



کنگره سراسری فناوری های نوین ایران

# اولین کنگره سراسری فناوری های نوین ایران

## گواهی ارائه مقاله

تاریخ: ۱۳۹۳/۱۱/۲۳  
شماره: ۱۱۴۵



بدینوسیله گواهی می گردد، اصل مقاله با عنوان:

تاثیر اندازه فرات بودر آهن بر روی ضخامت و کسر سطحی تخلخل ها در گوی های توخالی فولادی

کد مقاله: SENANA101328185

ارائه شده توسط: حمید سازگاران، علیرضا گیانی رشید

مورد پذیرش کامل و تأیید هیات داوران و کمیته علمی جهت ارائه در اولین کنگره سراسری فناوری های نوین ایران قرار گرفته و بصورت شفاهی ارائه گردیده است. امید است نتایج این کنگره در بهبود هر چه بیشتر عملکرد ایشان در راستای افزایش بهره وری و تحقق توسعه پایدار در کشور مؤثر واقع شده و در ارتقاء علمی ایشان مد نظر قرار گیرد.

مهندس فرزانه بواری  
دبیر کنگره و معاون پژوهش، تحقیقات و فناوری  
مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار

دکتر مهدی رهایی  
دبیر علمی و رئیس کمیته داوران  
اولین کنگره سراسری فناوری های نوین ایران

www.senaconf.ir



## تأثیر اندازه ذرات پودر آهن بر روی ضخامت و کسر سطحی تخلخل‌ها در گوی‌های توخالی فولادی

حمید سازگاران<sup>1\*</sup>، علیرضا کیانی رشید<sup>2</sup>

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

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

\* Hamid.Sazegaran@gmail.com

### چکیده

در این پژوهش، توسط دانه‌های پلی‌استیرین که به عنوان زیرلایه استفاده شدند و به روش متالورژی پودر، گوی‌های توخالی فولادی تولید شدند. ابتدا، دانه‌های پلی‌استیرین توسط الک دانه‌بندی شدند و سپس درون محفظه پاشش دستگاه مخصوص پوشش‌دهی قرار گرفتند. فشار هوای درون این محفظه موجب می‌شود که دانه‌ها به حالت معلق در آیند. سیلیکات سدیم به عنوان چسب و پودرهای آهن درون محفظه سوسپانسیون قرار گرفتند و دوغاب ایجاد شده توسط سیستم پاشش بر روی دانه‌های پلی‌استیرین پاشیده شد. در نتیجه، یک لایه نازک از مخلوط چسب و پودرهای آهن بر روی دانه‌های پلی‌استیرین قرار می‌گیرد. سپس دو فرآیند حرارتی شامل تجزیه دانه‌های پلی‌استیرین و تفجوشی پودرها انجام شد. تجزیه حرارتی دانه‌های پلی‌استیرین درون یک آون در دمای  $90^{\circ}\text{C}$  به مدت 1 ساعت و فرآیند تفجوشی درون یک کوره مخصوص عملیات حرارتی در دمای  $1120^{\circ}\text{C}$  به مدت 4 ساعت انجام شد. پودرهای آهن در این پژوهش دارای میانگین اندازه کوچک‌تر از 10 میکرون و بین 45 تا 100 میکرون 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. میانگین اندازه ذرات پودرهای آهن تأثیر زیادی بر روی ضخامت، کسر سطحی تخلخل، ترک‌ها و حفرات پوسته دارد.

کلمات کلیدی: گوی‌های توخالی فولادی، اندازه ذرات پودرهای آهن، متالورژی پودر، کسر سطحی تخلخل، تفجوشی حالت مایع.

### 1 - مقدمه

در سال‌های اخیر، فوم‌های فلزی و ساختارهای سلولی به عنوان مواد مهندسی جدید مطرح شده‌اند و بررسی‌های فراوانی بر روی تولید و توسعه آن‌ها صورت گرفته است. این مواد ویژگی‌های جالب توجهی همانند سبک بودن، خواص فیزیکی، مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی منحصر به فرد دارند و بنابراین، در بسیاری از کاربردهای صنعتی می‌توانند به صورت موفقیت‌آمیز به کار گرفته شوند [1]. مورفولوژی سلول‌ها در این مواد شامل سلول‌های باز، بسته و مخلوطی از آن‌ها می‌باشد که تأثیر زیادی بر روی ویژگی‌های محصول نهایی دارد. در اغلب فرآیندهای تولید که شامل 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 [3-1]، امکان ایجاد سلول‌هایی با مورفولوژی یکسان و اندازه کاملاً مشخص وجود ندارد [4 و 5]. وجود غیریکنواختی در مورفولوژی سلول‌ها موجب می‌گردد که ویژگی‌های محصول نهایی به صورت کاملاً یکنواخت

نباشد [6 و 2]. استفاده از گوی‌های توخالی فلزی به ویژه گوی‌های توخالی فولادی به عنوان سلول‌ها می‌تواند مشکلات ایجاد شده در اثر عدم یکنواختی مورفولوژی سلول‌ها را برطرف سازد [7-9].

