

## اثر پارامترهای عملیات حرارتی دوفازی سازی بر ریزساختار چدن نشکن آلومینیوم دار

مهشید رشیدی\*<sup>۱</sup> و محمد علی بوترابی<sup>۲</sup>

### چکیده

در این پژوهش، اثر زمان آستنیت‌دهی بر تغییرات ریزساختاری در حین عملیات حرارتی دوفازی سازی در چدن‌های نشکن آلومینیوم‌دار بررسی گردیده است. بدین منظور نمونه‌های چدن نشکن تهیه شده پس از انجام عملیات آنیل فریتی، به مدت ۱۰ دقیقه در کوره اتمسفر هوا در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  پیش‌گرم و سریعاً به محیط آلومینیوم با دو دمای  $920^{\circ}\text{C}$  و  $950^{\circ}\text{C}$  منتقل و از زمان ۱ دقیقه تا ۱۵ دقیقه آستنیت‌دهی و سپس در روغن با دمای  $25^{\circ}\text{C}$  کوئنچ شدند. نتایج بررسی‌های میکروسکوپ نوری و الکترونی از نمونه‌های مزبور نشان داد که در زمان‌های آستنیت‌دهی جزئی، فاز مارتنزیت بیش‌تر در مناطق بین سلولی و کمتر در اطراف گرافیت‌های کروی تشکیل شده است، که با افزایش زمان آستنیت‌دهی جزئی مقدار فاز مارتنزیت تشکیل شده افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش دمای آستنیت‌دهی جزئی در یک زمان آستنیت‌دهی جزئی مشخص، مقدار مارتنزیت تشکیل شده بیش‌تر بوده و سرعت افزایش تشکیل فاز مارتنزیت در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  بیش‌تر از دمای  $920^{\circ}\text{C}$  می‌باشد. در زمان ۴ دقیقه در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  فاز مارتنزیت تشکیل شده حداکثر تا ۹۰/۷٪ ساختار را تشکیل می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: چدن نشکن آلومینیوم‌دار، چدن نشکن دوفازی، فریتی-مارتنزیتی، ریزساختار.

۱- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی و فناوری‌های نوین، دانشگاه صنایع و معادن ایران

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

\*- نویسنده مسئول مقاله: mah\_metal@yahoo.com

### پیشگفتار

آلومینیوم و سیلیسیم بر سیستم آهن- کربن اثر مشابهی دارند، و به همین دلیل تلاش‌هایی برای جایگزینی سیلیسیم به‌وسیله آلومینیوم انجام شده است. سیلیسیم برای اولین بار در چدن‌های خاکستری متداول به‌وسیله کیپ با آلومینیوم به‌گونه جزئی در سال ۱۸۸۸ و به‌گونه کلی در سال ۱۸۸۹ جایگزین گردید. او نشان داد که آلومینیوم در چدن-ها به‌عنوان گرافیت زا عمل می‌کند [۱ و ۲]. تا دو دهه قبل نیز گرافیت کروی، تنها در سیستم Fe-C-Si قابل تولید به نظر می‌رسید تا اینکه در سال ۱۹۸۳ قریشی و کاندیک [۳] اعلام کردند که در سیستم Fe-C-Al که حاوی کمتر از ۰/۲٪ سیلیسیم است نیز می‌توان به گرافیت کروی دست یافت. اگرچه آنها اعلام کردند که تولید چدن‌های با گرافیت کروی در سیستم Fe-C-Al دارای محدودیت‌های ویژه‌ای است و بسیار پیچیده‌تر از انجماد چدن سیلیسیم با گرافیت کروی است و عملیات جوانه زایی باید در شرایط خاصی انجام شود تا اثر کامل خود را داشته باشد. از جمله مزایای چدن‌های نشکن آلومینیوم‌دار نسبت به چدن نشکن سیلیسیم دار، بدست آمدن زمینه‌ی کاملاً پرلیتی در هر دو شرایط ریختگی و عملیات حرارتی می‌باشد. هم‌چنین در این نوع چدن‌ها محدوده وسیعی از خواص مکانیکی به آسانی قابل دستیابی است به‌گونه‌ی که بعضی از آنها در سطحی بالاتر از خواص بدست آمده در چدن سیلیسیم‌دار با گرافیت کروی است [۴].

مزایای چدن‌های آلومینیوم دار را می‌توان به صورت ذیل طبقه بندی کرد:

۱. اثر استحکام دهی آلومینیوم در فریت، نسبت به سیلیسیم بیش‌تر است. چرا که شعاع اتمی آلومینیوم نسبت به سیلیسیم بیش‌تر است (۱/۹۸ آنگستروم، در مقابل ۱/۱۸ آنگستروم) در نتیجه با وجود آلومینیوم نه تنها فریت چقرمه‌تر می‌باشد بلکه سخت‌تر هم می‌شود.
۲. پرلیت حاوی آلومینیوم ریزتر و سخت‌تر از پرلیت حاوی سیلیسیم است [۵].

۳. آلومینیوم در مذاب تولید  $Al_2O_3$  می‌کند. لایه اکسیدی سطح خارجی قطعه در حال ریختگی را می‌پوشاند و به تبع آن مقاومت در برابر اکسیداسیون در دمای بالا افزایش می‌یابد.

