

Research Paper

Investigation on Microstructural and Compression Properties of Fe-0.5wt. %C-2wt. %Cu Foams Manufactured Through Powder Metallurgy

Hamid Sazegaran¹, *Masoud Pour², Milad Hojati³

1- Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

3- Production Management of Mashhad Powder Metallurgy Company, Mashhad, Iran.

Citation: Sazegaran H, Pour M, Hojati M. Investigation on Microstructural and Compression Properties of Fe-0.5wt. %C-2wt. %Cu Foams Manufactured Through Powder Metallurgy. Metallurgical Engineering 2016; 19(3) 206-215 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.45414.1079>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.45414.1079>

ABSTRACT

In this study, the spherical urea granulates as space holder were used to manufacturing the steel foams by powder metallurgy technique. In this process, the urea granulates were coated by a mixture of iron, copper, and carbon powders. After compacting the coated granulates up to 200 MPa through a hydraulic press in a metallic mold, the sintering process was carried out at 1120 °C in an especial powder metallurgy furnace. The performed studies on the manufactured specimens were included the measurement of the porosity fraction, microstructural evaluations by optical and scanning electron microscopies, and investigation of compression properties. The mean of the porosity fraction of manufactured specimens was measured 74.5 percent. The optical microscopic evaluations shown that the cells are exactly manufactured according to granulates geometry. In addition, no fracture was observed in the cell walls and in the urea granulates in compacting process. The SEM images shown that the all of cells walls connected to each other and sets of open and close cells were produced. In the compression stress vs. strain curves of manufactured steel foams, along plateau region was observed. The average of stress in the plateau region, maximum compression stress, and absorbed energy were 15 MPa, 25 MPa, and 14 Nm, respectively.

Keywords: Steel foam, urea granules, Porosity fraction, Microstructure, Compression behavior.

■ ■

* *Corresponding Author:*

Masoud Pour, PhD

Address: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

Tel: (+98)9151019957

E-mail: m.pour@qiet.ac.ir

ارزیابی ریزساختار و رفتار فشاری فوم‌های Fe-1.5wt.%C-2wt. %Cu تولید شده به روش متالورژی پودر

حمید سازگارگان^{۱*}، مسعود پور^۲، میلاد حجتی^۳

- ۱- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه «صنعتی» قوچان، قوچان، ایران.
 ۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه «صنعتی» قوچان، قوچان، ایران.
 ۳- کارشناسی ارشد، مدیر تولید، شرکت متالورژی پودر مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

در این پژوهش، گرانوله‌های اوره کرومی شکل به عنوان پُرکننده فضا در تولید فوم‌های فولادی به روشی مبتنی بر متالورژی پودر به کار گرفته شد. در این روش، گرانوله‌های اوره توسط مخلوطی از پودرهای آهن، کربن و مس پوشش‌دهی شدند. پس از فشردن گرانوله‌های پوشش‌دهی شده توسط یک پرس هیدرولیک درون یک قالب فلزی و با فشار ۲۰۰ MPa، تف‌جوشی درون یک کوره مخصوص متالورژی پودر در دمای ۱۱۲۰ °C صورت گرفت. مطالعات انجام شده بر روی نمونه‌های تولیدی شامل اندازه‌گیری درصد تخلخل، ارزیابی ریزساختار توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی و تعیین رفتار فشاری است. میانگین میزان تخلخل نمونه‌های تولیدی برابر ۷۴/۵ درصد اندازه‌گیری شد. مطالعات میکروسکوپ نورینشان داد که سلول‌ها دقیقاً منطبق با هندسه گرانوله‌های اوره تولید شده‌اند. علاوه بر این، هیچ‌گونه شکستی در دیواره سلول‌ها و در گرانوله‌ها در اثر فشردن مشاهده نشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که اغلب سلول‌ها به یکدیگر اتصال یافته‌اند و مجموعه‌ای از سلول‌های باز و بسته ایجاد شده است. در منحنی‌های تنش-کرنش فشاری فوم‌های تولیدی، یک ناحیه پلاتو طولانی به صورت دندان‌دار مشاهده می‌شود. میانگین تنش در ناحیه پلاتو برابر ۱۵ MPa، میانگین بیشترین مقدار تنش فشاری برابر ۲۵ MPa و میانگین انرژی جذب شده برابر ۱۴ Nm اندازه‌گیری شد.

واژه‌های کلیدی: فوم فولادی، گرانوله‌های اوره، درصد تخلخل، ریزساختار، رفتار فشاری.

۱. مقدمه

این دسته از مواد شامل تولید از مذاب فلز، تولید به روش متالورژی پودر، تولید از یون‌های فلزی و تولید به روش رسوب بخار است [۱ و ۲ و ۹]. استفاده از متالورژی پودر به منظور تولید فوم‌های فولادی نسبت به سایر روش‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است و علت آن به بالا بودن نقطه ذوب آهن و آلیاژهای آهنی ارتباط پیدا می‌کند [۸ و ۹].

در روشی که تحت عنوان روش تف‌جوشی و انحلال (SDP¹) شهرت دارد، می‌توان فوم‌های سلول باز با قیمت نهایی پایین تولید کرد. در این روش، از پُرکننده‌های فضا درون مخلوط پودرهای فلزی استفاده می‌شود و پس از فشردن مخلوط، فرآیند تف‌جوشی انجام می‌شود. در پایان، پُرکننده‌های فضا توسط فرآیند انحلال درون یک حلال حذف می‌شوند. در این فرآیند، با کنترل اندازه، شکل و توزیع پُرکننده‌ها می‌توان شکل، اندازه، توزیع و مورفولوژی سلول‌ها را بهبود بخشید که در نتیجه، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فوم تولیدی افزایش

فوم‌های فلزی و ساختارهای متخلخل فلزی دسته‌ای جدید از مواد مهندسی هستند که به دلیل ویژگی‌های جالب توجه همانند چگالی پایین، استحکام و سفتی ویژه بالا، میزان جذب انرژی ضربه‌عالی، قابلیت میرایی ارتعاشات مکانیکی بالا، رفتار صوتی و حرارتی منحصر به فرد می‌توانند در بسیاری از کاربردهای صنعتی به صورت موفقیت‌آمیز به کار برده شوند [۱-۳]. این مواد می‌توانند هم در کاربردهای ساختاری و هم در کاربردهای غیرساختاری به کار گرفته شوند. برخی از کاربردهای فوم‌های فلزی و ساختارهای متخلخل فلزی شامل پانل‌های سبک، ضربه‌گیرها، سپرها، کنترل‌کننده‌های نویزها، صداخفه‌کن‌ها، فیلترها، مبدل‌های حرارتی، سقف‌های ضدحریق و عایق‌های حرارتی و صوتی است [۴-۷].

