



ساخت و مشخصه‌یابی نانوذرات مس با استفاده از روش ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی به کمک ارتعاشات فراصوتی

مسعود آزاد¹، امین‌اله محمدی^{2*}، علیرضا فدایی تهرانی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 8415683111، amin1@cc.iut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه استفاده از نانوذرات فلزی در صنایع مختلف به اندازه‌ای گسترش یافته‌است که لزوم یافتن روش‌های نوین در زمینه‌ی تولید نانوذرات به یک چالش تبدیل شده است. یکی از روش‌های نسبتاً جدید در زمینه‌ی تولید نانوذرات، روش تخلیه‌ی الکتریکی در محیط مایع می‌باشد که به دلیل ارزان بودن فرایند و سازگار بودن با محیط زیست، نسبت به سایر روش‌های تولید نانوذرات، بیشتر مورد استقبال قرار گرفته است. در این پژوهش با طراحی و ساخت سیستم تولید ارتعاشات فراصوتی و همراه نمودن آن با فرایند تخلیه الکتریکی، اقدام به تولید نانوذرات مس در محیط مایع دی‌الکتریک آب دی‌یونیزه خالص شده است. تأثیر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری نظیر: شدت جریان، زمان روشنی و خاموشی جرقه و اثر ارتعاشات فراصوتی بر روی اندازه‌ی ذرات تولیدی، نرخ تولید، پایداری ذرات معلق در مایع و درصد فراوانی ذرات بررسی شده است. به منظور مشخصه‌یابی ذرات تولیدی، از آزمون‌های طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX) برای تشخیص خلوص نانوذرات، آزمون تفرق دینامیکی نور (DLS) برای تعیین درصد فراوانی و همچنین میانگین اندازه‌ی ذرات محلول در مایع دی‌الکتریک، و در نهایت برای تعیین اندازه‌ی ذرات تولید شده، از تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با گسیل میدانی (FESEM) استفاده شده است. طبق نتایج به دست آمده، خلوص نانو ذرات مس تولید شده بیشتر از 95% می‌باشد. با اعمال ارتعاشات فراصوتی، پایداری ذرات افزایش یافته و زمان ته‌نشین شدن ذرات تا بیشتر از 5 ماه افزایش یافته است. همچنین درصد فراوانی ذرات کوچکتر از 100 نانومتر، بیشتر از 70% شده است.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 11 تیر 1397
پذیرش: 13 مهر 1397
ارائه در سایت: اسفند 1397

کلیدواژگان:

نانو ذرات
تخلیه الکتریکی
ارتعاشات فراصوتی
مشخصه‌یابی

Manufacturing and characterization of copper nano particles by ultrasonic-assisted electrical discharge machining

Masoud Azad, Aminollah Mohammadi*, Alireza Fadaei Tehrani

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* P.O.B. 8415683111 Isfahan, Iran, amin1@cc.iut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 02 July 2018
Accepted 05 October 2018
Available Online March 2019

Keywords:

Nano particles
Electrical discharge
Ultrasonic vibrations
Characterization

Abstract

Today, since using metallic nanoparticles has been developed in various industries, achieving new methods to produce them is considered as an important issue. Comparing to other nanoparticle production methods, the dielectric discharge process has been emphasized due to its low cost and environmental compatibility. In this study, the ultrasonic-assisted electrical discharge process is designed and manufactured in order to produce copper nanoparticles in di-ionized fluid. The different machining parameters effect, as current intensity, pulse on/off time, and the ultrasonic vibrations on the produced particle size, material removal rate, suspensive particle stability in the fluid, and the particle abundance percentage is investigated. Characterizing the produced nanoparticles is done by different methods. Determining the purity of nanoparticles, percentage of abundance and the average particle size in the dielectric fluid and the produced particle size has been done by applying Energy Dispersive Analysis by X-ray (EDAX), Dynamic Light Scattering (DLS) and Field Emission Scanning Electronic Microscope (FESEM) image, respectively. Based on the results, the produced nanoparticles purity was more than 95%. By using ultrasonic vibration, the nanoparticles stability significantly was increased and the sedimentation time was more than 5 months. Moreover, the average particle size in more than 70% was less than 100 nm.

1- مقدمه

مطالب در زمینه‌ی مواد با مقیاس نانو است. در مقیاس نانو، مواد دچار تغییر رفتار می‌شوند به نحوی که رفتار آن‌ها بر رفتار توده‌ای ماده غالب می‌شود. در این حال بعضی از روابط فیزیکی

آنچه که باعث توجه زیاد به فناوری نانو شده، وجود نسبت سطح به حجم زیاد در نانوذرات است. این مطلب یکی از با اهمیت‌ترین

Please cite this article using:

M. Azad, A. Mohammadi, A. Fadaei Tehrani, Manufacturing and characterization of copper nano particles by ultrasonic-assisted electrical discharge machining, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 24-31, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ویسکوزیته‌ی بالاتر و رسانایی گرمایی بالاتری را ارائه می‌دهند که این موضوع متأثر از تغییر در پارامترهای سنتز، نظیر شدت جریان فرایند و میزان خنک‌کنندگی مایع دی‌الکتریک می‌باشد. این تحقیق بیان می‌کند که نانوذرات مس ایجاد شده دارای دمای جوش بالاتر (تا حدود 8 درجه سیلسیوس) و ویسکوزیته و رسانایی گرمایی بالاتری می‌باشند که این موارد عملکرد و ویژگی‌های ممتاز نانوذرات مس می‌باشد [7].

