



# ریخته‌گری

انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران / سال سی و نهم / شماره ۱۰۲ / پاییز و زمستان ۱۳۹۲

ISSN 1028-3897



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# ریخته گری

انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران / شماره ۱۰۳ / پاییز و زمستان ۱۳۹۲

**قابل توجه علاقمندان به چاپ مقاله در فصلنامه تخصصی ریخته‌گری:**

علاقمندان به چاپ مقالات در فصلنامه ریخته‌گری، می‌توانند مقالات خود را بر اساس الگوی نگارش مقالات به نشانی najarab@yahoo.com ارسال کنند.

**قابل توجه علاقمندان به نشریات تخصصی گروه انتشارات انجمن علمی ریخته‌گری ایران:**

با توجه به مشکلات پیش آمده به علت ارایه نشانی پستی اشتباه که منجر به تاخیر در ارسال یا عدم امکان ارسال نشریات می‌گردد. از کلیه اعضای دانشجویی، حقیقی و حقوقی این انجمن درخواست می‌شود هر گونه تغییر در نشانی، شماره تماس یا شماره دورنگار خود را به روابط عمومی این انجمن اطلاع دهند. بدیهی است در صورت صحیح نبودن نشانی پستی، این انجمن هیچگونه مسئولیتی در قبال ارسال به موقع نشریات به دریافت‌کنندگان نخواهد داشت.

صاحب امتیاز: جامعه ریخته‌گران ایران  
مدیر مسئول: دکتر پرویز دوامی  
سرمدیر: دکتر جلال حجازی  
مدیر اجرایی: دکتر نجم‌الدین عرب

## هیات تحریریه:

دکتر حسین آشوری	دانشگاه صنعتی شریف
مهندس اسدالله اسلامی	فولاد طبرستان
دکتر هاشم بنی‌هاشمی	تحقیقات مهندسی مواد فرایاز
دکتر جلال حجازی	دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر پرویز دوامی	دانشگاه صنعت شریف
دکتر مهدی دیواندری	دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر سعید شیبستری	دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر نجم‌الدین عرب	دانشگاه آزاد اسلامی
مهندس عبدالحمید قدیمی	انجمن صنفی ریخته‌گری ایران

نشانی نشریه: تهران، خیابان بهار شمالی، جنب اداره برق، شماره ۱۷۴، طبقه سوم

کدپستی: ۱۵۷۳۶۳۵۸۶۳

تلفن: ۸۸۸۲۴۹۲۷-۸۸۸۲۷۲۰۲، دورنگار: ۸۸۸۲۳۴۹۰

irfs.edu@gmail.com

زیر نظر گروه انتشارات

مجری طرح: نگارین پرتو (۷۷۵۳۰۳۰۷)



# ریخته‌گری

انتشارات جامعه ریخته‌گران ایران / سال سی و دوم / شماره ۱۰۳ / پاییز و زمستان ۱۳۹۲

مطابق تاییدیه شماره ۹۲/۵/۲۶ پ مورخ ۹۲/۳/۳۰ مجله ریخته‌گری از سال ۱۳۷۸ در پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC) با ضریب تاثیر ۰/۱۱۲ نمایه گردیده است.	بررسی تاثیر محیط سردایش پس از عملیات انحلال کامل و تاثیر عملیات پیرسازی بر ریزساختار و سختی سوپر آلیاژ پایه نیکلی IN100 ..... ۲ احمد رحیمی، شمس‌الدین میردامادی، سید حسین رضوی، سید مهدی عباسی، امیر جعفری
	ارزیابی مکانیزم شکست در فولاد هادفیلد ..... ۱۲ مجید عباسی، شهرام خیراندیش، جلال حجازی، یوسف خرازی
	بررسی تاثیر کلسیم بر ترمیم عیب اکسید فیلم دولایه در مذاب آلومینیم ..... ۱۸ فرزانه خالقی فر، رامین رئیس‌زاده، حمید دوست محمدی
	اثر افزودن سیلیسیم بر رفتار انبساط حرارتی آلیاژ ریختگی برنج Cu-Zn40 ..... ۲۵ حمید دوست محمدی، حمید مریدشاهی
	تاثیر زمان ماند مذاب بر رفتار اکسید فیلم‌های دوتایی در آلیاژهای Al-0.8Mg-7.5%Si و Al-2%Mg-7.5Si ..... ۳۱ امینه شفایی، رامین رئیس‌زاده
	ریخته‌گری فوم آلومینیم A356 سلول بسته به کمک مخلوط مذاب و سیلیکون - دولومیت گرانوله و بررسی رفتار فشاری آن ..... ۳۸ سید محمد حسین میرباقری، رضا پور غلام
	تاثیر اندازه، شکل و توزیع سلول‌ها در فوم‌های چدن خاکستری تولید شده به روش ریختگی توسط گوی‌های ماسه‌ای ..... ۵۱ حمید سازگاران، علیرضا کیانی رشید
	بررسی تاثیر گرافن بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت آلومینیم /گرافن ..... ۵۸ علی محمد بیگی، محمد ذاکری، علی نظری

تأییدیه اصحی  
با تأییدیه شماره ۹۲/۵/۲۶ مورخ ۹۲/۳/۳۰  
مجله ریخته‌گری از سال ۱۳۷۸ در پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC) با ضریب تاثیر ۰/۱۱۲ نمایه گردیده است.



