



## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

## تأثیر افزودن آنتیموان و مدول ریختگی بر مورفولوژی گرافیت، ریزساختار و خواص مکانیکی چدن نشکن

نجمه پیرنجم‌الدین<sup>۱</sup>، باقر محمد صادقی<sup>۲\*</sup>، سید محمد علی بوترابی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\* نویسنده مکاتبه کننده: bmsadeghi@iust.ac.ir

### چکیده:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱

در این تحقیق تأثیر افزودن آنتیموان و مدول ریختگی بر ریزساختار، مورفولوژی گرافیت، و خواص مکانیکی یک چدن نشکن مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. بدین منظور یک چدن نشکن با مدول‌های ریختگی مختلف ۸، ۱۵ و ۳۰ میلی متر ریخته‌گری شد. همچنین به منظور بررسی تأثیر عنصر آنتیموان در یک قالب دیگر با شرایط مشابه قبل، ۰/۱ درصد وزنی آنتیموان، به مذاب اضافه شد. سپس ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. برای تحلیل تصاویر ریزساختار از نرم افزار پردازش تصویر MIP4 استفاده شد. برای بررسی خواص مکانیکی، آزمایش سختی برینل و کشش انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد، با افزایش مدول ریختگی تعداد کره گرافیتی از ۵۰۰ به ۲۳۵ کره در میلی متر مربع و درصد کرویت از ۷۱ به ۶۳ درصد کاهش یافت. همچنین بررسی نتایج آزمایش سختی و کشش حاکی از آن است که با افزایش مدول ریختگی، سختی از ۲۸۹ به ۲۱۲ برینل و استحکام تسلیم از ۴۳۰ به ۳۵۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد. مقایسه نمونه‌های حاوی آنتیموان و بدون آنتیموان نشان داد، آنتیموان سبب افزایش درصد کرویت، تعداد کره گرافیتی و کسر حجمی پرلیت می‌شود. به عنوان مثال برای نمونه با مدول ۱۵ میلی متر حضور آنتیموان، تعداد کره گرافیتی را ۴۹٪ افزایش داد، درصد کرویت را از ۶۵ به ۶۸/۵ درصد بهبود بخشید، همچنین کسر حجمی پرلیت را تقریباً ۱۱٪ افزایش داد.

### واژه‌های کلیدی:

مدول ریختگی، چدن نشکن، مورفولوژی گرافیت، آنتیموان

### ارجاع به این مقاله:

نجمه پیرنجم‌الدین، باقر محمد صادقی، سید محمد علی بوترابی، تأثیر افزودن آنتیموان و مدول ریختگی بر مورفولوژی گرافیت، ریزساختار و خواص مکانیکی چدن نشکن، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، تابستان ۱۴۰۰، جلد ۵، شماره ۲، صفحات ۶۷-۷۷.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/frj.2021.304813.1140

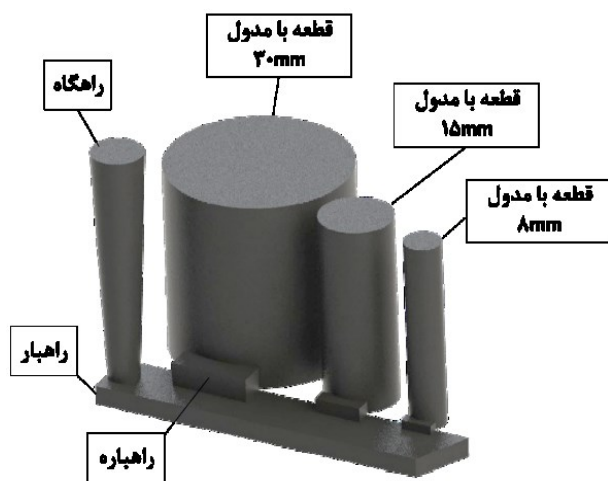
### ۱- مقدمه

کروی و خواص مکانیکی خوب، الزامی به نظر می‌رسد. عامل کلیدی جهت دستیابی به خواص مکانیکی مورد نیاز در چدن‌های نشکن، مورفولوژی کروی گرافیت است. مورفولوژی کروی گرافیت تشکیل شده، نقش مهمی در بهبود داکتیلیته و خواص خستگی چدن‌های نشکن دارد [۲، ۳]. تخریب گرافیت، که در بین آنها گرافیت چانکی رایج‌ترین و مضرترین آن شناخته شده است، ممکن است تحت شرایط خاص، در فرایند ریخته‌گری چدن نشکن رخ دهد. احتمال ظهور چنین عیوبی با افزایش ضخامت قطعه، تقریباً ۲۰۰-۱۰۰ میلی‌متر و زمان انجماد طولانی‌تر از یک ساعت افزایش می‌یابد [۴].

در سال‌های اخیر تقاضا برای تولید قطعات سنگین چدن نشکن، به دلیل هزینه کم تولید و خواص مکانیکی مطلوب افزایش یافته است. به عنوان مثال قطعات مورد استفاده برای ماشین‌آلات ساختمانی، وسایل نقلیه صنعتی و آسیاب‌های بادی اغلب از چدن نشکن با دیواره ضخیم ساخته می‌شوند، که دلیل آن خواص مکانیکی خوب مانند استحکام بالا، داکتیلیته خوب، استحکام خستگی مناسب و مقاومت در برابر شوک‌های حرارتی و ارتعاشات در چدن‌های نشکن است [۱]. در کاربردهای آینده چدن نشکن در ساخت قطعات صنعتی، نیاز به تولید قطعاتی با ضخامت دیواره بیشتر با حفظ ساختار گرافیت

در سرعت سرد شدن آهسته، عناصری با نقطه ذوب کم نظیر آنتیموان، قلع، سرب، بیسموت، کروم، وانادیوم، مولیبدن، منگنز، تنگستن و عناصر نادر خاکی در مرزخانه‌های آستنیت جدا می‌شوند که این منجر به کاهش دما در این مناطق و تشکیل کانال‌های مایع می‌شود که امکان نفوذ اتم‌های کربن از کانال‌های مایع به سمت کره‌های گرافیتی را فراهم می‌کند. مدت زمان تماس طولانی با مذاب باقیمانده منجر به تخریب کره‌های گرافیتی و کاهش میزان کرویت می‌شود [۱۰، ۹]. بنابراین افزودن میزان مناسب آنتیموان، نقش قابل توجهی در افزایش نرخ هسته‌گذاری و جلوگیری از تخریب کره‌های گرافیتی دارد، این در شرایطی است که آنتیموان کره گرافیتی را احاطه کرده و از نفوذ کربن از زمینه، به کره‌های گرافیتی جلوگیری می‌کند [۱۱، ۱۲].

در این پژوهش سعی بر این است، با ثابت نگهداشتن پارامترهایی از قبیل ترکیب شیمیایی، نوع و میزان ماده کروی کننده، نوع و میزان جوانه‌زا و دمای بارریزی در سه استوانه با مدول ریختگی مختلف، اثر مدول ریختگی بر خواص ریزساختاری چدن نشکن مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با افزودن آنتیموان به یک قالب مشابه، تاثیر عنصر آنتیموان مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۱- تصویر شماتیکی از مدل ریخته‌گری مورد استفاده در این تحقیق.

جدول ۱- مشخصات قطعات ریخته شده.

