

بررسی امکان به کارگیری روشی جدید برای تولید فوم کامپوزیت مس - آلومینا

احمد مولودی^۱، رامین رئیسزاده^۲، جلیل وحدتی خاکی^۳، ابوالفضل باباخانی^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، بخش مواد و متالورژی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان و عضو گروه پژوهشی مواد جهاددانشگاهی واحد مشهد.
- ۲- استادیار بخش مواد و متالورژی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان
- ۳- استاد بخش مواد و متالورژی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد
- ۴- استادیار بخش مواد و متالورژی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد و عضو گروه پژوهشی مواد جهاددانشگاهی واحد مشهد

Investigating the feasibility of a new method to produce porous copper composites

A. Moloodi¹, R. Raiszadeh², J. Vahdati-Khaki³, A. Babakhani⁴

- 1- Post graduate student of materials, Department of Materials and Metallurgy, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of (ACECR) Mashhad Kerman and Member of Materials Research Group of Iranian Academic Center for Education Culture & research branch.
- 2- Assistant professor of Department of Materials and Metallurgy, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman.
- 3- Professor of Department of Materials and Metallurgy, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.
- 4- Assistant professor of Department of Materials and Metallurgy, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad and (ACECR) Mashhad branch. Member of Materials Research Group of Iranian Academic Center for Education Culture & research

چکیده

فوم‌های فلزی دسته‌ای جدید از مواد بوده و دارای دانسیته پایین و مشخصات منحصر به فردی در زمینه خواص فیزیکی، مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و جذب صدا هستند. در این تحقیق امکان استفاده از روشی جدید به نام سنتز احتراقی برای تولید فوم کامپوزیت مس-آلومینا با تخلخل باز، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا مخلوطی از پودرهای اکسید مس (CuO)، آلومینیوم و گرافیت با درصد‌های وزنی مشخص با هم مخلوط گردیده و تحت فشار مشخصی پرس شدند و سپس با ایجاد یک حرارت لحظه‌ای در قسمتی از نمونه، واکنش سنتز احتراقی شروع شده و با خارج شدن گازهای تولیدی حین انجام واکنش و همچنین به علت وجود تخلخل اولیه در پودر تراکم شده، فومی متخلخل از کامپوزیت مس-آلومینا تولید گردید. تاثیر نسبت وزنی اجزای تشکیل دهنده مخلوط پودر و فشار تراکم اولیه بر چگونگی انجام واکنش سنتز احتراقی، نوع تخلخل و دانسیته محصول حاصل مورد ارزیابی قرار گرفته و مورفولوژی تخلخل ایجاد شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی گردید. نتایج حاصل نشان دادند که بهترین نسبت وزنی اجزای تشکیل دهنده مخلوط پودر برای تولید فومی با تخلخل باز، ۸۴ درصد اکسید مس، ۹/۵ درصد آلومینیوم و ۶/۵ درصد گرافیت و فشار بهینه برای فشردن مخلوط اولیه بین ۳۰۰-۱۰۰ مگا پاسگال است.

واژه‌های کلیدی: فوم‌های فلزی، سنتز احتراقی (SHS)، کامپوزیت مس-آلومینا

Abstract

Metal foams are a new, as yet imperfectly characterized, class of materials with low densities and novel physical, mechanical, thermal, electrical and acoustic properties. This article reports the study carried out on the feasibility of using the Self-propagating High-temperature Synthesis (SHS) process for manufacturing open cell copper-alumina composite foams. Porous Cu-Al₂O₃ composite was fabricated by the reactions between CuO, Al and C powders. The gas released during these reactions and also the initial porosity of the green powder compact was suggested to be the sources of the produced pores. The effect of C content and the precursor compressing pressure, on the porosity of the SHS product was determined. Scanning electron microscopy (SEM) was utilized to characterize the porous samples. The analyses of the properties of the composite foams revealed that the optimum weight fraction for blending initial powders are 84 wt.% CuO, 9.5 wt.% Al and 6.5 wt.% C. In addition, the critical limits of the initial compacting pressure of the powders were determined to be between 100 and 300 MPa.

Keyword: Metal Foam, SHS process, Copper Alumina Composite

اغلب متخلخل هستند [۱۲]. حال اگر در این فرایندها واکنش بین مواد اولیه نیز دارای محصولی گازی باشد، می‌توان از این فرایند برای تولید فوم فلزی استفاده کرد. Kobashi و Kanentake [۹] روش SHS را برای تولید فوم کامپوزیتی نیکل-آلومینا (مورد استفاده در ایمپلنت‌های پزشکی) مورد استفاده قرار دادند.

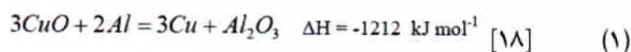
فوم مسی تخلخل باز به علت داشتن انتقال حرارت بالا، یکی از پرکاربردترین فوم‌های فلزی در زمینه انتقال حرارت است. Nakajima و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۰۱ میلادی فوم مسی را با استفاده از تشکیل حباب هیدروژن هنگام انجماد مذاب تولید و خواص آن را بررسی کردند. اخیراً از روش (Lost Carbonate) LCS (Sintering) نیز برای تولید فوم مسی با تخلخل‌های باز استفاده شده است [۵ و ۱۴]. Zhang و Wang [۱۵] نیز تحقیقات گسترده‌ای بر روی خواص فوم‌های مسی انجام داده‌اند.

