بعدی رزینی LCD که دقت مناسبی را ارائه می‌دهد، برای تولید قالب استفاده شده است. رزین ABS Like به عنوان جنس استفاده‌شده برای چاپ سه‌بعدی قالب انتخاب گردید و پارامترهای چاپ قالب شامل ضخامت لایه‌گذاری ۵۰ میکرومتر و زمان تابش ۵ ثانیه انتخاب شد. علت استفاده از این نوع رزین، ویژگی‌های کلیدی از جمله: انقباض بسیار کم پس از فرایند پخت، استحکام بالا و عدم شکنندگی و همچنین خنثی و بی اثر بودن نسبت به طیف وسیعی از مواد شیمیایی از جمله محلول الکترولیت اسیدی مس، می‌باشد. قالب تولید شده و ابعاد آن در شکل ۲ نمایش داده شده است. در مرحله بعد، قالب چاپ شده بر روی یک ورق مس خالص نصب شد. این ورق مسی نقش کاتد را در فرایند الکتروفرمینگ ایفا می‌کند. همچنین تمامی سطوح ورق کاتد به غیر از ناحیه‌ای که ته قالب را مسدود می‌نماید، عایق کاری می‌شوند. برای تنظیم دقیق موقعیت آند و کاتد نسبت به هم، فیکسچرهایی از جنس پلی‌لاکتیک اسید طراحی و تولید شدند. برای ساخت فیکسچرها از یک چاپگر سه‌بعدی FDM استفاده شد. مطابق شکل ۳، پس از آماده‌سازی و نصب قالب-کاتد و آند روی فیکسچرها، کل مجموعه در یک بشر یک لیتری محتوی حمام الکترولیت اسیدی مس غوطه‌ور شده و آند و کاتد به یک منبع تغذیه DC قابل تنظیم متصل می‌گردند. به منظور هم‌زدن حمام الکترولیت در حین فرایند، در این پژوهش از یک سیستم هم‌زن مغناطیسی استفاده شده است.

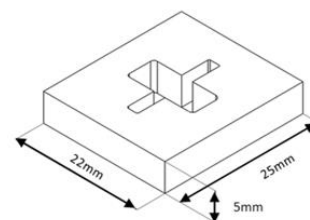
(ج)



(ب)

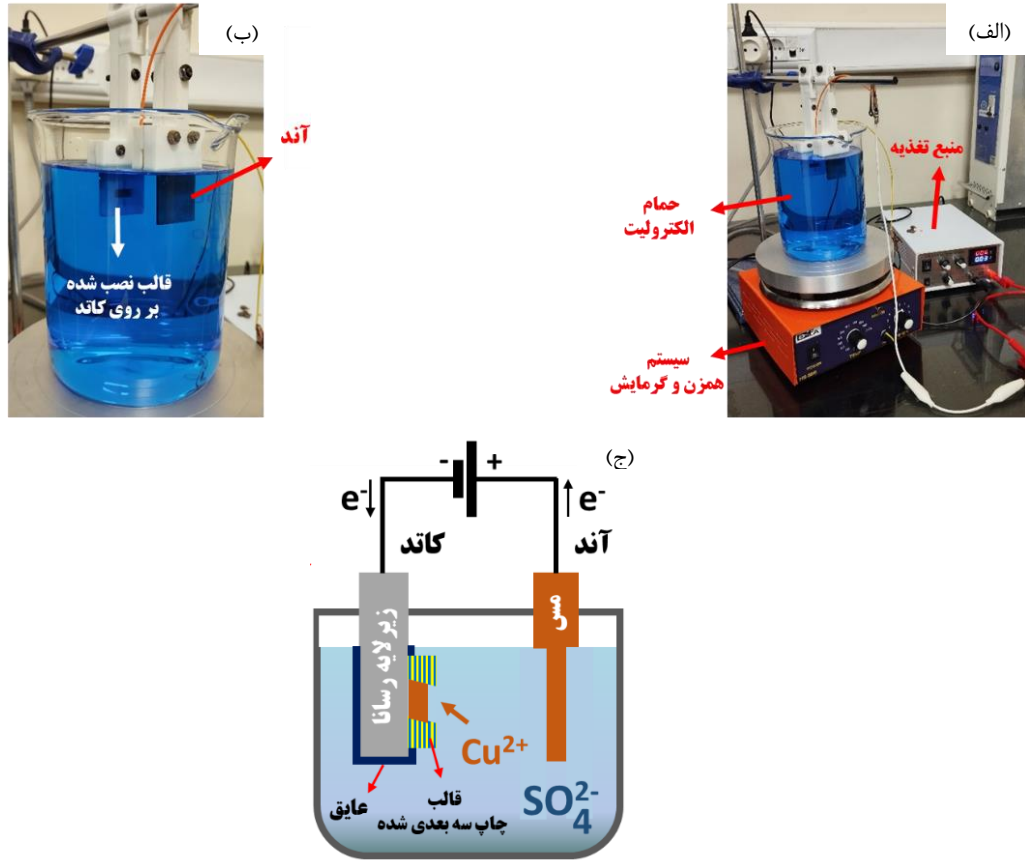


(الف)



