



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

The Effect of Pouring Temperature on Graphitization of Cast Bars Produced by In-Mold Lost Foam Process

Mohsen Mahdifar¹, Mehdi Divandari^{2*}

1. M.Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.

2. Associate Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology.

Received 07 November 2017

Accepted 28 December 2017

Abstract:

In this study the graphitization characteristics were studied in the test bars produced by the in-mold lost foam (IMLF) process. Polystyrene patterns were prepared, and the test bars were produced in three different diameters. In this paper, only the microstructure of the test bars, having 10 mm diameter and 200 mm height, cast at two temperatures of 1410 and 1440 °C, and 1 wt% of spheroidizing material (FeSiMg), have been investigated. For this purpose, 10 mm bars were cut from two sections, the middle and the end part (the furthest distance from the gate) and then, these sections were examined using optical microscope. The results show that, the melt temperature and fluid flow affect the graphite morphology as well as the distribution, shape, size and type of graphite. In the central part of the test bar, cast at 1410 °C, non-spheroidal graphite is formed which are different from other areas, but at 1440 °C, the graphite in the whole section is uniform and spherical, from the center to edge. The high nodule count (above 700 pcs. per unit surface) and above 80 percent nodularity, in both cases, are worth mentioning.

Keywords:

Nodular graphite cast iron,
In-mold lost foam process,
Pouring temperature,
Graphite distribution,
Polystyrene foam.

Journal homepage: www.foundingjournal.ir

Please cite this article using:

Mahdifar M., Divandari M., Effect of Pouring Temperature on Graphitization of Casting Bars Produced by In-Mold Lost Foam Process, in Persian, Founding Research Journal, 2017, 1(1) 23-35.

DOI: 10.22034/frj.2017.54491

* Corresponding Author:

Mehdi Divandari, Associate Professor

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology,
P.O. Box 16846-13114, Narmak, Tehran, Iran. Tel/Fax: +98 21 77240320.

E-mail: divandari@iust.ac.ir



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

اثر دمای بارریزی بر گرافیت‌زایی مقاطع تولید شده به روش منیزیم در راهگاه توپر

محسن مهدی فر^۱، مهدی دیوانداری^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران. mahdifar91@yahoo.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران. divandari@iust.ac.ir (نویسنده مکاتبه کننده)

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۱۶

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۷

در این تحقیق شرایط گرافیت‌زایی در مقاطع تولید شده به روش تلفیقی منیزیم در راهگاه-توپر مورد بررسی قرار گرفت. مقاطع با مدل پلی استایرین تهیه و ریخته‌گری با سه قطر متفاوت انجام شد. در این مقاله فقط مشخصات ریز ساختاری میله‌های با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر ریخته شده در دو دمای بارریزی ۱۴۱۰ و ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد و مقدار ۱ درصد ماده کرومی‌کننده (فرو سیلیسیم منیزیم)، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور میله‌های با قطر ۱۰ میلی‌متر از دو مقطع، در قسمت میانی و انتهایی (دورترین فاصله از راهباره) بریده شده و سپس این مقاطع با میکروسکپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که دمای بارریزی و حرکت سیال بر مورفولوژی و همچنین نحوه توزیع، شکل و اندازه گرافیت تاثیر بسزایی دارد، بطوری‌که ریزساختار میله‌های ۱۰ میلی‌متری ریخته شده در دمای ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد، در ناحیه مرکزی مقطع غیر کرومی بوده و متفاوت از نواحی دیگر است. اما در دمای ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد گرافیت در کل مقطع، از مرکز تا لبه مقطع، یکنواخت و کرومی است. تعداد گرافیت‌های کرومی (بالاتر از ۷۰۰ عدد در واحد سطح) در میله‌های ریخته شده در هر دو دما و همچنین بالاتر از ۸۰ درصد گرافیت کرومی در هر دو حالت از نکات قابل گزارش محسوب می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

چدن با گرافیت کرومی، روش منیزیم در راهگاه توپر، دمای ریخته‌گری، توزیع گرافیت، فوم پلی استایرن.

۱- مقدمه

در صورت ایجاد وقفه‌ای در تولید، کاهش قیمت تمام شده در صورت داشتن توان مهندسی و طراحی و قابلیت رقابت با کارگاه‌های متفرقه جزو مواردی است که مورد تاکید قرار گرفته است [۷-۱].

فرآیند ریخته‌گری توپر یک فرآیند ریخته‌گری نسبتاً جدید و نزدیک به شکل نهایی است که برای تولید طیف گسترده‌ای از قطعات استفاده شده و ساخت قطعات پیچیده‌ای را که تولید آن‌ها با روش‌های معمولی مستلزم کاربرد تعداد زیادی ماهیچه بطور هم‌زمان است، عملی می‌سازد [۸-۱۱]. این فرآیند در ابتدا برای تولید قطعات ریختگی هنری استفاده شد [۱۲] و به تدریج صنایع خودرو و صنایع دریایی نیز از اولین صنایع بودند که از این فرآیند به صورت تجاری استفاده کردند [۱۳]. این روش بیش‌تر در ریخته‌گری آلومینیم و چدن رایج بوده [۱۴] و اخیراً قابلیت‌های جدیدی از فرآیند ریخته‌گری توپر مورد مطالعه

در فرآیند منیزیم در راهگاه، عمل افزودن منیزیم به چدن مذاب در محفظه فعل و انفعال، که جزئی از سیستم راهگاهی است، صورت می‌گیرد و چون آلیاژ کرومی‌کننده درست لحظه‌ای قبل از انجماد قطعه در مذاب حل می‌شود، مشکل میرایی منیزیم بروز پیدا نمی‌کند [۲-۱]. از مزایای عمده فرآیند منیزیم در راهگاه می‌توان به مواردی مانند: افزایش تعداد گرافیت‌های کرومی در واحد سطح و بهبود ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی، بازدهی بالای منیزیم (بالاتر از ۹۰ درصد و کاهش مصرف منیزیم به حدود نصف مقدار مصرفی در روش‌های دیگر) امکان تولید قطعات ریختگی با ضخامت کم و عاری از کاربرد ناخواسته اشاره نمود. به جز موارد فوق امکان استفاده از قراضه‌های حاوی منگنز بالاتر، کاهش تخلخل چدن، سهولت اتوماسیون کردن خط تولید، امکان استفاده مجدد از مذاب

تلفیق روش توپر با روش منیزیم در راهگاه، علاوه بر بهره‌مندی از مزایای هر دو روش، سبب کاهش سرعت خطی حرکت مذاب و حذف تلاطم سطحی مذاب می‌گردد. با افزایش زمان تماس مذاب با ماده کروی کننده و جوانه‌زنی بهتر، تعداد گرافیت بیش‌تری تشکیل شده و در نتیجه تعداد گرافیت‌های کروی در هر میلی‌متر مربع افزایش می‌یابد [۳۵]. هم‌چنین با حضور فوم در قالب، حرکت مذاب آرام و یکنواخت شده و فرصت کافی جهت بالا آمدن و شناور شدن آخال‌ها و ناخالصی‌های غیر فلزی در صورت طراحی صحیح سیستم راهگاهی فراهم می‌گردد [۳۵]. در مورد دمای بارریزی مناسب در روش منیزیم در راهگاه توپر اطلاعات اندکی وجود دارد [۳۶-۳۷]. هم‌چنین قابلیت تولید مقاطع نازک چدن نشکن با روش منیزیم در راهگاه توپر تا کنون بررسی نشده است.

در این تحقیق اثر دمای بارریزی بر شکل، اندازه و مورفولوژی گرافیت در میله‌های با قطر ۱۰ میلی‌متر و نیز رفتار سیالاتی-انجمادی مذاب در طول مقاطع ۱۰ میلی‌متر ریخته شده، از نظر نحوه توزیع گرافیت کروی و غیر کروی بررسی می‌گردد.

