

Effect of WC content on porosity percentage, microstructure, and mechanical behavior of steel foam manufactured through powder metallurgy using space holder technique

*Hamid Sazegaran¹, Zahra Vali Pour², Farhad KhoramShahi³

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

2- B.Sc., Department of Industrial Engineering, Engineering Faculty, Quchan University of Technology, Quchan, Iran.

3- M.Sc., Research and Development Manager of Mashhad Powder Metallurgy Company, Mashhad, Iran.

Citation: Sazegaran H, Vali Pour Z, KhoramShahi F. Effect of WC content on porosity percentage, microstructure, and mechanical behavior of steel foam manufactured through powder metallurgy using space holder technique. Metallurgical Engineering 2020; 23(2): 142-153 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.120746.1279>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.120746.1279>

ABSTRACT

In this present work, steel foams were successfully manufactured through powder metallurgy route using urea granules as space holder and influences of WC content (0, 0.5, 1, 2, and 4 wt. %) added into cell walls were studied on porosity percentage, microstructure of cell walls, and mechanical properties of steel foams. The microstructure of cell walls was evaluated using optical microscope and scanning electron microscope equipped with image processing software. Increasing WC has little effect on surface fraction and sphericity of cell, while the surface fraction and sphericity of the pores formed into the cell walls are strongly affected by the addition of WC. The mechanical behavior of the steel foams was conducted using compression test. The porosity of the steel foams is between 73 % and 80 % and with the increase in WC content, the porosity percentage decreases. The results of microscopic evaluations indicated that the microstructure of cell walls contains ferrite and pearlite, with tungsten carbide particles distributed uniformly. The stress vs. strain curves of the steel foam have an elastic region, a long saw-tooth plateau region, and a fracture point and the curves are shifted upward as the WC content increased.

Keywords: Steel foam, WC, Space holder technique, Microstructure of cell wall, Compressive behavior.

Received: 26 January 2019

Accepted: 15 December 2020

■ ■

* *Corresponding Author:*

Hamid Sazegaran, PhD

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

Tel: +98 (51) 47017419

E-mail: h.sazegaran@qiet.ac.ir

اثر میزان کاربرد تنگستن بر درصد تخلخل، ریزساختار و رفتار مکانیکی فوم فولادی تولید شده به روش متالورژی پودر با استفاده از فضا ساز

*حمید سازگاران^۱، زهرا ولی پور^۲، فرهاد خرمشاهی^۳

۱- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران.
 ۲- فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران.
 ۳- مدیر بخش تحقیق و توسعه شرکت متالورژی پودر مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

در پژوهش حاضر، فوم‌های فولادی به روش متالورژی پودر و با استفاده از دانه‌های اوره به عنوان فضا ساز به صورت موفقیت آمیز تولید شدند و اثر افزودن کاربرد تنگستن (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی) به فولاد سازنده دیواره سلول‌ها بر روی میزان تخلخل، ریزساختار دیواره سلول‌ها و ویژگی‌های مکانیکی فوم‌های تولیدی مطالعه شد. ریزساختار دیواره سلول‌ها توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به نرم افزار پردازش تصویر ارزیابی گردید. افزایش درصد وزنی کاربرد تنگستن تاثیر اندکی بر روی کسر سطحی و میزان کرویت سلول‌ها دارد و این در حالی است که کسر سطحی و میزان کرویت حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها شدیداً تحت تاثیر افزودن کاربرد تنگستن است. رفتار مکانیکی فوم‌های فولادی تولید شده توسط انجام آزمون فشار تعیین شدند. درصد تخلخل فوم‌های تولیدی بین ۷۳ تا ۸۰ درصد است و با افزایش میزان کاربرد تنگستن، درصد تخلخل کاهش می‌یابد. نتایج ارزیابی‌های میکروسکوپی حاکی از آن است که ریزساختار دیواره سلول‌ها شامل فریت و پرلیت است که ذرات کاربرد تنگستن به صورت یکنواخت درون آن توزیع یافته‌اند. منحنی تنش- کرنش فوم‌های فولادی دارای ناحیه الاستیک، ناحیه پلاتو طولانی دندانه اراهی و نقطه شکست است و با افزایش درصد وزنی کاربرد تنگستن، منحنی‌ها به سمت بالا شیفت می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: فوم فولادی، کاربرد تنگستن، روش فضا ساز، ریزساختار دیواره سلول‌ها، رفتار فشاری.

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۶ | پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۵

۱. مقدمه

و ۴) تولید از یون‌های حاوی آهن است [۷۰۶]. باید در نظر داشت که تولید از حالت مذاب دارای مشکلات فراوانی است که نمونه‌هایی از آن‌ها شامل بالا بودن دمای ذوب، مشکلات مذاب‌ریزی و انجماد می‌باشد. البته، قابلیت بیشتری برای کنترل سلول‌ها در تولید از حالت جامد یا تولید به روش متالورژی پودر میسر است [۸].

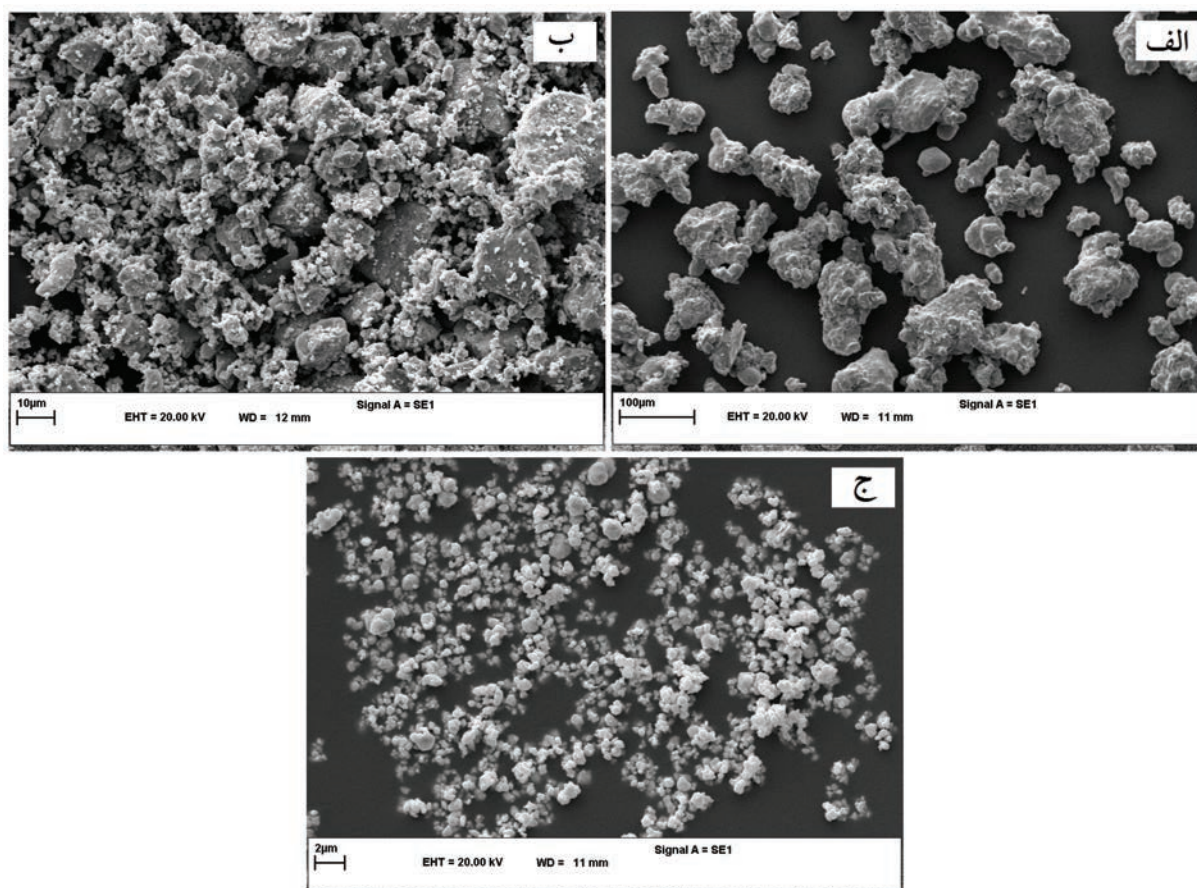
در تولید فوم‌های فولادی به روش متالورژی پودر، امکان کنترل موفولوژی (اندازه، شکل و توزیع) سلول‌ها یا همان حفرات و همچنین ضخامت دیواره سلول‌ها وجود دارد که استفاده از گوی‌های توخالی فولادی [۹ و ۱۰] و به کارگیری فضا سازهای مختلف [۱۱-۱۳] بسیار مفید است. در روش استفاده از فضا ساز، اغلب ذرات یا دانه‌های کرب آمید [۱۱-۱۵]، NH_4HCO_3 [۱۶]، اوره [۱۷]، پلی‌استیرن [۱۸ و ۱۹] و غیره به

