

Research Paper

Effect of Cooling Rate on the Microstructure and Graphite Morphology in the Ductile Iron-Steel Hollow Sphere Syntactic Foams

*Hamid Sazegaran¹, Masoud Pour², Milad Hojati³

1. Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Quchan University of Advanced Technology, Quchan, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Quchan University of Advanced Technology, Quchan, Iran.
3. Production Management of Mashhad Powder Metallurgy Company, Mashhad, Iran.

Citation: Sazegaran H, Pour M, Hojati M. Effect of Cooling Rate on the Microstructure and Graphite Morphology in the Ductile Iron-Steel Hollow Sphere Syntactic Foams. *Metallurgical Engineering*. 2016; 19(1):55-66. <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.40715.1059>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.40715.1059>

ABSTRACT

In this study, ductile iron-steel hollow sphere syntactic foams were manufactured through sand mold casting technique. The steel hollow spheres were synthesized in a fluidized bed. In this process, commercial iron powder was coated on the expanded polystyrene spheres. After coating, de-bonding and sintering processes were carried out. Therefore, the steel hollow sphere produced with 4, 6, and 8 mm in diameter. Then, the steel hollow spheres were randomly filled in the cavities of prepared mold and ductile iron infiltrated into the interstitial spaces between the spheres. Thus, the ductile iron- steel hollow sphere syntactic foams with 4, 6, and 8 mm spheres sizes were manufactured. Microstructural properties of produced foams were investigated by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). In addition, cooling rates in the syntactic foams with different sphere sizes were calculated and effects of cooling rate on the graphite morphology and microstructure were studied. The results revealed that decreasing of the spheres size caused to increasing the cooling rate. Furthermore, by increasing the cooling rate, surface fraction of graphite, graphite circularity, and surface fraction of iron carbide decrease and graphite nodule count increases.

Key words: Syntactic foam, Ductile iron, Steel hollow sphere, Casting, Scanning electron microscopy

■.....■
* **Corresponding Author:**

Hamid Sazegaran, PhD

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

Tel: +98 (51)47344029

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

تأثیر نرخ سرمایش بر ریزساختار و ریخت‌شناسی گرافیت‌ها در فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی

*حمید سازگارانی^۱، مسعود پور^۲، میلاد حجتی^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان، ایران.
 ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان، ایران.
 ۳- مدیر تولید شرکت متالورژی پودر مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

در این پژوهش، فوم‌های ترکیبی یا کامپوزیتی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی به روش ریخته‌گری ماسه‌ای تولید شدند. بدین منظور، گوی‌های توخالی فولادی توسط محفظه تعلیق (Fluidized Bed) و با استفاده از پودرهای آهن تجاری بر روی دانه‌های پلی‌استیرین پوشش‌دهی شدند. پس از پوشش‌دهی، عملیات تجزیه حرارتی و تف‌جوشی منجر به تولید گوی‌های توخالی با قطر ۴، ۶ و ۸ mm گردید. سپس، گوی‌های توخالی فولادی به صورت رندوم درون حفره‌های قالب ماسه‌ای قرار داده شدند و پس از ریخته‌گری مذاب چدن نشکن، فضای خالی میان گوی‌ها پر شد و فوم‌های ترکیبی یا کامپوزیتی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی با قطرهای مختلف تولید شدند. ارزیابی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (EDS) و اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی (۸) صورت گرفت. سپس، نرخ سرمایش در فوم‌های تولیدی با قطر گوی‌های مختلف محاسبه شد و تأثیر آن بر ریخت‌شناسی گرافیت‌ها و ریزساختار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که کاهش اندازه قطر گوی‌ها موجب افزایش نرخ سرمایش می‌شود. علاوه بر این، افزایش نرخ سرمایش موجب کاهش کسر حجمی گرافیت‌ها و میزان کرویت گرافیت‌ها و افزایش کسر حجمی کاربید آهن و تعداد کره‌های گرافیت می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فوم ترکیبی، چدن نشکن، گوی‌های توخالی فولادی، ریخته‌گری، میکروسکوپ الکترونی روبشی

۱. مقدمه

[۸-۶] و یا آلیاژهای پایه آهن [۹] است. البته باید در نظر داشت که از مواد پلیمری نیز به عنوان ماده سازنده زمینه استفاده می‌گردد [۱۰]. در این مواد، جزء دوم اغلب گوی‌های توخالی فلزی یا سرامیکی و یا دانه‌های سرامیکی متخلخل می‌باشد که به روش‌های تولید گوناگونی درون زمینه قرار می‌گیرد. فوم‌های فلزی ترکیبی قابلیت جذب انرژی زیادی دارند و پتانسیل استفاده در کاربردهایی همانند صنایع بسته‌بندی، خودروسازی، هوا-فضا، ساختمانی، نظامی، دریایی و غیره را دارند.

اغلب مطالعات انجام شده در مورد این دسته از مواد به ابداع و توسعه روش‌های مناسب تولید، ارزیابی‌های ریزساختاری و بررسی رفتار فشاری آن‌ها ارتباط پیدا می‌کنند. یکی از روش‌های مرسوم در تولید فوم‌های فلزی ترکیبی، فلزخورانی است که در این روش، مذاب فلز مورد استفاده فضای خالی میان گوی‌های توخالی و یا دانه‌های سرامیکی متخلخل که به صورت رندوم یا منظم درون یک قالب چیده شده‌اند، را با استفاده از فشار اعمالی یا با استفاده از نیروی گرانش پُر می‌کند [۳-۱].

فلزات سلولی و فوم‌های فلزی دسته‌ای جدید از مواد مهندسی پیشرفته هستند که روش‌های تولید و همچنین کاربردهای آن‌ها در حال توسعه می‌باشد. ریخت‌شناسی منحصر به فرد سلول‌ها در فلزات و آلیاژهای سلولی منجر شده است که این مواد ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی جالب توجهی داشته باشند. برخی از این ویژگی‌ها شامل چگالی پایین، سبک بودن، قابلیت جذب زیاد انرژی، هدایت حرارتی پایین، خصوصیات صوتی منحصر به فرد، قابلیت بازیافت ساده و رفتار جالب توجه در هنگام انفجار می‌باشد [۱]. فلزات سلولی و فوم‌های فلزی انواع گوناگونی دارند که فوم‌های فلزی ترکیبی^۱ یا فوم‌های فلزی کامپوزیتی گونه‌ای پُر اهمیت از آن‌ها می‌باشند [۳-۱].

فوم‌های فلزی ترکیبی دسته‌ای از مواد مرکب هستند که جزء زمینه در آن‌ها یک فلز همانند تیتانیوم [۴]، منیزیم [۵]، آلومینیوم

1. Syntactic metallic foams

* نویسنده مسئول:

دکتر حمید سازگارانی

نشانی: قوچان، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع.