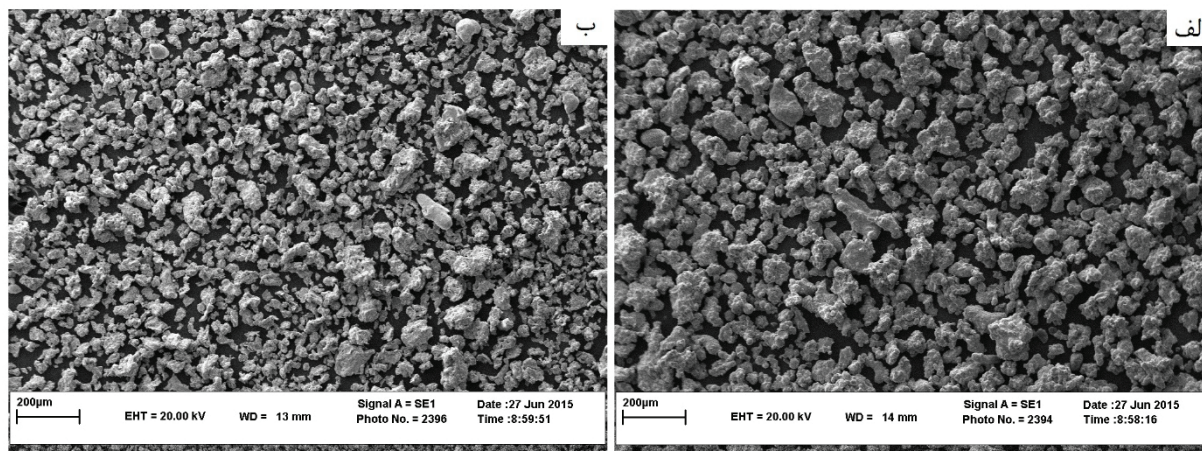
فوم‌های فلزی و ساختارهای متخلخل فلزی را می‌توان به روش‌های گوناگونی تولید کرد. روش‌های تولید مرسوم

1. Sintering and dissolution process

* نویسنده مسئول:
 دکتر مسعود پور

نشانی: قوچان، دانشگاه صنعتی قوچان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک.
 تلفن: ۰۹۱۵۱۰۱۹۹۵۷

پست الکترونیکی: m.pour@qiet.ac.ir



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از: الف) پودر آهن و ب) پودر مس.

جدول ۱. توزیع ذرات پودر آهن

اندازه ذرات (μm)	۲۰۰-۱۶۰	۱۶۰-۱۰۰	۱۰۰-۶۳	کوچک‌تر از ۶۳
مقدار (%)	۳	۳۰	۳۱	۳۶

۲. مواد و روش انجام آزمایشات

تولید فوم‌های فولادی

در این پژوهش، فرآیند متالورژی پودر مبتنی بر استفاده از پُرکننده‌های فضا که قابل انحلال در آب هستند، به منظور تولید فوم‌های فولادی به کار برده شد. این فرآیند دارای چهار مرحله اصلی است. این مراحل شامل (۱) مرحله مخلوط کردن پودرها و پوشش‌دهی پُرکننده‌ها، (۲) مرحله فشردن پُرکننده‌های پوشش‌دهی شده، (۳) مرحله انحلال پُرکننده‌ها توسط آب و خروج آن‌ها و (۴) مرحله تفجوشی یا زینترینگ در دما و زمان مناسب است. در اولین مرحله، پودرهای آهن، کربن و مس مخلوط شدند. بدین منظور از یک مخلوط‌کن مخصوص متالورژی پودر با سرعت چرخش ۲۰۰ rpm و زمان مخلوط کردن ۳۰ دقیقه استفاده شد. در مخلوط پودری تهیه شده، مقدار کربن برابر ۱/۵ درصد وزنی و مقدار مس برابر ۲ درصد وزنی تعیین شد. همه پودرهای مورد استفاده به صورت تجاری و از شرکت متالورژی پودر مشهد تهیه شدند. توزیع ذرات در پودر آهن در جدول ۱ ارائه شده است. علاوه بر این، توزیع ذرات پودر مس بین ۴۵ تا ۱۰۰ میکرون و پودرهای کربن از نوع UF با توزیع ذرات بسیار ریز قابل گزارش است. در شکل ۱، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودرهای آهن و مس نمایش داده شده است.

پس از مخلوط کردن پودرها، فرآیند پوشش‌دهی آن‌ها بر روی گرانوله‌های اوره صورت گرفت. میانگین قطر گرانوله‌های اوره مورد استفاده ۱/۵ mm و شکل کروی داشتند. قابل ذکر است که این گرانوله‌ها از شرکت مرک آلمان تهیه شده‌اند. به

می‌یابد [۹-۱۴]. در تولید فوم‌های آلومینیومی استفاده از ذرات نمک طعام بسیار مرسوم است [۱۳ و ۱۵]. از کرب آمید و بی‌کربنات آمونیوم نیز به عنوان پُرکننده فضا به منظور تولید فوم‌های آلومینیومی به این روش استفاده شده است [۱۵-۱۸]. در روشی مشابه، ابتدا فرآیند انحلال پُرکننده‌ها و سپس، فرآیند تفجوشی صورت می‌گیرد. این روش تحت عنوان روش انحلال و تفجوشی (SPD²) شهرت دارد. در تولید فوم‌های فولادی به علت بالا بودن دمای تفجوشی، روش انحلال و تفجوشی نسبت به روش تفجوشی و انحلال کارآمدتر است. کرب آمید و کربنات هیدروژن آمونیوم به عنوان پُرکننده‌های مرسوم در این روش به کار برده می‌شوند [۱۹]. فوم‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L [۲۰ و ۲۱] و فوم‌های فولاد زنگ نزن PH ۴-۱۷ [۲۲-۲۴] به صورت موفقیت‌آمیز به این روش تولید شده‌اند. قابل ذکر است که مطالعات فراوانی بر روی تولید فوم‌های فولاد پُر آلیاژ صورت گرفته است، اما مطالعات انجام شده در زمینه فوم‌های فولاد کم آلیاژ بسیار محدود است [۱۹-۲۴]. در این پژوهش، فوم‌های فولادی به روش متالورژی پودر تولید شدند. بدین منظور، گرانوله‌های اوره کروی شکل توسط مخلوط پودرهای آهن، کربن و مس پوشش داده شدند و پس از فشردن، گرانوله‌های اوره توسط انحلال در آب خارج شدند. در نهایت، استفاده از تفجوشی موجب تولید فوم‌های فولادی مستحکم شد. مطالعات صورت گرفته بر روی فوم‌های تولیدی شامل اندازه‌گیری درصد تخلخل، ارزیابی‌های ریزساختاری و تعیین ویژگی‌های فشاری است.

