

پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

تأثیر جوانه‌زا و مدول ریختگی بر ریزساختار انجمادی چدن آستنیتی منگنزی با گرافیت کرووی

رحیم رحیم‌پور بصرا^۱، مهران ترابی کفشگری^۲، مجید عباسی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۱۱۳۵۵۰۱۸۰۶، E-mail: abbasim@nit.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

در این مقاله، اثر میزان و نحوه افزودن جوانه‌زا و ضخامت قطعه (مدول ریختگی) بر ریزساختار انجمادی چدن نشکن آستنیتی با مقدار اسمی ۵ درصد وزنی منگنز بررسی شده است. به این منظور بعد از عمل نشکن‌سازی چدن مذاب با فروسیلیکومینیزیم، عملیات جوانه‌زایی با فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار انجام شد. جوانه‌زایی به دو روش اصلی، افزودن در پاتیل و افزودن حین بارریزی در مقادیر مختلف (صفر، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی) انجام شد. همچنین ریخته‌گری در قالب ماسه‌ای با چسب سیلیکات سدیم و به شکل پله‌ای با ضخامت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری و سختی توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی، آنالیز EDS و آنالیز تصویری MIP4 و سختی سنجی راکول‌سی انجام شد. نتایج نشان داد که ریزساختار ریختگی این چدن شامل گرافیت‌های کرووی و کاربیدهای یوتکتیک در زمینه پرلیتی است. با کاهش ضخامت نمونه‌ها، مقدار کاربید یوتکتیک و تعداد گرافیت‌ها، افزایش یافته و مقدار پرلیت و اندازه گرافیت‌ها کاهش می‌یابد. برای تمامی ضخامت‌های جداره مشاهده شد که با جوانه‌زنی، مقدار کاربید یوتکتیک و اندازه گرافیت‌ها کاهش یافته است و در مقابل، تعداد و مقدار کره‌های گرافیت‌های افزایش یافته است. همچنین نشان داده شد که جوانه‌زنی در حین بارریزی موثرتر از جوانه‌زنی در پاتیل است.

واژه‌های کلیدی:
چدن آستنیتی با گرافیت کرووی، جوانه‌زا، منگنز، فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار

ارجاع به این مقاله:

رحیم رحیم‌پور بصرا، مهران ترابی کفشگری، مجید عباسی، تأثیر جوانه‌زا و مدول ریختگی بر ریزساختار انجمادی چدن آستنیتی منگنزی با گرافیت کرووی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار ۱۴۰۰، جلد ۵، شماره ۱، صفحات ۱۹-۲۰.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/frj.2021.205511.1103

۱- مقدمه

(کاربیدزایی) افزایش پیدا می‌کند [۱ و ۲]. تأثیر افزایش منگنز در سیستم دوتایی آهن-کربن شامل کاهش دمای تحول یوتکتوئید، افزایش محدوده پایداری آستنیت، افزایش دمای تحول یوتکتیک و کاهش میزان کربن یوتکتیک و یوتکتوئید است [۳].

$$\%Mn=3\%S+0.35 \quad (1)$$

از سوی دیگر، استفاده از چدن با محتوای نیکل بالا از نظر فنی خوب است درحالی‌که از نظر اقتصادی به‌صرفه نیست. می‌توان به‌طور موفقیت‌آمیزی، نیکل در چدن آستنیتی را با منگنز بالاتر یا محتوای مس، جایگزین کرد. زیرا مس و منگنز هم می‌توانند

منگنز از عناصر آلیاژی در چدن است. نقش اصلی منگنز در چدن، خنثی کردن اثرات مخرب گوگرد با ایجاد ترکیب سولفید منگنز است که مقدار زیادی از آن وارد سرباره می‌شود. منگنز به‌تنهایی در چدن اثر کاربیدزایی دارد ولی به دلیل اینکه گوگرد که عامل کاربیدزا قوی است را از چدن خارج می‌کند، درنهایت، در مقادیر کم به گرافیت‌زایی کمک می‌کند. منگنز در استحاله یوتکتوئیدی سبب پرلیتی شدن ریزساختار می‌شود. درصد وزنی منگنز برای دست‌یابی به ساختار پرلیتی در چدن از رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید. در صورتی‌که منگنز بیشتر از مقدار موردنیاز برای به دست آوردن ساختار پرلیتی باشد، تمایل به سفید شدن چدن

میکرومتر) در جوانه‌زایی گرافیت مؤثرند که اندازه این ناخالصی‌ها خود به سرعت سرد کردن بستگی دارد به گونه‌ای که با افزایش سرعت سرد کردن، اندازه آن‌ها کوچک‌تر خواهد شد [۸ و ۹].

در تحقیقی توسط اولسن و اسکالند [۱۰]، تأثیر مواد جوانه‌زا در چدن نشکن بررسی شد. مشاهده شد که عناصر کلیدی مانند سیلیسیم، کلسیم، استرانسیم، آلومینیم، منیزیم، سریم، گوگرد، اکسیژن و نیتروژن در چدن نشکن، ترکیبات هتروژن غیرفلزی از قبیل سولفیدها، اکسیدها، نیتريد‌ها و سیلیکات‌ها را تشکیل می‌دهند. مطالعات نشان می‌دهد که یک برهم‌کنش پیچیده بین عملیات نشکن‌سازی، جوانه‌زایی و سرعت انجماد (ضخامت قطعه) وجود دارد [۹]. ارتباط ساختار کریستالی و پایداری مناسب جوانه به‌عنوان مناطق قوی برای تشکیل گرافیت در دست بررسی است. اولسن [۱۰] و کابانو و همکاران [۱۱] در مقاله‌های جداگانه‌ای، تأثیر جوانه‌زایی روی ریزساختار و خواص مکانیکی چدن نشکن را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. جوانه‌زایی یک روش مناسب برای کنترل و بهبود ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی چدن‌ها است. در فرآیند جوانه‌زایی گرافیت، نقاط جوانه‌زنی رسوب کربن در مقایسه با تشکیل کاربید بیشتر فراهم شده و گرافیت راحت‌تر تشکیل می‌شود. اکثر جوانه‌زاهای آلیاژی از فروسیلیسیم به همراه مقادیر کمی کلسیم، باریم و عناصر خاکی و آلومینیم است که این سازوکار را تسریع می‌کند [۸].

دیواندری و همکاران [۱۲] نشان دادند که افزایش سطح مقطع محفظه واکنش هم بر میزان کروی شدن و هم افزایش تعداد گرافیت تأثیر می‌گذارد. همچنین نشان داده شد که با افزایش ارتفاع سطح مقطع محفظه واکنش، میزان کروی شدن و تعداد گرافیت‌ها کاهش می‌یابد.

در این مقاله، به‌منظور تولید چدن آستنیتی منگزی با گرافیت‌های کروی مناسب و توزیع مناسب کاربیدهای یوتکتیک، نیاز به طراحی صحیح فرایند جوانه‌زنی و بهسازی در مرحله انجماد است. از این‌رو، اثر مقادیر مختلف جوانه‌زای فروسیلیسیم‌زیرکونیم‌دار به همراه مقدار مشخصی از فروسیلیکومنیسیم (کروی کننده) در ضخامت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش تحقیق

در این مقاله، اثر مقدار و نحوه اضافه کردن فروسیلیکومنیسیم زیرکونیم‌دار به‌عنوان جوانه‌زا در پاتیل (Ladle inoculation) و حین بارریزی مذاب (Pouring stream inoculation) برای تولید چدن آستنیتی با گرافیت کروی با حضور ۵ درصد اسمی منگنز مورد ارزیابی قرار گرفت.

به‌عنوان پایدارکننده آستنیتی عمل کنند. معمولاً تولید چدن آستنیتی با افزودن منگنز، سبب ایجاد ریزساختار پیچیده‌ای می‌شود. همراه با زمینه آستنیتی، ریزساختار به‌شدت تمایل به تولید کاربید ($Mn_{23}C_6$) در میان دانه‌های یا دندریت‌های آستنیت دارد [۴].

علاوه بر این، منگنز پایدارکننده آستنیت بهتری نسبت به مس است [۵]. در حال حاضر در چدن‌ها، منگنز صرفاً برای اهداف آلیاژی‌سازی به مقدار جزئی در چدن‌ها (اغلب کمتر از ۱ درصد وزنی) استفاده می‌شود و در کاهش استفاده از نیکل مشارکت نمی‌کند. فقط تعداد کمی از نشریات، بهینه‌سازی استفاده از منگنز در چدن نیکل-سخت را مطرح کرده‌اند. تا به امروز، هیچ طبقه‌بندی پذیرفته‌شده عمومی از چدن منگنز آستنیتی در استاندارد بین‌المللی معتبر مثل ASTM یا ISO وجود ندارد.

