



## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

### بهینه‌سازی شاخص حلالیت منیزیم در تولید چدن نشکن به روش افزودن در راهگاه

مهدی دیوانداری<sup>۱\*</sup>، حامد نیکوکار<sup>۲</sup>، رضا بختیاری<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران،

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۳- دانشیار، گروه مهندسی، دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

\* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۲۱-۷۷۲۴۰۳۲۰، تهران، نارمک، صندوق پستی: ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، E-mail: Divandari@iust.ac.ir

#### چکیده:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۰۹

پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۰

طراحی سیستم راهگاهی یکی از متغیرهای مهم در ریخته‌گری قطعات چدن نشکن به روش افزودن منیزیم در راهگاه است. در این پژوهش از یک سیستم راهگاهی جدید (بر اساس نظریه سرعت بحرانی) برای ریخته‌گری قطعات نمونه استفاده شد. اثر سه شاخص حلالیت منیزیم (مقادیر ۰/۰۳ و ۰/۰۴ و ۰/۰۵ درصد) و ارتفاع محفظه واکنش (مقادیر ۳۰، ۳۵ و ۴۰ میلی‌متر) و اثر استفاده از مبرد بر ریزساختار و نحوه تشکیل گرافیت در موقعیت‌های مختلف قطعه نسبت به سیستم راهگاهی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات میکروسکوپ نوری نشان داد که شرایط مطلوب برای تعداد بیشتر گرافیت‌ها در واحد سطح (ندول کانت بیشتر) و توزیع یکنواخت‌تر آن در سرتاسر قطعه، مربوط به شاخص حلالیت منیزیم ۰/۰۳ درصد و ارتفاع محفظه واکنش ۳۰ میلی‌متر است. با افزایش ارتفاع محفظه واکنش، میزان کروی شدن و تعداد گرافیت‌ها در یک میلی‌متر مربع کاهش یافت. همچنین هر چه قدر، سرعت سرد شدن قطعه بالاتر باشد، تعداد گرافیت‌ها در یک میلی‌متر مربع بیشتر می‌شود.

#### واژه‌های کلیدی:

چدن نشکن،

سیستم راهگاهی،

ریخته‌گری،

فاکتور حلالیت.

#### ارجاع به این مقاله:

مهدی دیوانداری، حامد نیکوکار، رضا بختیاری، بهینه‌سازی شاخص حلالیت منیزیم در تولید چدن نشکن به روش افزودن در راهگاه، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار ۱۳۹۸، جلد ۲، شماره ۱، صفحات ۲۷-۴۳.

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/FRJ.2019.154450.1057

#### ۱- مقدمه

منیزیم در چدن مذاب نسبت به زمان به‌صورت رابطه زیر است

[۱]:

$$Mg_t = Mg_o (e^{-kt}) \quad (1)$$

$Mg_t$ : منیزیم موجود در چدن در لحظه  $t$

$Mg_o$ : منیزیم موجود در چدن لحظه‌ای پس از تلقیح.

اصولاً در چدن‌های خاکستری و نشکن تأثیر مواد افزوده شده به مذاب با زمان تداوم نداشته و بیشترین تأثیر در زمان‌های اولیه افزودن آنها به مذاب است. به دلیل فاصله زمانی کم بین حل شدن منیزیم و انجماد میزان میرایی منیزیم و در نتیجه بازدهی آن در روش منیزیم در راهگاه بسیار بیشتر از روش‌هایی نظیر غوطه‌وری در پاتیل و یا روش ساندویچی است. در این

در میان مواد مهندسی، چدن با گرافیت کروی برای متالورژیست‌ها و طراحان صنعتی دارای ارزش و جایگاه ویژه‌ای است. روش‌های مرسوم تولید این نوع چدن‌ها بر مبنای افزودن منیزیم خالص یا آلیاژ محتوی منیزیم به پاتیل محتوی مذاب و یا قرار دادن آلیاژ منیزیم‌دار در ته پاتیل و بارریزی بر روی آن قرار دارد. افزایش بهره‌دهی فرایندهای جوانه‌زنی و بهبود شرایط کروی نمودن گرافیت در چدن‌ها موضوع فعالیت‌های مطالعاتی و پژوهشی سالیان متمادی بوده است. بر اساس مطالعات انجام شده حداکثر بهره‌دهی هنگامی حاصل می‌شود که فاصله زمانی افزایش مواد جوانه‌زا یا کروی کننده گرافیت تا شروع مرحله انجماد به حداقل برسد. وابستگی مقدار