فوم‌های فلزی یا فلزات سلولی (همان فلزات پُر تخلخل) دسته‌ای جدید از مواد مهندسی پیشرفته هستند که به دلیل چگالی پایین، نسبت استحکام و سفتی به وزن بالا، جذب انرژی عالی، سطح ویژه زیاد، رفتار حرارتی و صوتی جالب می‌توانند به صورت موفقیت آمیز در بسیاری از کاربردهای صنعتی به کار برده شوند [۴-۱]. فلزات مختلفی به منظور تولید فوم‌های فولادی استفاده می‌شوند، اما استفاده از فولاد که دارای ویژگی‌های جالب توجهی است، به عنوان ماده سازنده دیواره سلول‌ها می‌تواند سبب عملکرد بهتر فوم تولیدی شود [۵]. فوم‌های فولادی به روش‌های مختلفی تولید می‌شوند که فرآیندهای اصلی تولید آن‌ها شامل (۱) تولید از حالت مذاب، (۲) تولید از حالت جامد، (۳) تولید از حالت بخار یا گاز

* نویسنده مسئول:
 دکتر حمید سازگاران

نشانی: خراسان رضوی، قوچان، دانشگاه صنعتی قوچان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع.
 تلفن: ۰۹۸-۴۷۰۱۷۴۱۹ (۵۱)

پست الکترونیکی: h.sazegaran@qiet.ac.ir



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودرهای الف (آهن، ب) آهن حاوی فسفر و ج) کاربید تنگستن.

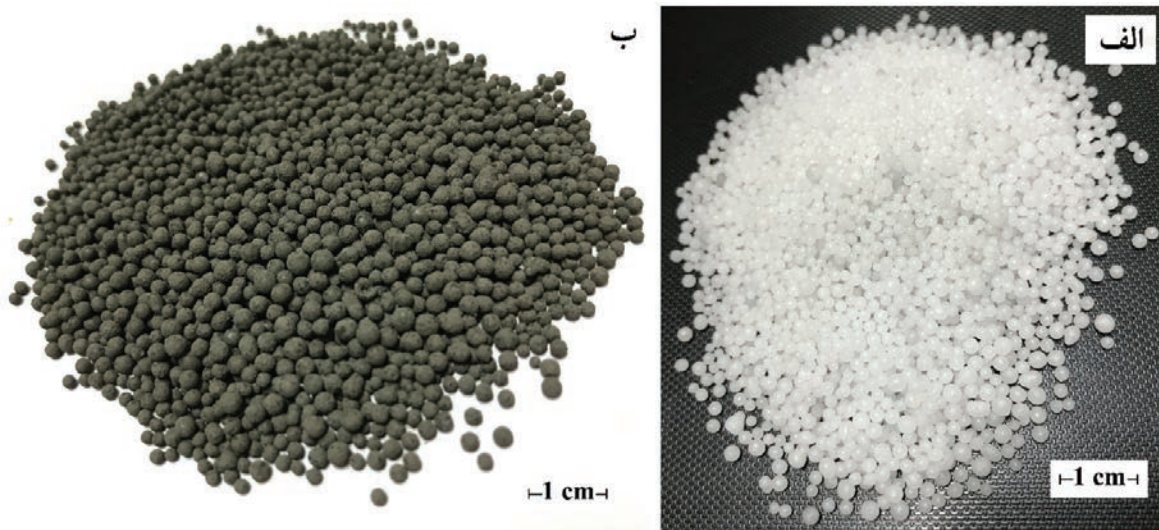
جدول ۱. توزیع ذرات پودرهای آهن و کاربید تنگستن.

اندازه ذرات	از ۶۳ تا ۱۰۰ µm	از ۴۵ تا ۶۳ µm	از ۲ تا ۴۵ µm	از ۱ تا ۲ µm	از ۰/۵ تا ۱ µm	کوچک تر از ۰/۵ µm
آهن	۴۳	۳۲	۲۵	۰	۰	۰
کاربید تنگستن	۰	۰	۰	۲۲	۳۴	۴۴

این، فرآیند تولید و اثرات پیر شدن در فومهای فولاد زنگ نزن PH ۱۷-۴ نیز مطالعه شده است [۲۳]. این در حالی است که تاثیرات افزودن عناصر آلیاژی و ذرات استحکام بخش همانند کاربیدها، نیتريد ها و اکسیدهای سرامیکی مختلف بر روی فومهای فولادی تولیدی به روش متالورژی پودر و با استفاده از فضا ساز به صورت کامل بررسی نشده است. با این وجود، اثر مس بر روی میزان تخلخل، ریزساختار دیواره سلولها و رفتار فشاری فومهای فولادی ارزیابی شده است و نتایج بیان می کنند که افزودن مس به مخلوط پودرهای مورد استفاده سبب ایجاد شرایط تفجوشی حالت مایع یا ذوبی می شود که در چنین شرایطی، ذرات مس افزوده شده در طی فرآیند تفجوشی ذوب می شوند و بهبود اتصال ذرات آهن به یکدیگر را نتیجه می دهند [۲۴]. میزان تخلخل، در فومهای فولادی حاوی مس بین ۷۱/۹ درصد تا ۷۷/۲ درصد و بهبود ضریب

عنوان مواد فضا ساز که سازنده سلولها هستند، با پودرهای آهن و افزودنی های مختلف که سازنده دیواره سلولها هستند، مخلوط می شوند و سپس، فرآیندهای فشردن، خروج فضا ساز و تفجوشی صورت می گیرد. البته در برخی موارد، ابتدا تفجوشی و پس از آن، خروج فضا ساز انجام می گیرد [۲۰]. خروج فضا ساز می تواند به شیوه های مختلفی صورت گیرد که دو روش مرسوم شامل روش انحلال فضا ساز درون یک حلال مناسب [۲۱ و ۲۲] و روش تبخیر یا تجزیه حرارتی فضا ساز در شرایط دمایی مناسب [۱۷ و ۱۸] است.

مطالعات فراوانی بر روی ایجاد و توسعه فرآیندهای تولید فومهای فولادی به روش های متنوع صورت گرفته است [۵ و ۱۵] و به عنوان یک نمونه جالب توجه، فومهای فولاد زنگ نزن با هسته هایی که میزان تخلخل آنها به صورت گرادسانی تغییر می کند، تولید و ارزیابی شدند [۲۲]. علاوه بر



شکل ۲. دانه‌های اوره الف) قبل از پوشش‌دهی و ب) بعد از پوشش‌دهی.