تلفن: ۰۲۹-۴۷۳۴۴۰۲۹ (۵۱) ۹۸+

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

مطالعه قرار گرفت. علاوه بر این، تأثیر نرخ سرمایش که وابسته به اندازه گوی‌های توخالی است، بر ریخت‌شناسی گرافیت‌ها و ریزساختار بررسی شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

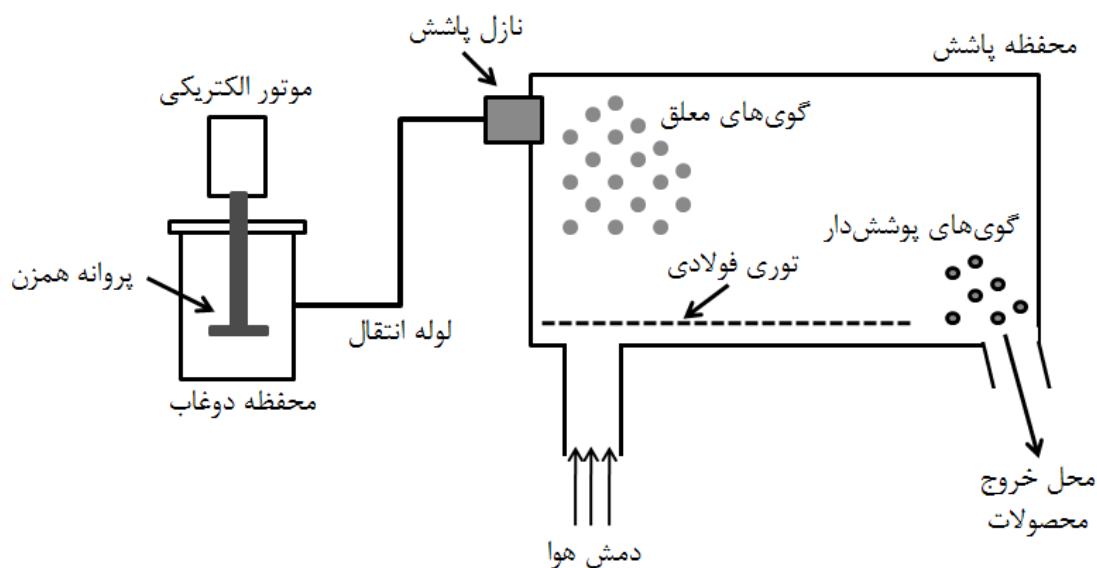
تولید گوی‌های توخالی فولادی

در این پژوهش، دانه‌های پلی‌استیرین انبساط‌یافته (دانه‌های یونولیت یا آکاستیو) با میانگین قطر تقریباً برابر $\frac{3}{5}$ ، $\frac{4}{5}$ و $\frac{7}{5}$ میلی‌متر به عنوان ماده زیرپایه برای تولید گوی‌های توخالی فولادی به کار برده شدند. به منظور تولید مخلوط پودری از پودرهای آهن خالص، مس خالص و کربن استفاده شد. توزیع اندازه ذرات پودر آهن این گونه است که ۳۶ درصد کوچک‌تر از ۶۳ میکرون، ۳۳ درصد بین ۶۳ و ۱۰۰ میکرون و ۳۱ درصد بین ۱۰۰ تا ۱۶۰ میکرون می‌باشد. این در حالی است که اندازه ذرات پودر مس بین ۴۵ تا ۱۰۰ میکرون است و در تهیه مخلوط پودری از پودر بسیار ریز کربن استفاده شد. قابل ذکر است که $\frac{1}{5}$ درصد وزنی پودر کربن و ۱۰ درصد وزنی پودر مس به مخلوط پودر افزوده شد.

افزودن پودرهای کربن و مس به مخلوط پودر به منظور بهبود رفتار مکانیکی گوی‌های توخالی فولادی می‌باشد. برای پوشش‌دهی مخلوط پودری بر روی دانه‌های پلی‌استیرین انبساط‌یافته از سیلیکات سدیم به عنوان چسب استفاده گردید. پس از تهیه مخلوط پودری، فرآیند پوشش‌دهی دانه‌های پلی‌استیرین توسط یک محفظه تعلیق صورت گرفت [۱۸، ۱۹]. به بیان دیگر، دانه‌های پلی‌استیرین و مخلوط پودری به درون محفظه تعلیق وارد می‌شوند و فرآیند پوشش‌دهی بر روی آن‌ها انجام می‌شود. در تصویر شماره ۱، تصویر محفظه تعلیق به صورت شماتیک

میزان تخلخل‌ها، خصوصیات ریزساختاری و رفتار مکانیکی فوم‌های فلزی ترکیبی به ماده پُرکننده یا همان گوی‌ها و دانه‌ها که درون زمینه پراکنده می‌شوند، فلز یا آلیاژ اصلی، درصد گوی‌ها یا دانه‌ها و نحوه چیدمان آن‌ها وابسته می‌باشد. گوی‌های کاربرد سیلیسیم [۱۱]، ذرات کرومی خاکستر [۱۲ و ۱۳]، مروراید سفید [۱۴]، دانه‌های آلومینا [۱۵] و گوی‌های توخالی فلزی [۹] مواد مرسوم هستند که به عنوان جزء دوم در فوم‌های فلزی ترکیبی به کار برده می‌شوند. به عنوان مثال، گوی‌های توخالی آلومینایی در تولید فوم‌های ترکیبی آلیاژ آلومینیوم A۳۸۰ به کار برده می‌شوند [۱۶]. بدیهی است که با تولید و توسعه انواع گوناگون گوی‌های توخالی فلزی به ویژه فولادی، این گوی‌ها به صورت گسترده در تولید فوم‌های فلزی ترکیبی به کار برده می‌شوند. گوی‌های توخالی فولادی توسط روش ریخته‌گری تحت نیروی گرانش برای تولید فوم‌های ترکیبی آلومینیوم متشکل از گوی‌های توخالی فولادی به کار برده شدند. باید در نظر داشت که ریزساختار فوم‌های تولیدی تحت تأثیر دمای مذاب‌ریزی و نرخ سرمایش می‌باشد [۱۷].

در روشی مشابه، گوی‌های توخالی فولادی درون یک قالب قرار داده شدند و فضای بین آن‌ها توسط پودرهای فولاد زنگ‌نزن پُر می‌شود. پس از تفجوشی، فوم‌های فولادی ترکیبی تولید می‌گردد. قابل ذکر است که ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی فوم‌های تولیدی وابسته به اندازه گوی‌ها، میزان زبری سطح گوی‌ها و میزان کربن می‌باشد [۹]. در این پژوهش، گوی‌های توخالی فولادی تولید شده به روش متالورژی پودر به منظور تولید فوم‌های ترکیبی چند نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی به کار برده شدند و ریزساختار فوم‌های تولیدی توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی مورد



تصویر ۱. تصویر شماتیک محفظه تعلیق که به منظور پوشش‌دهی دانه‌های پلی‌استیرین استفاده می‌شود.

معادله ۲ محاسبه گردید [۲۰].

معادله ۱.

$$P=m/V$$

معادله ۲.

$$P\%=[1-(PF/PS)]\times 100$$

که در معادلات فوق، P چگالی، m جرم، V حجم، P% درصد تخلخل، PF چگالی قطعه فومی و PS چگالی جامد یا چگالی قطعه بدون تخلخل می‌باشد. قابل ذکر است که چگالی جامد همان چگالی چدن نشکن ریختگی بدون تخلخل می‌باشد که توسط ریخته‌گری یک نمونه بدون تخلخل به صورت استوانه‌ای شکل با طول ۱۵ mm و قطر ۱۰ mm برابر 7168 kg/m^3 اندازه‌گیری شده است. قابل ذکر است که چگالی در این نمونه نیز بر اساس توزین و تعیین ابعاد محاسبه شد.