روش میزان فروسیلیسیم منیزیم مورد نیاز در روش ساندویچی که ۲ درصد است را می‌توان تا ۰/۸ درصد تقلیل داد. با توجه به جوانه‌زایی عالی در روش منیزیم در راهگاه، تعداد گرافیت‌های کروی نسبت به سایر روش‌ها بیشتر بوده و به همین نسبت خواص مکانیکی نیز بهبود پیدا می‌کند. در این حالت سختی و استحکام و مقاومت ضربه‌ی بالاتری نسبت به محصولات سایر روش‌ها دیده می‌شود که به دلیل حضور بیشتر فاز فریت در زمینه است [۶،۲].

در یک خط ریخته‌گری که حدود ۲۰ قالب وجود دارد، بین قالب اول و قالب بیستم که از یک پاتیل ذوب می‌گیرند، هم در خواص و هم در تعداد گرافیت‌ها در واحد سطح، به دلیل میرایی منیزیم، تفاوت وجود دارد. هم‌زمانی عمل جوانه‌زنی و افزودن منیزیم به صورت یکجا و با افزودن فروسیلیسیم منیزیم از مزیت‌های روش افزودن منیزیم در راهگاه به شمار می‌رود.

اولین تأثیر مهم آلیاژ کروی‌کننده، وقتی که به چدن مذاب اضافه می‌شود، ترکیب شدن با گوگرد برای تشکیل ترکیب سولفوردار پایداری است که بر روی سطح فلز شناور می‌گردد. تا زمانی که میزان گوگرد بالای حدود ۰/۱۵ درصد است، عمل گوگردزایی ادامه می‌یابد و در نتیجه عنصر کروی‌کننده آزاد برای آلیاژسازی با فلز موجود نیست [۸].

وقتی میزان گوگرد به کمتر از ۰/۱۵ درصد کاهش یافت عنصر کروی‌کننده به صورت محلول وارد چدن مذاب می‌شود. این عنصر حل شده، عامل مؤثر در فرایند تولید ساختار گرافیت کروی در حالت ریختگی است. آلیاژ کروی‌کننده که با گوگرد چدن ترکیب نمی‌شود، یک پایدارکننده قوی برای کاربید است. بنابراین برای عنصر کروی‌کننده، یک حد بالایی وجود دارد که نباید از آن مقدار تجاوز شود.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، سه شاخص حلالیت ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵ به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. برای شاخص‌های حلالیت ۰/۰۳ و ۰/۰۴، سه ارتفاع متفاوت محافظه واکنش و برای شاخص حلالیت ۰/۰۵ دو ارتفاع متفاوت محافظه واکنش مورد بررسی قرار گرفته شده است. در نتیجه، ۸ قطعه در هر درجه در نظر گرفته شده است.

برای به‌دست آوردن ارتفاع، ابتدا مقدار آلیاژ کروی‌کننده محاسبه و سپس با داشتن جرم حجمی آلیاژ کروی‌کننده و سطح مقطع محافظه واکنش، ارتفاع آلیاژ کروی‌کننده در هر یک از محافظه‌ها محاسبه شد.

در یک خط ریخته‌گری که حدود ۲۰ قالب وجود دارد، بین قالب اول و قالب بیستم که از یک پاتیل ذوب می‌گیرند، هم در خواص و هم در تعداد گرافیت‌ها در واحد سطح، به دلیل میرایی منیزیم، تفاوت وجود دارد. هم‌زمانی عمل جوانه‌زنی و افزودن منیزیم به صورت یکجا و با افزودن فروسیلیسیم منیزیم از مزیت‌های روش افزودن منیزیم در راهگاه به شمار می‌رود.

اولین تأثیر مهم آلیاژ کروی‌کننده، وقتی که به چدن مذاب اضافه می‌شود، ترکیب شدن با گوگرد برای تشکیل ترکیب سولفوردار پایداری است که بر روی سطح فلز شناور می‌گردد. تا زمانی که میزان گوگرد بالای حدود ۰/۱۵ درصد است، عمل گوگردزایی ادامه می‌یابد و در نتیجه عنصر کروی‌کننده آزاد برای آلیاژسازی با فلز موجود نیست [۸].