روش‌های گوناگونی به منظور ساخت و تولید گوی‌های توخالی فلزی توسعه پیدا کرده است [3، 2 و 10-12]. در یک روش جالب توجه که توسط موسسه فرانوفر 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 تجزیه حرارتی برای خارج شدن چسب و همچنین تفجوشی صورت می‌گیرد [13-15]. در تحقیقات دیگری نیز از همین روش به منظور تولید گوی‌های توخالی فولادی استفاده شده است [16 و 17].

در این روش از فشردن استفاده نمی‌شود و بنابراین، میزان تخلخل‌ها درون پوسته زیاد می‌باشد و در نتیجه، مدول الاستیک دیواره‌ها کم می‌باشد [18-22]. بنابراین، ساختارهای متشکل از گوی‌های توخالی نیز رفتار الاستیک جالب توجهی از خود نشان نمی‌دهند. به منظور بهبود رفتار مکانیکی ساختارهای متشکل از گوی‌های توخالی، علاوه بر انتخاب ماده اصلی و افزودنی‌های مناسب، نیاز به استفاده از عملیات حرارتی مناسب برای دستیابی به کمترین درصد تخلخل در دیواره‌ها وجود دارد [16]. این روش به منظور تولید گوی‌های توخالی و فوم آلیاژهای تیتانیوم نیز به کار برده شده است [23].

استفاده از گوی‌های توخالی فولادی در ساخت قطعات دارای حرکت سریع، به علت قابلیت ارتجاعی و قابلیت جذب زیاد انرژی ضربات در مقایسه با سایر آلیاژها ترجیح داده می‌شوند. بهبود 80 درصدی شرایط اقتصادی تولید در ساخت قطعات پیچیده توسط استفاده از تکنولوژی گوی‌های توخالی ممکن شده است [24]. مطالعات فراوانی بر روی روش‌های تولید گوی‌های توخالی آهنی و فولادی صورت گرفته است، اما متأسفانه در هیچ‌کدام تأثیر اندازه ذرات پودر آهن 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 انجام مطالعات میکروسکوپی بر روی دیواره‌های آن‌ها می‌باشد.

## 2- مواد و روش آزمایش

### 2-1- مواد

#### 2-1-1- دانه‌های پلی‌استیرن انبساط یافته

دانه‌های پلی‌استیرن انبساط یافته به عنوان ماده اولیه مورد استفاده در تولید گوی‌های توخالی فولادی به کار برده شدند. این دانه‌ها تهیه 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 4 mm استفاده شد.

### 2-1-2- چسب

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

### 2-1-3- پودرهای آهن

به منظور بررسی تاثیر اندازه ذرات پودرهای آهن بر روی گوی‌های توخالی فولادی از پودرهای آهن با میانگین اندازه ذرات کوچک‌تر از 10 میکرون و بین 45 تا 100 میکرون برای پوشش‌دهی دانه‌های پلی‌استیرین استفاده شد. به منظور ایجاد فاز مایع در فرآیند تف‌جوشی از پودرهای مس به عنوان افزودنی در پودرهای آهن درشت استفاده شد. در جدول 1، 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.

**جدول 1.** مشخصات پودرهای مورد استفاده و نحوه نام‌گذاری نمونه‌های تولیدی.

نام نمونه	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)	مس افزودنی	اندازه ذرات پودر (میکرون)
A	Fe-0/5C*	ندارد	<10
B	Fe-0/5C	ندارد	<100
C	Fe-0/5C-5Cu	دارد	<100

\* ذرات پودر کربن دارای اندازه بسیار ریز می‌باشند.

\*\* ذرات پودر مس دارای میانگین اندازه بین 45 تا 100 میکرون می‌باشند.

## 2-2-2 - تولید گوی‌های توخالی

### 2-2-2-1 - پوشش‌دهی دانه‌های پلی‌استیرین

در این مرحله، دانه‌های پلی‌استیرین تهیه شده با قطر 4 mm 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 [16 و 17] 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 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 1، نمونه‌ای از گوی‌های تولید شده نمایش داده شده است.