۲- مواد و روش تحقیق

به منظور بررسی اثر دمای بارریزی بر مورفولوژی گرافیت در مقاطع تولید شده به روش منیزیم در راهگاه توپر، ابتدا سیستم راهگاهی نشان داده شده در شکل (۱) طراحی شد. این سیستم راهگاهی متشکل از سه شاخه و هر شاخه، شامل یک محفظه واکنش جداگانه است که در هر یک از آن‌ها امکان قرار دادن مقدار مختلفی از ماده کروی‌کننده وجود دارد. هر شاخه شامل ۲ عدد از میله‌هایی با قطرهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر است.

پس از طراحی، اجزای سیستم راهگاهی از بلوک‌های فومی آماده، بریده شد. بلوک‌های فومی استفاده شده در ساخت مدل و سایر اجزای سیستم راهگاهی از جنس پلی‌استایرن با چگالی ۰/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب انتخاب شد. برای برش بلوک‌های فومی، یک دستگاه سیم داغ با قابلیت تنظیم دما، طراحی و ساخته شد. مونتاژ اجزای سیستم راهگاهی بریده شده با استفاده از چسب مخصوص فوم صورت پذیرفت.

برای قرار دادن ماده کروی‌کننده در داخل محفظه واکنش، ابتدا ورق‌های فومی به ضخامت ۴ میلی‌متر توسط دستگاه

قرار گرفته است [۱۵-۱۹]. در این فرآیند، ابتدا مدل از جنس فوم (معمولا فوم پلی‌استایرن) [۲۰] ساخته شده و با یک پوشش نسوز پایه آبی پوشش داده می‌شود. پس از خشک شدن پوشش، مدل‌ها داخل درجه قرار گرفته و درجه با ماسه بدون چسب و توسط ارتعاش پر می‌شود. [۲۱-۲۲]. سپس فلز مذاب به صورت مستقیم بر روی مدل ریخته می‌شود و مدل فومی در جلوی فلز مذاب پیش‌رونده به محصولات مایع و گازی تجزیه شده و از طریق پوشان متخلخل به درون ماسه نفوذ می‌کند و در نهایت فلز مذاب جایگزین مدل فومی می‌شود [۲۳]. ریخته‌گری توپر با ماسه چسب‌دار نیز انجام می‌شود. مزیت استفاده از ماسه چسب‌دار از بین رفتن خطر ریزش ماسه است اما تولید و بازیابی آن پرهزینه بوده و سرعت تولید را کاهش می‌دهد [۲۴]. مهم‌ترین مزایای روش توپر در مقایسه با روش ریخته‌گری معمولی عبارتند از: حذف ماهیچه‌ها و خطوط جدایش، دقت ابعادی مناسب و مدل‌سازی سریع و ارزان [۲۴-۲۷].

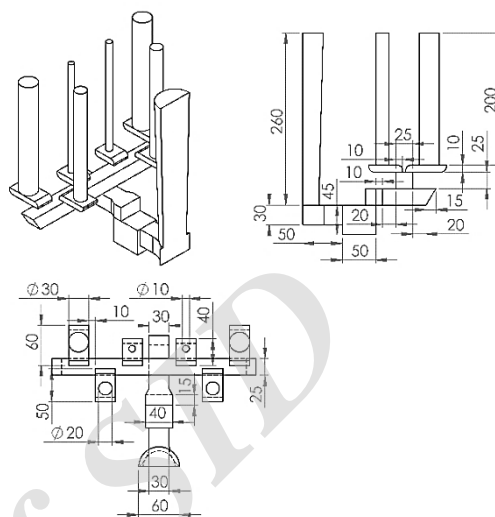
حرکت سیال در درون قالب در روش ریخته‌گری توپر، جزو ویژگی فیزیکی و شیمیایی مهم این روش محسوب می‌شود و تحقیقات در این زمینه جایگاه ویژه‌ای دارد. با ورود مذاب چدن به محفظه قالب، مدل پلی‌استایرن سریعاً شروع به تجزیه نموده [۲۸] و قسمت عمده محصولات تجزیه فوم به گاز تبدیل می‌شود [۲۹] و فاصله‌ای چند سانتی‌متری بین مذاب در حال پیش‌روی و فوم در حال تجزیه به وجود می‌آید [۳۰]. حجم گازهای تولید شده به چگالی فوم و دمای ذوب بستگی دارد. در یک دمای ریختگی ثابت، اگر چگالی مدل افزایش یابد، گاز بیش‌تری تشکیل می‌شود و اگر چگالی مدل ثابت باشد و دمای ریختگی افزایش یابد نیز گاز بیش‌تری تشکیل می‌شود چرا که در دماهای بالاتر، مولکول‌های پلی‌استایرن به مولکول‌های اولیه تجزیه می‌شوند [۳۱-۳۲]. عواملی که بر نوع و مقدار محصولات تجزیه حرارتی فوم و نیز بر خروج این محصولات از طریق پوشان تاثیرگذار هستند، رفتار پر شدن قالب‌های توپر را کنترل کرده و بر کیفیت قطعات ریختگی اثر می‌گذارند [۳۳]. پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی زیادی از قبیل انتقال حرارت و جرم، جریان سیال، واکنش‌های شیمیایی، انجماد، تجزیه مدل پلی‌استایرن در این روش ریخته‌گری دخیل هستند [۲۸، ۳۴].

روش CO₂، با استفاده از ماسه سیلیسی، چسب سیلیکات سدیم انجام گرفت.

برای تهیه ذوب از کوره القایی فرکانس متوسط با ظرفیت ۷۰۰ کیلوگرم و برای اندازه‌گیری دما از ترموکوپل غلافی مصرف‌شونده، استفاده شد. از ضایعات آهن، گرافیت کم گوگرد و فروسیلیسیم ۷۵ درصد به عنوان مواد شارژ استفاده شد. در جدول (۱)، ترکیب شیمیایی ذوب مورد استفاده آمده است. پس از تهیه مذاب، مقدار ۰/۲ درصد فروسیلیسیم ۷۵ درصد به عنوان جوانه‌زا در کف پاتیل قرار داده شد و ذوب در دمای ۱۴۷۰ درجه سانتی‌گراد بر روی آن ریخته شد. پس از افزودن جوانه‌زا، فرصت کافی به ذوب داده شد تا دمای آن کاهش یابد و سپس عملیات بارریزی و ریخته‌گری در دو دمای ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. پس از بارریزی و سرد شدن قالب، عملیات تخلیه قالب و تمیز کاری صورت پذیرفت.

نتایج بدست آمده در مورد هر سه مقطع و سه درصد مختلف (به دلیل زیاد بود اطلاعات ایجاد شده) در یک ماده کرومی‌کننده و از میان مقاطع مختلف، نمونه‌های مربوط به مقدار ۱ درصد فروسیلیسیم منیزیم (به عنوان ماده کرومی‌کننده) و میله با قطر ۱۰ میلی‌متر، برای بررسی اثر دمای بارریزی بر مورفولوژی گرافیت در مقاطع تولید شده به روش منیزیم در راهگاه توپر انتخاب و از سیستم راهگاهی جدا شد. به این منظور، یک مقطع از قسمت میانی و یک مقطع نیز از قسمت بالایی میله (دورترین فاصله از راهباره) بریده و جدا شد. سپس مقاطع برش‌یافته پس از سنباده‌زنی و پولیش با ذرات آلومینا با قطر ۰/۳ میکرومتر، جهت متالوگرافی آماده شد. عملیات تصویربرداری با میکروسکپ نوری HUVITZ مدل HR3-TRF-P و از مرکز تا لبه هر یک از مقاطع برش‌یافته صورت پذیرفت. موقعیت مقاطع برش‌یافته و هم‌چنین نواحی تصویر برداری شده در شکل (۳) نشان داده شده است.

متصل شدند تا شکل محفظه واکنش با ابعاد مورد نظر حاصل شود. به علاوه قبل از اتصال صفحه بالایی محفظه، ماده کرومی‌کننده درون آن قرار داده می‌شد. مدل فومی و اجزای مربوط به آن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱- طرح‌واره و ابعاد مدل استفاده شده در روش ریخته‌گری منیزیم در راهگاه-توپر (ابعاد بر حسب میلی‌متر).

