ماەنامە علمى پژوھشى

مهندسی ساخت و تولید ایران www.smeir.org



تأثیر پارامترهای فرآیند الکتروفرمینگ درجریان پالسی یک طرفه و معکوس بر خواص مکانیکی و یکنواختی ضخامت نمونههای قطعه U شکل مسی

ایمان محمدی ارانی¹، حمید منتظرالقائم^{2,3 *}

1- دانشجوى كارشناسى ارشد، گروه مهندسى مكانيك، واحد نجف أباد، دانشگاه أزاد اسلامي، نجف أباد، ايران. 2- استاديار، گروه مهندسي مكانيك، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامي، نجف آباد، ايران. 3- استادیار، مرکز تحقیقات فناوریهای نوین ساخت و تولید، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران * نجف آباد، صندوق پستى 8514143131 ، montazerghaem@pmc.iaun.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
هدف از انجام این تحقیق استفاده از تکنیک جدید مبنی بر استفاده از جریان پالسی یک طرفه و جریان پالسی معکوس شونده و با استفاده از آند مارپیچ شکل جهت دستیابی به ضخامت یکنواخت در دیواره قطعات U شکل مسی تولید شده است. ایده نوآورانه در این تحقیق استفاده از آند استوانهای فنری شکل و قرار دادن مندرل در وسط آند میباشد. آزمایشات اولیه به وسیله آند صفحه ای شکل رایج انجام شد و مشخص گردید آند مارپیچ شکل، باعث بهبود یکنواختی ضخامت میشود. خواص مکانیکی قطعات تولید شده در این دو روش	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 16 تیر 1399 داوری اولیه: 15 مرداد 1399 پذیرش: 17 شهریور 1399
بررسی و با هم مقایسه شده است. همچنین تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی خواص مکانیکی و یکنواختی ضخامت بررسی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که آزمایشاتی که با جریان پالسی معکوس انجام شدهاند دارای ضخامت یکنواخت تر و سطحی براق تر و سختی بیشتر نسبت به جریان پالسی یک طرفه می باشد. همچنین نتایج نشان داد شدت جریان بیشترین تأثیر را بر روی ضخامت دارد. افزایش شدت جریان به همراه افزایش فاصله زمانی بین پالس فوروارد و معکوس باعث افزایش سختی پوشش شده است. بیشترین مقدار سختی بدست آمده در جریان پالسی معکوس شونده برابر با 133 ویکرز بود و بیشترین استحکام مکانیکی بدست آمده در جریان پالسی معکوس شونده برابر با 142 مگاپاسکال است. بیشترین میزان سختی و استحکام مکانیکی بدست آمده در جریان پالسی یک طرفه برابر با 131 ویکرز و 160 مگاپاسکال بود. در مجموع نتایج نشان داد میزان یکنواختی ضخامت و سختی در جریان پالس معکوس شونده بیشتر از جریان پالس	کلیدواژگان: الکتروفرمینگ آند مارپیچ پالس یک طرفه پالس معکوس

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**

Iman Mohammadi Arani¹, Hamid Montazerolghaem^{1,2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Modern Manufacturing Technologies Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

* P.O.B. 8514143131, Najafabad, Iran, montazerghaem@pmc.iaun.ac.ir

Article Information	Abstract
Original Research Paper Received: 6 July 2020 First Decision: 5 August 2020 Accepted: 7 September 2020	The purpose of this research is usage of new technique based on the reverse pulse current and using of spiral shaped anode to achieve high strength and uniformity thickness in the wall of U-shaped workepiece. The innovative idea in this study is to use spring-shaped cylindrical anode and place the mandrel in the middle of the anode. Preliminary tests were performed with a common plate-shaped anode, and it was found that the
Keywords: Electroforming Spiral anode One-way pulse Forward pulse Reverse pulse	helical anode improves the thickness. The mechanical properties of the parts produced by these two methods were examined and then compared. The effect of process parameters on mechanical properties and thickness uniformity has also been investigated. The results of this study showed that the experiments performed with reverse pulse current have a more uniform and glossy surface thickness and greater hardness than one-way pulse current. The results also showed that current intensity has the greatest effect on thickness. Increasing the intensity of the flow along with increasing the time interval between the forward and reverse pulses has increased the hardness of the coating. The maximum hardness obtained in reverse pulse current was 133 Vickers and the maximum mechanical strength obtained in reverse pulse current is equal to 131 Vickers and 160 MPa.Overall, the results showed that the uniformity of thickness and hardness in reverse pulse current is higher than in one-way pulse current, but the degree of mechanical strength is higher in one-way pulse current samples.

Please cite this article using:

1– مقدمه

امروزه با توجه به گسترش صنایع پیشرفته، تولید تجهیزات فلزی با استفاده از تکنولوژیهای نوین اهمیت ویژهای یافته است. درمیان تجهیزات صنعتی، قطعات پوستهای بسیار نازک به دلیل کاربردهای متعدد و بروزچالشهای جدی در حین عملیات شکلدهی، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است [1]. شكلدهي الكتريكي يا الكتروفرمينگ تكنيک نسبتاً جدیدی برای تولید قطعههای فلزی به روش رسوبدهی الكتريكي است. مزيت اصلى فرآيند الكتروفرمينگ آن است كه مىتوان قطعاتى با ضخامت چند ميكرون ايجاد كرد. علاوه بر این، فرآیند الکتروفرمینگ در مقایسه با دیگر فرآیندها مانند ریخته گری، ماشین کاری و ... برای تولید قطعاتی با دقت تلرانس بالا (1/5تا 3 نانومتر)، پیچیدگی زیاد، و وزن پایین مورد نیاز باشد، مناسبتر و کارآمدتر است. قطعاتی که با روش الكتروفرمينگ ايجاد مىشوند خلوص بسيار بالايى دارند و بدليل ریز ساختار مناسبی که دارند، خواص مکانیکی و فیزیکی آنها فوق العاده است[2، 3]. خواص قطعه ساخته شده به روش الكتروفرمينگ شامل خصوصيات ظاهرى، آناليز تركيب شیمیایی، تخلخل، ساختار کریستالی، خواص مکانیکی و تنشهای داخلی، تحت تأثیر پارامترهای دانسیته جریان اعمالی، نوع جریان، دما، ترکیب شیمیایی حمام الکترولیت ، نوع و سرعت گردش سيال الكتروليت، ميباشند [4].