۴. آلومینیوم نسبت به سیلیسیم قابلیت گرافیت-زایی بیش‌تری دارد. این خاصیت تولید قطعات ریختگی چدن با دیواره نازک را بدون ایجاد کاربیدهای یوتکتیکی ممکن می‌سازد [۵].

۵. چدن‌های حاوی آلومینیوم در حین انجماد، تولید ساختارهای پیچیده (کمپلکس) آلومینیوم‌دار می‌کنند و همچون جوانه زای بسیار قوی عمل می‌کنند، در نتیجه سل‌های یوتکتیکی بیش‌تری تولید می‌شوند و بنابراین استحکام این نوع چدن نسبت به چدن‌های معمول سیلیسیم‌دار بیش‌تر است.

۶. وزن قطعه ریختگی چدن آلومینیوم‌دار نسبت به سیلیسیم دار از دو جهت می‌تواند کاهش یابد، اولاً کاهش وزن مربوط به چگالی خود آلومینیوم و ثانیاً نازک کردن دیواره قطعات ریختگی به دلیل خاصیت گرافیت‌زایی بیش‌تر آلومینیوم در چدن [۶].

از طرفی افزایش همزمان استحکام و انعطاف-پذیری در چدن‌های نشکن همواره مد نظر بوده است. نیاز به استحکام‌های بالاتر، وجود ساختارهای بینیتی یا مارتنزیتی را به جای ساختار لازم می‌سازد. اما حضور چنین فازهایی باعث کاهش انعطاف‌پذیری چدن می‌گردد. بنابراین، وجود یک ساختار دوگانه مارتنزیتی- فریتی و یا بینیتی- فریتی می‌تواند با حفظ انعطاف‌پذیری نسبی باعث افزایش استحکام آلیاژ گردد. به همین دلیل جهت دستیابی به ساختارهای دوگانه مزبور انجام عملیات حرارتی مناسب به‌وسیله محققین گوناگون پیشنهاد شده است. در این چدن‌ها غالباً سعی بر این است که فاز سخت را در اطراف گرافیت‌ها ایجاد کنند. حضور یک فاز مستحکم در اطراف گرافیت‌های کروی باعث به تأخیر افتادن تشکیل ترک در فصل مشترک فریت-گرافیت، در حین اعمال تنش می‌شود. این مسئله

شمش چدن کم سیلیسیم<sup>۱</sup>، فولاد کم کربن، آلومینیوم خالص تجاری و نیکل خالص مطابق با جدول ۱ با دمای  $1350^{\circ}\text{C}$  تهیه گردید.  $0.04\%$  وزنی آلومینیوم به شارژ اضافه گردید تا یک لایه فیلم اکسیدی محافظ جهت مینیمم کردن اتلاف کربن ایجاد گردد. شارژ تا  $1375-1350^{\circ}\text{C}$  حرارت داده شد و سپس مابقی آلومینیوم ( $99/96\%$  درصد وزنی) به پایین تر از سطح مذاب فرو برده شد. سپس دمای مذاب تا  $1525^{\circ}\text{C}$  بالا برده شد.

پس از آن، عملیات کروی سازی با افزودن  $0.064\%$  وزنی نیکل مینیزیم  $15\%$  (NiMg15) با اندازه  $10-12$  میلیمتر در پاتیل و جوانه زایی با افزودن مخلوطی از  $0.1\%$  وزنی جوانه  $1^2$  (FeSiZr) و  $0.1\%$  وزنی سیلیساید زیرکونیوم  $3^3$  (ZrSi) با اندازه  $5-6$  میلیمتر در پاتیل و همان نوع و مقدار از جوانه-زاهای با اندازه  $1-1/5$  میلیمتر در قالب انجام گردید. بمنظور بهبود درجه گردی گرافیت  $0.2\%$  وزنی قلع قبل از جوانه زایی در پاتیل به ذوب افزوده گردید. مذاب تهیه شده با دمای  $1420^{\circ}\text{C}$ ، در قالب استاندارد y-block شکل با ضخامت  $22$  میلیمتر ریخته شد. مقداری از مذاب برای تعیین آنالیز شیمیایی داخل قالب فلزی به صورت پولکی ریخته-گری شد. این آنالیز در جدول ۲ مشاهده می گردد. سپس از قطعه ریخته شده بمنظور انجام آزمایش-های مورد نیاز، در ابعاد  $10^*20^*11$  میلیمتر برشکاری انجام شد. پس از بررسی و مشاهدات میکروسکوپی اولیه، مشخص شد که ساختار زمینه اولیه، علاوه بر فریت شامل پرلیت نیز است. لذا جهت فریتی کردن زمینه و حذف کاربیدهای احتمالی از ساختار، تمامی نمونه های بریده شده تحت عملیات آنیل فریتی (بصورت حرارت دهی به مدت  $5$  ساعت در  $850^{\circ}\text{C}$  و سپس سرد شدن در کوره تا دمای  $700^{\circ}\text{C}$  و نگاه داشتن در این دما برای مدت  $15$  ساعت و بعد از آن سرد شدن در هوا) قرار

افزایش استحکام و چقرمگی چدن نشکن را در پی دارد [۷].

