

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



Manufacturing of Open Cell copper Foam by Electroless Method

Abstract

In this method, at first step a conductive layer of copper coated on the surface of open cell polyurethane foam (30 ppi) by electroless, and then copper deposited on polyurethane foam by using electrolysis with conductive electroless. Copper layer remains to produce the open cell copper foam with evaporating polyurethane foam by heating in argon atmosphere environment. The main factors affecting the deposition rate such as the solution composition and temperature were explored. Structural analysis was performed by using light microscopy and scanning electron microscopy (SEM). The results show that the optimum process conditions are CuSO_4 200 g/L, H_2SO_4 100g/L and temperature of 40 °C. The results of structural evaluations indicate success in production and coating uniformity in the final products. Study on porosity of produced foam show that this method could be one of the merely method for fabrication of high porosity open cell foam with more than 95% porosity.

Keywords: Copper foam, Open cell, Electroless, Electrolysis, Polyurethane foam

تولید فوم سلول باز مسی با استفاده از روش رسوب گذاری الکتروشیمیایی



چکیده

در این روش ابتدا فوم پلی اورتان سلول باز (۳۰ ppi) به روش الکترولس رسانا شده و سپس با استفاده روش الکترولیز، مس بر روی فوم پلی اورتان رسوب داده می‌شود، سپس فوم پلی اورتان تحت حرارت در محیط گاز آرگون از بین می‌رود و در نهایت فوم مسی سلول باز باقی می‌ماند. در این تحقیق پارامترهایی همچون؛ دمای حمام، غلظت سولفات مس و غلظت اسید سولفوریک در محلول الکترولیز مورد بررسی قرار گرفت، در نهایت شرایط بهینه حمام الکترولیز شامل CuSO_4 ۲۰۰ g/L، H_2SO_4 ۱۰۰ g/L و دمای ۴۰ درجه سانتیگراد بدست آمد. بررسی‌های ساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) صورت گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌های ساختاری حاکی از موفقیت در تولید و یکنواختی پوشش در محصولات نهایی بود. بررسی درصد تخلخل فوم‌های تولید شده نشان می‌دهد که این روش می‌تواند تنها روشی باشد که تخلخل‌های از نوع باز با مقادیر بالای ۹۵٪ ایجاد نماید.

کلمات کلیدی: فوم مسی، سلول باز، الکترولس، الکترولیز، فوم پلی اورتان.

مقدمه

فوم های فلزی شاخه ای از مواد نوین با خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد هستند. از جمله این خواص دارا بودن نسبت استحکام به وزن بالا و نسبت سطح به حجم بسیار بالاست که باعث شده این مواد قابلیت انتقال حرارت و انتقال جریان بالایی داشته باشند. در طبیعت نیز همواره از چنین ساختاری همانند استخوان و چوب برای بهره مندی از خواص منحصر به فرد آنها استفاده می گردد. به طور کلی در سالهای اخیر کاربرد این مواد افزایش یافته است. کاربردهایی همچون مبدل های حرارتی و کاتالیزورها، تخلخل باز به علت فراهم آوردن انتقال حرارت و میزان تماس با سیال بالاتر، مطلوب تر به شمار می رود. روش های مختلفی برای تولید فوم های فلزی وجود دارد. به طور کلی روش های ساخت این مواد را می توان به سه گروه روش های حالت جامد، مایع و گازی تقسیم بندی نمود. فوم های فلزی را می توان با کمک روش های منحصر به فرد و با بهره گیری روش رسوب گذاری الکتریکی تولید نمود [Banhart, ۲۰۰۱].

فوم مسی به علت داشتن انتقال حرارت بالا، یکی از فوم های فلزی پرکاربرد در زمینه انتقال حرارت است. برای مثال در ساخت مبردهای حرارتی آینده های لیزری، از این فوم استفاده می شود [Murakami, Ota, Ohashi, Hyun, Nakajima, ۲۰۰۱].