وزن قطعه (kg)	حجم قطعه (cm <sup>3</sup> )	ابعاد قطعه استوانه‌ای (mm)	مدول قطعه (mm)
۳۴	۴۸۱۰/۶	H = ۲۰۰ D = ۱۷۵	۳۰ ~ ۲۵
۵/۴	۷۶۹/۷	H = ۲۰۰ D = ۷۰	۱۵ ~ ۲۴
۱/۴	۱۹۲/۴۲۳	H = ۲۰۰ D = ۳۵	۸ ~ ۲۳

همانند سایر مواد فلزی، خواص مکانیکی چدن‌های نشکن نیز از ریزساختار این نوع چدن‌ها تاثیر می‌پذیرد. از آنجا که گرافیت شکل کروی دارد و زمینه چدن به شکل پیوسته است، خواص ماده در درجه اول توسط فاز زمینه مشخص می‌شود. تعدادی از عوامل شامل ترکیب شیمیایی، نرخ سرد شدن، روش و میزان تلقیح، میزان منیزیم باقیمانده و دمای بارریزی می‌توانند در ریزساختار زمینه چدن نشکن موثر باشند [۵، ۱]. از دیگر پارامترهای ریزساختاری مهم، می‌توان به تعداد کره‌های گرافیتی، میزان کرویت گرافیت‌ها و ریزساختار، به ویژه کسر حجمی فاز پرلیت اشاره کرد [۶].

نرخ سرد شدن، یکی از عوامل موثر بر مورفولوژی گرافیت در چدن‌های نشکن می‌باشد. سرد شدن سریع، باعث تشکیل پوششی از آستنیت در اطراف کره‌های گرافیتی می‌شود. پوسته‌ای که از چند دانه آستنیتی تشکیل شده است. این پوشش اجازه می‌دهد که شکل گرافیت کروی حفظ شود. در سرد شدن آهسته ی مذاب، تشکیل پوسته‌ی آستنیتی اطراف کره‌های گرافیتی به تاخیر می‌افتد، کانال‌های مایع بین دانه‌های آستنیت، زمان تماس طولانی‌تر را با کره‌های گرافیتی فراهم می‌کنند. بنابراین اتم‌های کربن به آسانی از طریق کانال‌های مایع به سمت گرافیت کروی نفوذ می‌کنند و این منجر به ناهم‌واری رشد کره گرافیتی و تخریب آن می‌شود [۴]. سرعت سرد شدن در طول انجماد. همچنین، اثر قابل توجهی بر روی تعداد کره در چدن نشکن دارد. به طور کلی، نرخ سرد شدن سریع‌تر منجر به افزایش تعداد کره می‌شود. این اثر با نظریه‌های جوانه‌زنی و رشد، سازگار است. این نظریه‌ها حاکی از آن است که با افزایش سرعت انجماد، اندازه شعاع بحرانی جوانه پایداری که رشد خواهد کرد، کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، بخش‌های نازک‌تر تعداد کره بالاتری خواهند داشت. در حقیقت برای یک نمونه ریختگی نه تنها بخش‌های مختلف سرعت‌های سرد شدن متفاوت دارند، بلکه در لبه و مرکز هر بخش سرعت‌های سرد شدن مختلف بدست می‌آید. در نتیجه تعداد کره در مکان‌های مختلف نمونه ریختگی متفاوت خواهد بود [۷، ۸].

افزودن مقدار کمی آنتیموان، می‌تواند از اثر مضر عناصر نادر خاکی، بر مورفولوژی گرافیت، در قطعات با دیواره ضخیم، جلوگیری کند. آنتیموان با عناصر نادرخاکی واکنش می‌دهد و ترکیبات بین فلزی مختلف نظیر،  $\text{La}_3\text{Sb}_2$ ,  $\text{LaSb}$ ,  $\text{CeSb}_2$ ,  $\text{CeSb}$  و  $\text{La}_2\text{Sb}$  را تشکیل می‌دهد، که به عنوان مکان‌های هسته‌گذاری عمل می‌کند. با این حال افزودن آنتیموان بیش از مقدار مورد نیاز برای خنثی کردن عناصر نادر خاکی، ممکن است بر روی شکل گرافیت اثر منفی بگذارد.

جدول ۲- مشخصات سیستم راهگاهی نشان داده شده در شکل (۱).

ارتفاع راهگاه بارریز (mm)	سطح مقطع راهبار (mm <sup>2</sup> )	سطح مقطع راهباره (mm <sup>2</sup> )	سطح مقطع بالای راهگاه (mm <sup>2</sup> )	سطح مقطع پایین راهگاه (mm <sup>2</sup> )
۲۵۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۱۷۰۰	۷۰۰

## ۲- مواد و روش تحقیق

هنگام ریختن مذاب به قالب همراه جوانه‌ها با مذاب اضافه شد. قالب‌ها در دمای محیط سرد شدند. پس از سرد شدن قالب، قطعات از ماسه خارج شدند و نمونه‌های استوانه‌ای از راهگاه جدا شدند. به منظور بررسی تأثیر سرعت سرد شدن در مرکزی‌ترین قسمت قطعه، قطعات از وسط برش داده شدند. جهت بررسی‌های متالوگرافی، استوانه‌ای به ارتفاع ۱/۵ سانتی‌متر از وسط نمونه‌ها جدا شد. برای بررسی مشخصه‌های ریزساختاری، از نمونه‌ها پس از آماده‌سازی، قبل و پس از اچ تصویربرداری شد. به منظور بررسی مورفولوژی و مشخصه‌های کمی گرافیت، از نرم‌افزار پردازش تصویر MIP4 استفاده شد. در مطالعه حاضر، خواص مکانیکی مانند سختی و خواص کششی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. سختی سنجی با روش برینل با ۵ مرتبه تکرار با قطر ساچمه ۵ میلی‌متر و نیروی ۷۲۰ کیلوگرم، انجام گرفت. نمونه‌های کشش طبق استاندارد ASTM-E8 تهیه و با دستگاه کشش با ظرفیت ۵ تن، کشیده شدند. به منظور بررسی سطح شکست و تعیین نوع شکست، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های آزمایش کشش تصویربرداری شد.

جدول ۳- ترکیب شیمیایی چدن مورد نظر.

نام عنصر	Fe	C	Si	Mn	Mg
wt. %	Balance	۳٫۳	۲٫۶	۰٫۳	۰٫۰۴۵

جدول ۴- ترکیب شیمیایی جوانه‌زای مورد استفاده در ریخته‌گری چدن.

نام عنصر	Fe	Al	Zr	Ca	Si
%wt	Bal.	۱٫۱، ۵	۱٫۳ - ۱٫۸	۲٫۲، ۵	۷۸-۷۳

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- تأثیر مدول ریختگی بر ریزساختار

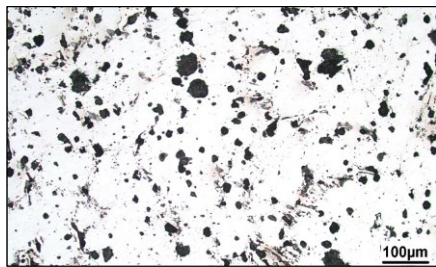
در شکل (۲) تصاویر میکروسکوپ نوری بدست آمده از ریزساختار نمونه‌های با آنتیموان و بدون آنتیموان با مدول‌های ریختگی متفاوت مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، ریزساختار شامل گرافیت، فریت، پرلیت و در برخی مدول‌ها کاربید است. با توجه به شکل‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌شود که با افزایش مدول ریختگی، تعداد کره گرافیتی، درصد کرویت، کسر پرلیت و درصد کاربید کاهش می‌یابد، در مقابل قطر متوسط گرافیت، و میزان فریت افزایش می‌یابد.