وقتی میزان گوگرد به کمتر از ۰/۱۵ درصد کاهش یافت عنصر کروی‌کننده به صورت محلول وارد چدن مذاب می‌شود. این عنصر حل شده، عامل مؤثر در فرایند تولید ساختار گرافیت کروی در حالت ریختگی است. آلیاژ کروی‌کننده که با گوگرد چدن ترکیب نمی‌شود، یک پایدارکننده قوی برای کاربید است. بنابراین برای عنصر کروی‌کننده، یک حد بالایی وجود دارد که نباید از آن مقدار تجاوز شود.

فاکتور حلالیت (شاخص حلالیت) به میزان حل شدن آلیاژ کروی‌کننده در مذاب نسبت داده می‌شود و در واقع، نرخ حل شدن آلیاژ را نشان می‌دهد و طبق رابطه (۲) برابر است با [۴-۱]:

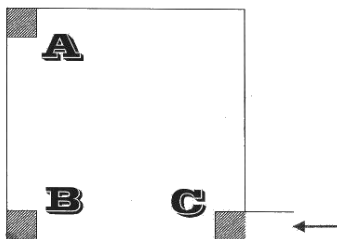
$$A.S.F = \frac{V \left( \frac{kg}{sec} \right)}{A(cm^2)} \quad (2)$$

که  $V$  دبی وزنی مذاب و  $A$  سطح مقطع محافظه واکنش است. اصولاً برای رسیدن به یکنواختی بیشتر باید شاخص حلالیت را بهینه کرد. به این معنی که آن را در دامنه‌ای نگه داشت که آلیاژ کروی‌کننده به میزان مساوی در سرتاسر قطعه ریختگی حل شود.

با توجه به مطالعات صورت گرفته، بهترین دامنه که برای این منظور تعیین شده است بین  $0.04 \text{ kg/sec.cm}^2$  تا

میلی‌متری از جنس فولاد AISI 1045 چسبیده به کف محفظه واکنش قرار گرفت. جنس آلیاژ کرومی کننده FeSiMg ۵ درصد و میزان آلیاژ کرومی در هر محفظه ۰/۸ درصد وزن قطعات یعنی ۶۰ گرم با دانه‌بندی ۰/۳ تا ۰/۷mm انتخاب شد. قبل از ذوب‌ریزی توسط دستگاه کوانتومتر موجود از داخل کوره آنالیز ذوب تهیه شد. آنالیز به‌دست‌آمده از دستگاه کوانتومتر در جدول (۱) تنظیم شده است.

دمای ذوب‌ریزی ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد بود و برای تعیین یکنواختی میزان منیزیم حل شده در کل قطعه ریختگی از هر یک از قطعات، سه نمونه به ترتیب از محل‌های نمایش داده شده در شکل (۲) تهیه شد. ابعاد نمونه‌های بریده‌شده ۲۰mm × ۲۰mm × ۲۰mm بودند. بعد از تهیه نمونه از قطعات هر کدام از نمونه‌ها علامت‌گذاری شدند. برای نام‌گذاری نمونه‌ها از حروف A، B و C به این صورت که حرف A برای نمونه ابتدایی، B برای نمونه میانی و C برای نمونه انتهایی و از اعداد جهت مشخص کردن محفظه واکنش مربوط به هر قطعه استفاده شده است. پس از علامت‌گذاری نمونه‌ها، سطوحی از آنها که جهت متالوگرافی در نظر گرفته شده بودند، سنباده و پولیش شدند. سپس نمونه‌هایی که نیاز بود علاوه بر شمارش گرافیت، ریزساختارشان مورد بررسی قرار گیرند، با محلول نایتال ۲ درصد اچ شدند. ندول کانت<sup>۱</sup> (شمارش گرافیت) نمونه‌ها در یک میلی‌متر مربع در بزرگ‌نمایی ۱۰۰ مطابق استاندارد ASTM E 2567 اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری شمارش گرافیت و درصد کرومی بودن از نرم‌افزار ImageJ استفاده شد.