روش های متنوعی جهت ایجاد یک ساختار زمینه دوفازی در چدن های نشکن وجود دارد. دو روش عمده تولید این نوع چدن ها به شرح ذیل می-باشد:

الف) ساختار زمینه چدن نشکن با عملیات آنیل فریتی، کاملاً به فریت تبدیل می شود. سپس چدن نشکن مورد نظر به مدت کوتاهی در ناحیه دوفازی آستنیت و گرافیت حرارت می بیند به گونه ای که مقداری از فاز فریت با توجه به زمان نگهداری در ناحیه دوفازی به آستنیت تبدیل می شود. سپس نمونه تا دمای محیط، در محیط سردکننده آب یا روغن کوئنچ می شود که باعث استحاله آستنیت به مارتنزیت می شود. اگر نمونه چدن نشکن قبل از کوئنچ شدن تا دمای محیط، و قبل از دمای تشکیل مارتنزیت کوئنچ و در آن دما برای مدتی نگه داشته شود و سپس تا دمای محیط سرد شود، آستنیت تشکیل شده به بینیت تبدیل خواهد شد. با این روش ساختار زمینه به ترکیبی از فریت و بینیت تبدیل خواهد شد.

ب) نمونه چدن نشکن پس از آن که تحت عملیات آنیل فریتی قرار گرفت و ساختار زمینه کاملاً به فریت تبدیل شد، برای مدت زمان خاصی در ناحیه سه فازی آستنیت، فریت و گرافیت قرار داده می شود. سپس بسته به نوع کوئنچ، آستنیت تشکیل شده به مارتنزیت یا بینیت تبدیل خواهد شد [۸].

تاکنون در مورد چدن های آلومینیوم دار پژوهشی مبنی بر ایجاد ساختار زمینه دوفازی انجام نگرفته است. در این مقاله، ساختار دوفازی فریتی مارتنزیتی در یک نوع چدن حاوی  $2/3\%$  آلومینیوم مورد پژوهش قرار گرفته است.

### روش پژوهش

$30$  کیلوگرم مذاب در یک کوره القایی

فرکانس متوسط به وسیله مواد شارژی به شرح

<sup>1</sup>- Sorelmetal

<sup>2</sup>- superseed

<sup>3</sup>- Zirconium Silicide

شکل شماره ۲ نشانگر آن است که ساختار زمینه بصورت فریتی پرلیتی می‌باشد و در بعضی نواحی پرلیت کروی شده مشاهده می‌گردد. هم-چنین هیچ‌گونه فاز کاربیدی در ساختار مشاهده نگردید.

جدول ۴ نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های کمی را بر نمونه ریخته شده نشان می‌دهد. بالا بودن تعداد گرافیت‌های کروی در واحد سطح در چدن نشکن تولید شده در این پژوهش با ضخامت قطعه ریختگی ۲۲ میلی‌متر، بیانگر قابلیت جوانه‌زایی صحیح و گرافیت‌زایی بالای آلومینیوم در تولید چدن نشکن است. بوتراپی نیز نشان داد که در اثر افزودن آلومینیوم‌دار و سیلیسیم‌دار در شرایط یکسان، تعداد گرافیت‌های کروی در چدن نشکن آلومینیوم‌دار نسبت به چدن نشکن سیلیسیم‌دار افزایش بیش‌تری را نشان داد که این نتیجه بیانگر گرافیت‌زایی بیش‌تر آلومینیوم در تولید چدن نشکن می‌باشد [۹]. تعداد گرافیت‌های کروی بالا در چدن نشکن را می‌توان به ترکیب اثر جوانه‌زای مورد استفاده و نرخ نفوذ کربن در چدن مذاب که با آلومینیوم و سیلیسیم مرتبط است نسبت داد. آلومینیوم نرخ نفوذ کربن در چدن مذاب را افزایش می‌دهد [۱۰]، زیرا رشد گرافیت‌های کروی در دمای انجماد بالاتری رخ می‌دهد. تفسیر مشابهی را می‌توان برای توضیح کاهش کاربیدهای یوتکتیکی در چدن نشکن آلومینیوم‌دار بکار برد، زیرا رشد آن در دمای انجماد پایین‌تری امکان پذیر است. همان‌گونه که پیش از این گفته شد تعداد گرافیت‌های کروی بدست آمده در واحد سطح در این پژوهش بالا بوده و با توجه به عکس‌های گرفته شده هیچ نوع کاربیدی در چدن مورد نظر تشکیل نشده است که این موضوع کاملاً مطابق با بحث گفته شده می‌باشد.

هم‌چنین همان‌گونه که در نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود، با وجود ضد کروی کننده بودن آلومینیوم و تأثیر منفی آن بر کروی شدن گرافیت، درجه بالایی از کرویت در این چدن حاصل گردیده است. نتیجه بدست آمده بیانگر کنترل صحیح

گرفتند. سپس نمونه‌های تهیه شده در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه پیشگرم گردیدند. پس از پیشگرم نمونه‌ها به سرعت به دو بوتله آلومینایی حاوی آلومینیوم مذاب که در دو دمای  $920^{\circ}\text{C}$  و  $950^{\circ}\text{C}$  نگهداری می‌شد، با زمان‌های نگهداری متفاوت (۱ دقیقه، ۱/۵ دقیقه، ۲ دقیقه ... و ۱۵ دقیقه)، منتقل شدند. علت انتخاب آلومینیوم مذاب به عنوان محیط آستنیت‌ه کردن، رسیدن سریع نمونه به دمای آستنیت‌ه ( $920^{\circ}\text{C}$  و  $950^{\circ}\text{C}$ ) و رسیدن به تعادل حرارتی در نمونه به علت هدایت حرارتی بالای آلومینیوم بود.