در پژوهش حاضر مدل‌سازی با استفاده از فوم انجام گرفت. تصویر طرحواره‌ای از مدل ریخته شده در شکل (۱) آورده شده است. ابعاد نمونه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. محاسبات انجام شده جهت طراحی سیستم راهگاهی براساس تئوری سرعت بحرانی انجام گرفت [۱۳]. راهگاه بارریز به صورت مخروط با شیب معکوس طراحی شد تا بتواند مذاب را از حوضچه بارریز به آرامی درون راهبار هدایت کند. ابعاد سیستم راهگاهی در جدول (۲) آورده شده است. قالبگیری با استفاده از روش CO<sub>2</sub> انجام گرفت. پس از آن به منظور کیفیت سطح، به قالب رنگ سیلیس گرافیت زده شد. در این پژوهش برای ذوب مواد شارژ از کوره القایی فرکانس متوسط، با ظرفیت ۵۰۰ کیلوگرم، استفاده شد. مواد شارژ شامل قراضه فولادی، پترول کک، فروسیلیسیم و فرومنگنز بود. پس از ذوب قراضه فولادی، آنالیزشیمیایی به وسیله اسپکتروسکوپی نشری انجام شد و با توجه به درصد عناصر مذاب و ترکیب شیمیایی مورد نظر، پترول کک، فروسیلیسیم و فرو منگنز به مذاب اضافه شدند. ترکیب شیمیایی آلیاژ در جدول (۳) آورده شده است. عملیات کروی کردن به روش ساندویچی و درون پاتیل انجام شد. با توجه به محاسبات مواد شارژ میزان ۷۵۰ گرم فروسیلیکومنیسیم (۶-۷٪ منیزیم) کف پاتیل ریخته شد و روی آن با ماسه چراغی پوشانده شد. سپس مذاب به درون پاتیل ریخته شد در این هنگام دمای مذاب ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. پس از آن عملیات جوانه‌زایی انجام شد. جوانه‌زایی طی دو مرحله انجام شد: ۱- افزودن جوانه‌ها درون پاتیل، ۲- افزودن جوانه‌ها در حین بارریزی درون قالب (۲/۰ درصد وزنی داخل پاتیل، ۲/۰ درصد وزنی داخل قالب، که مجموعاً برای یک قالب، ۴/۰ درصد وزنی جوانه‌ها استفاده شد). پس از آن ذوب به درون قالب ریخته شد و همزمان جوانه‌ها اضافه شد. جوانه‌زای مورد استفاده زیرسینوک بود که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۴) آورده شده است. دما هنگام ریختن مذاب به قالب ۱۳۴۰ درجه سانتی‌گراد بود. ۱۰۰ کیلوگرم مذاب تهیه شد که ۵۰ کیلوگرم آن در یک قالب (قالب شماره ۱) و ۵۰ کیلوگرم آن در قالب دیگر همراه با آنتیموان (قالب شماره ۲) ریخته شد. برای قالب شماره ۲ از پودر آنتیموان با خلوص بالا (۹۹/۹۹۹ درصد وزنی) با اندازه ذرات ۰/۱۵ میلی‌متر استفاده شد. میزان ۰/۰۱ درصد وزنی آنتیموان (۵ گرم برای ۵۰ کیلوگرم مذاب) به صورت بسته بندی

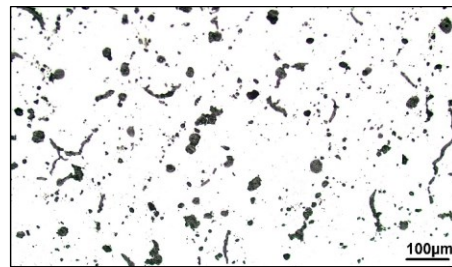
به ۹۲ کره در میلی‌متر مربع، کاهش می‌یابد. در شکل (۴) تعداد گرافیت کروی بر اساس مدول ریختگی رسم شده است. اندازه گرافیت کروی با کاهش مدول ریختگی، بدلیل افزایش در سرعت انجماد و افزایش تعداد گرافیت کروی، کاهش می‌یابد. بر اساس محاسبات نرم افزاری میانگین قطر گرافیت ریز در همه مدول‌ها حدود ۳ میکرومتر است. شکل (۵) تغییرات قطر متوسط گرافیت درشت را براساس مدول ریختگی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود با افزایش مدول ریختگی کروییت گرافیت‌های درشت از ۷۱ به ۶۳ درصد کاهش یافته است. این روند کاهشی با نتایج پژوهش سسچینی و همکاران [۱۴] مطابقت دارد. میزان کروییت گرافیت‌های ریز در همه مدول‌ها ۹۴-۹۵ درصد است. می‌توان گفت، در مدول‌های بالا به علت پایین بودن سرعت انجماد و کم بودن مکان‌های جوانه‌زایی شکل گرافیت‌ها از حالت کروی خارج می‌شود. همچنین در سرعت انجماد بالا، به دلیل تشکیل سریع پوشش آستنیتی در اطراف گرافیت، کربن موجود در زمینه فرصت نفوذ به کره‌های گرافیتی را ندارد و شکل کروی گرافیت حفظ می‌شود [۴].

به طور کلی، نرخ سرد شدن سریعتر منجر به افزایش تعداد کره گرافیتی می‌شود. این اثر با نظریه‌های جوانه‌زنی و رشد، سازگار است [۸]. با افزایش مدول ریختگی زمان انجماد افزایش می‌یابد که با افزایش زمان انجماد، میرایی جوانه‌زا اتفاق می‌افتد و جوانه‌های کمتری تشکیل شده و رشد می‌کنند. در مدول کم، به علت بالابودن سرعت انجماد، جوانه‌زا بهتر عمل می‌کند و یا به عبارت دیگر، سرعت جوانه‌زنی ناهمگن افزایش یافته و تعداد جوانه‌ها افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در تصاویر ریزساختاری مشاهده می‌شود، دو دسته گرافیت در ساختار وجود دارد: گرافیت ریز و گرافیت درشت.

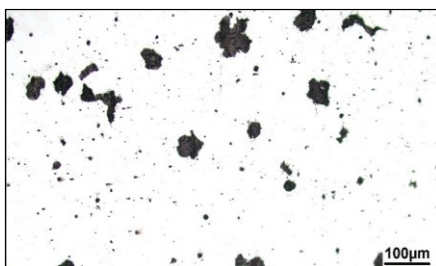
جوانه‌زایی دو مرحله‌ای می‌تواند علت این امر باشد. گرافیت‌های درشت حاصل رشد جوانه‌های ایجاد شده در مرحله نخست جوانه زنی، یعنی افزودن جوانه‌زا به پاتیل است که تا پایان انجماد فرصت رشد بیشتری دارند. گرافیت‌های ریز حاصل رشد جوانه‌های ایجاد شده در مرحله دوم جوانه‌زنی، یعنی هنگام ریختن مذاب در قالب است. مطابق محاسبات نرم‌افزاری با افزایش مدول ریختگی از ۸ به ۳۰ میلی‌متر تعداد کره گرافیتی ریز، از ۵۰۰ به ۲۳۵ کره در میلی‌متر مربع و تعداد کره گرافیتی درشت، از ۳۱۵