2. Dissolution and sintering process

مقداری نیتروژن به آن افزوده می‌شود تا ترکیب شیمیایی آن تقریباً شامل ۱۰ تا ۲۰ درصد حجمی هیدروژن و ۸۰ تا ۹۰ درصد حجمی نیتروژن باشد. پس از خروج نمونه‌ها از کوره تفجوشی، فوم‌های فولادی تولید شدند.

تعیین درصد تخلخل

به منظور تعیین میزان چگالی و درصد تخلخل، فوم‌های تولیدی توزین شدند و سپس، حجم آن‌ها براساس اندازه‌گیری‌های ابعادی مشخص گردید. در نهایت، میزان چگالی و درصد تخلخل هر کدام از فوم‌ها تعیین گردید. چگالی فوم‌های فولادی تولید شده براساس معادله (۱) اندازه‌گیری شد و درصد تخلخل آن‌ها توسط معادله (۲) محاسبه گردید [۲۶]. قابل ذکر است که چگالی جامد همان چگالی فولاد بدون تخلخل است برابر $7/8 \text{ g/cm}^3$ در نظر گرفته شد.

معادله ۱.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

معادله ۲.

$$\rho\% = \left[1 - \left(\frac{\rho_F}{\rho_S} \right) \right] \times 100$$

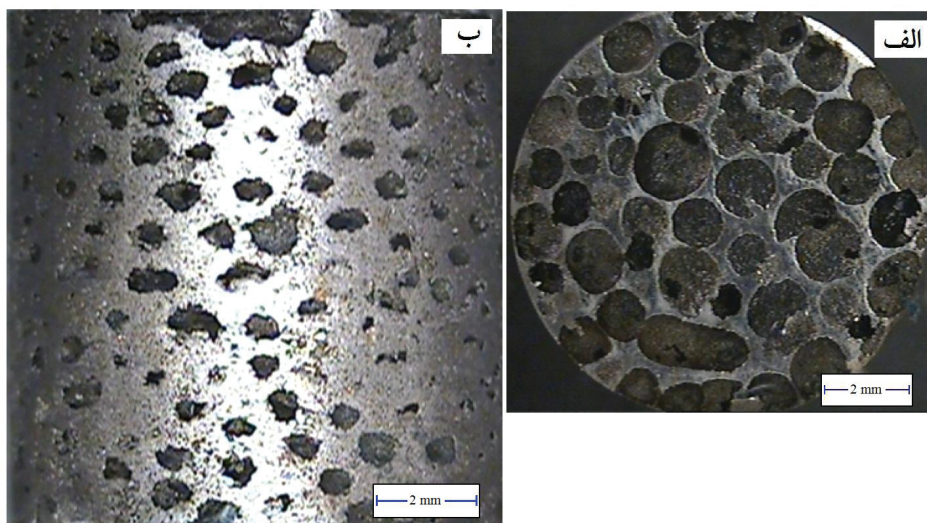
در معادلات فوق، ρ چگالی، m جرم، V حجم، $\rho\%$ درصد تخلخل، ρ_F چگالی قطعه فومی و ρ_S چگالی جامد یا چگالی فولاد بدون تخلخل است. باید در نظر داشت که میزان چگالی و تخلخل برای همه فوم‌های تولید شده اندازه‌گیری شد.

مطالعات میکروسکوپی

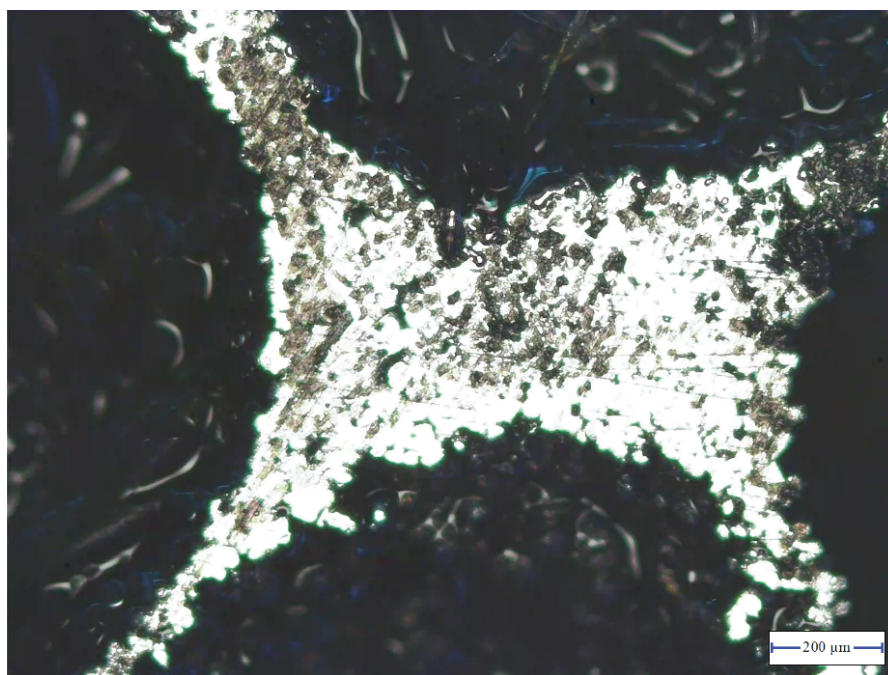
پس از تولید فوم‌های فولادی، نمونه‌های میکروسکوپی توسط وایرکات برش داده شدند. نمونه‌های تهیه شده ابتدا مانت گرم و سپس، سمباده‌زنی و پولیش کاری شدند. فرآیند اچ توسط محلول نایتال ۲ درصد انجام شد. ارزیابی‌های میکروسکوپ نوری قبل و بعد از اچ صورت گرفت و تصاویر متالوگرافی در بزرگنمایی‌های گوناگون تهیه گردید. علاوه بر این، از میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز برای انجام ارزیابی‌های ریزساختاری استفاده شد. قبل از انجام مطالعات میکروسکوپ الکترونی، پوشش آلیاژ Au-Pd بر روی نمونه‌های مانت شده توسط دستگاه پوشش‌دهی Sputter Coater SC7620 ایجاد شد. در این پژوهش، میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 1450VP مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی، اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی (EDS) به منظور شناسایی فازهای گوناگون از لحاظ ترکیب شیمیایی به کار گرفته شد.