ناکاجیما و همکارانش چگونگی تولید و همچنین خواص فوم مسی تولید شده به روش انجماد جهت دار که خود زیر مجموعه ای از روش گاسار است، را بررسی کردند. آنها مس را در فشار ۲ MPa در اتمسفر هیدروژن و آرگون ذوب و سپس به صورت جهت دار سرد کردند. تحت این شرایط، در دمای بالا هیدروژن در مذاب مس حل شده و با کم شدن دما در نقطه یوتکتیک، هیدروژن آزاد می شود (روش گاسار). تولید حباب های هیدروژن در مذاب موجب تولید فوم مسی می شود. آنها در این تحقیق اثر متغیر فشار، دمای مذاب، مخلوط اولیه و جهت سرد کردن بر مورفولوژی حفرات و خواص مکانیکی فوم تولیدی را مورد بررسی قرار دادند. در نهایت ناکاجیما در نتایج خود کنترل اندازه حفرات با این پارامترها را بسیار مشکل عنوان کرده است. محصول تولیدی در این روش دارای حفراتی با قطر ۵۰-۵ میکرومتر و بیشترین تخلخل به دست آمده برای فوم، ۷۰٪ بود.

Zhao و همکارانش (۲۰۰۶) روش حذف کربنات زینتر شده (LCS) را برای تولید فوم مسی بکار بردند. در این روش پودر مس همراه با پودر کربنات پتاسیم (K_2CO_3) مخلوط شده و سپس تفجوشی می شود. در نهایت کربنات از محصول نهایی خارج شده و فوم مسی تولید می شود. آنها در تحقیقات خود اثر متغیر دما و زمان تفجوشی و چگونگی حذف کربنات از نمونه را بر خواص فوم تولیدی مورد بررسی قرار دادند. Zhao با این روش فوم هایی با تخلخل ۵۰ تا ۸۰ درصد تولید کرد و توانست با انتخاب قطر مشخص برای پودرهای کربنات اولیه، قطر حفرات محصول نهایی را کنترل کند. او همچنین نشان داد خواص فوم هایی که در آنها دمای تفجوشی کمتر و زمان تفجوشی بیشتر بوده است، مطلوب تر است.

مواد و روش تحقیق

به منظور تولید فوم مسی سلول باز به روش رسوب دهی نیاز به یک مدل اولیه فومی می باشد که بتوان در نهایت آن را حذف کرد. برای این منظور از اسفنج های پلی اورتان (PU) سلول باز، با دانسیته $31-35 \text{ Kg/m}^3$ و اندازه تخلخل های ۳۰ ppi استفاده گردید. مراحل تولید فوم مسی سلول باز به روش رسوب گذاری الکتروشیمیایی مطابق شکل ۱ می باشد.



شکل ۱. مراحل تولید فوم مس به روش رسوب گذاری الکتروشیمیایی.

چربیگیری

در مرحله اول، عمل چربیگیری نمونه های فوم پلی اورتان بصورت غوطه وری در محلول های قلیائی انجام شد. موادی که با این روش خارج می شوند شامل روغن، چربی، موم، ذرات فلزی، گرد و غبار، ذرات کربن و سیلیس می باشد. این مواد با مکانیزم های امولسیون، متفرق سازی یا ترکیب این دو خارج می گردند [Duan, Song, Xue, Guo, Tian, ۲۰۰۷]. ترکیب شیمیایی محلول چربیگیری در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی محلول چربی گیر.

نوع ماده	مقدار
NaOH	۳۵ g/L
Na ₂ CO ₃	۲۵ g/L
Na ₃ PO ₄	۱۰ g/L

اچ کردن

اچ کننده ها محلول های اکسیدی می باشند که سطح پلیمر را در مقادیر مختلف می خورند و سبب افزایش چسبندگی پوشش فلزی بر روی سطح پلیمر می شوند. اچ کردن یک مرحله ضروری و کنترل کننده کیفیت پوشش می باشد [TIAN et al, ۲۰۰۷]. محلول اچ مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است، نمونه پلی اورتان به مدت ۲ دقیقه در دمای 45°C به صورت غوطه وری در محلول فرو برده شد.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی محلول اچ.

نوع ماده	مقدار
KMnO ₄	۱ g/L
H ₂ SO ₄	۰.۵ mL/L

شستشو

بعد از عملیات اچ کردن، عمل شستشو به منظور خنثی سازی اثرات محلول اچ باقیمانده مانند منگنز (MnO₂) در میان تخلخل ها و جلوگیری از آلوده کرده محلول مرحله بعد، توسط آب مقطر و در دمای محیط به مدت ۵ دقیقه انجام می شود [بشارت، ۱۳۹۰].