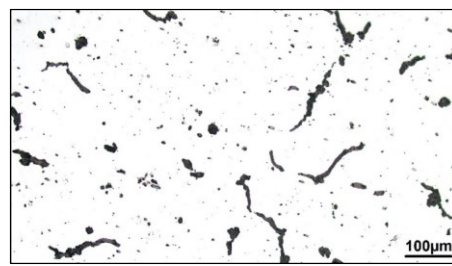
(ب) - نمونه با مدول ۸ میلی‌متر بدون آنتیموان



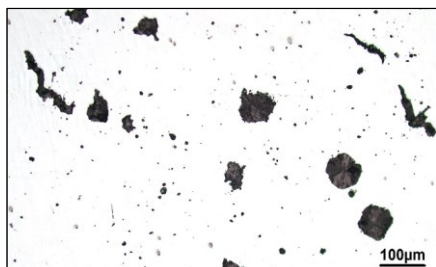
(الف) - نمونه با مدول ۸ میلی‌متر حاوی آنتیموان



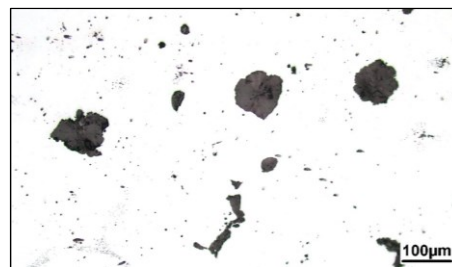
(ت) - نمونه با مدول ۱۵ میلی‌متر بدون آنتیموان



(پ) - نمونه با مدول ۱۵ میلی‌متر حاوی آنتیموان

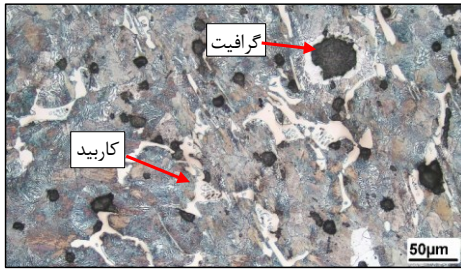


(ج) - نمونه با مدول ۳۰ میلی‌متر بدون آنتیموان

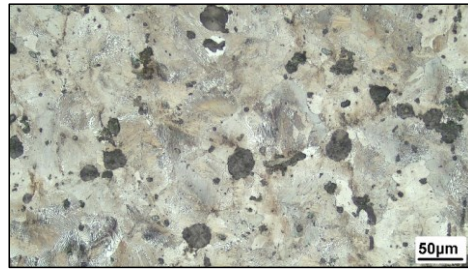


(ث) - نمونه با مدول ۳۰ میلی‌متر حاوی آنتیموان

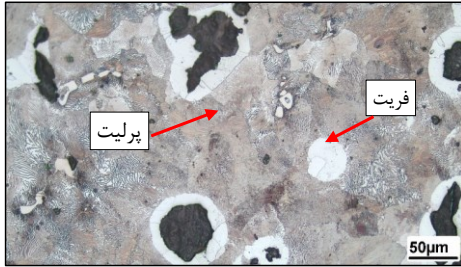
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های بریده شده از قطعات استوانه‌ای با مدول‌های ریختگی مختلف در دو شرایط بدون آنتیموان و با آنتیموان قبل از آج.



(ب) - نمونه با مدول ۸ میلی متر بدون آنتیموان



(الف) - نمونه با مدول ۸ میلی متر حاوی آنتیموان



(ت) - نمونه با مدول ۱۵ میلی‌متر بدون آنتیموان



(پ) - نمونه با مدول ۱۵ میلی‌متر حاوی آنتیموان



(ج) - نمونه با مدول ۳۰ میلی‌متر بدون آنتیموان

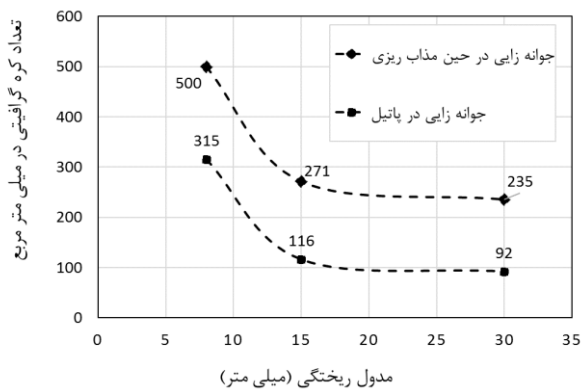


(ث) - نمونه با مدول ۳۰ میلی‌متر حاوی آنتیموان

شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های بریده شده از قطعات استوانه‌ای با مدول‌های ریختگی مختلف در دو شرایط بدون آنتیموان و با آنتیموان پس از آج.

۳-۲- تاثیر آنتیموان بر ریزساختار

افزودن میزان مناسب آنتیموان، نقش قابل توجهی در افزایش نرخ هسته‌گذاری و جلوگیری از تخریب کره‌های گرافیتی دارد، این در شرایطی است که آنتیموان کره گرافیتی را احاطه کرده و از نفوذ کربن از زمینه، به کره‌های گرافیتی جلوگیری می‌کند [۱۲]. به منظور بررسی عملکرد آنتیموان آنالیز عنصری خطی انجام شد که نتیجه آن در شکل (۹) قابل مشاهده است.

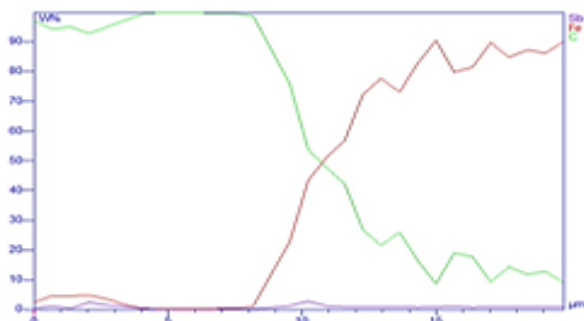
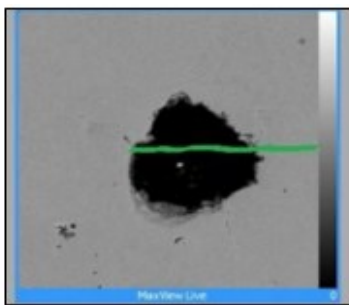


شکل ۴- منحنی تغییرات تعداد گرافیت کروی بر حسب مدول ریختگی.

