

Research Paper

Effect of Cell Size on the Microstructure and Mechanical Properties of Hollow Alumina Spheres-Ductile Iron Syntactic Foams

*Hamid Sazegaran

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

Citation: Sazegaran H . Effect of Cell Size on the Microstructure and Mechanical Properties of Hollow Alumina Spheres-Ductile Iron Syntactic Foams. Metallurgical Engineering 2017; 19(4) 273-284 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.51774.1106>

 : <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.51774.1106>

ABSTRACT

Cellular metals and metallic foams as a class of new engineering materials have unique properties and thus, these materials can be successfully used in many industrial applications. In this study, hollow alumina spheres were used to create cells and cell walls in ductile iron. Alumina hollow spheres were manufactured by polystyrene beads as the substrate and using the coating the polystyrene beads by mixture of alumina powder and sodium silicate as binder. Sand casting technique was used to produce ductile iron syntactic foams. In this technique, alumina hollow spheres were placed into the mold cavity and then, the molten metal was poured. Casting specimens were grinded and then, light microscopy, scanning electron microscopy evaluations, and compression testing were carried out. The results were shown that reduced cell sizes, improved compressive behavior of casting foams. The microstructure of casting specimens consisted of pearlite and ferrite surrounded nodular graphite. In the specimens with smaller alumina hollow spheres, the thickness of the cell walls decreases and cooling rate increases. Therefore, carbide phases were formed in microstructure.

Keywords: Syntactic foam, ductile iron, alumina hollow spheres, graphite phase.

■.....■

* *Corresponding Author:*

Hamid Sazegaran, PhD

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

Tel: (+98) 9352693344

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

تأثیر اندازه سلول‌ها بر ریزساختار و رفتار مکانیکی فوم‌های چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی

*حمید سازگاران

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

چکیده

فلزات سلولی و فوم‌های فلزی که به عنوان دسته‌ای از مواد مهندسی جدید شناخته می‌شوند، دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند و در نتیجه، می‌توانند در بسیاری از کاربردهای صنعتی به صورت موفقیت‌آمیز مورد استفاده قرار گیرند. در این پژوهش، گوی‌های توخالی آلومینایی به منظور ایجاد سلول‌ها در چدن نشکن به کار گرفته شدند. فرآیند تولید گوی‌های توخالی آلومینایی شامل پوشش‌دهی دانه‌های پلی‌استیرن به عنوان زیرلایه توسط مخلوطی از پودرهای آلومینا و سیلیکات سدیم و استفاده از عملیات حرارتی به منظور خروج پلی‌استیرن می‌باشد. سپس، به منظور تولید فوم‌هایترکیبی چدنی از روش ریخته‌گری ماسه‌ای استفاده گردید. بعد از تهیه قالب، گوی‌های توخالی آلومینایی درون حفرات قالب جای داده شدند و در نهایت، مذاب‌ریزی انجام شد. نمونه‌های ریخته‌گری سنگ‌زنی شدند و مطالعات میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون فشار بر روی آن‌ها صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که کاهش اندازه سلول‌ها منجر به بهبود رفتار فشاری فوم‌های چدنی می‌گردد. ریزساختار نمونه‌های تولیدی شامل پرلیت به همراه گرافیت‌های کروی احاطه شده با فریت است. در نمونه‌هایی که حاوی گوی‌های آلومینایی کوچک‌تر هستند، ضخامت دیواره سلول‌ها کاهش و بنابراین، سرعت سرد شدن افزایش می‌یابد. در نتیجه، سریع سرد شدن دیواره سلول‌ها در این نمونه‌ها موجب ایجاد فاز کاربید در ریزساختار می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فوم ترکیبی، چدن نشکن، گوی‌های توخالی آلومینایی، فاز گرافیت.

۱. مقدمه

با مواد سازنده خود نیستند [۶-۷]. این مشکل می‌تواند به حضور معایب مورفولوژیکی موجود در ساختار سلولی و همچنین آسیب دیدن دیواره‌های سلول‌ها مرتبط شود [۸]. عدم یکنواختی اندازه سلول‌ها و توزیع نامناسب آن‌ها نیز بر رفتار فیزیکی و مکانیکی محصول نهایی تأثیرات منفی خواهد گذاشت. بدیهی است که به منظور برطرف کردن نیازهای صنعتی و تولید فوم‌های فلزی با ویژگی‌های مورد انتظار باید این معایب ساختار سلولی برطرف گردد [۹].

در صورتی که اندازه سلول‌ها، توزیع آن‌ها، نحوه چیدمان آن‌ها و ضخامت دیواره‌ها کنترل شود، فوم‌هایی با ویژگی‌های مشخص تولید خواهد شد. در این راستا، شیوه‌ای توسعه یافته است که در آن از گوی‌های توخالی فلزی یا سرامیکی برای ایجاد سلول‌ها استفاده می‌گردد. باید در نظر داشت که به منظور تولید گوی‌های توخالی روش‌های گوناگونی ابداع شده است [۱۰-۱۴]. مهم‌ترین این روش‌ها بر پایه رسوب شیمیایی، فیزیکی یا الکتریکی فلز بر روی گوی‌های پلیمری استوار می‌باشد. روش ابداع شده توسط موسسه فرانهورف آلمان

فوم‌های فلزی دسته‌ای از مواد سلولی‌اند که دارای ترکیبی منحصر به فرد از خواص فیزیکی و مکانیکی هستند. چگالی پایین، سفتی ویژه زیاد، نسبت استحکام به وزن بالا و قابلیت جذب انرژی زیاد موجب شده است که کاربردهای فوم‌های فلزی در ساخت قطعات مختلف در صنایع گوناگون به ویژه صنعت خودرو و صنایع هوا-فضا گسترش یابد [۱]. علاوه بر این، این مواد دارای مقاومت به خستگی مناسبی در شرایط اعمال تنش‌های کششی و فشاری دینامیکی نیز هستند [۲-۳]. باید در نظر داشت که وجود سلول‌ها و مورفولوژی آن‌ها تأثیر زیادی بر رفتار این مواد دارد. مورفولوژی سلول‌ها در فوم‌ها به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شود که شامل سلول‌های باز، سلول‌های بسته و ترکیبی از سلول‌های باز و بسته است [۴]. یکی از چالش‌های عمده در نحوه عملکرد فوم‌های فلزی در شرایط گوناگون به تغییرات شدید در مورفولوژی سلول‌ها ارتباط پیدا می‌کند [۲-۵]. اغلب فلزات سلولی تولید شده به صورت تجاری دارای خصوصیات مورد انتظار در مقایسه

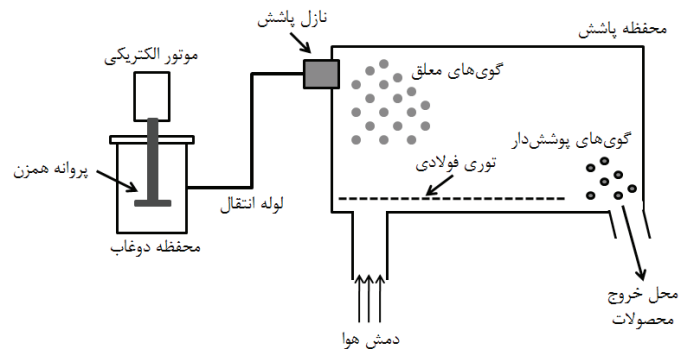
* نویسنده مسئول:

دکتر حمید سازگاران

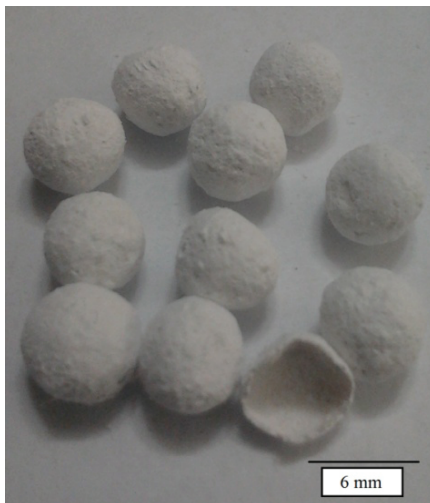
نشانی: قوچان، دانشگاه صنعتی قوچان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع.