تولید چدن آستنیتی با محتوای منگنز بالا با چندین عامل محدود می‌شود. ریزساختار این چدن تحت تأثیر محتوای منگنز و نرخ خنک‌سازی در طول انجماد قرار دارد. محتوای بیشتر منگنز، رسوب کاربید یوتکتیک را در سرتاسر زمینه آستنیتی افزایش می‌دهد و مانع رسیدن به ریزساختار آستنیتی کامل می‌شود [۶].

برای به دست آوردن چدن با حداقل کاربید از دو روش متفاوت می‌توان استفاده برد. اولین روش استفاده از عملیات جوانه‌زنی و تلقیح است که از ایجاد کاربید در حین انجماد جلوگیری می‌کند. روش تلقیح مناسب، رسوب کاربید طی انجماد و حتی بعد از آن را کاهش می‌دهد و خواص مکانیکی آن را بهبود می‌بخشد. روش دوم استفاده از عملیات حرارتی انحلالی است که می‌تواند کاربیدهای رسوب شده طی انجماد را از تجزیه کرده و به ریزساختار آستنیتی دست یافت.

بارانیکی و همکارانش [۷] نشان دادند که آهن و فروسیلیسیم هر دو باعث افزایش گرافیت‌زایی می‌شوند که تأثیر فروسیلیسیم در گرافیت‌زایی بیشتر است. آن‌ها نشان دادند که بیشترین مقدار گرافیت‌زایی زمانی حاصل می‌شود که درصد سیلیسیم در فروسیلیسیم ۷۵٪ و اندازه آن در محدوده $50-75\mu m$ باشد. علت افزایش سرعت گرافیت‌زایی، انتقال سریع اتم‌ها از مذاب گزارش شده است. در بررسی دیگر توسط ریپوزان و همکارانش [۸] مشاهده شد که نسبت بین شعاع جوانه‌های گرافیت به‌اندازه هسته متناظر با آن‌ها (D_{Max}/d_{Max}) در چدن‌های حاوی سیلیسیم بیشتر از چدن‌های بدون مواد جوانه‌زا است. در این تحقیق همچنان نشان داده شد که نوع مواد جوانه‌زا بر اندازه هسته‌های گرافیت مؤثر است. علاوه بر این ثابت شد تعداد ناخالصی‌های بسیار ریز سولفیدی و اکسیدی/سیلیکاتی (با اندازه ۱ تا ۸

نشکن‌سازی و فرومگنیز مورد استفاده در جدول (۱) و ترکیب شیمیایی مواد بهساز و جوانه‌زا (فروسیلیسیم‌های مختلف) در جدول (۲) آورده شده است.

متغیر بعدی در این آزمایش، مقدار جوانه‌زای اضافه شده در حین بارریزی بوده است. لذا حین بارریزی به کمک مخزنی مخروطی که مقدار خروجی آن قابل کنترل است، عملیات جوانه‌زایی با استفاده از پودر فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار ۷۵ درصد انجام شد. مقادیر ۰، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی مذاب فروسیلیسیم پودر شده با اندازه $0.7-2.0 \mu m$ به مذاب اضافه شد. در جدول (۳) اطلاعات مربوط به طراحی آزمایش و شرایط و میزان مواد جوانه‌زا در قالب و پاتیل ارائه شده است.

مطابق شکل (۱)، مدل به صورت پله‌ای با سه دیواره با ضخامت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر آماده شد که به همراه سیستم راهگامی روی صفحه مدل نصب شد [۱۳]. قالب مورد استفاده از ماسه سیلیسی با چسب سیلیکات سدیم تهیه شد که با گاز CO_2 (روش CO_2) سخت شد.

به این منظور، ابتدا مذاب چدن با استفاده از شمش چدن با گوگرد کم در یک کوره القایی ۱۰۰ کیلوگرمی فرکانس بالا تهیه شد و سپس فرومگنیز برای کنترل منگنز به آن اضافه شد.

عملیات تلقیح برای کروی‌شدن گرافیت‌ها به روش ساندویچی در دو پاتیل پیش‌گرم شده تا ۸۰۰ سانتی‌گراد با ظرفیت ۴۰ کیلوگرمی با دو نوع ترکیب مختلف بهساز و جوانه‌زا انجام شده است. در پاتیل شماره ۱ (L1) بهساز فقط شامل ۲ درصد فروسیلیکومنیسیم (۸۰۰ گرم) بوده است. پاتیل شماره ۲ (L2) حاوی ۲ درصد فروسیلیکومنیسیم (۸۰۰ گرم) به همراه ۰/۳ درصد فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار با اندازه ۶-۱ mm (۱۲۰ گرم) بوده است. این مواد در انتهای پاتیل قرار داده شده و با ماسه پوشش داده شد. بعد از بارریزی مذاب در آن، به کمک یک میله فولادی، پوشش ماسه‌ای روی مواد نشکن‌ساز از بین برده شده و این مواد با مذاب در تماس قرار گرفت. بعد از پایان عملیات کروی‌سازی و تلقیح، بارریزی مذاب در قالب در دمای $1400^\circ C$ انجام شد. ترکیب شیمیایی مذاب چدن نشکن بعد از عمل

جدول ۱- ترکیب شیمیایی چدن تولید شده و فرومگنیز استفاده شده در این تحقیق (بر حسب درصد وزنی)

ماده	C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe
چدن	۳/۶۱	۲/۳۰	۴/۶۲	۰/۰۵۷	۰/۰۱۸	۰/۰۴۲	مابقی
فرومگنیز	۱/۷۰	۱/۵۰	۸۰	۰/۲۰	۰/۰۲	-	مابقی

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آمیزان‌های مورد استفاده در این تحقیق (درصد وزنی)

آمیزان	نقش	Ce	Mg	Zr	Al	Ca	Si	Fe
فروسیلیکو منیزیم	کروی‌سازی گرافیت	۰/۴	۵/۸۰	-	۰/۴	۱/۲	۴۸	مابقی
فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار ۷۵٪	جوانه‌زا (گرافیت‌زا)	-	-	۱/۵	۱/۵۰	۲/۵۰	۷۵	مابقی

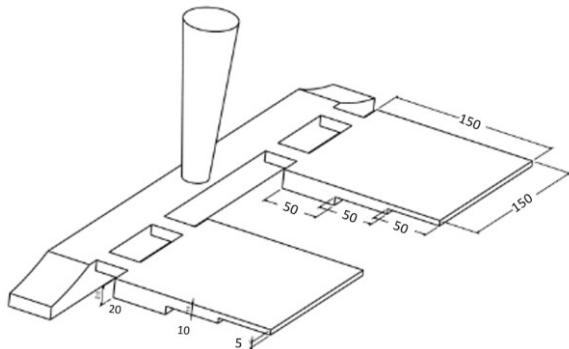
جدول ۳- اطلاعات مربوط طراحی آزمایش، شرایط و میزان جوانه‌زا و کد آزمایش‌ها

میزان جوانه‌زا در حین بارریزی با کد Py (کد هر آزمایش به صورت LPxy نوشته شده است)				میزان جوانه‌زا در پاتیل	شماره پاتیل (Lx)
P3	P2	P1	P0		
0.3 wt.% (60 گرم)	0.2 wt.% (40 گرم)	0.1 wt.% (20 گرم)	0 wt.% (0 گرم)		
LP13	LP12	LP11	LP10	0	L1 (جوانه‌زنی فقط طی بارریزی)
LP23	LP22	LP21	LP20	0.3 wt.% (120 گرم)	L2 (جوانه‌زنی در پاتیل و طی بارریزی)

ضخامت جداره، بر توزیع اندازه و تعداد کره‌های گرافیتی و میزان کاربیدهای یوتکتیکی تأثیر دارد. در ادامه، نگاه دقیق‌تری به این برهمکنش‌های متقابل بین عوامل ریخته‌گری و ریزساختاری می‌شود.