در سال 2014 آر.کی. ساهو و همکاران یک روش نوین بر اساس ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی برای تولید نانوذرات آلومینیوم ارائه دادند. نانوذرات آلومینیوم به‌عنوان اجزای سوخت جامد در فرمولاسیون سوخت راکت‌ها استفاده می‌شود. عملکرد این روش نیز تابع پارامترهایی نظیر ولتاژ، شدت جریان، زمان پالس و دوره‌ی کاری تعریف شده است. در این فرایند پیشنهادی، ابزار (کاتد) و قطعه‌کار (آند) از جنس آلومینیوم با خلوص بالا هستند و در آب دی‌یونیزه به‌عنوان مایع دی‌الکتریک، ذوب و سپس تبخیر می‌شوند. برای دست‌یابی به پراکندگی یکنواخت و جلوگیری از توده‌ای شدن ذرات تولیدی در فرایند، امواج فراصوتی با فرکانس 55 کیلوهرتز از میان سیال با کمک یک موج دهنده‌ی فراصوتی¹ عبور داده می‌شود. در این تحقیق، با عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی عبوری²، اندازه‌ی ذرات در حدود 50-130 نانومتر و با میانگین 90 نانومتر تعیین شده‌است. از نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان به کم‌هزینه بودن و نرخ بالای تولید نانوذرات آلومینیوم با استفاده از روش ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی اشاره کرد. اما پایداری نانوذرات آلومینیوم معلق در دی‌الکتریک، پس از مدت زمانی معین، هنوز هم یکی از چالش‌های جدی می‌باشد. به‌عبارتی ذرات معلق در نمونه‌ی آزمایش پس از گذشت مدت‌زمانی چندروزه، تا حد زیادی ته‌نشین می‌شود و این امر یکی از ضعف‌های تولید نانوذرات با استفاده از روش مذکور می‌باشد [8-10].

در سال 2005 چانگ و همکاران رفتار شاره‌ای نانوذرات مس معلق در مایع که به روش تخلیه الکتریکی ایجاد شده‌اند را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های آن‌ها، دمای منطقه‌ی جرقه‌زنی از 6000 تا 12000 درجه‌ی سانتی‌گراد بالا می‌رود؛ سپس فلز ذوب و بخار می‌شود؛ قسمتی از آب اطراف نیز تحت فشار بالا و نیروی اینرسی آب دی‌یونیزه‌ی اطراف، بخار می‌شود و این آب بخار شده باعث انتقال فلز بخار شده در منطقه‌ی جرقه به محیط اطراف شده و این بخار فلزی تشکیل

حاکم بر مواد توده‌ای نقض می‌شوند. به‌عنوان مثال زمانی که مواد در مقیاس نانو قرار می‌گیرند، برخی از ویژگی‌های آن‌ها از جمله استحکام، مقاومت در برابر سایش و رنگ تغییر می‌کند. به همین دلیل محققین و پژوهشگران علاقه‌مند به ساخت مواد در مقیاس نانو برای دست‌یابی به خواص ویژه هستند [1]. به‌طور کلی طراحی، ساخت، توسعه و استفاده از محصولاتی با اندازه‌ی 1 تا 100 نانومتر را نانوفناوری می‌نامند. نانو یک مقیاس جدید در فناوری‌ها و یک رویکرد جدید در تمام رشته‌ها است و این توانایی را به بشر می‌دهد تا دخالت خود را در ساختار مواد گسترش دهد و در ابعاد بسیار کوچک به طراحی و ساخت دست بزند و در تمام فناوری‌هایی که بشر در حال حاضر به آن دست یافته است، اثر بگذارد. نانوفناوری در حوزه‌های مختلف از جمله پزشکی، زیست فناوری، الکترونیک و کامپیوتر، ارتباطات، حمل و نقل، انرژی، محیط زیست، امنیت ملی و کشاورزی کاربرد دارد [2].

نانوسیال عبارت است از سیالی که حاوی نانوذرات است. نانوذرات مس در بسیاری از زمینه‌های صنعتی کاربرد دارند. ولی یکی از عمده کاربردهای آن، استفاده به‌عنوان انتقال‌دهنده‌ی حرارت می‌باشد. نتایج حاصل از تحقیقات گذشته نشان می‌دهد هدایت گرمایی آب شامل ذرات نانوی مس حدود 60% بیشتر از آب خالص است. این نشان می‌دهد که نانوسیالات مس می‌توانند یک محصول انقلابی به‌عنوان انتقال‌دهنده‌ی حرارت و یا عامل روان‌کاری محسوب شوند. در بسیاری از فرآیندهای صنعتی نیاز به یک سیستم انتقال حرارت با راندمان بالا می‌باشد که عمدتاً به‌وسیله‌ی جریان سیال، گرما را انتقال می‌دهند. امروزه هدایت گرمایی مایعاتی نظیر آب، اتیلن‌گلیکول و روغن به‌صورت گسترده‌ای به‌عنوان عامل خنک‌کننده در اتومبیل‌ها، صنایع الکترونیک، نیروگاه‌ها، یخچال‌ها و سیستم‌های تهویه مطبوع و صنایع و فرآیندهای شیمیایی استفاده می‌شوند. حال اگر این مایعات دارای انتقال حرارت پایین باشند، نرخ خنک‌کنندگی پایین می‌آید. بنابراین سیالات حاوی ریز ذرات جامد معلق، می‌توانند راندمان انتقال حرارت بالاتری نسبت به سیال خالص داشته باشند [3-6].