شکل ۲ الف) مشخصات ابعادی و هندسی بخش بیرونی قالب، ب) مشخصات ابعادی و هندسی بخش داخلی قالب و ج) تصویر قالب تولید شده

در این بخش و مطابق جدول ۳، تاثیر فاصله کاتد-آند، غلظت سولفات مس، اسیدی یا غیراسیدی بودن الکترولیت و وجود یا عدم وجود هم‌زن بر ریخت‌شناسی سطح نمونه‌های تولید شده با فرایند الکتروفرمینگ بررسی شده است. معیار تولید ریزسازه‌ها در جدول ۳ مشخص شده است و در هر بخش از آزمایش‌های تجربی، تمامی پارامترهای محیطی به جزء پارامتری که اثر آن تحت بررسی بوده است، مطابق معیار انتخاب شده‌اند. همچنین برای اندازه‌گیری پروفیل و صافی سطح از پروفیلومتر لیزری مدل LPM-D1 ساخت شرکت کهربا استفاده شد.



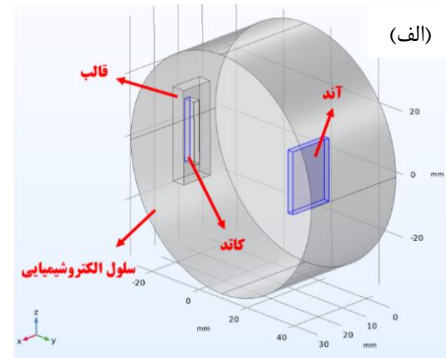
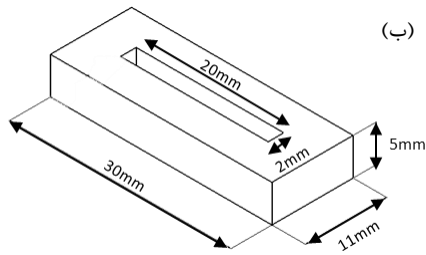
شکل ۳ الف) سیستم الکتروفرمینگ آزمایشگاهی، ب) آند و قالب نصب شده بر کاتد و ج) شماتیکی از شرح عملکرد فرایند تولید ریزسازه‌های فلزی

جدول ۳ متغیرهای تولید ریزسازه‌های تولید شده با فرایند الکتروفرمینگ فلز مس

عنوان	مقدار
تاثیر فاصله آند-کاتد	۳۰ میلی‌متر ۷۰ میلی‌متر (معیار تولید ریزسازه‌ها)
تاثیر اسیدی یا غیراسیدی بودن الکترولیت	بدون اسید (معیار تولید ریزسازه‌ها) ۷۸ گرم برلیتر سولفوریک‌اسید
تاثیر غلظت سولفات مس	۱۸۷ گرم بر لیتر (معیار تولید ریزسازه‌ها) ۸۰ گرم بر لیتر
تاثیر وجود یا عدم وجود سیستم همزن	همراه با همزن (معیار تولید ریزسازه‌ها) بدون همزن

۲-۳- شبیه‌سازی عددی فرایند الکتروفرمینگ

شبیه‌سازی عددی فرایند الکتروفرمینگ با استفاده از ماژول الکتروشیمیایی نرم‌افزار چندفیزیکی کامسول (نسخه ۶،۱) و مطابق شکل ۴-الف انجام شده است. جدول ۴، پارامترها و شرایط شبیه‌سازی عددی فرایند الکتروفرمینگ را نمایش می‌دهد. در این بخش و باهدف جلوگیری از اثرگذاری ناخواسته هندسه قالب بر نتایج شبیه‌سازی، یک تیغه مورد مطالعه قرار گرفته‌است. همچنین به منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی از آزمایش تجربی استفاده شده است. برای صحت‌سنجی، ضخامت یک تیغه مسی تولید شده طی زمان الکتروفرمینگ ۲۴ ساعت در یک قالب جدید مطابق شکل ۴-ب اندازه‌گیری شده و نتایج با داده‌های عددی مقایسه شده است. اندازه‌گیری ضخامت تیغه توسط میکروسکوپ دیجیتال شرکت Dino-Lite انجام شده است.