تلفن: ۹۳۵۲۶۹۳۴۴ (۹۸+)

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



شکل ۱. تصویر نمادین از دستگاه مخصوص پوشش دهی دانه های پلی استیرن توسط مخلوطی از پودر آلومینا، سیلیکات سدیم و آب.



شکل ۲. نمایش گوی های توخالی با قطر ۶ mm.

فوم های ترکیبی چدن نشکن با تنوع در اندازه سلول ها توسط فرآیند ریخته گری ماسه ای و با استفاده از گوی های توخالی آلومینایی تولید شدند و تاثیرات اندازه سلول ها بر رفتار فشاری و ریزساختار آن ها مورد مطالعه قرار گرفت.

۲. مواد و روش پژوهش

تولید گوی های توخالی آلومینایی

برای تولید گوی های توخالی آلومینایی، روشی مبتنی بر استفاده از ذرات پودر آلومینا به کار گرفته شد. پودر آلومینای مورد استفاده دارای خلوص ۹۹ درصد با اندازه ذرات کوچک تر از ۱۰۰ میکرومتر است. در روش به کار برده شده، دانه های پلی استیرن به عنوان زیرلایه استفاده شدند. ابتدا، دانه های پلی استیرن با میانگین قطر ۳/۵mm، ۵/۵mm و ۷/۵mm تهیه شدند. سپس، درون محفظه دستگاه مخصوص پوشش دهی قرار گرفتند و با اعمال فشار هوا درون محفظه معلق شدند. قابل ذکر است که بر روی یکی از دیواره های

بر اساس متالورژی پودر بنا نهاده شده است. در این روش، دانه های پلی استیرن به عنوان زیرلایه استفاده می گردند و مخلوطی از پودر فلز و چسب بر روی آن ها پاشیده می شود. پس از انجام فرآیندهای حرارتی که شامل تجزیه حرارتی پلی استیرن و تفجوشی فلز دیواره می باشند، گوی های توخالی فلزی تولید می گردند [۱۰].

چندین روش گوناگون برای استفاده از گوی های توخالی در ساختارهای سلولی وجود دارد. در برخی از این روش ها توسط تفجوشی، گوی های توخالی به یکدیگر متصل می شوند و ساختاری با سلول های باز و بسته به وجود می آید. در روشی دیگر، گوی های توخالی توسط یک چسب به یکدیگر اتصال می یابند. استفاده از پودرهای فلزی در میان گوی های توخالیو انجام فرآیند تفجوشی و همچنین ریخته گری مذاب فلز در بین گوی های توخالی نیز روش هایی مرسوم هستند [۱۵-۱۸]. باید توجه داشت که استفاده از گوی های توخالی در ساختارهای سلولی موجب یکنواختی در میزان، اندازه و توزیع سلول ها می گردد. ایجاد نظم های مشخص در چیدمان گوی های توخالی سبب تشکیل سلول های منظم خواهد شد و همچنین امکان تشکیل سلول هایی به صورت گرادینانی نیز وجود دارد [۱۹-۲۳].

این انتظار وجود دارد که تولید و توسعه چدن های سبک توسط افزودن عناصر آلیاژی خاص، افزودن ذرات سرامیکی همانند آلومینا و همچنین ایجاد سلول ها سبب افزایش کاربردهای این ماده ارزشمند مهندسی شود. افزودن مقادیر بالای آلومینیوم به چدن های خاکستری با هدف کاهش وزن، سبب ایجاد ذرات آلومینای کروی شکل درون زمینه می گردد [۲۴]. استفاده از سلول ها در زمینه چدن ها نیز می تواند روشی مناسب برای سبک سازی آن ها باشد. استفاده از گوی های ماسه ای و قرار دادن آن ها درون قالب و انجام مذاب ریزی، می تواند چدن های متخلخل تولید کند [۲۵]. ایجاد سلول ها در چدن ها منجر به ایجاد یک ماده جدید مهندسی شود که هم زمان دارای ویژگی های منحصر به فرد چدن ها و فوم های فلزی به صورت توامان باشد. در این پژوهش،

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

است. به دلیل این که فضاهای باقیمانده بین گوی‌های توخالی کوچک است و قابلیت ترشوندگی آلومینا توسط مذاب چدن کم می‌باشد، راه‌باره اصلی به صورت مخروطی و با ارتفاع ۲۰۰ mm و در مرکز قالب ساخته شد و راه‌گاه‌ها به صورت کاملاً مساوی ساخته شدند.

مذاب مورد استفاده توسط کوره القایی فرانکس متوسط با ظرفیت ۵۰۰ کیلوگرم در یک کارخانه ریخته‌گری تولید شد. شارژ کوره شامل شمش چدن نشکن، قراضه برگشتی چدن نشکن و قراضه آهنی است. افزودن کربن به مذاب همراه با شارژ کوره صورت گرفت. به منظور جوانه‌زایی و افزودن سیلیسیم به مذاب، از فروسیلیس حاوی ۶۵ درصد وزنی سیلیسیم استفاده شد. برای افزودن منیزیم به مذاب و انجام فرآیند کروی‌سازی از روش ساندویچی استفاده شد. بدین منظور، ابتدا فرومنیزیم بادامی (حاوی ۶۰ درصد وزنی منیزیم) در قسمت کف پاتیل ثانویه با ظرفیت ۵۰۰ کیلوگرم قرار گرفت. سپس، نرمه‌هایی از ورقه‌های آهنی بر روی فرومنیزیم قرار داده شد. در نهایت، مذاب آماده شده توسط کوره با دمای ۱۴۵۰ °C به درون پاتیل ثانویه برگردان گردید. بنابراین، منیزیم به درون مذاب وارد می‌شود و عملیات کروی‌سازی صورت می‌گیرد. ترکیب شیمیایی مذاب مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. قابل ذکر است که فرآیند مذاب‌ریزی توسط یک پاتیل با ظرفیت ۱۵ کیلوگرم صورت گرفت و دمای مذاب در حدود ۱۳۹۰ °C است.

ارزیابی رفتار مکانیکی

برای تعیین رفتار فشاری فوم‌های ترکیبی چدن نشکن تولید شده از آزمون فشار استفاده شد. این آزمون توسط دستگاه Zwick مدل Z250 انجام گردید. نمونه‌های آزمون فشار از نمونه‌های ریخته‌گری بریده شدند. نمونه‌های بریده شده توسط دستگاه سنگ مغناطیس از هر شش وجه به صورت یکسان سنگ‌زنی شدند و نمونه‌هایی با ابعاد ۲۵ mm × ۲۵ mm × ۳۷/۵ mm تولید شد. باید توجه داشت که قبل از انجام آزمون فشار از روغن به عنوان روانکار میان نمونه‌ها و فک‌های دستگاه استفاده شد. قابل ذکر است که سه نمونه از فوم‌های چدنی متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی با قطرهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و سرعت حرکت فک‌ها در این آزمون برابر ۲ mm/min در نظر گرفته شد. به منظور بررسی میزان سختی فازهای گوناگون که در ریزساختار چدن نشکن وجود دارند، از دستگاه ریزسختی‌سنج ویکرز استفاده شد. دستگاه مورد استفاده توسط شرکت بوهرلر ساخته شده است

این محفظه، یک سیستم پاشش نصب شده است و توسط آن، مخلوط پودر آلومینا، سیلیکات سدیم (۱۰ درصد وزنی) به عنوان چسب و آب (۱۰ درصد وزنی) بر روی دانه‌های پلی‌استیرن پاشیده می‌شود و یک لایه از آلومینا بر روی دانه‌های پلی‌استیرن قرار می‌گیرد. باید در نظر داشت که دستگاه دارای یک سیستم اختلاط است که از پودر آلومینا، سیلیکات سدیم و آب قرار گرفته درون محفظه دوغاب، یک سوسپانسیون تولید می‌کند. در شکل ۱، دستگاه مخصوص پوشش‌دهی به صورت نمادین نمایش داده شده است.