از طرف دیگر کامپوزیت‌های فلز-سرامیک به علت کارایی فراوان در تولیدات مهندسی نقش ویژه‌ای دارند. از جمله این کامپوزیت‌ها، کامپوزیت $Cu-Al_2O_3$ است. کامپوزیت مس-آلومینا خاصیت هدایت الکتریکی و گرمایی بالای مس و استحکام بالا و ثبات شیمیایی و گرمایی عالی آلومینا را توأم دارد. این نوع کامپوزیت به وفور در تولید الکترودهای جوش مقاومتی به کار می‌روند و استفاده از این مواد در راکتورهای آزمایشگاهی ترموهسته‌ای نیز پیشنهاد شده است [۱۶ و ۱۷].

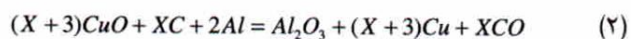
در تحقیق حاضر به صورت ابتکاری از روش SHS برای تولید فوم کامپوزیتی مس-آلومینا استفاده شده است و تاثیر مقدار فشار و نسبت وزنی مخلوط پودرهای اولیه بر روی چگونگی انجام واکنش، مورفولوژی و مقدار تخلخل فوم‌های تولیدی مورد بررسی قرار گرفته است.

اصول فرایند SHS

واکنش سنتز احتراقی برای تولید کامپوزیت مس-آلومینا از احیای اکسید مس توسط آلومینیوم محقق می‌گردد (واکنش ۱).



این واکنش به شدت گرمازا بوده و منجر به تولید دمای آدیاباتیکی در حدود ۵۰۰۰ درجه کلوین می‌شود [۱۹]. این دما باعث می‌شود تا محصولات واکنش به شدت تبخیر گردند. چنانچه به مخلوط پودرهای اولیه پودر گرافیت اضافه شود، دمای حاصل از احیای اکسید مس کاهش یافته و از طرفی محصولات گازی بیشتر نیز در طی واکنش تولید می‌شوند (واکنش ۲).



در شکل ۱ چگونگی فرایند تولید فوم مسی به صورت شماتیک نشان داده شده است.

فوم‌های فلزی شاخه‌ای از مواد نوین با خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد هستند. از جمله این خواص می‌توان به دارا بودن نسبت استحکام به وزن بالا و قابلیت بالای انتقال حرارت در فوم‌های تخلخل باز اشاره نمود. طبیعت نیز همواره از چنین ساختاری (همانند استخوان و چوب) برای بهره‌مندی از خواص منحصر به فرد آن استفاده می‌نماید. در سال‌های اخیر کاربرد این مواد افزایش یافته است. به‌طور کلی در کاربردهایی همچون ضربه‌گیرهای خودرو، فوم‌های دارای تخلخل بسته (Closed Pore) به علت خاصیت جذب ضربه و استحکام فشاری بالا، مناسب‌تر هستند. از طرف دیگر در کاربردهایی همچون مبدل‌های حرارتی و کاتالیزورها، فوم‌های فلزی تخلخل باز (Open Pores) به علت فراهم آوردن میزان تماس بیشتر با سیال، مطلوب‌تر به شمار می‌روند [۱-۴].

روش‌های مختلفی برای تولید فوم‌های فلزی وجود دارد. به‌طور کلی روش‌های ساخت این مواد را می‌توان به سه گروه روش‌های حالت جامد، مایع و گازی تقسیم‌بندی نمود. برخی از آنها مشابه روش‌های مورد استفاده در ساخت فوم‌های پلیمری و سرامیکی هستند، اما اغلب فوم‌های فلزی به کمک روش‌های منحصر به فرد و با بهره‌گیری از خواص ویژه فلزات (همانند روش رسوب‌گذاری الکتریکی) تولید می‌شوند [۲].

یکی از روش‌های پرکاربرد در ساخت فوم‌های فلزی که زیر گروه روش‌های حالت جامد محسوب می‌شود و قابلیت کنترل اندازه، شکل و پراکنندگی حفرات را دارد، روش‌های مبتنی بر استفاده از پودر فلزات است [۵]. روش متداول در این زمینه استفاده از یک عامل فوم‌ساز (Foaming Agent) در مخلوط پودر اولیه است [۶-۸].