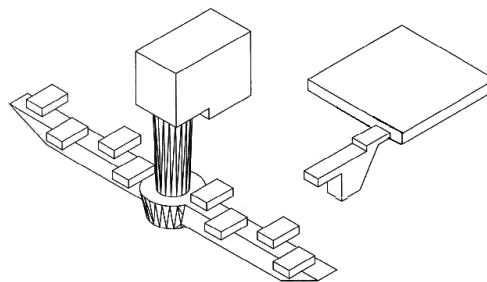


شکل ۲- محل نمونه‌های انتخاب‌شده جهت بررسی ریزساختاری

### ۳- نتایج و بحث

شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ نوری از وضعیت گرافیت‌ها در سه موقعیت A (شکل ۳-الف)، B (شکل ۳-ب) و C (شکل ۳-ج) از قطعه شماره ۱ را نشان می‌دهد. مشهود است گرافیت‌ها در دو موقعیت A و B به‌صورت کرومی و برای موقعیت C، به‌صورت ورقه‌ای نیز است. برای دو موقعیت A و B تعداد

<sup>۱</sup> Nodule Count



شکل ۱- شماتیک سیستم راهگاهی استفاده شده در این تحقیق

جدول ۱- ترکیب شیمیایی مذاب ریخته‌گری شده (درصد وزنی)

عنصر	C	Si	Mo	Mn	Cr	Sn
مقدار	۳/۷	۲/۲	۰/۷	۰/۴	۰/۰۵	۰/۰۱

قطعات و نمونه‌ها به شکل مکعب مستطیل به ابعاد ۲۰۰mm × ۲۰۰mm × ۲۰mm طراحی شدند که در شکل (۱) نشان داده شده است. در ضمن مدول قطعه ریختگی ۸/۳ mm است. طراحی سیستم راهگاهی نیز با در نظر گرفتن روش‌های جدید مبتنی بر (تئوری سرعت بحرانی) صورت گرفته است. طبق این نظریه با داشتن آهنگ پر شدن قالب می‌توان با استفاده از جداول مرجع ابعاد تمامی اجزاء سیستم راهگاهی را محاسبه نمود [۹]. با توجه به این که عمل تلقیح منیزیم در داخل سیستم راهگاهی صورت می‌گیرد و در این روش دمای بارریزی تأثیر بسزایی در میزان انحلال منیزیم در مذاب دارد، بنابراین ترجیحاً تمامی قطعات در یک درجه قالب‌گیری شد تا از افت دمایی مذاب در حین بارریزی جلوگیری شود.

از آنجا که سیستم راهگاهی طراحی شده به‌صورت غیرفشاری بوده و در سیستم غیر فشاری راهباز بر روی راهبار قرار دارد و همچنین خروجی محفظه نیز در روش افزودن منیزیم در راهگاه در روی محفظه واکنش قرار می‌گیرد در نتیجه جهت سهولت در امر قالب‌گیری در طراحی مدل‌های سیستم راهگاهی راهبار از فوم ساخته شد.

بعد از به دست آوردن ابعاد سیستم راهگاهی، مهم‌ترین مسئله طراحی محفظه واکنش است. با داشتن دبی جریان (حجم مذاب تقسیم بر زمان ذوب‌ریزی) و شاخص حلالیت، می‌توان سطح مقطع واکنش را محاسبه نمود. سطح مقطع مستطیلی به‌عنوان بهترین سطح مقطع در طراحی محفظه واکنش در روش افزودن منیزیم در راهگاه در نظر گرفته می‌شود. ماسه استفاده شده جهت قالب‌گیری به دلیل دقت ابعادی بالا ماسه CO<sub>2</sub> بود. به غیر از قالب اول در یک قالب دیگر نیز یک مبرد ۴

جدول ۲- نتایج نمونه‌های قطعات ۱، ۲، ۳ به ازای شاخص حلالیت ۰/۰۳ (سطح مقطع محفظه واکنش ۴×۵ سانتیمتر مربع)

شماره قطعه	موقعیت A	موقعیت B	موقعیت C
۱	۱۰۰ درصد کروی	۱۰۰ درصد کروی	خاکستری از نوع C
۲	۱۰۰ درصد کروی	۸۵ درصد کروی	خاکستری مایل به نشکن
۳	۱۰۰ درصد کروی	۷۰ درصد کروی	۲۰ درصد کروی

جدول ۳- نتایج نمونه‌های قطعات ۴، ۵، ۶ به ازای شاخص حلالیت ۰/۰۴ (سطح مقطع محفظه واکنش ۴×۴ سانتیمتر مربع)

