



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

اثر منگنز بر ریزساختار انجمادی چدن با گرافیت‌های کرووی

دانیال یوسف‌پور^۱، مجید عباسی^{۲*}، مجتبی جواهری^۳

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

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

۳- کارشناس ارشد مهندسی مواد، واحد طراحی و تکنولوژی شرکت ریخته‌گری فولاد طبرستان، مازندران، ایران.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تلفن: ۰۱۱-۳۵۵۰۱۸۰۶، Email: abbasim@nit.ac.ir

چکیده:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۱

در این تحقیق، اثر منگنز بر ریزساختار انجمادی چدن با گرافیت‌های کرووی با استفاده از روش‌های تجربی و نرم افزار JMatPro بررسی و ارزیابی شد. به این منظور نمونه‌های چدن با مقادیر مختلف ۰/۵، ۵، ۱۱ و ۱۷ درصد وزنی منگنز به روش ریخته‌گری در ماسه تولید شد. مشخصه‌های ریزساختار مانند نوع فازهای موجود، تعداد کره‌های گرافیتی، میزان کرویت کره‌های گرافیتی و کسر حجمی کاربیدها و گرافیت با استفاده از میکروسکوپ نوری مجهز به نرم‌افزار پردازش تصویر MIP4، میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به EDS و سختی‌سنجی برینل بررسی شد. در ادامه با استفاده از داده‌های نرم‌افزار JMatPro و پردازش آن، چگونگی جدایش منگنز و تحلیل فازی در دماهای مختلف انجماد بررسی شد. مشاهدات میکروسکوپی نشان داده است که حضور منگنز با مقادیر ۵، ۱۱ و ۱۷ درصد وزنی در چدن سبب کاهش دماهای بحرانی انجماد، ایجاد کاربیدهای یوتکتیکی، کاهش اندازه و تعداد کره‌های گرافیتی در ریزساختار نهایی می‌شود. ارزیابی کمی گرافیت‌ها نشان داد که تعداد و درصد کرویت آنها با افزایش مقدار منگنز تا ۱۷ درصد وزنی به ترتیب تا حدود ۶۰ و ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. نتایج بررسی جدایش عناصر منگنز و کربن در حین انجماد با نرم‌افزار JMatPro نشان داده است که با افزودن ۵ تا ۱۱ درصد وزنی می‌توان به زمینه آستنیتی با ترکیب مشابه فولادهای آستنیتی منگنزی به همراه توزیع مناسب‌تری از گرافیت‌های کرووی شده و کاربیدها دست یافت.

واژه‌های کلیدی:

آلیاژ A206،

سیلیسیم،

قابلیت ریخته‌گری،

پارگی گرم،

سیالیت.

ارجاع به این مقاله:

دانیال یوسف‌پور، مجید عباسی، مجتبی جواهری، اثر منگنز بر ریزساختار انجمادی چدن با گرافیت‌های کرووی پژوهش‌نامه ریخته‌گری، زمستان، ۱۳۹۹، جلد ۴، شماره ۴، صفحات ۲۰۳-۲۱۳.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2020.205051.1102

۱- مقدمه

می‌شود [۲،۱]. همچنین منگنز در مقادیر ۱ درصد وزنی، قادر است با کربن ترکیب شده و تشکیل کاربید M_3C ، $(FeMn)_3C$ ، بدهد و در صورت بالا بودن میزان منگنز (بیش‌تر از ۱ درصد وزنی)، ممکن است برخی دیگر از کاربیدها نظیر M_7C_3 ، M_5C_2 و $M_{23}C_6$ ، ایجاد شوند [۳]. از دیگر اثرات این عنصر می‌توان به تغییر دمای شرایط انجماد یوتکتیک در آلیاژهای چدنی اشاره کرد [۴،۱].

از اثرات نامطلوب منگنز در چدن‌های با گرافیت‌های کرووی (موسوم به چدن نشکن)، تغییر شکل گرافیت‌های کرووی و کاربیدزایی است. در یک چدن نشکن با ۲ درصد منگنز، بیش از

در آلیاژهای پایه آهنی، منگنز از عناصر پایدارکننده فازهای آستنیت و کاربید است. همچنین یک عنصر واکنش‌دهنده با گوگرد و پایدارکننده پرلیت محسوب می‌شود. میزان حلالیت منگنز در آهن گاما تقریباً نامحدود و در آهن آلفا تا ۳ درصد گزارش شده است. از ویژگی‌های منگنز، افزایش توان کارسختی فاز آستنیت است. برای مثال، فولادهای آستنیتی منگنزی موسوم به هادفیلد با داشتن ۱۰ تا ۱۴ درصد وزنی منگنز و ۱ تا ۱/۴ درصد وزنی کربن، یکی از خانواده‌های آلیاژی کارسخت‌پذیر و مقاوم به سایش در شرایط سخت و شدید محسوب

می‌تواند مشابه فولاد هادفیلد باشد که در برابر سایش‌های ضربه‌ای و شدید مقاوم است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه و ریخته‌گری

در این تحقیق، نمونه‌هایی از چدن با گرافیت‌های کرووی با مقادیر متفاوت منگنز مطابق با ترکیب شیمیایی جدول (۱) ریخته‌گری شدند. عملیات ذوب در کوره القایی با ظرفیت ۱۰۰ کیلوگرم صورت پذیرفت. عملیات تلقیح برای کرووی شدن گرافیت به روش ساندوچی توسط فروسیلیکومنیزیم (با ترکیب اسمی ۵۰ درصد سیلیسیم و ۶ درصد منیزیم) به میزان ۲ درصد وزن مذاب در پاتیل صورت گرفت. قالب‌های ماسه‌ای با چسب سیلیکات سدیم به روش CO₂ تهیه و ذوب موردنظر بعد از کرووی‌سازی در دمای ۱۴۵۰°C به داخل آنها ریخته شد. کربن معادل مطابق با رابطه (۱) محاسبه شد [۱۰].