سپس نمونه‌ها به درون ظرف بزرگ حاوی روغن با دمای  $25^{\circ}\text{C}$  جهت حصول سرعت کافی سرد شدن، کوئچ گردیدند. کدگذاری نمونه‌ها بر اساس جدول ۳ انجام گرفت.

نمونه‌های ریخته شده، فریتی شده و نمونه‌های دوفازی شده، متالوگرافی شدند. سمباده‌زنی با مش-های شماره ۶۰ الی ۲۵۰۰ انجام گردید و سپس نمونه‌ها با پودر آلومینا پولیش گردیدند. پس از آن نمونه‌ها با محلول نایتال ۲٪ به مدت حدود ۲۵ ثانیه اچ شدند و سپس سطوح مقطع نمونه‌ها با میکروسکوپ نوری مشاهده و عکسبرداری گردیدند. بررسی‌های دقیق‌تر ساختار به‌وسیله دستگاه میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل VEGA\\TESCAN و ولتاژ ۱۵ کیلو ولت مجهز به آنالیزگر EDS انجام گرفت. جهت تعیین تعداد گرافیت‌های کروی در واحد سطح و مقدار کرویت روش مقایسه‌ای انجام شد. کسر حجمی فریت و مارتنزیت زمینه نیز به‌وسیله همان روش روی نمونه‌های پولیش شده و اچ شده انجام گردید.

## نتایج و بحث

همان‌گونه که در شکل شماره ۱ دیده می‌شود، قطعات در حالت ریختگی چدنی با گرافیت کروی و تعداد گرافیت‌های کروی بالایی در واحد سطح هستند. هم‌چنین در مواردی جزئی پدیده دوقلویی شدن گرافیت‌ها نیز مشهود است.

کردند که تشکیل یک ساختار کاملاً مارتنزیتی در دهامای آستنیته کردن بالاتر، در زمان‌های کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد [۱۳] که نتایج بدست آمده نیز این مطلب را تأیید می‌کند.

آنالیز شیمیایی روی فاز نشان داده شده در شکل ۸ الف به وسیله‌ی آنالیزگر EDS با قطر اشعه ۱۶۰ نانومتر در فاصله ۳/۱ میکرومتری از گرافیت، در شکل ۸ ب نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر هیچ یک از عناصر اندازه-گیری شده بیش‌تر از مقدار متوسط آن در چدن مورد استفاده قرار گرفته نیست. کارلبرگ و فردریکسون در پژوهش خود نشان دادند که آلومینیوم و سیلیسیم هر دو اثر گرافیت‌زایی دارند و تأثیر آلومینیوم از سیلیسیم بیش‌تر است. در واقع آنها نشان دادند که آلومینیوم اثر پایدارکنندگی بیش‌تری بر روی گرافیت نسبت به سیلیسیم دارد که این موضوع کاملاً در تطابق با عدم تشکیل کاربید در چدن نشکن مورد مطالعه می‌باشد [۱۴].

آنالیز شیمیایی روی فاز نشان داده شده در شکل ۱۱ الف به وسیله‌ی آنالیزگر EDS با قطر اشعه ۱۶۰ نانومتر در فاصله ۳/۸ میکرومتری از گرافیت، در شکل ۱۱ ب نشان داده شده است.

هم‌چنین از مقایسه شکل‌های ۸ ب و ۱۱ ب می‌توان به این نتیجه رسید که هیچ نوع جدایشی در نمونه‌های دوفازی شده ایجاد نشده است. این موضوع نیز از عکس‌های گرفته شده به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی قابل تشخیص است.

مقدار فاز مارتنزیت تشکیل شده بر حسب زمان آستنیت‌ه جزئی در دو دمای  $920^{\circ}\text{C}$  و  $950^{\circ}\text{C}$  نیز در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش دما در یک زمان آستنیت‌ه جزئی ثابت، باعث افزایش درصد مارتنزیت می‌شود. دلیل این موضوع تبدیل فریت به آستنیت است. از آنجایی که تبدیل فریت به آستنیت یک فرآیند وابسته به زمان است، لذا با افزایش زمان، استحاله پیشرفت بیش‌تری خواهد کرد. هم‌چنین مشاهده می‌گردد که مقدار مارتنزیت تشکیل شده در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  در تمامی زمان‌ها از

عملیات جواته‌زایی و مکانیسم رشد گرافیت می‌باشد. از طرفی قریشی و کاندیک نشان دادند که افزودن مقدار کمی از عنصر قلع به چدن نشکن آلومینیوم-دار، کروی شدن گرافیت را با ثابت نگه داشتن بقیه شرایط، ترغیب می‌کند [۱۰].

