

تأثیر اندازه و نوع پوشش ذرات پودر آهن و میزان مس افزودنی بر ویژگی‌های گوی‌های توخالی فولادی

حمید سازگار^{۱*}، علیرضا کیانی رشید^۲

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

*Hamid.Sazegaran@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۲۶)

چکیده

گوی‌های توخالی فلزی می‌توانند به صورت موفقیت‌آمیز برای ایجاد سلول‌ها و حفرات در ساختارهای سلولی و فوم‌های فلزی به کار گرفته شوند که مهم‌ترین روش‌های تولید آن‌ها بر پایه متالورژی پودر استوار می‌باشد. در این پژوهش، گوی‌های توخالی فولادی با استفاده از دانه‌های پلی‌استیرین به عنوان ماده زیرلایه و به روش متالورژی پودر تولید شدند. دانه‌های پلی‌استیرین از یک بلوک پلی‌استیرین جدا شدند و دانه‌بندی آن‌ها به اندازه‌های متفاوت توسط الک صورت گرفت. سپس، مخلوط سیلیکات سدیم به عنوان چسب و پودر آهن، بر روی دانه‌های تهیه شده پاشیده شد و پس از آغشته شدن دانه‌ها به صورت کامل، خشک شدن درون هوا صورت گرفت. بنابراین، یک لایه نازک از پودرهای آهن به همراه چسب بر روی دانه‌های پلی‌استیرین ایجاد شد. در پایان، دو فرآیند عملیات حرارتی مجزا به منظور تولید گوی‌های توخالی فولادی با استحکام بالا انجام شد که شامل تجزیه حرارتی دانه‌های پلی‌استیرین و تف‌جوشی می‌باشد. به منظور ارزیابی ضخامت و میزان تخلخل پوسته گوی‌های توخالی فولادی و بررسی معایب آن‌ها، مقاطع پوسته‌ها توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. گوی‌های توخالی فولادی تقریباً دارای ضخامت یکنواخت می‌باشند. اندازه دانه‌های پودر آهن، افزودنی مس و نوع پوشش پودرهای آهن تأثیر زیادی بر روی ضخامت، کسر سطحی تخلخل، ترک‌ها و حفرات در پوسته دارند.

کلمات کلیدی:

گوی‌های توخالی فولادی، ساختارهای سلولی، متالورژی پودر، کسر سطحی تخلخل، تف‌جوشی حالت مایع.

۱- مقدمه

ترکیبی از آن‌ها) ارتباط پیدا می‌کند. قابل ذکر است که ایجاد یک مورفولوژی مشخص و تکرارپذیر از سلول‌ها شدیداً به نوع فرآیند تولید وابسته می‌باشد. فرآیندهای تولید فوم‌های فلزی شامل: الف) تولید از حالت مذاب، ب) تولید از حالت جامد به شکل پودر یا الیاف، ج) تولید از حالت بخار فلز یا ترکیبات

فوم‌های فلزی و ساختارهای سلولی دسته‌ای از مواد مهندسی پیشرفته هستند که به دلیل ویژگی‌هایی همانند سبک بودن، خواص فیزیکی، مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی منحصر به فرد می‌توانند در بسیاری از کاربردها به صورت موفقیت‌آمیز استفاده شوند [۱]. مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های این دسته از مواد به اندازه و مورفولوژی سلول‌ها (باز، بسته و یا

افزودنی‌های مناسب، نیاز به استفاده از عملیات حرارتی مناسب برای دستیابی به کمترین درصد تخلخل در دیواره‌ها می‌باشد [۱۷]. روشی مشابه به منظور تولید گوی‌های توخالی و فوم‌های آلیاژ تیتانیوم نیز به کار برده شده است [۲۴].

استفاده از گوی‌های توخالی فولادی در ساخت قطعات دارای حرکت سریع، به علت قابلیت ارتجاعی و قابلیت جذب زیاد انرژی ضربات در مقایسه با قطعات مشابه ساخته شده از آلیاژهای آلومینیوم ترجیح داده می‌شوند. قابل ذکر است که بهبود ۸۰ درصدی شرایط اقتصادی تولید در ساخت قطعات پیچیده توسط استفاده از تکنولوژی گوی‌های توخالی ممکن شده است [۲۵]. مطالعات فراوانی بر روی روش‌های تولید گوی‌های توخالی آهنی و فولادی صورت گرفته است، اما متأسفانه در هیچ کدام از آن‌ها تاثیر اندازه ذرات پودر آهن، استفاده از افزودنی مس و همچنین استفاده از پودرهای دارای پوشش بر روی فرآیند تولید و خصوصیات محصول تولیدی مطالعه نشده است. هدف از انجام این پژوهش، تولید گوی‌های توخالی آهنی به روش متالورژی پودر و بررسی‌های ریزساختاری بر روی دیواره‌های آن‌ها می‌باشد.

۲- مواد و روش آزمایش

۲-۱- مواد

۲-۱-۱- دانه‌های پلی‌استیرین انبساط یافته

دانه‌های پلی‌استیرین انبساط یافته به عنوان ماده اولیه مورد استفاده در تولید گوی‌های توخالی فولادی به کار برده شدند. این دانه‌ها از یک بلوک پلی‌استیرین جدا شده و دانه‌هایی که دارای شکل کروی مناسب بودند، تفکیک شدند. به منظور دستیابی به توزیع یکنواخت اندازه گوی‌های توخالی نهایی، دانه‌های پلی‌استیرین توسط الک دسته‌بندی شدند و دانه‌هایی با میانگین قطر ۵mm به منظور تولید گوی‌های توخالی به کار گرفته شدند.

گازی حاوی فلز و د) تولید از محلول حاوی یون‌های فلزی می‌باشد [۱-۴].