حساس سازی

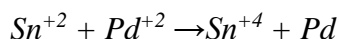
هدف حساس سازی کمک به مرحله فعال سازی است. برخی رزینها بدون تغییر در شارژ سطحی یا فیلم شکل گرفته توسط حساس سازی قابل آبکاری نیستند. دقت در انتخاب صحیح ترکیب مواد بسیار مهم می باشد، بدلیل اینکه می تواند سبب عدم آبکاری شود [Li, Gong, Z.W, Zheng, ۲۰۰۵]. حساس سازی با غوطه ور کردن نمونه در محلول کلرید استانو که در جدول ۳ آورده شده است به مدت ۵ دقیقه در دمای ۳۰°C به همراه همزدن انجام می شود.

جدول ۳. ترکیب شیمیایی محلول حساس ساز.

نوع ماده	مقدار
SnCl ₂	۲۰ g/L
HCl	۴۰ mL/L

فعال سازی

هدف فعال سازی ایجاد لایه ای رسانا روی سطح پلیمر است. اولین ذرات الکترولس مس در این محل ها می نشینند. سپس رسوبات فلزی بعدی بصورت کاتالیتیک روی آنها می نشینند. محلول فعال سازی گرانترین حمام در این فرآیند می باشد، بنابراین آنالیز منظم آن ضروری می باشد [Yang, Zhao, Ma, Wang, Cao, ۲۰۰۶]. فعال سازها که کاتالیزست هم نامیده می شوند شامل فلزات گران قیمت مثل طلا، پالادیم یا پلاتین هستند که توسط کلرید قلع احیاء می شوند. محلول های کاتالیزست مدرن، ترکیبی از کلرید قلع کلرید پالادیوم و اسید کلریدریک هستند. فعالیت و پایداری ترکیبات حاصله یعنی هیدرولیز پالادیوم-قلع بستگی به غلظتهای یون کلرید و قلع دارد. شستشو با آب بعد از فعال سازی سبب ایجاد یک لایه هیدروکسید قلع سنگین روی سطح پلاستیک می شود. یون های قلع که در مرحله حساس سازی روی سطح پلیمر جذب شده اند با یونهای پالادیوم به صورت زیر واکنش می دهند:



با انجام واکنش بالا، پالادیوم روی سطح پلیمر قرار می گیرد و سطح کاتالیزوری ایجاد می کند [قربانی، ۱۳۸۵]. عمل فعال سازی توسط محلول کلرید پالادیوم (جدول ۴) در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه انجام می شود.

جدول ۴. ترکیب شیمیایی محلول فعال ساز.

مقدار	نوع ماده
۰.۵ g/L	PdCl ₂
۱ mL/L	HCl

الکترولس

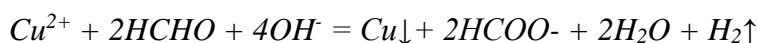
جهت رسوب دهی شیمیایی مس از یک حمام سولفاتی مس در دمای ۶۰°C استفاده گردید که در جدول ۵ ترکیب شیمیایی حمام مورد نظر آورده شده است. محلول های الکترولس مس بر اساس فرمول فلهینگ تهیه شد که شامل سولفات یا نیترات مس است و تامین کننده یون مس در محلول می باشد. از نمک راشل به عنوان عامل کمپلکس کننده در محلول استفاده می شود. همچنین به یک عامل احیاء کننده در حمام نیاز است که از فرمالدئید استفاده شود و سود سوزآور به عنوان تنظیم کننده pH به کار می رود [قربانی، ۱۳۸۵]. یکی دیگر از اجزای مهم محلول، پایدار کننده است که از تجزیه سریع محلول و آزاد شدن فلز در خود محلول جلوگیری می کند که در این محلول از فروسیانید پتاسیم (K₄Fe(CN)₆) استفاده گردید.

جدول ۵. ترکیب شیمیایی حمام الکترولس مس.