و پودر آهن حاوی فسفر به گونه‌ای اضافه شد که مقدار فسفر برابر ۲ درصد وزنی باشد. مقدار کاربید تنگستن اضافه شده برابر ۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی است. در شکل ۱، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودرهای آهن، آهن حاوی فسفر و کاربید تنگستن نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، پودرهای آهن که به روش اتمیزه آبی تولید شده‌اند، دارای اشکال نامنظم و به صورت تقریباً گرد هستند. پودر آهن حاوی فسفر دارای دو نوع ذره متفاوت است که اختلاف اندازه زیادی با یکدیگر دارند. پودرهای کاربید تنگستن دارای اشکال نامنظم و گوشه‌دار هستند. در جدول ۱، توزیع ذرات پودرهای آهن و کاربید تنگستن ارائه شده است.

تولید فوم‌های فولادی

مراحل تولید فوم‌های فولادی حاوی مقادیر مختلف کاربید تنگستن به روش متالورژی پودر و با استفاده از دانه‌های اوره به عنوان فضا‌ساز شامل (۱) اختلاط پودرها، (۲) پوشش‌دهی دانه‌های اوره توسط مخلوط پودری، (۳) فشردن دانه‌های اوره پوشش داده شده، (۴) خروج دانه‌های اوره توسط انحلال درون آب و (۵) تفجوشی است. در اولین مرحله، پودرهای آهن، گرافیت، آهن حاوی فسفر و کاربید تنگستن با مقادیر مناسب توسط یک دستگاه مخلوط‌کن مخصوص پودر با سرعت چرخش ۱۵۰ rpm و به مدت زمان ۳۰ min مخلوط شدند. در طی این مرحله، اختلاط به صورت کامل صورت گرفت و مخلوط کاملاً همگن تولید شد. سپس، از یک محفظه استوانه‌ای از جنس پلی‌اتیلن که قابلیت چرخش در امتداد محور را دارد، به منظور پوشش‌دهی دانه‌های اوره استفاده شد. در این فرآیند، ابتدا مقدار مشخصی از دانه‌های اوره (۴۹ درصد وزنی) به درون محفظه انتقال یافتند و ۲ درصد وزنی

کشسانی، تنش پلاتو، تنش شکست و کرنش نقطه شکست به ترتیب به میزان ۴/۵، ۶، ۶/۴ و ۲/۵ برابر گزارش شده است. در پژوهشی دیگر، تأثیرات افزودن عنصر کروم بر رفتار مکانیکی فوم‌های فولادی بررسی شده است و بهبود تنش پلاتو از ۴۱/۷ به ۱۵۳/۲ MPa، تنش نقطه شکست از ۴۲/۳ به ۱۸۲/۴ MPa و ضریب کشسانی از ۱/۲۳ به ۳/۷۳ گزارش شده است [۲۵]. با توجه به مطالعات بسیار اندک در زمینه تأثیرات افزودن عناصر آلیاژی و ذرات استحکام‌بخش بر روی رفتار و عملکرد فوم‌های فولادی، در این پژوهش به بررسی تأثیرات افزودن کاربید تنگستن بر روی مورفولوژی سلول‌ها، میزان تخلخل، ریزساختار دیواره سلول‌ها و رفتار فشاری فوم‌های فولادی تولید شده به روش متالورژی پودر و با استفاده از دانه‌های اوره به عنوان فضا‌ساز پرداخته می‌شود. البته، هدف اصلی ارزیابی تأثیرات ناشی از افزودن مقادیر مختلف کاربید تنگستن بر روی میزان تخلخل، مورفولوژی سلول‌ها، مشخصات ریزساختاری دیواره سلول‌ها و منحنی تنش-کرنش فشاری فوم‌های فولادی تقویت شده با ذرات کاربید تنگستن است.

۲. مواد و روش تحقیق

مواد

به منظور تولید فوم‌های فولادی از پودر تجاری آهن (تهیه شده از شرکت متالورژی پودر خراسان با خلوص ۹۹/۹ درصد)، پودر گرافیت (تهیه شده از شرکت متالورژی پودر مشهد با خلوص ۹۹/۹۹ درصد)، پودر آهن حاوی فسفر (تهیه شده از شرکت متالورژی پودر مشهد حاوی ۱۳/۵ درصد وزنی فسفر) و پودر کاربید تنگستن به عنوان ماده سازنده دیواره سلول‌ها و از دانه‌های اوره به عنوان فضا‌ساز یا پُرکننده فضا استفاده شد. مقدار پودر گرافیت افزودنی برابر ۰/۶ درصد وزنی است



شکل ۳. تصویر نمونه فوم فولادی اولیه بعد از فرآیند فشردن.

دمایی مختلف است که در ناحیه اول، دما به تدریج افزایش می‌یابد و فرآیندهای تجزیه حرارتی در این ناحیه صورت می‌گیرد. باقیمانده دانه‌های اوره درون نمونه‌های اولیه فشرده شده در ناحیه اول به صورت حرارتی تجزیه می‌شوند. سپس، فرآیند تفجوشی در ناحیه دوم در دمای 1120°C و به مدت 52 min صورت می‌گیرد. در ناحیه سوم، سرد شدن به صورت تدریجی تا دمای محیط صورت می‌گیرد. بنابراین، نمونه‌های مستحکم فوم فولادی توسط تفجوشی تولید می‌شوند.

تعیین میزان تخلخل

میزان چگالی و درصد تخلخل فوم‌های فولادی حاوی مقادیر مختلف کاربرد تنگستن به روش اندازه‌گیری ابعاد و تعیین وزن توسط یک ترازوی دیجیتال با دقت 0.01 g تعیین شدند. به منظور اندازه‌گیری چگالی فوم‌های فولادی از معادله (۱) و برای اندازه‌گیری درصد تخلخل آن‌ها از معادله (۲) استفاده شد [۲۴ و ۲۵]. قابل ذکر است که در معادله (۲)، چگالی جامد همان چگالی فولاد بدون تخلخل برابر $7/8\text{ g/cm}^3$ در نظر گرفته شد.

معادله (۱)

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

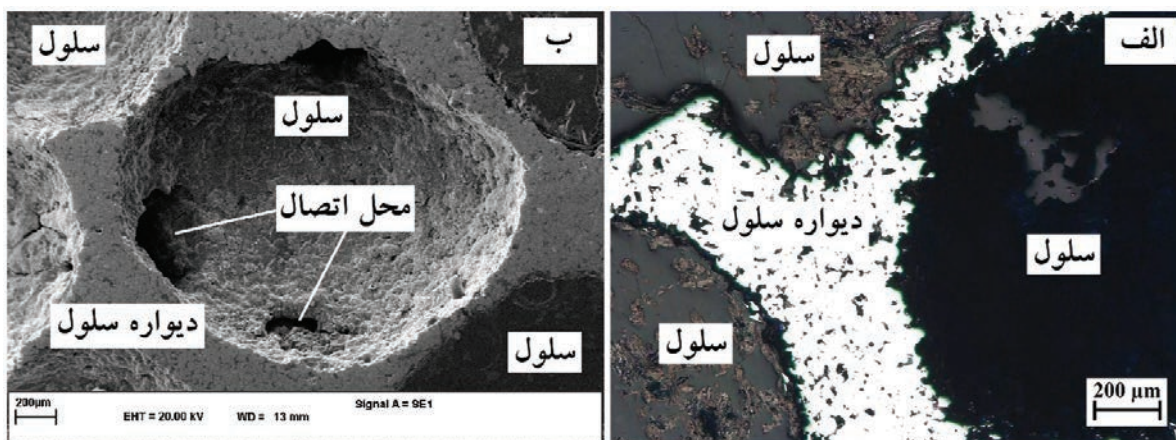
معادله (۲)