در اغلب روش‌های تولید فوم‌های فلزی، امکان ایجاد سلول‌هایی با مورفولوژی یکسان، اندازه کاملاً مشخص و توزیع یکنواخت حفرات وجود ندارد [۵-۶]. وجود نواقص مورفولوژیکی موجب تولید محصولاتی می‌گردد که ویژگی‌ها و خصوصیات آن‌ها قابل پیش‌بینی نمی‌باشد و یا این که ویژگی‌های آن‌ها در قسمت‌های گوناگون محصول نهایی متفاوت می‌باشد [۷ و ۲]. به منظور غلبه بر این مشکل، گوی‌های توخالی فلزی می‌توانند برای ایجاد سلول‌ها در فوم‌های فلزی کامپوزیتی و ساختارهای سلولی مورد استفاده قرار گیرند. این گوی‌های توخالی می‌توانند به شیوه‌های مختلفی برای تولید مواد متخلخل به کار برده شوند که این روش‌ها شامل ریخته‌گری فلزات در بین آن‌ها، چسباندن گوی‌ها به یکدیگر و تف‌جوشی گوی‌ها می‌باشد [۸-۱۰].

روش‌های متنوعی برای ساخت و تولید گوی‌های توخالی فلزی توسعه پیدا کرده است [۲-۳ و ۱۱-۱۳]. لیم^۱ و همکارانش توسط خارج کردن دوغاب پودرهای اکسید آهن و کروم از یک نازل، گوی‌های اکسیدی تولید کردند که توسط احیاء آن‌ها با هیدروژن، گوی‌های توخالی آلیاژی به دست می‌آید [۸]. در روشی دیگر که توسط موسسه فرانهورفر آلمان توسعه یافته است، دانه‌های پلی‌استیرین توسط فشار هوا درون یک محفظه معلق می‌شوند و سپس دوغابی شامل چسب و فلز بر روی آن‌ها پاشیده می‌شود. در پایان، عملیات حرارتی برای خارج شدن چسب و همچنین انجام تف‌جوشی صورت می‌گیرد [۱۴-۱۶]. در تحقیقات بهنام و همکارانش [۱۷-۱۸] نیز از روشی مشابه به منظور تولید گوی‌های توخالی فولادی استفاده شده است.

به علت تخلخل زیاد در پوسته گوی‌های توخالی تولید شده به این روش که به عدم استفاده از فشار در این روش متالورژی پودر ارتباط دارد، مدول الاستیک دیواره‌ها نسبتاً پایین است و در نتیجه، مدول الاستیک پایین ساختار گوی‌های توخالی را سبب می‌گردد [۱۹-۲۳]. به منظور بهبود ویژگی‌های الاستیکی ساختارهای گوی توخالی، علاوه بر انتخاب ماده اصلی و

۲-۱-۲- چسب

به منظور انجام فرآیند پوشش‌دهی پودرهای آهن بر روی دانه‌های پلی‌استیرین از سیلیکات سدیم به عنوان چسب استفاده شد. باید در نظر داشت که چسب‌های معدنی نسبت به چسب‌های آلی ترجیح داده می‌شوند. علت ارجحیت چسب‌های معدنی در مقایسه با چسب‌های آلی به تجزیه شدن چسب‌های آلی در هنگام عملیات‌های حرارتی تجزیه پلی‌استیرین و زینترینگ و جدا شدن پودرهای آهن از یکدیگر ارتباط دارد. قابل ذکر است که سیلیکات سدیم در دماهای بالای عملیات تف‌جوشی نیز می‌تواند پودرهای آهن را به خوبی در کنار یکدیگر نگه دارد و در نتیجه، اتصال مناسبی را فراهم آورد.

۲-۱-۳- پودرهای آهن

به منظور بررسی تاثیرات اندازه ذرات پودر آهن، مس افزودنی و نوع پوشش پودرهای آهن بر روی گوی‌های توخالی فولادی از پودرهای آهن گوناگون برای پوشش‌دهی دانه‌های پلی‌استیرین استفاده شد. در جدول (۱)، مشخصات پودرهای آهن مورد استفاده و نحوه نام‌گذاری نمونه‌های تولیدی ارائه شده است. مطابق با جدول، پنج نمونه پودر متفاوت به کار گرفته شد که در پایان، پنج نمونه گوی توخالی فولادی مختلف تولید می‌شود. قابل ذکر است که گوی‌های توخالی فولادی مطابق با نام‌گذاری پودرهای آهن مورد استفاده، نام‌گذاری می‌شوند.

جدول (۱): مشخصات پودرهای مورد استفاده و نحوه نام‌گذاری نمونه‌های تولیدی.

نام نمونه	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	نوع پوشش	اندازه ذرات پودر (میکرون)
A	Fe-۰/۵C*	ندارد	<۱۰۰
B	Fe-۰/۵C*	ندارد	<۱۰
C	Fe-۱۵Cu**۰/۵C*	ندارد	<۱۰۰
D	Fe	مس	<۱۰۰
E	Fe	برنز	<۱۰۰

*ذرات پودر کربن دارای اندازه بسیار ریز می‌باشند.