در سال 2006 ام‌جی. کائو و همکاران تولید ذرات اکسید مس را با استفاده از روش سنتز نانوذرات معلق در محلول، به کمک جرقه‌ی الکتریکی بررسی کردند. مس در آب دی‌یونیزه به‌عنوان سیال دی‌الکتریک، بخار شده و سپس به‌سرعت منجمد شده و باعث جوانه‌زایی و تشکیل پودر با نانو ساختار کریستالی می‌شود. نانوذرات اکسید مس در سیال، دمای جوش بالاتر،

¹ Sonicator² TEM

سیال انتقال می‌دهد. این روش اغلب برای ارتعاش دادن مجدد پس از انجام روش اول و یا در مواقعی که روش اول باعث ایجاد تغییر شکل یا آسیب در نمونه می‌شود (مثل ایجاد شکست در دیواره‌های نانولوله‌های کربن)، استفاده می‌شود. فرایند استفاده از امواج فراصوتی یک حالت ویژه برای فرایند جداسازی و پراکنده سازی است که شامل واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی پیچیده و پیوسته است که می‌تواند منجر به شکسته شدن ذرات خوشه‌ای و یا جلوگیری از تجمع ذرات شود. رسیدن و دستیابی به حالت بهینه در مورد استفاده از تجهیزات فراصوتی، نیازمند تعیین پارامترها و شرایط مناسب تعیین فرکانس، توان و طراحی مناسب تجهیزات و ابزارها می‌باشد.

3- روش‌های ساخت نانو ذرات

روش‌های ساخت مواد نانو بسیار گسترده می‌باشد که برخی از آن‌ها روش سل‌ژل، مکانیزم‌های تبخیر چگالش، واکنش‌های فاز گازی ایجاد شده به وسیله لیزر یا پلاسما می‌باشند؛ در میان روش‌های مذکور، روش استفاده از تخلیه الکتریکی به دلیل ایجاد جرقه در محیط مایع، و جلوگیری از پخش شدن نانوذرات در اتمسفر محیط، از لحاظ زیست محیطی یک روش پاک محسوب می‌شود و به دلیل بی‌نیاز بودن به شرایط کنترل شده‌ی دما و فشار، و همچنین مواد پایدارکننده و تجهیزات خاص، نسبت به سایر روش‌ها، یک روش ارزان به حساب می‌آید.

4- طراحی و شبیه سازی سیستم فراصوتی

4-1- طراحی ابزار و انتقال دهنده‌ی امواج فراصوتی²

به منظور به دست آوردن طول بهینه‌ی ابزار و انتقال دهنده‌ی امواج فراصوتی، ابتدا با توجه به داده‌های جدول 1 و رابطه‌ی (1)، سرعت امواج صوتی در آلومینیوم و مس به دست می‌آید. با استفاده از رابطه‌ی (2) طول ابزار و انتقال دهنده به اندازه یک طول موج (λ) به دست می‌آید. در ضمن مقدار فرکانس (f) برابر 20 کیلوهرتز در نظر گرفته می‌شود.

جدول 1 خواص مکانیکی آلومینیوم و مس

چگالی (ρ) (kg/m ³)	مدول یانگ (E) (Gpa)	جنس ماده
2823/9	71/7	آلومینیوم 7075
8940	110	مس با خلوص بیشتر از 95%

شده سپس دچار تغییر حالت فازی و تبدیل به سه حالت: جوانه‌زایی، رشد جوانه و جامدسازی می‌شود و سرانجام باعث ایجاد نانوذرات پراکنده در دی‌الکتریک می‌شود. ذرات تولید شده با این روش، برای مدت نسبتاً طولانی بدون ته‌نشینی و با توزیع یکنواخت پراکنده می‌شوند [11].

در پژوهش‌های انجام شده در گذشته، چند چالش اساسی وجود دارد. می‌توان به مواردی نظیر نرخ تولید بسیار پایین، توزیع غیر یکنواخت ذرات در محلول دی‌الکتریک با محدوده اندازه‌ی زیاد، زمان ته‌نشین شدن کم ذرات، استفاده از سیستم کنترل فشار مایع و کنترل دما به منظور یکنواخت شدن انرژی جرقه‌ها در محدوده‌ی گپ، استفاده از مواد پایدارکننده در محلول دی‌الکتریک به منظور هموزن شدن ذرات محلول اشاره نمود. این مواد باعث ایجاد ناخالصی در ذرات تولیدی می‌شوند. در پژوهش انجام شده، استفاده از ارتعاشات فراصوتی به صورت مستقیم درون محلول دی‌الکتریک به منظور ایجاد پدیده‌ی حباب‌زایی (کاویتاسیون) به عنوان نوآوری طرح می‌باشد. برای این منظور، ابتدا اقدام به طراحی و ساخت ابزار و انتقال دهنده‌ی امواج فراصوتی (هورن) شد و سپس با نصب بر روی دستگاه اسپارک و انجام آزمایش‌ها قبل و بعد از اعمال ارتعاشات فراصوتی، نتایج با یکدیگر مقایسه شد. کاهش اندازه‌ی ذرات، افزایش پایداری ذرات در محلول و افزایش نرخ تولید ذرات از مهمترین نتایج حاصل بود.

2- کاربرد امواج فراصوتی در تولید نانو ذرات

امواج فراصوتی به دو طریق می‌توانند در داخل سیال منتشر شوند:

الف- روش مستقیم: در این روش امواج فراصوتی مستقیماً از طریق پروب¹ معلق در سیال، اعمال می‌شوند.
ب- روش غیر مستقیم: در این روش کل حمام یا مخزن حاوی سیال تحت تأثیر امواج فراصوتی قرار می‌گیرد. روش اول برای دستیابی به نانوذرها با پراکندگی بالا بدون ایجاد حالت توده‌ای و همچنین به دلیل راندمان بالاتر انرژی خروجی، توصیه می‌شود.