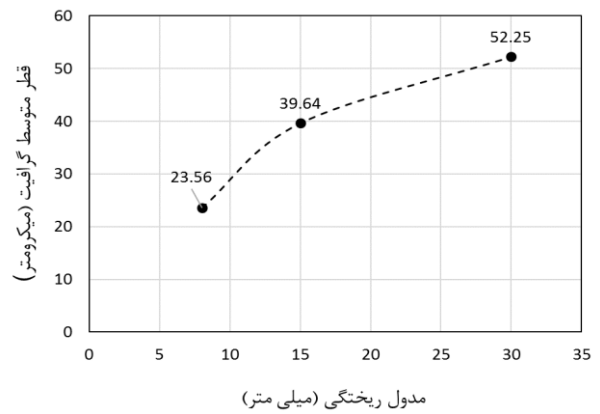
کسر حجمی کاربید تشکیل شده در طول انجماد چدن نشکن وابسته به ترکیب شیمیایی و تراکم کره است. تراکم کره، فاصله نفوذی برای کربن و عناصر دیگر را تعیین می‌کند که همراه با شرایط سرد شدن به طور قابل توجهی بر تعداد و اندازه کاربیدها اثر می‌گذارد [۱۵]. جوانه‌زایی ناکافی و سرعت انجماد بالا نیز از دلایل تشکیل کاربید هستند، بنابراین هر چه مدول قطعه کمتر باشد، سرعت انجماد بیشتر و احتمال تشکیل کاربید افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر، همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، با افزایش مدول ریختگی کسر کاربید کاهش می‌یابد. بیشترین درصد کاربید، مربوط به نمونه بدون آنتیموان با قطر ۳۵ میلی‌متر (مدول ۸ میلی‌متر)، میزان ۱۱/۴۵ درصد گزارش شده است، تصور می‌شود علاوه بر سرعت انجماد بالا، عدم تلقیح مناسب هم سبب تشکیل این حجم از کاربید شده است. با افزایش سرعت انجماد در قطعات با مدول ریختگی پایین کسر پرلیت افزایش می‌یابد. سرعت انجماد آرام به تشکیل فریت کمک می‌کند در نتیجه با افزایش مدول ریختگی نسبت پرلیت به فریت کاهش می‌یابد. این روند کاهش‌ی در شکل (۸) قابل مشاهده است.

طبق تصویر، پیک بنفش مربوط به آنتیموان است که الگوی آن به این صورت است، در نزدیکی لبه گرافیت، پیک آنتیموان شارپ می‌شود، داخل گرافیت هیچ پیکی از آنتیموان مشاهده نمی‌شود، با خروج از کره گرافیتی، مجدداً در لبه خروجی پیک آنتیموان شارپ می‌شود و پس از آن در زمینه مقدار کمی آنتیموان را نشان می‌دهد، این نشان از تشکیل هاله‌ای از آنتیموان در اطراف کره گرافیتی است که مانع از نفوذ کربن موجود در آستنیت بر روی کره‌های گرافیتی شده است.

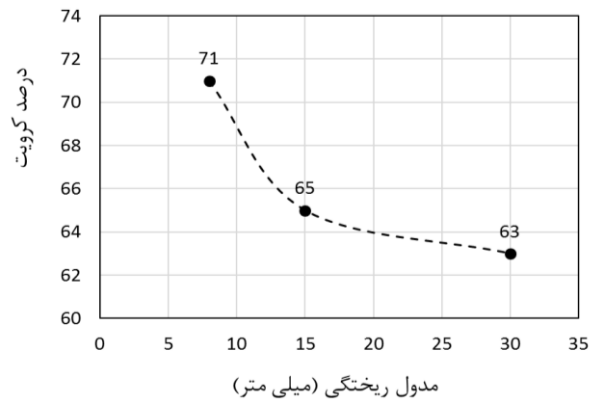
همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، در نمونه‌ی حاوی آنتیموان گرافیت‌های فشرده و کرمی شکل نیز تشکیل شده‌اند، اما حضور گرافیت‌های کروی با ابعاد کوچک و تعداد بالا، سبب کروییت بالاتر در نمونه حاوی آنتیموان شده است. آنتیموان با عناصر نادر خاکی ترکیب می‌شود و مکان‌های جوانه‌زایی را افزایش می‌دهد در نتیجه باعث افزایش درصد کروییت گرافیت می‌شود [۹، ۱۶]. با مقایسه تعداد گرافیت کروی در هر دو نمونه با استفاده از شکل (۱۰)، می‌توان نتیجه گرفت، حضور آنتیموان سبب افزایش کره‌های گرافیتی شده است در واقع افزایش در گرافیت‌های کروی ریز، که در مرحله دوم جوانه‌زنی همزمان با افزودن آنتیموان تشکیل شده است. گلاوس و همکاران [۱۰] نیز تایید کردند که در نمونه حاوی آنتیموان در ضخامت‌های بالا ابعاد کره‌های گرافیتی کاهش و تعداد آنها افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۱۱)، می‌توان نتیجه گرفت که حضور آنتیموان سبب افزایش درصد کروییت گرافیت‌های درشت شده است. درصد کروییت گرافیت‌های ریز در دو نمونه تقریباً برابر و در گستره‌ی ۹۴-۹۵ درصد است.



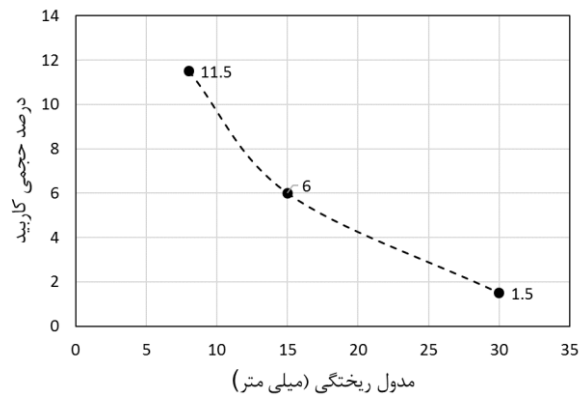
شکل ۹- تصویر اسکن خطی از توزیع عناصر آهن، کربن و آنتیموان.



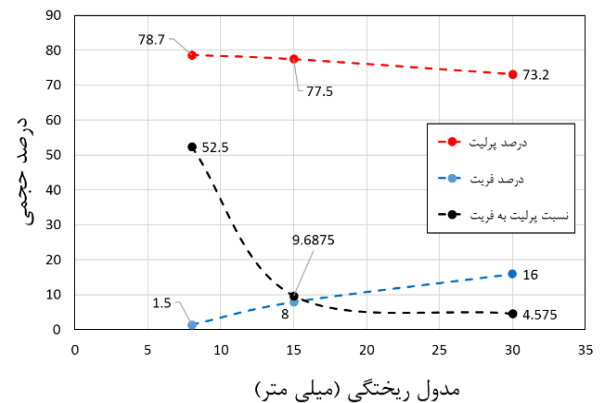
شکل ۵- منحنی تغییرات قطر متوسط گرافیت بر حسب مدول ریختگی.



شکل ۶- تغییرات درصد کروییت گرافیت بر حسب مدول ریختگی.



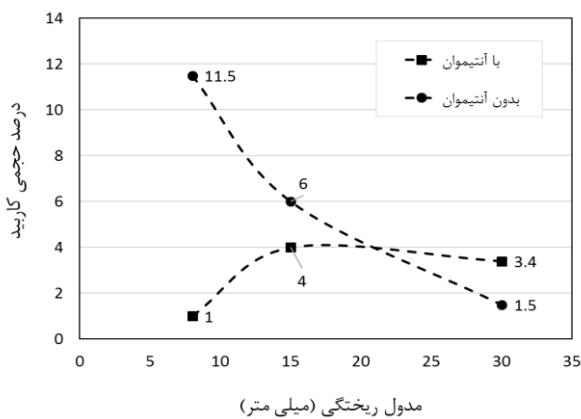
شکل ۷- منحنی تغییرات درصد کاربرد بر حسب مدول ریختگی.



شکل ۸- منحنی تغییرات درصد پرلیت، فریت و نسبت پرلیت به فریت بر حسب مدول ریختگی.