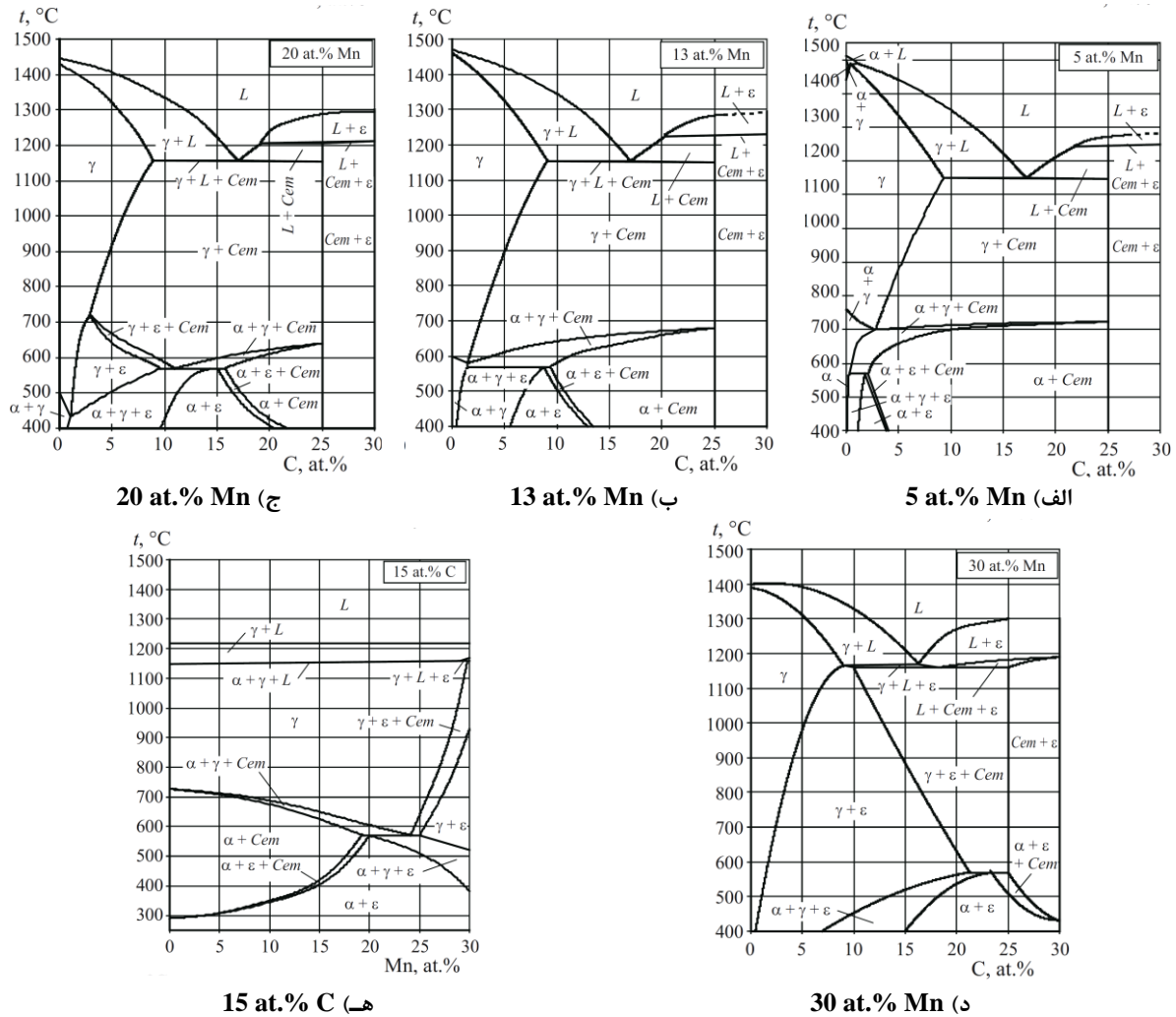
$$CE = \%C + 0.3(\%Si) + 0.33(\%P) - 0.027(\%Mn) + 0.4(\%S) \quad (1)$$

تصویر طرح‌واره از مدل ریخته‌گری در شکل (۲) به همراه سیستم راهگامی و اندازه‌گذاری آن ارائه شده است. نسبت سیستم راهگامی برای ریخته‌گری نمونه‌ها، پس از محاسبات مربوط به سطح مقطع تنگه طراحی شد. به این منظور، مطابق با اصول طراحی راهگام بر اساس طرح پرفسور جان کمپل [۱۱] یک سیستم غیرفشاری [۱:۱/۲:۱/۵] با کمترین تلاطم و اغتشاش مذاب و سرعت بهینه ۰/۵ m/s در نظر گرفته شد.

نمونه‌ها پس از جداسازی راهگام و آماده‌سازی‌های اولیه، از مقاطع یکسان برش زده شده و از تمامی نمونه‌های شاهد، آزمون سختی‌سنجی به روش برینل با حداقل ۵ بار تکرار به عمل آمد. برای انجام آزمایش سختی‌سنجی از دستگاه SCTMC طبق استاندارد ASTM E10 با فرو رونده ساچمه‌ای با قطر ۲/۵ mm تحت نیروی ۱۸۷ کیلوگرم و زمان ۱۵ ثانیه استفاده شد. همچنین برای مطالعه مشخصات میکروسکوپی، نمونه‌های متالوگرافی از بلوک‌های ریختگی تهیه شد. نمونه‌ها پس از حکاکی با محلول نایتال ۲ درصد حجمی با میکروسکوپ نوری مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفتند. به‌منظور بررسی مورفولوژی و مشخصه‌های کمی گرافیت‌ها از نرم‌افزار پردازش تصویر MIP4 روی حداقل ۱۰ تصویر میکروسکوپ نوری در بزرگ‌نمایی‌های ۱۰۰ و ۴۰۰ برابر استفاده شد.

۷۵ درصد از گرافیت‌های تغییر شکل داده و به‌صورت فشرده تشکیل می‌شود و کمتر از ۲۵ درصد از آنها کرووی است و ریزساختار زمینه، پرلیتی است [۵]. رولا و همکاران [۳] تأثیر منگنز در مقادیر بیشتر از یک درصد را بررسی کردند و نشان دادند که این عنصر در اطراف گرافیت تجمع کرده و غلظت بالاتری از منگنز را ایجاد می‌کند. این موضوع باعث می‌شود تا منگنز با مصرف گرافیت‌ها، کاربیده‌های پایدار منگنز تشکیل بدهد. همچنین استفاده از کربن در کاربیده‌ها، باعث کاهش فاکتور شکل گرافیت‌ها در چدن‌های نشکن شده و تعداد کره‌های گرافیتی را کاهش می‌دهد.

تحقیقات نشان داده است که این عنصر تمایل زیادی به جدایش در مناطق بین‌سلولی دارد. اوحدی و همکاران [۶] جدایش منگنز در چدن نشکن آستمپر شده، حاوی ۱/۵ درصد وزنی از این عنصر را مورد بررسی قرار داده و مشخص کردند که این عنصر تمایل به جدایش مثبت را افزایش می‌دهد. غلظت منگنز در مرز سلول‌های بین‌دندریتی بیشتر از نواحی نزدیک کره‌های گرافیت است. کونگ و همکاران [۷] نشان دادند که منگنز باعث کاهش ضریب نفوذ و انرژی فعال‌سازی نفوذ می‌شود. این مسئله باعث پایدارسازی فاز آستنیت در گستره بیشتری شده و باعث ایجاد فوق‌گرمایش‌های موضعی می‌شود که به عنوان محل‌های جوانه‌زنی آستنیت عمل می‌کنند [۸]. سیلمن [۴] با بررسی ترمودینامیکی سیستم‌های Fe-C-Mn نشان داد که افزایش مقدار منگنز موجب پایداری آستنیت و کاربرد در گستره بیشتری می‌شود. شکل (۱) نمودارهای تعادل فازی در سیستم‌های Fe-Mn-C در مقادیر مختلف منگنز و کربن را نشان می‌دهد. در این نمودارها، ایجاد کاربیده‌های ε در آلیاژهای غنی از منگنز و کربن و همچنین حضور کاربیده‌های M₃C در آن اجتناب‌ناپذیر است [۴]. نمودارهای ایزوترمال نشان داده است که در صورت وجود ۳۵ تا ۴۰ درصد اتمی منگنز، این کاربیده‌ها تا دماهای بالایی مانند ۱۰۰۰ °C (نزدیک خط یوتکتیک) پایدار باقی خواهند ماند [۹]. در تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر منگنز در چدن‌ها، بررسی‌هایی روی اثر مستقل منگنز بر ریزساختار انجمادی چدن صورت گرفته است. به‌علاوه، می‌توان به وجود اختلافاتی در زمینه نحوه جدایش منگنز در ریزساختارهای ریختگی و تأثیر آن بر مورفولوژی گرافیت‌ها در ریزساختار چدن نشکن اشاره کرد. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی مسیر انجماد و تأثیر مقادیر مختلف منگنز بر مورفولوژی گرافیت در چدن با گرافیت‌های کرووی از طریق آزمایش‌های تجربی و نرم‌افزار JMatPro است. این تحقیقات، برای امکان‌سنجی تولید چدن نشکن آستنیتی منگنزی با گرافیت‌های کرووی است. رفتار زمینه این چدن



شکل ۱- نمودارهای تعادل فازي در سیستم‌های Fe-Mn-C در مقادير مختلف منگنز و کربن: (الف) ۵ درصد اتمي منگنز، (ب) ۱۳ درصد اتمي منگنز، (ج) ۲۰ درصد اتمي منگنز، (د) ۳۰ درصد اتمي منگنز، (ه) ۱۵ درصد اتمي کربن، (توجه شود که با توجه به اختلاف محدود وزن اتمي دو عنصر منگنز و آهن، درصدهای اتمي و وزني منگنز در این سیستم‌ها تقریباً یکسان است و مقدار ۱۵ درصد اتمي کربن نزدیک به ۳/۶ درصد وزني کربن است) [۴].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژهای موردنظر با مقادير متفاوت منگنز (بر حسب درصد وزني).