در روش دوم، امواج فراصوتی ابتدا باید به دیواره‌ی ظرف حاوی سیال برخورد کرده، از آن عبور کند و به سیال برسد که موجب اتلاف انرژی فراصوتی می‌شود. ولی در روش اول، امواج فراصوتی به‌طور مستقیم از طریق پروب، انرژی فراصوتی را به

² Horn

¹ Probe

با مدار ایزوپالس استفاده شده است (شکل 2). آزمایش‌ها با تغییر در پارامترهایی نظیر زمان روشنی و خاموشی جرقه و شدت جریان اعمالی در فرایند تخلیه الکتریکی¹ انجام می‌شوند. لازم به ذکر است که در تمام آزمایش‌ها، قطبیت الکترود ابزار مثبت و قطعه کار منفی می‌باشد. در ضمن برای همه‌ی آزمایش‌ها، ولتاژ مدار باز برابر با 100 ولت و ولتاژ شکست برابر با 40 ولت در نظر گرفته شد (جدول 2). مجموعه سیستم فراصوتی ساخته شده شامل ابزار و انتقال دهنده در شکل 3 نشان داده شده است. یک پایهی نگه‌دارنده برای اتصال ابزارگیر به کلگی اسپارک، طراحی و ساخته شده است. محل نصب پایهی نگه دارنده در نقطه‌ای با کمترین دامنه‌ی ارتعاشی (گره) می‌باشد.

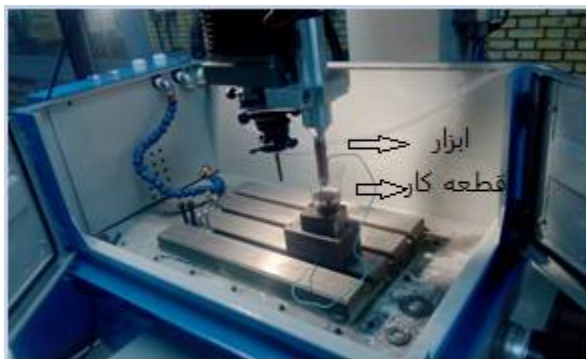


Fig. 2 A view of the Spark device, tool and workpiece

شکل 2 نمایشی از دستگاه اسپارک، ابزار و قطعه کار

جدول 2 پارامترهای تنظیمی آزمایش‌ها

Table 2 Variable factors

شماره	شدت	زمان روشنی	زمان خاموشی	اندازه گپ	زمان آزمایش
آزمایش	جریان (A)	جرقه (μs)	جرقه (μs)	(μm)	(دقیقه)
1	1	30	40	40	60
2	2	30	40	40	60
3	4	70	70	50	30
4	6	70	70	50	30

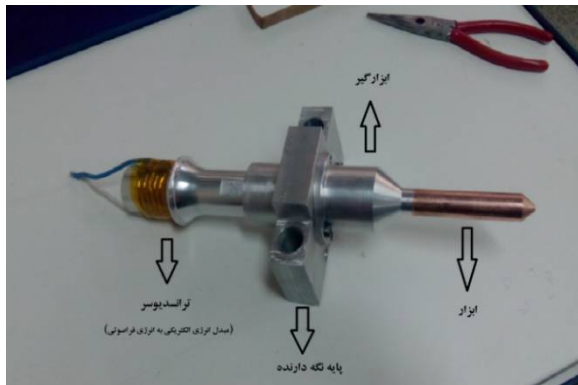


Fig. 3 The setup of ultrasonic vibration

شکل 3 سیستم ارتعاشی فراصوتی

برای انتقال هرچه بهتر امواج فراصوتی، طول مناسب برای طراحی ابزار و انتقال دهنده ضریب صحیحی از $(\lambda/2)$ می‌باشد.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

در روابط (1) و (2)، c سرعت صوت (m/s)، E مدول یانگ (Gpa) و ρ چگالی (kg/m³) می‌باشد. پس از جایگذاری اعداد جدول 1 در این روابط، طول انتقال دهنده با قطر 51 میلی‌متر 151 میلی‌متر و طول ابزار با قطر 8 میلی‌متر 110 میلی‌متر به‌دست آمده است.

4-2- شبیه‌سازی انتقال دهنده و ابزار در نرم افزار

به‌منظور دست‌یابی به حداکثر ارتعاش صرفاً طولی و بدون ارتعاشات جانبی در ابزار و انتقال دهنده، با وارد کردن مشخصات فیزیکی آن‌ها نظیر جنس، مدول الاستیسیته و چگالی در نرم‌افزار آباکوس و انجام تحلیل المان محدود، فرکانس ارتعاشی رزونانس مجموعه به‌دست آمده است.

یکی از نتایج تحلیل المان محدود، نمودار دامنه ارتعاشی ابزار و هورن بر حسب جابجایی در راستای طول می‌باشد (شکل 1).

طبق این نمودار، مجموعه‌ی ابزار و ابزارگیر در فرکانس 20400 هرتز بدست آمده از نرم‌افزار دارای ارتعاش صرفاً طولی می‌باشند که اندازه دامنه در نوک ابزار بیشترین مقدار می‌باشد. از طرفی در ناحیه‌ای که امواج ارتعاشی کمترین دامنه را دارند، بهترین مکان برای نصب مجموعه سیستم ارتعاشی به کلگی دستگاه اسپارک است.