شرح روی جلد:  
ساختار شاخه‌ای (دندریتی) در شمش خالص منیزیم

# تأثیر اندازه، شکل و توزیع سلول‌ها در فوم‌های چدن خاکستری تولید شده به روش ریختگی توسط گوی‌های ماسه‌ای

حمید سازگارانی<sup>۱</sup>، علیرضا کیانی‌رشید<sup>۲</sup>

۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
hamid.sazegaran@gmail.com

۲ دانشیار گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
kianirashid@um.ac.ir

## Effect of size, shape and distribution of cells in grey cast iron foam produced by casting process used of sand space holder

H. Sazegaran<sup>1</sup> & A.R. Kiani-Rashid<sup>2</sup>

1 PhD student of Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (E-mail address: Hamid.Sazegaran@gmail.com)

2 Associate Professor of Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (E-mail address: kianirashid@um.ac.ir)

### چکیده

مواد سلولولی و فوم‌ها دسته‌ای از مواد مهندسی نوین هستند که به علت داشتن ویژگی‌های منحصر به فرد می‌توانند در بسیاری از کاربردها صنعتی به صورت موفقیت‌آمیز به کار گرفته شوند. در این پژوهش، چدن خاکستری متخلخل با استفاده از قرار دادن گوی‌های ماسه‌ای درون قالب ماسه خشک و استفاده از فرآیند ریخته‌گری تولید شده‌اند و تاثیرات اندازه، شکل و توزیع سلول‌های ایجاد شده مورد مطالعه قرار گرفته است. تهیه مذاب توسط کوره دوار صورت گرفت و چهار نمونه فوم چدن خاکستری تولید شد که هر کدام دارای سلول‌های باز با اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت می‌باشند. ترکیب شیمیایی نمونه تولید تعیین شد و سایر آزمایشات شامل اندازه‌گیری درصد تخلخل، آزمون فشار، بررسی‌های میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی و رادیوگرافی می‌باشد. در بررسی‌های ریزساختاری مشاهده می‌شود که ریزساختار پرلیتی با گرافیت‌های ورقه‌ای نوع A می‌باشد و تصاویر رادیوگرافی نشان می‌دهد که در نمونه‌های دارای سلول‌های کوچک‌تر، توزیع حفرات یکنواخت‌تر می‌باشد. علاوه بر این، در نمونه‌های دارای سلول‌های کوچک‌تر، درصد تخلخل بیشتر می‌باشد و چگالی کاهش می‌یابد که سبب کاهش استحکام فشاری می‌گردد.

واژگان کلیدی: چدن خاکستری، مواد سلولولی، استحکام فشاری، ریزساختار.

### Abstract:

Cellular materials and foams are types of engineering materials due to their unique characteristics can be applied successfully in many industrial applications. In this study, porous grey cast iron was produced using dry sand casting process that the sand balls was inserted into the sand moulds and effect of size, shape and distribution of the cells has been studied. Rotary kiln was used for melting of iron and four specimens of porous grey cast iron were produced with open cells and different size and shape of cells. The chemical composition of the specimens was determined and other tests were included measurement of porosity percents, compression tests, optical microscopic and scanning electron microscopic evaluation and radiography. The results are shown that the pearlite microstructure with A-type of graphite flakes is formed and radiography images are shown that the distribution of cells is more uniform in the specimen with smaller pores. In addition, in specimens with smaller cells, porosity percent is increased and density is decreased, as a result, the compressive strength is decreased.

**Keywords:** Grey cast iron, Cellular materials, Compressive strength, Microstructure.

این انتظار وجود دارد که تولید و توسعه چدن‌های سبک سبب افزایش کاربردهای این ماده ارزشمند مهندسی شود. افزودن درصد‌های بالای آلومینیوم به چدن‌های خاکستری با هدف کاهش وزن سبب ایجاد ذرات آلومینای کروی شکل درون زمینه می‌گردد [۱۴]. استفاده از حفرات در زمینه چدن‌ها نیز می‌تواند شیوه‌ای به منظور سبک‌سازی آن‌ها باشد [۱۲]. این احتمال وجود دارد که ایجاد تخلخل در زمینه چدن خاکستری به منظور تولید فوم‌های چدنی منجر به ایجاد یک ماده جدید مهندسی خواهد شد که هم‌زمان دارای ویژگی‌های منحصر به فرد چدن‌ها و فوم‌های فلزی باشد. در این پژوهش، فوم‌های چدن خاکستری با تنوع در چگونگی حفرات توسط فرآیند ریخته‌گری ماسه‌ای و قرار دادن گوی‌های ماسه‌ای درون قالب تولید شدند و تأثیرات اندازه، شکل و توزیع سلول‌ها بر رفتار فشاری و ریزساختاری آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش آزمایشات