$$P\% = \left[1 - \left(\frac{\rho F}{\rho S} \right) \right] \times 100$$

آب به آن‌ها اضافه شد. در ادامه، محفظه با سرعت 200 rpm به مدت 2 min به چرخش در آمد و در نتیجه، سطوح دانه‌های اوره با آب واکنش می‌دهند و چسبنده می‌شوند. پس از آن، مخلوط پودری (49% درصد وزنی) به دانه‌های اوره چسبنده درون محفظه اضافه شد و فرآیند چرخش با همان سرعت به مدت 5 min تکرار گردید. در نتیجه، پودرها به سطوح چسبنده دانه‌های اوره می‌چسبند و فرآیند پوشش‌دهی دانه‌های اوره صورت می‌گیرد. در انتها، فرآیند خشک شدن دانه‌های اوره پوشش داده شده درون یک آون الکتریکی در دمای 75°C به مدت 4 ساعت انجام شد. در شکل ۲-الف، دانه‌های اوره مورد استفاده و در شکل ۲-ب، دانه‌های اوره پوشش داده شده نمایش داده شده است.

در مرحله سوم، فرآیند فشردن دانه‌های اوره پوشش داده شده توسط یک پرس هیدرولیک با ظرفیت 30 T و با یک قالب استوانه‌ای از جنس فولاد قالب سخت شده صورت گرفت. قالب دارای یک حفره استوانه‌ای شکل با قطر 12 mm و ارتفاع 200 mm است که دانه‌های اوره پوشش داده شده درون آن ریخته می‌شوند و فرآیند فشردن از دو طرف توسط سمبهایی از جنس فولاد ابزار سخت شده انجام می‌گیرد. فشار اعمالی برابر 150 MPa انتخاب شد و نمونه‌های اولیه با ارتفاعی بیشتر از 18 mm تولید شدند. در شکل ۳، تصویری از نمونه‌های اولیه فشرده شده نشان داده شده است. پس از تهیه نمونه‌های اولیه فشرده شده، فرآیند انحلال دانه‌های اوره توسط آب مقطر صورت می‌گیرد. در این مرحله، نمونه‌ها درون یک محفظه حاوی آب مقطر در دمای محیط و به مدت 1 min قرار می‌گیرند. سپس، فرآیند خشک کردن توسط یک آون الکتریکی در دمای 75°C به مدت 2 ساعت صورت گرفت. فرآیندهای انحلال و خشک کردن، 10 مرتبه تکرار شدند و در نتیجه، در حدود 90% درصد وزنی اوره از درون نمونه‌های فشرده شده خارج شد. انجام فرآیند انحلال به صورت پیوسته اغلب موجب آسیب به دیواره سلول‌ها می‌شود. برای بررسی میزان انحلال اوره در طی مراحل مختلف انحلال، نمونه‌ها پس از هر مرحله خشک شدن توسط ترازوی دیجیتال با دقت 0.01 g توزین شدند.

در پایان، فرآیند تفجوشی یا زینترینگ توسط یک کوره مخصوص متالورژی پودر (شرکت متالورژی پودر مشهد) صورت گرفت. محیط کوره شامل آمونیاک شکسته به همراه مقداری هیدروژن افزودنی است که ترکیب شیمیایی آن به صورت 10% درصد حجمی نیتروژن و 90% درصد حجمی هیدروژن است. باید در نظر داشت که علت انتخاب اتمسفر آمونیاک شکسته این است که در اغلب فرآیندهای تفجوشی قطعات فولادی به صورت صنعتی و نیمه صنعتی، این اتمسفر سبب اتصال بسیار خوب ذرات به یکدیگر می‌شود و علاوه بر این، تاثیر احیاء‌کنندگی نیز بر روی سطوح اکسید شده ذرات آهن در مقایسه با اتمسفر نیتروژن دارد. کوره شامل 3 ناحیه



شکل ۴. تصاویر الف) میکروسکوپ نوری و ب) میکروسکوپ الکترونی روبشی از سلول‌ها و دیواره سلول‌های فوم فولادی حاوی ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن.

از آزمون فشار استفاده شد. آزمون فشار توسط دستگاه Zwick مدل Z250 و مطابق با استاندارد ASTM E9-09 انجام گردید. ابتدا، فوم‌های تولید شده توسط دستگاه وایرکات (Dk7732ZAC) در جهت عمود بر محور به گونه‌ای بریده شدند که نمونه‌ای استوانه‌ای شکل با قطر ۱۲ mm و ارتفاع ۱۸ mm تولید شد. قابل ذکر است که برای روانکاری بین فک و نمونه‌ها از روغن مخصوص استفاده شد. سرعت حرکت فک‌ها در آزمون فشار برابر ۲ mm/min انتخاب شد. نتایج به دست آمده از آزمون فشار بر اساس میانگین حداقل ۳ آزمون تعیین شدند.

۳. نتایج و بحث

مورفولوژی سلول‌ها

تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی عبوری از سلول‌ها و دیواره سلول‌های فوم فولادی حاوی ۱ درصد وزنی کاربید تنگستن در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، سلول‌ها دارای اشکال تقریباً کروی هستند که به صورت یکنواخت در بین دیواره‌ها توزیع شده‌اند. علاوه بر این، محل‌های اتصال سلول‌ها به یکدیگر در برخی از دیواره‌ها به صورت حفراتی سیاه‌رنگ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده این است که سلول‌ها به یکدیگر ارتباط دارند و فوم‌های تولید شده از نوع سلول باز هستند. علاوه بر این مشاهده می‌شود که دیواره سلول‌ها نیز دارای حفرات بسیار کوچکی هستند.

مطابق با تصویر ۴، مشاهده می‌شود که دو نوع متفاوت از تخلخل درون ساختار فوم‌های فولادی تولید شده تشکیل شده است. نوع اول، به خروج دانه‌های اوره ارتباط پیدا می‌کند که تحت عنوان «سلول» نامیده می‌شود. سلول‌های تشکیل شده، از لحاظ شکل، اندازه و توزیع دقیقاً مشابه با دانه‌های اوره تشکیل می‌شوند. البته، تغییر شکل دانه‌های فاساز

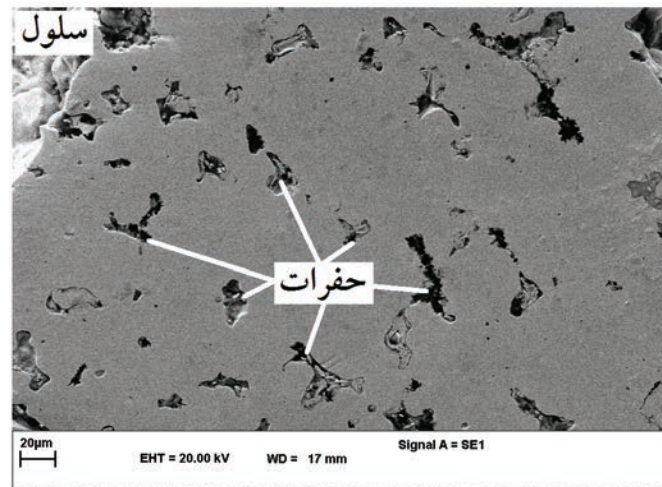
در معادلات فوق، ρ چگالی، M جرم، V حجم، ρ_s چگالی فولاد درصد تخلخل، ρ_F چگالی قطعه فومی و ρ_S چگالی فولاد بدون تخلخل است.