شکل ۴ الف) شماتیکی از نحوه قرارگیری اجزاء فرایند الکتروفرمینگ در نرم افزار کامسول، ب) مشخصات ابعادی قالب چاپ سه‌بعدی شده برای بخش صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی و ج) تصویر قالب تولید شده

جدول ۴ شرایط شبیه‌سازی عددی فرایند الکتروفرمینگ

مقدار	پارامتر
10 (S/m)	رسانایی الکترولیت
0.8 (mol/L)	غلظت یون مس (Cu^{2+})
0.8 (mol/L)	غلظت H_2SO_4
3×10^{-10} (m^2/s)	ضریب انتشار یون مس (Cu^{2+})
25 ($^{\circ}\text{C}$)	دمای سلول الکتروشیمیایی
10 (A/m^2)	چگالی جریان قابل تبادل
4 (A/dm^2)	چگالی جریان کاتدی
1.5	ضریب انتقال بار آندی
0.5	ضریب انتقال بار کاتدی

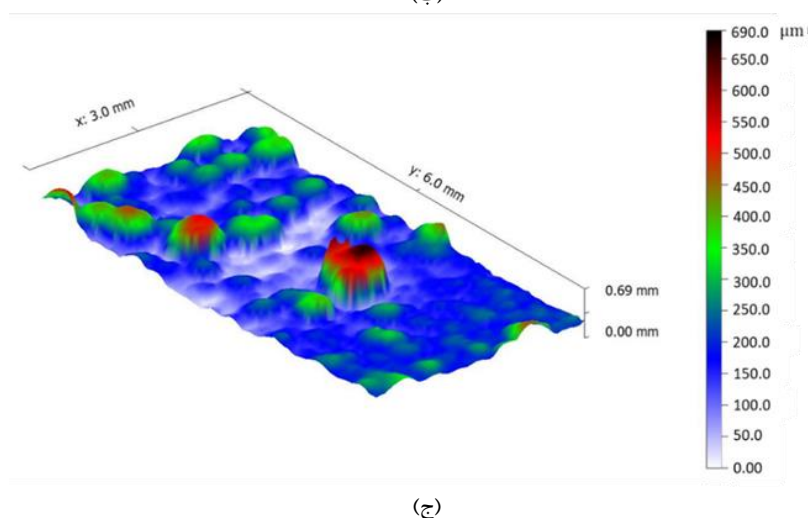
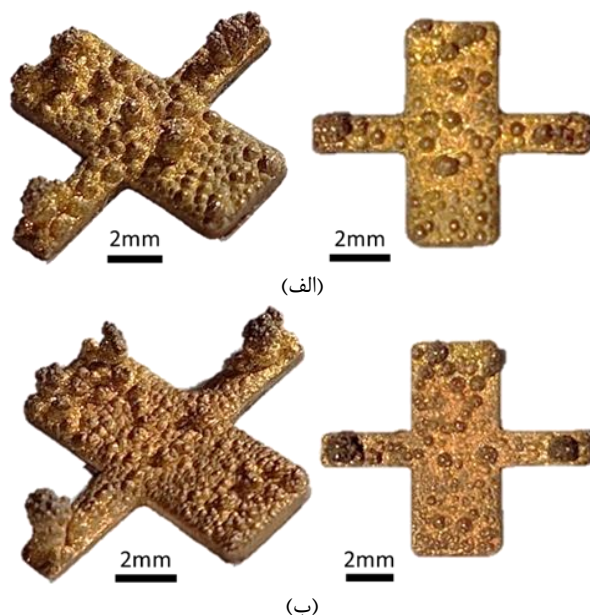
پس از شبیه‌سازی فرایند تولید تیغه مسی تحت شرایط مشابه با فرایند تولید تجربی، پروفیل تیغه لایه‌نشانی شده بعد از گذشت ۲۴ ساعت از آغاز فرایند، در دو حالت عددی و تجربی مقایسه شده است. همچنین در مرحله بعد، پروفیل تیغه لایه‌نشانی شده با فاصله آند تا کاتد در دو حالت ۳۰ و ۷۰ میلی‌متر شبیه‌سازی و محاسبه شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آزمایش تجربی

پس از فرایند الکتروفرمینگ، ریزسازه‌های تولید شده از قالب خارج شده و ریخت‌شناسی سطح آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان اولین آزمایش تجربی، اثر تغییر فاصله آند و کاتد بر ریخت‌شناسی سطح بررسی شده است. پیش‌بینی اولیه نشان می‌داد که با تغییر فاصله آند و کاتد، مسیر طی شده توسط یون‌های موجود در الکترولیت تغییر می‌کند، بنابراین با تغییر فاصله آند و کاتد در سلول الکتروشیمیایی، مقاومت محلول دچار تغییر خواهد شد. این تغییرات می‌تواند منجر به تغییر ضخامت لایه‌نشانی شده گردد و یکنواختی پروفیل لایه نشانی شده را تغییر دهد؛ اما بررسی نتایج تجربی اثر فاصله آند-کاتد بر ریخت‌شناسی سطح طی آزمایش انجام شده در