مس یکی از فلزات اساسی و پر کاربردی است که با توجه به هدایت الکتریکی و حرارتی بالای آن، شکل پذیری خوب و مقاومت نسبت به خوردگی و اکسیداسیون، کاربردهای متعددی در صنعت دارد [5، 6]. مس به طور گسترده برای الکتروفرمینگ استفاده می شود. زیرا قیمت آن نسبتا کم است. برای خیلی از كاربردها به قدر كافى مستحكم است، با استفاده از حمام اسیدی، در سرعت بالا و در حالت تنش کم رسوب گذاری می شود [7]. عبدالحمید و همکارشان [8] بروی چگالی جریان و در جه حرارت حمام قلیایی غیر سیانیدی مس تحقیق کردند و متوجه شدند که جهت کریستالوگرافی رسوب مس مستقل از چگالی جریان است ولی بهرهوری حمام تابع چگالی جریان و درجه حرارت میباشد. ژونگ ژاو و همکارانشان [9] از امواج مافوق صوت برای بهبود چسبندگی لایه نیکل روی مس، در حین فرآیند الکتروفرمینگ استفاده کردند و دریافتند که با استفاده از تحریک مافوق صوت به میزان 47% قدرت چسبندگی لایهها را افزایش میدهد. یانگ و همکاران [10] با استفاده از

نرم افزار انسیس¹، مشخصات آند ساچمهای شکل را طراحی کرده و آنها را درسبدهایی در اطراف مندرل قرار داده و مندرل را توسط موتور الکتریکی می چرخاندند و به این نتیجه رسیدند که قطعاتی دارای رسوب یکنواخت تر هستند که الگوی تراکم جریان آنها شبیه توزیع تراکم جریان درکاتد باشد. ژنگ وی زو [11] با قرار دادن مندرل درون سبد حاوی ساچمههایی با روکش سرامیکی و چرخش مندرل حول محور خود دریافتند که این عمل باعث افزایش مقاومت خوردگی مس و ایجاد لایههای ریز ساختاری و سطحی صافتر میشود. فدایی تهرانی و همکاران[12] بر روی تولید بیلوز از جنس نیکل با استفاده از جريان پالسي و پالسي معكوس شونده آزمايش انجام دادند. آنها در تحقیق خود دریافتند که با استفاده از جریان پالسی معکوس شونده نسبت به جریان پالسی میتوان قطعات با انحراف استاندارد ضخامت کمتر تولید کرد. ژاو و همکارانش [13] برروی سایش و خوردگی کامپوزیت مس گرافیت تولید شده به روش الکتروفرمینگ در حمام سولفات اسیدی با ذرات گرافیت معلق تحقیق کردند و دریافتند که ترکیب ذرات گرافیت باعث کاهش اندازه دانهها و بهبود مقاومت قطعه در برابر سایش میشود. لی و همکاران [14] با قرار دادن ورق مس الکتروفرمینگ شده در انتهای سبدی حاوی توپهای شیشهای و گذاشتن سبد درون دستگاه آلتراسونیک دریافتند که اندازه دانههای ورق مس به نانو كريستال تغيير مىيابد و استحكام كششى آن نيز دو برابر می شود. مینگ و همکاران [15] در تحقیقی برای کاهش سوراخ و حفرههای ایجاد شده بر روی سطح قطعات تولید شده به روش الکتروفرمینگ روش جدیدی را مورد بررسی قراردادهاند که دراین روش با ایجاد خلاء تناوبی برای خارج سازی گازهای حاصل از فرآیند و همچنین با استفاده از ایجاد گرادیان دما در جهت عمودى بين سطح قطعه و محلول الكتروليت، باعث كاهش حباب گازهای تولیدی و در نتیجه کاهش عیوب سطحی قطعه شدند. ژو و همکاران [16] توانستند با استفاده از ذرات سخت کروی که بین دو الکترود را پر کردهاند، سطح براق نیکلی را ايجاد كنند. با استفاده از اين ذرات، سطح كاتد به طور مداوم پاکسازی شده و حبابهای هیدروژنی و میکروحفرهها در حین فرآیند ازبین میروند. در تحقیق حاضر با استفاده از جریان پالسی و پالسی معکوس شونده و همچنین استفاده از آند مارپیچ شكل به بررسی پارامترهای فرایند الكتروفرمینگ جهت دستیابی به ضخامت یکنواخت در دیواره قطعات U شکل تولید شده پرداخته شده است. در ادامه خواص مکانیکی قطعات مورد

¹ ANSYS

بررسی و مقایسه قرار گرفتند و شرایط مناسب برای ایجاد قطعه با خواص مکانیکی مطلوب و دارای ضخامت یکنواخت در دیواره استخراج شده است.

2- مواد و روش تحقيق

در این تحقیق از حمام الکترولیت محتوی سولفات مس H₂SO₄ (80gr/l) و اسيد سولفوريک (USO₄.6H₂O (200gr/l) به منظور افزایش هدایت الکترولیت به همراه آب دیونیزه استفاده شده است و از هیچ گونه مواد افزودنی دیگر استفاده نشده است. مندرل استوانه U شكل از جنس فولاد سخت تهيه شده است و با کروم سخت آبکاری سطحی و سپس به روش مکانیکی و شیمیایی پالیش شدہ است. قطر مندرل (کاتد) برابر30 میلیمتر و طول آن برابر 170 میلیمتر است. آند فنری شکل از جنس مس خالص حاوى 0/03 درصد فسفر و داراى سطح مقطع مستطیلی به ابعاد 10×4 میلیمتر و قطر 160 میلیمتر و ارتفاع 350 ميلىمتر مىباشد محلول الكتروليت توسط مكنت دستگاههات پلیت متلاطم می شود. دمای حمام الکتروفرمینگ 2±25 درجه سانتی گراد است. در حین انجام فرآیند الكتروفرمينگ كنترل دما از اهميت خاصي برخوردار است. دماي بعضی از حمامها را باید افزایش و دمای برخی را باید کاهش داد و آن را سرد کرد. به هر حال باید شرایط بهینه دمایی را یافت و وسایل لازم را درسیستم الکتروفرمینگ در نظر گرفت. افزایش دما تا حد معینی بسته به نوع فلز و حمام باعث افزایش هدایت الکترولیت، سرعت نفوذ، ازدیاد انحلال شیمیایی در آند و انحلال مجدد در کاتد می شود [17، 18]. جهت ثابت نگه داشتن دمای حمام الكتروليت، وان محلول الكتروليت در داخل يك وان ديگر حاوی آب قرار داده شد که به سیستم خنک کننده مجهز و با گردش وخنک شدن آب درون وان دوم، دمای حمام الکتروفرمینگ نیز پایین آورده می شود. هم چنین در مواردی از پودر یخ در وان آب، نیز استفاده شد. نمایی از حمام الكتروفرمينگ در شكل 1 نشان داده شده است.

برای ارزیابی مقدماتی پارامترها و همچنین اطمینان از کارایی دستگاه، مجموعهای از آزمایشهای مقدماتی انجام شده است و در نهایت کیفیت قطعات تولیدی از لحاظ کیفیت ظاهری مورد بررسی قرار گرفته است. تمامی آزمایشات بر روی مندرل فولادی انجام شده و پارامترهای کنترلی ذکر شده شامل شدت جریان، زمان پالس روشن، زمان پالس خاموش در حالت جریان پالس یک طرفه و شدت جریان، زمان پالس فوروارد، زمان پالس معکوس در حالت جریان پالس معکوس شونده مورد بررسی قرار

گرفته شد. منظور از پالس فوروارد زمانی است که جریان مثبت در آند و جریان منفی در کاتد برقرار است و منظور از پالس معکوس زمانی است که جریان منفی در آند و جریان مثبت در کاتد برقرار است.