شکل 1. نمایش گوی‌های توخالی فولادی تولید شده.



## 2-2-2- تجزیه حرارتی دانه‌های پلی‌استیرن و تفجوشی

در مرحله قبل، پوشش ذرات پودر آهن بر روی زیرلایه‌هایی از دانه‌های پلی‌استیرن صورت گرفت. در این مرحله، با استفاده از عملیات حرارتی می‌توان زیرلایه‌های پلی‌استیرن را تجزیه و عملیات تفجوشی را انجام داد. گوی‌های تولیدی مرحله قبل درون یک آون با دمای  $100^{\circ}\text{C}$  به مدت 1 ساعت قرار می‌گیرند. این امر موجب می‌گردد که دانه‌های پلی‌استیرن به صورت تدریجی تجزیه شوند و از لایه‌لای 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 4 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.

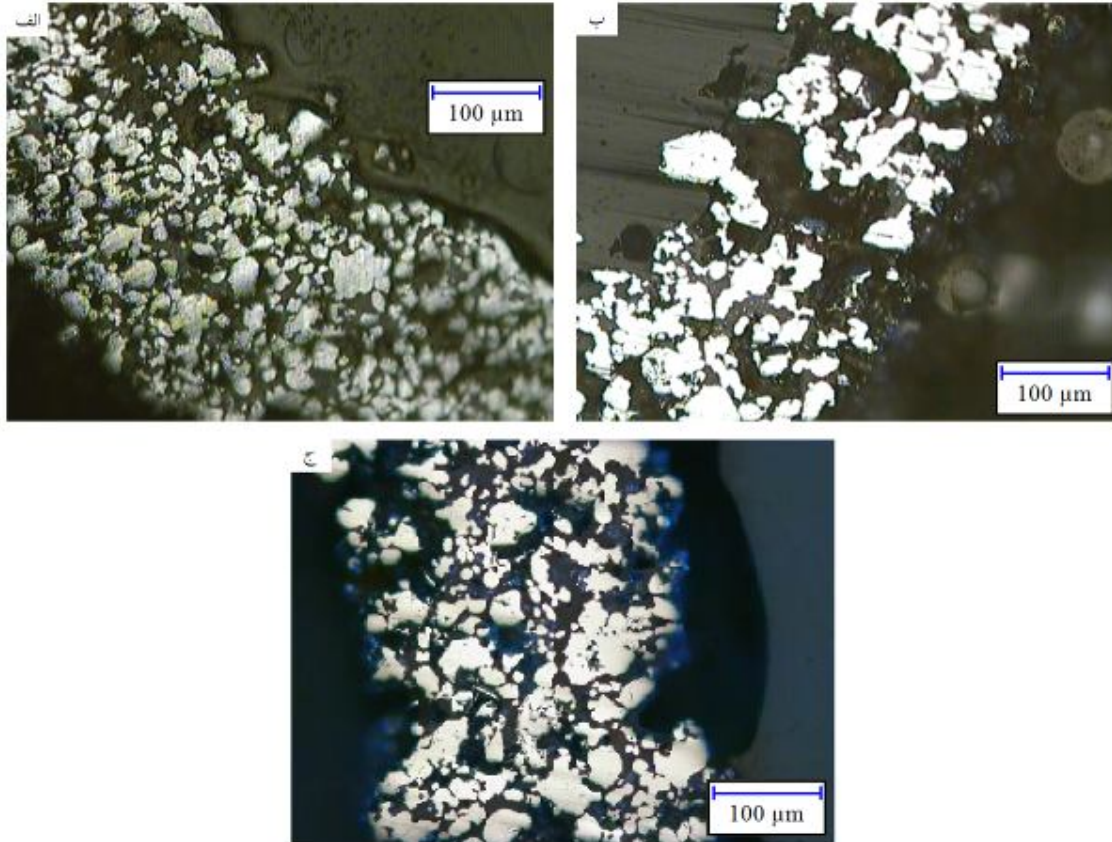
## 2-3- تعیین ضخامت، کسر سطحی تخلخل‌ها پوسته و بررسی ترک‌ها و حفرات پوسته

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 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 100 برابر و تصاویر به دست آمده در بزرگنمایی 200 برابر به ترتیب برای تعیین ضخامت پوسته و درصد تخلخل به کار گرفته شدند. قابل ذکر است که برای تعیین ضخامت پوسته و تعیین کسر سطحی تخلخل‌ها 15 اندازه‌گیری بر روی 10 تصویر متفاوت از پوسته گوی‌های تهیه شده انجام شد و نتایج براساس میانگین اعداد به دست آمده ارائه می‌گردد.