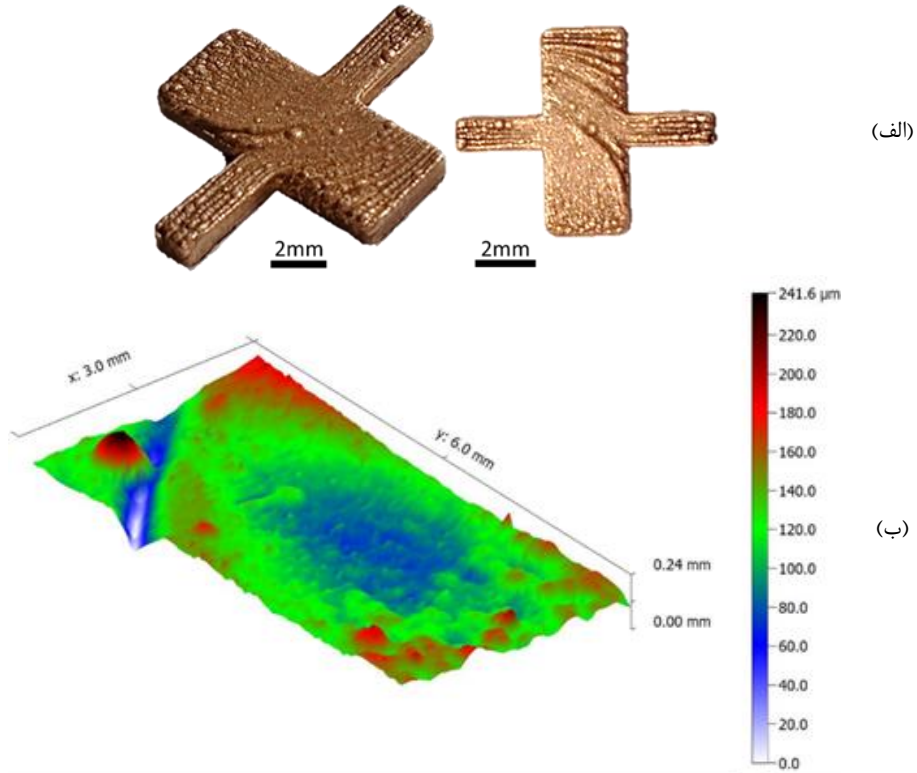
این پژوهش، تاثیر تقریباً ناچیز فاصله دو الکتروود بر صافی سطح ریزسازه‌های تولید شده را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵، سطح قطعات تولید شده شامل لایه‌های رسوبی قارچی شکل تقریباً مشابه است. این لایه‌ها معمولاً بلافاصله پس از پر شدن قالب تشکیل می‌شوند و برای دستیابی به قطعه نهایی، به عملیات پس‌پردازش تکمیلی مانند سنگزنی نیاز خواهد بود. همچنین نتایج پروفیل سطح قطعات تولید شده با فاصله آند-کاتد ۷۰ میلی‌متر در شکل ۵-ج نمایش داده شده است. فاصله آند-کاتد ۷۰ میلی‌متر به عنوان معیار فاصله دو الکتروود برای تولید و مقایسه دیگر قطعات استفاده شده است.



شکل ۵ تصویر ریزسازه تولید شده با فاصله آند-کاتد، (الف) ۳۰ میلی‌متر، (ب) ۷۰ میلی‌متر و (ج) پروفیل سطح تولید شده با فاصله آند-کاتد ۷۰ میلی‌متر