در این پژوهش، تولید فوم‌های چدن خاکستری توسط روش ریخته‌گری ماسه خشک و استفاده از گوی‌های ماسه‌ای به عنوان پُرکننده فضای قالب و خروج آن‌ها پس از فرآیند ریخته‌گری انجام شده است. به منظور ساخت گوی‌های ماسه‌ای از ماسه مستحکم شونده با رزین یا ماسه چراغی (نوعی ماسه که از مخلوط ماسه بر پایه سیلیس و پوشش رزین‌های مصنوعی گرماسخت همانند فنل فرمالدهید و یا اوره ساخته می‌شود و به وسیله حرارت سخت می‌گردد) و یک قالب آلومینیومی استفاده شد. از قالب آلومینیومی با سه حفره کروی و یک حفره استوانه‌ای استفاده شد. قطر حفرات کروی شکل قالب آلومینیومی به ترتیب برابر ۱۳، ۱۰ و ۱۸ میلی‌متر می‌باشد و حفره استوانه‌ای شکل دارای قطر ۶ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. هر حفره قالب دارای راهگاهی استوانه‌ای شکل جهت ورود ماسه به درون آن می‌باشد. پس از پُر شدن حفرات قالب توسط ماسه، حرارتی در حدود  $200^{\circ}\text{C}$  با استفاده از مشعل به قالب داده می‌شود و گوی‌های ماسه‌ای با اشکال مورد نظر تولید می‌شوند. در شکل ۱ گوی‌های ساخته شده توسط قالب آلومینیومی نمایش داده شده است. فرآیند ساخت گوی‌های ماسه‌ای آن‌قدر تکرار می‌گردد تا به مقدار کافی گوی ماسه‌ای تولید شود. به منظور انجام فرآیند ریخته‌گری، چهار قالب ماسه خشک با ابعاد  $59\text{ mm} \times 58/5\text{ mm} \times 50/5\text{ mm}$  تهیه شدند که توسط حروف A، B، C و D نام‌گذاری شدند. قالب A توسط گوی‌های کروی با قطر  $10\text{ mm}$ ، قالب B توسط گوی‌های کروی با قطر  $13\text{ mm}$ ، قالب C توسط گوی‌های کروی با قطر  $18\text{ mm}$  و قالب D توسط استوانه‌های ماسه‌ای پُر شدند. مذاب چدن خاکستری با ترکیب شیمیایی که در

در سال‌های اخیر، نیازمندی‌های شدیدی به استفاده از مواد متخلخل در صنایع گوناگون ایجاد شده است. مواد سلولی و فوم‌های فلزی دسته‌ای از مواد پیشرفته با ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی منحصر به فرد می‌باشند [۱-۳]. هدف اصلی از توسعه و تولید مواد متخلخل به ویژه فوم‌های فلزی استفاده از آن‌ها در کاربردهای صنعتی گوناگون می‌باشد که نیازمند کاهش وزن، سفتی، استحکام و قابلیت جذب انرژی زیاد، ارزان بودن، عایق بودن در برابر صوت و حرارت و همچنین ویژگی جذب امواج و جذب ارتعاشات مکانیکی می‌باشند [۲ و ۴]. در گذشته، تشکیل هر نوع حفره در ساختار قطعات فلزی به عنوان «عیب» محسوب می‌شد، این در حالی است که در حال حاضر، ایجاد حفرات در فلزات سبب تولید دسته‌ای خاص از مواد تحت عنوان «فلزات متخلخل» یا «فوم‌های فلزی» شده است [۵].

روش‌های مرسوم تولید فوم‌های فلزی منجر به تولید دو نوع از فوم‌ها شامل فوم‌های سلول باز و فوم‌های سلول بسته با اندازه و شکل حفرات متنوع و چگالی‌های مختلف می‌گردد [۱ و ۴]. فوم‌های سلول باز به دسته‌ای از مواد متخلخل اطلاق می‌شود که حفرات آن‌ها به یکدیگر متصل می‌باشند و به سطوح خارجی منتهی می‌شوند و فوم‌های سلول بسته دارای حفراتی هستند که آب‌بند بوده و به یکدیگر متصل نمی‌باشند. روش‌های تولید فوم‌های فلزی به چهار دسته کلی متالورژی پودر، روش‌های ذوبی، روش‌های استفاده از گاز یا بخار فلزی و روش‌های استفاده از یون‌های فلزی دسته‌بندی می‌شوند که هر کدام از این دسته‌ها خود شامل روش‌های گوناگونی می‌باشد [۱ و ۴].

تحقیقات فراوانی در زمینه تولید فوم‌های فولادی و بررسی خواص این دسته از فوم‌ها وجود دارد. روش متالورژی پودر [۶ و ۷]، روش استفاده از گوی‌های توخالی به عنوان پُرکننده فضای قالب در فرآیند ریخته‌گری [۴ و ۸]، روش فلزخورانی با استفاده از نیروی وزن و یا فشار مکانیکی [۹ و ۱۰]، قرار دادن گوی‌های ماسه‌ای به عنوان پُرکننده فضای قالب و خروج آن‌ها پس از ریخته‌گری [۱۱ و ۱۲] و ... جهت تولید فوم‌های فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما متأسفانه در مورد روش‌های تولید فوم‌های چدنی و ویژگی‌های آن‌ها اطلاعات زیادی وجود ندارد. چدن‌ها دسته‌ای از مواد مهندسی می‌باشند که دارای خواص ویژه‌ای همانند قیمت ارزان، قابلیت ریخته‌گری آسان، مقاومت به سایش عالی، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون مناسب و سفتی و استحکام نسبتاً خوب می‌باشند، اما به علت سنگین بودن و چگالی زیاد، روز به روز از کاربردهای آن‌ها کاسته می‌شود [۱۳].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی چند مورد استفاده.