شماره نمونه	مقدار اسمی منگنز	کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر	گوگرد	منیزیم	کربن معادل (رابطه ۱)
۱	۰/۵	۳/۶۱	۲/۲۱	۰/۵۰	۰/۰۱۸	۰/۰۱۵	۰/۰۵	۴/۲۷
۲	۵	۳/۷۰	۲/۱۳	۵/۱۱	۰/۰۲۱	۰/۰۱۱	۰/۰۷	۴/۲۱
۳	۱۱	۳/۶۳	۲/۲۱	۱۰/۹۷	۰/۰۲۷	۰/۰۰۸	۰/۰۵	۴/۰۰
۴	۱۷	۳/۵۳	۲/۰۳	۱۷/۲۳	۰/۰۲۹	۰/۰۰۸	۰/۰۶	۳/۶۹

موردنیاز شامل منحنی‌های سرد شدن از دمای مذاب تا پایان انجماد، نمودارهای تعادل‌های فازي در دماهای مختلف، تغییرات ترکیب شیمیایی در فازهای مختلف در حین انجماد استخراج شد. در این بررسی فاصله دمایی ۱ درجه سانتیگراد و پایان انجماد در کسر جامد ۰/۹۹۵ (۰/۵ درصد مذاب باقیمانده) در نظر گرفته شده است.

۲-۲- بررسی با نرم‌افزار JMatPro

برای بررسی مسیر انجماد آلیاژهای موردنظر و همچنین ارزیابی نوع و مقدار فازهای تشکیل شده در حین انجماد و تغییرات ترکیب شیمیایی و جدایش عناصر در فازها از نرم‌افزار JMatPro نسخه شماره ۷ استفاده شد. پس از اعمال ترکیب شیمیایی آلیاژ در نرم‌افزار به صورت درصد وزني، محاسبات بر مبنای روابط ترمودینامیکی و ریاضی توسط نرم‌افزار انجام شد و داده‌های

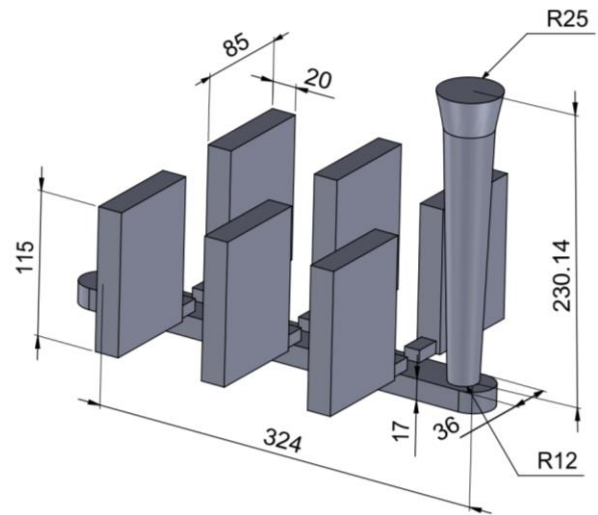
با افزایش مقدار منگنز تا ۱۱ درصد وزنی، سل‌های یوتکتیکی کاربیدی بیشتری مشاهده می‌شود که حاوی کاربیدهای چندوجهی-صفحه‌ای شکل است، شکل (۳-ج). با افزایش بیشتر منگنز تا ۱۷ درصد وزنی، مقدار کسر حجمی کاربیدها افزایش جزئی دارد، شکل (۳-د) ولی از میزان گرافیت‌های کروی شده به شدت کاسته می‌شود. دلیل این پدیده، اشباع شدن فاز سمنتیت از منگنز و همچنین مصرف کربن مذاب در ایجاد کاربیدها است [۱۲-۱۴]. همچنین مشاهده می‌شود که تمایل زمینه به تشکیل پرلیت مشابه آنچه که در نمونه با ۰/۵ و ۵ درصد منگنز است، کمتر شده است و عملاً پرلیت واضحی مشاهده نشده است. این می‌تواند به خاطر افزایش پایداری آستینت با حضور مقدار زیاد منگنز در زمینه باشد. توجه شود که افزودن منگنز، دما و کربن یوتکتوئید را کاهش می‌دهد [۱۴].

ارزیابی دقیق ریزساختاری در تصاویر شکل (۳) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار منگنز به بالاتر از ۵ درصد وزنی، مقدار سل‌های یوتکتیک کاربیدی بیشتر شده و همچنین کاربیدهای بیشتری به صورت صفحه‌ای چند وجهی درشت تشکیل شدند. این کاربیدها می‌توانند با ترکیب M_7C_3 از نوع ϵ یا M_5C_2 باشند [۲۵،۴].

جیانگ [۱۲] پیشنهاد کرد که شکل‌گیری کاربید در این آلیاژها ناشی از تأثیر منگنز است که منجر به جدایش کربن در دماهای پایین می‌شود. این رخداد شانس شکل‌گیری کاربید را افزایش داده و مانع تشکیل گرافیت می‌شود. بنابراین، استحاله چدن آلیاژی از ناحیه آستینت منجر به تشکیل مقدار قابل توجهی از کاربید می‌شود.

مطابق جدول (۲) و شکل (۳)، نتایج پردازش تصاویر متالوگرافی با میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد که با افزایش منگنز، اندازه، درصد کرویت و مقدار گرافیت‌ها کاهش می‌یابد. تا جایی که در آلیاژ با ۱۷ درصد وزنی منگنز، گرافیت‌های کروی قابل مشاهده نیستند. با افزایش مقدار منگنز، میزان کربن معادل کاهش یافته، تمایل به مصرف کربن و تشکیل کاربید بیشتر می‌شود. در نتیجه، میزان تشکیل گرافیت و کروی شدن آن کاسته شده و در مقابل کاربید بیشتری تشکیل می‌شود. منگنز با تشکیل کاربید، مانع از رشد کره‌ها شده و با مصرف کربن از مذاب، فاکتور شکل آنها را دچار تغییر می‌کند. در ارزیابی فاصله بین بازوهای دندریتی در نمونه‌های ۵ و ۱۱ درصد وزنی منگنز، مشاهده شد که فاصله بین آنها تغییر چندانی نکرده است. طبق پژوهش‌های انجام شده، این مکان‌ها فضای مناسبی برای جدایش منگنز هستند [۱۳، ۱۴].

ارزیابی سختی نشان داد که با افزایش مقدار منگنز، سختی افزایش می‌یابد. با افزایش منگنز تا ۵ درصد وزنی، جهش ناگهانی



شکل ۲- تصویر طرح‌واره از مدل ریخته‌گری (ابعاد به میلی‌متر است).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی ریزساختار ریخته‌گری

در شکل‌های (۳) و (۴) تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی از ریزساختار ریخته‌گری نمونه‌های مورد آزمایش چدنی با مقادیر منگنز متفاوت ارائه شده است. همچنین در جدول (۲) نتایج مربوط به مشخصه‌های کمی گرافیت‌ها و آنالیز تصویر به دست آمده از نرم‌افزار MIP4 به همراه تغییرات سختی نمونه‌ها ارائه شده است. به وضوح مشاهده می‌شود که مشخصه‌های کمی گرافیت با حضور منگنز، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به گونه‌ای که با افزایش منگنز از ۰/۵ تا ۱۷ درصد وزنی، تعداد کره‌های گرافیتی در یک میلی‌متر مربع از ۵۰۲ به ۱۹۸ و میزان کرویت کره‌های گرافیتی از ۸۱ درصد به ۵۸ درصد کاهش می‌یابد. در این فاصله، میزان گرافیت‌ها از ۱۰ درصد حجمی به کمتر از ۱ درصد حجمی کاهش و در مقابل میزان کاربیدهای یوتکتیکی از تقریباً صفر درصد تا حداقل ۴۷ درصد حجمی افزایش می‌یابد.