شکل‌های ۳ تا ۶، تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی از نمونه T21، T21.5 و T23 را نشان می‌دهد. فاز مارتنزیت تشکیل شده در مناطق بین سلولی و اطراف گرافیت‌های کروی و مرزدانه‌های فریت تشکیل شده است. پژوهش‌ها نشان داده است که مناطق بین سلولی و مناطق اطراف گرافیت‌های کروی، بسیار مناسب برای تشکیل فاز مارتنزیت هستند، اما سرعت رشد آن در مناطق بین سلولی بیش‌تر از مناطق اطراف گرافیت‌های کروی می‌باشد [۱۱]. عکس‌های گرفته شده از نمونه‌های آستنیت‌ه شده در دمای  $920^{\circ}\text{C}$  نشان می‌دهد که نقش زمان آستنیت‌ه در درصد مارتنزیت تشکیل شده و هم‌چنین توزیع مارتنزیت در زمینه چدن نشکن بسیار حائز اهمیت است. با توجه به شکل‌های ۳ تا ۶ مشاهده شد که در زمان‌های آستنیت‌ه جزئی کم، مارتنزیت بیش‌تر در مناطق بین سلولی ایجاد گردیده است، این درحالی است که با افزایش زمان آستنیت‌ه جزئی اطراف گرافیت‌های کروی نیز تشکیل شده است و در زمان ۱/۵ دقیقه در دمای  $920^{\circ}\text{C}$ ، ساختار مناسبی از چدن نشکن دوفازی فریتی-مارتنزیتی چشم‌سخت<sup>۱</sup> به وجود می‌آید.

شکل‌های ۷ تا ۱۳، تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی از نمونه T51، T52 و T53 را بعد از اچ نشان می‌دهد. عکس‌های گرفته شده نشان می‌دهد که مقدار مارتنزیت تشکیل شده در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  در زمان ثابت نسبت به دمای  $920^{\circ}\text{C}$  بیش‌تر است. همان‌گونه که در پژوهش‌های دیگر نیز اشاره گردیده است [۱۲] می‌توان نتیجه گرفت که علاوه بر زمان آستنیت‌ه جزئی، دما نیز در تعیین درصد مارتنزیت تشکیل شده و هم‌چنین توزیع مارتنزیت نقش موثری دارد. بهمنی و الیت مشاهده

<sup>1</sup> - Hard Eye Structure

- aluminium cast iron and the factors affecting it", *Journal of Materials Processing Technology* 55, pp. 186-192, 1995.
5. M. M., Haque, "Investigation on Properties and Microstructures of Spheroidal Graphite Fe-C-2Si and Fe-C-2Al Cast Irons", *Journal of Materials Processing Technology*, 191, pp.360-363, 2007 .
6. M., Mostafavi, and Boutorabi, S.M.A, "As cast acicular ductile aluminum cast iron", *Materials Letters*, 98, pp203-207, 2009.
۷. اوحدی، ا.، فضلی، م. ا.، نور میرزاده شیستری ج.، حجازی ج.، دوامی پ.، تحول در تولید چدن نشکن با ساختار دوگانه با بهره گیری از عملیات حرارتی، سمینار جامعه ریخته گران ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، صفحات ۱۵۷ تا ۱۸۶، مهر ۱۳۸۶.
8. R. C., Voigt, Eldoky, and L.M., Chious, H.S., "Fracture of Ductile Cast Iron with Ductile Matrix Structure", *AFS Transactions*, 103, pp. 645-656, 1989.
9. S. M. A., Boutorabi, "Effects of inoculation on the solidification characteristics of aluminium and silicon ductile irons", under publication.
10. M., Ghoreshy, and Kondic, V., *Solidification Technology in the Foundry and Cast House*, The Metal Society, 562, 1983.
11. J. M., Chou, Hon, and M.H., *The austenite transformation in ferritic ductile iron*, *Mater. Sci & Eng. A*, vol 158, pp 241-249, 1992.
۱۲. تدین سعیدی م.، وره‌رام ن.، ناگسوارا راو ج.، و باقرسای ن.، "بهبود ویژگی‌های چدن‌های نشکن آستمپر جهت افزایش قابلیت ماشین کاری و استحکام خستگی"، *مجله ی مواد نوین*، جلد ۱، شماره ۳، بهار ۱۳۹۰.
13. M., Bahmani, and Elliott, R., "Mater.Sci. Technol.", 10, 1050-1056, 1994.
14. T., Carlberg, and Fredriksson, H., "Solidification and casting of metals", *The Metals Society*, 115, 1979.

دمای  $920^{\circ}\text{C}$  بیش‌تر است. علت این مسئله این است که در دمای بالاتر نرخ نفوذ کربن بیش‌تر بوده و در نتیجه استحاله تبدیل فریت به آستنیت با سرعت بیش‌تری به وقوع می‌پیوندد. هم‌چنین مشاهده می‌گردد که در دمای  $950^{\circ}\text{C}$  شیب افزایش درصد حجمی مارتنزیت از دمای  $920^{\circ}\text{C}$  بیش‌تر است.