ریزساختار

پس از تولید فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌ها توخالی فولادی، قسمتی از آن‌ها توسط وایرکات برش داده شد و نمونه‌های میکروسکوپی با ابعاد $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ تهیه شد. ابعاد نمونه‌های تهیه شده آنقدر بزرگ است که همه اجزاء سازنده قابل مشاهده باشند. در ابتدا، نمونه‌های تهیه شده مانع گرم و سپس، سمباده‌زنی و پولیش کاری شدند. فرآیند حکاکی توسط محلول نایتال ۲ درصد انجام شد. ارزیابی‌های میکروسکوپ نوری قبل و بعد از حکاکی صورت گرفت و تصاویر متالوگرافی در بزرگنمایی‌های گوناگون تهیه شدند.

نرم‌افزار تحلیل تصاویر MIP برای بررسی تصاویر تهیه شده قبل و بعد از حکاکی مورد استفاده قرار گرفت. در تصاویر قبل از حکاکی، ریخت‌شناسی کره‌های گرافیت شامل میانگین تعداد کره‌های گرافیت در واحد سطح و میانگین میزان کرویتکره‌های گرافیتی مورد بررسی قرار گرفت و در تصاویر بعد از حکاکی، کمیت‌های ریزساختاری در زمینه چدن نشکل شامل کسر حجمی کره‌های گرافیتی، کسر حجمی کاربید آهن و کسر حجمی پرلیت اندازه‌گیری شد. قابل ذکر است که کسر سطحی اندازه‌گیری شد و به علت این که با کسر حجمی برابر است به جای آن از کسر حجمی استفاده شد. باید در نظر داشت که اندازه‌گیری‌های به عمل آمده برای تعیین کمیت‌های ریزساختاری بر روی ۱۵ تصویر میکروسکوپی انجام شده است.

نمایش داده شده است. سپس، دانه‌های پلی‌استیرین پوشش یافته توسط هوای گرم خشک شدند و عملیات تجزیه حرارتی در دمای 100°C و به مدت ۱ ساعت درون یک آون الکتریکی و عملیات تفجوشی در دمای 1120°C به مدت ۱ ساعت درون یک کوره صنعتی تونلی انجام شدند. در نتیجه، گوی‌های توخالی فولادی با میانگین قطر ۴، ۶ و ۸ mm تولید شد.

ریخته‌گری فوم‌های ترکیبی

فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی توسط فرآیند ریخته‌گری ماسه‌ای تولید شدند. برای ساخت قالب‌ها از ماسه سیلیسی به همراه ۵ درصد وزنی سیلیکات سدیم به عنوان چسب استفاده شد. قالب‌های ماسه‌ای تهیه شده برای تولید فوم‌های ترکیبی دارای سه حفره با ابعاد $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ می‌باشند. پس از قالب‌گیری، جداره‌های قالب‌ها در معرض گاز دی‌اکسید کربن قرار داده شدند و در اثر انجام واکنش شیمیایی بین سیلیکات سدیم و دی‌اکسید کربن، قالب‌ها مستحکم شدند. سپس، هر کدام از حفره‌های قالب توسط گوی‌های توخالی فولادی با قطرهای متفاوت به صورت رندوم پر شد. مذاب چدن مورد استفاده توسط کوره القایی بدون هسته و فرکانس متوسط تولید شد. افزودن کربن و سیلیسیم به مذاب همراه با شارژ کوره انجام شد. ترکیب شیمیایی مذاب در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

برای افزودن منیزیم به مذاب و انجام فرآیند کرومی‌سازی از روش ساندویچی استفاده شد و ۶ درصد وزنی فرومنیزیم اضافه گردید. قبل از ریخته‌گری، مذاب به درون یک بوته انتقال یافت و به منظور جوانه‌زایی، فروسیلیس حاوی ۶۵ درصد وزنی سیلیسیم درون مذاب اضافه و سپس، فرآیند مذاب‌ریزی درون قالب انجام گرفت. دمای مذاب‌ریزی در حدود 1380°C بود. پس از مذاب‌ریزی، فوم‌های ریختگی درون قالب ماسه‌ای سرد و منجمد شدند و در نتیجه، فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی با قطرهای ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر تولید شدند.

تعیین چگالی و درصد تخلخل

پس از سنگ‌زنی فوم‌های ترکیبی ریخته‌گری شده، نمونه‌های تولیدی توزین شدند و ابعاد آن‌ها اندازه‌گیری شد. حجم نمونه‌های تولیدی بر اساس ابعاد آن‌ها تعیین شد و سپس، چگالی و درصد تخلخل هر کدام از نمونه‌ها تعیین گردید. چگالی فوم‌های ترکیبی بر اساس معادله ۱ اندازه‌گیری شد و درصد تخلخل آن‌ها توسط

جدول ۱. ترکیب شیمیایی مذاب چدن نشکن مورد استفاده.

عنصر	C	Si	Al	Ni	Mn	P	S	Mg	Fe
مقدار (درصد وزنی)	۳/۹۱	۲/۳۸	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۶	<۰/۰۰۵	<۰/۰۰۵	۰/۰۶	باقیمانده

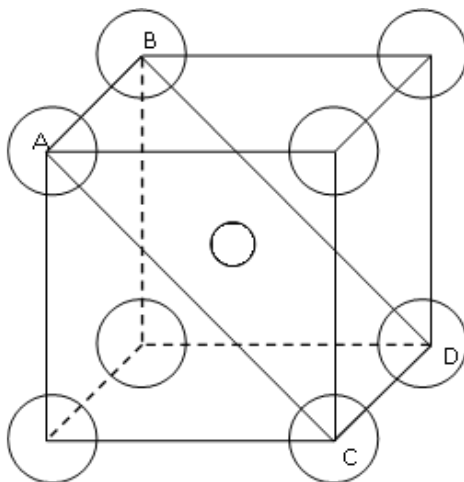
نظم باشند. در صورتی که گوی‌های توخالی فولادی به صورت چیدمان مکعبی ساده (به طوری که در هر گوشه مکعب یک گوی توخالی فولادی قرار بگیرد) در کنار یکدیگر چیده شوند، می‌توان یک کره فرضی کوچک در بین آن‌ها جای داد.

در تصویر شماره ۲، نحوه چیدمان گوی‌های توخالی و کره فرضی و همچنین چهاروجهی ABCD به منظور تعیین نسبت بین شعاع گوی‌های توخالی و شعاع کره فرضی نمایش داده شده است. همان‌طور که در تصویر شماره ۲-ب مشاهده می‌شود، در مثلث قائم الزاویه ABD، هر کدام از اضلاع مقادیر مشخصی دارند و با برقراری رابطه فیثاغورث در این مثلث می‌توان ارتباط بین شعاع گوی‌های توخالی فولادی و کره فرضی را محاسبه کرد. بنابراین، معادله زیر به دست می‌آید [۲۲].

معادله ۴.

$$r/R=0.732$$

که در این معادله، شعاع گوی‌های توخالی فولادی و شعاع کره فرضی است که می‌تواند در بین گوی‌های توخالی قرار گیرد. در نتیجه، نسبت شعاع کره فرضی به شعاع گوی‌های توخالی فولادی برابر ۰/۷۳۲ می‌باشد. محاسبات فوق در صورتی انجام شده است که گوی‌ها کاملاً به یکدیگر چسبیده باشند و در شرایطی که از یکدیگر فاصله داشته باشند، نسبت شعاع‌ها بین ۰/۷۳۲ و ۱ خواهد بود. بنابراین، با استفاده از قطر گوی‌های توخالی می‌توان قطر کره فرضی را محاسبه کرد. حال می‌توان میانگین ضخامت مذاب قرار گرفته در بین گوی‌های توخالی فولادی را برابر با میانگین قطرهای کره فرضی با نسبت شعاع‌های ۰/۷۳۲ و ۱ اختیار کرد. در جدول شماره ۲، قطر کره فرضی بر حسب نسبت ۰/۷۳۲ و میانگین ضخامت مذاب قرار گرفته در بین گوی‌های توخالی فولادی ارائه شده است.