ارزیابی ریزساختار دیواره سلول‌ها

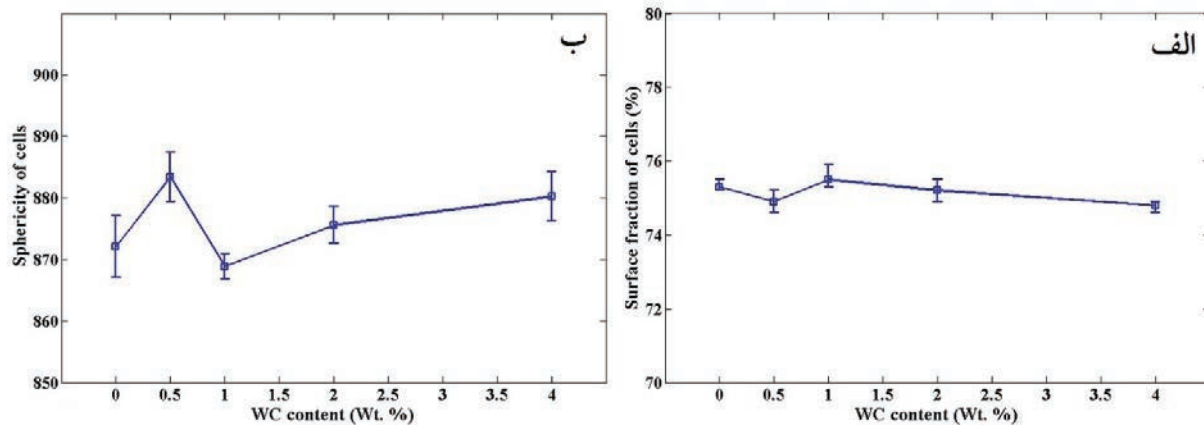
برای مطالعه ریزساختار دیواره سلول‌های فوم‌های فولادی تولید شده از ارزیابی‌های میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. فوم‌های فولادی تولید شده ابتدا توسط دستگاه وایرکات (Dk7732ZAC) در جهت عمود به محور برش داده شدند و سپس، فرآیندهای مانت گرم، سمباده‌زنی و پولیش‌کاری بر روی آن‌ها انجام شد. به منظور آشکارسازی ریزساختار، فرآیند حکاکی توسط محلول نایتال ۲ درصد و به مدت ۵ دقیقه صورت گرفت. نمونه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط آلیاژ Au-Pd با دستگاه Sputter Coater SCV۶۲۰ و با دستگاه پوشش‌دهی شدند و سپس، مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط دستگاه LEO ۱۴۵۰ VP انجام شد. علاوه بر این، برای شناسایی ترکیب شیمیایی فازهای گوناگون تشکیل شده در دیواره سلول‌های فوم‌های فولادی از اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی (EDS) استفاده شد. قابل ذکر است که از نرم‌افزار پردازش تصاویر MIP^{MT} به منظور اندازه‌گیری ضخامت دیواره سلول‌ها، کسر سطحی و میزان کرویت سلول‌ها و همچنین حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها استفاده شد. نکته حائز اهمیت این است که در اغلب نرم افزارهای پردازش تصویر میزان کرویت، یک کمیت بدون یکا و واحد است و در صورتی که ۱۰۰۰ باشد، بیانگر کرویت کامل است و هر چقدر از این مقدار کمتر باشد، کم بودن میزان کرویت نسبت به کره کامل را نشان می‌دهد.

بررسی رفتار مکانیکی

برای بررسی رفتار مکانیکی فوم‌های فولادی تولید شده



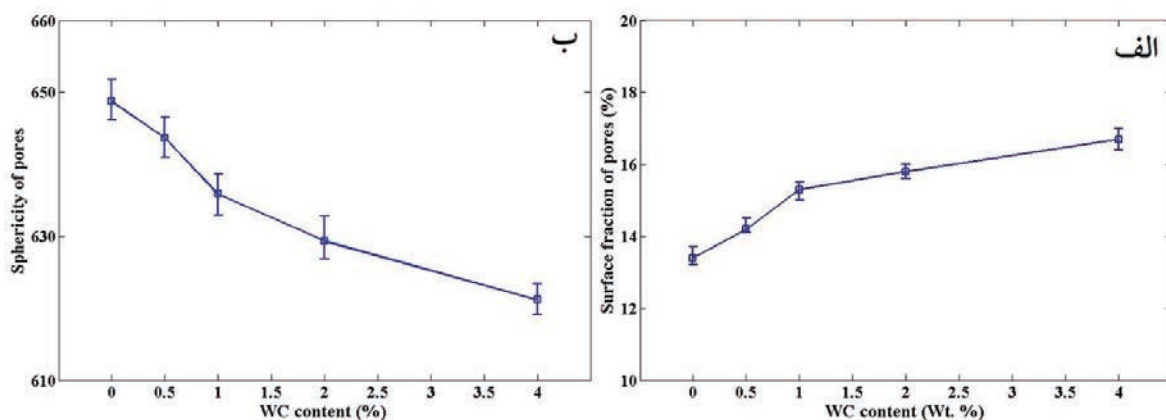
شکل ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌های فوم فولادی بدون کاربرد تنگستن.



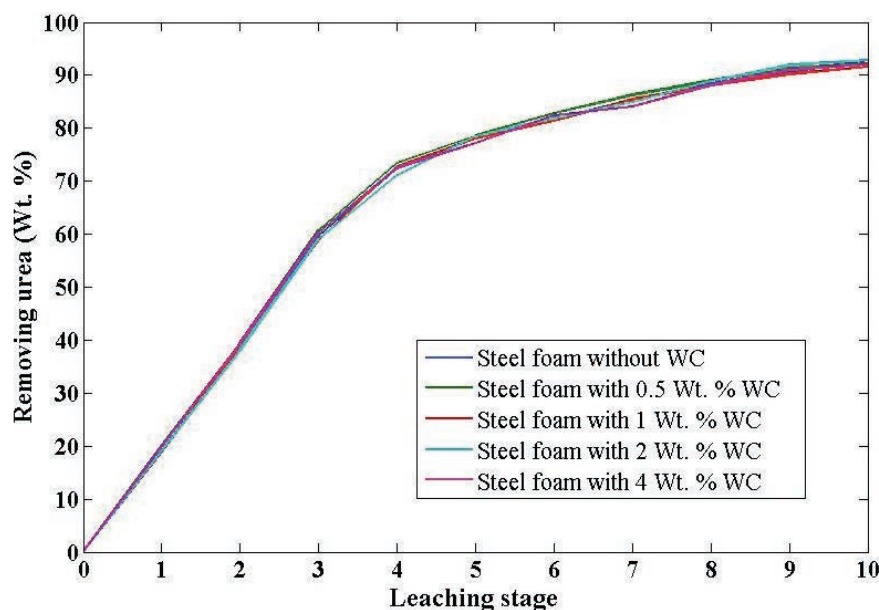
شکل ۶. الف) کسر سطحی و ب) میزان کرویت سلول‌های تشکیل شده در اثر خروج دانه‌های اوره بر حسب درصد کاربرد تنگستن اضافه شده.