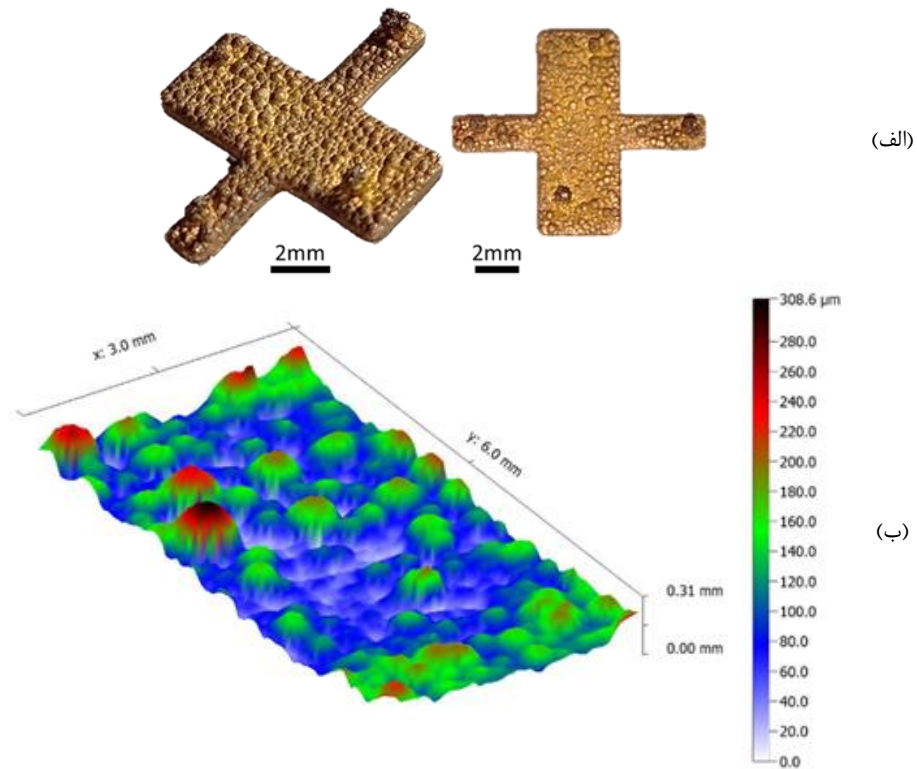
نتایج تولید ریزسازه‌ها با الکتروولیت حاوی سولفوریک‌اسید، تاثیر قابل توجه اسیدی یا غیراسیدی بودن الکتروولیت بر ریخت‌شناسی سطح قطعات تولید شده را نمایش می‌دهد. سولفوریک‌اسید به عنوان الکتروولیت پشتیبان^۱ در فرایند الکتروفرمینگ فلز مس، نقش تعیین کننده‌ای در خواص ظاهری و مکانیکی محصول خروجی ایفا می‌کند. نقش سولفوریک‌اسید به عنوان الکتروولیت پشتیبان شامل کمک به حفظ رسانایی محلول الکتروولیت و انتقال موثر یون‌ها در حین فرایند و همچنین تثبیت PH و بوجود آوردن محیط مناسب برای انجام واکنش‌های شیمیایی به طور منظم و یکنواخت، می‌باشد. مطابق شکل ۶، تنها با افزودن ۷۸ گرم بر لیتر سولفوریک‌اسید، صافی سطح بهبود چشمگیری نسبت به نمونه تولید شده بدون اسید (شکل ۵-ب) داشته است.

^۱ Supporting Electrolyte



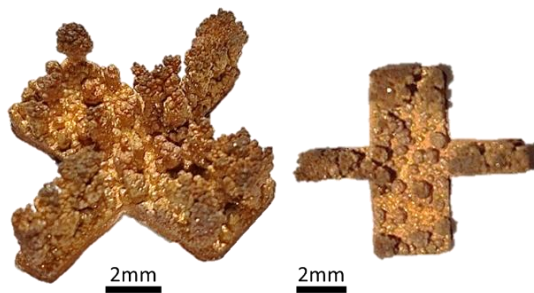
شکل ۶ الف) تصویر ریزسازه تولید شده با ۷۸ (گرم بر لیتر) سولفوریک‌اسید و ب) پروفیل سطح آن

بررسی تولید ریزسازه‌ها با همزن خاموش، اهمیت نقش همزن در فرایند الکتروفرمینگ را نمایش می‌دهد. شکل ۷، ریخت‌شناسی و پروفیل سطحی ریزسازه تولید شده بدون همزن را نمایش می‌دهد که صافی سطح بهتری نسبت به ریزسازه تولید شده با همزن (شکل ۵-ب) را نمایش می‌دهد که می‌تواند ناشی از تغییرات غلظت یون‌های مس در سطح مشترک الکترولیت با ناحیه لایه نشانی باشد.



شکل ۷ الف) تصویر ریزسازه تولید شده با همزن خاموش و ب) پروفیل سطح آن

همچنین نتایج غلظت سولفات مس نشان می‌دهد که تغییر غلظت این ماده ریخت‌شناسی سطح قطعات تولیدی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. شکل ۸، سطح ریزسازه تولید شده با ۸۰ گرم بر لیتر سولفات مس را نمایش می‌دهد که شامل ساختارهای قارچی شکل نسبتاً بزرگی می‌باشد و منجر به صافی سطح پایین تری نسبت به ریزسازه تولید شده با ۱۸۷ گرم بر لیتر سولفات مس (شکل ۵-ب) شده است. این آزمایش نشان داد که در صورت کمبودن سولفات مس، غلظت یون‌های مس کاهش یافته و طی زمان ثابت امکان ایجاد یک لایه یکنواخت کاهش پیدا می‌کند. در این حالت پیش‌بینی می‌شود که لایه‌ها به شکل ستونی و در نواحی که غلظت یون‌های مس بیشتر است، جانمایی و رشد خواهند کرد که منجر به ایجاد ساختارهای قارچی شکل بزرگ، به مانند شکل ۸ خواهند شد.