منظور انجام فرآیند پوشش‌دهی، گرانوله‌های اوره و مخلوط پودرهای تهیه شده درون یک محفظه استوانه‌ای شکل قرار گرفتند و ۲ درصد وزنی آب به محفظه اضافه شد. قابل ذکر است که نسبت وزنی گرانوله‌های اوره و مخلوط پودرهای تهیه شده برابر انتخاب شد. استفاده از آب موجب می‌گردد که سطوح گرانوله‌های اوره حالت چسبنده به خود بگیرد و در نتیجه، ذرات پودری به سطوح آن‌ها بچسبند. سپس، چرخش محفظه با سرعت 150 rpm و به مدت ۳ دقیقه صورت گرفت. در چنین شرایطی، ذرات پودر به سطوح گرانوله‌های اوره می‌چسبند. قابل ذکر است که در زمان پوشش‌دهی کمتر و یا مقدار آب کمتر، چسبیدن ذرات پودر به سطوح گرانوله‌های اوره به خوبی صورت نمی‌گیرد. از طرف دیگر اگر زمان پوشش‌دهی بیش از حد باشد، ذرات از سطوح گرانوله‌ها جدا خواهند شد. پس از انجام پوشش‌دهی، فرآیند فشردن صورت گرفت. به منظور فشردن از یک قالب فلزی استوانه‌ای با ارتفاع 200 mm و قطر داخلی 10 mm و یک پرس هیدرولیک استفاده شد. گرانوله‌های پوشش یافته درون قالب قرار داده شدند و سپس، فشردن توسط پرس صورت گرفت. قابل ذکر است که بر اساس پژوهش بکوز و همکارانش [۲۵] میزان فشار اعمالی برابر 200 MPa انتخاب شد. در چنین شرایطی، گرانوله‌های پوشش‌دهی شده به یکدیگر متصل شده و یک پیش‌ماده فومی تولید می‌شود. سپس، مرحله انحلال گرانوله‌های اوره درون آب انجام می‌گیرد. در این مرحله، پیش‌ماده‌های فومی تولید شده درون یک ظرف آب مقطر در دمای 30°C و به مدت ۱ دقیقه قرار گرفت و سپس، درون هوا به مدت ۴ ساعت خشک شد. این فرآیند ۵ مرتبه و به صورت متوالی انجام گردید و در نتیجه، گرانوله‌های اوره به صورت کامل خارج شدند. باید در نظر داشت که اگر مقدار زیادی از گرانوله‌ها درون پیش‌ماده باقی بماند، در مرحله تفجوشی موجب تخریب فوم می‌شود و این در حالی است که اگر مقدار گرانوله‌های باقیمانده کم باشد، در مرحله تفجوشی به صورت حرارتی تجزیه خواهند شد و خارج می‌گردند.

سپس، انجام فرآیند تفجوشی موجب تشکیل اتصالات متالورژیکی در بین ذرات پودر و تولید فوم فولادی می‌گردد. فرآیند تفجوشی درون یک کوره صنعتی متالورژی پودر (در شرکت متالورژی پودر مشهد) انجام شد. این کوره دارای سه منطقه دمایی است که در منطقه اول، دما به تدریج تا 600°C افزایش می‌یابد. این منطقه ۳۰ درصد زمان انجام فرآیند (حدود ۷۰ دقیقه) را به خود اختصاص می‌دهد. در منطقه دوم که منطقه تفجوشی است، دما به 1120°C افزایش می‌یابد و نمونه‌ها در مدت ۵۰ دقیقه (تقریباً در حدود ۲۰ درصد زمان انجام فرآیند) تحت چنین دمایی قرار می‌گیرند. در منطقه سوم، سرد شدن تدریجی صورت می‌گیرد که ۵۰ درصد زمان انجام فرآیند (۱۲۰ دقیقه) را به خود اختصاص می‌دهد. اتمسفر کوره حاوی آمونیاک شکسته است که



شکل ۲. نمونه‌ای از فوم‌های فولادی تولید شده؛ الف) نمای بالایی و ب) نمای جانبی.



شکل ۳. تصویر میکروسکوپ نوری از محل اتصال دیواره‌های چهار سلول به یکدیگر.

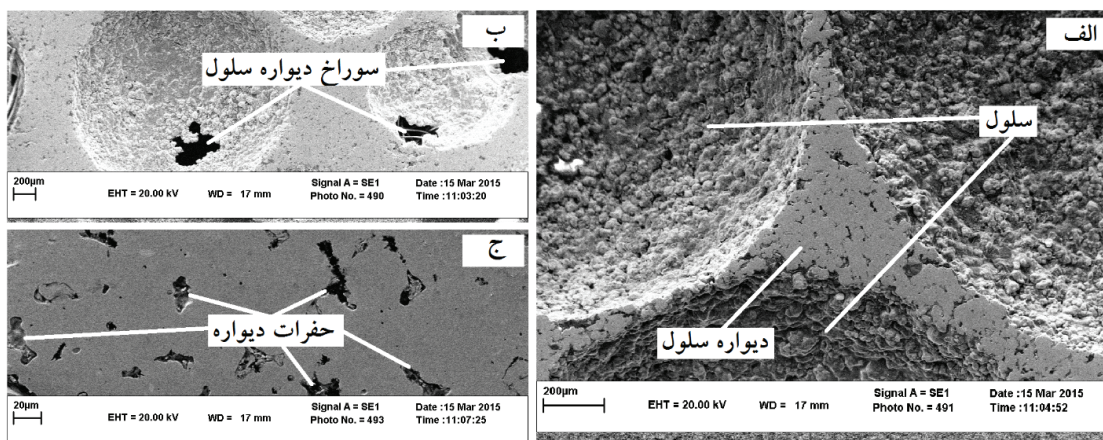
در نظر داشت که سرعت حرکت فک‌ها در این آزمون برابر ۲ mm/min در نظر گرفته شد.

۳. نتایج و بحث

در شکل ۲، نمونه‌ای از فوم‌های فولادی تولیدی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، یک ساختار کاملاً سلولی تشکیل شده است و سلول‌ها در فوم تولید شده به صورت یکنواخت توزیع یافته‌اند. بنابراین، با توجه به این که توزیع گرانوله‌های اوره درون پیش‌ماده اولیه به صورت

ارزیابی رفتار فشاری

برای تعیین رفتار مکانیکی فوم‌های تولیدی از آزمون فشار استفاده شد. این آزمون توسط دستگاه Zwick مدل Z250 انجام گردید. نمونه‌های آزمون فشار از فوم‌های تفجوشی شده تهیه شد. فوم‌های تولیدی توسط وایرکات برش داده شدند و نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ mm و ارتفاع ۱۵ mm تولید شد. در انجام آزمون فشار از روغن به عنوان روانکار در میان نمونه‌ها و فک‌های دستگاه استفاده شد. قابل ذکر است که ۱۵ نمونه فشاری از فوم‌های فولادی مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج بر اساس میانگین آن‌ها ارائه شد. باید



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط الکترون‌های ثانویه از سطح یک نمونه از فوم‌های فولادی تولید شده؛ الف) نمایش سلول‌ها و دیواره آن‌ها، ب) نمایش سوراخ‌های ایجاد شده در دیواره سلول‌ها و ج) نمایش حفرات موجود در دیواره سلول‌ها.