شماره قطعه	موقعیت A	موقعیت B	موقعیت C
۴	۸۵ درصد کروی	۸۰ درصد کروی	۲۰ درصد کروی
۵	۸۵ درصد کروی	۶۰ درصد کروی	۳۰ درصد کروی
۶	۶۵ درصد کروی	۵۰ درصد کروی	۲۰ درصد کروی

جدول ۴- نتایج نمونه‌های قطعات ۷ و ۸ به ازای شاخص حلالیت ۰/۰۵ (سطح مقطع محفظه واکنش ۳×۴ سانتیمتر مربع)

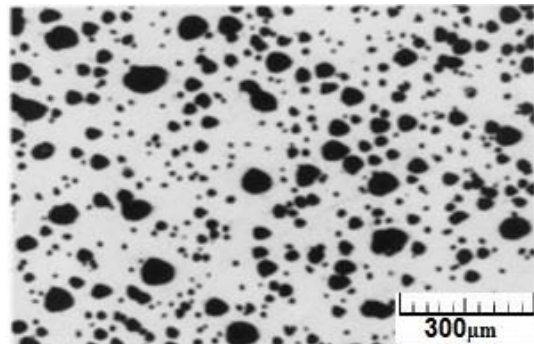
شماره قطعه	موقعیت A	موقعیت B	موقعیت C
۷	۷۰ درصد کروی	۵۰ درصد کروی	۲۰ درصد کروی
۸	۶۰ درصد کروی	۳۰ درصد کروی	خاکستری مایل به نشکن

با توجه به مطالب ذکر شده در مراجع [۶،۴]، هر چقدر شاخص حلالیت کوچک‌تر باشد، میزان حل شدن آلیاژ کروی کننده نیز بیشتر خواهد شد و هر چقدر میزان حلالیت بیشتر شود درصد کروی شدن و ندول کانت افزایش می‌یابد. افزایش درصد کروی شدن به دلیل افزایش میزان منیزیم حل شده در مذاب است و افزایش ندول کانت نیز به دلیل افزایش جوانه‌ها در اثر حل شدن مقدار بیشتری از دانه‌های فروسیلیسیم منیزیم است. با بزرگ‌تر شدن سطح مقطع محفظه واکنش، هم میزان کروی شدن و هم ندول کانت افزایش می‌یابد. آن هم به دلیل افزایش سطح واکنش و درگیر شدن حجم بیشتری از آلیاژ کروی کننده با مذاب است.

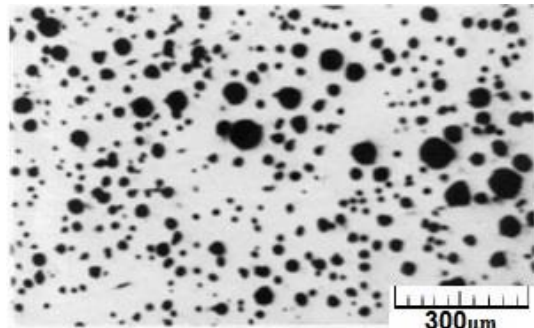
در مورد موقعیت C از قطعه شماره ۱ که از جلوی راهگاه ورودی تهیه شده و گرافیت‌ها کروی نشده‌اند، نیز به دلیل تمام

گرافیت‌ها در واحد سطح، ۵۰۰ به دست آمد. نتایج به دست آمده از کلیه نمونه‌ها پس از متالوگرافی و شمارش تعداد گرافیت‌های کروی و بررسی آنها در جداول (۲)، (۳) و (۴) آورده شده است. این جداول بر اساس نتایج نمونه‌های مربوط به ۳ سطح مقطع مختلف محفظه واکنش (۳ شاخص حلالیت ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵) تقسیم‌بندی شده است.