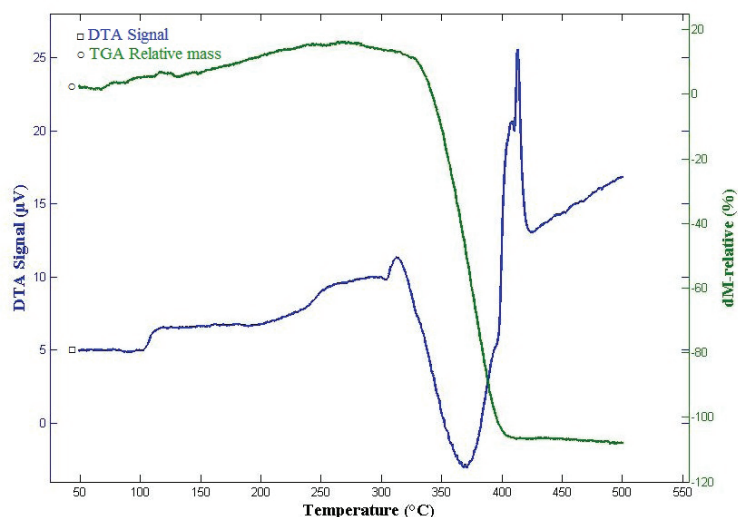
سپس، محصولات تولیدی از قسمت خروجی محفظه خارج می‌شوند و پس از خشک شدن به مدت ۴ ساعت درون هوا، به مدت یک ساعت درون یک آون با دمای ۱۲۰ °C قرار داده می‌شوند. قابل ذکر است که دمای اعمالی می‌تواند احتمالاً موجب ذوب شدن و تجزیه حرارتی دانه‌های پلی‌استیرن شود. در نهایت، گوی‌های توخالی آلومینایی با میانگین قطر ۴ mm، ۶ mm و ۸ mm تولید خواهند شد. در شکل ۲، گوی‌های تولید شده با قطر ۶ mm به عنوان نمونه نمایش داده شده‌اند.

آنالیز حرارتی پلی‌استیرن

به منظور بررسی رفتار حرارتی دانه‌های پلی‌استیرن در طی فرآیند تجزیه حرارتی از آنالیز حرارتی دیفرانسیلی (DTA) و آنالیز حرارتی وزنی (TGA) استفاده شد. دستگاه مورد استفاده Linseis مدل STS PT 1600 است که نرخ گرمایش برابر ۱۰ °C/min دارد که حداکثر دما برابر ۵۵۰ °C در نظر گرفته شد.

قالب‌گیری و ریخته‌گری

پس از تهیه گوی‌های توخالی آلومینایی، تولید فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی توسط روش ریخته‌گری ماسه‌ای صورت گرفت. به منظور ساخت قالب، از ماسه سیلیسی به همراه ۵ درصد وزنی سیلیکات سدیم استفاده شد. قالب تهیه شده دارای ۹ حفره با ابعاد ۵۰ mm × ۳۰ mm × ۳۰ mm است. قبل از مذاب‌ریزی، گوی‌های توخالی آلومینایی درون حفرات قالب قرار گرفتند. قابل ذکر است که درون سه حفره قالب توسط گوی‌هایی با میانگین قطر ۴ mm، درون سه حفره قالب دیگر توسط گوی‌هایی با میانگین قطر ۶ mm و درون سه حفره قالب آخر توسط گوی‌هایی با میانگین قطر ۸ mm پر شد. باید در نظر داشت که چیدمان گوی‌ها درون قالب‌ها به صورت رندوم



شکل ۳. نتایج به دست آمده از آنالیزهای TGA و DTA یک دانه پلی استیرن.

میکروسکوپ الکترونی، اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسط پرتو الکترونی (EDS) به منظور شناسایی فازهای گوناگون از لحاظ ترکیب شیمیایی به کار گرفته شد.

و شماره مدل آن ۶۱۲۵-۱۶۰۰ می باشد. زمان بارگذاری در این دستگاه برابر ۱۰ s است و مقدار بار اعمالی ۲۵ g انتخاب شد. قابل ذکر است که از بزرگنمایی ۴۰۰ برابر دستگاه برای شناسایی و مشاهده فازهای گوناگون استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

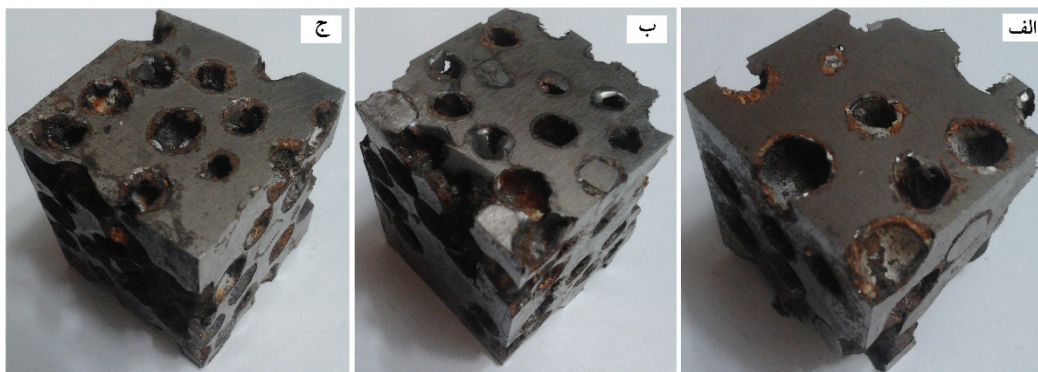
رفتار حرارتی پلی استیرن

در شکل ۳، نتایج به دست آمده از آنالیزهای حرارتی TGA و DTA یک دانه پلی استیرن ارائه شده است. مطابق با آنالیز DTA، فرآیند ذوب شدن دانه پلی استیرن در دمای حدود 100°C رخ می دهد و مطابق با آنالیزهای TGA و DTA، تجزیه حرارتی دانه پلی استیرن در دمای حدود 330°C مشاهده می شود. در سایر پژوهش ها، تجزیه حرارتی پلی استیرن از 320°C تا 500°C گزارش شده است [۲۶-۲۸]. قابل ذکر است که در اثر تجزیه حرارتی پلی استیرن در محیط های اکسیدی، گازهای منواکسید کربن و دی اکسید کربن و هیدروکربنات های اکسایشی تولید می شود [۲۸] و این در حالی است که محصولات ناشی از تجزیه حرارتی پلی استیرن در محیط های بدون اکسیژن وابسته به دما می باشد [۲۹].

