

# تأثیر نوع پوشش ذرات پودر آهن بر خصوصیات گوی‌های توخالی فولادی

حمید سازگارانی<sup>۱\*</sup>، علیرضا کیانی رشید<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

<sup>۲</sup> استاد گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

\* [Hamid.Sazegaran@gmail.com](mailto:Hamid.Sazegaran@gmail.com)

## چکیده

گوی‌های توخالی فلزی می‌توانند به صورت موفقیت‌آمیز برای ایجاد سلول‌ها و حفرات در ساختارهای سلولی و فوم‌های فلزی به کار گرفته شوند. در این مطالعه، 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 توسط الک صورت گرفت. سپس، مخلوط سیلیکات سدیم به عنوان چسب و پودرهای آهن درون یک محفظه بر روی دانه‌های معلق پلی‌استیرین پاشیده شد. برای معلق کردن دانه‌های پلی‌استیرین درون محفظه از دمش هوا درون محفظه توسط یک پمپ استفاده شد. بنابراین، یک لایه نازک از مخلوط پودرهای آهن و چسب بر روی دانه‌های پلی‌استیرین قرار گرفت. 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 می‌باشند. پودرهای آهن مورد استفاده شامل پودرهای آهن بدون پوشش، پودرهای آهن با پوشش مس و پودرهای آهن با پوشش برنز می‌باشند. به منظور ارزیابی ضخامت و میزان تخلخل پوسته گوی‌های توخالی فولادی و بررسی معایب آن‌ها، مقاطع پوسته‌ها توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. 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

فوم‌های فلزی و ساختارهای سلولی دسته‌ای از مواد مهندسی پیشرفته هستند که به دلیل خصوصیات همانند سبک بودن، ویژگی‌های 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 مورفولوژی سلول‌ها (باز، بسته و یا 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 گازی حاوی فلز و د) تولید از محلول حاوی یون‌های فلزی می‌باشد [۳-۱].

در اغلب روش‌های تولید فوم‌های فلزی، امکان ایجاد سلول‌هایی با مورفولوژی یکسان، اندازه کاملاً مشخص و توزیع یکنواخت حفرات وجود ندارد [۵ و ۴]. وجود نواقص مورفولوژیکی موجب تولید محصولاتی می‌گردد که ویژگی‌ها و خصوصیات آن‌ها قابل پیش‌بینی نمی‌باشد و یا این که ویژگی‌های در قسمت‌های گوناگون محصول نهایی متفاوت می‌باشد [۶ 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 توسط چسب و تفجوشی گوی‌ها به یکدیگر می‌باشد [۷-۹].

روش‌های متنوعی برای ساخت و تولید گوی‌های توخالی فلزی توسعه پیدا کرده است [۲، ۳، ۱۲-۱۰]. لیم<sup>۱</sup> 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 [۷]. در روشی دیگر که توسط موسسه فرانکوفر آلمان توسعه یافته است، دانه‌های پلی‌استیرن 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 [۱۵-۱۳]. در تحقیقات بهنام و همکارانش [۱۶ و ۱۷] 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 [۲۲-۱۸]. به منظور بهبود ویژگی‌های الاستیکی ساختارهای گوی توخالی، علاوه بر انتخاب ماده اصلی و افزودنی‌های مناسب، نیاز به استفاده از عملیات حرارتی مناسب برای دستیابی به کمترین درصد تخلخل در دیواره‌ها می‌باشد [۱۶]. روشی مشابه به منظور تولید گوی‌های توخالی و فوم آلیاژهای تیتانیوم نیز به کار برده شده است [۲۳]. 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 آلیاژ آلومینیوم ترجیح داده می‌شوند. بهبود ۸۰ درصدی شرایط اقتصادی تولید در ساخت قطعات پیچیده توسط استفاده از تکنولوژی گوی‌های توخالی ممکن شده است [۲۴]. مطالعات فراوانی بر روی روش‌های تولید گوی‌های توخالی آهنی و فولادی صورت گرفته است، اما متأسفانه در هیچ‌کدام تأثیر اندازه ذرات پودر آهن، استفاده از افزودنی مس و همچنین استفاده از پودرهای دارای پوشش بر روی فرآیند تولید و خصوصیات محصول تولیدی انجام 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 پلی‌استیرن انبساط‌یافته

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

#### ۲-۱-۲- چسب

به منظور انجام فرآیند پوشش‌دهی پودرهای آهن بر روی دانه‌های پلی‌استیرن از سیلیکات سدیم به عنوان چسب استفاده شد. چسب‌های معدنی نسبت به چسب‌های آلی ترجیح داده می‌شوند و علت آن به تجزیه شدن چسب‌های آلی در هنگام عملیات حرارتی 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.