علاوه بر این، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 1450VP نیز برای انجام ارزیابی‌های ریزساختاری استفاده شد. قبل از انجام مطالعات میکروسکوپ الکترونی، پوشش آلیاژ Au-Pd بر روی نمونه‌های مانت شده توسط دستگاه پوشش دهی Sputter Coater SC7620 به منظور رسانایی بیشتر سطح نمونه‌ها ایجاد شد. 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.

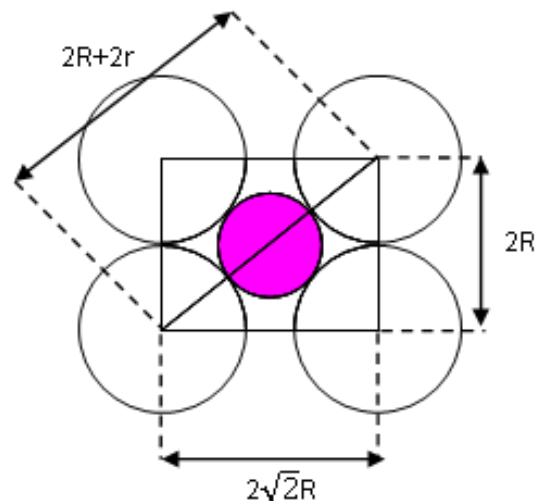
تعیین نرخ سرمایش

بر اساس تحلیل‌های نظری در ارتباط با فرآیند انجماد در چندین‌های نشکن، نرخ سرمایش به قابلیت ماده قالب برای جذب حرارت (Q)، گرمای ویژه چندین نشکن (C)، ضخامت دیواره قطعه ریختگی (S) و دمای مذاب‌ریزی یا همان دمای اولیه مذاب در هنگام ورود به قالب (T_1) وابسته است و بر اساس معادله زیر تعیین می‌شود [۲۱].

معادله ۳.

$$Q = \frac{8T_s \alpha^2}{\pi c^2 s^2 \ln \frac{T_1}{T_s}}$$

که در این معادله، نرخ سرمایش و دمای تعادلی یوتکتیک گرافیت (1167°C) [۲۱] است. برای استفاده از این معادله در شرایط ریخته‌گری فوم‌های ترکیبی چندین نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی، تعیین ضخامت مذاب قرار گرفته در بین گوی‌ها ضرورت پیدا می‌کند. همان‌طور که قبلاً بیان شد، گوی‌ها به صورت رندوم چیده می‌شوند. اما به منظور تعیین ضخامت مذاب قرار گرفته در بین گوی‌ها، فرض می‌شود که گوی‌ها دارای



تصویر ۲. الف) نمایش چیدمان گوی‌های توخالی فولادی (گوی‌های سفید) و کره فرضی قرار گرفته در بین آن‌ها (گوی خاکستری) و ب) نمایش ارتباط بین اضلاع و قطر در چهاروجهی DCBA.

جدول ۲. قطر کره فرضی بر حسب نسبت‌های ۱ و ۰/۲۳۷ و میانگین ضخامت مذاب محاسبه شده.

قطر کره فرضی بر حسب نسبت ۱ (cm)	قطر کره فرضی بر حسب نسبت ۰/۲۳۷ (cm)	میانگین ضخامت مذاب چدن (cm)
۰/۴	۰/۲۹۳	۰/۳۴۶
۰/۶	۰/۴۳۹	۰/۵۲۰
۰/۸	۰/۵۸۶	۰/۶۹۳

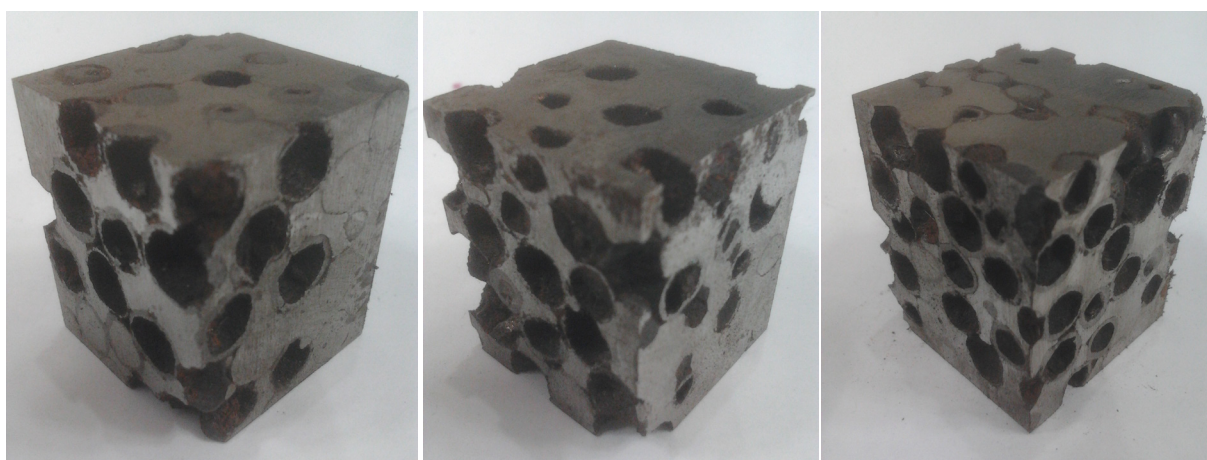
۳. نتایج و بحث

چگالی و درصد تخلخل

همان‌طور که مشاهده می‌شود، چگالی و درصد تخلخل با کاهش قطر گوی‌های توخالی فولادی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. در فوم‌های تولید شده توسط گوی‌های توخالی فولادی با قطر ۴ mm و گوی‌های توخالی با قطر ۸ mm به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان تخلخل وجود دارد.

با کاهش قطر گوی‌های توخالی فولادی، میزان تراکم چیدمان گوی‌ها درون محفظه قالب ریخته‌گری افزایش می‌یابد. در نتیجه، فضاهای خالی کمتری در بین گوی‌ها برای پر شدن توسط مذاب چدن نشکن به وجود می‌آید. بنابراین، میزان تخلخل با کاهش اندازه گوی‌های توخالی فولادی افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که گوی‌های توخالی فولادی مورد استفاده از مخلوط پودرهای آهن حاوی ۱۰ درصد وزنی مس افزودنی تولید شده‌اند. بنابراین، چگالی فوم‌های تولیدی در اثر افزودن مس به مخلوط پودری

با استفاده از فرآیند ریخته‌گری ماسه‌ای، فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی حاوی گوی‌هایی با میانگین قطر ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر تولید شدند. در تصویر شماره ۳ فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی که سنگ‌زنی شده‌اند، نمایش داده شده است. پس از سنگ‌زنی، فوم‌های تولیدی توزین شدند و سپس، چگالی و درصد تخلخل هر کدام از آن‌ها محاسبه گردید. در جدول شماره ۳، مقدار چگالی و درصد تخلخل فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی ارائه شده است.