**ذرات پودر مس دارای اندازه کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرون می‌باشند.

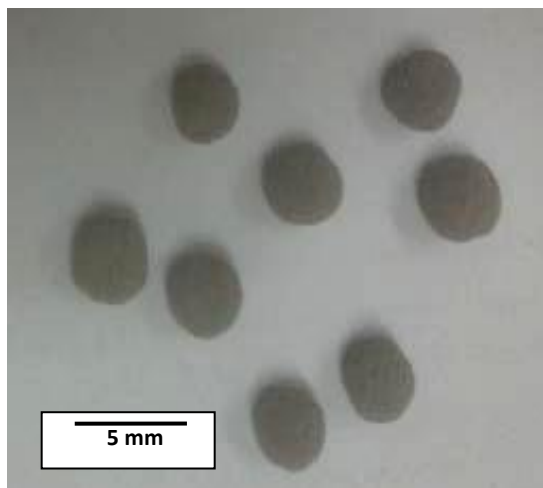
۲-۲- فرآیند تولید گوی‌های توخالی

۲-۲-۱- پوشش‌دهی دانه‌های پلی‌استیرین

در این مرحله، دانه‌های پلی‌استیرین تهیه شده با قطر ۵mm برای پوشش‌دهی به کار گرفته شدند. به منظور انجام فرآیند پوشش‌دهی دانه‌های پلی‌استیرین، یک دستگاه خاص طراحی و ساخته شد. این دستگاه دارای یک محفظه شیشه‌ای، یک سیستم تولید هوای فشرده (پمپ باد) و یک سیستم پاشش می‌باشد. باید توجه داشت که فشار هوای تولید شده توسط دستگاه به مقداری است که برای معلق شدن دانه‌های پلی‌استیرین درون محفظه شیشه‌ای و همچنین پاشش مخلوط چسب و پودرهای آهن کفایت می‌کند. در ابتدا، دانه‌های پلی‌استیرین توسط فشار هوای تامین شده توسط دستگاه درون محفظه

شیشه‌ای معلق می‌شوند. محفظه شیشه‌ای دستگاه به شکل مکعب مستطیل است و ابعاد آن به صورت ۵۰cm × ۵۰cm × ۳۰cm می‌باشد.

سیستم پاشش خود دارای یک محفظه پلاستیکی است که مخلوط چسب و پودرهای آهن درون آن قرار می‌گیرند. بر روی درب این محفظه یک الکتروموتور به همراه یک پروانه تعبیه شده است. پروانه درون مخلوط چسب و پودرهای آهن با سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه می‌چرخد و در نتیجه، مخلوطی همگن حاصل می‌شود و انجام این فرآیند از تنشین شدن پودرهای آهن جلوگیری می‌کند. سپس، مخلوط سیلیکات سدیم به عنوان چسب و پودر آهن توسط سیستم پاشش بر روی



شکل (۱): نمایش گوی‌های توخالی فولادی تولید شده

برای این که اتصال ذرات پودر آهن به یکدیگر به صورت قوی تشکیل شود و استحکام گوی‌های توخالی تولیدی افزایش یابد، فرآیند تف‌جوشی انجام می‌گیرد. عملیات تف‌جوشی در یک کوره صنعتی تونلی (مربوط به شرکت متالورژی پودر مشهد) که به صورت پیوسته کار می‌کند، در دمای 1120°C به مدت ۴ ساعت صورت گرفت. کوره مورد استفاده قابلیت کنترل اتمسفر را دارد. اتمسفر استفاده شده در عملیات تف‌جوشی، آمونیاک شکسته می‌باشد. برای جلوگیری از اتصال گوی‌های توخالی به یکدیگر در حین فرآیند تف‌جوشی، گوی‌ها درون یک محفظه قرار می‌گیرند و فضای بین آن‌ها توسط ذرات پودر آلومینا پُر می‌شود. قابل ذکر است که در هنگام انجام فرآیند تف‌جوشی، پودرهای آلومینا هیچ‌گونه واکنش شیمیایی یا فیزیکی با محصولات تولیدی ندارند.

۳-۲- تعیین ضخامت پوسته و کسر سطحی تخلخل و

بررسی ترک‌ها و حفرات در پوسته

گوی‌های تولید شده به منظور انجام آزمایشات متالوگرافی، مانع سرد شدند. سپس نمونه‌های مانع شده به صورت مقطعی از وسط بریده شدند. پس از برش، فرآیندهای سمباده‌زنی و پولیش بر روی نمونه‌های تولید شده انجام شد و تصاویر متالوگرافی بدون انجام فرآیند اچ توسط میکروسکوپ نوری

دانه‌های پلی‌استیرین معلق درون محفظه شیشه‌ای پاشیده می‌شوند.

بر اساس این که پاشش مخلوط چسب و پودرهای آهن نیروی در امتداد افق به دانه‌های پلی‌استیرین وارد می‌کنند، این دانه‌ها درون محفظه شیشه‌ای به چرخش در می‌آیند. این عمل موجب می‌شود که مخلوط سیلیکات سدیم و پودر آهن به صورت کامل سطح دانه‌های پلی‌استیرین را بپوشاند. بعد از انجام این فرآیند به مدت ۴۰ ثانیه، سیستم خاموش می‌شود و دانه‌های پوشش داده شده در انتهای محفظه شیشه جمع می‌شوند. سپس محصولات تولید شده از درون محفظه خارج می‌شوند. این انتظار وجود دارد که یکنواخت بودن ضخامت پوشش مخلوط چسب و پودرهای آهن قرار گرفته بر روی دانه‌های پلی‌استیرین وابسته به درصد چسب و پودر آهن مورد استفاده، غلظت چسب، چگونگی معلق شدن دانه‌های پلی‌استیرین درون محفظه و زمان نگهداری درون محفظه باشد. در شکل (۱)، نمونه‌ای از گوی‌های توخالی فولادی تولید شده به تصویر کشیده شده است.

۲-۲- تجزیه حرارتی دانه‌های پلی‌استیرین و تف‌جوشی

در مرحله قبل، فرآیند پوشش‌دهی ذرات پودر آهن بر روی زیرلایه‌هایی از دانه‌های پلی‌استیرین صورت گرفت. در این مرحله، با استفاده از عملیات حرارتی می‌توان زیرلایه‌های پلی‌استیرین را تجزیه و سپس عملیات تف‌جوشی را انجام داد. در ابتدا، گوی‌های تولیدی مرحله قبل درون یک آون با دمای 100°C به مدت ۱ ساعت قرار می‌گیرند. این امر موجب می‌گردد که دانه‌های پلی‌استیرین به صورت تدریجی تجزیه شوند و گازهای تولید شده از لایه‌های ذرات پودر آهن خارج شوند. در نتیجه، گوی‌های توخالی فولادی کم استحکام تولید شود.