<sup>1</sup> T. J. Lim

## ۲-۱-۳- پودرهای آهن

به منظور بررسی تأثیرات 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، سه نمونه پودر متفاوت به کار گرفته شد که در پایان، سه نمونه گوی توخالی فولادی مختلف تولید می‌شود. قابل ذکر است که گوی‌های توخالی فولادی مطابق با نام‌گذاری پودرهای آهن مورد استفاده، نام‌گذاری می‌شوند.

## ۲-۲- 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. در ابتدا، مخلوطی از سیلیکات سدیم به عنوان چسب و پودرهای آهن تهیه شد. سپس دانه‌های پلی‌استیرین درون محفظه دستگاه پوشش‌دهی [۱۶و۱۷] قرار گرفتند. وجود فشار هوا درون محفظه دستگاه سبب معلق شدن دانه‌های پلی‌استیرین شد. سپس پاشش مخلوط چسب و پودرهای آهن بر روی دانه‌های پلی‌استیرین معلق صورت گرفت. حرکت چرخشی دانه‌های پلی‌استیرین درون محفظه در اثر جریان متلاطم هوا موجب چسبیدن یک لایه‌ای نازک از پودرهای آهن به سطوح آن‌ها می‌شود. یکنواخت بودن ضخامت پوشش پودرهای آهن قرار گرفته بر روی دانه‌های پلی‌استیرین شدیداً به مقدار چسب، غلظت چسب، میزان حرکت چرخشی و زمان نگهداری درون محفظه ارتباط دارد. در شکل ۱، نمونه‌ای از گوی‌های تولید شده نمایش داده شده است.

### ۲-۲-۲- تجزیه حرارتی دانه‌های پلی‌استیرین و تفجوشی

در مرحله قبل، پوشش 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 عملیات تفجوشی را انجام داد. گوی‌های تولیدی مرحله قبل درون یک آون با دمای  $100^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱ ساعت قرار می‌گیرند. این امر موجب می‌گردد که دانه‌های پلی‌استیرین به صورت تدریجی تجزیه شوند و از لایه‌ای ذرات پودر آهن خارج شوند. در نتیجه، گوی‌های توخالی فولادی کم استحکام تولید شود. برای این که اتصال ذرات پودر آهن به یکدیگر صورت گیرد و استحکام گوی‌های توخالی تولیدی افزایش یابد، فرآیند تفجوشی انجام می‌گیرد. عملیات تفجوشی در یک کوره صنعتی تونلی که به صورت پیوسته کار می‌کند، در دمای  $1120^{\circ}\text{C}$  به مدت ۴ ساعت صورت گرفت. کوره مورد استفاده قابلیت کنترل اتمسفر را دارد و اتمسفر استفاده شده، آمونیاک شکسته می‌باشد. برای جلوگیری از اتصال گوی‌های توخالی به یکدیگر، گوی‌ها درون یک محفظه حاوی ذرات پودر آلومینا قرار گرفتند. قابل ذکر است که در هنگام انجام فرآیند تفجوشی، پودرهای آلومینا هیچ‌گونه واکنش شیمیایی یا فیزیکی با محصولات تولیدی ندارند.

## ۲-۳- تعیین ضخامت و کسر سطحی تخلخل پوسته و بررسی ترک‌ها و حفرات در پوسته

گوی‌های تولید شده به منظور انجام آزمایشات متالوگرافی مانت سرد و به صورت مقطعی 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 در بزرگنمایی‌های گوناگون تهیه گردید. نرم‌افزار پردازش تصویر MIP که توسط شرکت نهامین 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 مانده 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 استفاده شدند که در شکل ۲، نمونه‌ای از تصاویر مورد استفاده نمایش داده شده است. مطابق با شکل مشخص می‌شود که نمونه تولید شده B دارای ضخامت یکنواخت‌تر نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشند. در جدول ۲، میانگین ضخامت پوسته گوی‌های توخالی فولادی ارائه شده است. نتایج بیان می‌کند که بیشترین ضخامت مربوط به نمونه B و پس از آن به ترتیب مربوط به نمونه‌های A و C می‌باشد.