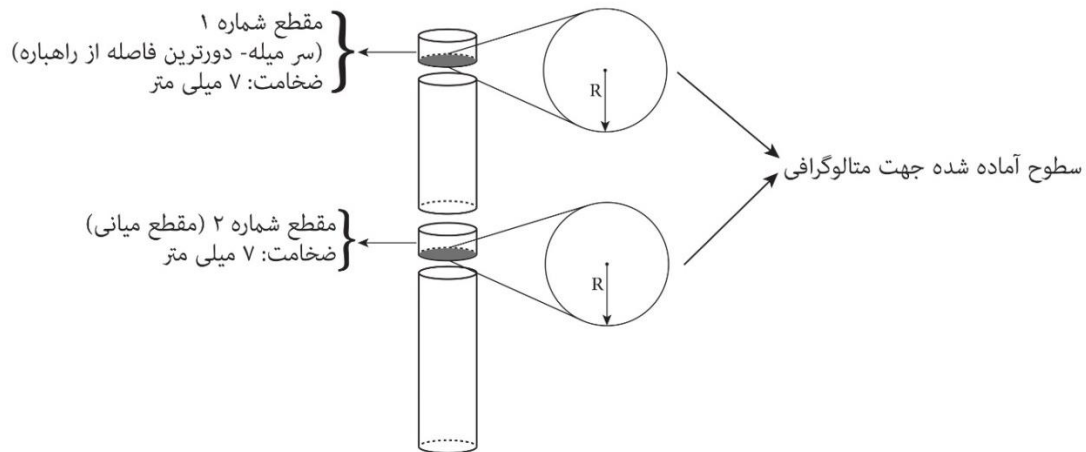


شکل ۲- تصویر مدل فومی ساخته شده و اجزای مربوط به آن.

برای کرومی‌سازی گرافیت از آلیاژ فروسیلیسیم منیزیم ۵-۷ درصد با دانه‌بندی ۱ تا ۴ میلی‌متر و در مقادیر ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد وزنی مذاب استفاده شد. عملیات قالب‌گیری به

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ذوب مورد استفاده در این تحقیق.

عنصر	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
درصد	۹۳/۶۳	۳/۶۲	۲/۱۸	۰/۳۶۱	۰/۰۰۸	۰/۰۲۵	۰/۰۱۶	<۰/۰۰۱
عنصر	Ni	Al	Cu	Sn	Ti	V	Mg	Nb
درصد	۰/۰۳۰	۰/۰۰۵	۰/۰۱۵	۰/۰۱۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰	<۰/۰۰۱



شکل ۳- موقعیت مقاطع برش یافته و همچنین سطوح آماده شده جهت متالوگرافی در میله با قطر ۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر. ناحیه‌ای که به صورت شعاعی (از مرکز تا لبه) تصویربرداری شده با شعاع R نشان داده شده است.

شدن ماسه در اطراف محفظه قالب) می‌تواند تا حدی افت دمای فلز را جبران کرده در نتیجه مذاب، سیالیت کافی برای پر کردن مقاطع کم قطر (در این تحقیق میله با قطر ۱۰mm) را داشته باشد.



شکل ۴- تصویر قطعه ریختگی حاصل از ریخته‌گری در دمای ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد.

شکل (۵)، سه مرحله قابل تصور در فرآیند منیزیم در راهگاه-توپر را نشان می‌دهد. در مرحله اول (شکل ۵-الف) مذاب در حال ورود از راهگاه به راهبار است. در این مرحله مذاب در حال ذوب و تبخیر کردن فوم پلی استایرین است که این فرآیند باعث کاهش دمای مذاب می‌شود. گردوگان و همکارانش [۴۶] به افت دمای حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، در حین ریخته‌گری توپر چدن اشاره کرده‌اند. چنین کاهش دمایی می‌تواند نتایج مشابه آنچه در این تحقیق نشان می‌دهد را به همراه داشته باشد. همچنین شکاف گازی به وجود آمده در حین تجزیه مدل فومی

در نهایت تصاویر به دست آمده از میکروسکپ نوری با نرم‌افزار ImageJ آنالیز شد و ویژگی‌های شکل گرافیت از قبیل تعداد گرافیت کروی در هر میلی‌متر مربع و درصد کرویت برای هر مقطع بررسی شد. لازم به ذکر است که مبنای محاسبات مربوط به مشخصات گرافیت، استفاده از فاکتور شکلی به نام کرویت (sphericity) است که بیش‌ترین استفاده را در چدن نشکن دارد و به صورت زیر (رابطه ۱) تعریف می‌شود. در این رابطه، S فاکتور شکل، A سطح هر ذره گرافیت و P محیط هر ذره گرافیت است. ذره‌ای که دارای $S > 0.65$ باشد به عنوان ذره کروی در نظر گرفته می‌شود [۳۸-۴۵].

$$S = (4 \pi A) / P^2 \quad (1)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- رفتار مذاب

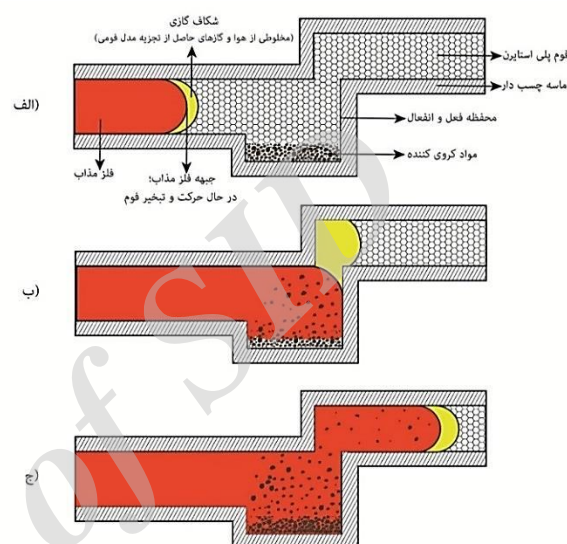
شکل (۴)، تصویر قطعه ریختگی حاصل از ریخته‌گری در دمای 1410°C را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقاطع مورد نظر (مقاطع با قطر ۱۰ میلی‌متر) در این دما به میزان ۹۰ درصد پر شده‌اند. با افزایش دما به 1440°C هیچ‌گونه اثری از نیامد در مقاطع مزبور دیده نشد. بنابراین می‌توان بیان نمود که روش ریخته‌گری منیزیم در راهگاه توپر، قابلیت پر کردن مقاطع با قطر ۱۰mm را دارد. در حالی که حل شدن ماده کروی‌کننده و تبخیر فوم، هر دو منجر، به کاهش دمای مذاب در حال حرکت می‌شوند ولی احتمالاً نقش مثبت ناشی از فرار گازهای حاصل از تجزیه مدل فومی (در حین پر شدن قالب به درون ماسه و گرم

۳-۲- ساختار در دمای ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد

در شکل (۶)، تصاویر مربوط به ریزساختار مقطع شماره ۱ (دورترین فاصله از راهبار) و مقطع شماره ۲ (قسمت میانی) میله ۱۰ میلی‌متری ریخته شده در دمای ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد به صورت شعاعی (از مرکز تا لبه آن)، نشان داده شده است. هم‌چنان‌که در شکل (۶-الف)، مشاهده می‌شود (مربوط به مقطع ۱ در میله ریخته شده در دمای ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد) در مرکز نمونه، ناحیه‌ای وجود دارد که در آن، گرافیت با سه نوع مورفولوژی کروی، فشرده و لایه‌ای دیده می‌شود. در این ناحیه، گرافیت‌های لایه‌ای بسیار ریز بوده و تعداد آن نسبت به دو نوع مورفولوژی دیگر قابل توجه است (شکل ۶-الف، تصاویر a و b در هر دو مقطع ۱ و ۲ کف فاصله‌ای خطی حدود ۸۰ میلی‌متری از هم‌دیگر دارند). با دور شدن از مرکز نمونه گرافیت‌های لایه‌ای از بین رفته و فقط گرافیت‌های کروی با تعدادی گرافیت فشرده حضور دارند (شکل ۶-الف، تصویر c). با نزدیک شدن به لبه نمونه نیز از تعداد گرافیت‌های فشرده کاسته شده و به تعداد گرافیت‌های کروی افزوده می‌شود (شکل ۶-الف، تصاویر d و e).