گوی‌های توخالی فولادی تحت تاثیر مشخصات پودرهای مورد استفاده و متغیرهای فرآیند تولید می‌باشد. با توجه به این که در فرآیند تولید، پوشش دهی به صورت کاملاً یکنواخت بر روی دانه‌های پلی‌استیرن صورت گرفته است، این احتمال وجود دارد که تغییر در ضخامت پوسته‌ها تحت تاثیر اندازه، افزودنی و نوع پوشش پودرها قرار گرفته است. علاوه بر این، به علت این که فرآیند تف‌جوشی در نمونه ساخته شده از پودرهای آهن با پوشش مس (نمونه D) و در نمونه ساخته شده از پودرهای آهن کوچکتر از ۱۰ میکرون (نمونه B) بهتر انجام شده است، ایجاد یکنواختی بیشتر در ضخامت پوسته‌ها و همچنین افزایش ضخامت پوسته قابل انتظار می‌باشد. بنابراین، استفاده از پودرهای حاوی پوشش مس و پودرهای ریزتر می‌تواند موجب بهبود یکنواختی ضخامت پوسته شود. در نمونه E که از پوشش برنز بر روی پودرهای آهن استفاده شده است، عنصر قلع موجود در برنز در دمای تف‌جوشی، به صورت سطحی ذوب و تبخیر می‌شود. این انتظار وجود داشت که ذوب برنز در حد فاصل ذرات پودر آهن موجب ایجاد تف‌جوشی حالت مایع شود و در نتیجه، اتصال مناسب‌تری صورت گیرد، اما تبخیر سطحی عنصر قلع به علت فشار بخار زیاد آن در دمای تف‌جوشی سبب جدا شدن اتصال بین پودرهای آهن می‌گردد که کاهش در ضخامت پوسته و همچنین عدم یکنواختی در ضخامت پوسته‌ها را نتیجه می‌دهد.

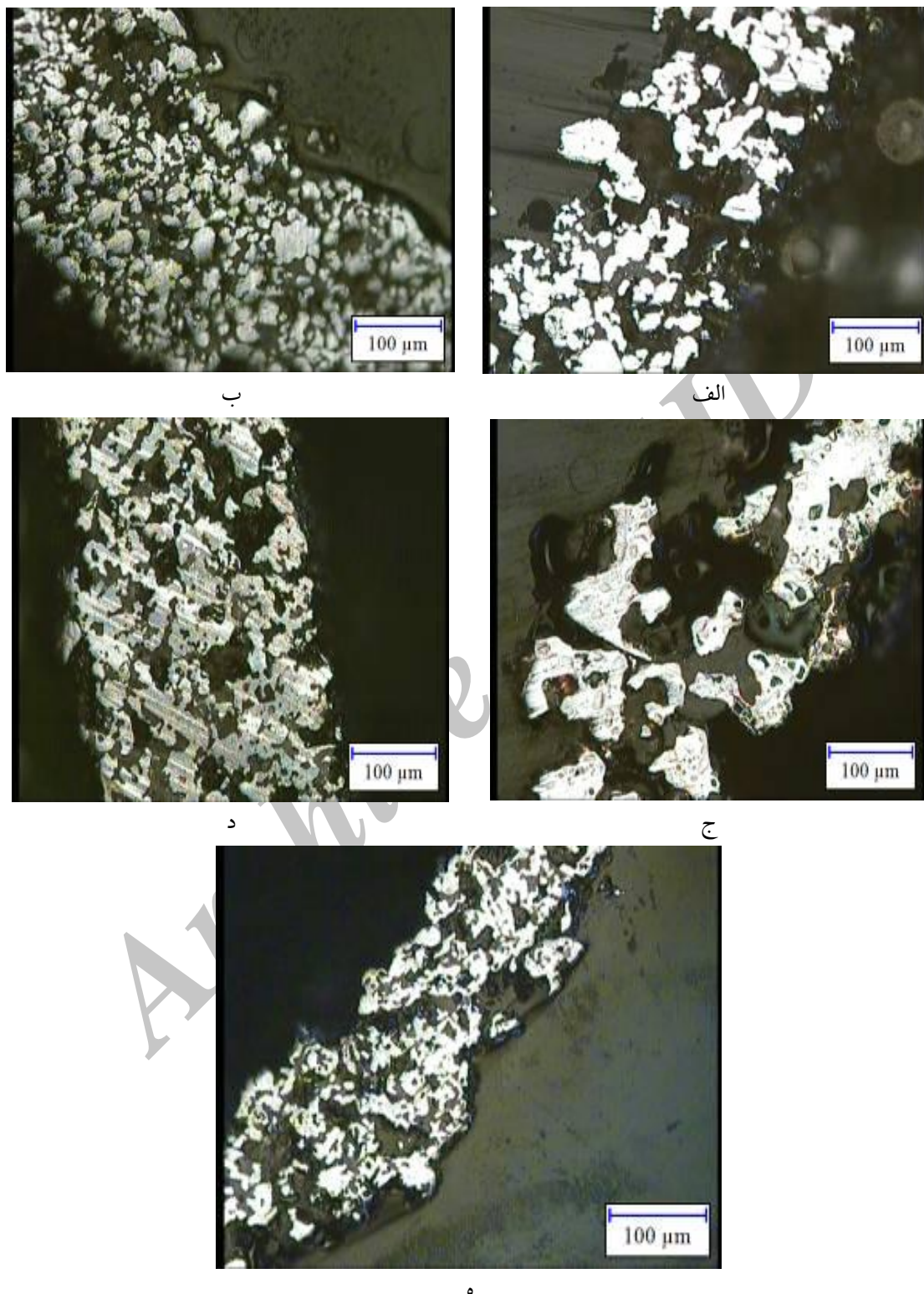
در بزرگنمایی‌های گوناگون تهیه گردید. نرم‌افزار پردازش تصویر MIP که توسط شرکت نهمین پردازان آسیا تولید شده است، به منظور تحلیل تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ نوری به کار گرفته شد. توسط نرم‌افزار پردازش تصویر، ضخامت و کسر سطحی تخلخل در قسمت پوسته گوی‌های تولید شده، ارزیابی شد. تصاویر به دست آمده در بزرگنمایی ۱۰۰ برابر و تصاویر به دست آمده در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر به ترتیب برای تعیین ضخامت پوسته و درصد تخلخل به کار گرفته شدند. قابل ذکر است که برای تعیین ضخامت پوسته ۱۵ اندازه‌گیری بر روی ۵ تصویر متفاوت از پوسته گوی‌های تهیه شده و برای تعیین درصد تخلخل ۵ اندازه‌گیری انجام شد و نتایج براساس میانگین اعداد به دست آمده ارائه می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین ضخامت پوسته