مطابق با نتایج به دست آمده از آنالیزهای حرارتی پلی استیرن مشخص می شود که در طی عملیات حرارتی یا همان نگهداری دانه های پلی استیرن پوشش یافته توسط پودر آلومینا و سیلیکات سدیم در دمای 120°C درون آون، پلی استیرن ذوب می شود و در فضای خالی میان ذرات پودرهای آلومینا قرار می گیرد. باید در نظر داشت که تجزیه حرارتی پلی استیرن به صورت جزئی نیز می تواند رخ دهد و این در حالی است که مقادیر زیادی از پلی استیرن در فضای بین ذرات پودر آلومینا باقی خواهد ماند. قابل ذکر است که استفاده از سیلیکات سدیم به عنوان یک چسب معدنی که

ارزیابی های میکروسکوپی

به منظور انجام ارزیابی های میکروسکوپی، قسمت هایی از نمونه های ریختگی توسط وایرکات بریده شدند. قابل ذکر است که نمونه های متالوگرافی از قسمت بالایی و مرکزی نمونه های ریختگی باقیمانده پس از تولید نمونه های آزمون فشار تهیه شدند. نمونه های بریده شده آنقدر بزرگ است که همه اجزاء قابل مطالعه باشد. ابتدا فرآیند مانت گرم و سپس، فرآیندهای سمباده زنی و پولیش کاری بر روی نمونه ها صورت گرفت. فرآیند اچ توسط محلول نایتال ۲ درصد انجام شد. مطالعات میکروسکوپ نوری قبل و بعد از اچ صورت گرفت و تصاویر متالوگرافی در بزرگنمایی های گوناگون تهیه شدند. علاوه بر این، نرم افزار تحلیل تصاویر MIP برای بررسی تصاویر تهیه شده مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده از بررسی های نرم افزاری بر روی تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از اچ شامل تعیین درصد فاز گرافیت، میانگین میزان کرویتندول های گرافیت، تعداد ندول های گرافیت در واحد سطح و میانگین قطر ندول های گرافیت و بعد از اچ شامل درصد فریت، پرلیت و کاربید آهن است. علاوه بر این، از میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز برای انجام ارزیابی های ریزساختاری استفاده شد. قبل از انجام مطالعات میکروسکوپ الکترونی، پوشش آلیاژ Au-Pd بر روی نمونه های مانت شده توسط دستگاه پوشش دهی Sputter Coater SC7620 ایجاد شد. در این پژوهش، میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO 1450VP مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر بررسی های



شکل ۴. نمایش فوم‌های ریخته‌گری شده پس از فرآیند سنگ‌زنی؛ الف) متشکل از گوی‌هایی با میانگین قطر ۸ mm، ب) متشکل از گوی‌هایی با میانگین قطر ۶ mm، ج) متشکل از گوی‌هایی با میانگین قطر ۴ mm.

فرآیند مذاب‌ریزی و همچنین تنش‌های ناشی از انقباض در فرآیند انجماد چدن نشکن نیز می‌تواند عامل بروز شکست دیواره گوی‌های توخالی محسوب شود. در نتیجه، برخی از گوی‌های توخالی آلومینایی توسط مذاب چدن نشکن پُر خواهند شد.

درصد تخلخل

پس از سنگ‌زنی، نمونه‌ها توزین شدند و سپس، میزان چگالی و درصد تخلخل هر کدام از نمونه‌ها تعیین شد. چگالی نمونه‌های ریختگی براساس معادله (۱) اندازه‌گیری شد و درصد تخلخل آن‌ها توسط معادله (۲) محاسبه گردید [۳۳]. شایان ذکر است که چگالی جامد همان چگالی چدن نشکن ریختگی بدون تخلخل است که توسط یک نمونه ریخته‌گری بدون تخلخل برابر 7170 kg/m^3 اندازه‌گیری شده است. مقادیر چگالی و درصد تخلخل فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.

معادله ۱.

$$\text{حجم قطعه ریختگی} / \text{جرم قطعه ریختگی} = \text{چگالی}$$

معادله ۲.

$$100 \times ((\text{چگالی جامد} / \text{چگالی فوم}) - 1) = \text{درصد تخلخل}$$

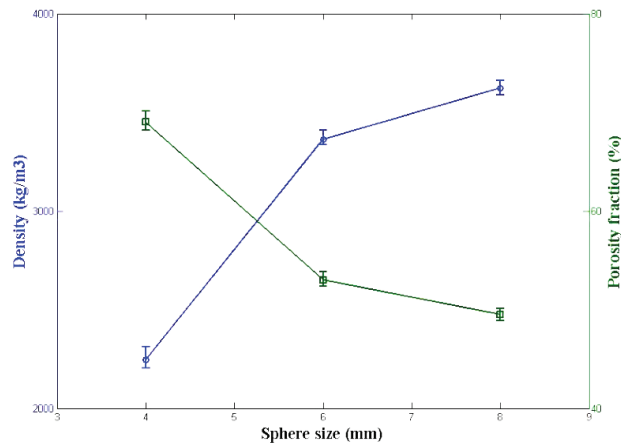
همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر در قطر گوی‌های توخالی آلومینایی بر روی میزان چگالی و درصد تخلخل تأثیرگذار است. فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی با میانگین قطر ۴ mm، کمترین میزان چگالی و بیشترین مقدار تخلخل و فوم‌های متشکل از گوی‌های توخالی با میانگین قطر ۸ mm، بیشترین میزان چگالی و کمترین مقدار تخلخل را دارند. به بیان دیگر، کاهش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی موجب کاهش چگالی و

در شرایط عملیات حرارتی و در حین مذاب‌ریزی پایدار است احتمالاً از تشکیل معایب در فصل مشترک بین گوی‌ها و چدن نشکن ممانعت به عمل می‌آورد.