## 3- نتایج و بحث

### 3-1- 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 100 برابر به منظور تعیین ضخامت پوسته گوی‌های توخالی فولادی استفاده شدند که در شکل 2، نمونه‌ای از تصاویر مورد استفاده نمایش داده شده است. مطابق با شکل مشخص می‌شود که نمونه تولید شده توسط پودرهای کوچک (نمونه A) دارای ضخامت یکنواخت‌تر نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشند. در جدول 2، میانگین ضخامت پوسته گوی‌های توخالی فولادی ارائه شده است. نتایج بیان می‌کند که بیشترین ضخامت مربوط به نمونه A و پس از آن به ترتیب مربوط به نمونه‌های C و B می‌باشد.



شکل 2. تصاویر متالوگرافی از بخش مقطعی پوسته گوی‌های تولید شده، الف) نمونه A، ب) نمونه B و ج) نمونه C.

جدول 2. نتایج تعیین ضخامت پوسته گوی‌های تولید شده.

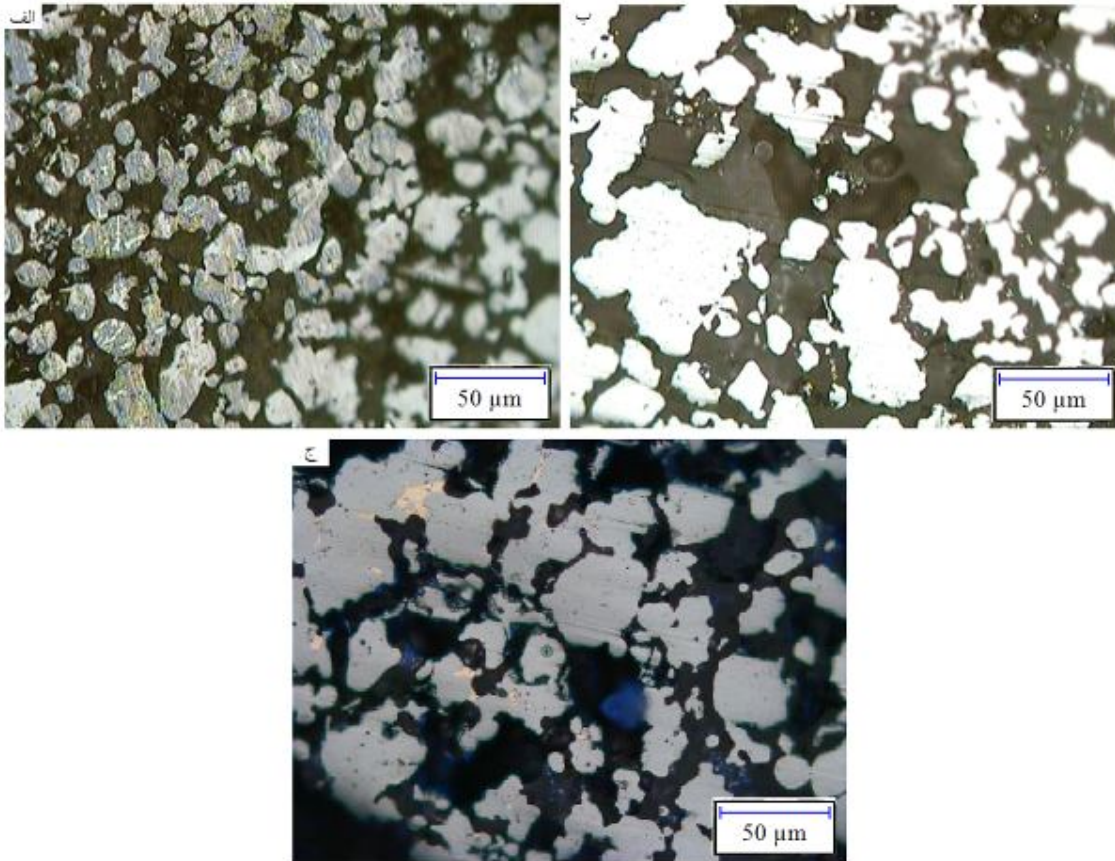
نمونه	میانگین ضخامت پوسته (میکرون)
A	240
B	195
C	260

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 اندازه ذرات پودرهای آهن و همچنین عملیات تفجوشی قرار گرفته است. علاوه بر این، به علت این که فرآیند تفجوشی در نمونه ساخته شده از پودرهای آهن کوچک (نمونه A) و نمونه ساخته شده توسط پودرهای آهن درشت به همراه 5 درصد مس (نمونه C) بهتر انجام شده است، ایجاد یکنواختی بیشتر در ضخامت پوسته‌ها و همچنین افزایش ضخامت پوسته قابل انتظار می‌باشد.