شامل کسر سطحی و میزان کرویت سلول‌ها در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی کاربرد تنگستن، تغییرات چندانی در کسر سطحی و میزان کرویت سلول‌ها رخ نمی‌دهد. این اثبات شده است که عواملی همانند مقدار، اندازه و شکل فضا ساز، فشار اعمالی در مرحله فشردن و دما و زمان تفجوشی می‌توانند تاثیرات شدیدی بر روی میزان و شکل سلول‌ها داشته باشند [۲۲]. علاوه بر این، ضخامت دیواره سلول‌ها نیز توسط نرم‌افزار پردازش تصاویر اندازه‌گیری شد که میانگین آن برابر $204 \mu\text{m}$ است. قابل ذکر است که افزودن کاربرد تنگستن نیز تاثیر قابل توجهی بر روی ضخامت دیواره سلول‌ها ندارد. مطابق با نتایج به دست آمده از پردازش تصاویر میکروسکوپی، کسر سطحی و میزان کرویت حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. مطابق با شکل، با افزایش درصد وزنی کاربرد تنگستن به مخلوط‌های پودری، کسر سطحی و میزان کرویت حفرات تشکیل شده در

از کره به بیضی در فشارهای اعمالی بسیار زیاد در مرحله فشردن گزارش شده است [۸]. نوع دوم، تخلخل درون دیواره سلول‌ها تشکیل می‌شود که تحت عنوان «حفره» نامیده می‌شود. در مرحله فشردن، در صورتی که فشار اعمالی زیاد باشد، احتمال شکستن دانه‌های فضا ساز وجود دارد و در چنین شرایطی، شکل، اندازه و توزیع سلول‌های تشکیل شده منطبق با دانه‌های فضا ساز نخواهد بود. در پژوهش بکوز و همکارش [۱۱]، شکستن دانه‌های فضا ساز (کرب‌آمید) در فشار بالاتر از 200 MPa گزارش شده است. این در حالی است که در فشارهای اعمالی پایین‌تر، حفرات به ناچار در دیواره سلول‌ها با توزیع نسبتاً یکنواخت تشکیل می‌شوند. در شکل ۵، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از حفرات توزیع یافته در دیواره سلول‌ها نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، حفرات دارای اشکال نامنظم و تقریباً کشیده شده هستند که به صورت یکنواخت در دیواره‌ها توزیع شده‌اند. نتایج به دست آمده از پردازش تصاویر میکروسکوپی



شکل ۷. الف) کسر سطحی و ب) میزان کرویت حفرات تشکیل شده در دیواره سلولها برحسب درصد کاربید تنگستن اضافه شده.

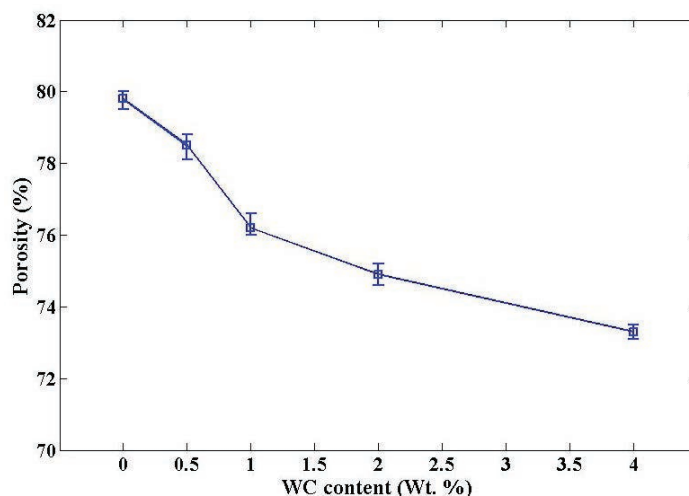


شکل ۸. درصد وزنی انحلال دانه‌های اوره برحسب مراحل مختلف انحلال.

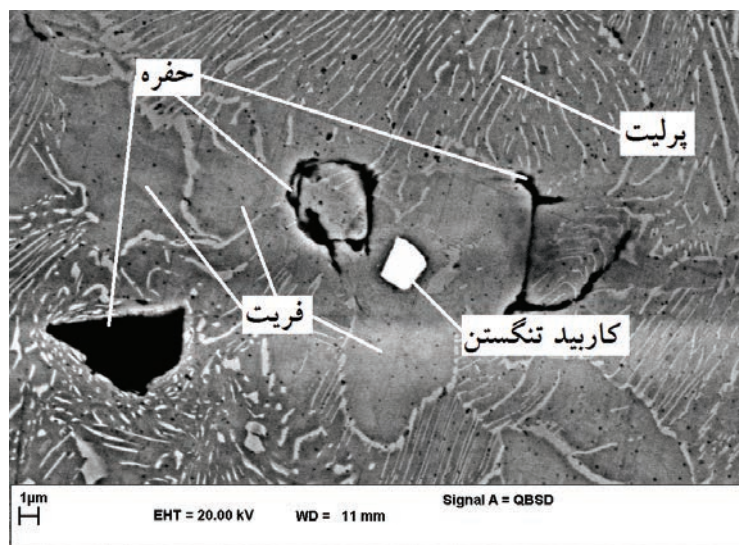
انحلال دانه‌های اوره

خروج دانه‌های اوره از بین دیواره سلول‌های فوم‌های فولادی و تشکیل سلول‌ها در مرحله انحلال توسط آب مقطر انجام می‌شود. در شکل ۸، درصد خروج دانه‌های اوره برحسب تعداد مراحل انحلال نشان داده شده است. مطابق با شکل، افزودن کاربید تنگستن به مخلوط‌های پودری مورد استفاده برای تولید فوم‌های فولادی هیچ‌گونه تاثیری بر روی میزان خروج اوره در مراحل مختلف انحلال و همچنین بر روی سرعت انحلال اوره ندارد. علاوه بر این، نرخ خروج اوره در مراحل اولیه انحلال بسیار زیاد است و تقریباً ۶۰ درصد وزنی اوره در سه مرحله اول خارج می‌شود. سرعت زیاد خروج اوره در مراحل اولیه احتمالاً به وجود مقادیر زیاد اوره در این مراحل انحلال ارتباط پیدا می‌کند. سپس، کانال‌هایی در بین دانه‌های اوره که به صورت جزئی انحلال یافته‌اند، تشکیل می‌شود. بنابراین،

دیواره سلول‌ها به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. حضور ذرات سخت و بسیار مستحکم کاربید تنگستن در دیواره سلول‌ها موجب می‌شود که حفرات بیشتری در دیواره‌ها باقی بماند و در نتیجه، کسر سطحی حفرات بیشتر شود. این احتمال وجود دارد که افزودن ذرات کاربید تنگستن سبب افزایش اصطکاک بین ذرات در طی فرآیند فشردن شود [۲۶ و ۲۷]. علاوه بر این، حضور ذرات کاربید تنگستن در دیواره سلول‌ها باعث می‌شود که تشکیل فاز مذاب در شرایط تفجوشی حالت مذاب کاهش یابد و در نتیجه، ایجاد گلویی در بین ذرات آهن در طی فرآیند تفجوشی حالت مذاب کم شود که این پدیده احتمالاً به بالا بودن انرژی کشش سطحی بین مذاب آهن تشکیل شده و ذرات کاربید تنگستن ارتباط پیدا می‌کند [۲۸] و در نتیجه، شکل حفرات کشیده‌تر خواهد شد و میزان کرویت حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۹. درصد تخلخل فوم‌های فولادی تولید شده بر حسب مقدار کاربید تنگستن افزوده شده.



شکل ۱۰. ریزساختار دیواره سلول‌ها در فوم فولادی حاوی ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن.

سلول‌ها است [۲۲-۲۴]. درصد تخلخل فوم‌های فولادی مطابق با معادله (۲) تعیین شده‌اند و نتایج به دست آمده در شکل ۹ نمایش داده شده‌اند. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، درصد تخلخل فوم‌های فولادی تولید شده با افزایش درصد وزنی کاربید تنگستن کاهش می‌یابد که احتمالاً به بالا بودن چگالی کاربید تنگستن ($15/63 \text{ g/cm}^3$) در برابر چگالی فولاد ($7/8 \text{ g/cm}^3$) ارتباط دارد. در کل، با افزایش ۴ درصد وزنی کاربید تنگستن به فوم‌های فولادی در حدود ۸ درصد میزان تخلخل کاهش پیدا می‌کند.