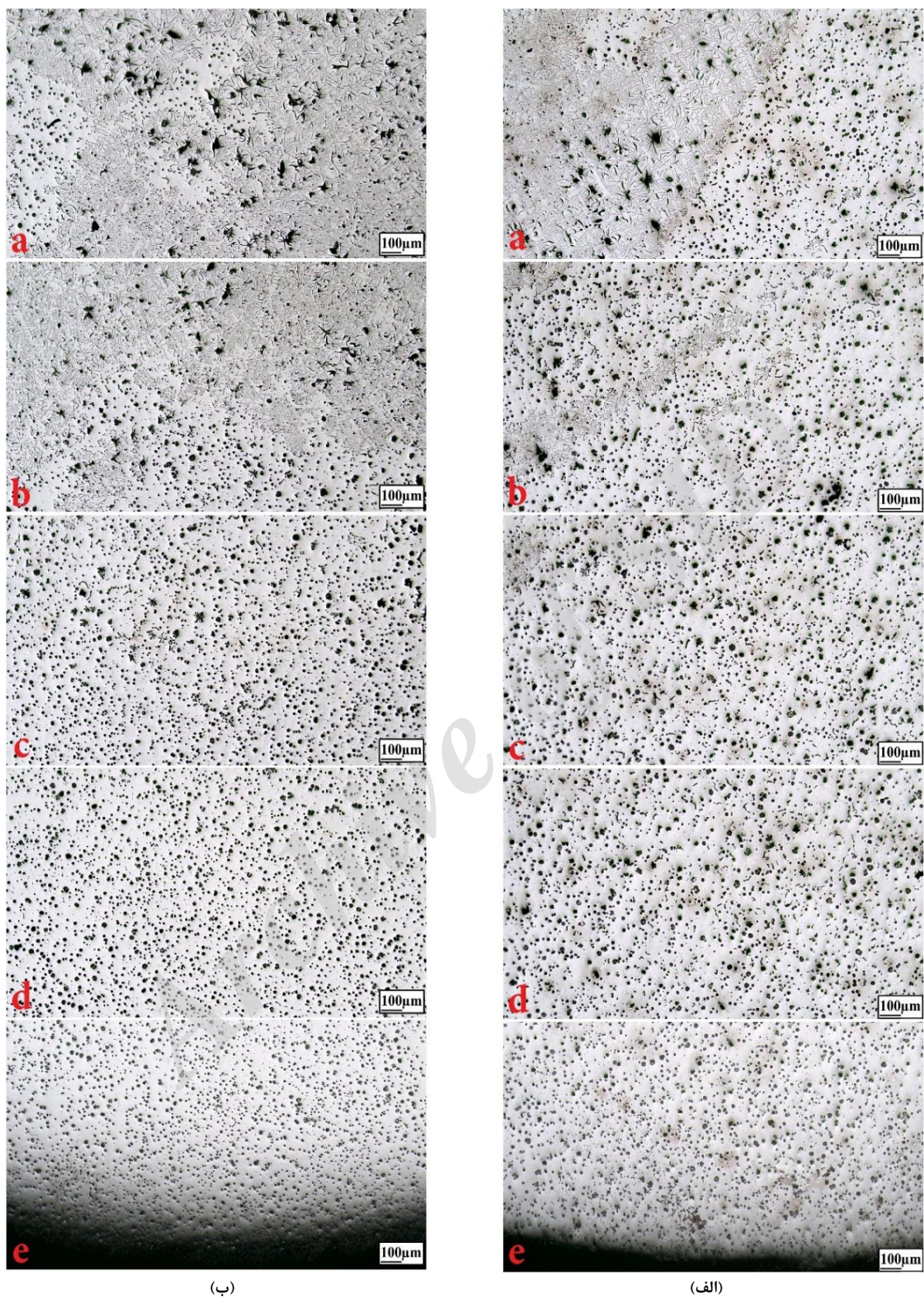
شکل (۶-ب)، تصاویر ریزساختار مقطع شماره ۲ (مقطع میانی) میله ریخته شده در دمای 1410°C را به صورت شعاعی (از مرکز تا لبه آن) نشان می‌دهد. شرایط تشکیل گرافیت با اندکی تغییر، مشابه شکل (۶-الف) است. موقعیت دقیق و هندسه ناحیه مرکزی در هر دو مقطع ۱ و ۲ در این دما به ترتیب در شکل (۷-الف) و (۷-ب) مشاهده می‌شود. ریزساختار هر یک از این مقاطع را می‌توان به دو ناحیه با مورفولوژی متفاوت تقسیم نمود: یکی ناحیه مرکزی با گرافیت‌های کروی، فشرده و لایه‌ای و نواحی دیگر با گرافیت‌های کروی و تعدادی گرافیت فشرده. این دو ناحیه مختلف را می‌توان ناشی از حضور دو جریان مختلف مذاب با سرعت‌های نابرابر و نیز پایین بودن قدرت حلالیت مذاب در این دما دانست. این نتایج نشان می‌دهد که ایجاد گرافیت کروی با توزیع یکنواخت در این روش نیاز به تحقیق مفصل دارد. البته نتایج حاضر از نظر امکان‌پذیری تولید قطعات با گرافیت کروی پر شمار و با میزان کرویت بالا رضایت بخش است.

دمایی کم‌تر از دمای سطح ذوب دارد به گونه‌ای که در این ناحیه با نزدیک شدن به سطح ذوب، دما افزایش می‌یابد. ماریویاما و همکارانش [۴۷]، پروفایل دما در شکاف گازی و سطح ذوب در حال پیشروی در فواصل مختلف از راهبار در حین ریخته‌گری چدن با دمای بارریزی ۱۴۳۰ درجه سانتی‌گراد را اندازه‌گیری کرده‌اند و اعداد مشابهی را گزارش کرده‌اند.



شکل ۵- مراحل پر کردن قالب در روش منیزیم در راهگاه- توپیر: (الف) ورود مذاب از راهگاه به راهبار در حال تبخیر فوم پلی‌استایرین، (ب) مذاب در حال واکنش با مواد کروی کننده، (ج) مذاب واکنش کرده با مواد کروی کننده و در حال پر کردن قسمت‌های قالب پس از خروج از محفظه و واکنش.

با توجه به تاثیر حضور مدل فومی در کاهش دمای مذاب، دمای بارریزی در فرآیند منیزیم در راهگاه توپیر را باید مقداری بالاتر از دمای بارریزی مورد استفاده در فرآیند منیزیم در راهگاه در نظر گرفت. با ورود مذاب به محفظه واکنش و تماس با مواد کروی کننده واکنش بین آن دو صورت گرفته و مذاب به لابه‌لای ذرات کروی کننده نفوذ می‌کند [۴۸]. پس از پر شدن محفظه واکنش، مذاب شروع به خارج شدن از محفظه می‌کند. مذاب خروجی از محفظه واکنش، در حالی‌که در حال ذوب و تبخیر کردن فوم پلی‌استایرین و نیز کامل کردن واکنش با ذرات خارج شده از محفظه است به حرکت خود ادامه داده و قسمت‌های مختلف قالب را پر می‌کند (شکل ۵-ج).



(ب)

(الف)

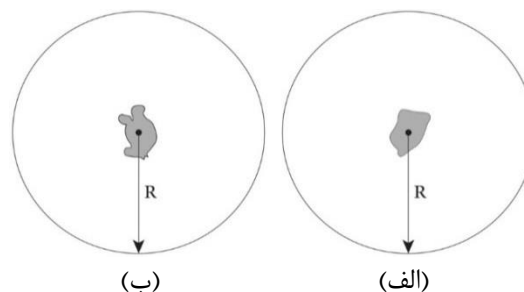
شکل ۶- ریز ساختار مرکز تا لبه میله ریخته شده در دمای 1410°C : (الف) مقطع شماره ۱ (قسمت بالا و دورترین فاصله از راهباره)، (ب) مقطع شماره ۲ (مقطع میانی): تصاویر از a تا e به ترتیب مرکز تا لبه مقطع را نشان می‌دهد.