Fe	Cu	Mo	Cr	Ni	Mn	P	S	Si	C
باقیمانده	۰/۰۸۶	۰/۰۱۶	۰/۰۸۸	۰/۰۶۸	۰/۴۶۲	۰/۰۳۲	۰/۱۹۶	۳/۵۴	۲/۷۶

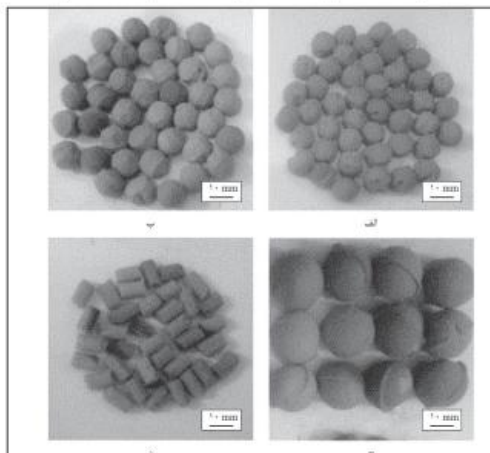
تولید شده خارج شدند و هر نمونه براساس نام قالب ریخته‌گری نام‌گذاری شد. علاوه بر نمونه‌های فومی، یک نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۵ mm و ارتفاع ۲۵ mm جهت اندازه‌گیری چگالی چدن خاکستری و همچنین آزمایش فشار ریخته‌گری شد.

نمونه‌های تولید شده جهت ایجاد سطوحی صاف به اندازه ۵/۰ mm از هر طرف سنگ‌زنی شدند و پس از سنگ‌زنی، ابعاد نمونه‌ها برابر ۵۸ mm × ۵۷/۵ mm × ۴۹/۵ mm اندازه‌گیری شد. نمونه چدن بدون تخلخل نیز به صورت استوانه‌ای با قطر ۸/۷ mm و ارتفاع ۱۲ mm تراش‌کاری شد. در شکل ۲ فوم‌های چدن خاکستری ریخته‌گری شده نمایش داده شده‌اند. بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌های متخلخل توسط میکروسکوپ نوری و نمونه بدون تخلخل توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (میکروسکوپ LEO VP-۱۴۵۰ با اختلاف پتانسیل ۲۰ kV) انجام شد. بررسی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری قبل از اچ و بعد از اچ توسط محلول نایتال ۲ درصد صورت گرفت. جهت بررسی نحوه توزیع سلول‌ها در فوم‌های تولید شده از آزمایش رادیوگرافی توسط دستگاه رادیوگرافی صنعتی اشعه ایکس مدل XXG-۲۰۰۵ استفاده شد.

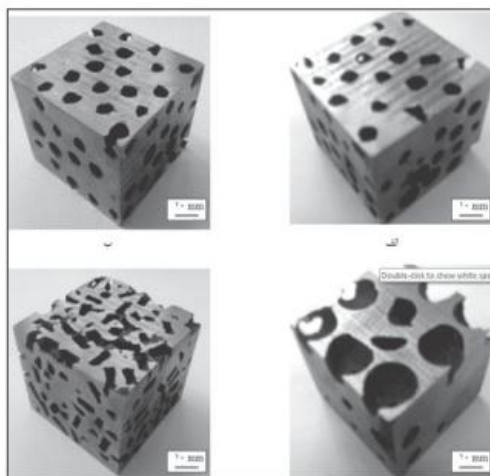
به منظور بررسی رفتار مکانیکی فوم‌های تولیدی، آزمایش فشار انجام شد. نمونه‌های ریخته‌گری شده جهت انجام آزمایش فشار توسط وایرکات به چهار قسمت برش داده شدند و ابعاد نمونه‌های آزمون فشار به ۲۹ mm × ۲۸/۷ mm × ۴۹/۵ mm تبدیل شدند. آزمایشات فشار توسط دستگاه Zwick مدل Z۲۵۰ با ظرفیت KN ۲۵۰ انجام شده‌اند. در آزمایشات فشار سرعت حرکت فک دستگاه ۲ mm/min در نظر گرفته شد. قابل ذکر است که جهت اندازه‌گیری چگالی و تعیین درصد تخلخل، جرم و ابعاد همه نمونه‌های برش خورده قبل از انجام آزمایش فشار اندازه‌گیری شدند.

### ۳- نتایج و بحث

با استفاده از فرآیند ریخته‌گری ماسه خشک و به کارگیری پُرکننده‌های فضا از جنس ماسه مستحکم شونده با رزین، چهار نمونه فوم چدن خاکستری هیپوپوتکتیک تولید شده است. به منظور تعیین چگالی نمونه‌های سنگ‌زنی شده از معادله (۱) استفاده شده است. تعیین حجم فوم‌های ریخته‌گری شده براساس اندازه‌گیری ابعاد محاسبه شده است. درصد تخلخل فوم‌های به دست آمده توسط معادله (۲) محاسبه گردید [۱۵].