تصویر ۳. فوم‌های چدن نشکن متشکل از گوی‌های فولادی پس از فرآیند سنگ‌زنی؛ الف) نمونه FC-4mm، ب) نمونه FC-6mm و ج) نمونه FC-8mm.

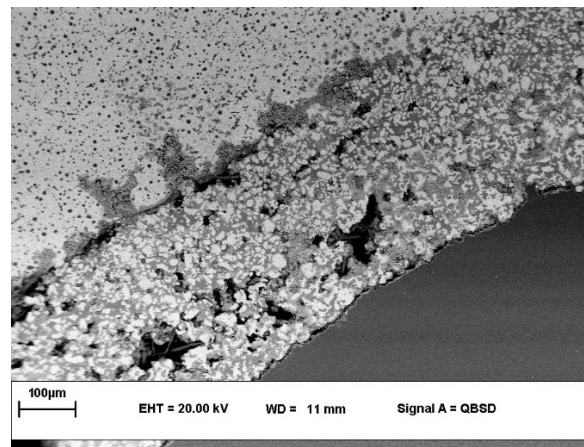
جدول ۳. میزان چگالی و درصد تخلخل فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی.

قطر گوی‌ها (mm)	چگالی (kg/m ^۳)	تخلخل (%)
۴	۴۸۲۴	۳۲/۷
۶	۵۰۸۹	۲۹/۰
۸	۵۱۹۳	۲۷/۵

با قطر ۸ mm نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دیواره‌های گوی توخالی فولادی توسط چدن نشکن احاطه شده‌اند. قابل ذکر است که در اغلب تصاویر میکروسکوپی، فقط گرافیت‌های کروی شکل حضور دارند، اما در برخی از قسمت‌ها، ورقه‌های گرافیتی نیز تشکیل شده است.

علاوه بر این، همان‌طور که در تصویر شماره ۵ نشان داده شده است، دیواره گوی توخالی از پودرهای تف‌جوشی شده به همراه مقادیر زیادی از حفرات و تخلخل‌ها و همچنین سیلیکات سدیم باقیمانده تشکیل شده است. قابل ذکر است که در اغلب نمونه‌های بررسی شده، اتصال خوبی در فصل مشترک بین گوی‌های توخالی فولادی و زمینه چدن نشکن مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در تصاویر شماره ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، تصاویر میکروسکوپی از سه ناحیه متفاوت تشکیل شده‌اند که شامل ناحیه چدن نشکن، ناحیه دیواره گوی‌های توخالی فولادی و ناحیه فصل مشترک بین آن‌ها است. وجود چدن نشکن در فضای خالی میان گوی‌های توخالی فولادی موجب اتصال بسیار خوب گوی‌ها به یکدیگر می‌شود که احتمالاً بر روی رفتار مکانیکی نیز تأثیرگذار خواهد بود [۹، ۱۶، ۱۷]. قابل ذکر است که در برخی از تصاویر میکروسکوپی مشاهده می‌شود که اتصال ناقص در بخش‌های کوچکی از فصل مشترک گوی‌های توخالی و چدن

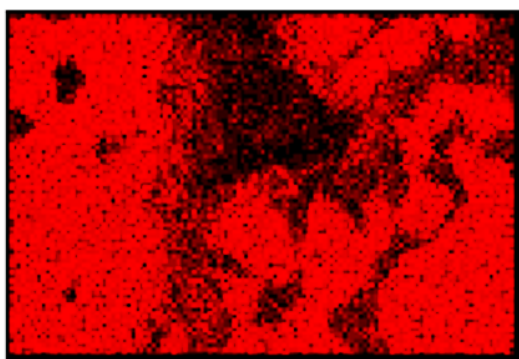


تصویر ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فوم ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی با قطر ۸ mm

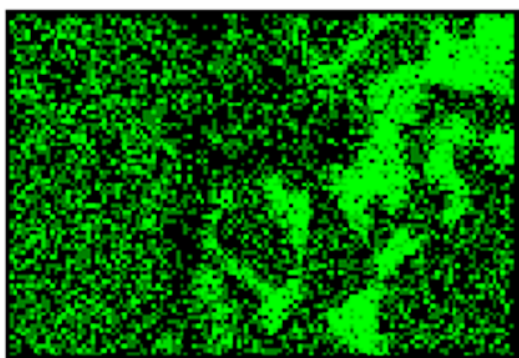
مورد استفاده در ساخت گوی‌های توخالی افزایش می‌یابد و این امر موجب کاهش میزان تخلخل اندازه‌گیری شده می‌گردد.

ارزیابی‌های ریزساختاری

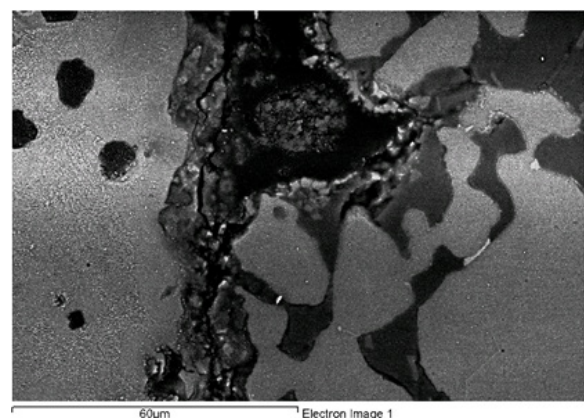
در تصویر شماره ۴، یک تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فوم ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی



Fe Ka1



Si Ka1



60μm

Electron Image 1



Cu Ka1

تصویر ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه نتایج آنالیز SDE به صورت نقشه‌ای از عناصر آهن، مس و سیلیسیم.