۳-۳- ساختار در دمای ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد

تصاویر مربوط به ریزساختار مقاطع شماره ۱ (دورترین فاصله از راهباره) و شماره ۲ (قسمت میانی) میله ریخته‌شده در دمای ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد به صورت شعاعی (از مرکز تا لبه آن) به ترتیب در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب)، نشان داده شده است. هم‌چنان‌که در این شکل‌ها، مشاهده می‌شود، در این دما، هیچ‌گونه اثری از ناحیه با گرافیت لایه‌ای وجود نداشته و گرافیت‌ها از مرکز تا لبه به صورت یکنواخت کروی شده‌اند. بنابراین می‌توان گفت که قدرت حلالیت مذاب در این دما به اندازه کافی بالا بوده به گونه‌ای که افت دمای ناشی از تماس جبهه اولیه مذاب با فوم جامد در کاهش میزان منیزیم باقی‌مانده در مذاب تاثیر کم‌تری داشته و هیچ‌گونه گرافیت لایه‌ای در نمونه ایجاد نشده است. اطلاعات مربوط به مشخصات شکل گرافیت در هر دو مقطع این میله (میله ریخته شده در دمای ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد) نیز که مشابه حالت قبل از میانگین آنالیز ۲۰ تصویر در دو بزرگ‌نمایی مختلف حاصل شده در جدول (۲) آمده است.

با توجه به داده‌های جدول (۲)، در خصوص میله ریخته‌شده در دمای 1440°C می‌توان بیان نمود که با فاصله گرفتن از راهباره، شمارگرافیت کروی در هر میلی‌متر مربع با اختلاف قابل توجهی افزایش می‌یابد. دلیل احتمالی افزایش تعداد گرافیت کروی و درصد کرویت در دمای 1440°C در مقطع شماره ۱ نسبت به مقطع شماره ۲ را می‌توان ناشی از قدرت حلالیت بالای مذاب در این دما دانست. به عبارتی در این دما، قدرت حلالیت مذاب به قدری بالا بوده که جبهه اولیه مذاب که اولین برخورد را با ذرات آلیاژ کروی کننده داشته، منیزیم بیش‌تری را در خود حل کرده است بنابراین در این مقطع شمارگرافیت کروی و درصد کرویت بیش‌تر شده است.

اطلاعات مربوط به مشخصات شکل گرافیت در نواحی غیر مرکزی (نواحی حاوی گرافیت کروی و عاری از گرافیت لایه‌ای) در هر دو مقطع این میله (میله ریخته‌شده در دمای ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد) که از میانگین آنالیز ۲۰ تصویر در دو بزرگ‌نمایی مختلف حاصل شده در جدول (۲) آمده است. همان‌طور که از داده‌های این جدول پیدا است، با دور شدن از راهباره شمارگرافیت و نیز درصد کرویت مقداری کاهش می‌یابد. البته این کاهش، خیلی قابل ملاحظه نیست ولی به هر حال کوچک‌تر بودن مقادیر شمارگرافیت و درصد کرویت در مقطع شماره ۱ (دورترین فاصله از راهباره) نسبت به مقطع شماره ۲ (مقطع میانی) را می‌توان ناشی از پایین بودن دمای بارریزی و افت دمای جبهه اولیه مذاب که با فوم در تماس است دانست. جبهه اولیه مذاب که در فواصل دورتر از راهباره قرار می‌گیرد، به دلیل اثر سرمایشی فوم افت دمایی بیش‌تری دارد. احتمالاً به دلیل کم شدن دمای جبهه اولیه مذاب، قدرت حلالیت آن پایین بوده و میزان منیزیم باقی‌مانده در مذاب اولیه کم‌تر شده و در نتیجه شمارگرافیت و درصد کرویت آن به نسبت مقطع شماره ۲ کم‌تر است.

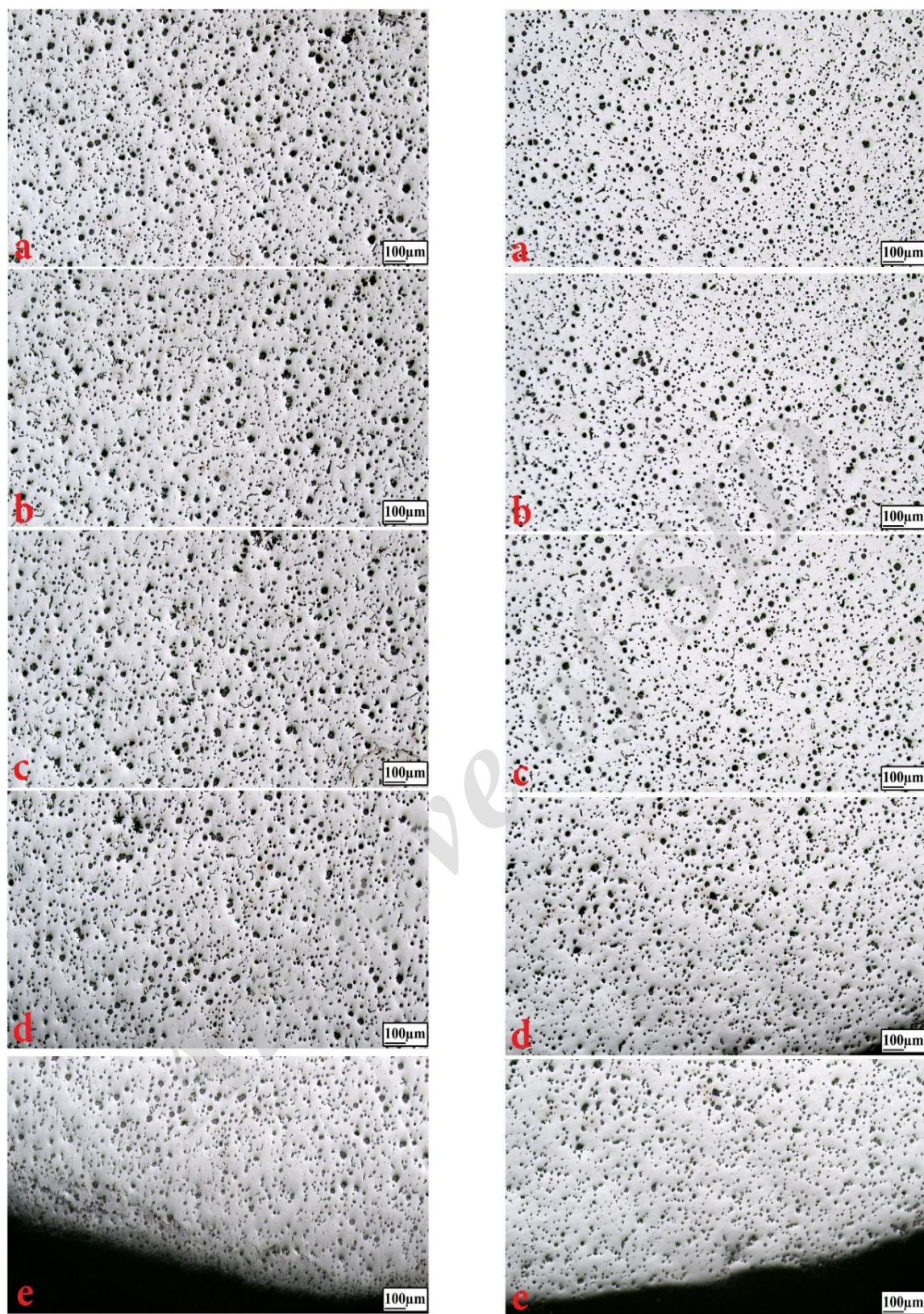


شکل ۷- طرح‌واره موقعیت و هندسه ناحیه دارای گرافیت‌های لایه‌ای که در نواحی مرکزی میله ریخته‌شده در دمای 1410°C ایجاد شده است. ناحیه‌ای که به صورت شعاعی (از مرکز تا لبه) تصویربرداری شده با شعاع R نشان داده شده است: (الف) مقطع شماره ۱، (ب) مقطع شماره ۲ (قسمت میانی) میله ریخته‌شده.