شکل ۱- نمایش پُرکننده‌های فضا، الف: گوی‌ها با قطر ۱۰ mm، ب: گوی‌ها با قطر ۱۳ mm، ج: گوی‌ها با قطر ۱۸ mm و د: استوانه‌ها با قطر ۶ mm و ارتفاع ۱۰ mm



شکل ۲- نمایش فوم‌های تولید شده، الف: A (توسط گوی‌های کروی با قطر ۱۰ mm)، ب: B (توسط گوی‌های کروی با قطر ۱۳ mm)، ج: C (توسط گوی‌های کروی با قطر ۱۸ mm) و د: D (توسط استوانه‌های ماسه‌ای با قطر ۶ mm و ارتفاع ۱۰ mm).

جدول ۱ ارائه شده است، توسط کوره دوار تولید و فرآیند ریخته‌گری با دمای مذاب‌ریزی °C ۱۴۰۰ به کمک پاتیل واسطه انجام شد. پس از سرد شدن و انجماد، با استفاده از فشار هوا، ماسه‌های درون فوم‌های

جدول ۲- نتایج به دست آمده از اندازه گیری وزن، ابعاد، چگالی و درصد تخلخل نمونه های تولیدی.

نمونه	شکل حفرات	حجم هر پُرکننده (mm <sup>3</sup> )	جرم (g)	ابعاد نمونه (mm)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	درصد تخلخل (%)
فوم نشده	بدون تخلخل	---	۵/۱۱۱	قطر ۸/۷ و ارتفاع ۱۲	۷۱۷۰	---
فوم A	کروی با قطر ۱۰ mm	۴۱۸۷	۱۲۶/۶	۴۹/۵ × ۲۸/۷ × ۲۹	۳۰۷۳	۵۷/۱
فوم B	کروی با قطر ۱۳ mm	۹۱۹۸	۱۳۳/۸	۴۹/۵ × ۲۸/۷ × ۲۹	۳۲۴۸	۵۴/۷
فوم C	کروی با قطر ۱۸ mm	۲۴۴۱۷	۱۳۵/۰	۴۹/۵ × ۲۸/۷ × ۲۹	۳۲۷۶	۵۴/۳
فوم D	استوانه ای	۱۱۳۰	۱۳۰/۳	۴۹/۵ × ۲۸/۷ × ۲۹	۳۱۶۳	۵۵/۹

معادله (۱)

حجم محصول ریختگی / جرم قطعه ریختگی = چگالی

معادله (۲)

$$100 \times (1 - (\rho_p / \rho_s)) = \text{درصد تخلخل}$$

در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (با استفاده از آشکارسازهای الکترون های ثانویه و الکترون های برگشتی) از نمونه های اچ شده توسط محلول نایتال ۲ درصد در بزرگنمایی های گوناگون به تصویر کشیده شده است. این تصاویر نیز مویذ حضور فازهای آستدیت و آخال های سولفیدی در زمینه کاملاً پرلیتی چدن مورد نظر می باشد.

به منظور بررسی تاثیرات کم بودن ضخامت سلول ها بر روی نوع و شکل گرافیت ها در فوم های چدنی ریخته گری شده، نمونه هایی از بخش های داخلی نمونه های ریخته گری شده تهیه شد و شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ نوری به دست آمده قبل از اچ را نشان می دهد. مطابق با تصاویر، مرحله رشد در فرایند انجماد همه نمونه های ریخته گری شده به صورت کاملاً دندرتی می باشد و گرافیت های نوع E جوانه زنی کرده و رشد یافته اند. مشاهده می شود که شکل گرافیت های ایجاد شده در نمونه B با سایر نمونه ها تفاوت های چشمگیری دارد. در نمونه B شکل گرافیت ها از نوع I و IV می باشد و این در حالی است که در سایر نمونه ها فقط شکل A مشاهده می شود.

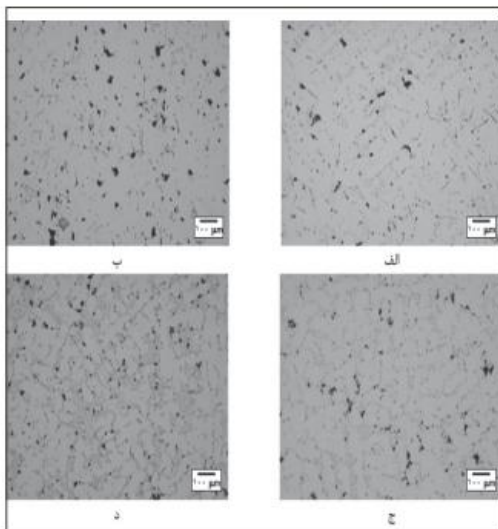
فوم ها دسته ای از مواد هستند که بر اساس حضور حفرات در فاز جامد ایجاد می شوند و می توان به منظور بررسی شکل و توزیع حفرات در این مواد از رادیوگرافی سود جست. در شکل ۶ نتایج رادیوگرافی فوم های ریخته گری به تصویر کشیده شده است. نواحی تاریک فیلم بیانگر قابلیت نفوذ بیشتر اشعه می باشند که تیره تر مشاهده می شوند و نواحی روشن تر بیانگر قابلیت نفوذ کمتر اشعه می باشند. مشاهده می شود که در نمونه های A، B و C توزیع نواحی روشن به صورت منظم تر می باشد و در نمونه D نواحی روشن در اغلب قسمت های تصویر به صورت یکسان توزیع شده اند. بنابراین این گونه می توان استنباط کرد که در نمونه های A، B و C توزیع حفرات منظم می باشد و این در حالی است که در نمونه D که با استفاده از استوانه های ماسه ای تولید شده است، توزیع حفرات دارای نظم کمتری می باشد. بر اساس نواحی تیره تر موجود در تصاویر می توان گفت که ضخامت دیواره سلول ها در نمونه C بیشترین مقدار را دارد