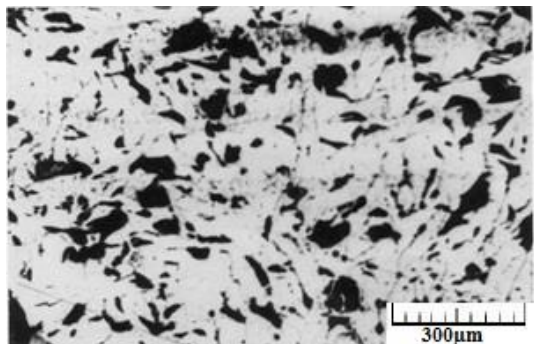
از نتایج به دست آمده مشخص شد که در میان هشت محفظه طراحی شده فقط محفظه‌های شماره ۱، ۲، ۳ جواب صد درصد کروی داشتند و این به معنی آن است که باقی محفظه‌ها به اندازه کافی بزرگ نبوده تا بتوانند عمل تلقیح منیزیم را به خوبی انجام دهند. در واقع شاخص حلالیت ۰/۰۳ از همه مناسب‌تر است.



(الف)



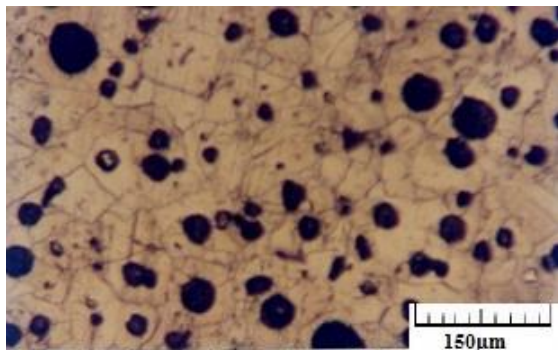
(ب)



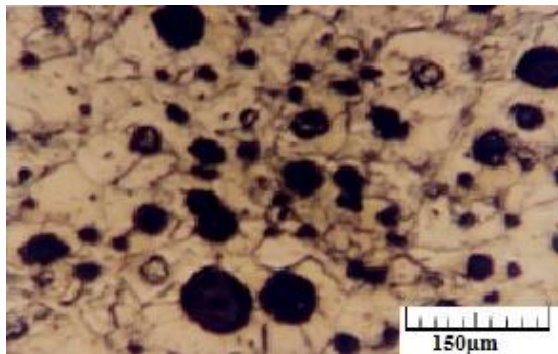
(ج)

شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از وضعیت گرافیت‌ها تهیه شده از قطعه شماره ۱ در دو موقعیت: الف) A و ب) B و ج) C

هم از نظر شمارش گرافیت مقایسه صورت گرفت که در شکل (۵) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که ساختار هر دو نمونه یعنی هم با مبرد و هم بدون مبرد فریتی است. دلیل آن را می‌توان در ندول کانت بالا پیدا کرد به این مفهوم که چون شمارش گرافیت چه در قطعات با مبرد و چه در قطعات بدون مبرد بالا است به کربن اجازه داده می‌شود تا در واکنش یوتکتوئید در زمینه به راحتی نفوذ کند و بر روی گرافیت‌ها بنشینند. این در حالی است که اگر تعداد گرافیت‌های کروی کم باشد، برخی از اتم‌های کربن در زمینه که نسبت به گرافیت‌ها فاصله بیشتری دارند، فرصت آن را پیدا نمی‌کنند تا در زمینه، نفوذ بلند دامنه انجام دهند و به گرافیت‌ها بپیوندند. در نتیجه باید فاز پرلیت تشکیل شود [۱۶].



(الف)



(ب)

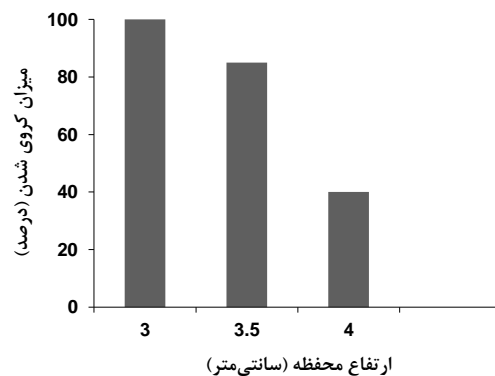
شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار در موقعیت A در دو نمونه: الف) با مبرد و ب) بدون مبرد

تئوری سرعت بحرانی توسط محدوده‌هایی از سرعت مذاب مشخص و محدود می‌شود. این محدوده‌ها عبارتند از سرعت‌های حداقلی که سبب تشکیل عیوب سردجوشی<sup>۱</sup> و لایه‌های اکسیدی<sup>۲</sup> می‌شود و همچنین یک سرعت حداکثر که در صورت عبور از آن، تلاطم سطح مذاب سبب ورود لایه‌های سطحی به درون توده مذاب می‌شود. عدم رعایت محدوده‌های