ریزساختار دیواره سلول‌ها

ریزساختار دیواره سلول‌ها در فوم فولادی حاوی ۲ درصد وزنی کاربید تنگستن افزودنی در شکل ۱۰ نمایش داده شده

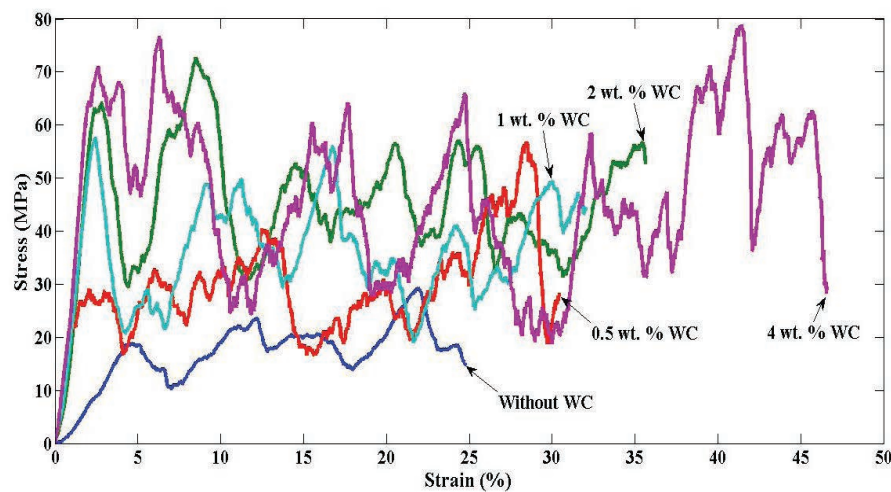
شدت عبور جریان آب مقطر از درون این کانال‌ها کاهش یافته و در نتیجه، میزان خروج اوره نیز کاهش می‌یابد [۲۳ و ۲۴]. این در حالی است که در صورت انحلال پیوسته مواد فضا ساز، امکان اشباع شدن محلول از فضا ساز وجود دارد و در چنین شرایطی میزان انحلال به شدت کاهش می‌یابد [۲۲].

میزان تخلخل

چگالی و میزان تخلخل یکی از مهم‌ترین خصوصیات فوم‌های فلزی به شمار می‌رود که به صورت مستقیم بر روی رفتار فیزیکی و مکانیکی آن‌ها موثر است [۴-۱]. در فوم‌های فولادی تولید شده به روش متالورژی پودر و با استفاده از فضا ساز، درصد تخلخل ناشی از تشکیل سلول‌ها بر اساس خروج دانه‌های فضا ساز و تشکیل حفرات در بین دیواره

جدول ۲. نتایج پردازش تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای کسر سطحی کاربید تنگستن در ریزساختار.

کربید تنگستن (% wt)	۰	۰/۵	۱	۲	۴
کسر سطحی کاربید تنگستن (%)	۰	۰/۲۳	۰/۴۶	۰/۸۹	۱/۹۱



شکل ۱۱. منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم‌های فولادی تولید شده حاوی مقادیر مختلف کاربید تنگستن.

پلاتو مشاهده می‌شود. به بیان دیگر، در ناحیه پلاتو قله‌ها و دره‌های تنشی مشاهده می‌گردد. در شرایطی که دیواره‌های سلول‌ها در برابر فشار اعمالی مقاومت می‌کنند، قله‌های تنشی تشکیل می‌شود. هنگامی که ردیفی از سلول‌ها دچار تخریب شوند، یک دره تنشی در منحنی تنش- کرنش به وجود می‌آید [۸-۶]. تشکیل پلاتو نسبتاً طولی در فوم‌های تولیدی بیانگر جذب انرژی زیاد در این فوم‌ها است و تشکیل نوسانات تنشی تأثیر چندانی بر روی مقدار جذب انرژی ندارد. البته، تخریب ردیفی از سلول‌ها در داخل فوم‌های فولادی منجر به ایجاد شرایط مناسب برای تشکیل ریزترک‌ها در دیواره سلول‌ها می‌شود. علاوه بر این، ریزترک‌هایی در ناحیه پلاتو در قسمت دیواره سلول‌ها تشکیل می‌شود که رشد آن‌ها منجر به شکست نهایی فوم‌های فولادی می‌گردد [۱۱-۱۳]. شکست در زاویه تقریباً برابر ۴۵° در فوم‌های فولادی حاوی کاربید تنگستن مشاهده می‌شود. نکته جالب توجه این است که ارتفاع زیاد قله‌ها و عمق زیاد دره‌ها در ناحیه پلاتو که سبب نوسانات شدید تنشی در منحنی تنش- کرنش شده است، رفتار ماده را نزدیک به رفتار یک ماده شکسته شده نشان می‌دهد که این امر احتمالاً مرتبط به حضور سلول‌ها و وجود حفرات و ریزترک‌ها در دیواره سلول‌ها است. با افزایش میزان کاربید تنگستن تا ۴ درصد وزنی، منحنی‌های تنش- کرنش فشاری به سمت بالا شیف‌ت پیدا می‌کنند و فوم‌های فولادی رفتار مکانیکی بهتری از خود نشان می‌دهند که به اثر کاربید تنگستن بر روی استحکام‌بخشی با ذرات سخت و مستحکم ارتباط دارد. این قابل ذکر است که بهبود رفتار سایشی سطح

است. همان طور که مشاهده می‌شود، ریزساختار فوم‌های فولادی شامل فریت، پرلیت و کاربید تنگستن افزودنی است. تشکیل لایه‌های سمانتیت درون پرلیت به نفوذ کربن ارتباط پیدا می‌کند. کربن افزوده شده به مخلوط پودری در دمای تف‌جوشی (۱۱۲۰ °C) به درون ذرات آهن نفوذ می‌کند و تشکیل کاربید آهن و در نتیجه، پرلیت را سبب می‌شود. کسر سطحی کاربید تنگستن افزوده شده در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط نرم‌افزار پردازش تصویر اندازه‌گیری شده است و نتایج به دست آمده در جدول ۲ ارائه شده است. مطابق با جدول، کسر سطحی کاربید تنگستن اندازه‌گیری شده درون ریزساختار دیواره سلول‌های فوم‌های فولادی با افزایش درصد وزنی کاربید تنگستن افزایش می‌یابد. با توجه به این که چگالی کاربید تنگستن تقریباً دو برابر چگالی فولاد است، مقادیر به دست آمده برای کسر سطحی کاربید تنگستن نیز تقریباً نصف درصد وزنی کاربید تنگستن است.