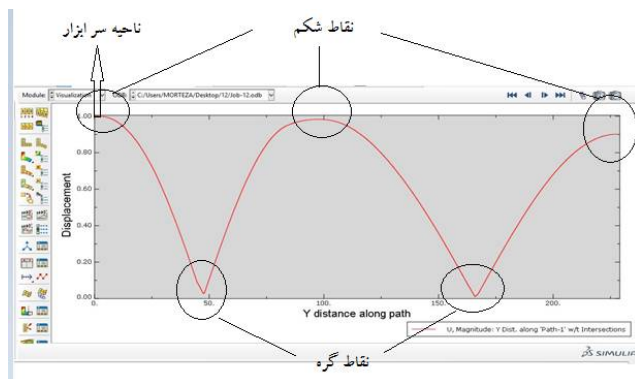


Fig. 1 Longitudinal vibration amplitude in terms of displacement along the length of the tool and horn

شکل 1 نمودار دامنه ارتعاشی طولی بر حسب جابجایی در راستای طول ابزار و انتقال دهنده امواج

5- وسایل و شرایط انجام آزمایش

در این تحقیق دستگاه اسپارک مدل (Azarakhsh-ZNC 304-75 A)

¹ EDM

برای انجام آزمایش DLS نیز ابتدا حدود 10 میلی لیتر از نمونه‌ی محلول داخل ظرف مخصوص دستگاه DLS ریخته شده، سپس حدود 10 میلی لیتر آب دی‌یونیزه نیز جهت رقیق سازی و ارزیابی نتایج بهتر به محلول اضافه شد.

5-1- بررسی اندازه ذرات و میزان پایداری آن‌ها

جدول 3 میانگین اندازه ذرات به‌دست آمده قبل و بعد از اعمال ارتعاشات فراصوتی و مدت زمان ته‌نشین شدن ذرات در محلول دی‌الکترونیک را نشان می‌دهد. محاسبه‌ی مدت زمان و میزان ته‌نشین شدن ذرات در محلول دی‌الکترونیک با استفاده از داده‌های حاصل از آزمون DLS مشخص شده‌است. به این ترتیب که در بازه‌های زمانی مختلف نمونه‌های تولید شده تحت آزمایش DLS قرار گرفته و با مشخص شدن غلظت ذرات و تغییر درصد فراوانی آن‌ها، مقدار ته‌نشین شدن ذرات مشخص شد. برای تعیین اندازه‌ی ذرات قبل و بعد از اعمال امواج فراصوتی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی که قادر به تشخیص ذرات بزرگتر از 100 نانومتر است استفاده شده است (شکل 5).

5-2- بررسی توزیع اندازه ذرات و فراوانی آن‌ها در محلول

برای این منظور از دستگاه آنالیزگر تفرق دینامیکی نور، مدل (HORIBA sz-100) استفاده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایش DLS طبق شکل 6 که از آزمایش نمونه‌ی با شدت جریان 1 آمپر، در آب دی‌یونیزه تحت تأثیر امواج فراصوتی ایجاد شده است، میانگین اندازه‌ی ذرات 123 نانومتر می‌باشد که با توزیع در بازه‌ی (80-130) نانومتر در محلول دی‌الکترونیک پراکنده شده است. همچنین بیشترین درصد فراوانی ذرات مربوط به ذرات با اندازه‌ی حدود 105 نانومتر است که نزدیک به 70% فراوانی در محلول را دارد.

جدول 3 میانگین اندازه ذرات و مدت زمان ته‌نشین ذرات در محلول

Table 3 Average particles size and sedimentation time of particles				
بدون اعمال امواج فراصوتی				پارامتر
6	4	2	1	شدت جریان (آمپر)
1000	850	600	400	میانگین اندازه تقریبی ذرات (nm)
72 ساعت	1 هفته	3 هفته	1 ماه	مدت زمان ته‌نشین شدن
با اعمال امواج فراصوتی				پارامتر
6	4	2	1	شدت جریان (آمپر)
600	350	200	50	میانگین اندازه تقریبی ذرات (nm)
3 هفته	1 ماه	3 ماه	بیش‌تر از 4 ماه	مدت زمان ته‌نشین شدن

به‌منظور اطمینان از عملکرد صحیح سیستم فراصوتی طراحی شده و مقایسه‌ی نتایج تئوری با نتایج عملی و اندازه‌گیری فرکانس تشدید آن، از تحلیلگر امپدانس مدل (Bandera-PV520 A) استفاده شده است. همانگونه که در شکل 4 نشان داده شده است، فرکانس ارتعاشی تشدید سیستم طراحی شده توسط این دستگاه 19902 هرتز اندازه‌گیری شده است که اختلاف بسیار کمی با نتایج ارائه شده‌ی توسط نرم افزار دارد.

برای اندازه‌گیری مقدار دامنه‌ی ارتعاشی سر ایزار، از یک سنسور اندازه‌گیری جابجایی غیر تماسی جریان گردابی مدل (AEC-5505) با محدوده‌ی اندازه‌گیری 0 تا 2 میلی متر و فرکانس پاسخ 35000 هرتز استفاده شده است. مقدار دامنه‌ی ارتعاشات فراصوتی در سر الکتروود ابزار 10 میکرون به‌دست آمد. دستگاه آنالیز تفرق دینامیکی نور (DLS)¹ مدل (HORIBA sz-100) برای تعیین توزیع اندازه‌ی ذرات محلول در مایع دی‌الکترونیک با قدرت تشخیص ذرات تا حدود اندازه‌ی 100 نانومتر و از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX)² مدل (EDS Silicon Drift) جهت اندازه‌گیری میزان خلوص ذرات مس با دقت تشخیص خلوص به میزان 5% استفاده شده است. اندازه‌ی ذرات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)³ مدل (FEI Quanta FEG 450) با بزرگنمایی تا 2 میلیون برابر تعیین گردیده است. به منظور آماده سازی نمونه‌ها برای انجام آزمون‌های EDAX و FESEM ابتدا چند قطره از نمونه‌ی آزمایش (سیال دی‌الکترونیک حاوی نانوذرات) بر روی لام میکروسکوپی تمیز شده توسط استون ریخته شده و پس از خشک شدن، تحت آزمون قرار گرفتند.