مقایسه دوبه‌دو تصاویر دو شکل (۲) و (۳) نشان می‌دهد که با انجام هم‌زمان عملیات تلقیح و جوانه‌زنی (افزودن هم‌زمان فروسیلیکومنیسیم و فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار در پاتیل شماره ۲)، گرافیت‌زایی و کروی شدن به‌صورت مطلوب‌تری در مقایسه با نمونه‌های حاصل از پاتیل شماره ۱ انجام می‌شود. این موضوع در نتایج تحقیقات اولسن [۱۰] و کابان [۱۱] نیز مشاهده شده است. با این‌وجود مشاهده می‌شود که مقدار جوانه‌زای اضافه شده در حین بارریزی بر مشخصه‌های ریزساختاری تأثیر دارد و این تأثیر نسبت به تأثیر جوانه‌زایی در پاتیل بیشتر است. تحلیل عددی این تأثیرها حاصل از نتایج آنالیز تصویر در نمودارهای شکل (۴) ارائه شده است.

در بررسی مجزای هر یک از شکل‌های (۲) و (۳) مشخص شد که علاوه بر تأثیر جوانه‌زا، با کاهش ضخامت، تعداد گرافیت‌ها بیشتر و اندازه آنها کوچک‌تر شده است. همچنین، مقدار کاربید زمینه افزایش یافته است. با کاهش ضخامت، سرعت انجماد افزایش یافته و مقدار مادون انجماد افزایش می‌یابد که به دنبال آن شعاع بحرانی جوانه پایدار (r^*) و انرژی مورد نیاز برای جوانه‌زنی (ΔG^*) کاهش می‌یابد. در نتیجه جوانه‌ها با شعاع کوچک‌تر می‌توانند پایدار مانده و رشد کنند که حاصل آن تعداد کره‌های گرافیت بیشتر و اندازه ریزتر آنها خواهد بود [۱۴]. با کاهش ضخامت نمونه‌ها، درصد کاربید افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش سرعت انجماد و جابه‌جایی نقطه یوتکتیک به سمت راست و پایین است. جابه‌جایی نمودار به سمت راست باعث کاهش کربن معادل و جابه‌جایی آن به سمت پایین باعث شده که جوانه‌زنی گرافیت با مادون انجماد بیشتری صورت می‌گیرد و در نتیجه تمایل به تشکیل کاربید افزایش و درصد کلی فاز گرافیت کاهش می‌یابد [۱۵، ۱۶].



شکل ۱- تصویر نقشه ابعادی مدل ریختگی به همراه سیستم راهگاهی (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

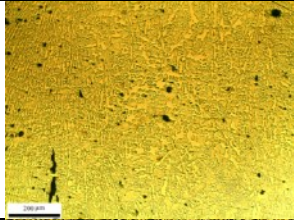
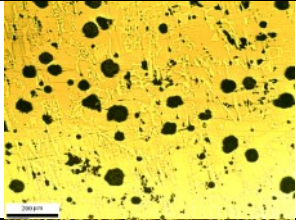
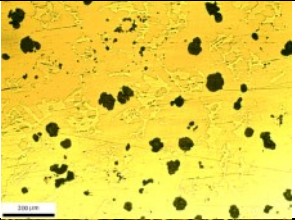
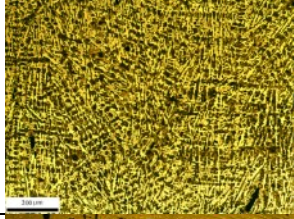
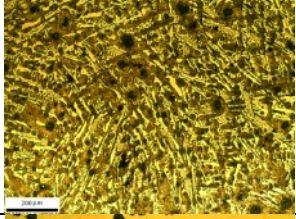
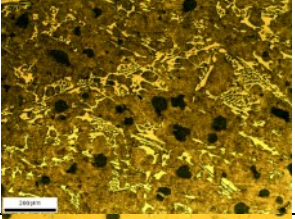
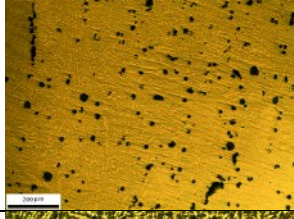
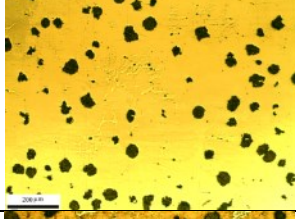
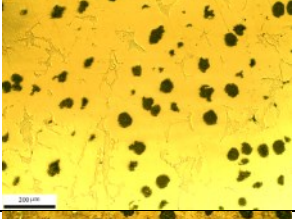
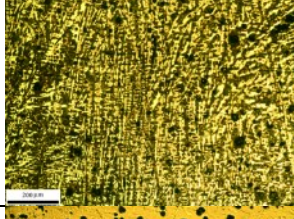
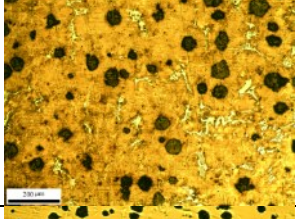
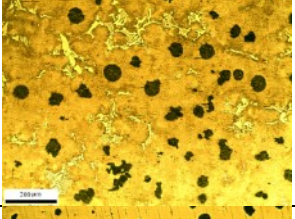
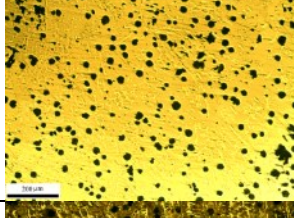
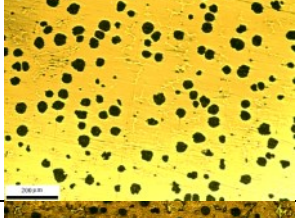
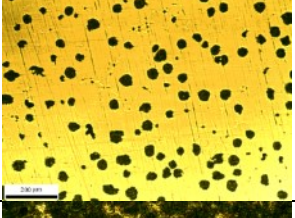
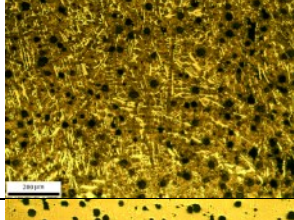
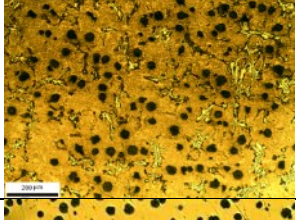
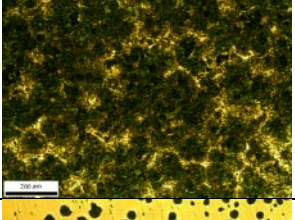
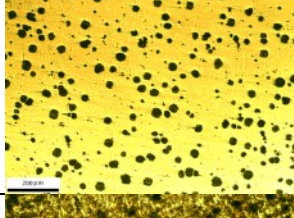
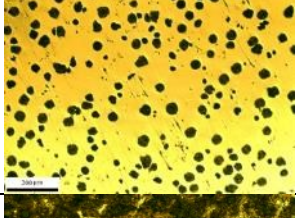
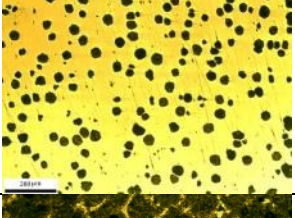
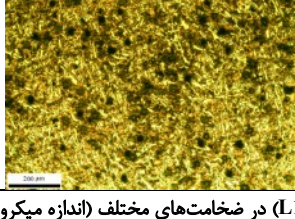
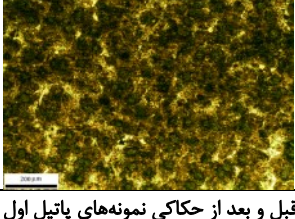
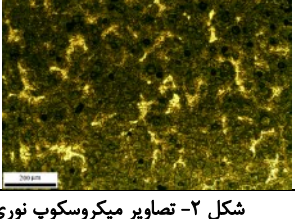
برای ارزیابی ریزساختار، ابتدا نمونه‌های متالوگرافی از قطعات ریختگی، برش و سنگ‌زده شدند. سپس از کاغذهای سنباده شماره ۱۰۰ الی ۲۵۰۰ و بعد از پارچه پولیش با پودر آلومینای $0.3 \mu\text{m}$ استفاده شد. به‌منظور ظاهرسازی ریزساختار و حکاکی از محلول نایتال ۲ درصد استفاده شد. از میکروسکوپ نوری اینورت، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل EM-3200 و میکروسکوپ ESEM مدل Quanta 200 استفاده شده است. از نرم‌افزار MIP4 برای ارزیابی کمی ریزساختار زمینه و مشخصه‌های گرافیت (در دو حالت بدون انجام حکاکی و بعد از حکاکی)، استفاده شد. این نرم‌افزار با استفاده از پردازش تصاویر بر اساس رنگ، قابلیت بررسی عکس‌های ریزساختاری را دارا است. نتایج استخراج شده از این نرم‌افزار شامل درصد کرویت گرافیت‌ها، تعداد گرافیت‌ها، درصد گرافیت، کاربید و پرلیت است که از بررسی حداقل ۱۰ تصویر در بزرگ‌نمایی ۱۰۰ به دست آمده است. برای سختی‌سنجی زمینه از روش راکولسی با نیروی ۱۵۰ کیلوگرم و زمان ۳ ثانیه با نافذ الماسی مخروطی شکل با حداقل ۵ تکرار به عمل آمد.