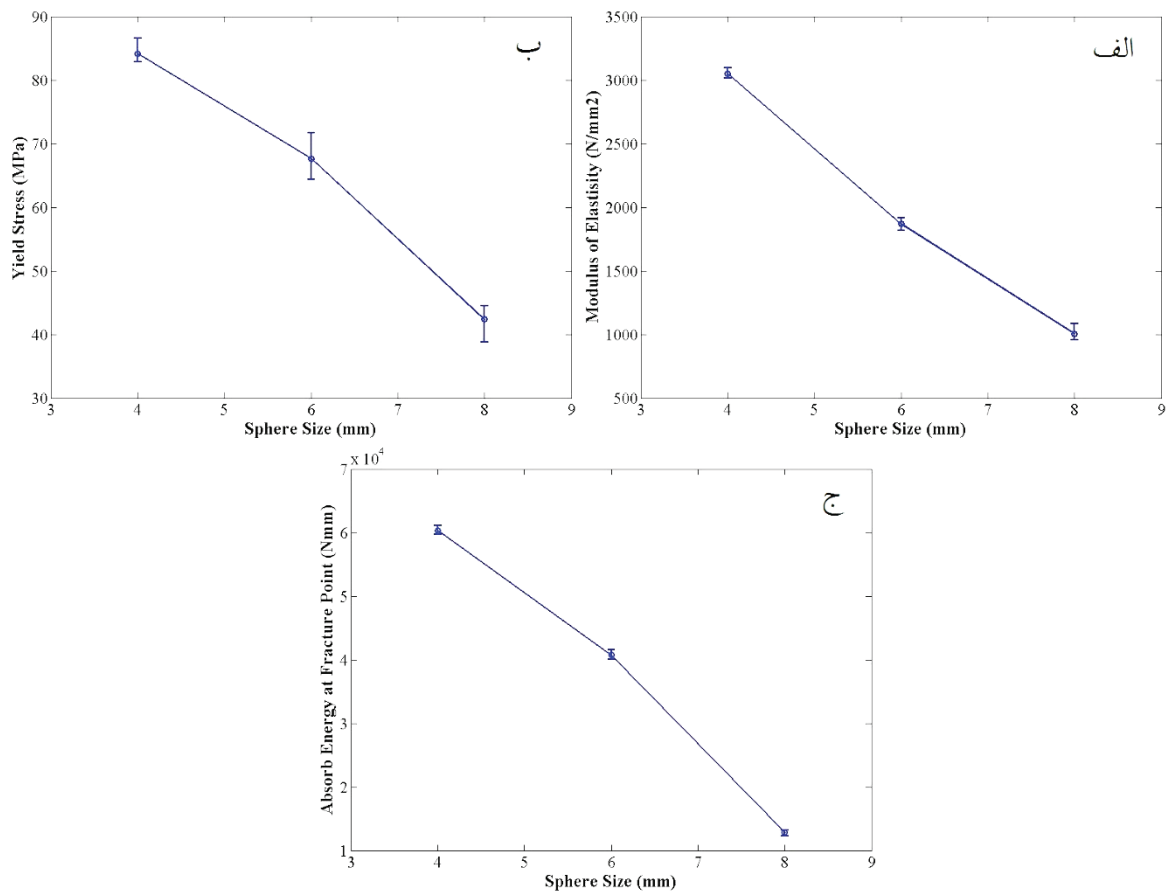
ارزیابی فصل مشترک

با استفاده از فرآیند ریخته‌گری ماسه‌ای، فوم‌های چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی تولید شدند که حاوی گوی‌هایی با میانگین قطرهای ۴، ۶ و ۸ mm هستند. در شکل ۴، تصاویر نمونه‌های تولید شده پس از فرآیند سنگ‌زنی نمایش داده شده است. قابل ذکر است که به علت ترد بودن دیواره گوی‌های آلومینایی، برخی از قسمت‌های گوی‌های توخالی در هنگام اجرای فرآیند سنگ‌زنی جدا می‌شوند. جدا شدن این قسمت‌ها نشان می‌دهد که یک فصل مشترک کاملاً سازگار در بین چدن نشکن و دیواره گوی‌های توخالی آلومینایی تشکیل نشده است. باید در نظر داشت که قابلیت ترشوندگی بسیار پایین آلومینا توسط مذاب چدن نشکن به عنوان مهم‌ترین دلیل تشکیل فصل مشترک ناسازگار شناخته می‌شود [۳۰-۳۲].

در برخی از سطوح سنگ‌زنی شده مشاهده می‌گردد که گوی‌های توخالی آلومینایی توسط مذاب چدن نشکن پُر شده‌اند. این امر ممکن است به دو دلیل رخ دهد. دلیل اول به وجود پلی‌استیرن باقیمانده در بین ذرات پودر آلومینا ارتباط پیدا می‌کند و دلیل دوم را می‌توان به عدم استحکام گوی‌های توخالی آلومینایی ارتباط داد. در طی عملیات حرارتی در دمای 120°C ، دانه‌های پلی‌استیرن ذوب می‌گردند (مطابق با نتایج آنالیزهای حرارتی در شکل ۳) و در فضای بین ذرات پودر آلومینا وارد می‌شوند. پلی (مطابق با نتایج آنالیزهای حرارتی در شکل ۳) استیرن باقیمانده در حین مذاب‌ریزی چدن نشکن به صورت حرارتی تجزیه شده و منجر به تشکیل گاز می‌گردد. در نتیجه، دیواره گوی‌های توخالی دچار شکست خواهند شد. علاوه بر این، فشار هیدرواستاتیکی مذاب در طی



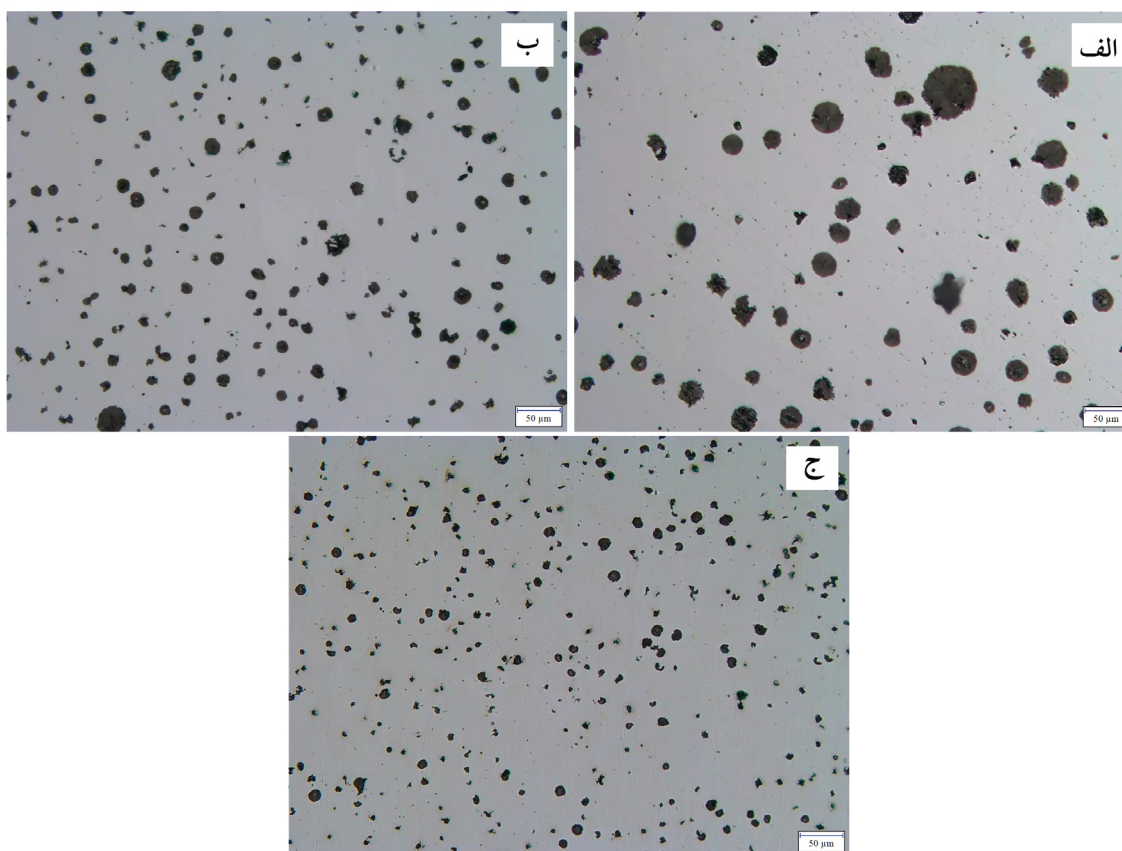
شکل ۵. مقادیر چگالی و درصد تخلخل فوم‌های تولید شده پس از انجام فرآیند سنگ‌زنی.



شکل ۶. تغییرات ویژگی‌های فشاری فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی بر حسب تغییرات اندازه گوی‌ها؛ الف) ضریب کشسانی، ب) استحکام تسلیم پروف و ج) انرژی جذب شده تا نقطه شکست.

فضاهای خالی بین گوی‌های با قطر کوچک‌تر وارد می‌شود. این نتایج با نتایج به دست آمده در مورد فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی فولادی همخوانی دارد [۳۴].

افزایش میزان تخلخل می‌شود. دلیل چنین تغییراتی آن است که با کاهش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی، چیدمان رندوم آن‌ها متراکم‌تر می‌گردد و در نتیجه، حجم فضاهای خالی میان آن‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین، مذاب کمتری درون



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از اچ در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر از زمینه چدن نشکن در فوم‌های ریخته‌گری؛ الف) حاوی گوی‌های آلومینایی با میانگین قطر ۸ mm، ب) حاوی گوی‌های آلومینایی با میانگین قطر ۶ mm و ج) حاوی گوی‌های آلومینایی با میانگین قطر ۴ mm.