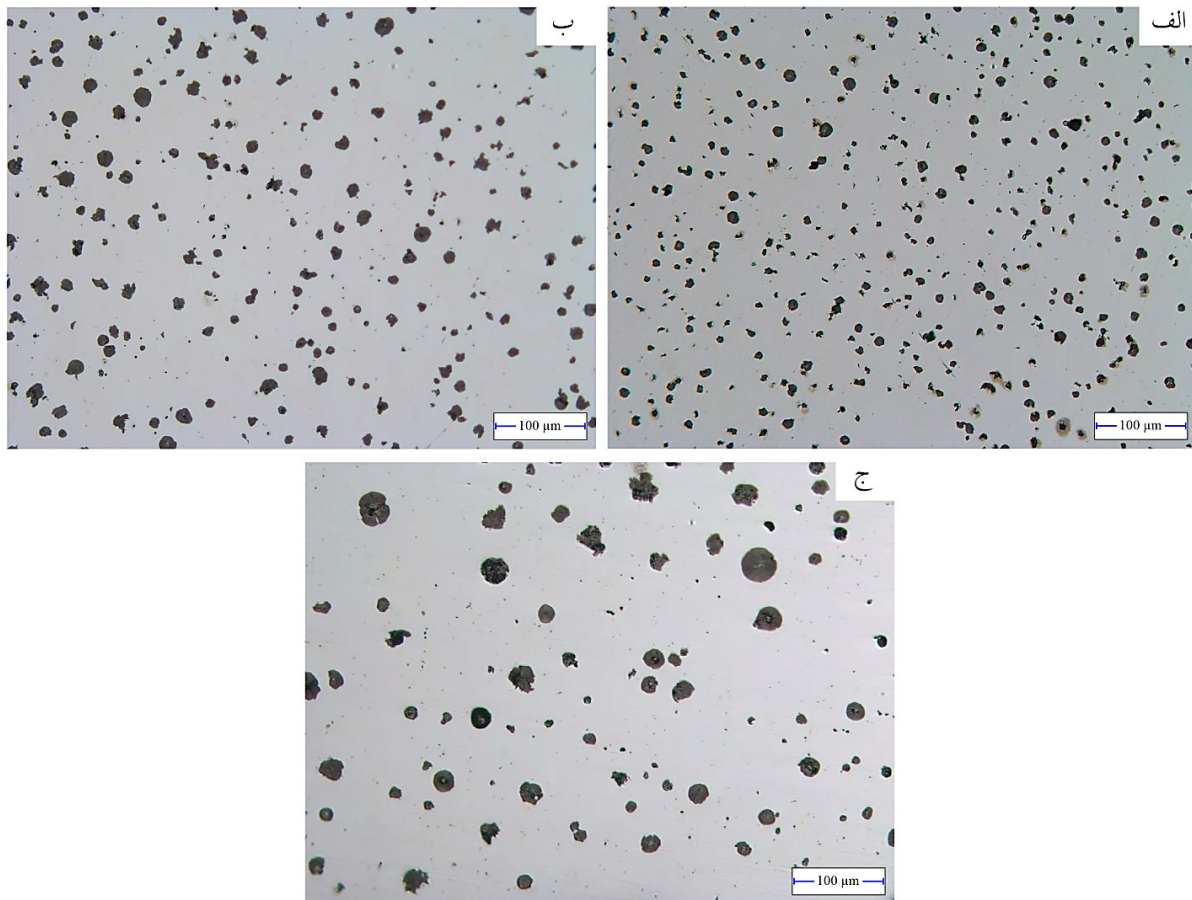
نشکن ایجاد شده است.

اندازه، تعداد، شکل و نحوه توزیع کره‌های گرافیت، ریزساختار زمینه و همچنین ویژگی‌های مکانیکی فوم‌های چدن نشکن موثر باشد [۲۱، ۲۳-۲۷].

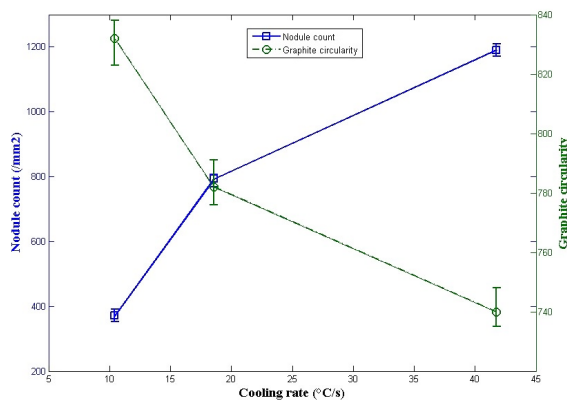
نرخ سرمایش تابعی از ضخامت قطعات ریختگی، ماده قالب، ضخامت جداره قالب و دمای مذاب‌ریزی است [۲۱ و ۲۴]. با توجه به این که در فرآیند ریخته‌گری فوم‌های چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی، ماده قالب مورد استفاده شده، ضخامت جداره قالب و دمای مذاب‌ریزی ثابت است، بنابراین، نرخ سرمایش وابسته به تغییر در ضخامت مذاب قرار گرفته در میان گوی‌های توخالی فولادی خواهد بود. با کاهش قطر گوی‌های توخالی فولادی، ابعاد فضاهای خالی میان گوی‌های چیده شده درون قالب ریخته‌گری کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، ضخامت مذاب چدن نشکن وارد شده در بین گوی‌ها با کاهش قطر آن‌ها کم می‌شود. در نتیجه، با توجه به این که گوی‌های توخالی فولادی به عنوان مبرد عمل می‌کنند، میزان انتقال حرارت و نرخ سرمایش افزایش خواهد یافت [۲۱ و ۲۳-۲۷]. بنابراین، در اثر زیاد شدن نرخ سرمایش، ریخت‌شناسی گرافیت‌ها شدیداً تغییر می‌کند. در تصویر شماره ۷، تغییرات نرخ سرمایش برحسب میانگین ضخامت محاسبه شده

تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از حکاکی در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر از زمینه چدن نشکن در فوم‌های ترکیبی متشکل از گوی‌های توخالی فولادی با قطرهای ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر در تصویر شماره ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ریخت‌شناسی گرافیت‌ها شامل میانگین تعداد کره‌های گرافیت در واحد سطح و میانگین میزان کرویت کره‌های گرافیتی با تغییر در اندازه گوی‌های توخالی فولادی تغییر می‌کند. عوامل موثر بر ریخت‌شناسی گرافیت‌ها و همچنین ریزساختار زمینه در چدن‌های نشکن شامل ترکیب شیمیایی، دمای مذاب‌ریزی، نرخ سرمایش و نوع عملیات حرارتی انجام شده بر روی آلیاژ می‌باشد [۲۱].

با توجه به این که ترکیب شیمیایی و دمای مذاب‌ریزی در همه فوم‌ها یکسان است و هیچ‌گونه عملیات حرارتی بر روی فوم‌ها صورت نگرفته است، بنابراین نرخ سرمایش عامل اصلی موثر بر ریخت‌شناسی گرافیت‌ها و همچنین ریزساختار خواهد بود. در نتیجه، این انتظار وجود دارد که تغییرات نرخ سرمایش ایجاد شده در اثر اختلاف در اندازه گوی‌های توخالی فولادی بر



تصویر ۶ تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از حکاکی از زمینه چدن نشکن فوم‌های ترکیبی متشکل از گوی‌های توخالی فولادی با قطرهای؛ الف) ۴ mm (ب) ۶ mm و ج) ۸ mm



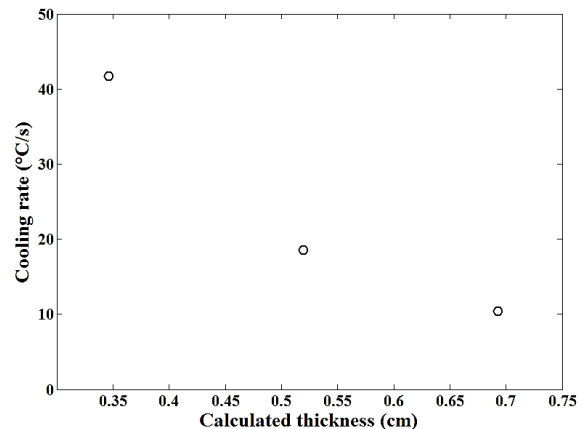
تصویر ۸. تغییرات تعداد کره‌ها و میزان کرویت گرافیت بر حسب نرخ سرمایش.

افزایش مقدار کاربید آهن در زمینه چدن نشکن در فوم‌های متشکل از گوی‌های توخالی با قطر ۴ mm کاهش یافته است.

در ریزساختار قسمت چدن نشکن در فوم‌های متشکل از گوی‌هایی با قطر ۶mm (مطابق با اشکال ۹-ج و ۹-د)، گرافیت‌های کروی شکل و کاربید آهن (سمانتیت) دندریتی در زمینه فریتی-پرلیتی مشاهده می‌شوند. در این ریزساختار، فاز فریت اطراف گرافیت‌ها را احاطه کرده است (ساختار چشم گاوی) و در کنار آن مقادیر کمی از پرلیت تشکیل شده است. علاوه بر فریت و پرلیت، کاربید آهن نیز در زمینه فریتی تشکیل شده‌اند. قابل ذکر است که مقدار کاربید آهن در این نمونه در مقایسه با ریزساختار قسمت چدنی فوم‌های متشکل از گوی‌هایی با قطر ۴ mm کمتر است که به ضخامت بیش‌تر چدن قرار گرفته در بین گوی‌های توخالی فولادی ارتباط پیدا می‌کند.