۳- نتایج و بحث

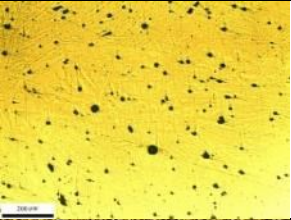
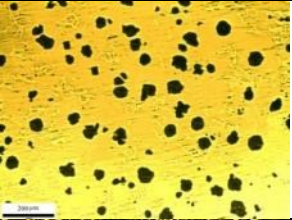
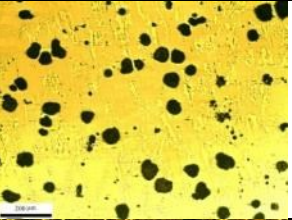
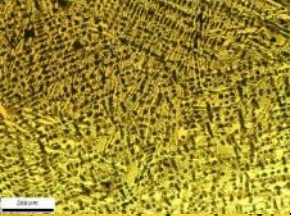
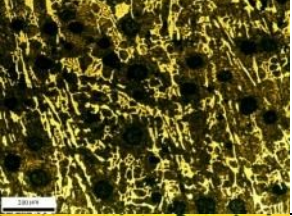
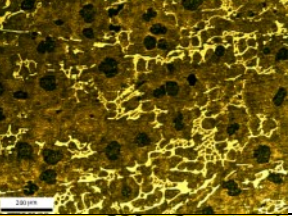
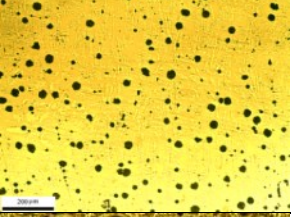
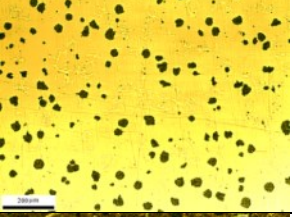
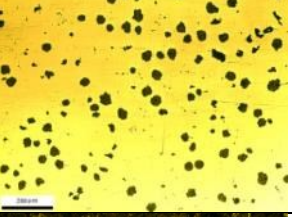
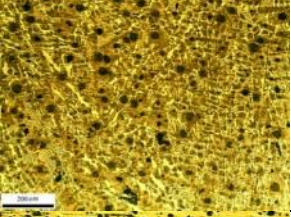
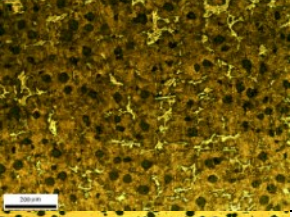
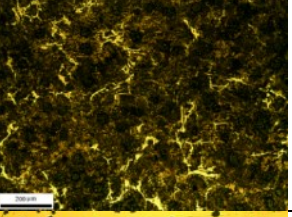

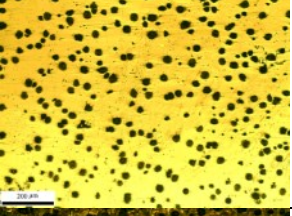
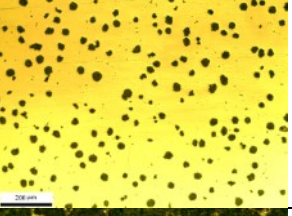
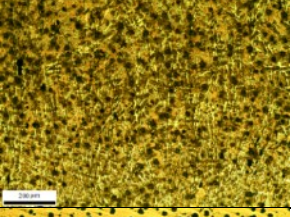
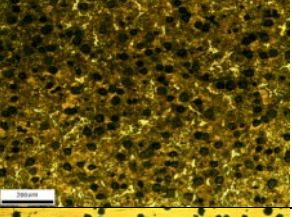
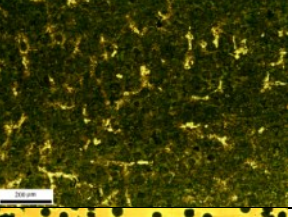
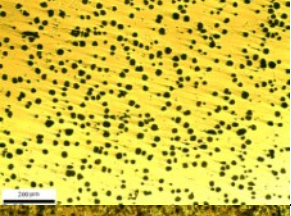
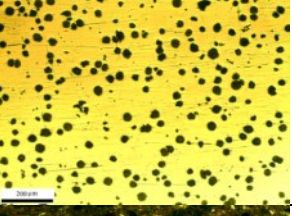

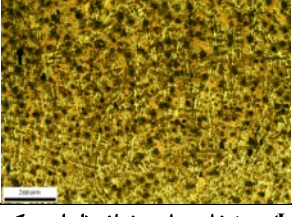
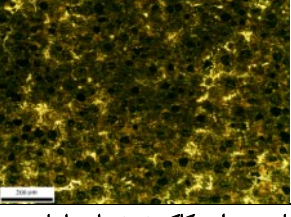
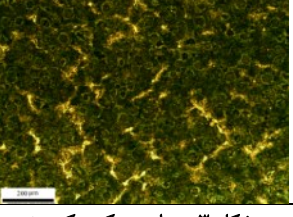
۳-۱- بررسی ریزساختار با میکروسکوپ نوری

تصاویر ریزساختار حاصل از میکروسکوپ نوری نمونه‌های ریخته‌گری شده از پاتیل شماره ۱ (L1) و پاتیل شماره ۲ (L2) به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) در دو شرایط قبل و بعد از حکاکی نشان داده شده است. در پاتیل شماره ۱، جوانه‌زنی در پاتیل انجام نشده و فقط حین بارریزی، مقادیر مختلف فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار به صورت پودری روی مذاب پاشیده شده است. ولی در پاتیل شماره ۲ (L2) جوانه‌زنی هم در پاتیل و هم در حین بارریزی با مقادیر مختلف فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار انجام شده است. همچنین در نمونه‌های حکاکی شده، وضعیت ریزساختار زمینه و تشکیل کاربیدها و در نمونه‌های حکاکی نشده، وضعیت گرافیت‌ها مشخص می‌شود. در شکل (۴) نتایج آنالیز تصویری از مشخصه‌های ریزساختاری شامل تعداد کره‌های گرافیتی (شکل ۴-الف)، کسر سطحی گرافیت‌ها (شکل ۴-ب) و کسر سطحی کاربیدها (شکل ۴-ج) ارائه شده است.

در نگاه کلی، مشاهده می‌شود که با حضور تقریبی ۵ درصد وزنی منگنز در چدن، می‌توان با جوانه‌زنی و عملیات تلقیح مناسب، توزیع مناسبی از گرافیت‌های کروی را به دست آورد. با این وجود، حضور مقدار بالای منگنز شرایط را برای تشکیل کاربیدهای یوتکتیک و ایجاد زمینه پرلیتی در ریزساختار ریختگی فراهم می‌کند. همچنین می‌توان مشاهده نمود که نحوه جوانه‌زنی در پاتیل و حین بارریزی با فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار به همراه

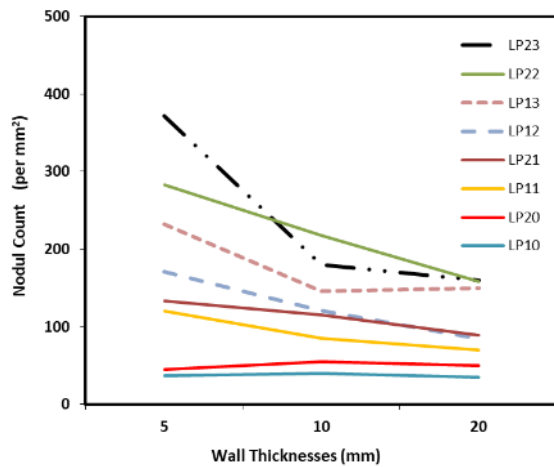
کد نمونه / ضخامت		ضخامت		
		۵mm	۱۰mm	۲۰mm
LP10	حکاکي نشده			
	حکاکي شده			
LP11	حکاکي نشده			
	حکاکي شده			
LP12	حکاکي نشده			
	حکاکي شده			
LP13	حکاکي نشده			
	حکاکي شده			

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری قبل و بعد از حکاکي نمونه‌های پاتیل اول (L1) در ضخامت‌های مختلف (اندازه میکروبار ۲۰۰ μm است)