رفتار فشاری فوم‌های فولادی

منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم‌های فولادی حاوی مقادیر متفاوت کاربید تنگستن در شکل ۱۱ به تصویر کشیده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های تنش- کرنش دارای ناحیه الاستیک، ناحیه پلاتو دندان‌اره‌ای نسبتاً طولی و نقطه شکست هستند. در ناحیه الاستیک، تغییرات تنش بر حسب کرنش تقریباً به صورت خطی است. این در حالی است که نوسانات بسیار شدید تنشی در ناحیه

References

- [1] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley, *Metal Foams: A Design Guide*, p. 125, Butterworth-Heinemann, Massachusetts, 2000.
- [2] H. P. Degischer, B. Kriszt, *Handbook of Cellular Metals, Production, Processing and Applications*, p. 87, Wiley-VCH/Verlag GmbH, Weinheim, 2002.
- [3] J. Banhart, "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, pp. 559-632, 2001.
- [4] Y. Bienvenu, "Application and future of solid foams", *Comptes Rendus Physique*, Vol. 15 (8-9), pp. 719-730, 2014.
- [5] B. H. Smith, S. Szymiszewski, J. F. Hajjar, B. W. Schafer, S. R. Arwade, "Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 71, pp. 1-10, 2012.
- [6] C. Park, S. R. Nutt, "PM synthesis and properties of steel foams", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 288, pp. 111-118, 2000.
- [7] C. Park, S. R. Nutt, "Effects of process parameters on steel foam synthesis", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 297, pp. 62-68, 2001.
- [8] M. H. Golabgir, R. Ebrahimi-Kahrizangi, O. Torabi, H. Tajizadegan, A. Jamshidi, "Fabrication and evaluation of oxidation resistance performance of open-celled Fe(Al) foam by space-holder technique", *Advanced Powder Technology*, Vol. 25, pp. 960-967, 2014.
- [9] H. Sazegaran, A. R. Kiani-Rashid, J. Vahdati Khaki, "Effects of copper content on the shell characteristics of hollow steel spheres manufactured using an advanced powder metallurgy technique", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 23 (4), pp. 434-441, 2016.
- [10] H. Sazegaran, A. R. Kiani-Rashid, J. Vahdati Khaki, "Effects of sphere size on the microstructure and mechanical properties of ductile iron-steel hollow sphere syntactic foams", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 23 (6), pp. 676-682, 2016.
- [11] N. Bekoz, E. Oktay, "Effects of carbamide shape and content on processing and properties of steel foams", *Journal of Materials Processing and Technology*, Vol. 212, pp. 2109-2116, 2012.
- [12] N. Bekoz, E. Oktay, "Mechanical properties of low alloy steel foams: Dependency on porosity and pore size", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 576, pp. 82-90, 2013.
- [13] N. Bekoz, E. Oktay, "High temperature mechanical properties of low alloy steel foams produced by powder metallurgy", *Materials and Design*, Vol. 53, pp. 482-489, 2014.
- [14] Nuray Bekoz, Enver Oktay, "The role of pore wall microstructure and micropores on the mechanical properties of Cu-Ni-Mo based steel foams", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 612, pp. 387-397, 2014.
- [15] I. Mutlu, E. Oktay, "Mechanical properties of sinter-hardened Cr-Si-Ni-Mo based steel foam", *Materials and Design*, Vol. 44, pp. 274-282, 2013.

فولاد کم کربن با افزودن ذرات کاربرد تنگستن قبلاً گزارش شده است [۲۹]. البته باید در نظر داشت که رفتار مکانیکی فوم‌های فولادی شدیداً وابسته به میزان تخلخل، مورفولوژی سلول‌ها و مشخصات ریزساختاری دیواره سلول‌ها است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با وجود این که افزودن کاربرد تنگستن سبب افزایش کسر سطحی و کاهش میزان کرویت حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها می‌گردد، رفتار مکانیکی فوم‌های فولادی تولید شده به علت فعال شدن مکانیزم استحکام‌بخشی با ذرات سخت و مستحکم بهبود پیدا می‌کند.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، فوم‌های فولادی حاوی ۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی کاربرد تنگستن به روش متالورژی پودر و با استفاده از دانه‌های اوره به عنوان فضا ساز تولید شدند و نتایج اصلی زیر حاصل شد.

۱- تخلخل موجود در فوم‌های فولادی شامل سلول‌های ایجاد شده در اثر خروج دانه‌های اوره و حفرات ایجاد شده در بین دیواره سلول‌ها است که هم سلول‌ها و هم حفرات به صورت یکنواخت توزیع یافته‌اند.

۲- افزایش درصد وزنی کاربرد تنگستن تاثیر چندانی بر روی کسر سطحی و میزان کرویت سلول‌ها ندارد و این در حالی است که کسر سطحی و میزان کرویت حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها با افزایش مقدار کاربرد تنگستن به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند.

۳- انحلال دانه‌های اوره توسط آب مقطر در مراحل اولیه انحلال بسیار سریع و سپس، کند می‌شود و پس از ۱۰ مرتبه انحلال در حدود ۹۰ درصد دانه‌های اوره خارج می‌شوند.

۴- با افزایش درصد وزنی کاربرد تنگستن، درصد تخلخل فوم‌های فولادی کاهش پیدا می‌کند.

۵- ریزساختار فوم‌های فولادی تولید شده شامل فریت، پرلیت و ذرات کاربرد تنگستن پراکنده شده است.

۶- منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم‌های فولادی با افزایش درصد وزنی کاربرد تنگستن به سمت بالا شیف‌ت پیدا می‌کنند و نتیجتاً بهبود رفتار مکانیکی مشاهده می‌شود.

- [16] D. P. Mondal, H. Jain, S. Das, A. K. Jha, "Stainless steel foams made through powder metallurgy route using NH_4HCO_3 as space holder", *Materials and Design*, Vol. 88, pp. 430-437, 2015.
- [17] H. Jain, G. Gupta, R. Kumar, D. P. Mondal, "Microstructure and compressive deformation behavior of SS foam made through evaporation of urea as space holder", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 223, pp. 737-744, 2019.
- [18] T. Shimizu, K. Matsuzaki, H. Nagai, N. Kanetake, "Production of high porosity metal foams using EPS beads as space holders", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 558, pp. 343-348, 2012.
- [19] Y. Bienvenu, "Application and future of solid foams", *Comptes Rendus Physique*, Vol. 15 (8-9), pp. 719-730, 2014.
- [20] Y. Hangai, T. Morita, T. Utsunomiya, "Fabrication of Al foam with harmonic structure by Cu addition using sintering and dissolution process", *Materials Letters*, Vol. 230, pp. 120-122, 2018.
- [21] M. Mirzaei, M. H. Paydar, "A novel process for manufacturing porous 316 L stainless steel with uniform pore distribution", *Materials and Design*, Vol. 121, pp. 442-449, 2017.
- [22] M. Mirzaei, M. H. Paydar, "Fabrication and Characterization of Core-Shell Density-Graded 316L Stainless Steel Porous Structure", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 28 (1), pp. 221-230, 2019.
- [23] I. Mutlu, E. Oktay, "Production and aging of highly porous 17-4 PH stainless steel", *Journal of Porous Materials*, Vol. 19 (4), pp. 433-440, 2012.
- [24] H. Sazegaran, M. Hojati, "Effects of copper content on microstructure and mechanical properties of open-cell steel foams", *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, Vol. 26 (5), pp. 588-596, 2019.
- [25] Ha. Sazegaran, A. Feizi, M. Hojati, "Effect of Cr Contents on the Porosity Percentage, Microstructure, and Mechanical Properties of Steel Foams Manufactured by Powder Metallurgy", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, pp. 1-8, 2019.
- [26] M. Hasan, J. Zhao, Z. Huang, L. Chang, H. Zhou, Z. Jiang, "Analysis of sintering and bonding of ultrafine WC powder and stainless steel by hot compaction diffusion bonding", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 133, pp. 39-50, 2018.
- [27] S. H. Chang, S. L. Chen, "Characterization and properties of sintered WC-Co and WC-Ni-Fe hard metal alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 585, pp. 407-413, 2014.
- [28] R. O. Calderon, A. Agna, U. U. Gomes, W. D. Schubert, "Phase formation in cemented carbides prepared from WC and stainless steel powder - An experimental study combined with thermodynamic calculations", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 80, pp. 225-237, 2019.
- [29] A. Liu, M. Guo, H. Hu, "Improved Wear Resistance of Low Carbon Steel with Plasma Melt Injection of WC Particles", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19 (6), pp. 848-851, 2010.