که در این معادله،  $\rho_p$  چگالی فوم و  $\rho_s$  چگالی جامد می باشد. در جدول ۲ حجم پُرکننده های فضا و همچنین میانگین جرم، ابعاد، چگالی و درصد تخلخل نمونه های برش خورده توسط وایرکات قبل از انجام آزمایش فشار ارائه شده است. مطابق با جدول، نمونه A که توسط کوچک ترین اندازه گوی ها تولید شده است، کمترین چگالی و بیشترین درصد تخلخل را دارا می باشد. فوم D که توسط استوانه های ماسه ای تولید شده است در رتبه بعدی قرار می گیرد و فوم های B و C به ترتیب در ردیف های بعدی می باشند. با توجه به این که کاهش قطر گوی ها سبب می گردد که فضای بیشتری از قالب را اشغال کنند، نتایج به دست آمده در مورد فوم های تولید شده توسط گوی های ماسه ای قابل پیش بینی است. به علت این که حجم استوانه های ماسه ای پُرکننده فضا کوچک تر از گوی های A می باشد، این انتظار وجود داشت که درصد تخلخل در نمونه D بیشتر باشد، اما نتیجه معکوس حاصل شده است که احتمالاً به تفاوت در شکل هندسی آن ها و تاثیر این پارامتر مهم بستگی دارد.

در شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه فوم نشده قبل از اچ و بعد از اچ توسط محلول نایتال ۲ درصد در بزرگنمایی های مختلف ارائه شده است. در شکل ۳- الف ورقه های گرافیتی نوع A و C در زمینه چدن خاکستری هیپوپوتکتیک قبل از انجام اچ مشاهده می شوند. همان طور که شکل ۳- ب نمایش می دهد، بعد از انجام اچ، ریزساختاری کاملاً پرلیتی مشاهده می گردد. علاوه بر این در بررسی های میکروسکوپی، فازهای آستدیت و آخال های سولفیدی نیز در زمینه پرلیتی چدن وجود دارند که در اشکال ۳- ج و ۳- د نمونه هایی از این فازها و آخال ها مشاهده می شوند. فاز آستدیت در محدوده های دمایی مشخصی تشکیل می گردند و نهایتاً منجر به کاهش ویژگی های مکانیکی می شود.

جدول ۳- نتایج رفتار فشاری فوم‌های چدنی و نمونه فوم نشده.

نمونه	استحکام فشاری نهایی (MPa)	انرژی جذب شده تا شکست (Nmm)	بیشینه کرنش (%)
فوم A	۸۸	۹۴۵۶۰	۴/۹
فوم B	۹۰	۱۲۳۹۷۵	۵/۳
فوم C	۱۰۰	۱۸۰۶۳۰	۸/۳
فوم D	۶۲	۶۱۸۷۲	۴/۳

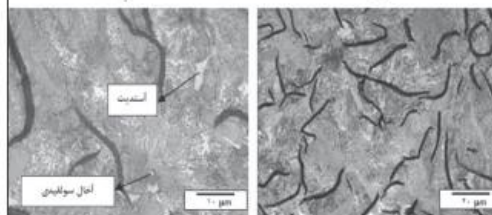
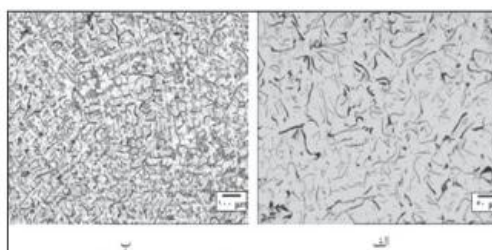


شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از اج فوم‌های چدنی، الف) نمونه A، ب) نمونه B، ج) نمونه C و د) نمونه D.

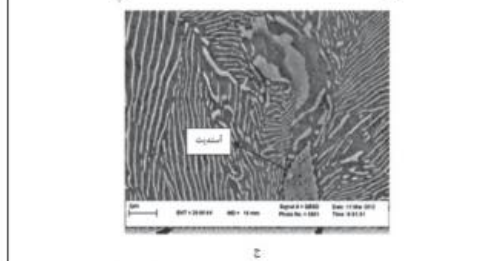
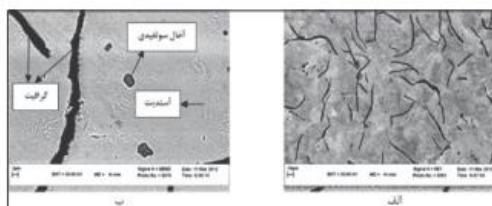
و نمونه‌های B و A در رتبه‌های بعدی قرار دارند. این در حالی است که در تصویر مرتبط با نمونه D کمترین ضخامت دیواره سلول‌ها مشاهده می‌شود.