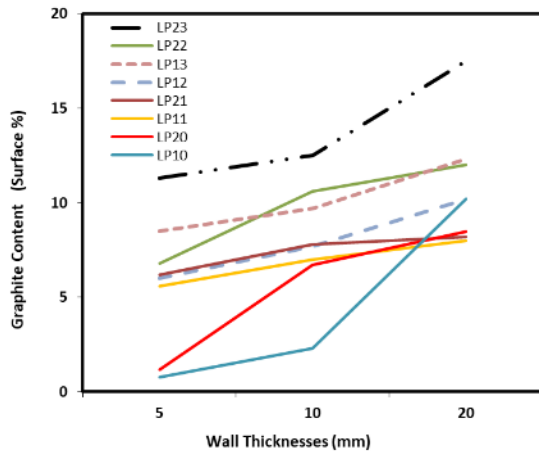
کد نمونه \ ضخامت		mm δ	10mm	20mm
LP20	حکاکی نشده			
	حکاکی شده			
LP21	حکاکی نشده			
	حکاکی شده			
LP22	حکاکی نشده			
	حکاکی شده			
LP23	حکاکی نشده			
	حکاکی شده			

شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری قبل و بعد از حکاکی نمونه‌های پاتیل دوم (L2) در ضخامت‌های مختلف (اندازه میکروبار $200 \mu\text{m}$ است)

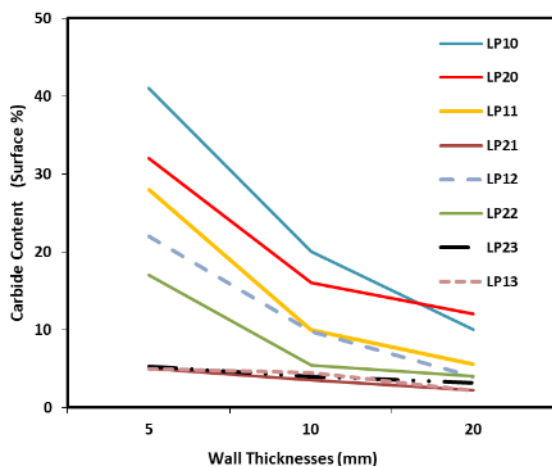
این مزیتی بزرگ در تولید قطعات صنعتی برای ضخامت‌های متفاوت است که یکنواختی ریزساختار و خواص مکانیکی را به همراه دارد [۱۶].



الف



ب



ج

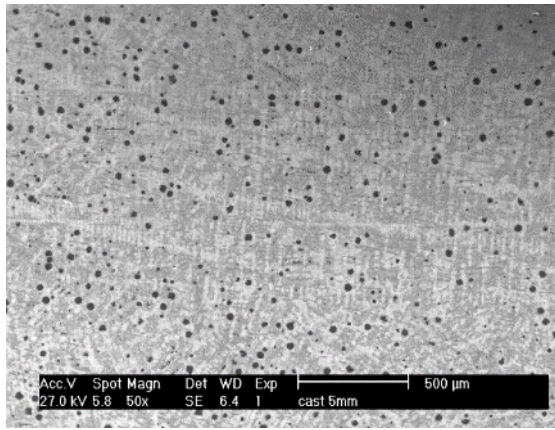
شکل ۴- نتایج آنالیز تصویر از اثر ضخامت دیواره، روش و مقدار جوانه‌زایی بر: الف) تعداد گرافیت (ب) کسر سطحی گرافیت و ج) کسر سطحی کاربیدهای یوتکتیک در چند منگنزدار با گرافیت کروی (در هر یک از این شکل‌ها، نمودارهای هر آزمایش به ترتیب میزان اثر بر متغیر مورد بررسی، مرتب شده تا با توجه به شاخص راهنما (لگاند) و رنگ بهتر شناسایی شود)

علت دیگر تشکیل کاربید بیشتر در ضخامت‌های کمتر این است که با افزایش سرعت انجماد مذاب و کاهش سریع‌تر دما، مرحله اول انجماد یوتکتیک زود به اتمام می‌رسد و مرحله دوم انجماد یوتکتیک شروع می‌شود. در مرحله اول انجماد، گرافیت‌زایی صورت می‌گیرد و کندتر انجام می‌شود (به خاطر نیاز به نفوذ پرماده کربن)، ولی مرحله دوم که تعادل آستنیت و کاربید است، سریع‌تر و به مقدار بیشتر صورت می‌گیرد (این مرحله به نفوذ کم دامنه کربن و منگنز نیاز دارد). همچنین باید توجه داشته که منگنز عنصر کاربیدزا است و میل به تشکیل کاربید را بیشتر می‌کند. مشخص شده است که جوانه‌زاها قادرند تا حدی از تشکیل کاربید جلوگیری کنند. سرعت انجماد بالا و تشدید جدایش عناصر کاربیدزا بر تأثیر جوانه‌زا غلبه می‌کند و کاربیدزایی تشدید می‌شود.

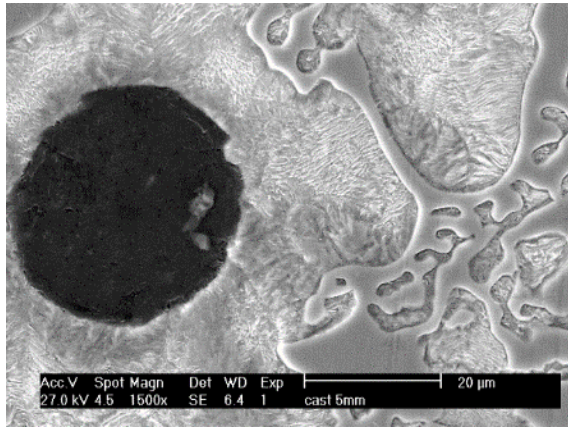
در تکمیل بحث فوق به این نکته باید اشاره کرد که در تولید چدن نشکن برای پایداری بیشتر فاز کاربید دو روش وجود دارد: اول اینکه سرعت انجماد افزایش داده شود (کاهش ضخامت قطعه، استفاده از مبرد یا قالب فلزی و غیره) و دوم اینکه مقدار عناصر گرافیت‌زا را کاهش و مقدار عناصر کاربیدزا افزایش داده شود که تقریباً هر دو شرایط در نمونه‌های نازک از این آلیاژ حاکم است [۱۴، ۱۷].

مقایسه دوه‌دو تصاویر حکاکی نشده در شکل‌های (۲) و (۳) نشان می‌دهد که با اضافه کردن جوانه‌زا، تعداد گرافیت (ندول کانت) افزایش، اندازه آنها ریزتر و توزیع آنها یکنواخت‌تر شده است. اضافه نمودن جوانه‌زای زیرکونیم‌دار باعث تشکیل نقاط جوانه‌زای پایدار می‌شود که به دنبال آن تعداد گرافیت‌ها بیشتر و اندازه آنها ریزتر می‌شود. علاوه بر آن، وقتی که تعداد کره‌های گرافیت افزایش می‌یابد، میزان کربن در زمینه کاهش یافته و زمینه بیشتر تمایل به تشکیل پرلیت در این نوع چدن داشته و به همراه آن درصد کاربید یوتکتیک کاهش می‌یابد [۱۸، ۳].

مطابق شکل (۴) مشاهده می‌شود که با کاهش ضخامت جداره، تعداد کره‌های گرافیتی بیشتر (شکل ۴-الف) و اندازه آنها ریزتر (شکل ۴-ب) و در مقابل میزان کاربید (شکل ۴-ج) بیشتر شده است. بنابراین تغییر مهم دیگر ناشی از اضافه کردن مواد جوانه‌زا، کاهش حساسیت به سطح مقطع است. با مقایسه ساده از نتایج مربوط به نمونه‌های مختلف مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار جوانه‌زا، مقدار حساسیت نمونه‌ها به سطح مقطع کاهش یافته است. منظور از کاهش حساسیت به سطح مقطع این است که در مقاطع مختلف از یک قطعه میزان اختلاف ساختاری (هم از نظر شکل، اندازه، تعداد و نوع توزیع گرافیت و هم از نظر ویژگی‌های فاز زمینه) در مقاطع مختلف کاهش یافته است.