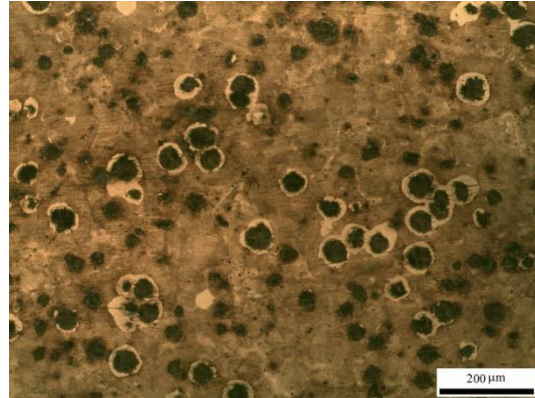
در شکل (۳-الف) تصویر نمونه با ۰/۵ درصد منگنز مشاهده می‌شود که ریزساختار شامل پرلیت با مقداری فریت (مناطق سفید) در اطراف گرافیت‌های کروی است و هیچ نوع کاربید یوتکتیکی و یا پرویوتکتیکی مشاهده نمی‌شود. در تصویر میکروسکوپی مربوط به نمونه ۵ درصد وزنی منگنز، شکل (۳-ب)، مقدار قابل ملاحظه‌ای کاربیدهای یوتکتیکی در ریزساختار به همراه کلونی‌هایی از پرلیت و آستینت باقیمانده مشاهده می‌شود. ترکیب سل یوتکتیک کاربیدی (لدبوریت) به همراه مقدار اندکی از سمنتیت صفحه‌ای و پرلیت در زمینه مشاهده می‌شود. این ریزساختار لدبوریتی (سل‌های یوتکتیک کاربیدی)، متشکل از آستینت و کاربید (سمنتیت) است.

افزایش می‌دهد و مشابه انجماد در حالت تحت تبرید شدید می‌شود. دلیل این موضوع را می‌توان در کاهش پدیده نفوذ کربن با حضور منگنز بیان نمود. در این حالت، شرایط به سمت سیستم شبه پایدار ترغیب می‌شود. با وجود اینکه تغییرات انرژی آزاد یوتکتیک آستنیت-سمنتیت، بیشتر از آستنیت-گرافیت است، سیستم به دلیل محدودیتی که برای آن ایجاد شده (عدم نفوذ کربن)، تشکیل آستنیت-سمنتیت را انتخاب می‌کند [۴].

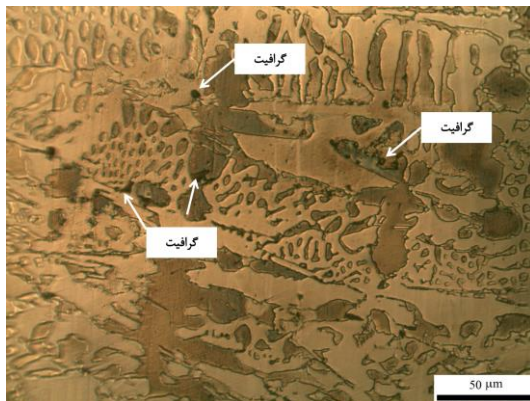
در سختی دیده می‌شود که علت آن، حضور فاز سخت سمنتیت است. با افزایش منگنز از ۵ به ۱۱ درصد وزنی، سختی بالاتری دیده شد. علت این امر، کاهش آستنیت و ایجاد صفحات مستقل و درشت کاربیدی است. با افزایش بیشتر منگنز این روند با شدت کمتری ادامه می‌یابد که همراه با غنی‌شدن سمنتیت از عنصر منگنز و سخت‌شدن بیشتر آن است [۱۵]. به‌طور کلی مشاهده شد که حضور منگنز، تمایل سیستم آهن-کربن به تشکیل یوتکتیک کاربیدی (موسوم به لدبوریت) را



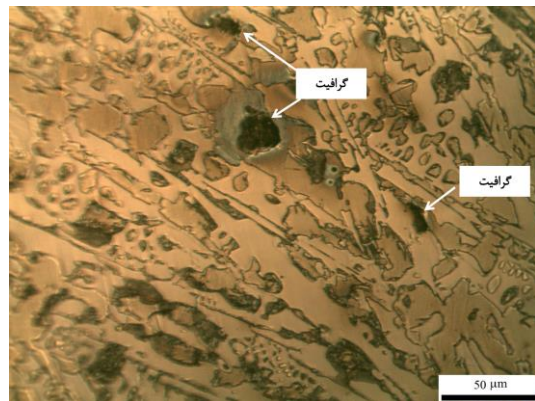
5 Mn (ب)



0.5 Mn (الف)



17 Mn (د)

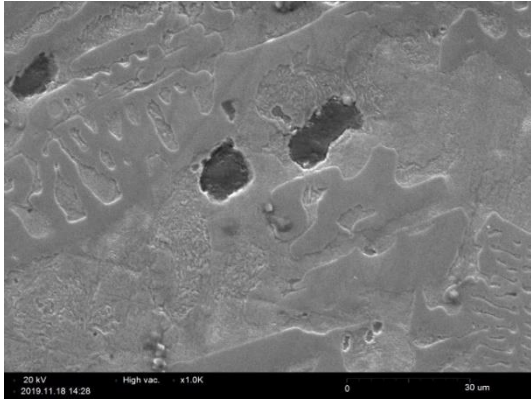


11 Mn (ج)

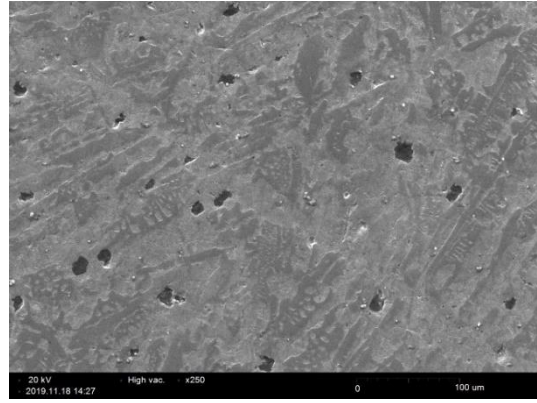
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های چدن با مقادیر متفاوت منگنز: الف: ۰/۵، ب: ۵، ج: ۱۱، د: ۱۷ درصد وزنی.

جدول ۲- نتایج پردازش تصویر ریزساختار انجمادی و سختی‌سنجی نمونه‌های چدن با مقادیر مختلف منگنز.