Fig. 1 The electrofoming device was designed and built in this study $\hat{\mathbf{m}}$ دستگاه الکتروفرمینگ طراحی شده و ساخته شده در این تحقیق

در ابتدا آزمایشاتی با استفاده از آند ساخته شده فنری شکل و آند صفحهای رایج انجام شد و دیگر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که نمونههای تولید شده با استفاده از آند فنری شکل توزیع ضخامت یکنواخت تری دارد. برای بدست آوردن محدوده زمانی مناسب برای انجام آزمایشهای الكتروفرمينگ، آزمايشات اوليه در زمانهاي 6، 12و 18 ساعت انجام شد و در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده مدت زمان 12 ساعت برای انجام آزمایشها انتخاب گردید. برای به دست آوردن محدوده شدت جریان مناسب، ابتدا چند آزمایش با جریان مستقیم (DC) در شدت جریانهای مختلف 0/3، 0/45، 0/6، 0/75 و 0/9 آمپر انجام شد و دیگر پارامترها ثابت در نظر گرفته شد. با بررسی نمونههای تولید شده از نظر عدم تخلخل، رشد دانهها و درختچهها بروی سطح و زبری سطح نمونه تولید شده با شدت جریان 0/6 آمپر نمونه برتر بود و با توجه به اینکه می توان در جریان پالسی شدت جریان را چند برابر افزایش داد طراحی آزمایش از 1/8 تا 3/6 آمپر انجام شد. در شدت جریان بالای 3/6 آمپر نمونهها کیفیت سطح خود را از دست میدهند.

در حالت جریان پالسی یک طرفه (PC)، سه پارامتر شدت جریان، زمان پالس روش و زمان پالس خاموش به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شد. همچنین در حالت جریان پالسی معکوس شونده (PRC)، سه پارامتر شدت جریان، زمان پالس فوروارد و زمان پالس معکوس به عنوان پارامترهای متغیر

در نظر گرفته شد. سپس توسط نرم افزار مینی تب¹ طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح انجام گردید و 20 آزمایش طراحی شد و در نهایت نمودارهای سه بعدی آن استخراج گردید. لازم به ذکر است پارامتر با شدت جریان 2/7 آمپر و زمان پالس روشن 8 میلی ثانیه و زمان پالس خاموش 5/3میلی ثانیه، شش مرتبه تکرار شده است و پس از انجام آزمایشها تکراری به دلیل اینکه مقادیر استحکام مکانیکی و سختی و واریانس ضخامت آنها بسیار نزدیک هم و در مواردی مثل هم بود از ذکر آنها صرفنظر شد و به عنوان یک نمونه واحد در نظر گرفته شد. پارامترهای کنترلی مرتب شده در جریان پالسی یکطرفه و معکوسشونده در جدول بر آزمایش ثابت نگه داشته شد تا بتوان مقایسهای منطقی از بر آزمایش ثابت نگه داشته شد تا بتوان مقایسهای منطقی از

قبل از انجام هر آزمایش، مراحل چربیزدایی از سطح مندرل انجام میشود و سپس داخل حمام الکترولیت قرار می گیرد. به منظور بررسی مورفولوژی سطح و ریزساختار لایههای مسی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی الکترونی روبشی (FE SEM) مدل MIRA3 TESCAN ساخت کشور جمهوری چک استفاده شد. برای اندازه گیری سختی پوششها از دستگاه میکروسختی ویکرز مدل U1 استفاده شد. نیروی وارده به میزان 100 گرم به مدت 10 ثانیه بود. جهت افزایش دقت آزمایش، هر آزمایش سه مرتبه تکرار و میانگین اندازه گیری سختی گزارش شد.

برای بررسی مورفولوژی سطح و اندازه دانه، دو نمونهی انتخابی یکی از جریان پالسی یک طرفه و دیگری معکوس شونده که بیشترین استحکام مکانیکی و سختی را داشتند برش داده و مانت سرد شد و پس از آمادهسازی اولیه، متالوگرافی روی آنها انجام گرفت و به کمک عکسهای حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی اندازه گیریها انجام شد.

برای بررسی ضخامت پوشش در دیواره نمونههای تولیدی، تمامی نمونهها توسط دستگاه وایرکات از وسط برش طولی داده شد. سپس توسط میکرومتر دیجیتالی مدل QLR ساخت کشور چین که با دقت یک میکرون ضخامت را اندازه گیری می کند، در 21 نقطه مطابق شکل 2 اندازه گیری شد. توسط نرم افزار اکسل، واریانس نمونهها محاسبه و دادهها در نرم افزار مینی تب ثبت گردید. برای تعیین تنش و کرنش کششی از دستگاه Instron مدل 4486 ساخت کشور انگلیس استفاده شد.

_	reverse	e-pulse					
	ده	معكوس شون	پالسى	فه	, پالسی یک طر	جريان	
	شدت	زمان پالس	زمان پالس	شدت	زمان پالس	زمان پالس	شماره
	جريان	معكوس	فوروارد	جريان	خاموش	روشن	سماره
	(آمپر)	(میلی ثانیه)	(میلی ثانیه)	(آمپر)	(میلی ثانیه)	(میلی ثانیه)	تمونه
	1/8	2	6	1/8	2	6	1
	3/6	2	6	3/6	2	6	2
	2/7	3/5	6	2/7	3/5	6	3
	1/8	5	6	1/8	5	6	4
	3/6	5	6	3/6	5	6	5
	2/7	2	8	2/7	2	8	6
	1/8	3/5	8	1/8	3/5	8	7
	2/7	3/5	8	2/7	3/5	8	8
	3/6	3/5	8	3/6	3/5	8	9
	2/7	5	8	2/7	5	8	10
	1/8	2	10	1/8	2	10	11
	3/6	2	10	3/6	2	10	12
	2/7	3/5	10	2/7	3/5	10	13
	1/8	5	10	1/8	5	10	14
	3/6	5	10	3/6	5	10	15



Fig. 2 Points marked on the template for measuring thickness شکل **2** نقاط مشخص شده بر روی قالب برای اندازه گیری ضخامت

3- بحث و نتايج

3-1- بررسی نمونههای الکتروفرمینگ با جریان پالسی یک-طرفه و معکوسشونده

در جریان پالسی یک طرفه با توجه به شکل ظاهر و مقادیر واریانس ضخامت نمونهها، نمونهی شماره 14 که در شکل 3 نشان داده شده است با زمان جریان پالس روشن 10 میلی ثانیه و زمان پالس خاموش 5 میلی ثانیه و شدت جریان 1/8 آمپر از لحاظ صاف و صیقلی بودن سطح، نبودن تخلخل، نمونه ایده آل از نظر یکنواختی ضخامت می باشد که واریانس ضخامت آن برابر با 66 میکرون می باشد. و همچنین در جریان پالسی معکوس شونده، نمونهی شماره 11 که در شکل 4 نشان داده شده است،