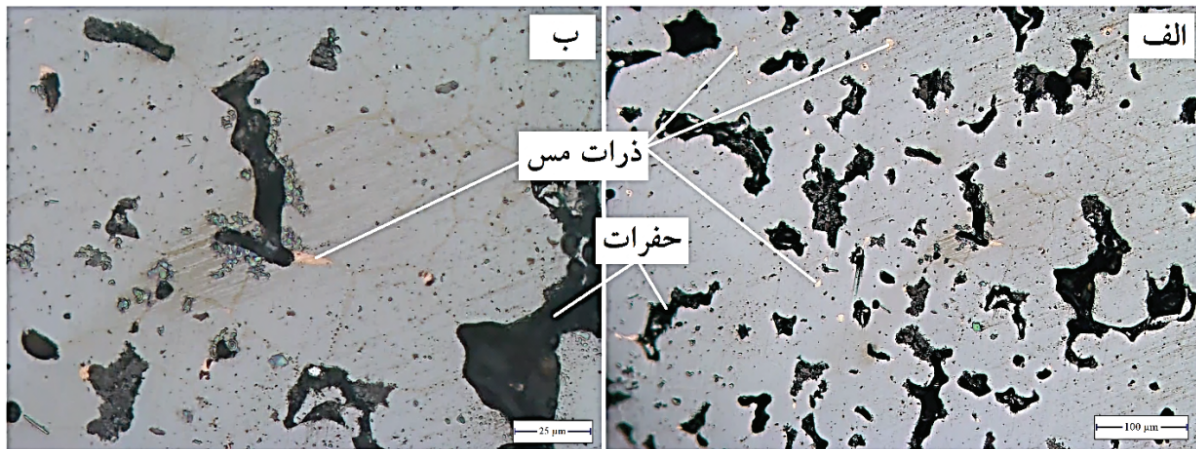
پودر تشکیل شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، توزیع هر دو نوع سلول‌ها درون فوم‌های فولادی تولید شده به صورت یکنواخت است.

در شکل ۴- الف، یک تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از محل اتصال دیواره سه سلول نمایش داده شده است. بر اساس این که عمق میدان میکروسکوپ الکترونی در مقایسه با میکروسکوپ نوری بسیار زیادتر است، در این تصویر دیواره سلول‌ها با وضوح بیشتری قابل مشاهده هستند. مطابق با شکل ۴- ب، سوراخ‌هایی در بین برخی از دیواره سلول‌ها مشاهده می‌شود. علت تشکیل این سوراخ‌ها را می‌توان به فرآیند فشردن گرانوله‌های پوشش داده شده اوره ارتباط داد. این احتمال وجود دارد که در حین فرآیند فشردن، تماس فیزیکی پیدا کنند. در نتیجه با حل شدن گرانوله‌های اوره، سوراخ‌هایی بین دیواره سلول‌ها تشکیل خواهد شد. در شکل ۴- ج، حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها نمایش داده شده است. همان طور که قبلاً بیان شد، این حفرات به کم بودن فشار اعمالی (۲۰۰ MPa) در طی فرآیند فشردن گرانوله‌های پوشش داده شده درون قالب فلزی ارتباط پیدا می‌کند. باید در نظر داشت که افزایش فشار منجر به کاهش این حفرات می‌گردد، اما امکان شکستن گرانوله‌های اوره وجود دارد [۲۵ و ۲۷].

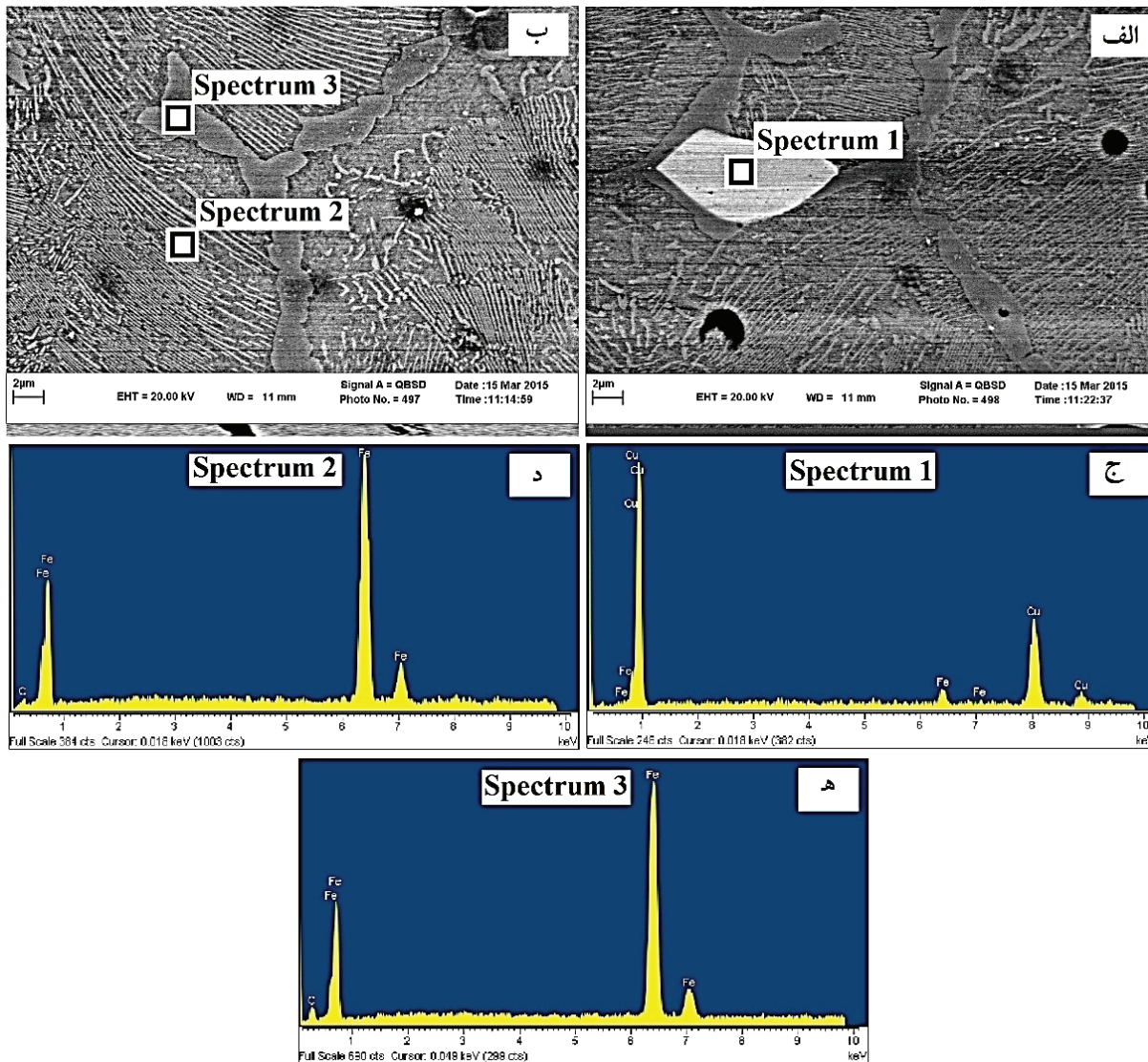
در شکل ۵، تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی‌های متفاوت از دیواره سلول‌ها در یک نمونه از فوم‌های فولادی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، دیواره سلول‌ها از سه ناحیه متفاوت تشکیل شده است. این نواحی شامل ناحیه ذرات آهن، ناحیه ذرات مس و ناحیه حفرات باقیمانده در بین ذرات آهن است. اتصال ذرات آهن به یکدیگر منجر به تشکیل دیواره سلول‌ها در فوم‌های تولیدی می‌گردد. در مخلوط پودرهای مورد استفاده برای پوشش‌دهی