با توجه به این که در فرآیند تولید، پوشش‌دهی به صورت کاملاً یکنواخت بر روی دانه‌های پلی‌استیرن صورت گرفته است، این احتمال وجود دارد که تغییر در ضخامت پوسته‌ها تحت تاثیر نوع پوشش پودرها و همچنین عملیات تفجوشی قرار گرفته است. علاوه بر این، به علت این که فرآیند تفجوشی در نمونه ساخته شده از پودرهای آهن با پوشش مس (نمونه B) بهتر انجام شده است، ایجاد یکنواختی بیشتر در ضخامت پوسته‌ها و همچنین افزایش ضخامت پوسته قابل انتظار می‌باشد. در نمونه C 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. انتظار می‌رفت 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 موجب می‌گردد.

#### 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. کسر سطحی تخلخل 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. نتایج بیان می‌کند که کمترین میزان کسر سطحی تخلخل به نمونه B و بیشترین مقدار آن به نمونه C ارتباط دارد. پایین بودن کسر سطحی تخلخل در نمونه B به تفجوشی مناسب در این نمونه ارتباط پیدا می‌کند. نمونه B 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 در کسر سطحی تخلخل‌ها را سبب می‌شود. پس از نمونه B، کمترین میزان کسر سطحی تخلخل مربوط به نمونه A می‌باشد. در نمونه C، به علت تبخیر سطحی فلز قلع موجود در پوشش برنزی پودرهای آهن، کسر سطحی تخلخل‌ها به بیشترین مقدار افزایش می‌یابد.

#### 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. در نمونه B حضور مس و انجام تفجوشی حالت مایع موجب می‌گردد که ترک‌ها و حفرات بزرگ به مقدار بسیار کم مشاهده شوند. قابل ذکر است که استحکام نمونه B به صورت کیفی نسبت به نمونه‌های A و C بهتر می‌باشد که به پایین بودن میزان حفرات و ترک‌ها و

همچنین تفجوشی بهتر در این نمونه‌ها ارتباط می‌یابد. در نمونه C 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.

- ✓ استفاده از این روش می‌تواند به صورت موفقیت‌آمیز به منظور تولید گوی‌های توخالی فولادی به کار گرفته شود.
- ✓ در این روش، قابلیت تغییر در قطر، ضخامت پوسته و حتی شکل هندسی گوی‌های توخالی فولادی وجود دارد.
- ✓ نوع پوشش پودرهای آهن از عوامل موثر بر خصوصیات گوی‌های توخالی محسوب می‌شود.
- ✓ گوی‌های توخالی تولید شده توسط پودرهای آهن پوشش شده توسط مس بهترین خصوصیات را از خود نشان می‌دهند.