یکی دیگر از روش‌های مبتنی بر استفاده از پودر فلزات روش سنتز احتراقی^۱ است [۹]. به‌طور کلی در این روش که نام دیگر آن SHS^2 است، واکنش بین مواد اولیه، باعث تولید حرارتی شدید می‌گردد. حرارت ناشی از واکنش در منطقه حرارت دیده آن‌قدر زیاد است که حرارت لازم برای شروع واکنش در منطقه مجاور را تامین کرده و بدین صورت واکنش به صورت خود به خودی تا انتها پیش می‌رود. در شرایط آدیاباتیک گرمای آزاد شده از واکنش، دمای سیستم را (که اصطلاحاً به آن دمای آدیاباتیک (T_{ad}) می‌گویند) به مقدار زیادی افزایش می‌دهد. Merzhanov [۱۰] نشان داد که برای انجام یک واکنش به صورت SHS، دمای آدیاباتیک باید بالاتر از ۱۸۰۰ درجه کلوین باشد. در تحقیق دیگری Munir و همکارانش [۱۱] دمای ۲۰۰۰ درجه کلوین را دمای بحرانی برای واکنش‌های SHS ذکر کردند. محصولات تولیدی به روش SHS

1) Combustion Synthesis

2) Self-propagating High-temperature Synthesis

مگاپاسگال در قالبی استوانه‌ای (h=20mm, Ø=1.7mm) متراکم گردیدند. پس از آن با ایجاد حرارت لحظه‌ای توسط شعله اکسی استیلن در قسمتی از نمونه، واکنش سنتز احتراقی انجام گرفته و فوم‌های کامپوزیتی مس-آلومینا پس از سرد شدن نمونه در هوا از نظر میزان تخلخل و نوع ساختار مورد بررسی واقع شدند. برای بررسی مورفولوژی نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و همچنین به منظور بررسی ترکیب نهایی محصولات از آنالیز XRD استفاده شد و مقدار تخلخل نمونه‌ها با استفاده از روش ارشمیدس اندازه‌گیری گردید. برای ضبط تصاویر واکنش از دوربین دیجیتال با سرعت ضبط تصویر fps ۳۰ استفاده شد. فیلم تهیه شده سپس توسط نرم افزار Windows Media Player به عکس‌هایی با فرمت JPG تبدیل گردید و مورد مطالعه قرار گرفتند.

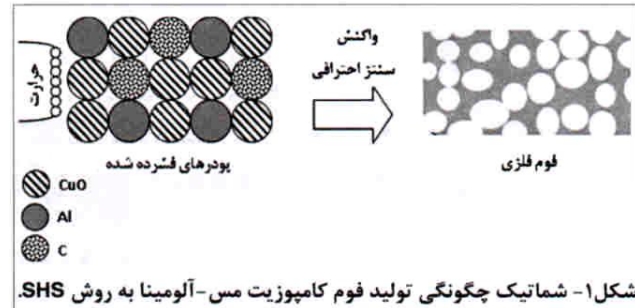
نتایج و سگالش

واکنش SHS و مورفولوژی حفرات

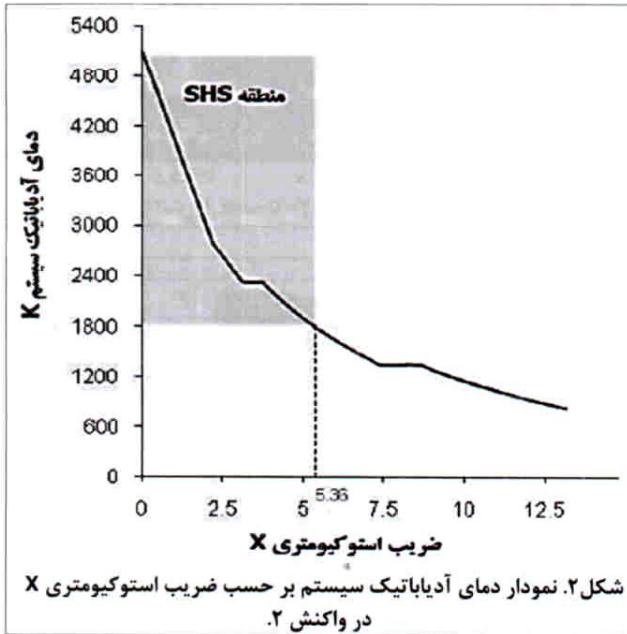
اختلاف زیاد شدت واکنش SHS در نسبت‌های وزنی متفاوت مخلوط اولیه نشان می‌دهد که این واکنش به شدت به نسبت وزنی پودرهای اولیه وابسته است. شکل ۳(الف) چگونگی انجام فرایند SHS برای نمونه‌ای با نسبت مولی $CuO: Al: C = 3: 2: 0$ (X=0) را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود در این نمونه پس از ایجاد حرارت اولیه، واکنش به شدت ادامه یافته و در نهایت تمامی محصولات واکنش تبخیر شده‌اند. این رفتار، ناشی از تولید دمای آدیباتیک بسیار بالا در حین انجام واکنش است. زمان انجام واکنش در این نمونه ۱/۹ ثانیه اندازه‌گیری گردید.

شدت واکنش با افزودن گرافیت به مخلوط اولیه کاهش یافت. این موضوع در شکل ۳(ب) که مقدار گرافیت آن، ۲۷/۳٪ مولی است ($CuO: Al: C = 6: 2: 3$) (X=3)، مشاهده می‌گردد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، در انتهای واکنش، نمونه شکل خود را تقریباً حفظ کرده است. همچنین زمان انجام واکنش نیز نسبت به نمونه قبلی افزایش یافته و به ۴/۰۲ ثانیه رسیده است. این رفتار توسط نمودار شکل ۲ قابل پیش‌بینی بود.