آزمایش فشار در فوم‌های فلزی و همچنین چدن‌ها به عنوان یکی از آزمایشات پُر کاربرد برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی این مطرح می‌باشند. در شکل ۷، منحنی تنش- کرنش به دست آمده از آزمایشات فشار فوم‌های ریختگی نشان داده شده است. در بین فوم‌های تولید شده، نمونه C بالاترین مقدار تنش را تحمل می‌کند و پس از آن به ترتیب نمونه‌های A، B و D قرار دارند. ضخامت دیواره سلول‌ها را می‌توان به عنوان مهم‌ترین عامل در تحمل تنش در فوم‌های تولیدی محسوب کرد و بنابراین این عامل تأثیر زیادی بر روی منحنی تنش- کرنش فشاری خواهد داشت. بالا بودن توانایی تحمل تنش‌های فشاری در نمونه C نسبت به سایر نمونه‌ها به ضخامت دیواره سلول‌ها ارتباط پیدا می‌کند. به علت این که ضخامت دیواره‌ها در نمونه D نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر می‌باشد (مطابق با نتایج به دست آمده از رادیوگرافی)، این انتظار وجود داشت که منحنی تنش- کرنش این نمونه در سطح پایین‌تری قرار گیرد.

در همه فوم‌های چدنی تولید شده، جوانه‌زنی ترک از روی دیواره سلول‌ها شروع می‌شود و سپس رشد آن منجر به شکست می‌گردد. قابل ذکر است که با کاهش نیرو در پایین‌تر از ۲۰ درصد مقدار بیشینه، آزمایش فشار متوقف می‌شود. در هیچ نمونه‌ای

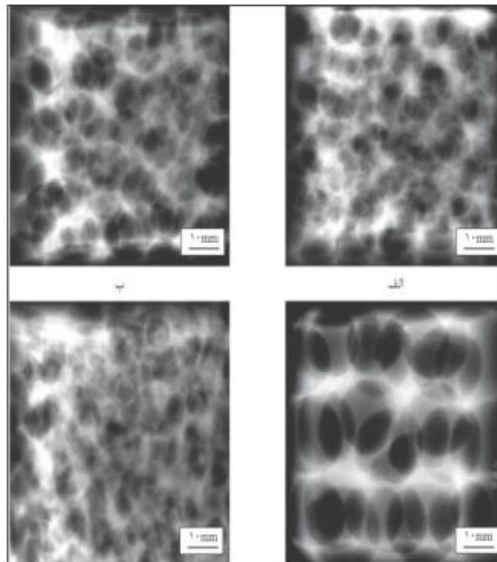


شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه فوم نشده، الف) قبل از اج، ب)، ج) و د) اج شده توسط نایتال ۲ درصد در بزرگنمایی‌های گوناگون.

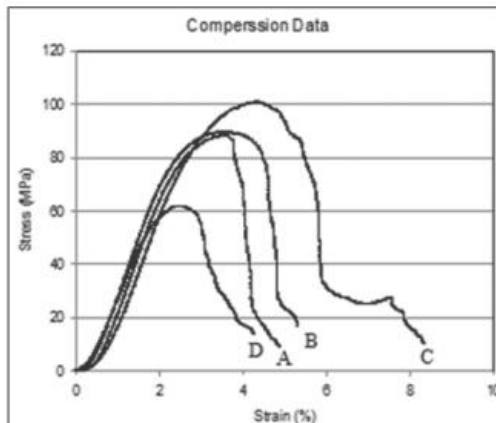


شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه فوم نشده، الف: تصویر الکترون‌های ثانویه در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر، ب: تصویر الکترون‌های برگشتی در بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر و ج: تصویر الکترون‌های برگشتی در بزرگنمایی ۲۰۰۰۰ برابر.





شکل ۶- تصاویر رادیوگرافی فوم‌های تولیدی. الف: فوم A، ب: فوم B، ج: فوم C و د: فوم D.



شکل ۷- منحنی تنش- کرنش فشاری فوم‌های تولیدی.

- در فوم‌های تولید شده توسط استوانه‌های ماسه‌ای، پراکندگی حفرات منظم‌تر و ضخامت دیواره سلول‌ها کم‌تر می‌باشد.
- رفتار فشاری فوم‌های چدن خاکستری هیپوپوتکتیک کاملاً متفاوت با رفتار فوم‌های آلومینیومی می‌باشد و در منحنی تنش- کرنش آنها، ناحیه پلاتو مشاهده نمی‌شود.
  - رفتار فشاری فوم‌های تولیدی به درصد تخلخل، شکل، اندازه و توزیع حفرات و ضخامت دیواره سلول‌ها وابسته می‌باشد.