یکنواخت است، پیش‌بینی می‌گردد که توزیع سلول‌ها درون فوم‌های فولادی تولید شده به صورت یکنواخت باشد. علاوه بر این، با توجه به این که نسبت گرانوله‌های اوره و مخلوط پودرهای فلزی با یکدیگر برابر هستند و همچنین میزان فشار اعمالی (۲۰۰ MPa) در مرحله فشردن زیاد نیست، این انتظار وجود دارد که درصد تخلخل در فوم‌های تولید شده زیاد باشد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که سلول‌ها هم از نوع باز و هم از نوع بسته در ساختار فوم‌های فولادی تولیدی ایجاد شده‌اند. میزان تخلخل یکی از کمیت‌های مهم در ساختارهای متخلخل و فوم‌های فلزی محسوب می‌شود که بر ویژگی‌های مکانیکی محصول تولیدی تاثیر شدیدی دارد [۱ و ۲]. بنابراین، میزان تخلخل در فوم‌های فولادی تولیدی اندازه‌گیری شده است. میانگین چگالی فوم‌های تولیدی برابر $1/97 \text{ g/cm}^3$ اندازه‌گیری شد. البته، بیشترین و کمترین مقدار چگالی به ترتیب برابر $2/14$ و $1/82 \text{ g/cm}^3$ تعیین شد. در نتیجه، میانگین میزان تخلخل فوم‌های فولادی تولید شده برابر $74/5$ درصد است (بر اساس معادله (۲)). قابل ذکر است که بیشترین و کمترین مقدار تخلخل به ترتیب برابر $76/6$ و $72/7 \text{ g/cm}^3$ اندازه‌گیری شد.

یک تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۵۰ برابر از سطح فوم فولادی در شکل ۳ نمایش داده شده است. مطابق با شکل، محل اتصال بین دیواره سلول‌ها به خوبی قابل مشاهده است. علاوه بر این، دو نوع سلول در فوم‌های فولادی مشاهده می‌شود. دسته اول سلول‌ها به حل شدن گرانوله‌های اوره توسط آب ارتباط پیدا می‌کنند. شکل این سلول‌ها دقیقاً مشابه با شکل گرانوله‌های اوره به صورت کروی است و میانگین قطر آن‌ها در حدود $1/5 \text{ mm}$ است. دسته دوم از سلول‌ها به وجود حفرات در مخلوط پودرهای فلزی که دیواره سلول‌ها را می‌سازند، ارتباط می‌یابد. این حفرات در ساختار دیواره سلول‌ها قرار دارند و در طی فرآیند متالورژی



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ نوری از دیواره سلول‌ها در فوم‌های فولادی تولید شده در: الف) بزرگنمایی ۲۰۰ برابر و ب) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر.



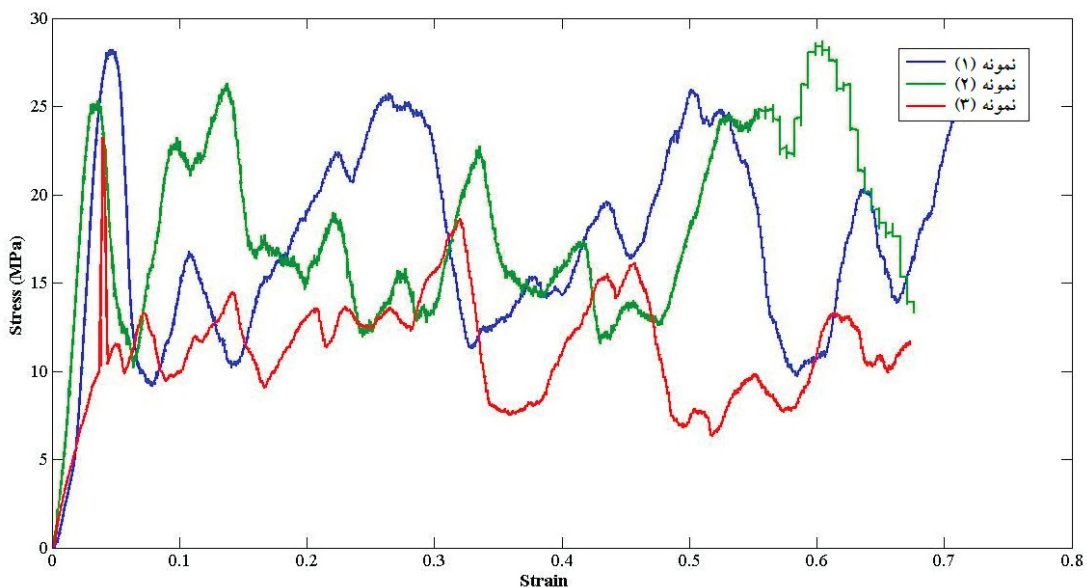
شکل ۶. الف) و ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و ج) ، د) و ه) نتایج آنالیزهای اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی.