### ۳-۳- نتایج خواص مکانیکی

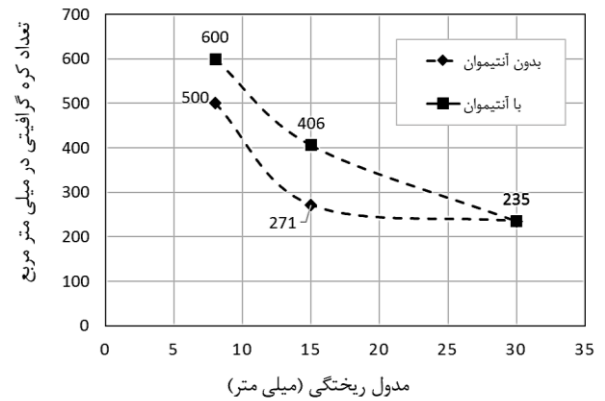
مطابق نتایج این تحقیق، کاهش مدول ریختگی و در نتیجه افزایش سرعت انجماد باعث افزایش کسر پرلیت و کاربرد می‌شود، بنابراین میزان سختی افزایش می‌یابد. همچنین در پژوهش حاضر با کاهش مدول ریختگی در نمونه بدون آنتیموان میزان سختی ۲۶/۶ درصد افزایش یافته است. نتایج سختی سنجی در شکل (۱۴) قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود در مدول‌های ۱۵ و ۳۰ میلی‌متر، میزان سختی نمونه حاوی آنتیموان، نسبت به نمونه بدون آنتیموان بالاتر است که علت آن بالاتر بودن کسر پرلیت، در نمونه حاوی آنتیموان است. در مدول ۸ میلی‌متر درصد بالای کاربرد در نمونه بدون آنتیموان سختی بالاتری را نسبت به نمونه حاوی آنتیموان سبب شده است. مورفولوژی گرافیت نقش مهمی بر خواص مکانیکی چدن‌های نشکن دارد [۱۷]. در این نوع چدن‌ها انحراف شکل گرافیت از حالت کروی ایده‌آل، انعطاف پذیری و استحکام را کاهش می‌دهد [۱۸]. گرافیت غیر کروی به عنوان نقص یا افزایش دهنده تنش عمل می‌کند که شروع و انتشار ترک را آسان می‌کند. کره‌های گرافیتی مانند توقف کننده ترک عمل می‌کنند که موجب بهبود انعطاف پذیری فاز زمینه می‌شود [۱۰]. در نتیجه انتظار می‌رود با افزایش مدول ریختگی، کاهش میزان کروییت، همچنین کاهش کسر پرلیت و کاربرد، استحکام کششی کاهش یابد. مقادیر استحکام تسلیم در شکل (۱۵) نشان می‌دهد، با افزایش مدول ریختگی در نتیجه کاهش کسر پرلیت، استحکام تسلیم کاهش می‌یابد. لاین و همکاران [۱۹] نیز در پژوهش خود نشان دادند با افزایش کسر پرلیت، از ۷۰ به ۱۰۰ درصد، استحکام تسلیم از ۳۶۰ به ۵۰۰ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. آنتیموان تاثیری بر میزان استحکام تسلیم نداشته است و بالا بودن درصد کاربرد در نمونه بدون آنتیموان در مدول‌های ۸ و ۱۵ میلی‌متر، موجب افزایش استحکام تسلیم شده است.



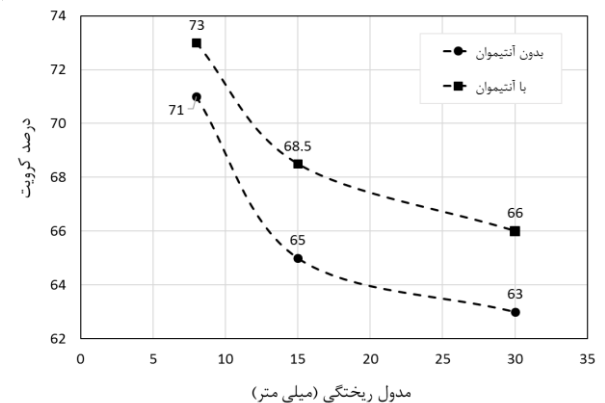
مدول ریختگی (میلی متر)

شکل ۱۳- منحنی تغییرات درصد حجمی کاربرد در دو نمونه بدون آنتیموان و با آنتیموان در مدول‌های مختلف ریختگی.

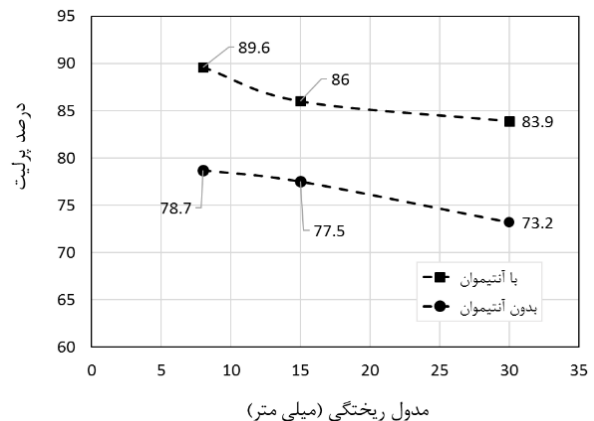
آنتیموان عنصری پرلیت‌زا است، بنابراین در همه مدول‌ها، نمونه حاوی آنتیموان، نسبت به نمونه‌ی بدون آنتیموان، درصد پرلیت بیشتری دارد که در شکل (۱۲) قابل مشاهده است؛ همچنین در سرعت سرد شدن بالا مانع از تشکیل سمنتیت یوتکتیک می‌شود. میزان کاربرد در هر دو نمونه در شکل (۱۳) مقایسه شده است.



شکل ۱۰- تاثیر مدول ریختگی بر تعداد گرافیت‌های کروی ریز (حاصل جوانه‌زایی در حین ریختن مذاب به قالب) در دو نمونه بدون آنتیموان و با آنتیموان.



شکل ۱۱- تاثیر مدول ریختگی بر درصد کروییت گرافیت‌های درشت در دو نمونه بدون آنتیموان و با آنتیموان.



شکل ۱۲- منحنی تغییرات درصد حجمی پرلیت در دو نمونه بدون آنتیموان و با آنتیموان در مدول‌های مختلف ریختگی.

در ساختار فریتی-پرلیتی، انتظار می‌رود دو الگوی شکست مشاهده شود، در مجاورت کره‌های گرافیتی که میزان فریت زیاد است شکست داکتیل اتفاق می‌افتد که علت آن انعطاف پذیر بودن فاز فریت است، از طرف دیگر شکست ترد در مناطق پرلیتی اتفاق می‌افتد [۲۰].

همانطور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود، غالب سطح شکست نمونه‌ها رخ برگی است که بیانگر شکست ترد است. ترد بودن شکست را می‌توان به بالا بودن درصد پرلیت زمینه نسبت داد. در اطراف ذرات گرافیت نیز داکتیل بودن شکست قابل مشاهده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر مدول ریختگی و عنصر آنتیموان بر خواص کششی و ریزساختار یک چدن نشکن مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه نتایج بدست آمده به صورت زیر است:

۱- افزودن دو مرحله‌ای جوانه‌زا سبب تشکیل دو نوع گرافیت در ریزساختار شده است، گرافیت درشت که حاصل جوانه‌زایی در پاتیل است و جوانه فرصت بیشتری برای رشد داشته است و گرافیت ریز که حاصل جوانه‌زایی در حین ریختن مذاب به قالب است و جوانه فرصت کمتری برای رشد داشته است. همچنین جوانه‌زایی دو مرحله‌ای تا مقدار زیادی انحطاط گرافیت جلوگیری کرده است.