مقدار	نوع ماده
۱۶ g/L	CuSO ₄ .5H ₂ O
۱۴g/L	NaKC ₄ H ₄ O ₆
۲۵g/L	EDTA NA ₂ .2H ₂ O
۱۵mL/L	Formaldehyde
۱۴g/L	NaOH
۱۰mg/L	K ₄ Fe(CN) ₆ .4H ₂ O
۱۲/۵	pH

پس از وارد نمودن نمونه به داخل محلول آبکاری الکترولس پس از ۳۰ ثانیه عمل آبکاری شروع می شود و زمان اتمام آبکاری بستگی به سطح نمونه دارد. زمان آبکاری الکترولس نمونه های بکار رفته در این آزمایش حدود ۵-۴ دقیقه می باشد. افزایش بیش از حد زمان آبکاری الکترولس، سبب تیره شده سطح نمونه های آبکاری شده می شود و از طرف دیگر ظرف نیز از لایه های مس پوشیده می شود. توصیه می شود پس از هر بار آبکاری الکترولس ظرف حمام با محلول اسید نیتریک رقیق لایه برداری و شستشو شود. در غیر این صورت هم مصرف مواد حمام بالا رفته و هم سطح نمونه ها تیره می شوند [Tian, ۲۰۰۷].

مهمترین واکنش این مرحله که سبب رسوب مس می شود عبارتند از :



این واکنش باعث رسوب مس و آزاد شدن گاز هیدروژن حاصل از واکنش فرمالدئید با مس می شود. در شکل ۲ نمونه فوم مسی تولید شده با استفاده از روش الکترولس آورده شده است.



شکل ۲. نمونه فوم مسی تولید شده بعد از الکترولس.

الکترولیز

پس از انجام فرآیند الکترولس مس، لایه ای نازک از مس به ضخامت ۱ تا ۲ میکرون بر روی سطح فوم پلیمری ایجاد می شود که در مرحله بعد می توان توسط فرآیند الکترولیز لایه ای ضخیم از مس را بر روی فوم ایجاد کرد. جهت انجام آبکاری از یک بشر شیشه ای استفاده شد. یک عدد ورق مسی به ابعاد ۳×۳ سانتیمتر به عنوان آند استفاده شد. آند مسی به قطب مثبت رکتیفایر و نمونه پلیمری به قطب منفی رکتیفایر متصل شدند. فاصله نمونه پلیمری از آند ۳ سانتیمتر می باشد. سیم اتصال به نمونه یک سیم مسی می باشد که قبلا در مرحله الکترولس به نمونه متصل شده است. در این مرحله از حمام اسیدی با سه غلظت متفاوت سولفات مس ۷۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ گرم بر لیتر و همچنین سه غلظت متفاوت اسید سولفوریک مس ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ گرم بر لیتر استفاده گردید. دمای حمام نیز به عنوان متغیر با سه دمای ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتیگراد جهت بررسی نرخ رسوب مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب و شرایط حمام آبکاری مس بهینه شده مورد استفاده در جدول ۶ ارائه شده است. از آنجا که دمای حمام های سیانیدی زیاد است ممکن است روی نمونه های پلیمری اثر بگذارد به همین دلیل از این نوع حمام ها استفاده نمی شود [قربانی، ۱۳۷۹].

جدول ۶. ترکیب شیمیایی و شرایط حمام بهینه شده الکترولیز مس.

نوع متغیر	مقدار
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	۲۰۰ g/L
H_2SO_4	۱۰۰ g/L
دما (درجه سانتیگراد)	۴۰
میزان جریان (A/cm^2)	۰,۰۱
زمان (دقیقه)	۲۵

نمونه ای از فوم مسی تولید شده بعد از انجام عملیات الکترولیز بر روی آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. نمونه فوم مسی بعد از الکترولیز با مش ۳۰ PPI.

حذف پلیمر

به منظور حذف فوم پلیمری و همچنین افزایش استحکام لایه مسی ایجاد شده، نمونه ها به مدت ۱۰ ساعت در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر گاز آرگون قرار داده شدند.

آزمون های مورد استفاده برای بررسی نمونه ها

اندازه گیری دانسیته و مقدار تخلخل

چگالی نمونه ها با استفاده از نسبت وزن به حجم آنها به دست آمد. درصد تخلخل فوم های تولید شده از رابطه ۱ به دست می آید:

$$P = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (1)$$

در رابطه فوق P ، درصد تخلخل فوم، ρ و ρ_s به ترتیب چگالی فوم و چگالی ماده موجود در دیواره ها است و نسبت ρ/ρ_s که چگالی نسبی فوم نامیده می شود مشخص کننده نسبت چگالی محصول فومی به چگالی ماده موجود در دیواره ها می باشد.