شدن مواد کروی‌کننده درون محفظه است. چون بر اساس محاسبات قبل از ریخته‌گری وزن قطعه ۶kg تعیین شده بود و پس از بررسی و وزن کردن قطعات ریخته‌گری دیده شد که وزن قطعات ۷kg است. این به معنی آن است که چنانچه درون این محفظه به جای ۶۰gr، ۷۰gr فروسیلیسیم‌منیزیم استفاده شود، موقعیت C از این قطعه نیز کاملاً کروی می‌شود.

موقعیت‌های C از قطعه‌های شماره ۲ و ۳ در مقایسه با موقعیت C از قطعه شماره ۱ نتیجه بهتری دارند، که به دلیل باقی ماندن آلیاژ کروی‌کننده درون محفظه و کاهش سرعت حلالیت در اثر افزایش ارتفاع محفظه است. یعنی اینکه چون ارتفاع محفظه این دو قطعه نسبت به محفظه اولی بیشتر است موقعیت‌های A و B در این دو قطعه کمتر آلیاژ کروی‌کننده در خود حل کرده، در نتیجه نمونه C مقدار بیشتری فروسیلیسیم‌منیزیم در خود حل کرده است.

شکل (۴) ارتباط میان درصد کروی شدن گرافیت با ارتفاع محفظه و واکنش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که چنانچه ارتفاع محفظه بیش از حد بزرگ باشد، کارایی محفظه از بین می‌رود. ارتفاع محفظه شماره ۱ از دو محفظه دیگر یعنی شماره ۲ و ۳ کمتر بوده به همین دلیل با پایین آمدن سطح آلیاژ در حین حل شدن مشکل ایجاد نمی‌شود. در نتیجه تنها در قطعه شماره ۱ هر دو نمونه یعنی نمونه B و A صددرصد کروی شده‌اند. در باقی قطعات به دلیل افزایش ارتفاع محفظه نمونه‌های B کاملاً کروی نشده‌اند که به دلیل کاهش غلظت منیزیم حل شده در اثر افزایش یافتن بیش از حد ارتفاع محفظه در حین واکنش است.



شکل ۴- ارتباط میان درصد کروی شدن با ارتفاع محفظه و واکنش

به دلیل بالا بودن تعداد نمونه‌ها از آماده‌سازی و متالوگرافی نمونه‌های بدون مبرد صرف نظر شد و تنها از موقعیت A از قطعه بدون مبرد مربوط به محفظه شماره ۱ متالوگرافی به عمل آمد و با موقعیت A از قطعه با مبرد، هم از نظر ساختار و

<sup>۱</sup> Cold Laps

<sup>۲</sup> Oxide Laps

۵- هر چه فاصله محفظه واکنش تا قطعه کمتر باشد، میرایی فروسیسیسیم منیزیم کمتر بوده و تعداد گرافیت در واحد سطح بالاتر می‌رود.