### 3-2- کسر سطحی تخلخل‌ها

تصاویر تهیه شده در بزرگنمایی 200 برابر از مقطع پوسته گوی‌های تولید شده در شکل 3 نمایش داده شده است. اندازه‌گیری کسر سطحی تخلخل‌ها در نمونه‌های تولید شده توسط پردازش تصاویر تهیه شده با استفاده از نرم‌افزار MIP

انجام شد و جدول 3 نتایج به دست آمده را نشان می دهد. نتایج بیان می کند که کمترین میزان کسر سطحی تخلخل به نمونه A و بیشترین مقدار آن به نمونه B ارتباط دارد. پایین بودن کسر سطحی تخلخل در نمونه A به تفجوشی مناسب در این نمونه به علت ریز بودن اندازه ذرات پودرهای آهن ارتباط پیدا می کند. نمونه C توسط پودرهای آهن حاوی پودرهای مس افزودنی (5 درصد وزنی) تولید شده است که این امر موجب بهبود فرآیند تفجوشی و همچنین انجام تفجوشی حالت مایع می گردد. در نتیجه، کاهش در کسر سطحی تخلخلها در مقایسه با نمونه B را سبب می شود. پس از نمونه A، کمترین میزان کسر سطحی تخلخلها مربوط به نمونه C می باشد.



شکل 3. تصاویر میکروسکوپ نوری از مقطع پوسته گوی های تولید شده به منظور بررسی درصد تخلخل، الف) نمونه A، ب) نمونه B و ج) نمونه C.

جدول 3. نتایج کسر سطحی تخلخلها در پوسته گوی های تولید شده.