اندازه گیری میزان نرخ رسوب

محاسبه مساحت سطح فوم به دلیل پیچیده بودن سطح بسیار دشوار می باشد. از این رو در این مطالعه، نرخ رسوب طبق رابطه ۲ محاسبه گردید:

$$V = (m_2 - m_1) / (m_1 t) \quad (2)$$

در این رابطه m_2 و m_1 به ترتیب وزن فوم قبل و بعد از پوشش می باشد و t زمان انجام عملیات رسوب دهی می باشد.

ریز ساختار

به منظور بررسی ریز ساختار فوم های تولیدی، ابتدا نمونه ها مانع شدند تا در مراحل آماده سازی، شکل حفرات و ساختار آنها تغییر نکند. پس از آن نمونه های مانع شده ابتدا توسط سمباده و سپس توسط دستگاه پولیش و خمیر الماس پولیش شده و نهایتاً ریزساختار نمونه ها توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفتند. برای بررسی ویژگی های ساختاری نمونه های فوم مسی تولید شده، از میکروسکوپ نوری Olympus و میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO 1450VP(35Kv) استفاده شد.

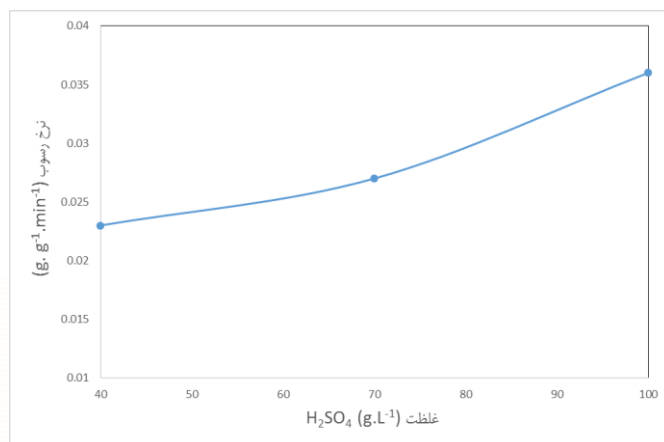
نتایج و بحث

بررسی دانسیته و تخلخل

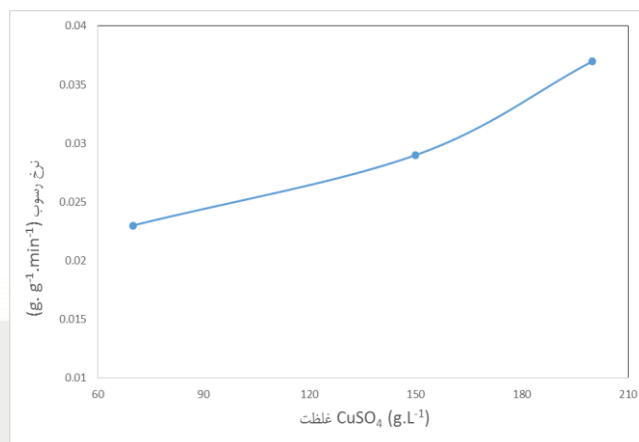
میزان دانسیته نمونه ها به طور میانگین 0.8 gr/cm^3 و میزان دانسیته نسبی در حدود 0.09 است که این نشان دهنده چگالی بسیار کم فوم در مقایسه با چگالی مس می باشد. درصد تخلخل اندازه گیری شده فوم مسی 98% می باشد که این درصد تخلخل نشان دهنده نسبت سطح به حجم بالای این نوع فوم می باشد. نتایج درصد تخلخل و دانسیته فوم های تولید شده با روش رسوب گذاری الکتروشیمیایی در مقایسه با سایر روش های فوم سازی نشان می دهد تنها روشی که می توان تخلخل های از نوع باز با مقادیر بالای 95% ایجاد نمود روش رسوب گذاری الکتروشیمیایی می باشد.

بررسی میزان نرخ رسوب

نتایج بدست آمده پس از انجام و تکمیل آزمایشات با متغیرهای سولفات مس و اسید سولفوریک در اشکال ۴ و ۵ آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش سولفات مس و اسید سولفوریک میزان نرخ رسوب افزایش می‌یابد ولی اگر این میزان بیش از این حد شود باعث تشکیل نمک متبلور در حمام می‌گردد.