¹ Minitab

مهندسی ساخت و تولید ایران، دی 1399، دوره 7 شماره 10



زمان پالس خاموش و روشن(میلی ثانیه)

 Fig. 5 Sample No. 12 with pulse current time of 10 milliseconds and a reverse pulse time of 2 milliseconds and a current of 3.6 amps

 شكل 5 نمونه شماره 12 با زمان جريان پالس روشن 10 ميلى ثانيه و زمان پالس خاموش 2 ميلى ثانيه وشدت جريان 3/6 آمير



Fig. 6 Sample No. 12 with a pulse forward time of 10 milliseconds and a reverse pulse time of 2 milliseconds and a current of 3.6 amps شكل 6 نمونه شماره 12 با زمان جريان پالس فوروارد 10 ميلى ثانيه و زمان پالس معكوس 2 ميلى ثانيه و شدت جريان 3/6 آمپر

همان طور که در شکل 7- الف مشاهده می شود، ضخامت پوشش ایجاد شده در طول مندرل یکسان نیست و پوشش تشکیل شده دارای سطحی نسبتا یکنواخت و هموار نیست و دارای سطحی زبر می باشد. در شکل 7- ب اندازه ی دانه ها نشان داده شده است. که اندازه ی آنهادر محدوده میکرون قرار دارد. از آنجایی که در جریان پالسی یک طرفه با قطع جریان در زمان پالس خاموش یون ها و ذرات درشت مس در حمام بر روی لایه های رسوب داده شده می چسبند که این امر باعث ایجاد بافت دانه ای در شت ر و در نتیجه ضخامت و زبری سطح بیشتر نسبت به الکتروفرمینگ با جریان پالسی معکوس شونده می شود. استفاده از جریان پالسی معکوس شونده می روش مناسب در ایجاد پوششی یکنواخت تر مشهود است.

برای بررسی مورفولوژی سطح پوشش در جریان پالسی معکوسشونده (PRC)، از نمونه شماره 12، تصاویری تهیه شد. همانطور که در شکل 8 مشاهده می شود دانههایی به اندازههای کمتر از یک میکرون در لایههای نمونه وجود دارد و این دانهها به خوبی به سطح پوشش چسبیده است. شکل 8-الف تصویر میکروسکوپی الکترونی از لبهی سطح مقطع عرضی از طرفی با انجام آزمایشهای استحکام و سختی مکانیکی مشخص شد که در جریان پالسی یکطرفه، نمونه شماره 12 مطابق شکل 5 با زمان جریان پالس روشن 10 میلی ثانیه و زمان پالس خاموش 2 میلی ثانیه و شدت جریان 3/6 آمپر، از نظر استحکام مکانیکی، نمونهی برتر میباشد. همچنین در جریان پالسی معکوس شونده، نمونهی شماره 12 که در شکل 6 نشان داده شده است با زمان جریان پالس فوروارد10میلی ثانیه و زمان پالس معکوس 2 میلی ثانیه و شدت جریان 3/6 آمپر نمونهی برتر با بیشترین استحکام و سختی مکانیکی میباشد.



 Fig. 3 Sample No. 14 with a pulse current time of 10 milliseconds and a silent pulse time of 5 milliseconds and a current of 1.8 amps.

 شكل 3 نمونه ى شماره 14 با زمان جريان پالس روشن 10 ميلى ثانيه و زمان يالس خاموش 5 ميلى ثانيه و شدت جريان 1/8 آمير



 Fig. 4 Sample No. 11 with a pulse forward time of 10 milliseconds and a reverse pulse time of 2 milliseconds and a current of 1.8 amps

 شكل 4 نمونهى شماره11 با زمان جريان پالس فوروارد 10ميلى ثانيه و زمان

 پالس معكوس 2 ميلى ثانيه و شدت جريان 1/8 آمپر

3-2- بررسی مورفولوژی سطح پوشش در جریان پالسی یک طرفه و معکوسشونده

در شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در مقطع برش عرضی نمونه شماره 12تولید شده در جریان پالسی یک طرفه نشان داده شده است.







(ب)

Fig. 8 (a) Electron microscopic image of a surface section of sample No. 12, (b) Electron microscopic image of surface grains of sample No. 12 with reverse pulse current

شکل 8 (الف) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ازبرش سطح مقطع نمونه شماره 12، (ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از دانههای سطح مقطع نمونه شماره 12 با جریان پالسی معکوسشونده

3-3- ضخامت پوشش در نمونهها با جریان پالس یکطرفه و جریان پالس معکوس شونده

جهت اندازه گیری ضخامت پوششها با جریان پالس یک طرفه طبق جدول 2 و با جریان پالس معکوس شونده مطابق جدول 3 مقادیر ضخامت هر نمونه در 12 نقطه و مقدار واریانس آن بر اساس اندازه گیری های انجام شده، قید شده است. قابل ذکر است که داده های اول و دوم به ترتیب مربوط به مرکز انحنا و قسمت شیب انحنا و مقادیر دیگر مربوط به 10 نقطه در طول نمونه به ترتیب از قسمت پایین به سمت بالا (لبهی نمونه) می باشد. فاصلهی نقاط از همدیگر به اندازه ی یک سانتی متر انتخاب شد. شایان ذکر است ضخامت تک تک نمونه ها در طول محیطی آنها، در نقاط مختلف نیز بررسی شد و به دلیل اختلاف ناچیز ضخامت، از ذکر آنها صرف نظر شد.

با توجه به دادههای جدول 2، مقدار ضخامت برای نمونه ایدهآل (نمونه شماره 14)، برابر با 66 میکرون میباشد که دارای استحکام مکانیکی نسبتاً خوبی نیز میباشد. نمونه شماره 1،

نمونه شماره 12 را نشان میدهد. همانطور که در شکل مشخص است میزان تخلخل حداقل بوده و پوشش تشکیل شده از ضخامت تقریبا یکنواختی برخوردار و همگن است و یوشش دارای ساختار یکپارچه میباشد. در واقع میتوان گفت که جریان پالسی معکوس شونده باعث کاهش تخلخل و افزایش یکنواختی سطح در پوشش می شود. از طرفی افزایش شدت جریان باعث ناهمواری سطح و رشد دانههای بزرگ در سطح نمونه می شود. در شکل 8- ب اندازه دانههای رسوب یافته را نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود دانه هایی به اندازه های میکرون و دهم میکرون بوده و توزیع اندازه دانه عمدتا یکنواخت و ریزتر از نمونه 12 جريان يکطرفه است. اين نتيجه نشان ميدهد که رشد دانهها در طول فرآیند الکتروفرمینگ به صورت طبیعی بوده است. جهت گیری دانهها بصورت تصادفی بوده و بیشتر جهت گیری مکعبی دارند که بر روی زیرلایه رشد کردهاند که این بدان معنی است که نمونه دارای یک فیبر بافت است که در ابتدا در طول فرآیند الکتروفرمینگ ایجاد می شود.