جدول ۲. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های نرم‌افزاری بر روی تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از اچ

قطر گوی‌های توخالی (mm)	کسر سطحی فاز گرافیت (%)	میانگین میزان کرویتندول‌های گرافیت (%)	تعداد ندول‌های گرافیت در واحد سطح ($/mm^2$)	میانگین قطر ندول‌های گرافیت (μm)
۴	۶/۹	۰/۷۲۳	۹۸۵	۱۶
۶	۷/۷	۰/۷۸۱	۶۲۰	۲۱
۸	۸/۴	۰/۸۴۹	۳۶۵	۲۸

کاهش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی موجب پراکندگی یکنواخت‌تر سلول‌ها و در نتیجه، بهبود ویژگی‌های فشاری می‌گردد. بر اساس منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم‌های تولیدی، تخریب سلول‌ها و فروریختن آن‌ها مشابه با رفتار فشاری فوم‌های آلومینیومی رخ نمی‌دهد. قابل ذکر است که تشکیل ترک در دیواره‌های چدنی سلول‌ها و ایجاد شکست ترد در دیواره‌ها موجب شکست فوم‌های تولیدی تحت فشاری می‌گردد.

ارزیابی‌های ریزساختاری

تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از اچ در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر از زمینه چدن نشکن فوم‌های ترکیبی تولیدی در شکل ۷

رفتار فشاری

در ساختارهای سلولی فلزی و فوم‌های فلزی، رفتار مکانیکی به ویژه رفتار فشاری از اهمیت بسزایی برخوردار است [۱]. نتایج به دست آمده از آزمون فشار در شکل ۶ نمایش شده است که شامل ضریب کشسانی، استحکام تسلیم بر اساس روش آفست ۰/۲ درصد و انرژی جذب شده تا نقطه شکست می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ویژگی‌های مکانیکی اندازه‌گیری شده در فوم‌های ترکیبی چدن نشکن حاوی گوی‌های درشت کمترین مقدار و در نمونه‌های حاوی گوی‌های ریز، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین می‌توان گفت که با کاهش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی، ضریب کشسانی، استحکام تسلیم و انرژی جذب شده بهبود پیدا می‌کند.

از گوی‌های توخالی آلومینایی، ماده قالب مورد استفاده شده و دمای مذاب ریزی ثابت است، بنابراین، نرخ سرمایش وابسته به تغییر در ضخامت قطعه خواهد بود. دلیل این پدیده را می‌توان بر اساس میزان انتقال حرارت و سرعت سرمایش شرح داد. بنابراین، با کاهش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی، 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، میزان انتقال حرارت و نرخ سرمایش افزایش خواهد یافت [۳۷ و ۳۸]. در اثر زیاد شدن نرخ سرمایش، مورفولوژی گرافیت‌ها شدیداً تغییر می‌کند.

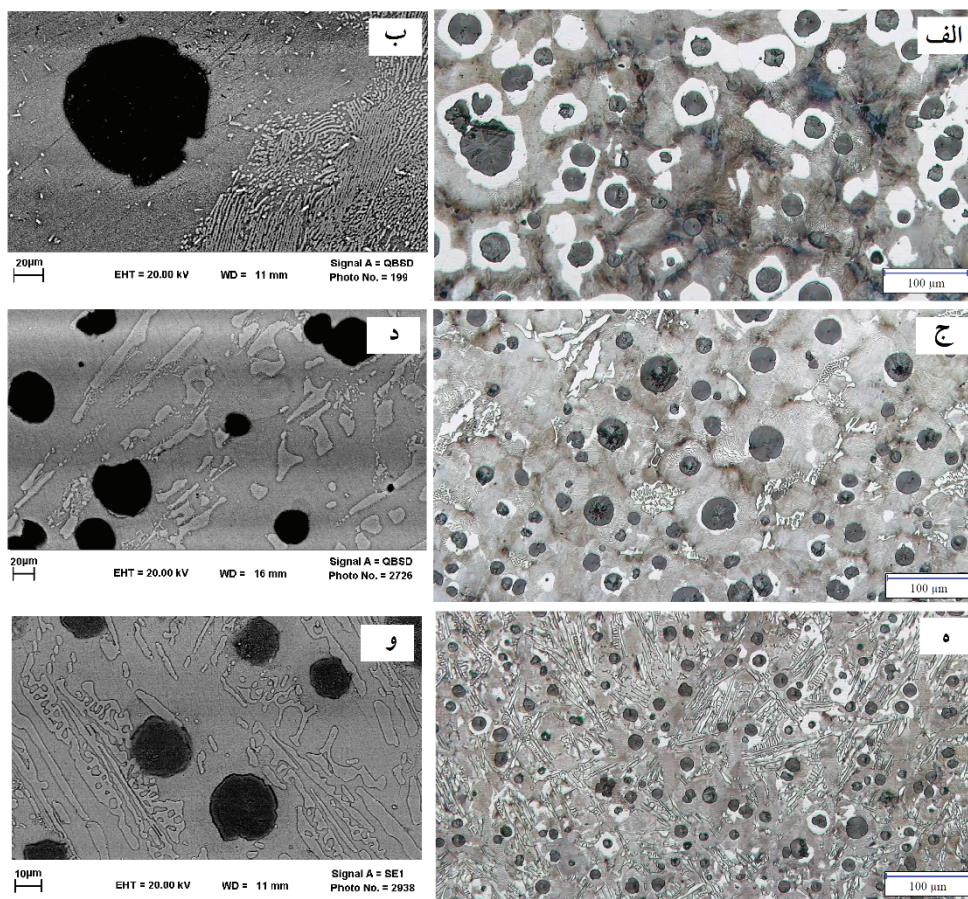
در شکل ۸، تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی از زمینه چدن نشکن در فوم‌های ترکیبی تولیدی پس از اچ‌نمایش داده شده است. در همه نمونه‌ها مشاهده می‌شود که گرافیت‌های کرووی توسط فریت پوشیده شده‌اند و گرافیت‌هایی از نوع چشم‌گاو ایجاد شده است. زمینه چدن نشکن در فوم‌های متشکل از گوی‌هایی با قطر ۸ mm به صورت فریتی-پرلیتی است. این در حالی است که در زمینه چدن نشکن سایر فوم‌ها، کاربیدهای آهن در کنار ساختار فریتی-پرلیتی مشاهده می‌گردد. نتایج ریزسختی‌سنجی که در جدول ۳ ارائه شده است، صحت شناسایی فازهای گوناگون را تایید می‌کند. مطابق با تصاویر میکروسکوپ نوری که در شکل ۸ ارائه شده است، با کاهش قطر گوی‌های آلومینایی، کسر سطحی کاربید آهن افزایش و کسر سطحی فریت کاهش می‌یابد. در جدول ۴ نتایج به دست آمده از پردازش تصاویر میکروسکوپ نوری بعد از اچ توسط نایتال ارائه شده است. همان طوری که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار فریت در فوم حاوی گوی‌های آلومینایی با قطر ۴ mm تشکیل شده است و کسر سطحی فریت در دو نمونه دیگر تفاوت چشمگیری ندارد. علاوه بر این، کسر سطحی پرلیت تفاوت چندانی را نشان نمی‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که تغییر در قطر گوی‌های توخالی آلومینایی بر روی کسر سطحی پرلیت موثر نیست. این در حالی است که تغییر در اندازه گوی‌ها تاثیر شدیدی بر روی کسر سطحی کاربید آهن تشکیل شده در ساختار دارد و با کاهش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی، افزایش در کسر سطحی کاربید آهن مشاهده می‌شود.