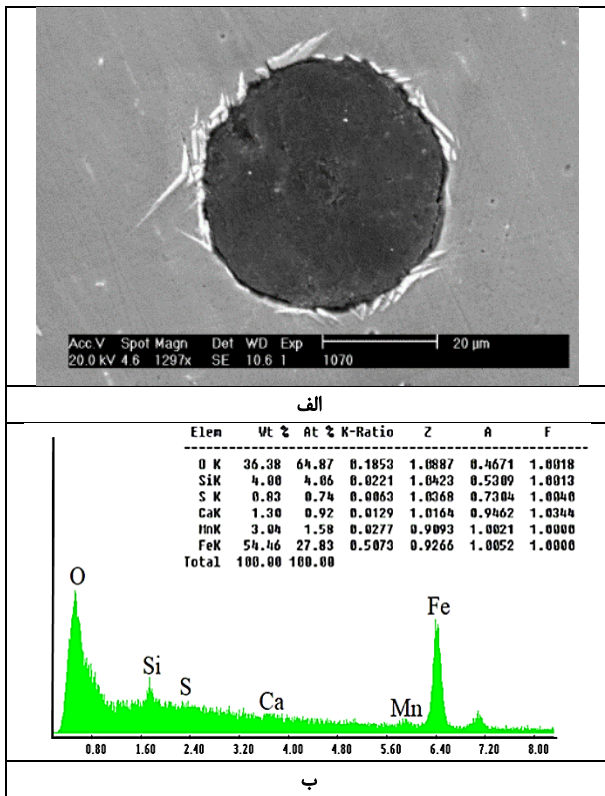


الف



ب

شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه ریختگی LP22-5mm در دو بزرگ‌نمایی مختلف.



ب

شکل ۶- الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از گرافیت کروی و ب) آنالیز EDS از مرکز آن (نمونه LP22-5mm)

به علت کاهش ضخامت دیواره، میزان سرعت انجماد و نیز به‌واسطه آن میزان مادون انجماد افزایش می‌یابد. این عمل باعث کاهش کار موردنیاز برای جوانه‌زنی و کاهش شعاع بحرانی جوانه می‌شود. در مقابل به علت سرعت بالای انجماد، سرعت رشد جوانه‌ها محدود می‌شود. در نتیجه جوانه‌های بیشتری با شعاع کمتر، پایدار می‌شوند. همچنین با اضافه کردن بیشتر جوانه‌زا، تعداد گرافیت‌ها در واحد سطح و مقدار گرافیت افزایش می‌یابد. به این علت که جوانه‌ها، تعداد مناطق جوانه‌زنی پایدار را افزایش می‌دهند. در نتیجه، تعداد جوانه‌ها افزایش یافته و به‌واسطه آن توزیع یکنواخت‌تر و مقدار کلی گرافیت، افزایش و اندازه آنها کوچک‌تر خواهد شد. به همراه تغییرات فوق، درصد فاز کاربید کاهش می‌یابد، چون وقتی که با حضور جوانه‌زا تعداد و حجم فاز گرافیت کروی افزایش می‌یابد، وسعت کلی مناطق فقیر از عنصر کربن نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه درصد فاز پرلیت، افزایش و درصد فاز کاربید یوتکتیک کاهش می‌یابد. در داخل زمینه، درصد کاربید یوتکتیک کاهش و درصد پرلیت افزایش یافته است.

در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) مشاهده می‌شود که جوانه‌زنی هم‌زمان در پاتیل و حین بارریزی شرایط مطلوب‌تری را برای تشکیل گرافیت‌های کروی در مقایسه با جوانه‌زنی در حین بارریزی فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، این میزان در نمونه LP23 بیشترین مقدار است (مقدار آن از ۲۰۰ کره گرافیتی در میلی‌متر مربع در ضخامت ۲۰ میلی‌متر به حدود ۴۰۰ کره گرافیتی در میلی‌متر مربع در ضخامت ۵ میلی‌متر می‌رسد). مقایسه نمودارهای مربوط به نمونه‌های LP10 و LP20 نشان می‌دهد که عدم جوانه‌زایی در حین بارریزی می‌تواند اثرات مخربی بر تعداد کره‌های گرافیتی و مقدار آن در ریزساختار نهایی داشته باشد. از سوی دیگر، در شکل (۴-ج) مقایسه میزان کاربید یوتکتیک تشکیل شده در نمونه‌های LP13، LP23، LP22 و LP21، در ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد که جوانه‌زنی در حین بارریزی، نقش مؤثرتری نسبت به جوانه‌زنی در پاتیل دارد. به‌عنوان مثال، میزان کاربید یوتکتیک تشکیل شده در همه ضخامت در دو نمونه LP13 و LP23 یکسان است. در حالی که این میزان در نمونه LP12 بسیار بیشتر است. به بیان دیگر، جوانه‌زنی در پاتیل شرایطی را فراهم می‌کند که اثر کاربیدزایی منگنز را کاهش می‌دهد و همچنین شرایط تشکیل گرافیت را بیشتر تسهیل می‌نماید. همچنین مطابق شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود که تعداد کره‌های گرافیت در این دو نمونه با افزایش ضخامت افزایش معنی‌داری دارد و حتی با افزایش ضخامت جداره از ۱۰ به ۲۰ میلی‌متر، یک‌روند افزایشی در تعداد کره‌های گرافیتی مشاهده می‌شود.

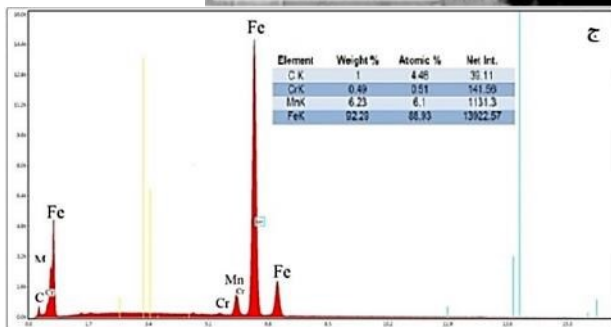
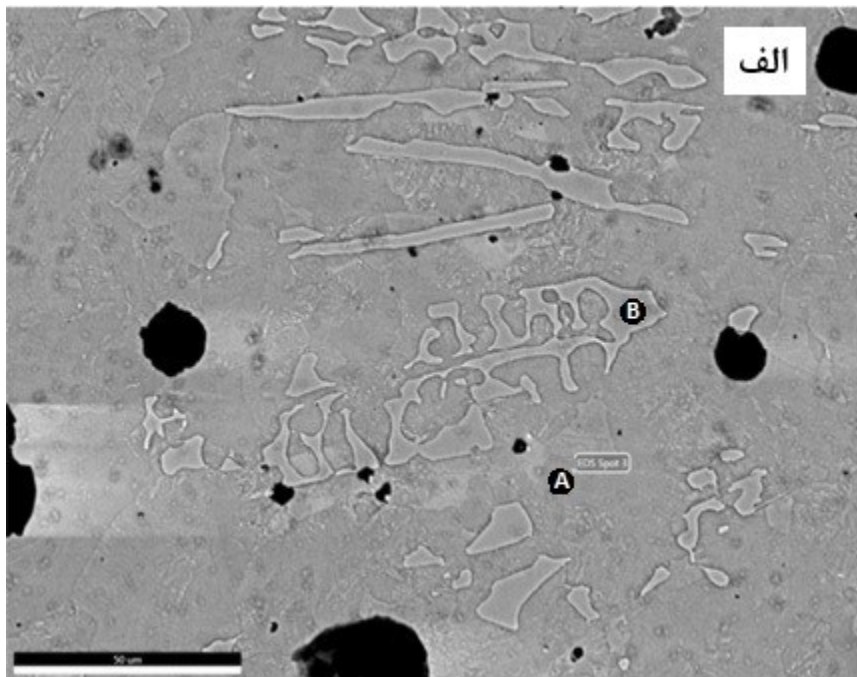
را تأیید می‌نماید. جوانه‌زنی گرافیت روی ذرات سولفید، اکسید و یا نیتريد که بعد از اضافه کردن جوانه‌زا شکل گرفته‌اند، اتفاق می‌افتد. تحقیقات نشان داده است که ترکیبات سولفیدی و اکسیدی به‌عنوان نقاط جوانه‌زنی برای کره‌های گرافیت در چدن نشکن هستند. همچنین مشخص شده که اکثر کره‌های گرافیت با جوانه‌زهای غیرفلزی پیوند دارند و رشد گرافیت در برخی موارد وابسته به شکل و توزیع جوانه‌زا است [۱۹،۲۰].

شکل (۷)، آنالیز نقطه‌ای EDS از دو نقطه زمينه و کاربید یوتکتیک مربوط به نمونه ریختگی LP13-10mm را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۸)، آنالیز خطی از این تصویر از کاربید یوتکتیک بین دو گرافیت ارائه شده است. با مقایسه ساده می‌توان گفت که عنصر منگنز در فاز کاربید به بیشترین مقدار و عنصر سیلیسیم به کمترین مقدار می‌رسد. مشخص شد که در قسمت‌هایی که کاربید تشکیل شده، مجدداً مقدار کربن افزایش یافته است.