Fig.7 (a) Electron microscope image of a cross-sectional cross-section of sample No. 12, (b) Microscopic image of a cross-sectional grain size of the coating formed on the mandrel in sample No. 12 with one-way pulse current.

شکل 7 (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از برش عرضی سطح مقطع نمونه شماره 12، (ب) تصویر میکروسکوپی روبشی از اندازه دانههای سطح مقطع پوشش تشکیل شده بر روی مندرل در نمونه شماره 12 با جریان پالسی یک طرفه. میکرون میباشد که فاقد هر گونه تخلخل میباشد. در الکتروفرمینگ با جریان پالسی معکوس شونده، شرایط جوانهزایی و رشد جوانه ها مساعدتر است، در نتیجه الکتروفرمینگ پالسی معکوس شونده نمونه ای با دانه بندی ریز تر و سطحی یکنواخت تر را ایجاد می کند.

دارای حداقل واریانس ضخامت برابر با 51 میکرون میباشد ولی دارای سطحی سوخته و کدر میباشد. در نمونهی شماره 14 ترک، تخلخل و ناهمواری وجود ندارد و میتوان آن را به عنوان نمونه ایدهآل در نظر گرفت. در جدول 3، نمونه ایده آل از نظر یکنواختی ضخامت نمونه شماره 11، با ضخامت واریانس 33

جدول 2 مقادیر توزیع ضخامت برای نمونههای الکتروفرم شده در جریان پالسی یک طرفه

Thickness distrib	ution va	lues for	electroi	formed s	specime	ns durin	ig one-w	vay puls	e curren	ıt			
بايا: خخارت		نقاط (میکرون)										سماره	
واريانس صحامت	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	مونه
51	294	294	300	296	292	295	301	304	316	402	408	425	1
200	522	529	521	539	533	540	548	563	650	845	927	1/125	2
187	392	389	402	375	398	404	397	411	474	781	844	619	3
79	252	251	256	256	264	266	288	293	332	448	415	459	4
256	489	538	541	550	552	559	578	614	683	1/116	1/152	1/103	5
118	432	430	409	412	413	407	412	433	475	678	683	688	6
53	258	257	259	259	264	267	279	284	318	370	398	384	7
95	374	375	382	379	380	382	389	411	444	557	618	607	8
238	583	534	484	516	536	541	563	572	690	1/011	1/88	1/109	9
161	386	381	395	378	392	395	391	410	463	754	791	708	10
73	275	310	312	295	313	308	316	330	390	449	436	505	11
220	512	511	510	508	512	532	548	563	635	878	939	1/170	12
85	365	426	405	402	402	418	408	434	470	608	581	615	13
66	263	261	270	269	269	271	285	301	343	435	386	431	14
222	548	521	501	513	526	538	554	570	651	983	1/021	1/088	15

جدول 3 مقادير توزيع ضخامت براي نمونههاي الكتروفرم شده در جريان پالسي معكوس شونده

Table 3 T	hickness distributio	n values	for ele	ctroform	ned sam	ples in r	everse j	oulse cu	rrent					
							بكرون)	نقاط (مب						شماره
	واريانس صحامت	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	نمونه
	25	126	140	142	139	148	133	151	150	153	179	25	208	1
	74	271	286	293	269	278	285	280	279	312	449	74	434	2
	34	126	128	126	130	128	128	130	126	145	188	34	619	3
	15	81	80	79	78	81	82	84	87	92	106	15	121	4
	18	145	136	141	139	137	137	141	140	142	159	18	196	5
	55	230	228	230	230	226	235	240	272	293	322	55	333	6
	23	85	85	83	90	88	86	90	90	100	123	23	130	7
	35	171	165	165	164	167	167	173	178	185	228	35	250	8
	55	220	215	214	214	218	214	217	230	258	350	55	307	9
	28	136	136	132	134	136	138	140	146	149	175	28	219	10
	33	170	168	170	168	167	167	171	177	191	237	33	250	11
	67	340	344	358	358	358	366	372	372	398	490	67	522	12
	49	201	203	199	197	197	209	211	213	227	307	49	321	13
	21	96	96	93	93	96	98	99	101	109	141	21	145	14
	48	190	191	192	188	191	187	187	190	209	299	48	290	15

3-4- بررسی ضخامت پوشش نمونهها

شکل 9 منحنی سه بعدی اثر شدت جریان و زمان پالس روشن بر روی ضخامت در جریان پالس یک طرفه را نشان می دهد. با افزایش شدت جریان، واریانس ضخامت لایهی تشکیل شده بیشتر شده و به عبارت دیگر یکنواختی ضخامت نمونه کاهش می یابد و این می تواند به دلیل عدم توازن دانسیته جریان بین آند و کاتد باشد که نرخ سرعت رشد دانهها را به صورت ناهمگن افزایش می دهد. با افزایش ضخامت پوشش، مقدار رشد ناخواسته دانهها افزایش می یابد که این امر موجب کاهش کیفیت قطعه تولیدی می شود.

در شکل 10 تأثیر شدت جریان و زمان پالس فوروراد بر ضخامت پوشش با جریان پالس معکوسشونده نشان داده شده است. با توجه به شکل 10، در واقع در جریان پالس یک طرفه با افزایش شدت جریان موجب افزایش ضخامت پوشش میشود. از طرفی میتوان گفت با افزایش شدت جریان، مقدار بیشتری از یونهای موجود در الکترولیت فعال شده و در واکنش شرکت میکنند و باعث تجمع یونهای بیشتری بر روی مندرل شده و موجب افزایش ضخامت میشود. همچنین افزایش زمان پالس فوروارد نیز باعث میشود در مدت زمان بیشتری رسوب گذاری کنترل شده انجام شود که این امر باعث افزایش یکنواخت ضخامت نمونهها میشود.