#### مراجع

- [1] Banhart. J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams," *Progress in Materials Science*, Vol. 46, pp. 559–632, 2001.
- [2] Ashby. M. F., Evans. A. G., Fleck. N. A., Gibson. L. J., Hutchinson. J. W. and Wadley. H. N. G., *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth–Heinemann, Massachusetts, 2000.
- [3] Degischer. H. P., Kriszt. B., *Handbook of Cellular Metals, Production, Processing and Applications*, Wiley–VCH/Verlag GmbH, Weinheim, Germany, 2002.
- [4] Sugimura. Y., Meyer. J., He. M. Y., Bart-Smith. H., Grenstedt. J., Evans. A. G., "On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams," *Acta Materialia*, Vol. 45, no. 12, pp. 5245–5259, 1997.
- [5] Sugimura. Y., Rabiei. A., Evans. A. G., Harte. A. M., Fleck. N. A., "Compression fatigue of cellular Al alloys," *Journal of material science and engineering A*, Vol. 269, pp. 38–48, 1999.
- [6] Rabiei. A., O'Neill. A., Neville. B., "Processing and development of a new high strength metal foam," *MRS Fall 2004 Proceedings 841*, pp. 517–526, 2005.
- [7] Lim. T. J., Smith. B., McDowell. D. L., "Behavior of a random hollow sphere metal foam," *Acta Materialia* 50, pp. 2867–2879, 2002.
- [8] Baumeister. E., Klaeger. S., Kaldos. A., "Lightweight, hollow-sphere-composite (HSC) materials for mechanical engineering applications," *Journal of Materials Processing Technology 155–156*, pp. 1839–1846, 2004.
- [9] Lhuissier. P., Salvo. L., Brechet. Y., "Sintered hollow spheres: Random stacking behaviour under uniaxial tensile loading," *Scripta Materialia* 63, pp. 277–280, 2010.
- [10] Gibson. L. J., Ashby. M. F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1997.
- [11] Andersen. O., Stephani. G., *Handbook of cellular metals. Production, Processing, Applications*, Edited by Degischer. H. P., Kriszt. B., Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002.
- [12] Vendra. L. J., "Processing and characterization of aluminum-steel composite metal foams," *Metal Foams*, Raleigh, North Carolina, 2008.
- [13] Cellular Metallic Materials, Frounhofer, IFAM.
- [14] Jaeckel. M., Smigilski. H., "Coating of polymeric spheres with particles," *European Patent DE 3724156*, 1988.
- [15] Augustin. C., Hungerbach. W., "Production of hollow sphere (HS) and hollow structure (HSS) ," *Materials Letters*, vol. 63, pp. 1109–1112, 2009.
- [16] Behnam. M., Golezani. A. S., Lima. M. M., "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.
- [17] Behnam. M., Golezani. A. S., Lima. M. M., "Optimization of surface quality and shell porosity in low carbon steel hollow spheres produced by powder metallurgy," *Powder Technology 235*, pp. 1025–1029, 2013.

- [18] Khor. K. A., Yu. L. G., Andersen. O., Stephani. G., "Effect of spark plasma sintering (SPS) on the microstructure and mechanical properties of randomly packed hollow sphere (RHS) cell wall," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 365, pp. 130–135, 2003.
- [19] Gao. Z. Y., "Mechanical behaviour of metallic hollow sphere materials: experimental study," *Journal of Aerospace Engineering* 21, pp. 206–217, 2008.
- [20] Fallet. A., Lhuissier. P., Salvo. L., Brechet. Y., "Mechanical behaviour of metallic hollow spheres foam," *Advanced Engineering Materials* 10, pp. 858–862, 2008.
- [21] Reinfried. M., Waag. U., Stephani. G., Bretschneider. F., "Deformation behaviour of ultra light steel based hollow sphere structures," *Euro Mat* 2003, Switzerland, 2003.
- [22] Fiedler. T., Kim. H. S., Belova. I. V., Sloan. S. W., Murch. G. E., Ochsner. A., "Elastic finite element analysis on cross-sections of random hollow sphere structures," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 41, pp. 250–256, 2010.
- [23] Yu. P., Stephani. G., Luo. S. D., Goehler. H., Qian. M., "Microwave-assisted fabrication of titanium hollow spheres with tailored shell structures for various potential applications," *Materials Letters* 86, pp. 84–87, 2012.
- [24] Ochsner. A., Augustin. C., "Multifunctional metallic hollow sphere structures: manufacturing, properties and application," *Engineering Materials*, pp. 101–107, 2009.

### جدول ۱. مشخصات پودرهای مورد استفاده و نحوه نام گذاری نمونه های تولیدی.

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

\* ذرات پودر کربن دارای اندازه بسیار ریز می باشند.

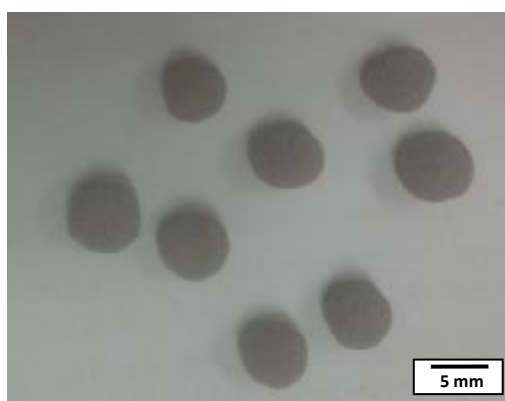
\*\* ذرات پودر مس دارای اندازه کوچک تر از ۱۰۰ میکرون می باشند.