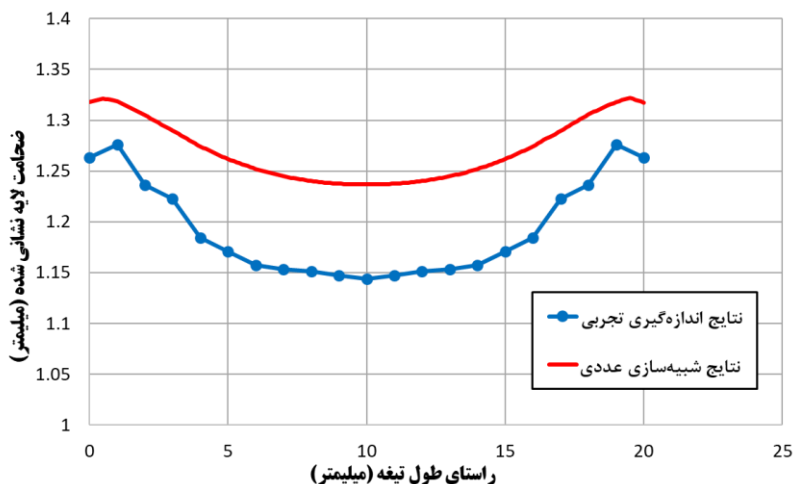


شکل ۸ تصویر ریزسازه تولید شده با ۸۰ گرم بر لیتر سولفات مس.

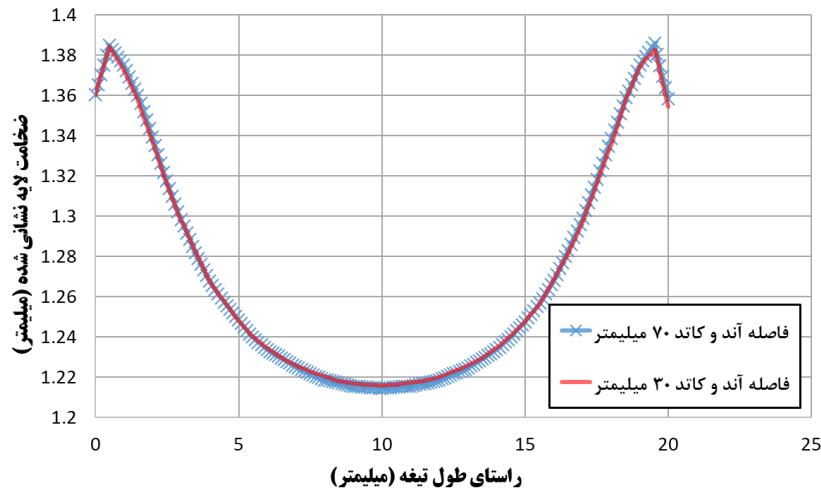
۳-۲- نتایج شبیه‌سازی عددی

طی اولین بررسی عددی فرایند، پروفیل ضخامت تیغه لایه نشانی شده در راستای طول تیغه، شبیه‌سازی شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی انجام شده با نتایج اندازه‌گیری تجربی، دقت قابل قبول و توانایی پیش‌بینی مناسب مدل عددی استفاده شده را نشان می‌دهد. میزان خطای نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در نقاط ابتدایی (لبه) و وسط تیغه به ترتیب $3/3$ و $7/5$ درصد است. شکل ۹، پروفیل ضخامت تیغه لایه‌نشانی شده توسط شبیه‌سازی عددی و مقادیر ضخامت اندازه‌گیری شده توسط میکروسکوپ در ۲۰ نقطه با فاصله ثابت یک میلی‌متر را نمایش می‌دهد. همچنین نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهند که ضخامت تیغه لایه‌نشانی شده در وسط تیغه کمتر از لبه‌ها خواهد بود که پیش‌بینی می‌شود این پدیده به علت شدت بالاتر چگالی جریان الکتریکی در لبه‌ها اتفاق می‌افتد. تغییرات جزئی جریان و ولتاژ منبع تغذیه، ایده‌آل نبودن شرایط همزدن الکترولیت و دیگر عوامل محیطی پیش‌بینی نشده می‌تواند از جمله علل اختلاف پروفیل‌های ضخامت عددی و تجربی باشند.