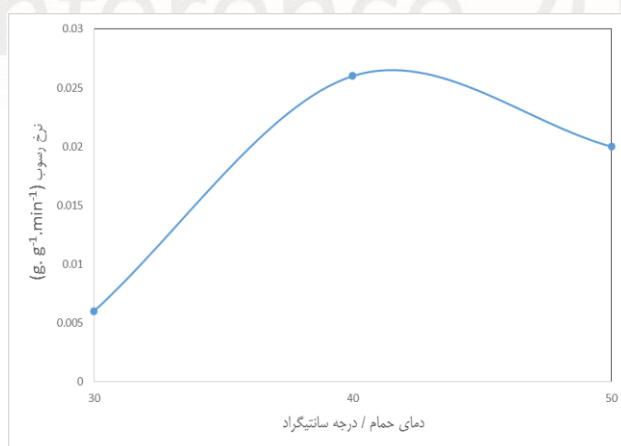


شکل ۵. تاثیر میزان اسید سولفوریک بر نرخ رسوب.



شکل ۴. تاثیر میزان سولفات مس بر نرخ رسوب.

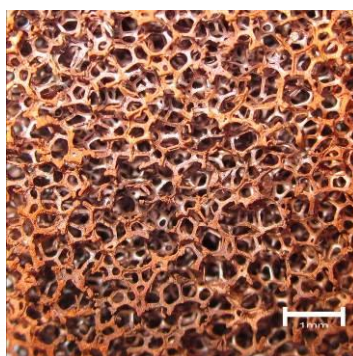
در شکل ۶ نتایج حاصل از اثر دمای حمام الکترولیز نشان داده شده است. نتایج بیانگر افزایش نرخ رسوب تا دمای ۴۰ درجه سانتیگراد می‌باشد که افزایش دما بیش از این حد باعث تشکیل رسوب مس در کف حمام و کاهش نرخ رسوب بر روی فوم‌های تولیدی می‌شود.



شکل ۶. تاثیر دمای حمام الکترولیز مس بر نرخ رسوب

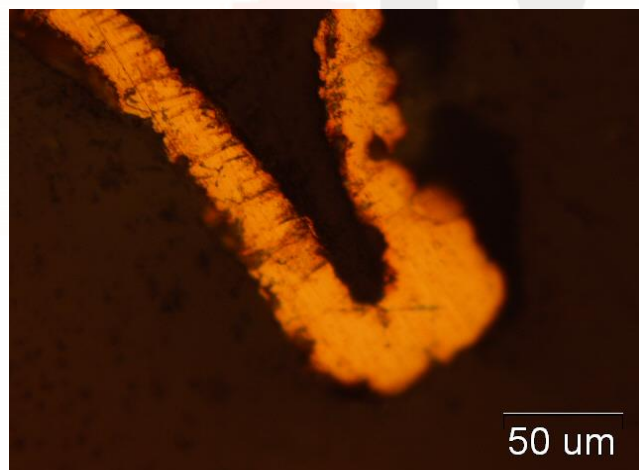
بررسی ساختاری

در بررسی های ماکروسکوپی صورت گرفته بر روی فوم های تولید شده پیوستگی مناسب دیواره ها و همچنین ایجاد پوششی یکنواخت در سطح و حجم نمونه ها (شکل ۷) مشاهده گردید.

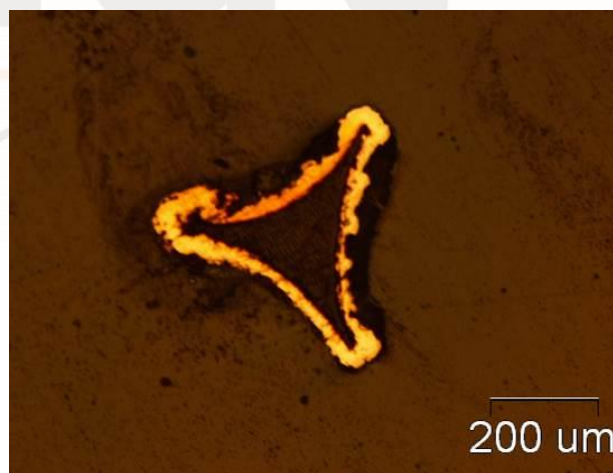


شکل ۷. فوم مسی با تخلخل ۳۰ PPI.