### نتیجه گیری

۱. در نمونه ریخته شده با ضخامت ۲۲ میلی‌متر در سیستم Fe-C-Al درجه بالایی از کرویت ( $90\%$ ) و تعداد گرافیت‌های کروی در واحد سطح ( $352/\text{mm}^2$ ) بدست آمد.
۲. با افزایش زمان آستنیت‌ه جزئی، درصد حجمی مارتنزیت در دماهای آستنیت‌ه  $920^{\circ}\text{C}$  با شیب کمتر و در دمای آستنیت‌ه  $950^{\circ}\text{C}$  با شیب بیش‌تری افزایش یافت.
۳. در دمای آستنیت‌ه جزئی  $920^{\circ}\text{C}$ ، در زمان  $1/5$  دقیقه، ساختار مناسبی از چدن نشکن دوفازی فریتی-مارتنزیتی چشم سخت با مقدار  $25\%$  فاز مارتنزیت تشکیل شده است، در حالی که در دمای آستنیت‌ه  $950^{\circ}\text{C}$  ساختار مشابه در زمان ۱ دقیقه و به مقدار  $31/1\%$  حجمی فاز زمینه تشکیل گردید.
۴. افزایش دما در یک زمان آستنیت‌ه جزئی ثابت، باعث افزایش درصد مارتنزیت گردیده است.
۵. هیچ‌گونه کاربیدی در نمونه ریخته شده در سیستم Fe-C-Al در نمونه‌های دوفازی شده دیده نشد.

### References

1. W. J., Keep, J. of Franklin Inst., 126, 220, 1888.
2. W. J., Keep, Trans. Am. Inst. Mining Eng, 18, 1889.
3. M., Goreshy, "Investigation on Properties and Microstructures of Ductile Cast Irons with Substitution of Al for Si", Ph.D. Thesis, Birmingham Universtiy, 1982.
4. M. M., Haque, and Young. J. M., "Production of spheroidal graphite

## پیوست‌ها

جدول ۱- شارژ مورد استفاده برای تهیه ۳۰ کیلوگرم مذاب .

ماده شارژی	شمش چدن	فولاد کم کربن	آلومینیوم خالص	نیکل خالص	نیکل منیزیم ٪۱۵	قلع خالص
وزن (کیلوگرم)	۱۴/۸۸	۱۳/۹۹۸	۰/۴۶۲	۰/۴۹۱	۰/۱۲۸	۰/۰۴

جدول ۲- ترکیب شیمیایی چدن نشکن تولید شده .

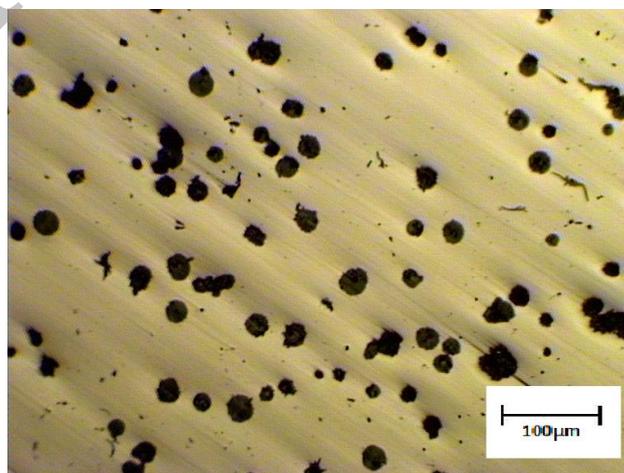
عناصر	Sn	Mn	S	Mg	Ni	Al	Si	C
درصدوزنی	۰/۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴۸	۰/۶	۲/۳	۰/۲	۳/۲

جدول ۳- نحوه کدگذاری نمونه‌های دو فازی شده.

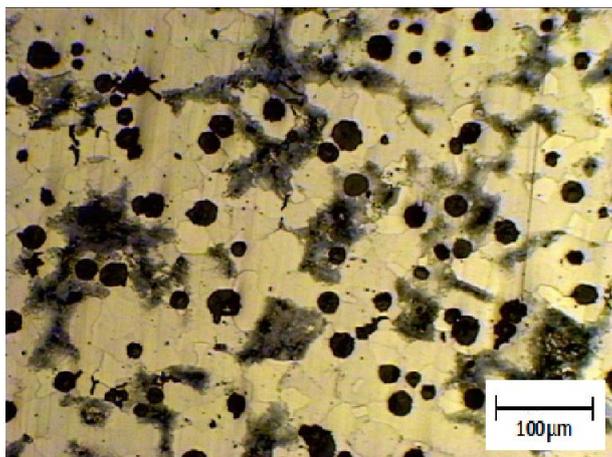
ردیف	شماره نمونه	دمای آستنیت	زمان آستنیت
۱	T21	۹۲۰°C	۱ min
۲	T21.5	۹۲۰°C	۱/۵ min
۳	T22	۹۲۰°C	۲ min
۴	T23	۹۲۰°C	۳ min
۵	T24	۹۲۰°C	۴ min
۶	T26	۹۲۰°C	۶ min
۷	T51	۹۵۰°C	۱ min
۸	T52	۹۵۰°C	۲ min
۹	T53	۹۵۰°C	۳ min
۱۰	T54	۹۵۰°C	۴ min
۱۱	T515	۹۵۰°C	۱۵ min

جدول ۴- نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های کمی روی نمونه ریخته شده .