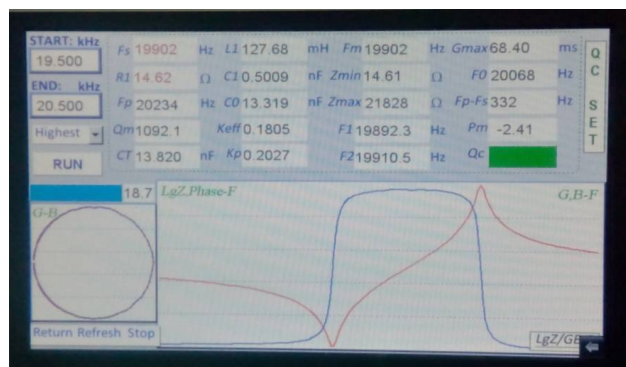


Fig. 4 Verification of the vibration system using an impedance analyzer device

شکل 4 صحت‌سنجی سیستم ارتعاشاتی ساخته شده، به‌وسیله‌ی دستگاه تحلیلگر امپدانس

¹ Dynamic light scattering

² Energy Dispersive Analysis by X-ray

³ Field emission scanning electron microscope

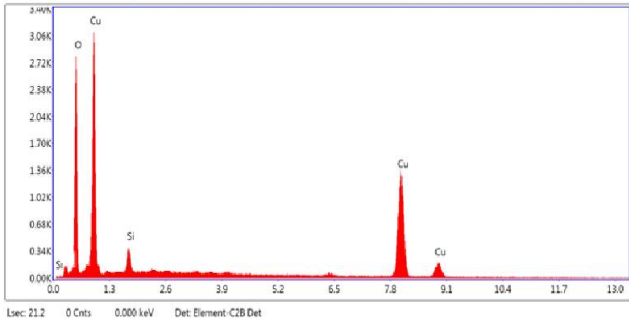


Fig. 7 X-ray energy spectroscopy pattern of produced nanoparticles

شکل 7 الگوی طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس از نانوذرات تولید شده

قله‌ی عنصر سیسیلسیوم موجود در تصویر، مربوط به خراشیدگی روی لام شیشه‌ای میکروسکوپی و ترکیب شدن ذرات شیشه با نمونه‌ی آزمایش می‌باشد که در ابتدا چند قطره از نانوسیال روی آن ریخته شده، سپس در کوره خشک می‌گردد و ذرات مس با استفاده از کاردک، از سطح لام جمع‌آوری می‌شوند.

6- نتایج و بحث

6-1- نرخ تولید ذرات

نرخ تولید نانوذرات از طریق تخلیه‌ی جریان الکتریکی به عواملی از قبیل مقدار و شکل جریان جرقه، زمان روشنی و خاموشی پالس بستگی دارد و از رابطه‌ی (3) قابل محاسبه است:

$$MRR = \left(\frac{M1 - M2}{\rho t} \right) * 10^3 \quad (3)$$

در این رابطه (MRR) مقدار نرخ براده‌برداری بر حسب ($M2$)، جرم قطعه‌کار قبل از ماشین‌کاری (g)، ($M1$) جرم قطعه‌کار بعد از ماشین‌کاری (g)، t مدت‌زمان ماشین‌کاری (min) و ρ چگالی قطعه‌کار (gr/cm^3) است.

در این پژوهش برای تولید نمونه‌ی با شدت جریان 1 آمپر و زمان روشنی جرقه ($30\mu s$) و زمان خاموشی جرقه ($40\mu s$) و زمان 60 دقیقه، میزان تولید پودر مس بدون اعمال امواج فراصوتی حدود $\frac{1}{3}$ گرم بر ساعت می‌باشد و بعد از اعمال امواج فراصوتی در حدود یک گرم بر ساعت می‌شود که نسبت به حالت بدون استفاده از ارتعاشات فراصوتی حدود سه برابر بیشتر شده است؛ دلیل آن را می‌توان در شستشوی بهتر گپ بین ابزار و قطعه‌کار و ایجاد فشار و مکش در نتیجه‌ی ارتعاشات فراصوتی دانست که سبب افزایش پالس‌های نرمال و ایجاد کاپیتاسیون می‌شود [12].

با اعمال ارتعاشات فراصوتی، پایداری فرایند بیشتر شده و پالس‌های نرمال افزایش می‌یابد. همچنین در این شرایط زمان تاخیر جرقه نیز کاهش می‌یابد. نوسان ذرات آزاد توسط امواج

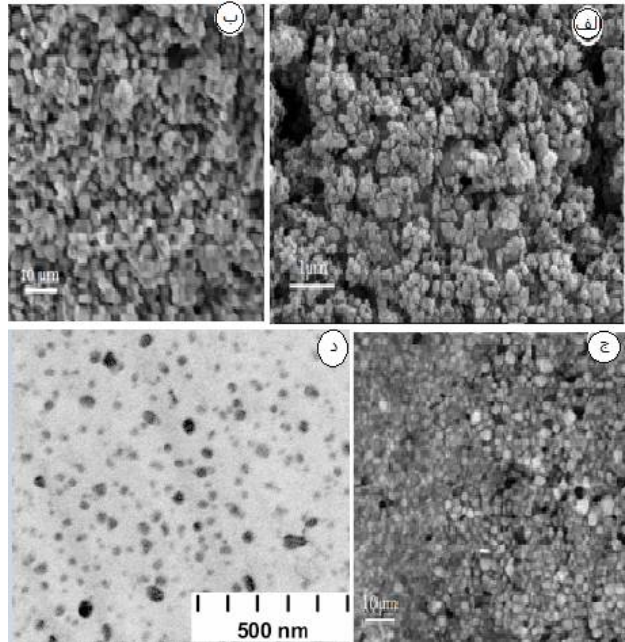


Fig. 5 The image obtained from a SEM microscope without applying ultrasound waves, (a) I=4 A, (b) I=2 A, (c) I=1 A, (d) with applying ultrasonic waves and I=1 A