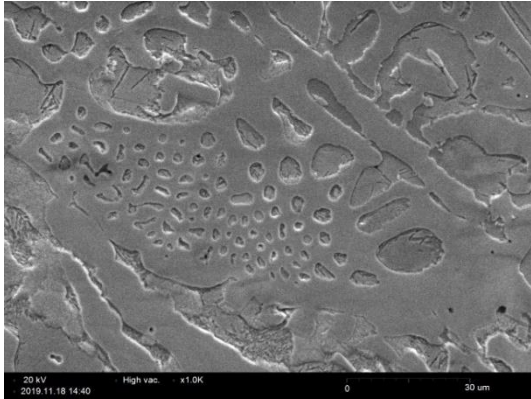
شماره نمونه	مقدار اسمی منگنز [wt%]	تعداد کره‌های گرافیتی (ندول کانت) (mm ²)	کرویت (ندولاریته) (%)	کسر حجمی گرافیت (%)	کسر حجمی کاربید (%)	سختی (HB)
۱	۰/۵	۵۰۲	۸۱	۱۰	-	۲۸۴ ± ۸
۲	۵	۳۱۳	۶۲	۲	۲۷	۵۶۸ ± ۱۲
۳	۱۱	۲۶۸	۶۱	۱/۷	۴۷	۶۳۳ ± ۹
۴	۱۷	۱۹۸	۵۸	۱ >	۵۰	۶۵۰ ± ۱۱



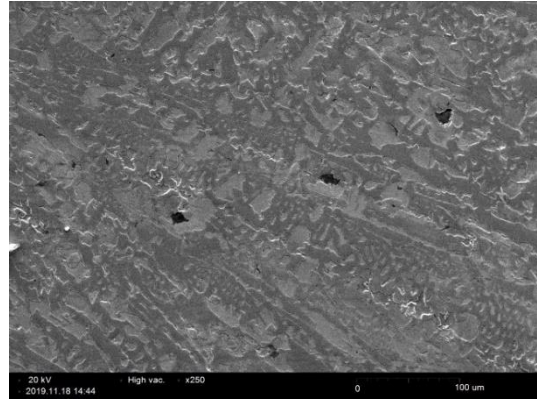
ب) 5 Mn



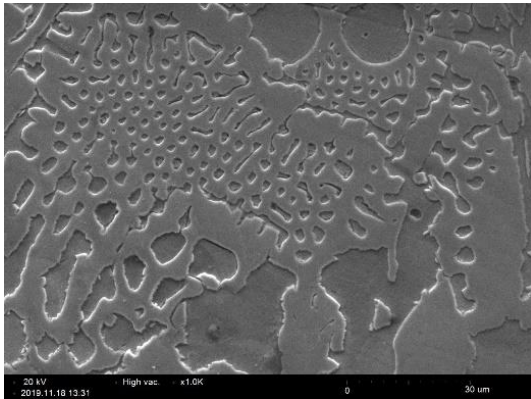
الف) 5 Mn



د) 11 Mn



ج) 11 Mn



و) 17 Mn



ه) 17 Mn

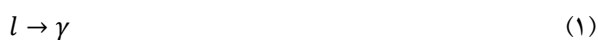
شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های چدن با مقادیر متفاوت مگنیز.

الف و ب) ۵، ج و د) ۱۱، هـ و ز) ۱۷ درصد وزنی

نتایج این پردازش و داده‌های مربوط به دماهای بحرانی و آنالیز فازها در پایان انجماد را نشان می‌دهد.

در انجماد چدن‌های مورد مطالعه، سه تحول انجمادی صورت می‌گیرد که به ترتیب در روابط (۱) تا (۳) نشان داده است:

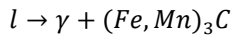
- انجماد با جوانه‌زنی فاز آستنیت از مذاب:



- یوتکتیک اول: انجماد هم زمان آستنیت و گرافیت از مذاب باقیمانده:



۲-۳- آنالیز حرارتی انجماد با استفاده از نرم‌افزار JMatPro با استفاده از نرم‌افزار JMatPro، نمودارهای سرد شدن (منحنی انجماد) نمونه‌های مختلف چدن بر حسب مقدار اسمی مگنیز به دست آمده است که به صورت یک‌جا در شکل (۵-الف) ارائه شده است. همچنین نمودار مشتق دوم این منحنی‌ها پردازش شده و در شکل‌های (۵-ب) تا (۵-هـ) به ترتیب برای چهار آلیاژ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، از نمودار مشتق دوم به خوبی می‌توان دماهای بحرانی را از طریق مکان‌یابی پیک‌ها تشخیص داد. جدول‌های (۳) و (۴)،

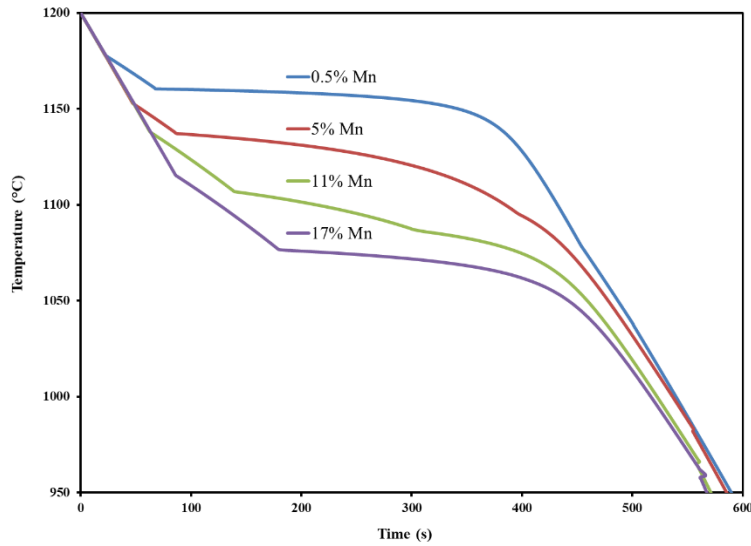


(۳)

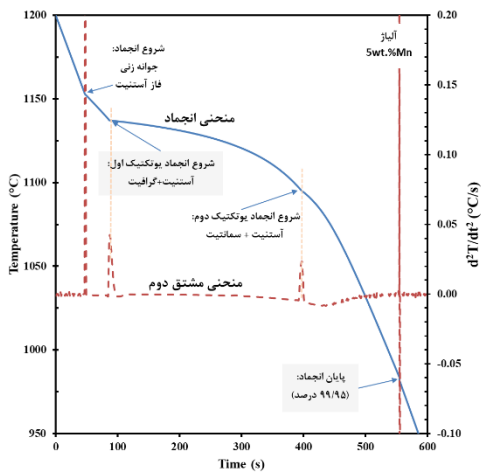
(یوتکتیک دوم: انجماد هم‌زمان آستنیت و کاربید از

مذاب باقیمانده غنی از منگنز و کربن)

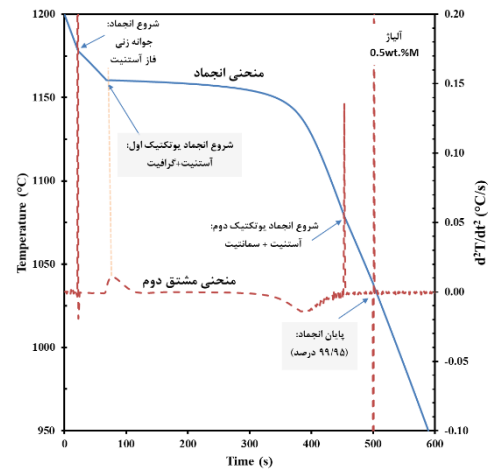
که l مذاب، γ آستنیت، G گرافیت است.