در ریزساختار زمینه چدن نشکن فوم‌های ترکیبی متشکل از گوی‌های توخالی با قطر ۸mm، علاوه بر این که اندازه کره‌ها درشت‌تر شده است، مقدار پرلیت نیز افزایش یافته است (مطابق با اشکال ۹-و و ۹-ز). تشکیل فاز فریت در اطراف گرافیت‌های کروی در این نمونه‌ها به صورت واضح‌تر مشاهده می‌شود (ساختار چشم گاوی). در کنار فریت‌های احاطه‌کننده گرافیت‌های کروی، پرلیت با مقادیر نسبتاً بیش‌تری در مقایسه با سایر نمونه‌ها تشکیل شده است.

کسر حجمی فازهای گرافیت، کاربید آهن، فریت و ساختار پرلیت توسط نرم‌افزار پردازش تصویر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و نتایج به دست آمده در جدول شماره ۴ ارائه شده است. مطابق با جدول، با افزایش قطر گوی‌های توخالی فولادی (یا کاهش نرخ سرمایش)، کسر حجمی کاربید آهن کاهش و کسر حجمی گرافیت و پرلیت افزایش می‌یابد. قابل توجه است که در زمینه چدن نشکن فوم متشکل از گوی‌های توخالی با قطر ۴mm، مقدار پرلیت صفر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد فریت در نمونه‌های متشکل از گوی‌هایی با قطر ۶ و ۸ میلی‌متر تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهد، اما درصد فریت در نمونه متشکل از

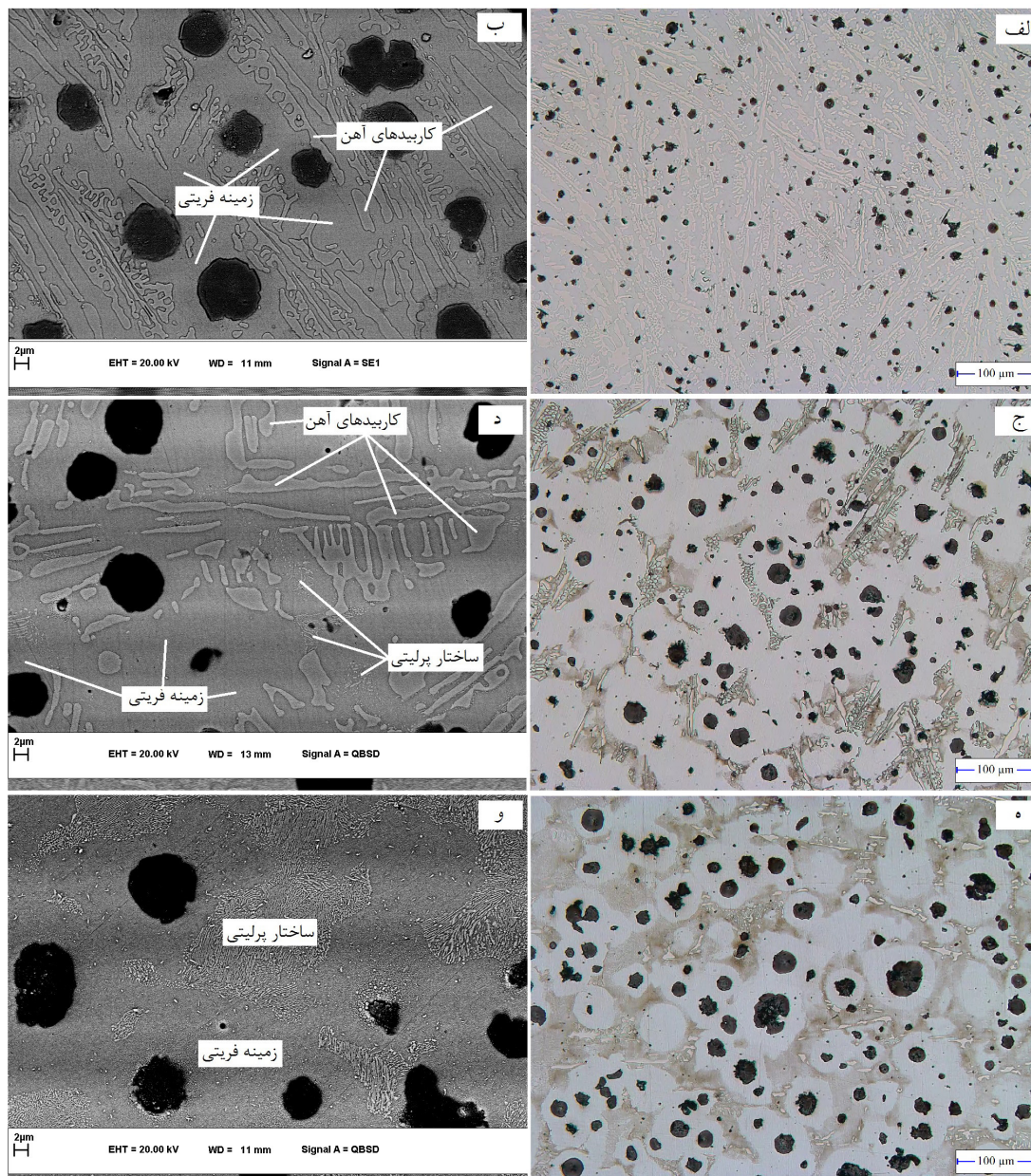


تصویر ۷. تغییرات نرخ سرمایش بر حسب میانگین ضخامت محاسبه‌شده.

برای چدن نشکن قرار گرفته در بین گوی‌های توخالی نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش میانگین قطر گوی‌های توخالی فولادی نرخ سرمایش کاهش می‌یابد.

اندازه کره‌های گرافیت با افزایش قطر گوی‌های توخالی فولادی (کاهش نرخ سرمایش) افزایش می‌یابد. توسط نرم‌افزار پردازش تصاویر میکروسکوپی، میانگین تعداد کره‌های گرافیت در واحد سطح و میانگین میزان کرویت کره‌های گرافیت در نمونه‌های تولید شده اندازه‌گیری شده است. در تصویر شماره ۸، نتایج به دست آمده از پردازش تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از حکاکی در مورد ریخت‌شناسی کره‌های گرافیت ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین تعداد کره‌های گرافیت در واحد سطح با افزایش قطر گوی‌ها (یا کاهش نرخ سرمایش) کاهش می‌یابد. در زمینه چدن نشکن فوم‌های متشکل از گوی‌های توخالی فولادی با قطرهای ۴ و ۸ میلی‌متر به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تعداد کره‌های گرافیت در واحد سطح مشاهده می‌شود. علاوه بر این، میانگین میزان کرویت با افزایش قطر گوی‌ها (یا کاهش نرخ سرمایش) افزایش می‌یابند.