شکل 5 تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی بدون اعمال امواج فراصوتی، (الف) شدت جریان 4 آمپر، (ب) شدت جریان 2 آمپر، (ج) شدت جریان 1 آمپر، (د) با اعمال امواج فراصوتی و شدت جریان 1 آمپر

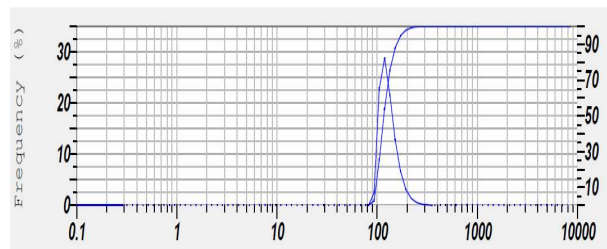


Fig. 6 Dynamic Diffraction Analysis Results from a test sample produced with a current density of 1 Amp

شکل 6 نتایج آنالیز تفرق دینامیکی نور حاصل از آزمایش نمونه‌ی تولید شده با شدت جریان 1 آمپر

لازم به ذکر است که اندازه‌ی واقعی ذرات که با آزمون DLS مشخصه‌یابی می‌شوند، کوچکتر از مقادیر گزارش شده می‌باشد؛ زیرا آزمون مذکور، صرفاً قطر هیدرودینامیکی ذرات را نشان می‌دهد که به مراتب بزرگتر از اندازه‌ی واقعی ذره است. بنابر این اندازه‌ی ذرات تولید شده با جریان 1 آمپر، کمتر از 100 نانومتر می‌باشد [8].

5-3- بررسی خلوص نانوذرات تولید شده

همان‌طور که در شکل 7 مشخص است، ذرات اکسید مس با غلظت زیاد (بیشتر از 95%) و کمترین ناخالصی با استفاده از این روش، قابل تولید می‌باشند.

ذرات، میزان پایداری ذرات در محلول، مدت‌زمان ته‌نشین شدن ذرات در محلول، درصد فراوانی و توزیع ذرات و در نهایت اندازه‌ی ذرات تولید شده مورد بررسی قرار گرفت. شدت جریان جرقه در فرایند تولید نانوذرات با استفاده از تخلیه الکتریکی، بیشترین تأثیر را در اندازه و میزان پایداری و پراکندگی ذرات در محلول دارد. پس از آن زمان روشنی و خاموشی جرقه بیشترین تأثیر را در شکل‌گیری ذرات مس ایجاد شده داشته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که فرایند تخلیه الکتریکی به کمک امواج فراصوتی، یک روش ساده، با راندمان بالا و فرایندی سازگار با محیط زیست و بدون آلودگی زیست محیطی است که برای تولید نانوذرات مس در آب دی‌یونیزه و بدون افزودن عامل پایدارکننده محسوب می‌شود. از این رو نتایج زیر از این تحقیق حاصل شده است:

- با اعمال ارتعاشات فراصوتی در این فرایند، انتقال ذرات از منطقه‌ی گپ به مناطق مجاور با دمای پایین‌تر انجام شده، که موجب جلوگیری از توده‌ای شدن ذرات و کاهش اندازه‌ی آن‌ها می‌شود و می‌توان ذراتی با میانگین اندازه‌ی 50 نانومتر تولید کرد.

- با اعمال امواج فراصوتی، نرخ تولید پودر مس در مقایسه با فرایند بدون امواج فراصوتی، حدود سه برابر بیشتر شد؛ دلیل آن را می‌توان در شستشوی بهتر گپ بین ابزار و قطعه کار و ایجاد فشار و مکش در نتیجه‌ی ارتعاشات فراصوتی دانست که سبب کاهش پالس‌های ناپایدار و نامطلوب می‌شود. در این شرایط زمان تاخیر جرقه نیز کاهش می‌یابد.

- با به‌کارگیری ارتعاشات فراصوتی، توزیع اندازه‌ی ذرات یکنواخت‌تر می‌شود و پایداری ذرات در محلول دی‌الکتریک نیز افزایش می‌یابد؛ دلیل آن یکنواختی پالس‌های جرقه در منطقه‌ی گپ و جدا شدن ذرات با اندازه‌های یکنواخت از قطعه کار و هموزن شدن محلول حاوی نانوذرات می‌باشد. در نتیجه مدت زمان ته‌نشینی نانوذرات در محلول افزایش می‌یابد.

8- مراجع

- [1] C. P. Pool, J. Frank, J. Owens, Introduction to nanotechnology, Aa Wiley Interscience publication, 112-114 (2003).
- [2] H. Thembela, H. Mbhuti, Nanotechnology and the challenge of clean water, *Nature Nanotechnology*, **2**, 663-664 (2007).
- [3] M.J. Kao, C.H. Lo, T.T. Tsung, Y.Y. Wu, C.S. Jwo, H.M. Lin, Copper-oxide brake nanofluid manufactured using arc-submerged nanoparticle synthesis system, *Alloys and Compounds*. No.4, pp.