تعیین ضخامت پوسته توسط برش مقطعی گوی‌های مانت سرد شده و با به کارگیری نرم‌افزار پردازش تصاویر متالوگرافی امکان‌پذیر شد. تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر به منظور تعیین ضخامت پوسته گوی‌های توخالی فولادی به کار برده شدند که در شکل (۲)، نمونه‌ای از تصاویر مورد استفاده نمایش داده شده است. مطابق با شکل مشخص می‌شود که نمونه‌های تولید شده B و D دارای ضخامت یکنواخت‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشند. در جدول (۲)، میانگین ضخامت پوسته گوی‌های توخالی فولادی ارائه شده است. مطابق با جدول، میانگین ضخامت پوسته در نمونه‌های مطالعه شده بین ۱۶۵ تا ۳۰۰ میکرون می‌باشد. قابل ذکر است که ضخامت پوسته اندازه‌گیری شده در مطالعات بهنام و همکارانش در محدوده ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون می‌باشد که تطبیق نتایج به دست آمده با سایر مطالعات را نشان می‌دهد [۱۷].

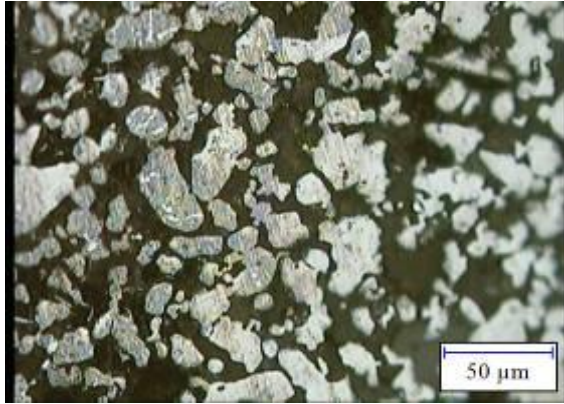
علاوه بر این، بیشترین ضخامت مربوط به نمونه D و پس از آن به ترتیب مربوط به نمونه‌های A، B، C و E می‌باشد. ضخامت



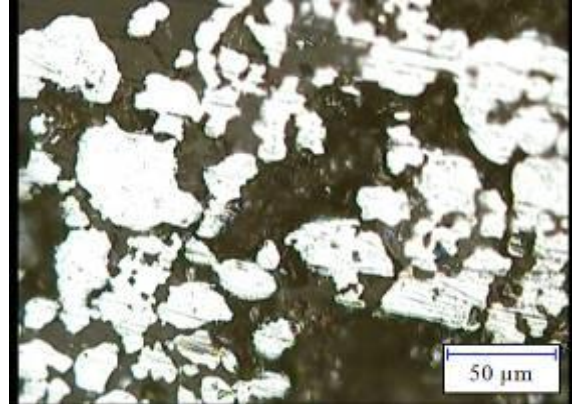
شکل (۲): تصاویر متالوگرافی از بخش مقطعی پوسته گوی‌های تولید شده: (الف): نمونه A، (ب): نمونه B، (ج): نمونه C، (د): نمونه D و (ه): نمونه E

۳-۲- کسر سطحی تخلخل‌ها

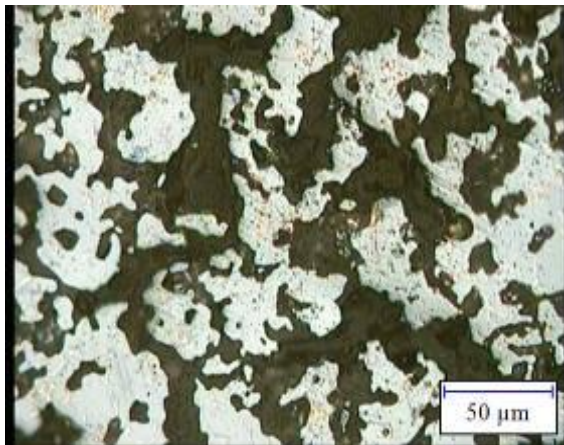
تصاویر تهیه شده در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر از مقطع پوسته گوی‌های تولید شده در شکل (۳) نمایش داده شده است.