افزایش کسر سطحی کاربید آهن و کاهش درصد فریت در زمینه با کاهش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی را می‌توان به نرخ سرمایش ارتباط داد [۳۷ و ۳۸]. همان طور 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. می‌دانیم که ندول‌های گرافیت کاملاً از کربن تشکیل شده‌اند و سمانتیت یا کاربیدهای آهن دارای ۶/۶۷ درصد کربن هستند و در ساختار چدن‌ها، مقادیر زیادی از کربن درون این فازها قرار می‌گیرد. بنابراین، کربن

نشان داده شده است. در همه این تصاویر مشاهده می‌شود که جوانه‌زنی و رشد گرافیت‌ها به صورت کرووی در زمینه چدن نشکن رخ داده است. این امر به افزودن منیزیم در مذاب به روش ساندویچی ارتباط دارد که موجب کاهش میزان اکسیژن و گوگرد موجود در مذاب می‌گردد [۳۵ و ۳۶]. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که تغییر در اندازه گوی‌های توخالی آلومینایی موجب تغییر در میزان، اندازه و توزیع ندول‌های گرافیت شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی، اندازه ندول‌های گرافیت تشکیل شده در زمینه چدن نشکن افزایش می‌یابد. در جدول ۲، درصد فاز گرافیت، میانگین میزان کرویتندول‌های گرافیت، تعداد ندول‌های گرافیت در واحد سطح و میانگین قطر ندول‌های گرافیت که توسط نرم‌افزار MIP بر روی تصاویر به دست آمده قبل از اچ تهیه شده‌اند، ارائه شده است.

مطابق با جدول ۲، بیشترین درصد فاز گرافیت و حداکثر میزان کرویت ندول‌های گرافیت در زمینه چدن نشکن در فوم‌های متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی با میانگین قطر ۸ mm و کمترین درصد فاز گرافیت و کمترین میزان کرویت ندول‌های گرافیت در زمینه چدن نشکن در فوم‌های متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی با میانگین قطر ۴ mm مشاهده می‌گردد. علاوه بر این، حداکثر تعداد ندول‌های گرافیت در واحد سطح و کمترین میانگین قطر ندول‌های گرافیت در زمینه چدن نشکن در فوم‌های متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی با میانگین قطر ۴ mm و کمترین تعداد ندول‌های گرافیت در واحد سطح و بیشترین میانگین قطر ندول‌های گرافیت در زمینه چدن نشکن در فوم‌های متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی با میانگین قطر ۸ mm مشاهده می‌گردد. به بیان دیگر، با افزایش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی، مقدار فاز گرافیت، میزان کرویت ندول‌های گرافیت و میانگین قطر ندول‌های گرافیت به صورت همزمان افزایش و تعداد ندول‌های گرافیت در واحد سطح کاهش می‌یابد. عوامل موثر اصلی بر مورفولوژی گرافیت‌ها و همچنین ریزساختار زمینه در چدن‌های نشکن شامل ترکیب شیمیایی، دمای مذاب‌ریزی، نرخ سرمایش و نوع عملیات حرارتی هستند [۳۷]. با توجه به این که ترکیب شیمیایی و دمای مذاب‌ریزی در شرایط ریخته‌گری همه فوم‌ها یکسان است و هیچ‌گونه عملیات حرارتی بر روی نمونه‌ها صورت نگرفته است، بنابراین نرخ سرمایش عامل اصلی موثر بر مورفولوژی گرافیت‌ها خواهد بود. در نتیجه، این انتظار وجود دارد که تغییرات نرخ سرمایش بر اندازه، شکل و نحوه توزیع ندول‌های گرافیت، ریزساختار زمینه و همچنین ویژگی‌های مکانیکی فوم‌های چدن نشکن موثر باشد [۳۷ و ۳۸].

نرخ سرمایش تابعی از ضخامت قطعات ریختگی، ماده قالب، ضخامت جداره قالب و دمای مذاب‌ریزی است. با توجه به این که در فرآیند ریخته‌گری فوم‌های چدن نشکن متشکل



شکل ۸. تصاویر ریزساختاری از زمینه چدن نشکن فوم‌های ترکیبی ریختگی متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی با قطرهای: الف) و ب) ۸ mm، ج) و د) ۶ mm، ه) و و) ۴ mm (تصاویر سمت راست: میکروسکوپ نوری و تصاویر سمت چپ: میکروسکوپ الکترونی روبشی).

جدول ۳. میزان ریزسختی فازهای گوناگون در زمینه چدن نشکن

فاز	کاربید آهن	دندریت‌های کاربیدی	فریت
ریزسختی (HV)	۶۵۲	۵۰۰	۱۸۴

جدول ۴. نتایج به دست آمده از پردازش تصاویر میکروسکوپ نوری بعد از اچ توسط نایتال

قطر گوی‌های توخالی (mm)	کسر سطحی کاربید آهن (%)	کسر سطحی فریت (%)	کسر سطحی پرلیت (%)
۴	۱۰/۳	۶/۸	۷۵/۸
۶	۸/۲	۷/۲	۷۶/۱
۸	۰	۱۸/۳	۷۳/۳

در حالی است که کسر سطحی ندول‌های گرافیت کاهش پیدا می‌کند.

قابل ذکر است که هر چند با افزایش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی، درصد تخلخل و میزان کاربید آهن تشکیل شده در ساختار کاهش می‌یابد، اما رفتار فشاری فوم‌های متشکل از گوی‌های توخالی با قطر ۴ mm نسبت به سایر نمونه‌ها بهتر است. علت اصلی این رخداد را می‌توان به توزیع یکنواخت‌تر سلول‌ها در فوم‌های متشکل از گوی‌های آلومینایی با قطر

مازاد از زمینه فریتی- پرلیتی، درون ندول‌های گرافیت و کاربیدهای آهن وارد می‌شود. در نتیجه، باید از لحاظ مقداری، یک تعادل بین کسر سطحی گرافیت و کسر سطحی کاربیدها در ریزساختار چدن‌های نشکن وجود داشته باشد. علاوه بر این، نرخ سرمایش بر کسر سطحی ندول‌های گرافیت و کسر سطحی کاربید آهن موثر است. با افزایش سرعت سرد شدن (کوچک شدن اندازه گوی‌های توخالی آلومینایی)، مقادیر بیش‌تری از سمانتیت در ریزساختار تشکیل می‌گردد و این

- انرژی جذب شده تا نقطه شکست در فوم‌های تولیدی به ترتیب ۳، ۲ و ۵ برابر بهبود یافته است.
۴. ندول‌های گرافیت موجود در زمینه چدن نشکن در فوم‌های تولیدی توسط فاز فریت احاطه شده‌اند و ریزساختار فریتی-پرلیتی مشاهده می‌شود.
۵. مورفولوژی گرافیت‌ها و ریزساختار وابسته به اندازه گوی‌های توخالی آلومینایی است.
۶. کاهش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی از ۸ mm به ۴ mm موجب می‌گردد که کسر سطحی گرافیت از ۸/۴ به ۶/۹ درصد، میانگین میزان کرویت از ۰/۸۴۹ به ۰/۷۲۳ و میانگین قطر ندول‌های گرافیت از ۱۶ به ۲۸ میکرومتر کاهش یابد و تعداد ندول‌های گرافیت در واحد سطح از ۳۶۵ به ۹۸۵ /mm² افزایش یابد.
۷. با کاهش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی از ۸ mm به ۴ mm، کسر سطحی کاربید آهن از صفر به ۱۰/۳ درصد افزایش و کسر سطحی فریت از ۱۹/۳ به ۶/۷ درصد کاهش می‌یابد و این در حالی است که تغییر در قطر گوی‌های توخالی آلومینایی تاثیر چندانی بر روی کسر سطحی پرلیت ندارد.

کوچک‌تر ارتباط داد. به بیان دیگر، نحوه توزیع سلول‌ها درون ساختار فوم‌های چدن نشکن ترکیبی با کاهش قطر گوی‌های توخالی آلومینایی یکنواخت‌تر می‌شود و در نتیجه، بهبود رفتار فشاری را سبب خواهد شد.