آنچه در بررسی ریزساختاری نمونه ها مشاهده گردید، پیوستگی دیواره در بیشتر قسمت ها و همچنین یکنواختی ضخامت دیوارها می باشد (شکل ۸). همانطور که در شکل ۹ مشاهده می گردد در قسمت های نوک تیز ضخامت مقداری افزایش یافته است که به دلیل تجمع یون های فلزی در این مناطق می باشد.

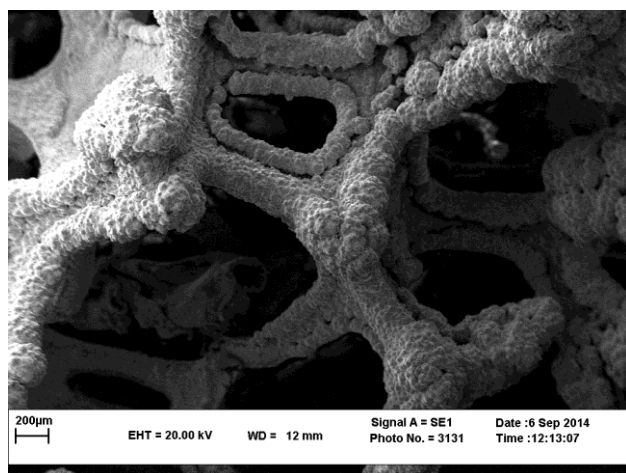


شکل ۹- افزایش ضخامت دیواره فوم در قسمت های نوک تیز

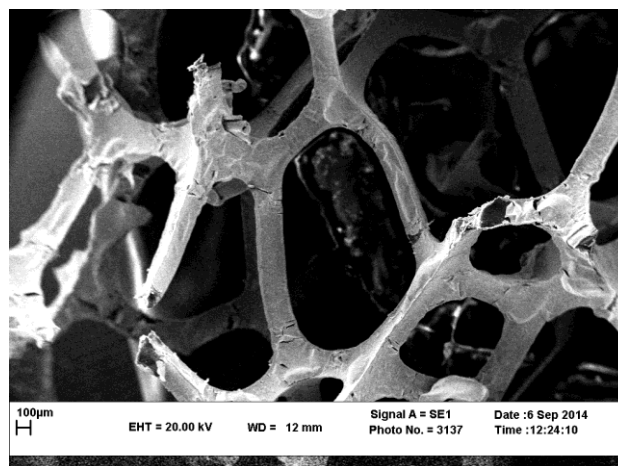


شکل ۸- پیوستگی دیواره فوم مس ۳۰ ppi

بررسی های انجام شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی بعد از فرآیند الکترولس و بعد از عملیات الکترولیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است که حاکی از یکنواختی پوشش در مرحله الکترولس و همچنین مقداری افزایش ضخامت پوشش در مناطق نوک تیز بعد از مرحله الکترولیز می باشد.



ب



الف

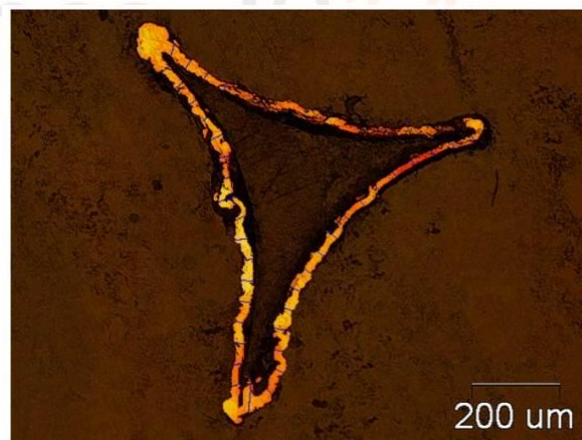
شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های تولید شده (الف) بعد از فرایند الکترولس و (ب) بعد از فرایند الکترولیز.

بررسی ضخامت دیواره

به منظور اندازه‌گیری ضخامت دیواره‌های فوم تولیدی از نرم‌افزار پردازش تصویر استفاده گردید. میزان ضخامت دیواره به طور میانگین $19\text{ }\mu\text{m}$ می‌باشد که با افزایش زمان الکترولیز مس می‌توان ضخامت دیواره را تا 0.5 میلیمتر افزایش داد. تصویر ۱۱ نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضخامت دیواره را نشان می‌دهد.