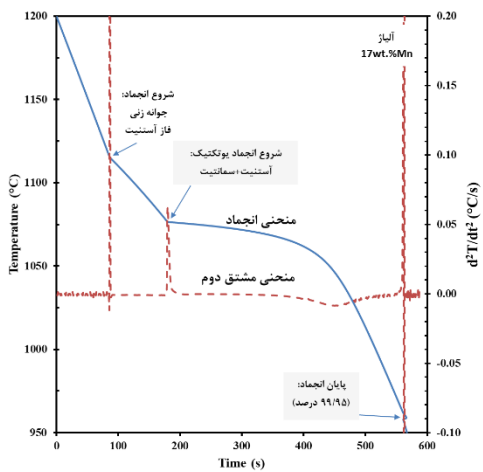
(الف)



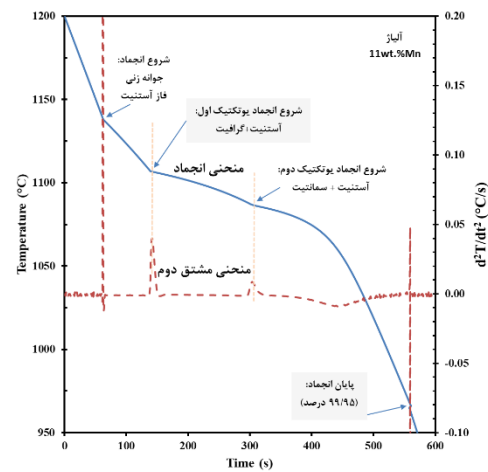
(ج)



(ب)



(هـ)



(د)

شکل ۵- الف) نمودارهای منحنی انجماد چندین با مقادیر متفاوت منگنز به دست آمده از نرم افزار JMatPro و نمودار منحنی انجماد و مشتق دوم آن برای آلیاژهای: (ب) ۰/۵، (ج) ۵، (د) ۱۱ و (هـ) ۱۷ درصد وزنی منگنز.

جدول ۳- نتایج پردازش تصویر ریزساختار انجمادی و سختی‌سنجی نمونه‌های چدن با مقادیر مختلف منگنز.

شماره نمونه	مقدار اسمی منگنز [wt%]	دماهای بحرانی (°C)			
		شروع انجماد	شروع یوتکتیک اول: آستینیت+گرافیت	شروع یوتکتیک دوم: آستینیت+سمانتیت	پایان انجماد
۱	۰/۵	۱۱۷۸	۱۱۶۰	۱۰۷۸	۱۰۳۹
۲	۵	۱۱۵۳	۱۱۳۷	۱۰۹۶	۱۰۱۵
۳	۱۱	۱۱۳۸	۱۱۰۷	۱۰۸۶	۹۸۴
۴	۱۷	۱۱۲۰	*۱۰۷۲	۱۰۷۸	۹۶۴

بیشتر کند و استحاله یوتکتوئیدی را به دمای پایین‌تر و کربن کمتر سوق دهد [۱۷]. اگر سرد شدن از دمای بالای استحاله یوتکتوئیدی سریع‌تر انجام شود، این امکان وجود دارد که آستینیت در دمای محیط در آلیاژهای غنی از منگنز به صورت شبه پایدار ظاهر شود و تمام آن به پرلیت تبدیل نشود. در ادامه، جدایش عناصر در حین انجماد به همراه تغییرات میزان فازها بررسی می‌شود.

۳-۳- بررسی جدایش عناصر در حین انجماد

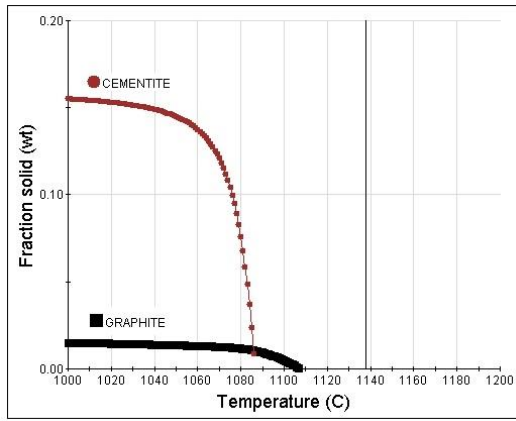
شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب)، نمودارهای تغییرات فازی در حین انجماد و شکل‌های (۶-ج) و (۶-د) نحوه جدایش دو عنصر منگنز و کربن در این فازها را برای چدن با ۱۱ درصد منگنز نشان می‌دهد. به علت حجم بالای داده‌ها از ارائه تصاویر سایر نمونه‌ها صرف‌نظر شده است و نتایج نهایی داده‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در نمونه‌های با ۵، ۱۱ و ۱۷ درصد منگنز، آستینیت در مراحل پایانی انجماد از دو عنصر منگنز و سیلیسیم به شدت غنی می‌شود و در مقایسه با فولاد شماره ۱، میزان کربن محلول کاهش می‌یابد. کاهش مقدار کربن در آستینیت می‌تواند به دلیل استفاده هم‌زمان دو عنصر منگنز و کربن در سمانتیت و حجم بالای سمانتیت و حجم کمتر آستینیت در چدن‌های منگنزدار باشد. همچنین میزان منگنز در سمانتیت با افزایش منگنز در چدن تا بیش از ۳۲ درصد افزایش می‌یابد. این اعداد نشان می‌دهد جدایش منگنز در حین انجماد نسبتاً زیاد است. مقایسه آنالیز به دست آمده از آستینیت در سه نمونه منگنزدار در مراحل پایانی انجماد نشان می‌دهد که این آنالیز با ترکیب شیمیایی مرسوم فولاد هادفیلد (۱۰-۱۴ درصد وزنی منگنز و ۱/۴-۱ درصد وزنی کربن [۱۶]) مشابه است و یا حتی از منگنز بیشتری برخوردار است. در مقابل فقط مقدار سیلیسیم آنها کمی بیشتر است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که در همه سه آلیاژ، زمینه آستینیتی در دمای محیط به صورت شبه پایدار ظاهر شود (همان‌طور که در شکل‌های (۲-ج) و (۲-د) مشاهده شده است که کاملاً به پرلیت تبدیل نشده است).

مطابق شکل (۵-الف) و بر اساس رابطه (۱) مشاهده می‌شود که انجماد در این آلیاژها با جوازه‌زنی فاز آستینیت از مذاب شروع می‌شود و سپس دو نوع انجماد یوتکتیک آستینیت به اضافه گرافیت (رابطه ۲) و یوتکتیک آستینیت به اضافه سمانتیت (رابطه ۳) به ترتیب می‌تواند رخ دهد تا انجماد پایان یابد. البته برای آلیاژ اول با ۰/۵ درصد منگنز، شکل (۵-ب)، فقط یوتکتیک اول قالب است و سهم یوتکتیک دوم بسیار ناچیز است. در مقابل برای آلیاژ با ۱۷ درصد منگنز، فقط یوتکتیک دوم (آستینیت+سمانتیت) مشاهده می‌شود و یوتکتیک اول با تاخیر و به میزان بسیار کم انجام می‌شود، شکل (۵-ه) که این موضوع قبلاً در بخش ۳-۱ بررسی آزمایشگاهی شده است.

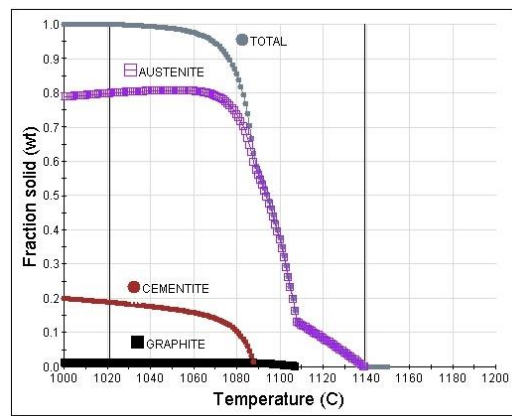
مطابق داده‌های ارائه شده در جدول (۳)، دماهای بحرانی شامل شروع و پایان انجماد و شروع انجمادهای یوتکتیک با افزایش منگنز کاهش می‌یابد. همچنین افزایش منگنز دامنه انجماد را افزایش و در مقابل سهم استحاله یوتکتیک را کاهش می‌دهد که می‌تواند به علت کاهش مقدار کربن معادل و قدرت کاربیدزایی آن باشد. این تغییر در دامنه انجماد آلیاژ سبب خارج شدن مکانیزم انجماد از حالت پوسته‌ای به خمیری می‌شود که تأثیر مستقیمی در قابلیت ریخته‌گری این آلیاژها دارد، چرا که بسیاری از تخلخل‌ها در این مرحله پدیدار می‌شوند [۹].