فروریختن دیواره سلول‌ها همانند آنچه که در مورد فوم‌های آلومینیومی مشاهده می‌شود [۱۶]، دیده نمی‌شود که احتمالاً به رشد ترک از گرافیت‌های درون زمینه پرلیتی ازتباط دارد. تفاوت‌های چشمگیری بین منحنی‌های تنش- کرنش به دست آمده در مورد فوم‌های چدنی با منحنی‌های تنش- کرنش فوم‌های فلزات نرم همانند آلومینیوم وجود دارد. در منحنی‌های به دست آمده ناحیه پلاتو اصلاً مشاهده نمی‌شود که این مسئله را می‌توان براساس ترد بودن چدن خاکستری توجیه کرد. ترد بودن چدن و جوانه‌زنی ترک بر روی ورقه‌های گرافیت منجر به شکست سریع و عدم فروریختن دیواره سلول‌ها و چگالش فوم می‌شود. گسترش ترک‌ها در دیواره سلول‌های فوم‌های تولید شده منجر به انهدام فوم می‌شود.

قابل ذکر است که آزمایش فشار نمونه چدن خاکستری فوم نشده نیز انجام شد که شکست آن در زاویه ۴۵ درجه رخ داد. توانایی تحمل تنش‌های فشاری در فوم‌های ریخته‌گری در مقایسه با نمونه فوم نشده بسیار کمتر می‌باشد که به کاهش ضخامت دیواره سلول‌ها در مقایسه با نمونه حجیم ارتباط دارد. در جدول ۳ نتایج به دست آمده از آزمایشات فشار نمونه‌های فوم شده ارائه شده است. مطابق با جدول، فوم C بیشترین مقدار استحکام فشاری، انرژی جذب شده براساس سطح زیر منحنی تنش- کرنش و بیشینه کرنش را در بین نمونه‌های فومی دارا می‌باشد. رفتار فشاری بهتر فوم C به نسبت سایر فوم‌های تولیدی را می‌توان به ضخامت بیشتر دیواره سلول‌ها و درصد تخلخل پایین‌تر در این فوم ارتباط داد. فوم D که دارای حفرات استوانه‌ای شکل می‌باشد، پایین‌ترین رفتار فشاری را از خود نشان می‌دهد که علت این رفتار را می‌توان توسط توزیع و پراکندگی منظم حفرات، شکل نامناسب حفرات، درصد تخلخل بالا و ضخامت کم دیواره سلول‌ها تشریح کرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- در این تحقیق، توسط گوی‌ها و استوانه‌های ماسه چراغی و با استفاده از قالب ماسه خشک و مذاب چدن خاکستری هیپوپوتکتیک، فوم‌های چدنی با اندازه حفرات گوناگون تولید شدند و نتایج به دست آمده به صورت زیر می‌باشند.
- استفاده از ماسه چراغی به منظور ساخت پُرکننده‌های فضا روشی ساده و موثر می‌باشد که موجب تسهیل در خروج پُرکننده فضا در فرآیند فوم‌سازی می‌شود.
  - استفاده از گوی‌های کوچک‌تر سبب افزایش درصد تخلخل می‌شود.

## مراجع

- Ashby M.F., Evans A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W. and H.G.N Wadley H.G.N., Metal foams; a Design Guide Butterworth-Heinemann, Massachusetts, 2000.
- Banhart J., Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams., *Prog mater science* , 456, pp. 559-632, 2001.
- Tinjian L., Ultra light porous metals: from fundamentals to applications, *Acta, mechanica sinica, Chinese J. mech.* 18 (5), pp. 457-479, 2002.
- B.H. Smith, S. Szyniszewski, 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* 71, pp. 1-10, 2012.
- S. Sridhar, S. S. Mohamed Nazirudeen, M. Kavitha, Production of gunmetal foam casting- A novel technique, *International Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2(10), pp. 5080-5087, 2010.
- C. Park, S.R. Nutt, Effects of process parameters on steel foam synthesis, *Materials Science and Engineering A297*, pp. 62-68, 2001.
- S. Guarino, M. Barletta, S. Pezzola, S. Vesco, Manufacturing of steel foams by Slip Reaction Foam Sintering (SRFS), *Materials and Design* 40, pp. 268-275, 2012.
- Lakshmi J. Vendra, Afsaneh Rabiei, A study on aluminum-steel composite metal foam processed by casting, *Materials Science and Engineering A* 465, pp. 59-67, 2007.
- G. Castro, S.R. Nutt, Synthesis of syntactic steel foam using gravity-fed infiltration, *Materials Science and Engineering A* 553, pp. 89-95, 2012.
- G. Castro, S.R. Nutt, Synthesis of syntactic steel foam using mechanical pressure infiltration, *Materials Science and Engineering A* 535, pp. 274-280, 2012.
- A. K. Shaik dawood, S. S. Mohamed Nazirudeen, A Development of Technology for Making Porous Metal Foams Castings, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Volume 4 , pp. 292 - 299, 2010.
- S. Sridhar, S. S. Mohamed Nazirudeen, M. Kavitha, Production of gunmetal foam castings-a novel technique, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2(10), pp. 5080-5087, 2010.
- C.F. Walton, T.J. Opar, *Iron Casting Handbook*, Iron Casting Society Inc., New York, 5, 1981.
- R. M. Hathaway, 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.
- H. Bafii, A. Habibolahzadeh, Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters, *Materials and Design* 31, pp. 4122-4129, 2010.
- N. V. Ravi Kumar, N. Ramachandra Rao, B. Sudhakar, A.A. Gokhale, Foaming experiments on LM25 alloy reinforced with SiC particulates, *Materials Science and Engineering A* 527, pp. 6082-6090, 2010.