جدول ۲- مشخصات گرافیت‌های رسوب کرده در مقاطع شماره ۱ و ۲ میله‌های با قطر ۱۰ میلی‌متر.

شماره مقطع	دمای بارریزی ($^{\circ}\text{C}$)	تعداد کل گرافیت در 1 mm^2	تعداد گرافیت کروی در 1 mm^2	درصد کرویت (درصد گرافیت کروی)	تعداد گرافیت فشرده در 1 mm^2	درصد گرافیت فشرده
۱*	۱۴۱۰	۱۰۳۳	۸۲۹	۸۰/۲۶	۱۸۶	۱۷/۸۹
۲*	۱۴۱۰	۱۰۵۸	۹۱۴	۸۶/۳۴	۱۳۲	۱۲/۴۸
۱	۱۴۴۰	۱۰۹۹	۹۱۲	۸۲/۹۷	۱۶۸	۱۵/۳۱
۲	۱۴۴۰	۹۴۵	۷۲۶	۷۶/۷۹	۱۹۶	۲۰/۷۶

* اطلاعات مربوط به مشخصات شکل گرافیت در این مقاطع، به نواحی غیر مرکزی (ناحیه مرکزی گرافیت ورقه‌ای تشکیل شده است) مربوط می‌شود.



ب

الف

شکل ۸- ریز ساختار مرکز تا لبه میله ریخته شده در دمای 1440°C : الف) مقطع شماره ۱ (قسمت بالا و دورترین فاصله از راهباره)، ب) مقطع شماره ۲ (مقطع میانی). تصاویر از a تا e به ترتیب مرکز تا لبه مقطع را نشان می‌دهد.

می‌شود که تعداد گرافیت‌های کروی در هر میلی‌متر مربع در همه مقاطع نسبت به سایر روش‌های کروی‌سازی چدن بالا است. در واقع یکی از مزایای تلفیق روش منیزیم در راهگاه (در اینجا روش تلفیقی آن با روش توپر) افزایش قابل ملاحظه شمار گرافیت کروی در هر میلی‌متر مربع است. عجمی و همکارانش [۳۷] در مورد تاثیر مدل فومی بر روی مورفولوژی گرافیت بیان نمودند که روش ریخته‌گری منیزیم در راهگاه توپر، شمارگرافیت را در قالب صفحه‌ای حداقل ۴۰ درصد افزایش می‌دهد و دلیل آن را افزایش مکان‌های جوانه‌زنی دانسته‌اند. دلیل دیگری که می‌توان برای این موضوع مطرح کرد کاهش سرعت حرکت مذاب ناشی از وجود فوم در داخل قالب است. در واقع با کاهش سرعت حرکت مذاب، زمان تماس مذاب با ماده کروی‌کننده گرافیت افزایش یافته و واکنش میان آن‌ها کامل می‌شود. بنابراین تعداد گرافیت‌های کروی در هر میلی‌متر مربع افزایش می‌یابد.

از شکل‌های (۹) و (۱۰) پیدا است که روند تغییر مورفولوژی گرافیت در مقاطع شماره ۱ و ۲ در هر دمای ریختگی متفاوت از دمای دیگر است. در دمای بارریزی ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد، مقادیر مربوط به شمارگرافیت و درصد کرویت در مقطع شماره ۱ (دورترین فاصله از راهباره) کم‌تر از مقطع شماره ۲ (مقطع میانی) است. ولی در دمای ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد، این روند معکوس می‌شود؛ یعنی مقادیر مربوط به شمار گرافیت و درصد کرویت در مقطع شماره ۱ بیشتر از مقطع شماره ۲ است. دلایل مربوط به هر دو مورد در قسمت‌های قبل شرح داده شد. این قضیه، تاثیر بسیار زیاد دمای بارریزی را بر مورفولوژی گرافیت در فرآیند ریخته‌گری منیزیم در راهگاه توپر نشان می‌دهد.

از شکل (۹) مشاهده می‌شود که شمار گرافیت در دمای بارریزی ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد با فاصله گرفتن از راهباره از ۹۱۴ (مقطع ۲) به ۸۲۹ (مقطع ۱) کاهش می‌یابد ولی در دمای بارریزی ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد، شمارگرافیت با فاصله گرفتن از راهباره از ۷۲۶ (مقطع ۲) به ۹۱۲ (مقطع ۱) افزایش می‌یابد. یعنی تغییرات شمارگرافیت در دمای ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد شدیدتر است. بنابراین هر چند افزایش دمای بارریزی سبب از بین رفتن و یا کاهش ناحیه حاوی گرافیت لایه‌ای می‌شود ولی الزاما منجر به بهبود شرایط گرافیت نمی‌شود؛ لذا تحقیق بیشتر در مورد تولید مقاطع نشکن با این فرآیند ضروری به نظر می‌رسد.

دلیل دیگری که برای توجیه این قضیه می‌توان بیان نمود، بیش‌تر بودن سرعت سرد شدن مذاب در مقطع شماره ۱ نسبت به مقطع شماره ۲ است. در مقطع شماره ۱، به دلیل تماس طولانی‌تر جبهه حرکت مذاب با محیط پیرامون و واکنش‌های انجام گرفته سرعت سرد شدن مذاب بیش‌تر از مقاطع دیگر است. با افزایش سرعت سرد شدن، سرعت جوانه‌زنی غیرهمگن افزایش یافته و بنابراین منجر به کوتاه‌تر شدن زمان انجماد (افزایش سرعت انجماد) و افزایش تعداد گرافیت‌های کروی در هر میلی‌متر مربع می‌شود [۴۹]. از طرفی با افزایش تعداد گرافیت‌های کروی در هر میلی‌متر مربع، درصد کرویت نیز افزایش می‌یابد [۴۹].

با توجه به داده‌های جدول (۲)، می‌توان بیان نمود که کاهش تراکم آلیاژ کروی‌کننده و عدم حلالیت یکنواخت آن از شروع تا پایان مرحله بارریزی، باعث تغییرات میزان منیزیم باقی‌مانده در مذاب شده و در نتیجه باعث غیر یکنواختی مورفولوژی گرافیت از مقطع کف تا انتهای میله می‌شود. به گونه‌ای که جبهه اولیه مذاب که به دلیل حرکت آرام مذاب ناشی از وجود فوم در قالب در انتهای میله قرار گرفته دارای گرافیت‌های کروی با تعداد بسیار زیاد و توزیع یکنواخت است ولی با نزدیک شدن به راهباره تعداد گرافیت‌های کروی در ۱ میلی‌متر مربع و درصد کرویت کاهش می‌یابد که نشان دهنده حلالیت زیاد آلیاژ کروی‌کننده در مذاب، در لحظات اولیه بارریزی است. پورآرین و دیواندری که در تحقیق خود از یک مدل صفحه‌ای شکل با ابعاد $15 \times 150 \times 160$ میلیمتر و دمای بارریزی ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده کرده‌اند نیز بیان داشته‌اند که در روش منیزیم در راهگاه توپر، با گذشت زمان از آغاز بارریزی درصد کرویت و تعداد گرافیت کروی در هر میلی‌متر مربع کاهش می‌یابد [۵۰]. در حقیقت ناهمگن بودن شکل و توزیع گرافیت‌ها در ساختار نمونه، بزرگ‌ترین مشکل روش منیزیم در راهگاه است که استفاده از فوم در داخل قالب، باعث تشدید تغییرات به وجود آمده در شرایط انحلال شده و ناهمگنی مورفولوژی گرافیت را افزایش می‌دهد [۳۷].