با افزایش مقدار گرافیت به ۲۳/۳٪ مولی، $(CuO: Al: C = 8: 2$ (X=5)) (شکل ۳(ج))، واکنش SHS به صورت خود پیش‌رونده به انجام نرسیده است. آزمایشات بعدی با مقادیر X بین ۴ تا ۵ نشان دادند که مقدار بحرانی X برای انجام واکنش SHS حدود ۴/۵ است. طبق نمودار شکل ۲ سیستم در این حالت، دمای آدیباتیکی حدود ۲۰۰۰ درجه کلون دارد. با توجه به این مسئله، می‌توان بیان کرد که این سیستم با حد بحرانی دمای آدیباتیک پیشنهاد شده توسط Munir ($T_{ad}=2000\text{ }^\circ\text{K}$) مطابقت دارد.



شکل ۱- شماتیک چگونگی تولید فوم کامپوزیت مس-آلومینا به روش SHS.



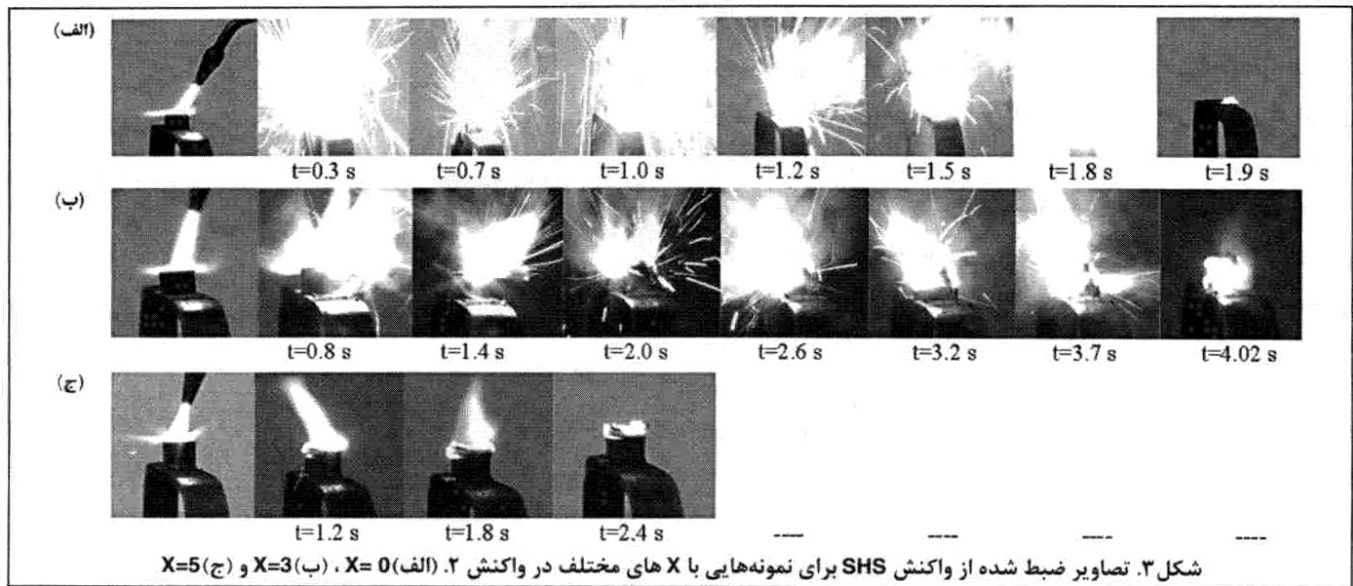
شکل ۲. نمودار دمای آدیباتیک سیستم بر حسب ضریب استوکیومتری X در واکنش ۲.

در صورت استفاده از گرافیت، دمای آدیباتیک سیستم وابسته به مقدار X خواهد بود. شکل ۲، واکنش بین دمای آدیباتیک و مقدار X، که توسط واکنش (۳) محاسبه شده است، را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش مقدار X دمای آدیباتیک کاهش یافته و با توجه به معیار Merzhanov ($T_{ad} = 1800\text{ K}$)، این واکنش در $X = 5/36$ از حالت سنتز احتراقی خارج می‌گردد.

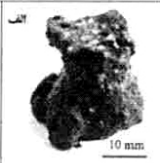
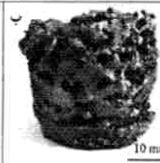

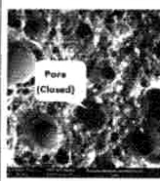

$$\Delta H_{298} (\text{واکنش دهنده‌ها}) = \int_{298}^{T_{ad}} \sum C_p (\text{محصولات}) \quad (3)$$