ذرات پودرهای آهن قرار می‌گیرد و طی فرآیند سرد شدن، یک اتصال بسیار خوب در بین ذرات پودرهای آهن ایجاد می‌کند [۲۸ و ۲۹]. همان طور که مشاهده می‌شود، حفرات ایجاد شده در بین ذرات تف‌جوشی شده دارای اشکال هندسی نامنظم هستند و تشکیل آن‌ها در دیواره سلول‌ها موجب افزایش میزان تخلخل در ساختار فوم‌های فولادی تولیدی می‌شود. البته این انتظار وجود دارد که تشکیل حفرات با هندسه نامنظم در دیواره سلول‌ها موجب کاهش استحکام فوم‌های تولیدی نیز می‌گردد.

منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی به دست آمده از آزمون فشار در مورد سه نمونه که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند، در شکل ۷ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، همه منحنی‌ها مشابه با منحنی‌های تنش- کرنش فشاری مرسوم در فوم‌های فلزی هستند [۲۰ و ۲۱]. در منحنی‌های تنش- کرنش فشاری سه ناحیه متفاوت مشاهده می‌شود. ناحیه اول، ناحیه تغییرشکل کشسان یا الاستیک است. در این ناحیه مقدار تنش به صورت تدریجی افزایش می‌یابد و دیواره‌های فولادی سلول‌ها دچار تغییرشکل برگشت‌پذیر می‌شود. در این ناحیه مقدار تنش تقریباً تا حدود ۲۵ MPa افزایش می‌یابد. سپس، تنش تقریباً تا مقدار ۱۵ MPa کاهش می‌یابد که احتمالاً به تخریب و شکست

گرانوله‌های اوره، ۱/۵ درصد وزنی کربن استفاده شده است. کربن موجود در شرایط تف‌جوشی به درون ذرات پودرهای آهن نفوذ می‌کند و درون آهن با ساختار مکعبی مرکز سطحی انحلال می‌یابد. انحلال کربن در شبکه آهن موجب تغییر در نقطه لیکوتیدوس، کشش سطحی و همچنین ویسکوزیته آهن مذاب تشکیل شده در محل تماس ذرات با یکدیگر می‌شود. بنابراین، افزودن کربن به مخلوط پودری بر روی سرعت تف‌جوشی تاثیر مثبت دارد [۲۸] و در نتیجه، منجر به بهبود اتصالات بین ذرات آهن می‌شود.

در شکل ۶، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نتایج به دست آمده از آنالیزهای اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی به تصویر کشیده شده است. همان طور که در اشکال ۶- الف و ۶- ب مشاهده می‌شود، ریزساختار فوم‌های تولیدی کاملاً پرلیتی (شکل ۶- د) است و کاربیدهای آهن (شکل ۶- ه) در مرزخانه‌ها تشکیل شده‌اند. احتمالاً تشکیل کاربیدهای مرزخانه‌ای منجر به کاهش رفتار مکانیکی فوم‌های تولیدی خواهد شد. علاوه بر این، ذرات مس (شکل ۶- ج) در قسمت‌هایی از ریزساختار فوم‌های تولیدی پراکنده شده‌اند. می‌دانیم که ذرات مس افزوده شده به مخلوط پودری در دمای تف‌جوشی (۱۱۲۰ °C) ذوب می‌شود. در نتیجه، مذاب تولید شده به صورت یک باریکه نازک در بین



شکل ۷. منحنی‌های تنش- کرنش فشاری سه نمونه از فوم‌های فولادی تولید شده.

جدول ۲. نتایج به دست آمده از آزمون فشار نمونه‌های فومی

ویژگی	میانگین بیشترین تنش (MPa)	میانگین تنش پلاتو (MPa)	میانگین انرژی جذب شده (Nm)	میانگین بیشترین کرنش (%)
مقدار	۲۵	۱۵	۱۳/۹۸	۶۸

یک لایه از سلول‌ها که در یک امتداد قرار دارند، ارتباط پیدا می‌کند [۲۵].

گرانوله‌های کرومی شکل اوره به عنوان پُرکننده فضا تولید شدند و مطالعات ریزساختاری و ارزیابی رفتار فشاری، نتایج زیر را بیان می‌دارد.

۱. اتصال ذرات پودر آهن در فرآیند تفجوشی منجر به تشکیل دیواره سلول‌ها در فوم‌های فولادی تولیدی شده است.
۲. ریزساختار فوم‌های تولیدی متشکل از پرلیت، کاربیدهای آهن مرزدانه‌ای و ذرات پراکنده شده مس است.
۳. وجود ذرات پودر مس در مخلوط پودری مورد استفاده برای پوشش‌دهی گرانوله‌های اوره منجر به بهبود اتصال بین ذرات آهن در فرآیند تفجوشی شده است.
۴. فوم‌های تولیدی دارای میانگین میزان تخلخل برابر $74/5$ درصد هستند.
۵. منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم‌های تولیدی از سه ناحیه تشکیل شده‌اند که شامل ناحیه الاستیک، ناحیه پلاتو و ناحیه شکست است.
۶. در فوم‌های تولیدی، میانگین بیشترین تنش فشاری برابر 25 MPa، میانگین تنش در ناحیه پلاتو برابر 14 MPa، میانگین انرژی جذب شده برابر 14 Nm و میانگین بیشترین کرنش فشاری برابر 68 درصد است.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان با شماره گرنت ۹۴/۴۰۱۷ انجام شده است.

References

- [1] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, Metal foams: a design guide, USA: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] J. Banhart, Manufacture, characterization and applications of cellular metals and metal foams, Prog. Mater. Sci., vol. 46, pp.559-632, 2001.
- [3] R. Surace, L.A.C. De Filippis, A.D. Ludovic and G. Boghetich, Influence of processing parameters on aluminum foam produced by space holder technique, Mater. Des., vol.30, pp.1878-85, 2009.
- [4] Y. Sirong, L. Jiaan, L. Yanru and L. Yaohui, Compressive behavior and damping property of ZA22/SiCp composite foams, Mater. Sci. Eng. A, vol. 457, pp.325-8, 2007.
- [5] I.S. Golovin and H.R. Sinnig, Damping in some cellular metallic materials, Alloys. Compd., vol. 355, pp.2-9, 2003.
- [6] K.C. Chan and L.S. Xie, Dependency of densification properties on cell topology of metal foams, Scripta. Mater., vol. 48, pp.1147-52, 2003.
- [7] L.J. Gibson and M.F. Ashby, Cellular solids - structures and properties, Cambridge, Cambridge University Press, 1997.
- [8] A.H. Brothers, Processing and properties of advanced metallic foams. A thesis, Northwestern University, December, 2006.