Fig. 9 Three-dimensional curve The effect of current pulse intensity and light pulse time on coating thickness with one-way pulse current شکل 9 منحنی سه بعدی اثر شدت جریان و زمان پالس روشن بر روی ضخامت پوشش با جریان پالسی یکطرفه



Fig. 10 The effect of pulse forward flow time and time on sample thickness thickness with reverse pulse flow شكل 10 تأثير شدت جريان و زمان پالس فوروارد بر ضخامت پوشش نمونه با

جريان پالس معكوس شونده

3-5- بررسی سختی پوشش در نمونهها

جدول 4 مقادیر سختی پوشش در نمونههای مختلف با جریان پالسی یکطرفه نشان میدهد. با توجه به دادههای جدول 4، مقادیر سختی برای نمونه ی 14، نمونه ایدهآل از لحاظ یکنواختی ضخامت 117 ویکرز میباشد. در مقایسه با نمونه شماره 12 که بیشترین استحکام مکانیکی و سختی را دارد و مقدار سختی آن برابر 131 ویکرز میباشد. دلیل آن نیز در شدت جریان بیشتر و زمان پالس خاموش کمتر میباشد که افزایش شدت جریان تا اندازه مشخصی به همراه زمان پالس خاموش کمتر موجب افزایش ضخامت و همچنین آرایش بهتر دانهها میشود. این امر باعث افزایش سختی پوشش میشود. مطابق شکل 11، شدت جریان زیاد باعث ایجاد رسوبی پفکی و ناهموار با واریانس ضخامت زیاد میشود که باعث کاهش سختی پوشش نیز میگردد. همچنین افزایش زمان پالس روشن باعث به وجود آمدن دانههای درشت بروی سطح در نتیجه ایجاد تخلخل و کاهش سختی پوشش میشود.

جدول 4 مقادیر استحکام و سختی مکانیکی پوشش در نمونهها با جریان پالسی یکطرفه

 Table 4 The mechanical properties of the coating in the samples with one-way pulse current

. ₹:۱ .	ا، تحکلم				
میںکیں	استحقاظ	سدت	رمان ۱	رمان "	شماره
قادير سختى	مکانیکی م	جريان	پالس خاموش	پالس روشن	نمونه
(ويكرز)	(مگا پاسکال)	(آمپر)	(میلی ثانیه)	(میلی ثانیه)	<u> </u>
115	138	1/8	2	6	1
126	156	3/6	2	6	2
122	123	2/7	3/5	6	3
108	96	1/8	5	6	4
117	102	3/6	5	6	5
128	120	2/7	2	8	6
111	118	1/8	3/5	8	7
119	141	2/7	3/5	8	8
118	150	3/6	3/5	8	9
112	138	2/7	5	8	10
109	146	1/8	2	10	11
131	160	3/6	2	10	12
124	140	2/7	3/5	10	13
117	151	1/8	5	10	14
130	153	3/6	5	10	15

جدول 5 مقادیر سختی پوشش در نمونههای مختلف با جریان پالسی معکوسشونده نشان میدهد. در کل میتوان به این نتیجه رسید که در سختی پوشش علاوه بر شدت جریان،

مقدار زمان پالس فوروارد نیز رابطه مستقیم دارد و با افزایش هر کدام به تنهایی نمی توان به سختی مطلوب دست یافت. تغییر هر کدام از این پارامترها باعث تغییر سختی می شود و بایستی به یک نقطه مشترک در هر دو پارامتر رسید زیرا با افزایش شدت جریان و کاهش میزان زمان یالس فوروارد، باعث افزایش سرعت رسوب گذاری و احیاء هیدروژن بیشتر و به طبع ایجاد ناهنجاری زیادی در اندازه دانههای پوشش میشود که این امر باعث کاهش سختی میشود. ثانیاً افزایش زمان پالس فوروارد و کاهش شدت جریان نیز باعث کاهش ضخامت رسوب و به طبع کاهش سختی در مدت زمان معین می شود. در نتیجه افزایش شدت جریان به همراه افزايش زمان پالس فوروارد باعث افزايش سختى پوشش می شود. با توجه به شکل 12، افزایش شدت جریان، در زمان یالس فوروارد یایین موجب کاهش سختی می شود و سیس با افزایش پالس فوروارد سختی نیز به مرور افزایش مییابد و به نقطه ایدهآل میرسد. و از طرفی با افزایش پالس فوروارد، در شدت جریان پایین میزان سختی در بازه کمی افزایش می یابد و به نقطه ایدهآل خود نمیرسد.

جدول 5 مقادیر استحکام و سختی مکانیکی پوشش در نمونهها با جریان پالسی م**ع**کوسشونده

 Table 5 The mechanical properties of the coating in the samples with reverse pulse current

ميانگين	استحكام	شدت	زمان	زمان	شا. ش
مقادير سختے	مکانیکی	جريان	پالس معکوس	پالس فوروارد	سماره
(ويكرز)	(مگا پاسکال)	(آمپر)	(میلی ثانیه)	(میلی ثانیه)	نمونه
118	101	1/8	2	6	1
94	80	3/6	2	6	2
105	38	2/7	3/5	6	3
57	17	1/8	5	6	4
65	28	3/6	5	6	5
107	138	2/7	2	8	6
77	53	1/8	3/5	8	7
87	60	2/7	3/5	8	8
95	65	3/6	3/5	8	9
69	43	2/7	5	8	10
95	77	1/8	2	10	11
133	142	3/6	2	10	12
81	35	2/7	3/5	10	13
75	45	1/8	5	10	14
87	51	3/6	5	10	15

3-6- تغییرات استحکام مکانیکی در نمونهها

در جدول 4 مقادیر استحکام مکانیکی برای نمونهها با جریان پالسی یکطرفه آمده است. در زمان پالس روشن، مهاجرت

مهندسی ساخت و تولید ایران، دی 1399، دوره 7 شماره 10

یونها به مندرل بیشتر و اتصال بهتر بین دانهها انجام می گیرد که همین امر استحکام اتصال را نیز افزایش میدهد و به ایجاد یک ریزساختار یکنواختتر لایهی کمک میکند و همین امر باعث تخلخل کمتر، ظرفیت بیشتر برای حفظ تنشها بزرگتر می شود.



Fig. 11 The effect of current intensity on the hardness of the sample cover in one-way pulse current

شکل 11 تأثیر شدت جریان بر میزان سختی پوشش نمونه در جریان پالسی یکطرفه



Fig. 12 The effect of pulse forward and current intensity on the hardness of the cover in reverse pulse current شکل 12 اثر پالس فوروارد و شدت جریان بر سختی پوشش در جریان پالس معکوس شونده

با توجه به دادههای جدول 4، مقادیر استحکام مکانیکی برای نمونهی شماره 12، برابر 160 مگاپاسکال میباشد. در واقع بیشترین میزان استحکام مکانیکی مربوط به نمونه شماره 12 میباشد. میتوان گفت با افزایش فاصله زمانی بین پالس روشن و پالس خاموش، باعث افزایش مهاجرت یونها از آند به سمت کاتد میشود و از طرفی با کاهش زمان پالس خاموش باعث کاهش اتصال یونهای آزاد در محلول به کاتد میشود در نتیجه و شکل 15 تأثیر شدت جریان و زمان پالس روشن بر روی اس استحکام مکانیکی را نشان میدهد. همان طور که مشاهده ک میشود، افزایش زمان پالس روشن و افزایش شدت جریان باعث افزایش استحکام مکانیکی میشود. در واقع با افزایش زمان پالس روشن یونهای بیشتری میتوانند بر روی همدیگر تجمع کرده و در واقع باعث افزایش جوانه زنی و رشد جوانهها میشود که یه میتواند استحکام مکانیکی را افزایش دهد.