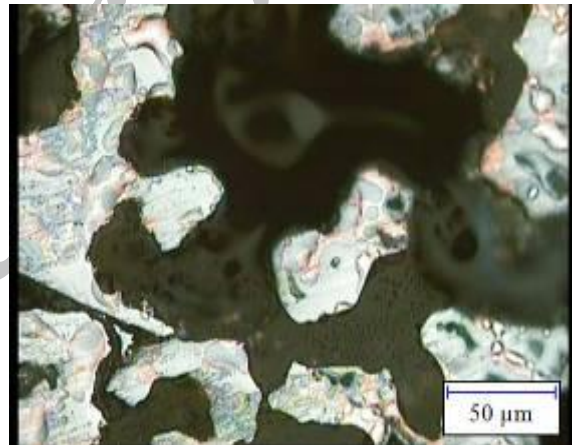
ب



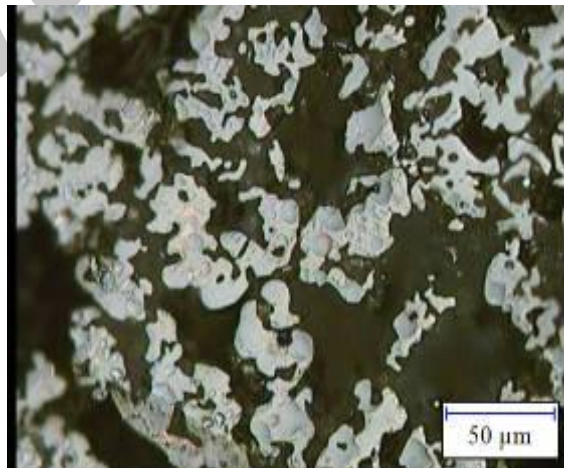
الف



ج



د



ه

شکل (۳): تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع پوسته گوی‌های تولید شده به منظور بررسی درصد تخلخل: (الف): نمونه A، (ب): نمونه B، (ج): نمونه C، (د): نمونه D و (ه): نمونه E

موجود در پوشش برنزی پودرهای آهن و همچنین ذوب برنز، کسر سطحی تخلخل‌ها به بیشترین مقدار افزایش می‌یابد.

جدول (۳): نتایج کسر سطحی تخلخل‌های موجود در پوسته.

نام نمونه	کسر سطحی تخلخل (%)
A	۵۳/۱۷
B	۵۱/۵۰
C	۵۸/۲۹
D	۴۹/۸۹
E	۶۴/۴۳

میزان تخلخل‌ها در پوسته گوی‌های توخالی فولادی به مشخصات پودرهای مورد استفاده، مقدار چسب، زمان پوشش‌دهی، دما و زمان تف‌جوشی وابسته می‌باشد. بدیهی است که تف‌جوشی در دماهای بالاتر و یا افزایش زمان تف‌جوشی می‌تواند موجب کاهش کسر سطحی تخلخل‌های باقیمانده در پوسته شود. باید توجه داشت که میزان تخلخل‌ها در پوسته تاثیر شدیدی بر ویژگی‌های مکانیکی گوی‌های توخالی خواهد گذاشت. کاهش کسر سطحی تخلخل‌ها وابسته به اندازه و نوع پوشش پودرها نیز می‌باشد. استفاده از پودرهای کوچکتر موجب افزایش چگالی ظاهری پودرها می‌شود که در نتیجه، بهبود میزان تخلخل‌ها را سبب می‌شود. علاوه بر این، پوشش مس قرار گرفته بر روی پودرهای آهن نیز همانند افزایش دما و زمان تف‌جوشی موجب بهبود فرآیند تف‌جوشی و در نتیجه، کاهش تخلخل‌ها می‌شود.

۳-۳- ترک‌ها و حفرات

حضور ترک‌ها و حفرات در پوسته گوی‌های توخالی به عدم استفاده از فشردن در فرآیند متالورژی پودر به کار گرفته شده ارتباط پیدا می‌کند. ترک‌ها و حفرات ایجاد شده در پوسته گوی‌های توخالی فولادی به کمک تصاویر متالوگرافی تجزیه و تحلیل می‌شوند. در شکل (۴)، ترک‌ها و حفرات ایجاد شده در نمونه‌های تولیدی نمایش داده شده است. ترک‌ها و حفرات

جدول (۲): نتایج تعیین ضخامت پوسته گوی‌های تولید شده

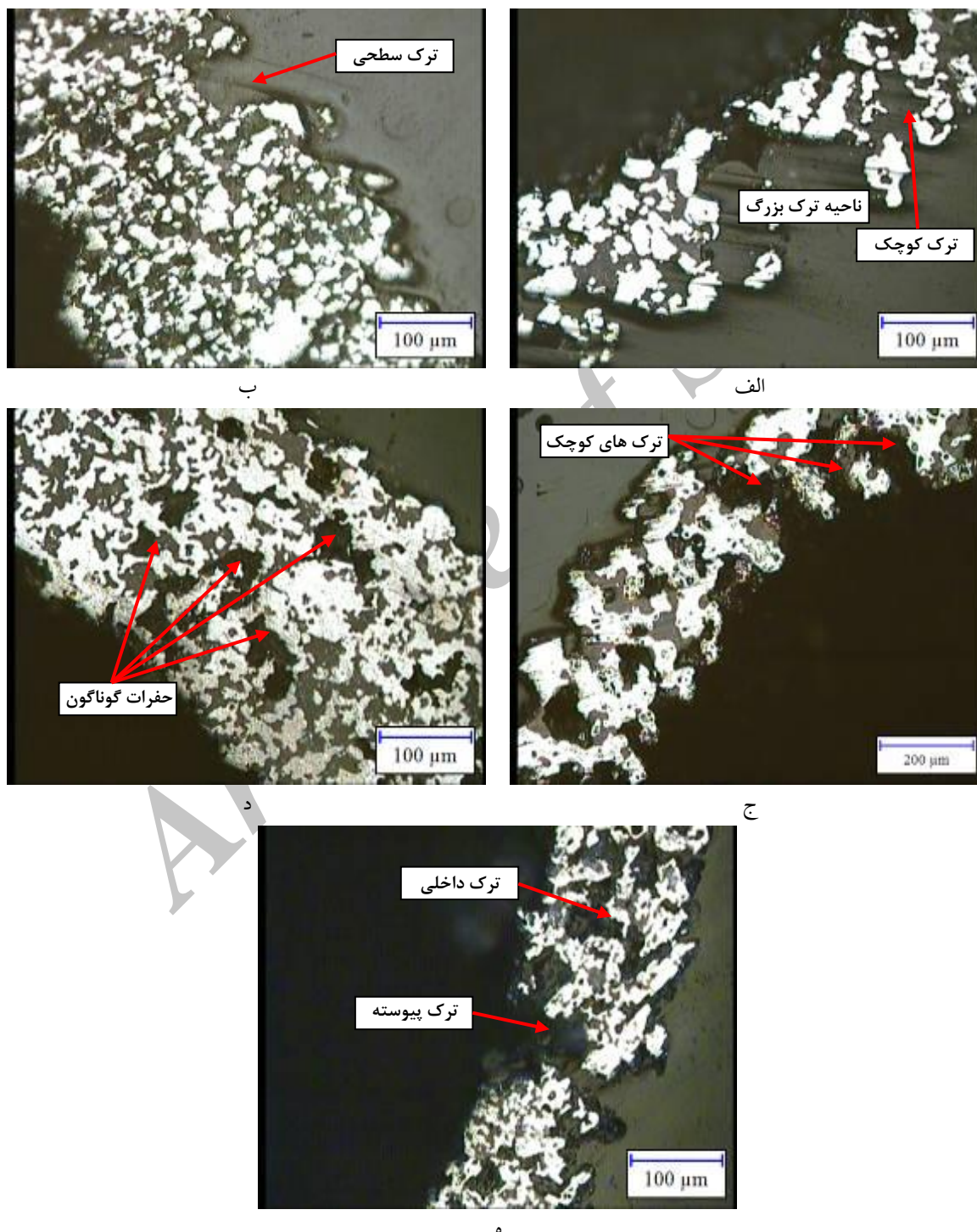
نام نمونه	میانگین ضخامت پوسته (میکرون)
A	۲۵۰
B	۲۸۵
C	۲۲۰
D	۳۰۰
E	۱۶۵