مواد و روش تحقیق

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق پودر اکسید مس (CuO) با اندازه ذره کمتر از ۱۶۰ میکرون، پودر آلومینیوم با اندازه ذره کمتر از ۱۶۰ میکرون و پودر گرافیت با اندازه ذره کمتر از ۵۰ میکرون، همگی با خلوص بالای ۹۹ درصد و ساخت شرکت Merck آلمان، بودند. ابتدا نمونه‌ها با X های متفاوت (با انتخاب ضریب استوکیومتری X بین ۰ تا ۶ (معادل ۰ تا ۳۵/۴ درصد مولی گرافیت)) با هم مخلوط شده و سپس با فشاری بین ۹۰-۳۵۰



شکل ۳. تصاویر ضبط شده از واکنش SHS برای نمونه‌هایی با X های مختلف در واکنش ۲. (الف) X=0، (ب) X=3 و (ج) X=5

شکل ظاهری			
سطح مقطع			-----
فوم ساز و جرمی در واکنش X	X=1	X=3	X=5

شکل ۴. شکل ظاهری و مورفولوژی حفره‌های ایجاد شده در نمونه‌های سنتز شده با X های ۱، ۳ و ۵.

همانطور که در شکل ۴ (ج) مشاهده می‌شود، واکنش SHS در نمونه‌ای که در آن مقدار X از حد بحرانی تجاوز کرده است (CuO : Al : C = 8 : 2 : 5 (X=5))، کامل نشده و در همان شروع، متوقف شده است.

مقدار تخلخل

شکل ۵ مقدار تخلخل محاسبه شده برای نمونه‌هایی با فشارهای تراکم متفاوت و نسبت مخلوط سازی یکسان (X=3) را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با کاهش مقدار فشار تراکم اولیه، مقدار تخلخل افزایش می‌یابد. Kobashi و Kanetake [۹] نیز در طی مطالعات خود برای تولید فوم نیکل-آلومینا از روش SHS رفتار مشابهی را مشاهده کردند. البته همانطور که در نمودار مشخص شده است، کاهش فشار به زیر ۱۰۰ MPa و یا افزایش آن به بالا تر از ۳۰۰ MPa، باعث توقف واکنش SHS گردید. این رفتار به خصوصیت ذاتی واکنش‌های SHS مربوط می‌شود.

حضور گرافیت در مخلوط اولیه علاوه بر تاثیر بر چگونگی انجام واکنش SHS، بر مورفولوژی حفرات ایجاد شده نیز موثر بود. شکل ۴، ظاهر و مورفولوژی حفرات مربوط به سه نمونه با X های ۱، ۳ و ۵ را نشان می‌دهد. مقدار C در مخلوط اولیه، هر چه مقدار گاز CO تولید شده در محصول نهایی را کنترل می‌کند. هر چه مقدار گاز CO در محصول نهایی بیشتر باشد، مقدار تخلخل نیز در محصول نهایی بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر با کاهش مقدار C در مخلوط اولیه، دمای آدیاباتیک سیستم افزایش یافته و منجر به ذوب شدن بیشتر محصولات می‌شود. با ذوب شدن بیشتر محصولات ظاهر فوم فلزی تولید شده تغییر شکل بیشتری یافته و از حالت استوانه‌ای اولیه خارج می‌گردد.

شکل ۴ (الف)، شکل ظاهری و مورفولوژی مربوط به نمونه‌ای با X = ۱ (CuO : Al : C = 4 : 2 : 1) را نشان می‌دهد. در این نمونه به علت پایین بودن مقدار گرافیت در مخلوط اولیه، دمای آدیاباتیک بالا بوده (با توجه به نمودار شکل ۲، $T_{ad} = 3900 \text{ K}$) و در نتیجه مقدار زیادی از مواد ذوب شده‌اند. این مطلب منجر به تغییر شکل قابل توجه محصول نهایی نسبت به استوانه متراکم اولیه شده است. همچنین مطالعه سطح مقطع نمونه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که حفرات در این نمونه از نوع تخلخل بسته هستند.

از طرف دیگر در نمونه شکل ۴ (ب) به علت افزایش مقدار گرافیت ((X=3) (CuO : Al : C = 6 : 2 : 3))، دمای آدیاباتیک کاهش یافته و نمونه شکل ظاهری خود را تقریباً حفظ کرده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز نشان دادند که افزایش مقدار گرافیت از X=1 به X=3 باعث شده تا مورفولوژی حفره‌های ایجاد شده در فوم فلزی از تخلخل بسته به تخلخل باز تغییر یابند.

واقعی تخلخل از مقدار محاسبه شده حدود ۲/۵ تا ۵ درصد بیشتر است. Kim [۲۳] نشان داد که سطح پودر آلومینیوم معمولاً با آلومینای آبدار ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) پوشیده می‌گردد. از طرفی پودر آلومینیوم عموماً دارای مقداری هیدروژن حل شده است. Kanetake و Kobashi [۹] نشان دادند که در حین انجام واکنش‌های سنتز احتراقی که در آنها پودر آلومینیوم شرکت دارد، مقدار زیادی از تخلخل ایجاد شده حاصل آزاد شدن گاز هیدروژن از پودر آلومینیوم است. در هر حال سایر عوامل، از قبیل انبساط مواد حاصل از واکنش، نیز ممکن است در ایجاد این اختلاف سهمیم باشند.