بزرگ نمای ۵۰۰ X



بزرگ نمایی ۱۰۰ X

شکل ۱۱. آنالیز تصویری ضخامت دیواره فوم مسی در بزرگنمایی مختلف.

نتیجه گیری

در این تحقیق فوم سلول باز مسی با درصد تخلخل ۹۸٪ با استفاده از تکنیک رسوب گذاری الکتروشیمیایی با پوشش دهی مس بر روی یک مدل پلی اورتان متخلخل تولید گردید. لایه یکنواخت تشکیل شده در محصولات تولیدی گویای موفقیت در تولید بود. فوم های مسی تولید شده به علت داشتن درصد تخلخل بالا، باعث شد به شدت سطح تماس با سیال افزایش یابد که در کاربردهای نظیر کاتالیزورها و سیستم های خنک کننده بسیار پر مصرف می باشد. در مرحله الکتروپولیس از یک حمام سولفاتی مس در دمای ۶۰°C استفاده گردید. در صورتی که دما کمتر از این محدوده باشد سبب تشکیل لایه بسیار نازک از مس می شود که این لایه تشکیل شده ناپایدار می باشد و در مرحله الکتروپولیز از بین می رود. همچنین اگر دما بالاتر از ۷۰°C باشد عمل آبکاری الکتروپولیس روی دیواره ظرف نیز صورت می گیرد و سطح نمونه بخوبی آبکاری نمی شود. بررسی درصد تخلخل فوم های تولید شده به روش رسوب گذاری الکتروشیمیایی در مقایسه با سایر روش های تولید فوم نشان می دهد که این روش تنها روشی است که می توان تخلخل های از نوع باز با مقادیر بالای ۹۵٪ ایجاد نمود. افزایش دما به ۴۰°C در محلول الکتروپولیز سبب افزایش میزان رسوب و همچنین ایجاد سطح براق در فوم می شود. افزایش دمای محلول الکتروپولیز بیش از ۴۰°C باعث می شود که مس در کف محلول رسوب کرده و سبب کاهش نرخ رسوب بر روی سطح فوم گردد. با افزایش میزان سولفات مس و اسید سولفوریک میزان نرخ رسوب افزایش یافته و در نتیجه ضخامت پوشش بر روی فوم های تولید شده افزایش می یابد.

مراجع

- Banhart, J. (2001). "Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, pp. 559-632.
- CAO, Xiao-qing., WANG, Zhi-hua., MA, Hong-wei., ZHAO, Long-mao., YANG, Gui-tong. (2006). "Effects of cell size on compressive properties of aluminum foam", *Trans Nonferrous Met Soc China*, Vol. 16, pp. 351-356.
- Nakajima, H., Hyun, S.K., Ohashi, K., Ota, K., Murakami, K. (2001). "Fabrication of porous copper by unidirectional solidification under hydrogen and its properties", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering*, Vol 179, pp. 209-214.
- TIAN Qing-hua. (2007). "Electrodeposition for manufacturing foamed zinc material", *Central South University, Journal of Tianjin Polytechnic University*, Vol. 24, pp. 3-26.
- TIAN, Qing-hua., GUO, Xue-yi., XUE, Ping., SONG, Yu., DUAN, Lian. (2007). "Electro-deposition for oamed zinc material from zinc sulfate solution", *Materials Science Forum*, Vol. 561, pp. 1669-1672.
- Zhao, Y.Y., Fung, T., Zhang, L.P. (2005). "Lost carbonate sintering process for manufacturing metal foams", *Scripta Materialia*, Vol. 52, pp. 295-298.
- ZHENG, Ya-jie., ZOU, Wei-hong., YI, Dan-qing., GONG, Zhu-qing., LI, Xin-hai. (2005). "Electroless copper plating system of potassium sodium tartrate and EDTA-2Na", *Journal of Central South University: Science and Technology*, Vol. 36, pp. 971-976.

بشارت، اسرافیل (۱۳۹۰). آبکاری فلزات. تهران: انتشارات طراح

قربانی، محمد (۱۳۷۹). پوشش دادن فلزات. جلد ۱. تهران: موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف

قربانی، محمد (۱۳۸۵). پوشش دادن فلزات. جلد ۲. تهران: موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف

iMat
Conference 2014