Fig. 13 The Changes tensile stress to tensile strain in the example with one-way pulse current $% \left({{{\mathbf{F}}_{\mathbf{F}}}^{T}}\right) =0$

شکل 13 تغییرات تنش کششی به کرنش کششی در نمونهها با جریان پالسی یکطرفه.



Fig. 14 The Changes tensile stress to tensile strain in the example with reverse pulse current شکل 14 تغییرات تنش کششی به کرنش کششی در نمونهها با جریان پالس معکوس شونده

در شکل 16 تغییرات سه پارامتر تنش کششی، جریان و مدت زمان پالس فوروارد نسبت به هم ترسیم شده است. با افزایش میزان شدت جریان و مدت زمان پالس فوروارد، مقدار استحکام مکانیکی افزایش مییابد. در واقع با افزایش شدت جریان و مدت زمان پالس فوروارد باعث افزایش سرعت تشکیل

وجود این دو عامل در کنار هم باعث آرایش بهتر دانهها و افزایش استحکام مکانیکی میشود. شکل 13 تغییرات تنش کششی به کرنش کششی برای نمونههای با جریان پالسی یک طرفه را نشان میدهد. همانطور که مشخص است بیشترین مقدار تنش کششی به کرنش کششی مربوط به نمونه شماره 12 مىباشد. دندانهدار بودن منحنىها نشاندهنده تغييرات ساختاری ناهمگن در نمونهها است. وجود اثر پورتوین - لوشاتلیه (پیرکرنشی، این اثر با دندانهدار شدن منحنی تنش-کرنش در محدوده تغییر شکل پلاستیک ظاهر می شود) می تواند ناشی از برهم كنش نابجاييها باشد كه باعث به وجود آمدن اين نوع رفتار در مواد می شود [19]. در منحنی شماره 12 که با رنگ سبز مشخص است در نقطه به میزان کرنش کششی 31 میلیمتر بر میلیمتر، گسستگی رخ میدهد که نقطه شکست نامیده میشود که اگر چه تنش کاهش مییابد اما کرنش افزایش پیدا میکند. بیشترین میزان نیروی اعمالی حدود 1000 نیوتن است که میزان کشیدگی نمونه برای این میزان نیرو، حدودا برابر با 15/5 میلیمتر است که میتوان گفت عدم گسیختگی نمونه به واسطه استحکام مکانیکی بالای آن میباشد.

در جدول 5 مقادیر استحکام مکانیکی برای نمونهها با جریان پالسی معکوس شونده آمده است. با توجه به دادههای جدول 5، مقادیر تنش کششی برای نمونهی برتر (نمونهی شماره 12) برابر 142 مگاپاسکال میباشد. در واقع بیشترین میزان استحکام و سختی مکانیکی مربوط به نمونه شماره 12 میباشد. شکل 14 تغییرات تنش کششی به کرنش کششی برای نمونههای با جریان پالسی معکوس شونده را نشان میدهد. با توجه به شکل 14، بیشترین مقدار تنش کششی برابر با 142 مگاپاسکال و بیشترین مقدار کرنش کشش 28میلیمتر بر میلیمتر میباشد که مربوط به نمونه شماره 12 بوده که با رنگ سبز مشخص می باشد. می،توان گفت که در مقادیر پایین نیرو، ذرات مس دارای پیوستگی و چسبندگی خوبی میباشند. که این نشان دهندهی مقاومت کششی نمونه میباشد. بیشترین مقدار نیروی وارد شده بر نمونه شماره 12 حدود 600 نيوتن مي باشد كه با اين ميزان نیرو، حداکثر مقدار کشیدگی و کشسانی نمونه حدود 14 میلیمتر بود. در شکل 14 بعد از نقطهای با میزان کرنش کششی 28 میلیمتر بر میلیمتر، گسستگی رخ میدهد که نقطه شکست نامیده می شود که اگر چه تنش کاهش می یابد اما كرنش افزایش پیدا مىكند. مىتوان نتیجه گرفت با این میزان نيرو و عدم گسستگی نمونه شماره 12 با افزايش استحكام مکانیکی همراه است.

پوشش و قرار گرفتن ذارت بر روی مندرل میشود که این تناسب در سرعت جوانهزایی و رشد جوانهها، و مورفولوژی قطعه تولیدی تأثیر زیادی دارد.



Fig. 15 The effect of light pulse current and time intensity on the mechanical strength of the sample with one-way pulse current شكل 15 تأثير شدت جريان و زمان پالس روشن بر روى استحكام مكانيكى نمونه با جريان پالس يکطرفه



Fig. 16 Effect of current intensity and pulse forward on mechanical strength شکل 16 اثر شدت جریان و پالس فوروارد بر استحکام مکانیکی

در صورت مناسب بودن شرایط الکتروفرمینگ از نظر (شکل هندسی الکترودها، ترکیب و دمای حمام الکترولیت، شرایط همزدن محلول الکترولیت) تعادلی بین سرعت جوانهزایی و رشد جوانهها به وجود میآید. با برقراری این تعادل در کلیه نقاط مندرل، رسوبی یکنواخت و یکدست در سطح مندرل حاصل میشود. همچنین افزایش هم زمان شدت جریان و مدت زمان پالس فوروارد، سرعت رشد احیای یونهای آزاد مس و رشد رسوب فلزی را افزایش میدهد و لایههای در حال رشد رسوب مس، توانایی این را دارند که یونها را به دام بیندازند و جذب قوی بین ذرات اتفاق میافتد که میتواند باعث افزایش استحکام مکانیکی شود.

4-نتيجەگىرى

در این تحقیق با استفاده از روش جدیدی مبنی بر استفاده از

جریان پالسی معکوس با استفاده از آند مارپیچ شکل جهت دستیابی به ساخت قطعات با استحکام بالا و ضخامت یکنواخت در دیواره قطعات مسی U شکل پرداخته شده است و اثر پارامترهای فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است. ایده نوآورانه در این تحقیق استفاده از آند استوانهای فنری شکل و قرار دادن مندرل در وسط آند میباشد. آزمایشهای اولیه به وسیله آند صفحهای شکل رایج انجام شد و مشخص گردید آند مارپیچ شکل باعث بهبودی ضخامت میشود. در طراحی آزمایش پارامترهای شدت جریان، زمان پالس روشن، زمان پالس خاموش در حالت جریان پالسی یک طرفه و شدت جریان، زمان پالس فوروارد، زمان پالس معکوس در حالت جریان پالسی معکوس شونده به عنوان متغیرهای فرآیند مورد بررسی قرار گرفتند.