با افزایش منگنز، در صورتی که مقدار آن در توازن با مقدار گوگرد باشد (تا ۰/۷ درصد وزنی)، به دلیل خنثی‌شدن اثر گوگرد در مذاب، قدرت گرافیت‌زایی مذاب افزایش می‌یابد و در نتیجه، دمای یوتکتیک افزایش می‌یابد. ولی با افزایش شدید مقدار منگنز، تحت تبرید آلیاژ افزایش می‌یابد و در نتیجه کاربیدزایی بیشتر و گرافیت‌زایی کمتر شده و دمای یوتکتیک هم کاهش می‌یابد [۱۶].

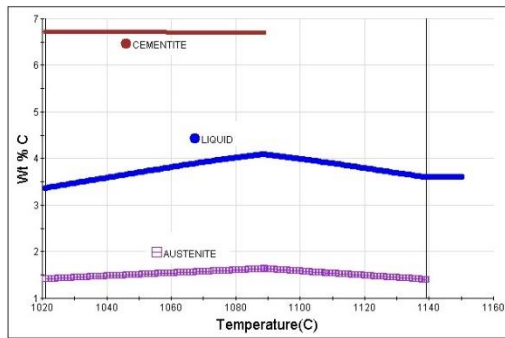
پس از پایان انجماد، با سرد شدن قطعه، از دندریت‌ها و فازهای آستینیت غنی از کربن و منگنز، کاربید رسوب می‌کند. در نهایت، در محدوده دمای استحاله یوتکتوئیدی، آستینیت باقیمانده می‌تواند به پرلیت تبدیل می‌شود (شکل ۲-الف و ب). حضور مقدار بالای منگنز در زمینه می‌تواند پایداری فاز آستینیت را



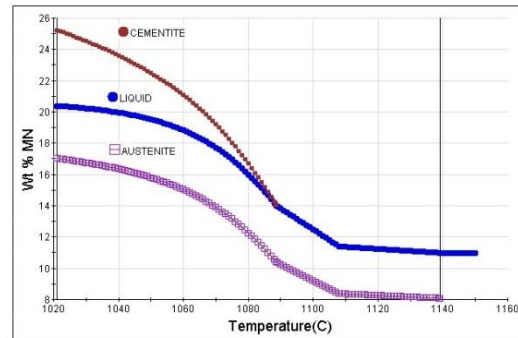
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶- الف و ب) نمودار تغییرات فازی در حین انجماد آلیاژ 11Mn (شماره ۳)،
ج) نمودارهای جدایش منگنز و د) نمودارهای جدایش کربن در حین انجماد در فازهای مختلف

جدول ۳- نتایج آنالیز فازی و جدایش عناصر در حین انجماد نمونه‌های چدن با مقادیر مختلف منگنز.

شماره نمونه	مقدار اسمی منگنز [wt.%]	مقدار فاز در پایان انجماد (درصد وزنی):			حداکثر مقدار عنصر محلول در آستنیت در پایان انجماد (درصد وزنی):			
		آستنیت	گرافیت	سمنتیت	کربن	منگنز	سیلیسیم	آهن
۱	۰/۵	۹۵/۲۴	۲/۰۶	۲/۷۰	۱/۵۶	۲/۲۵	۰/۶۸	۹۴/۹۱
۲	۵	۸۹/۰۸	۱/۹۰	۹/۰۰	۱/۴۱	۱۱/۲۳	۲/۴۲	۸۴/۴۶
۳	۱۱	۸۲/۷۰	۱/۵۷	۱۵/۷۳	۱/۴۲	۱۷/۰۱	۳/۴۹	۷۷/۹۳
۴	۱۷	۶۳/۴۸	۰/۳۲	۳۶/۱۷	۱/۴۰	۲۰/۸۳	۴/۱۰	۷۳/۵۵

۴-۳- طراحی آلیاژ و فرایند تولید

مزیت‌هایی نظیر مقاومت به سایش بهتر را می‌توان در چدن‌های منگنز بالا با گرافیت‌های کروی انتظار داشت. این مزیت می‌تواند به خاطر حضور فازهای سخت کاربیدی، زمینه آستنیتی کارسخت‌پذیر به همراه گرافیت‌های کروی روانکار در چدن باشد. این ماده یک کامپوزیت طبیعی خود به خودی است. کسب این مزیت، از یک سو به طراحی‌های صحیح آلیاژ و فرایند تولید آن و از سوی دیگر به انتخاب شرایط سایشی مناسب وابسته است. بنابراین برای توسعه این استراتژی، تحقیقات بیشتری نیاز است.

این مقاله به طراحی آلیاژ برای کسب یک ریزساختار انجمادی اولیه مطلوب توجه دارد تا در ادامه با بهینه‌سازی سایر متغیرهای آلیاژی و فرایندهای عملیات حرارتی و ریخته‌گری، شرایط مناسب‌تری به دست آید.

آزمایش‌های تجربی انجام شده با مقادیر مختلف منگنز و شبیه‌سازی با نرم‌افزار JMatPro نشان داده است که تولید این نوع چدن از نظر کنترل ریزساختار، سه مشکل بزرگ اولیه دارد:

۱- کاهش تمایل به تشکیل گرافیت با افزایش مقدار منگنز در چدن،

۴. با افزایش منگنز از ۰/۵ به ۱۷ درصد وزنی، سختی از ۲۸۴ برینل به ۶۵۰ برینل افزایش یافته است. در مقابل کسر حجمی گرافیت‌ها از ۱۰ درصد به ۱ درصد و تعداد کره‌های گرافیتی از ۵۰۲ عدد به ۱۹۸ عدد در میلی‌متر مربع کاهش یافته است.

مراجع

- [1] Davis J.R., Mills K.M., Lampman S.R., Metals Handbook, Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-performance Alloys, ASM International, Materials Park, Ohio 44073, USA, 1990.
- [2] Hashmi S., Comprehensive Materials Finishing, Oxford, United Kingdom, 2016.
- [3] Roula A., Kosnikov G.A., Manganese distribution and effect on graphite shape in advanced cast irons, Materials Letters, 2008, 62(23) 3796-3799.
- [4] Silman G.I., Phase diagram of alloys of the Fe-C-Mn system and some structural effects in this system: Part 2. Calculation and construction of isothermal sections of the diagram, Metal Science and Heat Treatment, 2005, 47(3-4) 123-130.
- [5] Nili Ahmadabadi M., Niyama E., Echigoya J., Transmission electron microscopy study of high-temperature bainitic transformation in 1 wt.% Mn ductile iron, Materials Science and Engineering A, 1995, 194 87-98.
- [6] Owhadi A., et al., Microsegregation of manganese and silicon in high manganese ductile iron, Materials Science and Technology, 1997, 13(10) 813-817.
- [7] Kong L., et al., The influence of manganese on kinetics of austenitization of the Fe-Mn-C ternary alloys, Mechanika, 2017, 23(2) 291-298.
- [8] Pietrowski S., Gumienny G., Microsegregation in nodular cast iron with carbides, Archives of Foundry Engineering, 2012, 12(4) 127-134.
- [9] Vasudevan S., et al., A study on the influence of manganese additions on austenitic ductile iron, British Foundryman, 1985, 78(5) 243-251.
- [10] Rudnev V., Loveless D., Cook R. L., Handbook of Induction Heating, CRC Press, 2017.
- [11] Campbell J., Castings Practice: The Ten Rules of Castings, Butterworth-Heinemann, Elsevier Science and Technology Books, 2004.
- [12] Jiyang Z., Colour metallography of cast iron, China Foundry, 2011, 8(2) 239-246.
- [13] Wolf G., Flender E., Sahn P R., Solidification behavior of technical metastable near-eutectic iron-carbon alloys (experimental and numerical simulation), Symposium-Physical Metallurgy of Cast Iron, 1984, 34, 241-249.
- [14] Park J.S., Verhoeven J.D., Directional solidification of white cast iron, Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27A(8) 2328-2337.
- [15] Vasudevan S., Raja V.S., Seshan S., Chattopadhyay K., Study of influence of manganese additions on electrochemical corrosion behaviour of austenitic spheroidal graphite iron, British Corrosion Journal, 1986, 21(2) 87-94.
- [16] Torabi S.A., Amini K., Naseri M., Investigating the effect of manganese content on the properties of high manganese austenitic steels, Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, 2017, 10(1) 75-83.
- [17] Randle V., Laird G., A microtexture study of eutectic carbides in white cast irons using electron back-scatter diffraction, Journal of Materials Science, 1993, 28(15) 4245-4249.