یک ناحیه دوم، ناحیه پلاتو است که به صورت دندانه اره‌ای مشاهده می‌شود. تشکیل دندانه‌ها در ناحیه پلاتو احتمالاً به شکست دیواره سلول‌ها و تخریب آن‌ها ارتباط پیدا می‌کند. به بیان دیگر، تحمل فشار اعمالی توسط دیواره سلول‌ها موجب افزایش مقدار تنش و شکست دیواره‌های سلول‌ها و انهدام آن‌ها در اثر اعمال فشار موجب کاهش مقدار تنش می‌گردد.

بنابراین، انجام این پدیده به صورت متوالی منجر به تشکیل دندانه‌ها خواهد شد. در ناحیه سوم که در انتهای ناحیه پلاتو قرار دارد، شکست فوم فولادی رخ می‌دهد. در برخی از نمونه‌ها، پدیده شکست همزمان با افزایش تنش و در برخی دیگر از نمونه‌ها، همزمان با کاهش تنش رخ می‌دهد. در کل، پدیده شکست به صورت ترد است و در اثر رشد ترک‌ها از دیواره‌های سلول‌ها و رشد آن‌ها صورت می‌گیرد. سایر نتایج به دست آمده از آزمون فشار بر روی همه فوم‌های فولادی تولید شده در جدول ۲ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، میانگین انرژی جذب شده براساس مساحت زیر منحنی تنش- کرنش در مورد همه فوم‌های تولیدی تقریباً برابر 14 Nm و میانگین بیشترین کرنش در حدود 68 درصد است.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، فوم‌های فولادی حاوی $1/5$ درصد وزنی کربن و 2 درصد وزنی مس به روش متالورژی پودر و توسط

- [9] Y.Y. Zhao and D.X. Sun, A novel sintering-dissolution process for manufacturing Al foams, Scripta. Mater., vol. 144, pp. 105-10, 2000.
- [10] Y.Y. Zhao, F. Han and T. Fung, Optimisation of compaction and liquid-state sintering in sintering and dissolution process for manufacturing Al foams, Mater. Sci. Eng. A, vol. 364, pp. 117-25, 2004.
- [11] D.X. Sun and Y.Y. Zhao, Phase changes in sintering of Al/Mg/NaCl compacts for manufacturing Al foams by the sintering and dissolution process, Mater. Lett., vol. 59, pp.6-10, 2005.
- [12] Y.J. Yang, F.S. Han, D.K. Yang and K. Zeng, Compressive behavior of open cell Al-Al₂O₃ composite foams fabricated by sintering dissolution process, Mater. Sci. Technol., vol. 23, pp. 502-4, 2007.
- [13] D.X. Sun and Y.Y. Zhao, Static and dynamic absorption of Al foams produced by sintering and dissolution process, Metall. Mater. Trans. B, vol. 34, pp. 69-76, 2002.
- [14] N.Q. Zhao, B. Jiang, X.W. Du, J.J. Li, C.S. Shi and W.X. Zhao, Effect of Y₂O₃ on the mechanical properties of open cell aluminum foams, Mater. Lett., vol. 60, pp.1665-8, 2006.
- [15] H.I. Bakan, A novel water leaching and sintering process for manufacturing highly porous stainless steel, Scripta. Mater., vol. 55, pp.203-6, 2006.

- [16] B. Jiang, N.Q. Zhao, C.S. Shi, X.W. Du, J.J. Li and H.C. Man, A novel method for making open cell aluminum foams by powder sintering process, *Mater. Lett.*, vol. 59, pp.3333-6, 2005.
- [17] M. Bram, C. Stiller, H.P. Buchkremer, D. Stover and H. Bauer, High-porosity titanium, stainless steel, and superalloy parts, *Adv. Eng. Mater.*, vol. 2, pp.196-9, 2000.
- [18] C.E. Wen, M. Mabuchi, Y. Yamada, K. Shimojima, Y. Chino and T. Asahina, Processing of biocompatible porous Ti and Mg, *Scripta. Mater.*, vol. 45, pp.1147-53, 2001.
- [19] L.P. Zhang and Y.Y. Zhao, Fabrication of high melting-point porous metals by lost carbonate sintering process via decomposition route, *J.Eng.Manuf.*, vol. 222, pp. 267-271, 2008.
- [20] M. Bram, C. Stiller, H.P. Buchkremer, D. Stverand H. Baur, High porosity titanium, stainless steel and superalloy parts, *Adv. Eng. Mater.*, vol. 2, pp. 196-199, 2000.
- [21] H.I. Bakan, A novel water leaching and sintering process for manufacturing highly porous stainless steel, *Scripta. Materialia.*, vol. 55, pp. 203-206, 2006.
- [22] H.O. Gulsoy and R.M. German, Sintered foams from precipitation hardened stainless steel powder, *Powd. Metall.*, vol. 51, pp. 350-353, 2008.
- [23] I. Mutlu and E. Oktay, Processing and properties of highly porous 17-4 PH stainless steel, *Powd. Metall. Met. Cer.*, vol. 50, pp. 73-83, 2011a.
- [24] I. Mutlu and E. Oktay, *Production and aging of highly porous 17-4 PH stainless steel*, *J. Poro. Mater.*, vol. 11, pp. 9491-9498, 2011b.
- [25] N. Bekoz and E. Oktay, *Effects of carbamide shape and content on processing and properties of steel Foams*, *J. Mater. Proc. Tech.*, vol. 212, pp. 2109- 2116, 2012.
- [26] R.M. Hathaway and P.K. Rohatgi, *Research into the production of a light weight cast iron (LWCI)*, *Proc. Int. Conf. High. Temperature. Capillarity.*, vol. 29, Cracow, Poland, 1997
- [27] H. Bafti and A. Habibolahzadeh, *Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters*, *Mater. Des.*, vol. 31, pp. 4122-4129, 2010.
- [28] A. Simchi, *Effect of C and Cu addition on the densification and microstructure of iron powder in direct laser sintering process*, *Mater. Lett.*, vol. 62, pp. 2840-2843, 2008.
- [29] W.D. Wong-Angel, L. Tellez-Jurado, J.F. Chavez-Alcala, E. Chavira-Martinez and V.F. Verduzco-Cedeno, *Effect of copper on the mechanical properties of alloys formed by powder metallurgy*, *Mater. Des.*, vol. 58, pp. 12-18, 2014.