در مرحله بعد و مطابق شکل ۱۰، پروفیل تیغه لایه نشانی شده با فاصله آند-کاتد ۳۰ و ۷۰ میلی‌متر شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی عددی، درستی نتایج بدست آمده از آزمایش تجربی را اثبات کرد. بنابراین، نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی انجام‌شده طی این پژوهش، عدم تاثیرپذیری پروفیل ضخامت لایه‌نشانی شده با تغییرات فاصله آند و کاتد در محدوده آزمایش این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری تجربی پروفیل تیغه لایه‌نشانی شده



شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی عددی پروفیل تیغه لایه‌نشانی شده با فاصله آند-کاتد ۳۰ و ۷۰ میلی‌متر

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تجربی و عددی اثر پارامترهای محیطی فرایند الکتروفورمینگ بر ریخت‌شناسی سطح ریزسازه‌های تولید شده توسط الکتروفورمینگ فلز مس در قالب‌های چاپ شده با فناوری ساخت افزایشی پرداخته شد. فاصله کاتد-آند، غلظت سولفات مس، اسیدی یا غیراسیدی بودن الکترولیت و وجود یا عدم وجود هم‌زن؛ پارامترهای محیطی بررسی شده طی این پژوهش بودند. در ادامه به خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده اشاره شده است:

- مقایسه ریخت‌شناسی سطح ریزسازه‌های تولید شده با فاصله آند-کاتد ۳۰ و ۷۰ میلی‌متر نشان می‌دهد که فاصله دو الکتروود در محدوده آزمایش این پژوهش، اثر قابل توجهی بر سطح نمونه‌های تولیدی ندارد. پیش‌بینی می‌شود علت این پدیده وجود بازه‌ای بهینه برای فاصله آند-کاتد باشد، به نحوی که در این بازه فاصله‌ای انتقال یون‌ها و واکنش‌های شیمیایی به صورت یکنواخت انجام پذیرفته و صافی سطح و یکنواختی پروفیل لایه نشانی شده در بهترین حالت خود می‌باشد. این بازه بهینه به متغیرهای زیادی از قبیل: ترکیب الکترولیت، هندسه سلول، نوع و شدت تحریک مکانیکی بستگی دارد و در اکثر موارد از طریق سعی و خطا در آزمایش‌های تجربی یا شبیه‌سازی‌های عددی، تعیین می‌گردد.
- اسیدی بودن الکترولیت و غلظت سولفوریک اسید اثر قابل توجهی بر ریخت‌شناسی سطح ریزسازه‌ها دارد و استفاده از مقادیر نسبتاً کم از اسید (۵۰ تا ۱۰۰ گرم بر لیتر)، می‌تواند صافی سطح را به شکل چشمگیری بهبود بخشد.
- غلظت سولفات مس تاثیر زیادی بر ریخت‌شناسی سطح قطعات تولیدی دارد. به طور کلی پیش‌بینی می‌شود با کاهش غلظت سولفات مس، ریخت‌شناسی سطح از لایه‌های یکنواخت به قارچی شکل تبدیل شوند که این موضوع احتمالاً به دلیل کاهش در غلظت یون‌های مس و رسانایی محلول و در نتیجه افزایش تمرکز موضعی چگالی جریان ایجاد می‌شود.
- بررسی تاثیر هم‌زدن محلول الکترولیت، اهمیت نقش هم‌زن در تولید ریزسازه‌ها با فرایند الکتروفورمینگ را نمایش داد. استفاده از هم‌زن با دور مناسب، به نحوی که جریانی آرام و نه مخشوش از سیال الکترولیت را در سلول ایجاد کند، می‌تواند صافی سطح ریزسازه‌های تولیدی را بهبود بخشد.
- نتایج عددی و تجربی نشان داد که ضخامت تیغه لایه‌نشانی شده در وسط تیغه کمتر از لبه‌ها خواهد بود که پیش‌بینی می‌شود این پدیده به علت شدت بالاتر چگالی جریان الکتریکی در لبه‌ها اتفاق می‌افتد.
- تغییرات ضخامت در راستای طول تیغه در دو نمونه عددی و تجربی با تقریب مناسبی برابر بوده و اختلاف پروفیل‌های ضخامت، می‌تواند ناشی از خطای تنظیم جریان و ولتاژ منبع تغذیه، ایده آل نبودن شرایط هم‌زدن الکترولیت و دیگر عوامل محیطی پیش‌بینی نشده باشد.
- مدلسازی عددی می‌تواند پروفیل ضخامت لایه نشانی شده را در صورت عدم بروز رشد قارچی و دیگر عیوب احتمالی ناشی از شرایط تولید، با دقت بالایی پیش‌بینی کند.