### جدول ۲. نتایج تعیین ضخامت پوسته گوی های تولید شده.

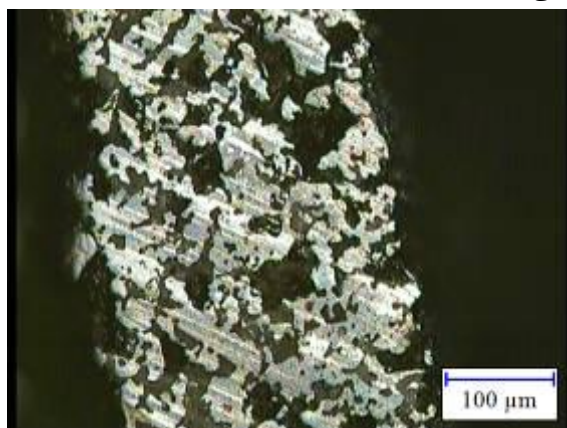
نام نمونه	میانگین ضخامت پوسته (میکرون)
A	۲۵۰
B	۳۰۰
C	۱۶۵

### جدول ۳. نتایج درصد تخلخل پوسته گوی های تولید شده.

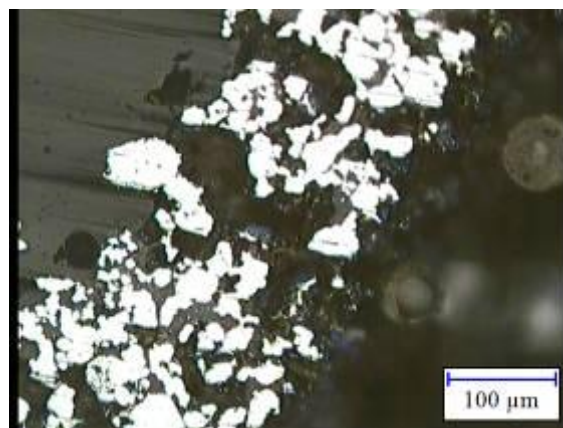
نام نمونه	کسر سطحی تخلخل (%)
A	۵۳/۱۷
B	۴۹/۸۹
C	۶۴/۴۳



شکل ۱. نمایش گوی‌های توخالی فولادی تولید شده.



ب

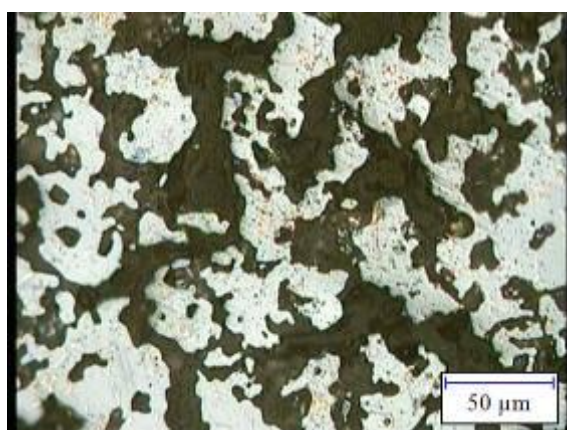


الف

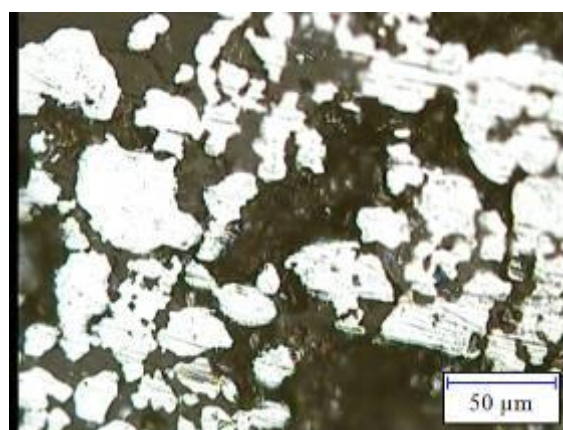


ج

شکل ۲. تصاویر متالوگرافی از بخش مقطعی پوسته گوی‌های تولید شده، الف) نمونه A، ب) نمونه B و ج) نمونه C.