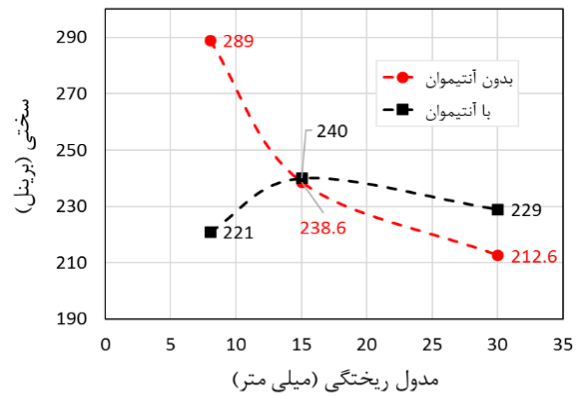
۲- با افزایش مدول ریختگی از ۸ میلی‌متر به ۳۰ میلی‌متر در نتیجه کاهش سرعت انجماد، تعداد گرافیت کروی و درصد کرویت گرافیت‌ها کاهش یافت درمقابل قطر متوسط گرافیت افزایش پیدا کرد.

۳- با افزایش مدول ریختگی از ۸ میلی‌متر به ۳۰ میلی‌متر، کسر پرلیت و کسر کاربید کاهش یافت، درحالی‌که کسر فریت افزایش یافت، همچنین ساختار زمینه درشت‌تر شد.

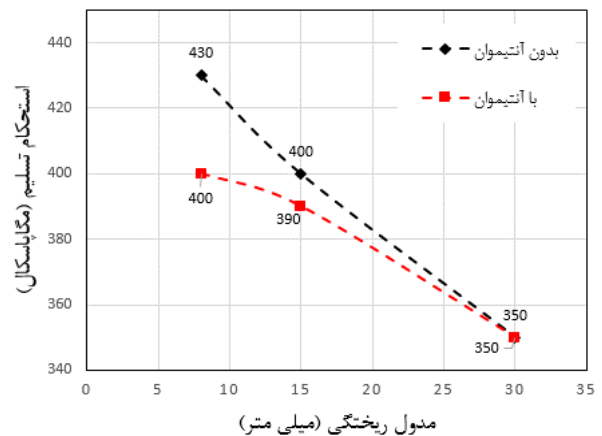
۴- با افزایش مدول ریختگی از ۸ میلی‌متر به ۳۰ میلی‌متر میزان سختی از ۲۸۹ برینل به ۲۱۲ برینل کاهش یافت.

۵- با افزایش سرعت سرد شدن و در نتیجه بهبود پارامترهای ریزساختاری، استحکام تسلیم افزایش یافت و درصد ازدیاد طول نسبی کاهش یافت. بالاترین درصد ازدیاد طول ۶/۶ درصد، مربوط به نمونه‌ای با بالاترین مدول ریختگی (۳۰ میلی‌متر) بود.

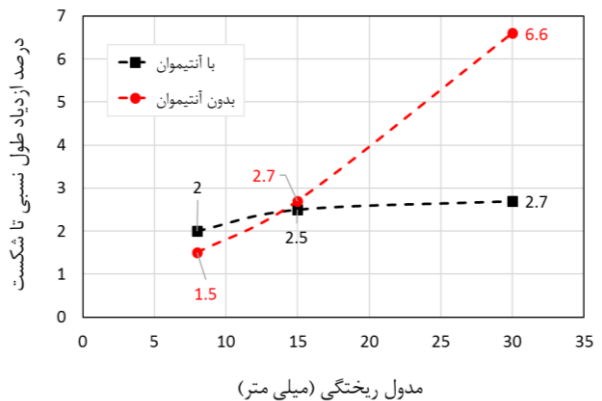
۶- افزودن ۰/۰۱ درصد وزنی آنتیموان سبب افزایش تعداد گرافیت کروی و درصد کرویت گردید، همچنین باعث افزایش کسر پرلیت در همه مدول‌ها شد. همچنین در مدول ۱۵ و ۳۰ میلی‌متر سختی با حضور آنتیموان افزایش پیدا کرد.



شکل ۱۴- منحنی تغییرات میزان سختی بر حسب مدول ریختگی در نمونه بدون آنتیموان و با آنتیموان.



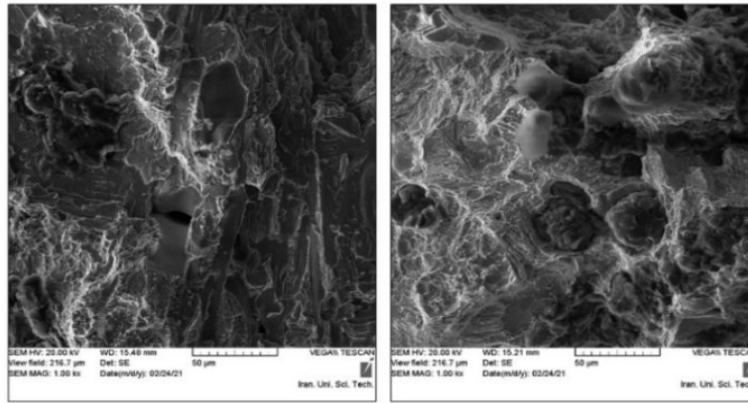
شکل ۱۵- منحنی تغییرات استحکام تسلیم بر حسب مدول ریختگی در نمونه‌های بدون آنتیموان و با آنتیموان.



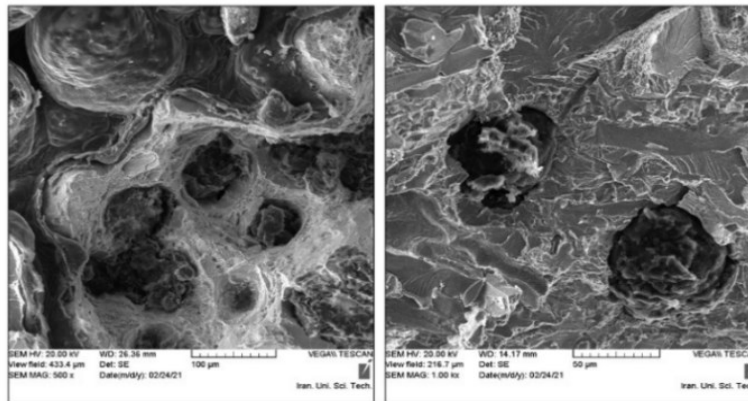
شکل ۱۶- منحنی تغییرات درصد ازدیاد طول نسبی تا شکست بر حسب مدول ریختگی در نمونه‌های با آنتیموان و بدون آنتیموان.

همانطور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود با افزایش مدول ریختگی در نتیجه افزایش فریت، میزان ازدیاد طول تا شکست افزایش می‌یابد. از آنجا که آنتیموان عنصری پرلیت‌زا است، در نتیجه می‌توان کسر بالای پرلیت در نمونه حاوی آنتیموان را، دلیل کمتر بودن میزان ازدیاد طول نسبی، نسبت به نمونه بدون آنتیموان دانست.