References

- [1] Hsu TR. MEMS and microsystems: design, manufacture, and nanoscale engineering. John Wiley & Sons; 2008 Mar 17.
- [2] Hernández P, Campos D, Socorro P, Benítez A, Ortega F, Díaz N, Marrero MD. Electroforming applied to manufacturing of microcomponents. *Procedia engineering*. 2015 Jan 1;132:655-62. doi: [10.1016/j.proeng.2015.12.544](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.544)
- [3] McGeough JA, Leu MC, Rajurkar KP, De Silva AK, Liu Q. Electroforming process and application to micro/macro manufacturing. *CIRP Annals*. 2001 Jan 1;50(2):499-514. doi: [10.1016/S0007-8506\(07\)62990-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62990-4)
- [4] Yang H, Kang SW. Improvement of thickness uniformity in nickel electroforming for the LIGA process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000 May 1;40(7):1065-72. doi: [10.1016/S0890-6955\(99\)00107-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00107-8)
- [5] Huang C, Li HY, Zhu MJ, Yu MM. Present research situation and new trends of electroforming. *Applied Mechanics and Materials*. 2013 Mar 21;278:401-5. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.278-280.401](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.278-280.401)
- [6] Li H, Jiang K, Guo Y, Peng Y. Research on bipolar pulse current electroforming in precision molds and dies. *Tsinghua Science and Technology*. 2009 Jun;14(S1):144-8. doi: [10.1016/S1007-0214\(09\)70082-3](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70082-3)
- [7] Gupta K, Jain NK, Laubscher R. Chapter 4-advances in gear manufacturing. *Advanced gear manufacturing and finishing*. 2017:67-125.
- [8] Chai J, Zhang K, Xue Y, Liu W, Chen T, Lu Y, Zhao G. Review of MEMS based Fourier transform spectrometers. *Micromachines*. 2020 Feb 20;11(2):214. doi: [10.3390/mi11020214](https://doi.org/10.3390/mi11020214)
- [9] Genolet G, Lorenz H. UV-LIGA: From development to commercialization. *Micromachines*. 2014 Jul 23;5(3):486-95. doi: [10.3390/mi5030486](https://doi.org/10.3390/mi5030486)
- [10] Malekabadi A, Paoloni C. UV-LIGA microfabrication process for sub-terahertz waveguides utilizing multiple layered SU-8 photoresist. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2016 Jul 8;26(9):095010. doi: [10.1088/0960-1317/26/9/095010](https://doi.org/10.1088/0960-1317/26/9/095010)
- [11] Van Erps J, Vervaeke M, Ottevaere H, Hermanne A, Thienpont H. Deep proton writing for the rapid prototyping of polymer micro-components for optical interconnects and optofluidics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2013 Jul 15;307:243-7. doi: [10.1016/j.nimb.2012.10.023](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.10.023)
- [12] Zhang H, Zhang N, Gilchrist M, Fang F. Advances in precision micro/nano-electroforming: a state-of-the-art review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2020 Jul 30;30(10):103002. doi: [10.1088/1361-6439/aba017](https://doi.org/10.1088/1361-6439/aba017)
- [13] Rabiei Motmaen F. Design and Development of the Electroforming Fabrication Process for Metallic Microstructures Using Additive Manufacturing Molds [master's thesis]. Tehran: Sharif University of Technology; 2023. [In Persian]
- [14] Priyadarshi P, Kishore K, Maurya R. Electrodeposited Ni on copper substrate: an experimental and simulation comparative study. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2023 Aug;17(4):1489-95. doi: [10.1007/s12008-022-01166-8](https://doi.org/10.1007/s12008-022-01166-8)
- [15] Wang H, Xie J, Fan T, Sun D, Li C. Improving the thickness uniformity of micro gear by multi-step, self-aligned lithography and electroforming. *Micromachines*. 2023 Mar 30;14(4):775. doi: [10.3390/mi14040775](https://doi.org/10.3390/mi14040775)
- [16] Mohammadi Arani I, Montazerolghaem H. Effect of Electroforming Process Parameters with One-way Pulse Current and Reverse Pulse Current (PRC) on Mechanical Properties and Thickness Uniformity of Produced Copper U-shaped. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Dec 21;7(10):61-72. doi: [10.1007/s12008-022-01166-8](https://doi.org/10.1007/s12008-022-01166-8) [In Persian]
- [17] Malone GA, Hudson W, Babcock B, Edwards R. Improved electroformed structural copper and copper alloys. 1998 Nov 1.