کسر سطحی تخلخل‌ها نمونه‌های تولید شده توسط پردازش تصاویر تهیه شده با استفاده از نرم‌افزار MIP انجام شد و جدول (۳) نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. مطابق با جدول، کسر سطحی تخلخل‌ها بین ۵۰ تا ۶۵ درصد به دست آمده است. نتایج به دست آمده در مقایسه با نتایج مطالعات بهنام و همکارانش، کسر سطحی تخلخل بیشتری را نشان می‌دهد [۱۷-۱۸]. نتایج بیان می‌کند که کمترین میزان کسر سطحی تخلخل‌ها به نمونه D و بیشترین مقدار آن به نمونه E ارتباط دارد. پایین بودن کسر سطحی تخلخل‌ها در نمونه D به تف‌جوشی مناسب در این نمونه ارتباط پیدا می‌کند. نمونه D توسط پودرهای آهن پوشش داده شده توسط مس تولید شده است که این امر موجب بهبود فرآیند تف‌جوشی و همچنین انجام تف‌جوشی حالت مایع می‌گردد. در نتیجه، کاهش کسر سطحی تخلخل‌ها را سبب می‌شود.

پس از نمونه D، کمترین میزان کسر سطحی تخلخل‌ها مربوط به نمونه B می‌باشد که ریز بودن اندازه ذرات پودر آهن به کار گرفته شده موجب تماس بیشتر ذرات، تف‌جوشی بهتر و کاهش میزان تخلخل می‌گردد. در نمونه C به علت این که اندازه ذرات پودر آهن درشت می‌باشند و همچنین به علت این که مقدار زیادی ذرات مس با اندازه بزرگ افزوده شده است و در فرآیند تف‌جوشی، ذرات مس افزودنی ذوب شده و ذرات پودر آهن را به یکدیگر متصل می‌سازد، حفرات بین پودرها در اثر ایجاد نیروهای کشش سطحی در فصل مشترک مذاب مس و ذرات پودر آهن، درشت‌تر شده و کسر سطحی تخلخل‌ها نیز افزایش می‌یابد. در نمونه E، به علت تبخیر سطحی فلز قلع

می‌باشند، این ذرات به راحتی درون یکدیگر قرار می‌گیرند و سطوح تماس آن‌ها افزایش می‌یابد. این امر موجب می‌گردد که ترک‌ها و حفرات با ابعاد بسیار کوچک تشکیل شوند.

موجود در پوسته گوی‌های توخالی تأثیر شدیدی بر رفتار مکانیکی آن‌ها خواهد داشت. در نمونه B، به علت این که اندازه ذرات پودر آهن در مقایسه با نمونه A بسیار کوچک



شکل (۴): نمایش ترک‌ها و حفرات ایجاد شده در پوسته گوی‌های فولادی: (الف): نمونه A، (ب): نمونه B، (ج): نمونه C، (د): نمونه D و (ه): نمونه E

۵- مراجع

- [1] J. Banhart, "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", Progress in Materials Science, Vol. 46, pp. 559-632, 2001.
- [2] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson & H. N. G. Wadley, Metal Foams: A Design Guide, Butterworth-Heinemann, Massachusetts, 2000.
- [3] H. P. Degischer & B. Kriszt, Handbook of Cellular Metals, Production, Processing and Applications, Wiley-VCH/Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 2002.
- [4] م. سبزواری، س. ع. سجادی و ا. مولودی، "بررسی خواص فوم نانوکامپوزیتی مس/ آلومینا تولید شده به روش متالورژی پودر"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال نهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۴.
- [5] Y. Sugimura, J. Meyer, M. Y. He, H. Bart-Smith, J. Grenstedt & A. G. Evans, "On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams", Acta Materialia, Vol. 45, No. 12, pp. 5245-5259, 1997.
- [6] Y. Sugimura, A. Rabiei, A. G. Evans, A. M. Harte & N. A. Fleck, "Compression fatigue of cellular Al alloys", Journal of material science and engineering, Vol. 269A, pp. 38-48, 1999.
- [7] A. Rabiei, A. O'Neill & B. Neville, "Processing and development of a new high strength metal foam", MRS Fall 2004 Proceedings, Vol. 841, pp. 517-526, 2005.
- [8] T. J. Lim, B. Smith & D. L. McDowell, "Behavior of a random hollow sphere metal foam", Acta Materialia, Vol. 50, pp. 2867-2879, 2002.
- [9] E. Baumeister, S. Klaeger, A. Kaldos, "Lightweight, hollow-sphere-composite (HSC) materials for mechanical engineering applications", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 155-156, pp. 1839-1846, 2004.
- [10] P. Lhuissier, L. Salvo & Y. Brechet, "Sintered hollow spheres: Random stacking behaviour under uniaxial tensile loading", Scripta Materialia, Vol. 63, pp. 277-280, 2010.