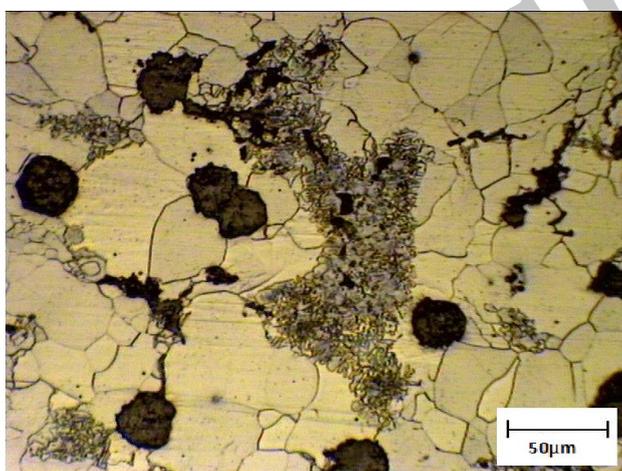
درصد حجمی گرافیت	درصد حجمی فریت	درصد پرلیت+پرلیت کروی شده	اندازه گرافیت ها ( $\mu\text{m}$ )	درصد کرویت گرافیت ها	تعداد گرافیت کروی در واحد سطح ( $\text{mm}^2/\text{nodule}$ )
۱۱/۳۸	۶۶/۵۸	۲۲/۰۴	۲۷	۹۰	۳۵۲



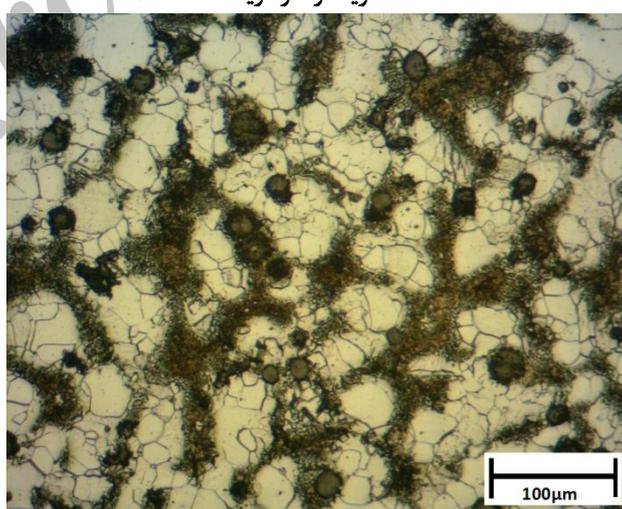
شکل ۱- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه ریخته شده، قبل از اچ.



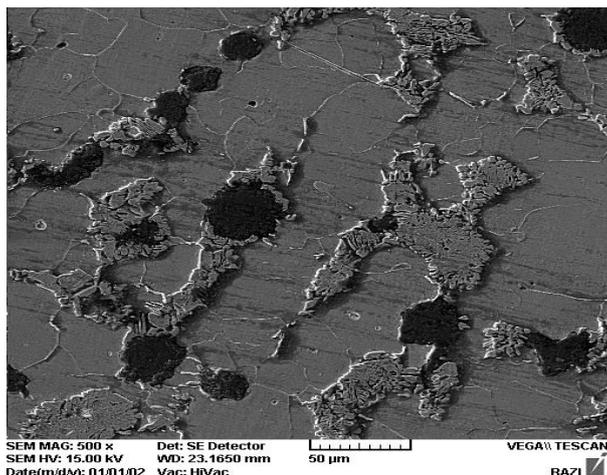
شکل ۲- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه ریخته شده، اچ شده با محلول نایتال ۲٪.



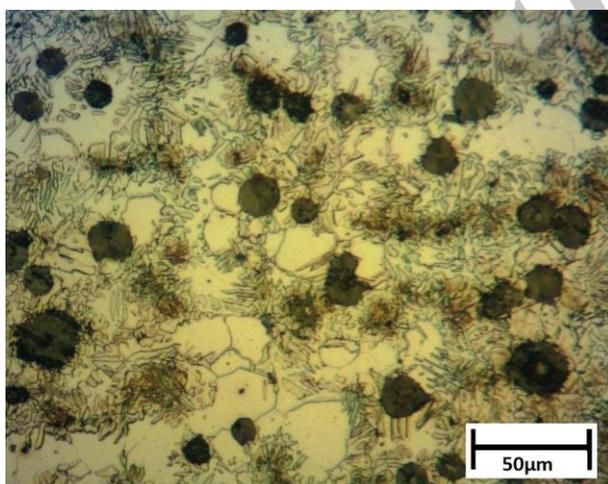
شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه دوفازی شده. آستنیته جزئی به مدت ۱ دقیقه در دمای ۹۲۰°C. ساختار شامل گرافیت های کروی، فریت و مارتنزیت.



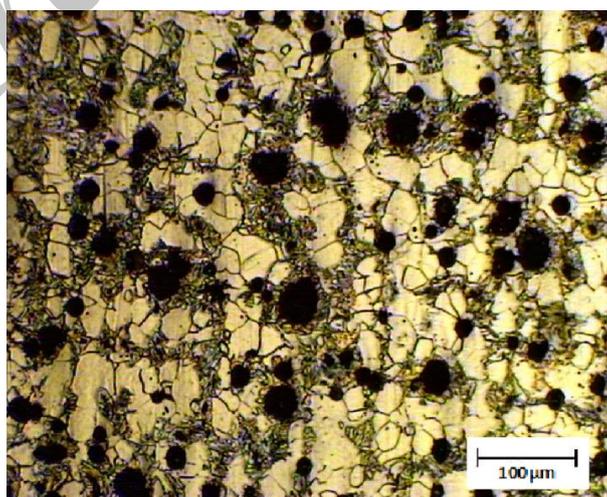
شکل ۴- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه دوفازی شده. آستنیته جزئی به مدت ۱/۵ دقیقه در دمای ۹۲۰°C. ساختار شامل گرافیت های کروی، فریت و مارتنزیت.