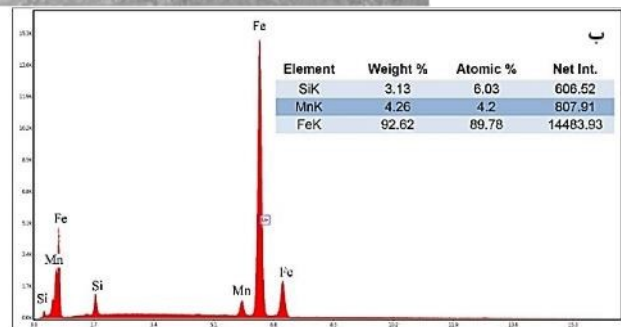
بنابراین مشاهده می‌شود که برای کنترل ریزساختار و مشخصه‌های گرافیت، افزودن فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار در حین بارریزی، مؤثرتر از اضافه کردن آن در پاتیل است و مقدار ۶۰ گرم بیشترین تأثیر را دارد.

۳-۲- بررسی ریزساختار با میکروسکوپ الکترونی روبشی

در شکل (۵) تصاویر به‌دست‌آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نمونه ریختگی با ضخامت ۵mm (LP22-5mm) در دو بزرگ‌نمایی مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ریزساختار شامل گرافیت‌های کروی، کاربیدهای یوتکتیک و زمينه پرلیتی (فضای بین گرافیت و کاربید در شکل ۵-ب) است. در اطراف گرافیت به علت کربن کمتر، پرلیت و در فاصله دورتر از گرافیت، کاربید یوتکتیک تشکیل شده است. در شکل (۶) آنالیز نقطه‌ای (EDS) مربوط به مرکز یک کره گرافیت ارائه شده است. مشاهده شده است که بالا بودن عناصری مانند اکسیژن، سیلیسیم، کلسیم و گوگرد، تأثیر ترکیبات اکسیدی در جوانه‌زایی



ج) نقطه B: کاربید

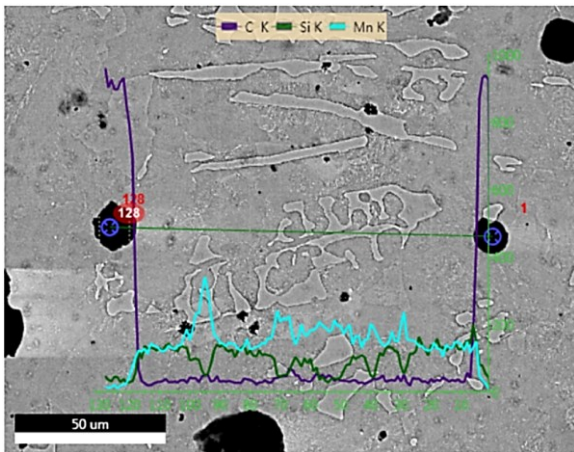


ب) نقطه A: زمينه

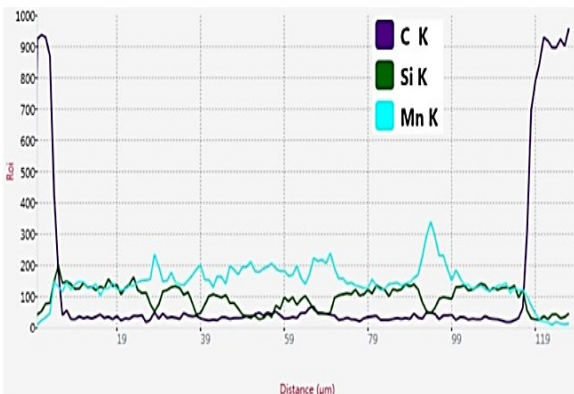
شکل ۷- الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی از ریزساختار ریختگی (ب) و ج) آنالیز EDS نقاط شکل الف مربوط به نمونه LP13-10mm

جدول ۴- نتایج سختی‌سنجی نمونه‌ها در شرایط مختلف جوانه‌زنی و ضخامت جداره

ردیف	کد نمونه: (بر اساس میزان جوانه‌زایی در حین بارریزی)	میزان جوانه‌زا در حین بارریزی (گرم)	ضخامت نمونه (mm)	سختی (HRC) با دقت ±۱ HRC	
				پاتیل شماره ۱ (L1) بدون جوانه‌زایی در پاتیل	پاتیل شماره ۲ (L2) با جوانه‌زایی در پاتیل
۱	P0	۰	۵	۵۲/۰	۵۰/۲
۲	P0	۰	۱۰	۴۵/۰	۳۷/۹
۳	P0	۰	۲۰	۳۷/۴	۳۵/۰
۴	P1	۲۰	۵	۴۰/۰	۳۹/۷
۵	P1	۲۰	۱۰	۳۸/۰	۳۶/۰
۶	P1	۲۰	۲۰	۳۵/۴	۳۴/۰
۷	P2	۴۰	۵	۳۹/۰	۳۸/۴
۸	P2	۴۰	۱۰	۳۶/۰	۳۳/۵
۹	P2	۴۰	۲۰	۳۱/۳	۳۰/۵
۱۰	P3	۶۰	۵	۳۵/۵	۳۲/۰
۱۱	P3	۶۰	۱۰	۳۲/۵	۲۹/۶
۱۲	P3	۶۰	۲۰	۳۰/۰	۲۸/۰



الف



ب

شکل ۸- الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی و ب) آنالیز خطی EDS از کاربرد یوتکتیک مربوط به نمونه LP13-10mm

قابل ذکر است که در تحقیقی که قبلاً توسط نویسندگان اصلی این مقاله انجام شده است [۲۱]، مشخص شده است که برای تولید چدن آستنیتی با منگنز که ریزساختار مطلوبی داشته باشد، مقدار منگنز ۵ تا ۷ درصد مناسب است. مقادیر بالای منگنز (۱۷٪) از تشکیل گرافیت به شدت جلوگیری می‌کند. به همین دلیل در این مقاله، مقدار ۵ درصد منگنز مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۵- بررسی سختی

نتایج اندازه‌گیری سختی نمونه‌های ریختگی به روش راکولسی (HRC) در جدول (۴) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش ضخامت جداره، مقدار سختی افزایش می‌یابد که دلیل آن، افزایش درصد فاز سخت کاربید یوتکتیک و کاهش گرافیت در اثر افزایش سرعت انجماد در مقاطع نازک‌تر است. همچنین مشاهده شده است که با افزایش مقدار جوانه‌زا، میزان سختی نمونه‌ها کاهش می‌یابد که علت آن، افزایش میزان فاز نرم گرافیت است. همچنین در این شرایط از میزان کاربیدها کاسته شده و به جای آن پرلیت تشکیل می‌شود که دارای سختی کمتری نسبت به کاربیدهای یوتکتیک است [۱۱، ۲۲-۲۴].

در نمونه‌های بدون جوانه‌زایی در پاتیل اختلاف سختی نمونه‌های نازک (۵ mm) و ضخیم (۲۰ mm) تقریباً HRC ۱۵ است. اما در نمونه‌های جوانه‌زایی شده در پاتیل این اختلاف به کمتر از ۴ HRC می‌رسد. مشخص شد که افزودن مواد جوانه‌زا در پاتیل موجب کاهش اختلاف ساختاری و خواص مکانیکی مانند سختی می‌شود.