به منظور بررسی بهتر اثر دما بر مورفولوژی گرافیت، شمارگرافیت کروی در هر میلی‌متر مربع و درصد کرویت برای همه مقاطع برش‌یافته و نیز میانگین آن برای هر میله در هر دو دمای ۱۴۱۰ و ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. مشاهده

۴- نتیجه گیری

۱- روش ریخته‌گری منیزیم در راهگاه توپر، قابلیت پر کردن مقاطع کم قطر (در این تحقیق میله با قطر ۱۰ میلی‌متر) را به طور کامل و بدون استفاده از هیچ‌گونه عملیات متالورژیکی و یا عملیات قالب‌گیری خاصی دارد.

۲- در ریزساختار میله‌های ۱۰ میلی‌متری ریخته شده در دمای ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد، دو ناحیه با مورفولوژی‌های متفاوت گرافیت وجود دارد. وجود این دو ناحیه مختلف را می‌توان ناشی از سرعت بیشتر حرکت مذاب در ناحیه مرکزی و نیز پایین بودن قدرت حلالیت مذاب در این دما دانست.

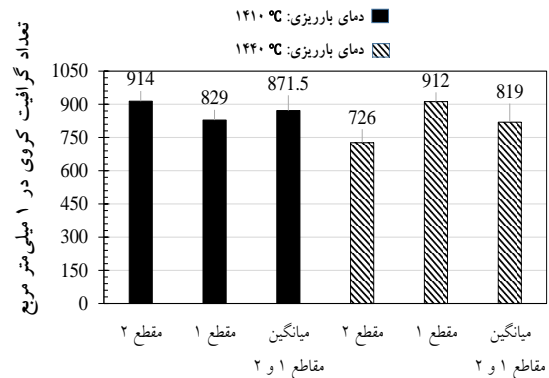
۳- در ریزساختار میله‌های ۱۰ میلی‌متری ریخته‌شده در دمای ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد، به علت بالا بودن قدرت حلالیت مذاب در این دما، هیچ‌گونه اثری از ناحیه با گرافیت لایه‌ای وجود نداشته و گرافیت‌ها از مرکز تا لبه به صورت یکنواخت کروی شده‌اند.

۴- تعداد گرافیت‌های کروی در هر میلی‌متر مربع در میله‌های ریخته شده در هر دو دما بالا بوده که این افزایش قابل توجه در تعداد گرافیت‌های کروی در هر میلی‌متر مربع را می‌توان از مزایای تلفیق روش منیزیم در راهگاه با روش توپر در نظر گرفت.

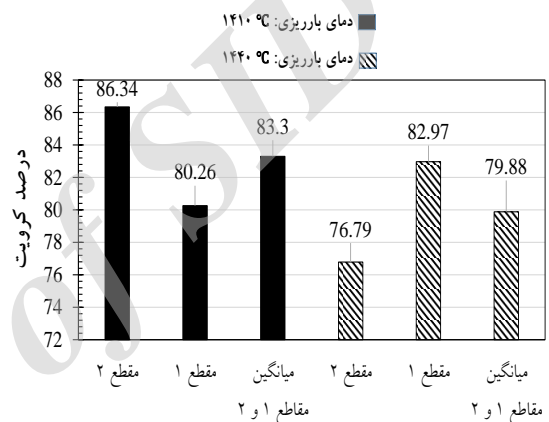
۵- دمای بارریزی در فرآیند ریخته‌گری منیزیم در راهگاه توپر تاثیر بسیار زیادی بر مورفولوژی گرافیت دارد. به طوری که تعداد گرافیت‌های کروی در هر میلی‌متر مربع و نیز درصد کرویت با فاصله گرفتن از راهبار، در دمای ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش و در دمای ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.

تقدیر و تشکر

از آزمایشگاه‌های مواد متخلخل و مشبک و متالوگرافی دانشگاه علم و صنعت ایران، از شرکت به‌ریز فولادان و مدیران محترم آن جناب آقایان مهندس اردشیر کریمی و مهندس صابر بالی و همچنین سایر کارکنان محترم شرکت که در مرحله قالب‌گیری، ذوب و ریخته‌گری نهایت همکاری را انجام دادند و نیز از جناب آقایان مهندس حامد ابوالفتحی و مهندس ابوالفضل تقی‌زاده که به ترتیب در آماده‌سازی نمونه‌های متالوگرافی و طراحی شکل‌ها همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی شود.



شکل ۹- تعداد گرافیت کروی در هر میلی‌متر مربع برای مقاطع برش یافته و نیز میانگین آن برای میله‌های ۱۰ میلی‌متری ریخته شده در دماهای ۱۴۱۰ و ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۱۰- درصد کرویت برای مقاطع برش یافته و نیز میانگین آن برای میله‌های ۱۰ میلی‌متری ریخته‌شده در دماهای ۱۴۱۰ و ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد.

میانگین مقادیر تعداد گرافیت کروی در هر میلی‌متر مربع و درصد کرویت در میله‌های ۱۰ میلی‌متری ریخته‌شده در دمای ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد بیش‌تر از مقادیر مربوط به میله‌های ۱۰ میلی‌متری ریخته‌شده در دمای ۱۴۴۰ درجه سانتی‌گراد است (شکل‌های ۹ و ۱۰). بنابراین با کاهش دمای بارریزی، شمارگرافیت و درصد کرویت بهبود می‌یابد. در واقع با کاهش دمای بارریزی شعاع بحرانی جوانه‌زنی کاهش یافته و به این ترتیب، هسته‌هایی که دارای شعاع کم‌تری هستند نیز توانایی جوانه‌زایی و رشد را خواهند داشت. البته مجدداً تاکید می‌شود که این نتیجه با فرض نادیده گرفتن ریزساختار ناحیه مرکزی در دمای پایین‌تر (۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد) بیان شده و لازم است که در عمل، کم‌ترین دمایی را که در آن ریزساختار ناحیه مرکزی عاری از گرافیت با مورفولوژی لایه‌ای می‌شود، انتخاب و به کار برد.