۴. نتیجه‌گیری

- در این پژوهش، گوی‌های توخالی آلومینایی به صورت نامنظم درون حفرات قالب‌های ماسه‌ای قرار داده شدند و سپس، ریخته‌گری مذاب چدن نشکن در بین آن‌ها به منظور تولید فوم‌های ترکیبی چدن نشکن متشکل از گوی‌های توخالی آلومینایی صورت گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش فشار و ارزیابی‌های میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی بر روی فوم‌های ترکیبی تولید شده به صورت زیر فهرست شده‌اند.
۱. عدم سازگاری در فصل مشترک بین چدن نشکن و گوی‌های توخالی آلومینایی در فرآیند سنگ‌زنی مشاهده گردید.
 ۲. میزان تخلخل تحت تاثیر اندازه گوی‌های توخالی آلومینایی است و با کاهش قطر گوی‌ها، درصد تخلخل افزایش می‌یابد.
 ۳. با کاهش قطر گوی‌های استفاده شده از ۸ mm به ۴ mm، اندازه سلول‌ها کاهش یافته و توزیع آن‌ها یکنواخت‌تر می‌گردد و ضریب کشسانی، استحکام تسلیم فشاری و

References

- [1] J. Banhart and W. Brinkers, Journal of Material Science Letters, Vol. 18, pp: 617-619, 1999.
- [2] Y. Sugimura, A. Rabiei, A.G. Evans, A. M. Hart and N. A. Fleck, Material Science and engineering A, Vol. 269, pp: 38-48, 1999.
- [3] A. Rabiei, A. G. Evans and J. W. Hutchinson, Metall. and mater. Trans, Vol. 31A, pp: 1129-1136, 2000.
- [4] 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, Butterworth-Heinemann, Massachusetts, 2000.
- [5] Y. Sugimura, J. meyer, M. Y. He, H. Bart-Smith, J. Grenstedt and A. G. Evans, Acta Mater, Vol. 45, pp: 5245-5259, 1997.
- [6] A. G. Evans, J. W. Hutchinson and M. F. Ashby, Progress in Materials Science, Vol. 43, pp: 171-221, 1998.
- [7] L. J. Gibson and M. F. Ashby, Cellular Solid, Structures and properties, 2nd, Cambridge university press, Cambridge, UK, 1997.
- [8] A. Rabiei, L. Vendra, N. Reese, N. Young and B. P. Neville, Materials Transactions, Vol. 47, No. 9, pp: 2148-2153, 2006.
- [9] U. Ramamurty and A. Paul, Acta Materialia, Vol. 52, pp: 869-876, 2004.
- [10] G. Stephani, D. Kupp, T. D. Claar and U. Waag, International conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, Fraunhofer Institute for Manufacturing and Advanced Materials, pp: 50-58, 2001
- [11] T. J. Lim, B. Smith, D. L. McDowell, Behavior of a random hollow sphere metal foam, Acta Materialia, Vol. 50, pp: 2867-2879, 2002.
- [12] O. Anderson, U. Waag, L. Schneider, G. Stephani and B. Kieback, Advanced Engineering Materials, Vol. 2, pp: 192-195, 2000.
- [13] M. Behnam, A. S. Golezani, M. M. Lima, 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.
- [14] M. Behnam, A. S. Golezani, M. M. Lima, Optimization of surface quality and shell porosity in low carbon steel hollow spheres produced by powder metallurgy, Powder Technology, Vol. 235, pp: 1025-1029, 2013.
- [15] C. Augustin and W. Hungerbach, Production of hollow spheres (HS) and hollow sphere structures (HSS), Materials Letters, Vol. 63, pp: 1109-1112, 2009.
- [16] P. Yu, G. Stephani, S. D. Luo, H. Goehler and M. Qian, Microwave-assisted fabrication of titanium hollow spheres with tailored shell structures for various potential applications, Materials Letters, Vol. 86, pp: 84-87, 2012.
- [17] E. Baumeister, S. Klaeger and A. Kaldos, Lightweight, hollow-sphere-composite (HSC) materials for mechanical engineering applications, Journal of Materials Processing Technology 155-156, pp: 1839-1846, 2004.
- [18] P. Lhuissier, L. Salvo and Y. Brechet, Sintered hollow spheres: Random stacking behaviour under uniaxial tensile loading, Scripta Materialia, Vol. 63, pp: 277-280, 2010.
- [19] W. S. Sanders and L. J. Gibson, Mechanics of BCC and FCC hollow-sphere foams, Materials Science and Engineering A, Vol.352, pp: 150-161, 2003.
- [20] W. S. Sanders and L. J. Gibson, Mechanics of hollow sphere

- foams, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 347, pp: 70-85, 2003.
- [21] Ying Liu, He-xiang Wu, Xin-chun Zhang and B. Wang, The influence of lattice structure on the dynamic performance of metal hollow sphere agglomerates, *Mechanics Research Communications*, Vol. 38, pp: 569-573, 2011.
- [22] S. Gasser, F. Paun, A. Cayzele and Y. Brechet, Uniaxial tensile elastic properties of a regular stacking of brazed hollow spheres, *Scripta Materialia*, Vol. 48, pp: 1617-1623, 2003.
- [23] Ying Liu, He-Xiang Wu and Bin Wang, Gradient design of metal hollow sphere (MHS) foams with density gradients, *Composites, Part B*, Vol. 43, pp: 1346-1352, 2012.
- [24] R. M. Hathaway and P.K. Rohatgi, Research into the production of a light weight cast iron (LWCI), *Proc. Int. Conf. High Temperature Capillarity*, 29 June- 2 July, Cracow, Poland, 1997.
- [25] S. Sridhar, S. S. Mohamed Nazirudeen and M. Kavitha, Production of gunmetal foam castings-a novel technique, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2(10), pp: 5080-5087, 2010.
- [26] A. Marcilla and M. Beltran, Kinetic study of the thermal decomposition of polystyrene and polyethylene-vinyl acetate graft copolymers by thermogravimetric analysis, *poly degrad stab*, vol. 50, 1995, pp: 117-124.
- [27] A. Kokta, M. Valada and E. Martin, Thermal decomposition of polystyrene: effect of molecular weight, *J Poly Sci*, vol. 12, 1974, pp: 271-220.
- [28] J.L. Gurman, L. Baier and B.C. Levin, Polystyrenes: A review of the literature on the products of thermal decomposition and toxicity, *Fire Mater*, vol. 11, 1987, pp: 109-130.
- [29] M. Guita, Thermal degradation of polystyrene, *British Poly J*, vol. 18, 1986, pp: 226-230.
- [30] D. Wittig, Pressureless infiltrated alumina and zirconia based steel - MMCs, Doctoral Thesis, Technical University of Bergakademie Freiberg, Italy, 2008.
- [31] N. Eustathopoulos, M. G. Nicholas, and B. Drevet, *Wettability at high temperatures*, Pergamon Materials Series, Amsterdam/ Lausanne/ New York/ Oxford/Shannon/ Singapore/ Tokyo: Pergamon, pp: 420-435, 1999.
- [32] E. Kapilashrami, Investigation of interactions between liquid Iron containing oxygen and aluminosilicate refractories, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2003.
- [33] A. K. Shaik dawood and S. S. Mohamed Nazirudeen, A Development of Technology for Making Porous Metal Foams Castings, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 4, pp: 292 - 299, 2010.
- [34] H. Sazegaran, A. R. Kiani-Rashid, and 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*, pp: 676-682, 2016.
- [35] T. Skaland, Nucleation mechanisms in ductile iron, *Proc AFS Cast Iron Inoculation Conference*, 2005, Schaumburg, Illinois.
- [36] S.C. Murcia, E.A. Ossa, and D.J. Celentano, Nodule evolution of ductile cast iron during solidification, *Met Mater Trans B*, , vol. 45B, 2014, pp: 707-718.
- [37] M. Gorny and E. Tyrala, Effect of Cooling Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Thin-Walled Ductile Iron Castings, *JMEPEG*, vol. 22, 2013, pp: 300-305.
- [38] F. Binczyk, A. Kowalski, J. Furmanek, The effect of cooling rate on the microstructure of nodular cast iron, *Arch Found Eng*, vol. 7, 2007, pp: 115-118.