### مراجع

- [1] Olawale J.O., Ibitoye S.A., Oluwasegun K.M., Processing techniques and productions of ductile iron, International Journal of Scientific and Engineering Research, 2016, 7(9) 397-423.
- [2] Stawarz M., Janerka K., Dojka M., Selected phenomena of the in-mold nodularization process of cast iron that influence the quality of cast machine parts, Processes, 2017, 5(4) 68-70.
- [3] Wesse S., Mohla P.P., In the mold process, AFS Transactions, 1995, 93, 68-82.
- [4] 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.
- [5] Bunsu W., Shivani A., A model study of treatment inside the mold, AFS Transactions, 1992, 90, 155-172.
- [6] Juretzko F.R., Stefanescu D.M., A new modified in-mold treatment of ductile iron production using direct-pour container technique, AFS Transactions, 2007, 115, 07-046.
- [7] Peny X., Yang Y.M., Ding N.X., Influence of in the mold casting, AFS Transactions, 1987, 90, 227-233.
- [8] Remonein M., Inoculation and spheroidization treatment directly inside the mold, AFS Transactions, 1974, 82, 34-41.
- [۹] بوتراپی س.م.ع.، و همکاران، نگرشی نوین بر طراحی سیستم‌های راهگاهی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ۱۳۷۶.
- [۱۰] مهدی‌فر م.، دیواندروی 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.
- [۱۱] فرشیدی ن.، عرب ف.، سراج ا.، قمری م.، مشکلات تولید قطعات چدن نشکن به روش ریخته‌گری دقیق، ریخته‌گری، ۱۳۹۲، ۳۲، ۳۱-۳۶.
- [۱۲] ذوالفقاری اصل ع.، عابدی ا.، بوتراپی س.م.ع.، تأثیر جوانه‌زایی بر خواص مکانیکی و ریزساختار چدن نشکن ریخته‌گی جداره نازک دارای آلومینیم، ششمین کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی مهندسی مواد و متالورژی، ۱۳۹۶.
- [۱۳] عجمی ب.، دیواندروی م.، عربی ح.، بررسی تأثیر 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.
- [۱۴] پورآرین ا.، دیواندروی م.، بررسی تأثیر مقدار ماده کرومی کننده بر مورفولوژی گرافیت در فرآیند ریخته‌گری منیزیم در راهگاه توپر، ریخته‌گری، ۱۳۹۰، سال ۳۰ (۹۷) ۴۰-۵۰.
- [15] 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
- [16] Iafari H., Idris MH., Ourdjini A., Karirnian M., Payaneh 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.

سرعت بحرانی در هنگام ورود مذاب به محفظه قالب، سبب ایجاد انواع عیوب و ترک‌ها در قطعات ریخته‌گری می‌شود و در نتیجه آنها غیرقابل اطمینان خواهند بود [۱۲، ۱۳].

شرط لازم برای تشکیل پرلیت در چدن نشکن، یا شمارش گرافیت پایین و یا سرعت سرد شدن زیاد است. این‌گونه به نظر می‌رسد که به دلیل جوانه‌زنی قوی، ندول کانت بالا بر سرد شدن مبردی قطعه غلبه کرده و حتی نمونه‌های مبردی نیز ساختار پرلیتی پیدا نکردند. چنانچه به‌جای مبرد از قالب فلزی استفاده شود، این سرعت سرد شدن نمود بیشتری پیدا کرده و احتمال تشکیل فاز پرلیتی نیز وجود دارد [۱۱، ۱۴].

بیشتر شدن تعداد گرافیت در نمونه با مبرد نسبت به نمونه بدون مبرد را نیز می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که هر چه سرعت سرد شدن بیشتر شود، هم نیروی محرکه برای جوانه‌زنی غیرهمگن بیشتر می‌شود و هم از میرایی بیشتر فروسیسیسیم منیزیم جلوگیری به عمل می‌آید. به همین دلیل تعداد جوانه‌ها بیشتر شده است و به همان نسبت تعداد گرافیت افزایش می‌یابد. ریخته‌گری قطعات به همراه مبرد باعث افزایش سرعت انجماد و سرعت سرد شدن می‌شود. افزایش سرعت انجماد منجر به افزایش تعداد گرافیت و افزایش سرعت سرد شدن قطعه منجمد شده منجر به ایجاد فاز پرلیت و ریزتر شدن دانه‌ها می‌شود [۱۵، ۱۹]. چنانچه در زمینه فاز پرلیت ظاهر شود، سختی آن بالاتر می‌رود. در این صورت در کنار چقرمگی بالا، سختی مناسب‌تری در قطعات چدن نشکن حاصل خواهد شد [۱۸].

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بهینه‌سازی متغیرهای مؤثر در تولید چدن نشکن به روش افزودن منیزیم در راهگاه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج زیر به دست آمد:

- ۱- با افزایش سطح مقطع محفظه واکنش (از  $3 \times 4$  تا  $4 \times 5$  سانتیمتر مربع) هم میزان کرومی شدن و هم تعداد گرافیت افزایش می‌یابد.
- ۲- با افزایش ارتفاع سطح مقطع محفظه واکنش، میزان کرومی شدن و تعداد گرافیت‌ها کاهش می‌یابد.
- ۳- از میان ۸ محفظه واکنش طراحی شده در بخش عملی پروژه، محفظه شماره ۱ نسبت به سایر محفظه‌ها مناسب‌تر است.
- ۴- در محفظه واکنش از پایین محفظه به بالا، میزان فروسیسیسیم منیزیم حل شده در مذاب کم می‌شود.