صوتی برخورد یونی را زیاد کرده و شکست دی‌الکتریک را تسریع می‌کند. تحریک ایجاد شده در مایع، یونیزاسیون را تسهیل کرده و از چسبندگی ذرات به سطح الکتروود جلوگیری می‌کند [12,13].

در تمامی آزمایش‌ها، اعمال ارتعاشات فراصوتی موجب پایداری و ثبات بیشتر فرایند شده است. تحت تأثیر ارتعاشات فراصوتی تعداد پالس‌های نرمال در واحد زمان افزایش یافته و پایداری فرایند بیشتر شده است و در نهایت منجر به افزایش نرخ برابرداری شده است [12].

6-2- اثر ارتعاشات فراصوتی بر روی اندازه‌ی ذرات

ارتعاشات فراصوتی می‌تواند تغییرات فشار در محیط گپ ایجاد کند و باعث ایجاد حرکات ضربه‌ای در منطقه‌ی ذوب شده که باعث خروج راحت‌تر و سریع‌تر بخارات فلزی از منطقه‌ی ذوب می‌شوند؛ بنابر این در محیط دی‌الکتریک اطراف آن با دمای پایین‌تر، خنک شده و از رشد اضافی ذرات جلوگیری نموده و باعث ایجاد ذرات با اندازه‌ی کوچک‌تر می‌شوند. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با گسیل میدانی، اندازه‌ی ذرات تولید شده با شدت جریان 1 آمپر و تحت تأثیر امواج فراصوتی را کمتر از 100 نانومتر و با میانگین اندازه‌ی 50 نانومتر نشان می‌دهد.

6-3- اثر ارتعاشات فراصوتی بر روی توزیع ذرات

با افزایش شدت جریان الکتریکی، و همچنین افزایش زمان روشنی جرقه، انرژی جرقه افزایش یافته و چاله‌های مذاب بزرگ‌تری در الکتروود قطعه‌کار ایجاد می‌شود و ذرات درشت‌تری از آن کنده می‌شود؛ از طرفی نرخ تولید ذرات افزایش یافته و پایداری ذرات در محلول نیز کاهش می‌یابد [6].

در تمامی آزمایش‌ها، با به‌کارگیری ارتعاشات فراصوتی، توزیع اندازه‌ی ذرات یکنواخت‌تر شده و پایداری ذرات در محلول دی‌الکتریک نیز افزایش یافته است؛ دلیل آن یکنواختی پالس‌های جرقه در منطقه‌ی گپ و جدا شدن ذرات با اندازه‌های یکنواخت از قطعه کار و هموزن شدن محلول حاوی نانوذرات می‌باشد. در نتیجه مدت‌زمان ته‌نشینی نانوذرات در محلول افزایش می‌یابد.

7- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر پارامترهای مختلف فرایند تخلیه الکتریکی نظیر شدت جریان تنظیمی، زمان روشنی و خاموشی پالس و نوع دی‌الکتریک بدون اعمال امواج فراصوتی، بر روی نرخ تولید

- properties of Fe₃O₄ nanoparticles prepared by arc discharge in water, *Science in China Press, Springer*, 2007.
- [9] H.Chang, C.S.Jwo, C.H.Lo, T.T.Tsung, M.J.Kao and H.M.Lin, Rheology of cuo nanoparticle suspension prepared by ASNSS, *Article in Reviews Advanced Materials Science*, 2004.
- [10] J. S. Taurozzi, V. A. Hackley, Preparation of Nanoparticle Dispersions from Powdered Material Using Ultrasonic Disruption, *NIST Special Publication 1200-2*, 2012.
- [11] Der-Chi Tien, Kuo-Hsiung Tseng, Chih-Yu Liao, Tsing-Tshih Tsung, Colloidal silver fabrication using the spark discharge system and its antimicrobial effect on Staphylococcus aureus, *Medical Engineering & Physics*. No. 1346, p. 5, 2007.
- [12] A. Mohammadi, *Theoretical and Experimental Analysis of Ultrasonic-Assisted Wire Electrical Discharge Turning Process*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, 2014. (in Persian فارسی)
- [13] A. Mohammadi, A. Fadaei Tehrani, A. Abdullah, Analytical and experimental study of material removal mechanism in turning process by ultrasonic-assisted wire electrical discharge, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-9, 2016 (in Persian)
- 434–435, 2007.
- [4] R.K. Sahu, Somashekhar S.H., Manivannan P.V., Investigation on Copper Nanofluid obtained through Micro Electrical Discharge Machining for Dispersion Stability and Thermal Conductivity, *International Conference on Design and Manufacturing*. No. 64, pp. 946-955, 2013.
- [5] R.K. Sahu, Somashekhar S.Hiremath., P.V. Manivannan and M.Singaperumal, An Innovative Approach for Generation of Aluminium Nanoparticles Using Micro Electrical Discharge Machining, *International Conference on advances in Manufacturing and Materials Engineering*. No. 5, pp. 1205-1213, 2014.
- [6] D.-C. Tien, C.-Y. Liao, J.C. Huang, K.-H. Tseng, J.-K. Lung, T.-T. Tsung, Novel technique for preparing a nano-silver water suspension by the arc discharge method, *Article in Reviews Advanced Materials Science*. No. 18, pp.750-756, 2008.
- [7] Chih-Hung Loa, Tsing-Tshih Tsung, Hong-Ming Lin, Preparation of silver nanofluid by the submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS), *Journal of Alloys and Compounds*. No. 434–435, pp. 659-662, 2007.
- [8] XiaoLing,F & KeFu,Y, Structural and magnetic