- با استفاده از آند فنری شکل در جریان پالسی معکوس شونده، مورفولوژی ریزتر و یکنواخت تر شده و پارامتر برای یکنواختی ضخامت پوشش، شدت جریان 1/8 آمپر و میزان زمان پالس فوروارد برابر با 10 میلی ثانیه و میزان زمان پالس معکوس برابر با 2 میلی ثانیه میباشد. واریانس آن برابر با 33 میکرون است. در حالی که در نمونههای با جریان پالس یک طرفه نمونهها ناهموارتر بوده و بهترین پارامتر از لحاظ یکنواختی پوشش در این حالت، شدت جریان 1/8 آمپر و میزان زمان پالس روشن 10 میلی ثانیه و میزان زمان پالس خاموش برابر با 5 میلی ثانیه بود. واریانس آن برابر با 66 میکرون است.

- بیشترین استحکام مکانیکی در جریان پالسی یک طرفه، پارامتر شدت جریان/3 آمپر و زمان پالس روشن 10 میلی ثانیه و زمان پالس خاموش2 میلی ثانیه، میباشد و مقدار آن 160 مگاپاسکال میباشد. بیشترین استحکام مکانیکی در جریان پالسی معکوس شونده، با شدت جریان/3 آمپر و زمان پالس فوروارد 10 میلی ثانیه و زمان پالس معکوس 2 میلی ثانیه، می-باشد و مقدار آن 142 مگاپاسکال میباشد.

- مقدار حداکثر سختی در جریان پالس معکوس شونده برابر با 133 ویکرز بود و حداکثر میزان سختی در جریان پالس یک-طرفه برابر 131 ویکرز بود و با توجه به مصرف آند کمتر، از نظر اقتصادی به صرفهتر میباشد.

- با بررسی انتهای U شکل نمونهها، در جریان پالس یک-طرفه رشد درختچهها و دانههای درشت به وضوح مشخص است و این در صورتی است که در انتهای U شکل هیچ نمونه ای از جریان پالس معکوس شونده این پدیده رخ نداده است که این امر نشان میدهد استفاده از جریان پالس معکوس شونده بهترین https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.08.020

- [10] J.M. Yang., D.H. Kim., D. Zhu, K. Wang, Improvement of deposition uniformity in alloy electroforming for revolving parts, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, pp.329-337, 2008. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.10.006
- [11].W. Zhu, D. Zhu, N.S. Qu, Synthesis of smooth copper deposits by simultaneous electroforming and polishing process, Materials Letters, Vol. 62, pp. 1283-1286, 2008 https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.08.031
- [12] T.A. Fadaee, J.H. Salimy, A. Behagh, Comparison of Thickness Distribution in the Rotary Parts Produced by Electroforming Using Pulse current and Reverse Pulse current, 12th Iranian Conference on Manufacturing Engineering (ICME 2010), pp.6-8, (فار سی in Persian) (فار سی
- [13] H. Zhao, L. Liu, Y. Wu, W. Hu, Investigation on wear and corrosion behavior of Cu-graphite composites prepared by electroforming, Composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 1210-1217, 2007.

https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.05.013

- [14] Qiang.L., Weiping.L., Huicong.L., Ligun.Zh., Fabrication of Nanostructured Electroforming Copper Layer by Means, Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 23, pp. 599-603, 2010. https://doi.org/10.1016/S1000-9361(09)60260-0
- [15] P.M. Ming, D. Zhu, Y.Y. Hu, Y.B. Zeng, Microelectroforming under periodic vacuum-degassing and temperature-gradient conditions, Vacuum, Vol. 83, pp. 1191-1199, 2009.

https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.03.032

- [16] Z.W. Zhu, D. Zhu, N.S. Qu, K. Wang, J.M. Yang, Electroforming of revolving parts with near-polished surface and uniform thickness, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 39, pp. 1164-1170, 2007. https://doi.org/10.1007/s00170-007-1300-9.
- [17] A. Fan, W. Tian, Q. Sun, B. Wangc, Microstlucture and penetration behavior of electroformed copper liners of shaped charges, J University of Science and Technology Beijing, Vol. 130, pp. 73-78, 2006. https://doi.org/10.1016/S1005-8850(06)60017-0
- [18] A.B. Vidrine, E.J. Podlaha, Composite electrodeposition of ultrafine calumina particles in nickel matrices, Part I: citrate and chloride electrolytes, Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 31, No. 8, pp. 461-468, 2001. https://doi.org/10.1023/A:1017532103622
- [19] Weichao Wu, Chun Xu, Chaorun Si, Tian Xue, Influence of Dislocation Density and Solute Atoms Concentration on the Electroplastic Effect of Al-Cu Alloy, July 24, 2017. https://doi.org/10.1115/MSEC2017-2690

روش جهت از بین بردن عیوب ناشی از رشد درختچهها در گوشهها و زاوایا در فرآیند الکتروفرمینگ است.

- با توجه به مطالب بالا میزان یکنواختی ضخامت و سختی در جریان پالس معکوس شونده بیشتر از جریان پالس یک طرفه می باشد ولی استحکام مکانیکی کاهش می یابد.

- میزان یکنواختی ضخامت در جریان پالسی معکوس شونده 50% بهبود يافته ولى استحكام مكانيكي أن 11% كاهش يافته است.

5- مراجع

- [1] J.A. McGeough, M.C. Leu, K.P. Rajurkar, A.K.M. De Silva, Q. Liu, Electroforming process and application to micro/macro manufacturing, Annals of *CIRP*, Vol. 50, pp. 499-514, 2001. the https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62990-4
- [2] J. Kozaka, K. P. Rajurkar, Y. Makkar, Selected problems of micro-electrochemical machining, Journal of Materials Processing Technology, Vol.149, pp 426-431, 2004. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.031.
- [3] K. Zheng, D.J. Politis, L. Wang, J. Lin, A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminium panel components, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, Vol. 1, No. 2, pp. 55-80, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.03.006
- [4] T. Elshenawy, S. Soliman. A.N 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. https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.05.015
- [5] C.M. Cotell, J.A. Sprague, F.A. Smidt, jr. ASM Handbook, Vol. 5, surface engineering, Publisher: Materials Park: ASM International, 1994, c1990c2007.
- [6] A. Balasu bramanian, D. S. Srikumar, G. Raja, G. Saravanan, S. Mohan, Effect of Pulse Parameter on Pulsed Electrodeposition of Copper on Stainless Steell, Surface Engineering. Vol. 25, No. 5, pp. 389-392.
- [7] A.E.W. Rennie, C.E. Bocking, G.R. Bennett, Electroforming of rapid prototyping mandrels for electro-discharge machining electrodes, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 110, No. 2, pp. 186-196, 2010. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00878-5
- Abdel [8] Z. Hamid, A. Abdel Aal, New environmentally friendly non-cyanide alkaline electrolyte for copper electroplating, Surface & Coatings Technology, Vol. 203, pp. 1360-1365, 2009. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.11.001
- [9] Z. Zhao, L. Du, Z. Xu, L. Shao, Effects of ultrasonic agitation on adhesion strength of micro electroforming Ni layer on Cu substrate, Ultrasonics Sonochemistry , Vol. 29, pp. 1-10, 2016.