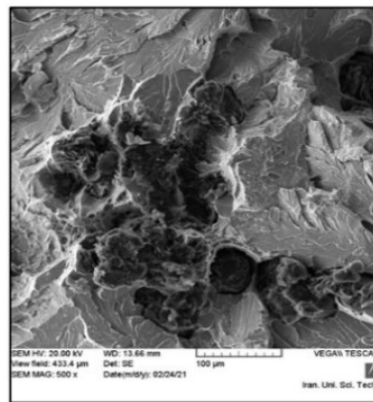




(الف) - نمونه با مدول ریختگی ۸ میلی‌متر حاوی آنتیموان (ب) - نمونه با مدول ریختگی ۱۵ میلی‌متر حاوی آنتیموان



(ب) - نمونه با مدول ریختگی ۳۰ میلی‌متر حاوی آنتیموان (ت) - نمونه با مدول ریختگی ۱۵ میلی‌متر بدون آنتیموان



(ث) - نمونه با مدول ریختگی ۳۰ میلی‌متر بدون آنتیموان

شکل ۱۷- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح شکست در نمونه‌های آزمایش کشش در شرایط مختلف ریختگی.

## مراجع

- irons, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2018, 41(11) 2231-2238.
- [5] Borsato T., Ferro P., Berto F., Carollo C., Effect of solidification time on microstructural, mechanical and fatigue properties of solution strengthened ferritic ductile iron, *Metals (Basel)*, 2019, 9, 1.
- [6] Grenier S., Labrecque C., Gundlach R., Krocka B., Riabov M., Inter-laboratory study of nodularity and nodule count of ductile iron by image analysis, 2014.
- [7] Doubrava J. H., Cater S. F., Wallace J. F., The influence of processing variables on the matrix structure and nodularity of ductile iron, *AFS Trans.*, 1981, 229-250.
- [8] Guo X., Stefanescu D. M., Stefanescu D. M., Chuzhoy L., Pershing M. A., A mechanical properties model for ductile iron nucleation and growth of spheroidal graphite view project CompCAST Plus view project a mechanical
- [1] Nakayama H., Zhao B. R., Furusato N., Yamada S., Nishi T., Ohta H., Effect of amount of chunky graphite on mechanical properties of spheroidal-graphite cast iron, *Materials Transactions*, 2018, 59(3) 412-419.
- [2] Bauer B., Mihalic Pokopec I., Petric M., Mrvar P., Effect of Si and Ni addition on graphite morphology in heavy-section spheroidal graphite iron parts, *Materials Science Forum*, 2018, 925, 70-77.
- [3] Song L., Guo E., Tan C., Effect of Bi on graphite morphology and mechanical properties of heavy section ductile cast iron, *China Foundry, Foundry Journal Agency*; 2014, 11(2)125-31.
- [4] Borsato T., Berto F., Ferro P., Carollo C., Influence of solidification defects on the fatigue behaviour of heavy-section silicon solution-strengthened ferritic ductile cast

- numerical evaluation of effects of cooling rates, *International Journal of Cast Metals Research*, Maney Publishing, 2015, 28(6):365–74.
- [15] Riebisch M., Pustal B., Bührig-Polaczek A., Influence of Carbide-Promoting elements on the microstructure of high-silicon ductile iron, *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14(4) 1152–1161,
- [16] Lia B. G., Sim K. H., Kim R. C., Effect of Sb–Ba–Ce–Si–Fe post inoculants on microstructural and mechanical properties of as-cast pearlitic ductile iron, *Steel Research International*, 2019, 90(5)1800530.
- [17] Wang Z. H., Zhang X., Xu F. L., Qian K. C., Chen K. M., Effect of nodularity on mechanical properties and fracture of ferritic spheroidal graphite iron, *China Foundry*, 2019, 16(6), 386–392.
- [18] Havlicek F., Elbel T., Archives of foundry engineering geometrical modulus of a casting and its influence on solidification process, 2011, 11, 170–176.
- [19] Laine J., Jalava K., Vaara J., Soivio K., Frondelius T., Orkas J., The mechanical properties of ductile iron at intermediate temperatures: the effect of silicon content and pearlite fraction, *International Journal of Metalcasting*, 2021, 15(2) 538–547.
- [20] 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.
- properties model for ductile iron, *Transactions of the American Fisheries Society*, 1997.
- [9] Ferro P., Fabrizi A., Cervo R., Carollo C., Effect of inoculant containing rare earth metals and bismuth on microstructure and mechanical properties of heavy-section near-eutectic ductile iron castings, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(9) 1601–1608.
- [10] Glavas Z., Strkalj A., Maldini K., Effects of antimony and wall thickness on graphite morphology in ductile iron castings, *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2016, 47(4) 2487–2497.
- [11] Diao X. G., Ning Z. L., Cao F. Y., Ren S. Z., Sun J. F., Effects of antimony addition and section size on formation of chunky graphite in ductile iron, *Materials Science and Technology*, 2011, 27(4) 834–838.
- [12] Mourad M. M., El-Hadad S., Ibrahim M. M., Nofal A. A., Effect of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Heavy Section Ductile Iron, *Journal of Metallurgy*, 2015, 2015, 1–11.
- [۱۳] بوتراپی م. ع.، کزازی غ. ر.، مصلح ب.، نفیسی ش.، نگرشی نوین بر طراحی سیستم راهگامی، نشر دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ چهارم، ۱۳۹۶.
- [14] Ceschini L., Morri A., Morri A., Salsi E., Squatrito R., Todaro I., Microstructure and mechanical properties of heavy section ductile iron castings: Experimental and



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

### Research Paper:

### Effect of Sb Addition and Casting Modulus on Graphite Morphology, Microstructure and Mechanical Properties of Ductile Cast Iron

Najmeh Pirnajmeddin<sup>1</sup>, Bagher Mohammad Sadeghi<sup>2\*</sup>, Seyyed Mohammad Ali Boutorabi<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, IRAN
2. Assistant professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, IRAN
3. Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, IRAN

\* Corresponding Author: bmsadeghi@iust.ac.ir

#### Paper history:

Received: 23 September 2021  
Accepted: 12 November 2021

#### Keywords:

Casting Modulus,  
Ductile Cast Iron,  
Graphite Morphology,  
Antimony.

#### Abstract

In- In this study, the effects of Sb addition and casting modulus on the microstructure, morphology of graphite, and mechanical properties of ductile cast iron were investigated. For this purpose, a ductile cast iron with different casting modulus of 8, 15 and 30 mm were cast. Also, in order to examine the effect of Sb element in another mold with similar conditions, 0.01 wt. % of Sb was added to the melt followed by the microstructure evaluation using an optical microscope. MIP4 image processing software was used to analyze the microstructure images. Brinell hardness and tensile tests were conducted to evaluate the mechanical properties. The results of this study showed that with increasing the casting modulus, nodule count decreased from 500 to 235 nodule per square mm, also nodularity decreased from 71 to 63%. In addition, the study of the results of hardness and the tensile test showed that with increasing the casting modulus, the hardness decreases from 289 to 212 HB and the yield strength from 430 to 350 MPa. Comparison of samples containing Sb and without Sb showed that Sb increased the nodularity, nodule count and volume fraction of perlite. For example, for the sample with 1 mm modulus, the presence of Sb increased the nodule count by 49%, improved the nodularity from 65% to 68.5%, and also increased the perlite volume fraction by almost 11%.

#### Please cite this article using:

Najmeh Pirnajmeddin, Bagher Mohammad Sadeghi, Seyyed Mohammad Ali Boutorabi, Effect of Sb addition and casting modulus on graphite morphology, microstructure and mechanical properties of ductile cast iron, in Persian, Founding Research Journal, 2021, 5(2) 67-77.

DOI: 10.22034/frj.2021.304813.1140

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)