مراجع

- [۱] گل‌عذار م.ع، اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۰.
- [2] ASM International, Casting Design and Performance. ASM International, 2009.
- [۳] مهدوی و.، عابدی ا.، ریخته‌گری آلیاژهای آهنی، دانشگاه شهید رجایی، ۱۳۹۴.
- [4] Rashidi M.M., Idris M.H., Effect of inoculation on microstructure, mechanical and corrosion properties of high manganese ductile Ni-resist alloy, *Materials and Design*, 2013, 51, 861–869.
- [5] Cox G.J., Some Properties of Ductile, Nickel-containing, lean-alloy austenitic irons, *Foundryman*, 1988, 81(9) 435–443.
- [6] Dasgupta R.K., Mondal D.K., Chakrabarti A.K., Ganguli A.C., Kinetics of austenitisation of ductile irons containing two different contents of manganese and copper, *International Journal of Cast Metals Research*, 2012, 25(4) 239–245.
- [7] Baraniecki C., Pinchbeck P. H., Pickering F. B., Some aspects of graphitization induced by iron and ferro-silicon additions, *Carbon*, 1969, 7(2) 213–224.
- [8] Riposan L., Chisamera M., Stan S., Skaland T., A new approach to graphite nucleation mechanism in gray irons, in *Proceedings of the AFS Cast Iron Inoculation Conference*, September, 2005, 29–30.
- [9] Stefanescu D.M., Alonso G., Suarez R., Recent developments in understanding nucleation and crystallization of spheroidal graphite in iron-carbon-silicon alloys, *Metals*, 2020, 10(2) 221.
- [10] Olsen S.O., Skaland T., Hartung C., Inoculation of grey and ductile iron a comparison of nucleation sites and some practical advises, in *66th World Foundry Congress*, 2004, 891–902.
- [11] Mourad M., El-Hadad S, Ibrahim M., Influence of inoculant type on the microstructure characteristics and mechanical properties of ductile iron, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2020, 73(4) 1027–1041.
- [۱۲] دیواندری م.، نیکوکار ح.، بختیاری ر.، بهینه‌سازی شاخص حلالیت منیزیم در تولید چدن‌نشکن به روش افزودن در راهگاه، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۸۸، ۳(۱) ۳۷–۴۳.
- [13] Campbell J., *Castings*, Elsevier Science, 2003.
- [14] Alabbasian F., Boutorabi S.M.A., Kheirandish S., Effect of inoculation and casting modulus on the microstructure and mechanical properties of ductile Ni-resist cast iron, *Materials Science and Engineering A*, 2016, 651, 467–473.
- [15] Bockus S., Venckunas A., Zaldarys G., Relation between section thickness, microstructure and mechanical properties of ductile iron castings, *Materials Science*, 2008, 14(2) 115–118.
- [16] Takeda H., Yoneda H., Asano K., Effect of silicon and bismuth on solidification structure of thin wall spheroidal graphite cast iron, *Materials Transactions*, 2010, 51(1) 176–185.
- [۱۷] منشی ا.، انجماد فلزات، نشر ارکان دانش، ۱۳۹۵.
- [18] ASM International. Handbook Committee, *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*.
- [19] Skaland T., Nucleation mechanisms in ductile iron, *AFS cast iron inoculation conference*, 2005, 13–30.
- [20] Putyra P., Tabor A., Zarkebskic K., Analysis of fracture mechanism in austenitic ductile iron with 30% Ni after impact test, *Archives of Foundry Engineering*, 2008, 8(4) 193–198.

پس در تولید قطعات صنعتی از چدن پر منگنز گرافیت کروی با ضخامت‌های متفاوت، عمل جوانه‌زایی باید با دقت بیشتری انجام شود تا ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی یکنواخت‌تری حاصل شود. همچنین می‌توان با انجام عملیات حرارتی، موضوع انحلال کاربیدها، افزایش مقدار منگنز محلول در زمینه و تغییر زمینه از پرلیتی به آستنیتی، خواص مکانیکی نهایی محصول را بیشتر بررسی کرد [۲۱].

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثر عملیات جوانه‌زنی در تولید چدن آستنیتی با گرافیت کروی با حضور ۵ درصد اسمی منگنز مورد بررسی قرار گرفت. عملیات کروی‌سازی گرافیت (inoculation) با فروسیلیکومنیسیم به صورت ساندویچی در پاتیل (Ladle inoculation) انجام شد. با این وجود، عمل جوانه‌زنی برای کنترل اندازه فازها با فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار به دو صورت اضافه کردن در پاتیل (Ladle inoculation) و اضافه کردن در حین بارریزی (Pouring stream inoculation) به داخل قالب با ضخامت جداره (یا مدول ریختگی) مختلف بررسی شده است. نتایج کلی به شرح زیر حاصل شده است:

- ۱- ریزساختار انجمادی چدن با حضور ۵ درصد وزنی منگنز شامل گرافیت‌های کروی، کاربیدهای یوتکتیک در یک زمینه پرلیتی است که مشخصه‌های کمی و کیفی آنها تحت تأثیر شدید سازوکار جوانه‌زنی و ضخامت جداره است.
- ۲- در چدن با ۵ درصد وزنی منگنز، می‌توان با جوانه‌زنی و عملیات تلقیح مناسب، توزیع مناسبی از گرافیت‌های کروی و کاربیدهای یوتکتیک به دست آورد.
- ۳- جوانه‌زنی مذاب با فروسیلیسیم زیرکونیم‌دار در حین بارریزی مؤثرتر از جوانه‌زنی در پاتیل است. با این وجود، جوانه‌زنی هم‌زمان در پاتیل و حین بارریزی شرایط مطلوب‌تری برای توزیع گرافیت (هم از نظر تعداد و هم از نظر مقدار و توزیع اندازه) و تشکیل کاربیدهای یوتکتیک در مقایسه با جوانه‌زنی تنها در حین بارریزی را فراهم می‌نماید.
- ۴- با کاهش ضخامت جداره (مدول ریختگی)، تعداد کره‌های گرافیتی بیشتر، مقدار آنها کمتر و اندازه آنها کوچک‌تر می‌شوند. در مقابل، میزان کاربیدهای یوتکتیک افزایش می‌یابد که سبب افزایش سختی می‌شود. در این شرایط با جوانه‌زنی هم‌زمان در پاتیل و حین بارریزی به میزان مناسب (۰/۳ درصد وزنی حین بارریزی)، اثر تبریدی در جداره‌های نازک هم می‌تواند به‌طور چشم‌گیری کاهش یابد.

- [23] Shinde V.D., Ravi B., Narasimhan K., Effect of orientation, thickness, and composition on properties of ductile iron castings, *Materials and Manufacturing Processes*, 2013, 28(5) 539–544.
- [24] Riposan I., Chisamera M., Stan S., Skaland T., Graphite nucleant (microinclusion) characterization in Ca/Sr inoculated grey irons, *International Journal of Cast Metals Research*, 2013, 16(1-3) 105-111.

- [۲۱] یوسف‌پور د، عباسی م، جواهری م، اثر منگنز بر ریزساختار انجمادی چدن با گرافیت‌های کروی پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۹، ۴ (۴) ۲۰۳-۲۱۳.
- [22] Cho G.S., Choe K.H., K.; Lee W., Ikenaga A., Effects of alloying elements on the microstructures and mechanical properties of heavy section ductile cast iron, *Journal of Materials Science and Technology*, 2007, 23(1) 97–101.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Effect of Inoculation and Casting Modulus on the as Cast Microstructure of Austenitic Manganese Iron with Nodular Graphite

Rahim Rahimpour Besra¹, Mehran Torabi Kafshgari², Majid Abbasi^{3*}

1. MSc Student in Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology.
 2. BSc Student in Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology.
 3. Associate Professor of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology.
- * Corresponding author: E-mail: abbasim@nit.ac.ir, Phone: +981135501806

Paper history:

Received: 16 October 2019
Accepted: 25 August 2021

Abstract:

In this paper, the effects of grain refiner amount, its addition method and the casting modulus (wall thickness) on the solidification microstructure of austenitic nodular graphite cast iron with 5 weight percent manganese were investigated. For this purpose, the inoculation was performed with ferrosilicon zirconium after spheroidizing with ferrosilicon magnesium. The grain refiner additions were performed using two basic method, ladle inoculation and pouring stream inoculation in different amounts (0, 0.1, 0.2 and 0.3% by weight). In addition, the casting process was performed in the step form sand-sodium silicate binder mold with 5, 10 and 20 mm thicknesses. Microstructural evaluations and hardness measuring were achieved using the optical and electron microscopes, EDS, MIP4 visual analysis and Rockwell C test method. The results showed that the as cast microstructure of the cast iron consists of nodular graphite and eutectic carbide at the pearlitic matrix. The amount of eutectic carbides and graphite nodule count increase and the amount of pearlite and the size of the graphite's decrease by decreasing the mold thickness. For all casting modulus (wall thicknesses), the inoculation process decreases the amount of eutectic carbide and graphite size and increases the graphite nodule count and its volume fraction. In addition, it was observed that the pouring stream inoculation is more effective than the ladle inoculation.

Keywords:

Granular austenitic iron,
Nucleation,
Manganese,
Ferrosilicon-zirconium

Please cite this article using:

Rahim Rahimpour Besra, Mehran Torabi Kafshgari, Majid Abbasi, Effect of Inoculation and Casting Modulus on the as Cast Microstructure of Austenitic Manganese Iron with Nodular Graphite, in Persian, *Founding Research Journal*, 2021, 5(1) 19-30.

DOI: 10.22034/frj.2021.205511.1103