در تصویر شماره ۹، تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی از زمینه چدن نشکن در فوم‌های ترکیبی متشکل از گوی‌های توخالی فولادی بعد از حکاکی به ترتیب در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر و ۱۰۰۰ برابر نشان داده شده است. در ریزساختار فوم چدنی متشکل از گوی‌های توخالی با قطر ۴ mm (مطابق با اشکال ۹-الف و ۹-ب)، شبکه‌ای دندریتی از سمانتیت یا کاربید آهن در زمینه فریتی مشاهده می‌شود. قابل ذکر است که در ریزساختار چدن نشکن در این نمونه، هیچ‌گونه پرلیتی تشکیل نشده است. تشکیل مقدار زیادی از سمانتیت دندریتی یا کاربید آهن در این نمونه بیانگر این است که نرخ سرمایش در این نمونه بسیار زیاد است. تشکیل مقادیر زیادی از کاربید آهن موجب می‌شود که مقداری از کربن موجود در زمینه صرف تشکیل آن‌ها شود. بنابراین، کسر حجمی کره‌های گرافیت با



تصویر ۹. تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی بعد از حکاکی از زمینه چدن نشکن؛ الف) و ب) گوی‌های قطر ۴ mm (ج و د) گوی‌های قطر ۸ mm (ه و و) گوی‌های قطر ۸ mm

جدول ۴. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های نرم‌افزاری در مورد ریزساختار.

نمونه	کسر حجمی گرافیت (%)	کسر حجمی کاربید آهن (%)	کسر حجمی فریت (%)	کسر حجمی پرلیت (%)
FC-4mm	۵/۲	۳۳/۶	۶۱/۲	۰/۰۰
FC-6mm	۶/۶	۱۱/۸	۶۷/۲۱	۱۴/۵۱
FC-8mm	۷/۱	۴/۶۶	۶۵/۷۳	۲۲/۵۱

References

- [1] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. H.G.N. Hutchinson and H.G.N. Wadley, Metal foams; a Design Guide, Butterworth-Heinemann, Massachusetts, 2000.
- [2] J. Banhart, Prog.Mater. Sci. 456, 559-632, 2001.
- [3] Despois, J. F., Marmottant, A., Salvo, L., Mortensen, A., Mater. Desi. 25, 189,195, 2007.
- [4] X. Xiao-bing, W. Li-qiang, W. Min-min, L. Wei-jie, Z. Di, Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 22,188-192, 2012.
- [5] C.J. Poteet, Mater. Sci. Lett.15, 1015-1021, 1996.
- [6] P.K. Rohatgi, R.Q. Guo, H. Iksan, E.J. Borchelt, R. Asthana, Mater. Sci. Eng. A 244, 2685-2692, 1998.
- [7] A.H. Brothers, D.C. Dunand, Appl. Phys. Lett. 84, 1108-1114, 2003.
- [8] L.P. Zhang, Y.Y. Zhao, J. Compos. Mater. 41, 2105-2111, 2007.
- [9] A. Rabiei, M. Garcia-Avila, Mater. Sci. Eng. A 564, 539-547, 2013.
- [10] N. Gupta, V.C. Shunmugasamy, Mater. Sci. Eng. A528, 7596- 7605, 2011.
- [11] D.D. Luong, O.M. Strbik Iii, V.H. Hammond, N. Gupta, K. Cho, J. Alloy. Compd. 550, 412-422, 2013.
- [12] Y. Mu, G. Yao, J. Mater. Eng. Perform. 19, 995-997, 2010.
- [13] Z. Dou, L. Jiang, G. Wu, Q. Zhang, Z. Xiu, G. Chen, Scripta Mater. 57, 945-948, 2007.
- [14] M.A. Sulong, M. Taherishargh, I.V. Belova, G.E. Murch, T. Fiedler, Comp. Mater. Sci. 109, 258-265, 2015.
- [15] C. San Marchi, F. Cao, M. Kouzeli, A. Mortensen, Mater. Sci. Eng. A 337, 202-211, 2002.
- [16] J.A. Santa Maria, B.F. Schultz, J.B. Ferguson, N. Gupta, P.K. Rohatgi, J. Mater. Sci. 49, 1267-1278, 2014.
- [17] L.J. Vendra, J.A. Brown, A. Rabiei, J Mater Sci 46, 4574-4581, 2011.
- [18] H. Sazegaran, A.R. Kiani-Rashid, J. Vahdati Khaki, Int. J.Min.Metall.Mater. 23(4), 434-441, 2016.
- [19] M. Amirjan, H. Khorsand, M. Khorasani, Int. J. Min. Metall. Mater.21 (11), 1146- 1151, 2014.
- [20] R. M. Hathaway, P. K. Rohatgi, Proc. Int. Conf. High temperature capillarity, 1997, Cracow, Poland.
- [21] M. Gorny and E. Tyralla, JMEPEG 22, 300-305, 2013.
- [۲۲] علیرضا کیانی رشید و حمید سازگارن، بلورشناسی مواد، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ص: 78-80. 1389.
- [23] F. Binczyk, A. Kowalski, J. Furmanek, Arch. Found. Eng. 7, 115-118, 2007.
- [24] M.M. Jabbari Behnam, P. Davami, N. Varahram, Mater. Sci. Eng. A528 (2), 583-588, 2010.
- [25] Yun-Cheng Peng, Hui-Jin Jin, Jin-Hai Liu, Guo-Lu Li, Mater. Chara.72, 53-58, 2012.

گوی‌های توخالی با قطر ۴mm نسبت به سایر نمونه‌ها کم‌تر است. در کل، می‌توان کاهش درصد کاربید آهن در زمینه و افزایش درصد پرلیت با افزایش قطر گوی‌های توخالی فولادی را به نرخ سرمایش ارتباط داد. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، با کاهش قطر گوی‌های توخالی، ضخامت مذاب چدن قرار گرفته در بین گوی‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه، نرخ سرمایش افزایش خواهد یافت.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فوم‌های ترکیبی با کامپوزیتی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی با قطرهای ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر به روش ریخته‌گری تولید شدند و ارزیابی‌های ریزساختاری و ریخت‌شناسی گرافیت‌ها بر روی نمونه‌های تولیدی صورت گرفت و نتایج به دست آمده در زیر ارائه شده‌اند.

درصد تخلخل در فوم‌های ترکیبی چدن نشکن تولید شده بین ۲۷/۵ و ۳۲/۷ می‌باشد و با کاهش اندازه گوی‌های توخالی فولادی، درصد تخلخل افزایش می‌یابد.

اندازه گوی‌های توخالی فولادی بر نرخ سرمایش موثر است و نرخ سرمایش بین ۱۰ تا ۴۲ °C/S محاسبه شده است.

ریخت‌شناسی گرافیت‌ها و ریزساختار زمینه به نرخ سرمایش یا اندازه گوی‌های توخالی وابسته است.

با کاهش اندازه گوی‌های توخالی فولادی یا افزایش نرخ سرمایش، تعداد کره‌های گرافیت افزایش و میزان کرویت کره‌های گرافیتی کاهش می‌یابد.

با کاهش اندازه گوی‌های توخالی فولادی یا افزایش نرخ سرمایش، کسر حجمی کره‌های گرافیت و کسر حجمی پرلیت کاهش و کسر حجمی کاربید آهن افزایش می‌یابد.

[26] K. H. W. Seah, J. Hemanth, S. C. Sharma, J. Mater. Sci. 33, 23-28, 1998.

[27] E. Frás, M. Gorny, H.F. Lopez, Int. Foundry. Res. 61, 2-10, 2009.