نمونه	کسر سطحی تخلخلها (%)
A	49/16
B	61/59
C	55/26

### 3-3 - ترک‌ها و حفرات

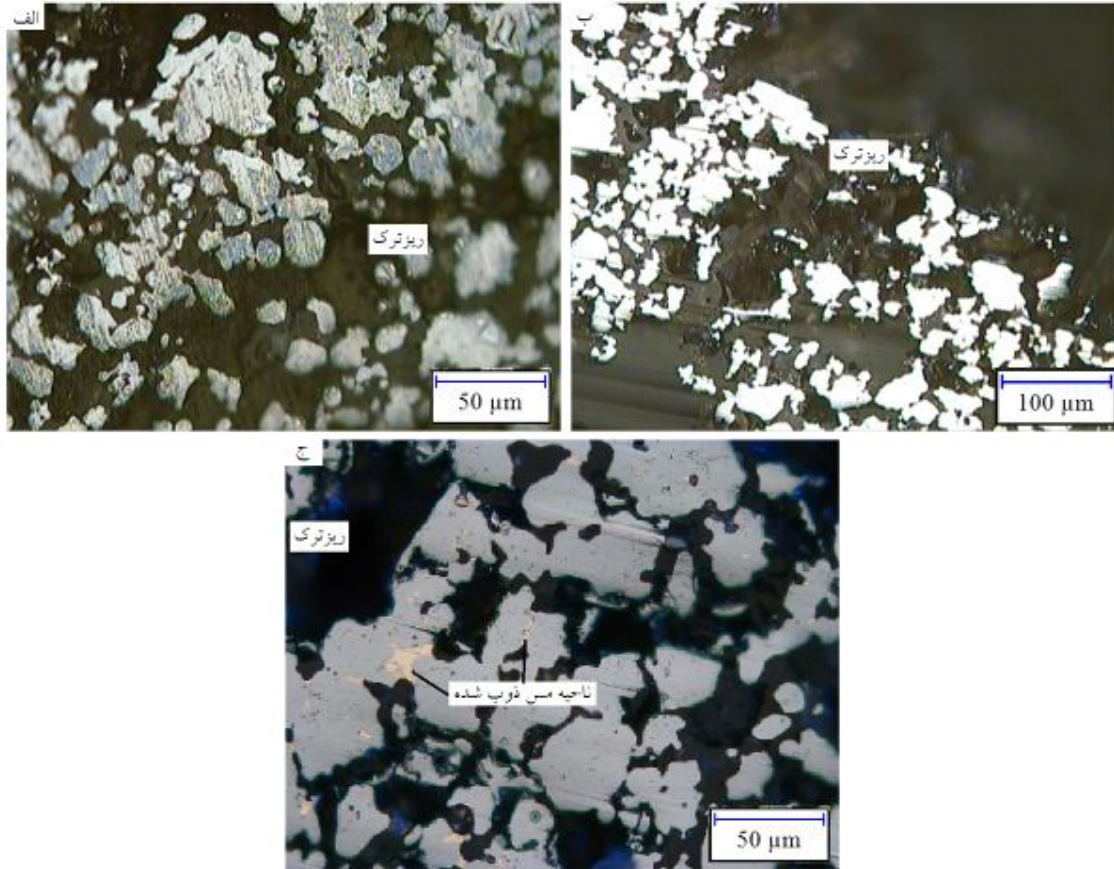
حضور ترک‌ها و حفرات در پوسته گوی‌های توخالی به عدم استفاده از فشردن در فرآیند متالورژی پودر به کار گرفته شده ارتباط پیدا می‌کند. ترک‌ها و حفرات ایجاد شده در پوسته گوی‌های توخالی فولادی توسط بازرسی چشمی ارزیابی شد. در جدول 4 نتایج به دست آمده از بازرسی چشمی 100 نمونه ارائه شده است. میزان ترک‌ها و حفرات در نمونه A کمترین مقدار و در نمونه B بیشترین مقدار می‌باشد. درشت بودن ذرات در نمونه B موجب شده است که اتصال پودرها در فرآیند تفجوشی به خوبی صورت نگیرد و در نتیجه میزان ترک‌ها و حفرات ایجاد شده در پوسته زیاد باشد. در نمونه C، وجود پودرهای مس موجب تفجوشی بهتر شده است و در نتیجه میزان ترک‌ها و حفرات در مقایسه با نمونه B کمتر می‌باشد. در نمونه A استفاده از پودرهای ریز آهن موجب تفجوشی بهتر و در نتیجه کاهش ترک‌ها و حفرات می‌گردد.

جدول 4. میزان ترک‌ها و حفرات ایجاد شده در پوسته گوی‌های تولید شده.

نمونه	تعداد ترک‌ها و حفرات
A	2
B	18
C	7

با استفاده از تصاویر متالوگرافی نیز ایجاد ریزترک‌ها در پوسته گوی‌های توخالی فولادی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل 4، ریزترک‌های ایجاد شده در نمونه‌های تولیدی نمایش داده شده است. در نمونه C حضور مس و انجام تفجوشی حالت مایع موجب می‌گردد که ترک‌ها و حفرات بزرگ به مقدار بسیار کم مشاهده شوند. در نمونه A نیز استفاده از پودرهای ریز موجب بهبود فرآیند تفجوشی و کاهش ریزترک‌ها می‌شود. در نمونه B بیشترین مقدار ریزترک‌ها در پوسته گوی‌های تولیدی مشاهده می‌گردد. قابل ذکر است که اغلب ریزترک‌های ایجاد شده در امتداد شعاع گوی‌های تولیدی ایجاد شده‌اند.





شکل 4. نمایش ترکها و حفرات ایجاد شده در پوسته گوی های فولادی، الف) نمونه A، ب) نمونه B و ج) نمونه C.

#### 4 - نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، گوی های توخالی فولادی با استفاده از یک روش متالورژی پودر تولید شدند و نتایج به دست آمده در زیر فهرست شده اند.

- ✓ استفاده از این روش می تواند به صورت موفقیت آمیز به منظور تولید گوی های توخالی فولادی به کار گرفته شود.
- ✓ در این روش، قابلیت تغییر در قطر، ضخامت پوسته و حتی شکل هندسی گوی های توخالی فولادی وجود دارد.
- ✓ اندازه ذرات پودرهای آهن یکی از عوامل موثر بر خصوصیات گوی های توخالی محسوب می شود.
- ✓ گوی های توخالی تولید شده توسط پودرهای آهن با اندازه ریز بهترین خصوصیات را از خود نشان می دهند.
- ✓ افزودن مس به پودرهای آهن درشت موجب بهبود فرآیند تف جوشی و ایجاد خصوصیات بهتر می گردد.

#### 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] Venda. 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.