آنالیز XRD محصولات

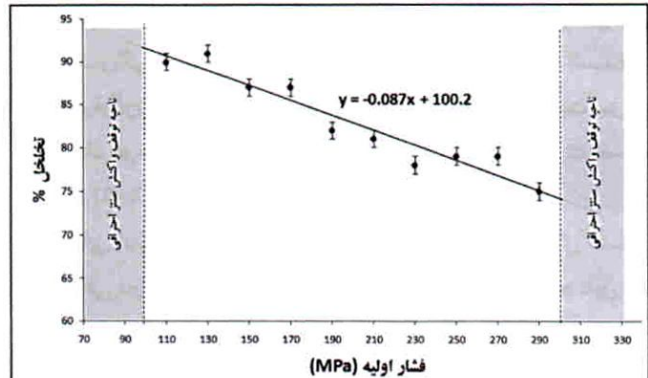
شکل ۷ پیک‌های XRD مربوط به نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف از مواد اولیه را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش مقدار X در نمونه‌ها، از شدت پیک‌های مربوط به Al_2O_3 و Cu_2O کاسته شده و شدت پیک‌های مربوط به Cu افزایش یافته است. این الگوها نشان می‌دهند که با افزایش ضریب استوکیومتری X، تعداد و اندازه ذرات اکسیدی به قدری کم می‌شوند که با آنالیز XRD قابل شناسایی نیستند.

کاهش شدت پیک‌های Al_2O_3 ، طبق واکنش ۲، به دلیل کم شدن درصد وزنی آن با افزایش مقدار X است. لیکن طبق واکنش ۲ در محصولات نهایی نباید Cu_2O وجود داشته باشد. علت حضور این فاز در زمینه و شناسایی آن توسط XRD، با دیاگرام فازی Cu-O توجیه می‌شود. شکل ۸ بخشی از دیاگرام فازی Cu-O را نشان می‌دهد [۲۴].

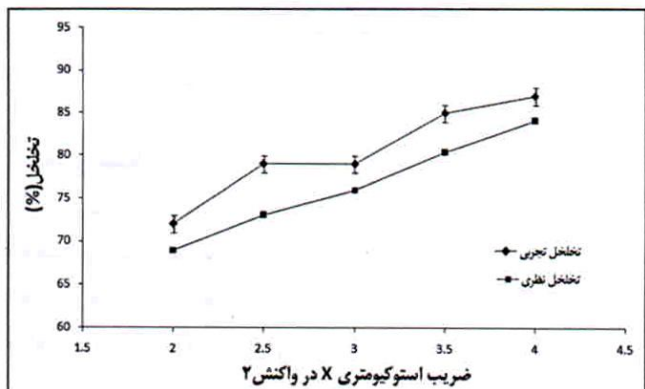
همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در ۴۳٪ وزنی اکسیژن، این عنصر با مس یک تحول یوتکتیک دارد. که محصول آن مس و اکسید مس است (واکنش ۳):



از طرف دیگر با مراجعه به این دیاگرام مشخص می‌شود، که با افزایش دما به علت حل شدن اکسیژن بیشتر در مذاب، مقدار Cu_2O در محصول نهایی افزایش می‌یابد. این اتفاق در طی مراحل ساخت تولید شمش‌های مسی نیز می‌افتد و یکی از مشکلات تولید مس خالص وجود فاز Cu_2O ، به صورت ناخالصی در زمینه است [۲۵]. بنابراین حضور فاز Cu_2O و علت افزایش آن با افزایش دمای سیستم به علت انجام واکنش در هوا و حل شدن اکسیژن بیشتر محیط در مذاب مس است.



شکل ۵- تخلخل نمونه‌های تولید شده از روش سنتز احتراقی با فشار تراکم اولیه متفاوت ($X=3$)



شکل ۶. تخلخل تئوری و اندازه‌گیری شده در نمونه‌هایی با نسبت وزنی اختلاط متفاوت.

در تحقیقات بسیاری [۲۰-۲۱] که بر روی این واکنش‌ها صورت پذیرفته، مشخص گردیده است که فشار تراکم اولیه دارای تاثیری دوگانه بر نحوه انجام واکنش سنتز احتراقی است. افزایش فشار تراکم اولیه از طرفی منجر به افزایش سطح تماس پودرهای اولیه و در نتیجه انجام آسان‌تر واکنش می‌شود، بنابر این در صورتی که این فشار از حد بحرانی کمتر شود، کاهش شدید تماس سطوح ذرات پودری باعث توقف انجام واکنش می‌گردد. از طرف دیگر، افزایش فشار تراکم اولیه منجر به افزایش انتقال حرارت در درون نمونه شده و افزایش بیش از حد انتقال حرارت در ناحیه ابتدایی موج حرارتی SHS منجر به کاهش دمای آن به زیر حد بحرانی و توقف آن می‌شود.