در نمونه‌های C و D حضور مس و انجام تف‌جوشی حالت مایع موجب می‌گردد که ترک‌ها و حفرات بزرگ به مقدار بسیار کم مشاهده شوند. شایان ذکر است که حفرات و ترک‌ها در نمونه D نسبت به نمونه C کمتر می‌باشد که احتمالاً به توزیع یکنواخت‌تر مس در این نمونه ارتباط پیدا می‌کند. قابل ذکر است که استحکام نمونه‌های B، C و D به صورت کیفی نسبت به نمونه‌های A و E بهتر می‌باشد که به پایین بودن میزان حفرات و ترک‌ها و همچنین تف‌جوشی بهتر در این نمونه‌ها ارتباط می‌یابد. در نمونه E که پودرهای آهن مورد استفاده برای تولید آن توسط برنز پوشش‌دهی شده‌اند، به علت تبخیر سطحی عنصر قلع در دمای تف‌جوشی و خروج بخارات تولید شده از لابه‌لای ذرات پودر آهن، میزان ترک‌ها و حفرات بیشتر می‌باشد. در بررسی‌های انجام شده بر روی گوی‌های توخالی سوراخ شده، مشخص شد که نمونه‌های A و E بیشترین مقدار گوی‌های توخالی سوراخ شده را دارند.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، گوی‌های توخالی فولادی با استفاده از یک روش متالورژی پودر تولید شدند و نتایج به دست آمده در زیر فهرست شده‌اند.

۱- استفاده از این روش می‌تواند به صورت موفقیت‌آمیز به منظور تولید گوی‌های توخالی فولادی به کار گرفته شود.

۲- در این روش، قابلیت تغییر در قطرهای داخلی و خارجی، ضخامت پوسته و حتی شکل هندسی گوی‌های توخالی فولادی وجود دارد.

۳- اندازه ذرات پودر آهن، افزودنی مس و نوع پوشش پودرهای آهن از عوامل موثر بر ویژگی‌های گوی‌های توخالی محسوب می‌شوند.

۴- گوی‌های توخالی تولید شده توسط پودرهای آهن کوچک‌تر از ۱۰ میکرون، پودرهای آهن حاوی ۱۰ درصد مس افزودنی و پودرهای آهن پوشش شده توسط مس بهترین خصوصیات را از خود نشان می‌دهند.

- of randomly packed hollow sphere (RHS) cell wall”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 365A, pp. 130–135, 2003.
- [20] Z. Y. Gao, “Mechanical behaviour of metallic hollow sphere materials: experimental study” *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 21, pp. 206–217, 2008.
- [21] A. Fallet, P. Lhuissier, L. Salvo & Y. Brechet, “Mechanical behaviour of metallic hollow spheres foam”, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 10, pp. 858–862, 2008.
- [22] M. Reinfried, U. Waag, G. Stephani, F. Bretschneider, “Deformation behaviour of ultra light steel based hollow sphere structures”, *Euro Mat* 2003, Switzerland, 2003.
- [23] T. Fiedler, H. S. Kim, I. V. Belova, S. W. Sloan, G. E. Murch & A. Ochsner, “Elastic finite element analysis on cross-sections of random hollow sphere structures”, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Vol. 41, pp. 250–256, 2010.
- [24] P. Yu, G. Stephani, S. D. Luo, H. Goehler & M. Qian, “Microwave-assisted fabrication of titanium hollow spheres with tailored shell structures for various potential applications”, *Materials Letters*, Vol. 86, pp. 84–87, 2012.
- [25] A. Ochsner & C. Augustin, “Multifunctional metallic hollow sphere structures: manufacturing, properties and application”, *Engineering Materials*, pp. 101–107, 2009.
- [11] L. J. Gibson & M. F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1997.
- [12] O. Andersen, G. Stephani, *Handbook of cellular metals. Production, Processing, Applications*, Edited by H. P. Degischer, B. Kriszt, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002.
- [13] L. J. Vendra, “Processing and characterization of aluminum-steel composite metal foams”, *Metal Foams*, Raleigh, North Carolina, 2008.
- [14] *Cellular Metallic Materials*, Frounhofer, IFAM.
- [15] M. Jaeckel, H. Smigilski, “Coating of polymeric spheres with particles”, *European Patent DE 3724156*, 1988.
- [16] C. Augustin & W. Hungerbach, “Production of hollow sphere (HS) and hollow structure (HSS)”, *Materials Letters*, Vol. 63, pp. 1109–1112, 2009.
- [17] M. Behnam, A. S. Golezani & M. M. Lima, “The effect of size and morphology of iron powder on shell density in low carbon steel hollow spheres”, *Powder Metallurgy Progress*, Vol. 11, pp. 185–192, 2011.
- [18] M. Behnam, A. S. Golezani & M. M. Lima, “Optimization of surface quality and shell porosity in low carbon steel hollow spheres produced by powder metallurgy”, *Powder Technology*, Vol. 235, pp. 1025–1029, 2013.
- [19] K. A. Khor, L. G. Yu, O. Andersen & G. Stephani, “Effect of spark plasma sintering (SPS) on the microstructure and mechanical properties

۶- پی‌نوشت

- [1] T. J. Lim