مراجع

- on mechanical properties of aluminum matrix composites produced via lost foam casting, Proceedings of Iran International Aluminum Conference (IAC 2012) Arak, Iran 2012, 1-7.
- [19] Pakzaman H.R., Khavandi A.R., Divandari M., A study on aluminum matrix composite reinforced with a two-dimensional network of interconnected steel wires fabricated by lost foam casting, New and Advanced Material International Congress, Islamic Azad University, Majlesi Branch, 2012.
- [20] Kumar S., Kumar P., Shan H.S., Parametric optimization of surface roughness castings produced by Evaporative Pattern Casting process, Materials Letters, 2006, 60(25) 3048-3053.
- [21] Chakherlou T.N., Mahdinia Y.V., Akbari A., Influence of lustrous carbon defects on the fatigue life of ductile iron castings using lost foam process, Materials and Design, 2011, 32(1) 162-169.
- [22] Xiao B., Fan Z., Microstructure and mechanical properties of ductile cast iron in lost foam casting with vibration, Journal of Iron and Steel Research International, 2014, 21(11) 1049-1054.
- [23] Barone M.R., Caulk D.A., Analysis of mold filling in lost foam casting of aluminum: Part I Method, International Journal of Metalcasting. 2008, 2(3) 29-45.
- [24] Monroe R.W., Expendable Pattern Casting, AFS Inc., USA, 1992.
- [25] Pacyniak T., Effect of foamed pattern density on the lost foam process, Archives of Foundry Engineering, 2007, 7(3) 231-236.
- [26] Just P., Pacyniak T., Influence analysis foamed polystyrene model on casting defects as well as microstructure ductile cast iron from Lost Foam process with In-mold method, Archives of Foundry Engineering, 2011, 11(3) 155-158.
- [27] Just P., Pacyniak T., The influence of the shape of the reaction chamber on spheroidisation of cast iron produced in the lost foam casting process with use of the In-mold method, Archives of Foundry Engineering, 2012, 12(2) 175-178.
- [28] Mirbagheri S.H. M., Silk J.R., Davami P., Modelling of foam degradation in lost foam casting process, Journal of Materials Science, 2004, 39(14) 4593-603.
- [29] Khodai M., Mirbagheri S.M.H., Behavior of generated gas in lost foam casting, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, 5 431-435.
- [30] Walling R.P., Dantzing J.A., Mechanisms of molds filling in the EPC process, Transactions of the American Foundrymen's Society, 1994, 102, 849-854.
- [31] Shivkumar S., Modelling of temperature losses in liquid metal during casting formation in expendable pattern casting process, Materials Science and Technology, 1994, 10(11) 986-992.
- [32] Kumar S., Kumar P., Shan H.S., Effect of evaporative pattern casting process parameters on the surface roughness of Al-7% Si alloy castings, Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182(1) 615-623.
- [33] Pan E. N., Sheu G. L., The filling phenomena of lost foam cast irons and aluminum alloys, Transaction of the American Foundry, 2003, 1255-1263.
- [34] Liu Y., Bakhtiyarov S.I., Overfelt R.A., Numerical modeling and experimental verification of mold
- [۱] جعفریان، ی.، دوامی، پ.، روشی نو در تولید چدن با گرافیت کرووی "افزودن منیزیم در راهگاه"، ریخته‌گری، ۱۳۶۴، ۶(۳) ۱۱۷-۱۳۸.
- [2] Kaczorowski R., Just P., Pacyniak T., Ductile cast iron obtain by lost foam process and in-mold method, Archives of Metallurgy and Materials, 2013, 58(3) 823-826.
- [۳] جعفریان، ی.، ورهرا، ن.، دوامی، پ.، نگرشی نو بر فرآیند افزودن منیزیم در راهگاه، سمینار سالانه جامعه ریخته‌گران ایران، مرداد ماه ۱۳۷۰.
- [4] Pietrowski S., Control of cast iron and casts manufacturing by In-mold method, Archives of Foundry Engineering, 2009, 9(3) 133-142.
- [5] Pacyniak T., Kaczorowski R., Ductile cast iron obtaining by In-mold method with use of lost foam process, Archives of Foundry Engineering, 2010, 10(1) 101-104.
- [6] Just P., Kaczorowski R., Pacyniak T., Optimization of master alloy amount and gating system design for ductile cast iron obtain in lost foam process, Archives of Foundry Engineering, 2013, 13(3) 43-46.
- [7] McCaulay J. L., Production of nodular-graphite iron castings by the in-mold process, Foundry Trade Journal, 1971, 130(2836) 327-32.
- [8] Shroyer H.F., Cavityless Casting Mold and Method of Making Same, Patent U.S., 1958, 2, 830, 343.
- [9] Shivkumar S., Wang L., Apelian D., The lost-foam casting of aluminum alloy components, Journal of Metals, 1990, 42(11) 38-44.
- [10] Ho S., Hibbard G.D., Ravindran C., Production of magnesium thin-wall cellular castings through lost foam casting, Transactions of the American Foundrymen's Society. 2009, 117-857.
- [11] Kumar P., Kumar S., Shan H.S., Comparative study of some refractory filler materials with zircon flour in evaporative pattern casting process, Transactions of the American Foundry Society. 2006, 114, 987-1000.
- [12] Duca A., Flemings M.C., Taylor H.F., Art Casting, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1963.
- [13] Lessiter M.J., A look back at the 20th century, Lost foam casting, Modern Casting, 2000, 90(11) 54-65.
- [14] Bates C.E., Griffin J., Littleton H., Expendable Pattern Casting-Process Manual, Vol. 1, AFS Publication, 1994, 1.
- [15] Hejazi M., Divandari M., Taghaddos E., Effect of copper insert on the microstructure of gray iron produced via lost foam casting, Materials and Design, 2009, 30(4) 1085-1092.
- [16] Divandari M., Golpayegani A.R.V., Study of Al/Cu rich phases formed in A356 alloy by inserting Cu wire in pattern in LFC process, Materials and Design, 2009, 30(8) 3279-3285.
- [17] Emami S.M., Divandari M., Hajjari E., Arabi H., Comparison between conventional and lost foam compound casting of Al/Mg light metals, International Journal of Cast Metals Research, 2013, 26(1) 43-50.
- [18] Pakzaman H.R., Divandari M., Khavandi A.R., Effect of nickel coating on steel wire reinforcement

- [48] Varahraam N., Ohide T., Variation of residual magnesium and preheating phenomena associated with nodularising alloys employed in the in-mold process, *Cast Metals*, 1989, 2(1) 39-45.
- [49] Iafari H., Idris MH., Ourdjini A., Karimian M., Payganeh G., Influence of gating system, sand grain size, and mould coating on microstructure and mechanical properties of thin-wall ductile iron, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2010, 17(12) 38-45.
- [۵۰] پورآرین ا., دیواندری م., بررسی تاثیر مقدار ماده کروی‌کننده بر مورفولوژی گرافیت در فرآیند ریخته‌گری منیزیم در راهگاه توپر، ریخته‌گری، ۱۳۹۰، ۳۰ (۹۷) ۴۰-۵۰.
- filling and evolved gas pressure in lost foam casting process, *Journal of Materials Science*, 2002, 37(14) 2997-3003.
- [۳۵] مهدی‌فر م., دیواندری م., بررسی مورفولوژی گرافیت در مقاطع تولید شده با فرآیند منیزیم در راهگاه توپر، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مواد و متالورژی و یازدهمین کنفرانس مشترک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن علمی ریخته‌گری ایران، تهران - ایران، ۶ و ۷ آبان ماه ۱۳۹۶.
- [۳۶] رشادی ا., دیواندری م., و بوترابی م., بررسی شرایط حلالیت ماده کروی‌کننده در مذاب و تاثیر آن بر ساختار و خواص قطعات چدن نشکن تولید شده به روش در قالب-توپر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه علم و صنعت ایران؛ ۱۳۸۷.
- [۳۷] بشیر عجمی ر., دیواندری م., عربی ح., بررسی تاثیر مدل فومی بر روی مورفولوژی گرافیت در صفحه‌های ریخته شده به روش منیزیم در راهگاه توپر، پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و جامعه علمی ریخته‌گری ایران، ۱۳۹۰.
- [38] Castro M., Herrera-Trejo M., Alvarado-Reyna J. L., Martinez-Tello C.L., Mendez-Nonell M., Characterization of graphite form in nodular graphite cast iron, *International Journal of Cast Metals Research*, 2003, 16(1-3) 83-86.
- [39] Ruxanda R., Stefanescu D.M., Graphite shape characterization in cast iron—from visual estimation to fractal dimension, *International Journal of Cast Metals Research*, 2002, 14(4) 207-216.
- [40] Vasko A., Vasko M., Correlation between shape factor and mechanical properties of graphitic cast irons, *Production Engineering Archives*, 2016, 11(2) 11-14.
- [41] Imasogie B. I. and Wendt U., Characterization of graphite particle shape in spheroidal graphite iron using a computer-based image analyzer, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2004, 3(1) 1-12.
- [42] Dogan O.N., Schrems K.K., Hawk J.A., Microstructure of Thin-Wall Ductile Iron Casting, U.S. Department of Energy, Albany Research Center, Albany, Oregon, 97321, 2003.
- [43] Ruxanda R.E., Stefanescu D.M., Piwonka T.S., Microstructure characterization of ductile thin wall iron casting, *Transactions American Foundrymen Society*, 2002, 2, 1131-1148.
- [44] Metzloff K.E., Loper J.C.R., Effect of nodularity, heat treatment and copper on the elastic modulus of ductile and compacted graphite irons, In *Transactions of the American Foundry Society and the One Hundred Fifth Annual Castings Congress*, 2001, 1-16.
- [45] Charoenvilaisiri S., Stefanescu D.M., Ruxanda R., Piwonka T.S., Thin wall compacted graphite iron castings, *Transactions American Foundrymen Society*, 2002, 2, 1113-1130.
- [46] Gurdogan O., Huang H., Akay H. U., Fincher W., Mold-filling analysis for ductile iron lost foam castings, *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 1996, 104, 451-459.
- [47] Maruyama T., Gotoh N., Nakagawa T., Kobayashi T., Temperature measurement in thermal decomposition gas gap on evaporative pattern casting of cast iron, *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 2008, 116, 933.