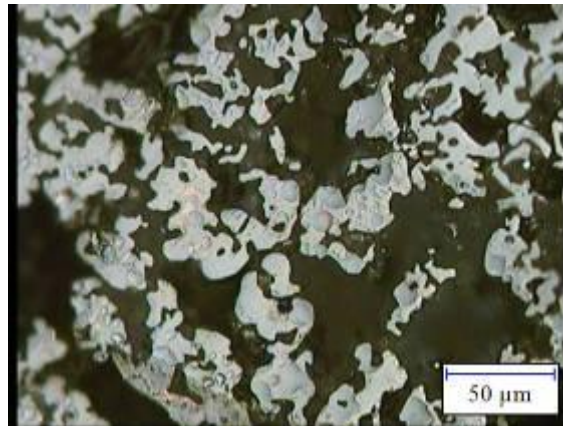


ب



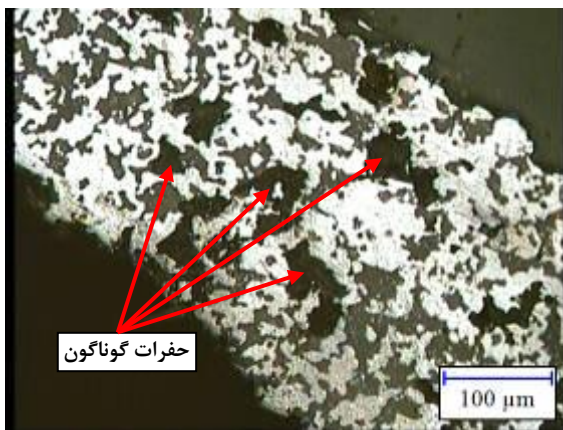
الف



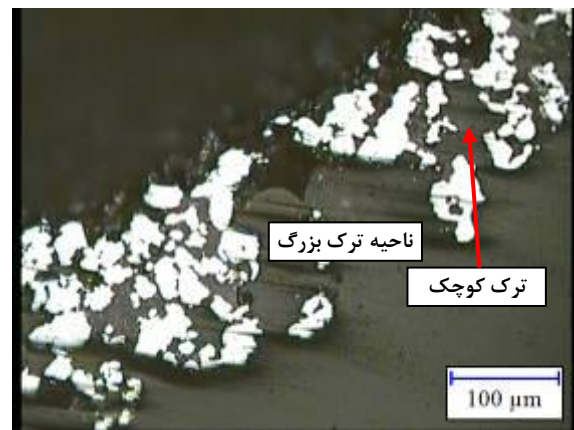


ج

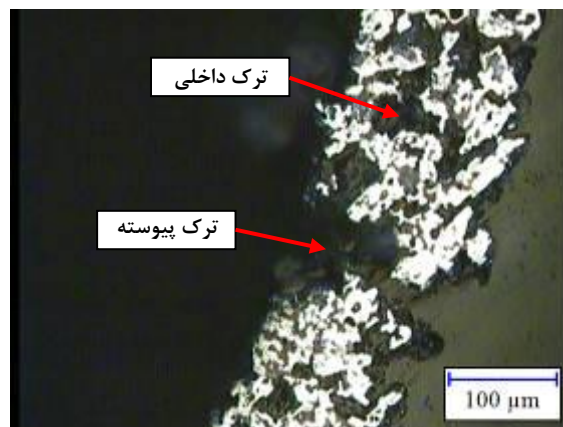
شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع پوسته گوی‌های تولید شده به منظور بررسی درصد تخلخل، الف) نمونه A، ب) نمونه B و ج) نمونه C.



ب



الف



ج

شکل ۴. نمایش ترک‌ها و حفرات ایجاد شده در پوسته گوی‌های فولادی، الف) نمونه A، ب) نمونه B و ج) نمونه C.