در شکل ۶ مقدار تخلخل تئوری و اندازه‌گیری شده در نمونه‌هایی با نسبت‌های وزنی اختلاط مختلف (X های متفاوت) و فشار تراکم اولیه یکسان ($P=250$ MPa)، نشان داده شده است. مقدار تخلخل تئوری با در نظر گرفتن مقدار گاز CO تولیدی، اختلاف حجم مولی محصولات واکنش و مواد اولیه و همچنین مقدار تخلخل اولیه در نمونه‌های پرس شده، محاسبه شده است [۲۲]. همانگونه که مشاهده می‌شود، در تمامی نمونه‌ها مقدار

الف) نسبت مولی اختلاط پودرهای اولیه تاثیر بسیار زیادی بر چگونگی انجام واکنش، مقدار تخلخل ایجاد شده و مورفولوژی حفرات به وجود آمده دارد. بهترین نسبت برای ایجاد فومی با تخلخل باز توسط واکنشی پایدار عبارت است از $CuO : Al : C = 6 : 2 : 3 (X=3)$.

ب) دمای آدیاباتیک (T_{ad}) بحرانی برای انجام واکنش سنتز احتراقی در این سیستم حدود ۲۰۰۰ درجه کلوین (مطابق با نسبت اختلاط $X=4/5$) برآورد شد.

ج) با کاهش مقدار فشار تراکم مخلوط پودرها، مقدار تخلخل نمونه‌ها افزایش یافت و واکنش در فشارهای کمتر از ۱۰۰ MPa و بالاتر از ۳۰۰ MPa متوقف گردید.

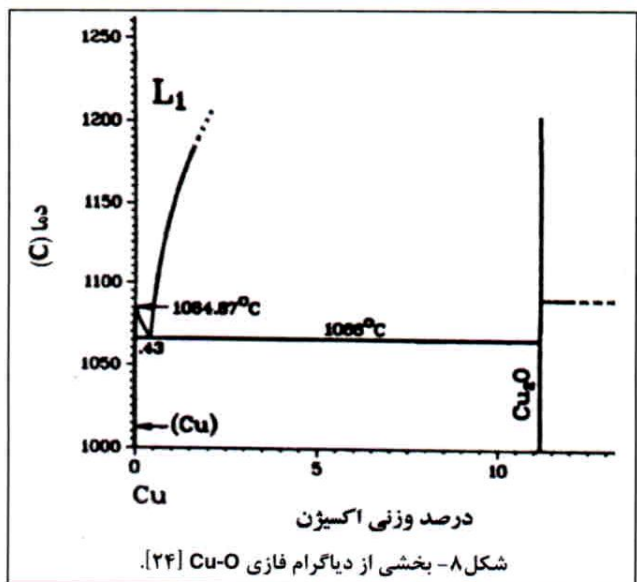
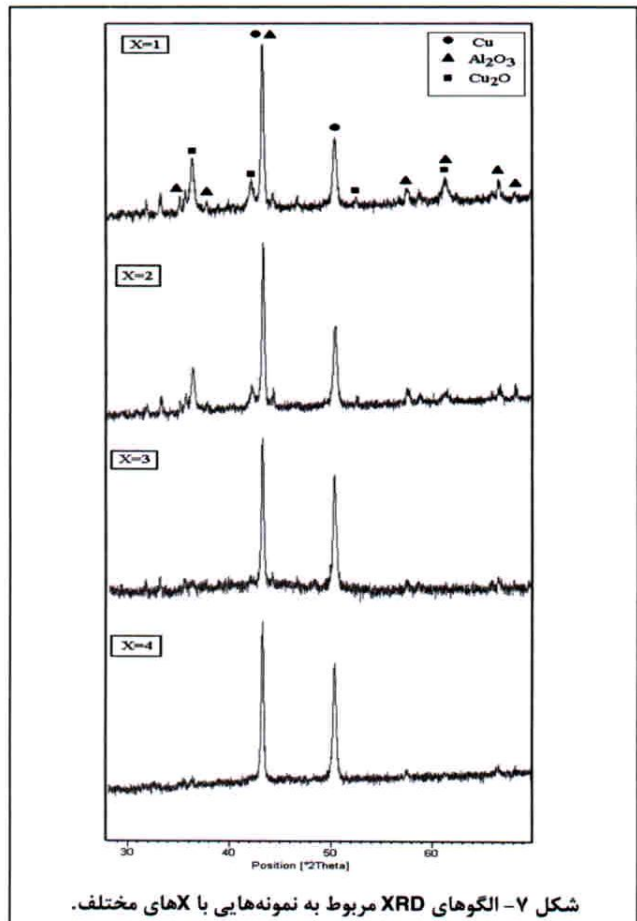
د) به علت انجام واکنش در اتمسفر محیط مقداری فاز ناخواسته در Cu_2O در محصولات نهایی تولید می‌گردد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم میدانند از زحمات مسئولین واحد تخصصی فنی و مهندسی جهاددانشگاهی مشهد آقایان مهندس علیرضا صادقی و مهندس حسین امینی، جهت حمایت‌های مالی و فراهم کردن مواد اولیه، تقدیر و تشکر نمایند.