۲- کاهش کرویت گرافیت‌ها با حضور منگنز،
۳- حجم بالای کاربید در زمینه (بیش از ۳۶ درصد وزنی در آلیاژ ۱۷ درصد منگنز) و در نتیجه ترد و شکننده کردن آلیاژ.

بر اساس داده‌های به‌دست آمده نتیجه می‌شود که مقدار منگنز ۱۷ درصد مناسب نیست چرا که از تشکیل گرافیت‌های کرووی به شدت جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر، چنانچه میزان منگنز و کربن محلول در آستنیت (مشابه فولاد هادفیلد) به ترتیب بیش از ۱۰ و ۱ درصد وزنی باشد، شرایط مناسبی برای خواص سایشی فراهم می‌شود. حتی در برخی تحقیقات، فولاد منگنزی با ۷ درصد منگنز برای برخی شرایط سایشی آرام لغزشی پیشنهاد شده است [۲۶]. لذا جدایش منگنز و کربن در حین انجماد و میزان حلالیت این عناصر در آستنیت نشان می‌دهد که مقدار مطلوب منگنز در چدن می‌تواند بین ۵ تا ۱۱ درصد باشد (ترجیحاً به ۵ نزدیک‌تر و از ۱۱ دورتر باشد). در این شرایط هم کاربیدهای سخت و هم گرافیت‌های نرم روانکار حضور خواهند داشت و زمینه هم می‌تواند از منگنز و کربن غنی باشد (داده‌های جدول (۴) را مشاهده کنید).

نیاز است که در گام بعدی با انجام عملیات حرارتی انحلالی، وضعیت انحلال یا استحاله‌های فازی در کاربیدها، گرافیت‌زایی جدید و انحلال عناصر در زمینه آستنیت بررسی شود.

۴- نتیجه‌گیری

۱. عملیات تلقیح برای کرووی کردن گرافیت‌های چدن، تحت تأثیر مقدار منگنز قرار می‌گیرد. با حضور ۱۷ و ۱۱ درصد وزنی شرایط برای تشکیل گرافیت‌های کرووی (انجماد یوتکتیک اول: آستنیت+گرافیت) بسیار دشوار می‌شود و در مقابل انجماد یوتکتیک دوم، آستنیت به اضافه کاربید، تسریع می‌شود.

۲. با حضور ۵ درصد وزنی، وضعیت گرافیت‌ها از نظر اندازه، میزان کرویت و تعداد کره‌های گرافیتی شرایط قابل قبول‌تری دارند و هم زمان، میزان کاربیدهای یوتکتیک مناسب است (شرایط متعادل‌تری برای انجام هر دو نوع انجماد یوتکتیک). افزایش بیشتر منگنز تا کمتر از ۱۱ درصد می‌تواند بهبود بیشتری ایجاد نماید.

۳. بررسی جدایش منگنز و کربن در آستنیت در حین انجماد چدن با استفاده از نرم‌افزار JMatPro نشان داده است که با حضور ۵ تا ۱۱ درصد وزنی منگنز می‌توان به آستنیتی غنی از منگنز مشابه آنالیز فولاد هادفیلد (آستنیتی منگنزی) دست یافت.

- [22] Janus A., Stachowicz M., Thermodynamic stability of austenitic Ni-Mn-Cu cast iron, *Metalurgija*, 2014, 53(3) 353-356.
- [۲۳] مهدی‌فر م.، دیواندری م.، اثر دمای بارریزی بر گرافیت‌زایی مقاطع تولید شده به روش منیزیم در راهگاه توپر، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۶، ۱(۱) ۳۵-۲۳.
- [24] ESI Group, Procast user manual, (2009).
- [25] Bhadeshia H.K.D.H., Cementite, *International Materials Reviews*, 2020, 65(1) 1-27.
- [26] Fucheng Z., Tingquan L., A study of friction-induced martensitic transformation for austenitic manganese steel, *Wear*, Vol. 212, 1997, 195-198.
- [18] Javahery M., Abbasi M., Simulation of casting process: case study on the gating and feeding design for outlet diaphragms of iron ore ball mill, *Heat and Mass Transfer*, 2019, 55(7) 1959-1967.
- [19] Stefanescu D.M., Davis J.R., Destefani J.D., *Metals Handbook*, Vol. 15, Casting, ASM International, 1988.
- [20] Chudasama B.J., Solidification analysis and optimization using Pro-cast, *International Journal of Research in Modern Engineering and Emerging Technology*, 2013, 1(4) 9-19.
- [21] Kotas P., et al., Elimination of hot tears in steel castings by means of solidification pattern optimization, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2012, 43(3) 609-626.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Effect of Manganese Content on the as Cast Microstructure of Nodular Cast Iron

Danial Yousefpuor¹, Majid Abbasi², Mojtaba Javahery^{3*}

1. M.Sc. Student, in Materials Engineering, Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran
2. Associate Professor, Faculty of Materials and Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.
3. M.Sc. in Materials Engineering, Design and Technology Center of Tabarestan Steel Foundry Company, Mazandaran, Iran

* Corresponding author, abbasim@nit.ac.ir

Paper history:

Received: 13 October 2019
Accepted: 01 December 2020

Keywords:

Manganese nodular cast iron,
JMatpro software,
Segregation,
Solidification Curve.

Abstract:

In this research, the effect of manganese addition on the as cast microstructure of nodular cast iron was investigated using experimental and simulation methods. For this purpose, required cast sample with different manganese contents 0.5, 5, 11 and 17 wt.% were produced in sand mold. The as cast microstructures were examined by optical microscopy equipped by image analysis (MIP4 software) and hardness measurement. Then, using JMatPro simulation software, the manganese segregation, the fraction, analysis and stability of the phase's at different temperature were predicted based on thermal analysis. The results showed that the addition of manganese with 5, 11 and 17% weight percent has strongly affected the solidification characterization, hardness, and morphology of graphite. A quantitative evaluation of the graphite morphology showed that with increasing manganese content to 17 weight percent, the number of nodal counts and nodularity decrease 60 and 28 percent respectively. The results of the JMatPro software showed that the M_7C_3 carbide is formed alongside the ledeburitic composition. Also, the thermodynamically analysis of this software revealed that manganese reduces the eutectic temperature and increases the solidification range.

Please cite this article using:

Danial Yousefpuor, Majid Abbasi, Mojtaba Javahery, Effect of Manganese Content on the as Cast Microstructure of Nodular Cast Iron, in *Persian, Founding Research Journal*, 2021, 4(4) 203-213.
DOI: 10.22034/FRJ.2020.205051.1102

Journal homepage: www.foundingjournal.ir