منابع و مراجع

1. M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, "Metal Foams: A Design Guide". Butterworth Heinemann, 2000.
2. J. Banhart, "Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foam", Prog. Mater. Sci., Vol.46, pp.559-585, 2001.
۳. مهدی دیواندری، علیرضا وحیدگلپایگانی، حمیدرضا شاهرودی، "فومهای فلزی"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۵.
4. H.P. Degischer, B.Kriszt, "Handbook of Cellular Metals, Production, Processing, Applications", ISBNs: 3-527-30339-1, 2002.
5. Y.Y. Zhao, T. Fung, L.P. Zhang, F.L. Zhang, "Lost carbonate sintering process for manufacturing metal foams", Scr. Mater., Vol.52, pp.295-298, 2005.
6. A.R. Kennedy, "The effect of TiH_2 heat treatment on gas release and foaming in Al- TiH_2 preforms", Scr. Mater., Vol.47, pp.763-767, 2002.
7. E. Koza, M. Leonowicz, S. Wojciechowski, F. Simancik, "Compressive strength of aluminium foams", Mater. Lett., Vol.58, pp.132-135, 2003.
8. M. Guden, S.Yuksel, A. Tasdemirci, M. Tanoglu, "Effect of aluminum closed-cell foam filling on the quasi-static axial crush performance of glass fiber reinforced polyester composite and aluminum/composite hybrid tubes", Compos. Struct., Vol.81, pp.480-490, 2007.



نتیجه گیری

در این تحقیق فوم کامپوزیتی مس-آلومینا به روش سنتز احتراقی و با استفاده از واکنش بین پودرهای اکسید مس (CuO)، آلومینیوم و گرافیت تولید گردید. نتایج به دست آمده از بررسی نمونه‌های تولیدی به صورت خلاصه عبارتند از:

۲۲. احمد مولودی، "مطالعه فرایند تولید فوم کامپوزیتی مس-آلومینا با استفاده از روش سنتز احتراقی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، گروه مواد و متالورژی، بهار ۱۳۸۸.
23. Y.W. Kim, W.M. Griffith, F.H. Froes, "Surface oxides in P/M aluminum alloys", *J. Met.*, Vol.32, pp.27-33, 1985.
24. E. H. Kottcamp, "Alloy phase diagrams", *ASM Handbook Vol. 3*, 1999.
۲۵. دکتر حکمت رضوی زاده - دکتر رامز وقار، "متالورژی مس"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ دوم، ۱۳۸۲.
9. N. Kanetake, M. Kobashi, "Innovative processing of porous and cellular materials by chemical reaction", *Scr. Mater.*, Vol.54, pp.521-525, 2006.
10. A.G. Merzhanov, "Combustion processes that synthesize materials", *J. Mater. Process. Tech.*, Vol.56, pp.222-241, 1996.
11. Z.A. Munir, U. Anselmi-Tamburini, "Self-propagating high-temperature synthesis of hard materials", in: Riedel, R., (ed.) *Handbook of Ceramic Hard Materials*, Wiley-VCH, pp. 322-373, 2000.
12. Z.Y. Fu, H. Wang, W.M. Wang, R.Z. Yuan, "Composites fabricated by self-propagating high-temperature synthesis", *J. Mater. Process. Tech.*, Vol.137, pp.30-34, 2003.
13. H. Nakajima, S.K. Hyun, K. Ohashi, K. Ota, K. Murakami, "Fabrication of porous copper by unidirectional solidification under hydrogen and its properties", *J. Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, Vol.179, pp. 209-214, 2001.
14. M. A. El-Hadek, S. Kaytbay, "Mechanical and physical characterization of copper foam", *Int. J. Mech. Mater. Des.*, Vol.4, pp.63-69, 2008.
15. E. Zhang, B. Wang, "On the compressive behavior of sintered porous coppers with low to medium porosities—part I: experimental study", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.47, pp.744-756, 2005.
16. P. K. Jena, E. A. Brocchi, M. S. Motta, "In-situ formation of Cu-Al₂O₃ nano-scale composites by chemical routes and studies on their microstructures", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol.313, pp.180-186, 2001.
17. D. Y. Ying, D. L. Zhang, "Processing of Cu-Al₂O₃ metal matrix nanocomposite materials by high energy ball milling", *Mater. Sci. Eng. A*, Vol.286, pp.152-156, 2000.
18. E.A. Brandes and G.B. Brook, "Smithells Metals Reference Book", 7th ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999.
19. P.K. Jena, E.A. Brocchi, I.G. Solórzano, M.S. Motta, "Identification of a third phase in Cu-Al₂O₃ nanocomposites prepared by chemical routes" *Mater. Sci. Eng. A*, Vol.371, pp. 72-78. 2004.
20. A. D. Bratchikov, A. G. Merzhanov, V. I. Itin, V. N. Khachin, E. F. Dudarev, V. É. Gyunter, V. M. Maslov, D. B. Chernov, "Self-propagating high-temperature synthesis of titanium nickelide", *Powder Metall. Met. Ceram.*, Vol.19, pp.5-8, 1980.
21. K. C. Patil, S.T. Aruna, T. Mimani, "Combustion synthesis: an update", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol.6, pp.507-512, 2002.