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه دوفازی شده. آستنیته جزئی به مدت ۱/۵ دقیقه در دمای  $920^{\circ}\text{C}$ . ساختار شامل گرافیت-های کروی، فریت و مارتنزیت.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه دوفازی شده. آستنیته جزئی به مدت ۳ دقیقه در دمای  $920^{\circ}\text{C}$ . ساختار شامل گرافیت‌های کروی، فریت و مارتنزیت.

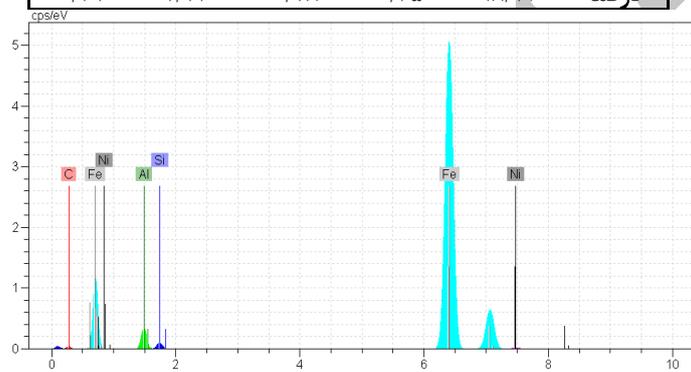


شکل ۷- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه دوفازی شده. آستنیته جزئی به مدت ۱ دقیقه در دمای  $950^{\circ}\text{C}$ . ساختار شامل گرافیت‌های کروی، فریت و مارتنزیت.



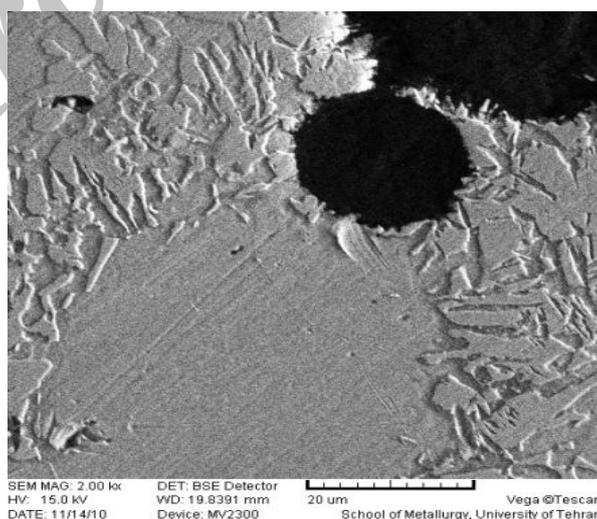
الف

C	Al	Si	Ni	Fe	درصد
۰/۲۱	۱/۱۳	۰/۱۸	۰/۳۵	۹۸/۱۳	

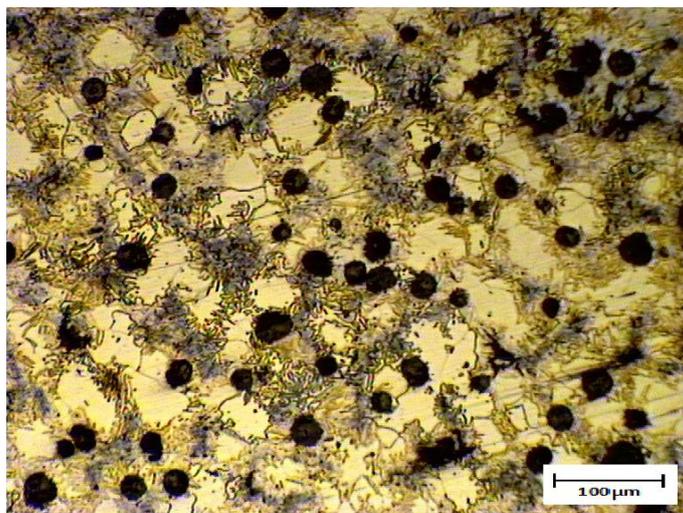


ب

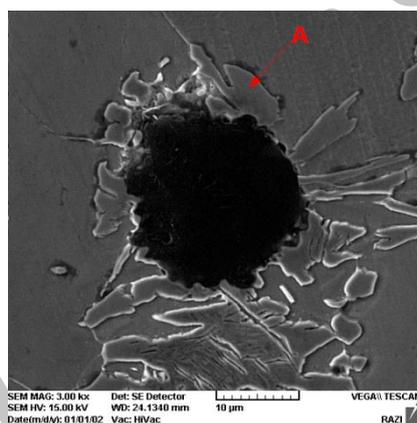
شکل ۸-الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه دوفازی شده. آستنیت به جزیی به مدت ۱ دقیقه دردمای  $950^{\circ}\text{C}$ . ساختار شامل گرافیت کروی، فریت و مارتنزیت-ب) آنالیز نقطه‌ای گرفته شده با EDS از فاز A نشان داده شده در الف.



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه دوفازی شده. آستنیت به جزیی به مدت ۱ دقیقه دردمای  $950^{\circ}\text{C}$ . ساختار شامل گرافیت‌های کروی و فریت و مارتنزیت.

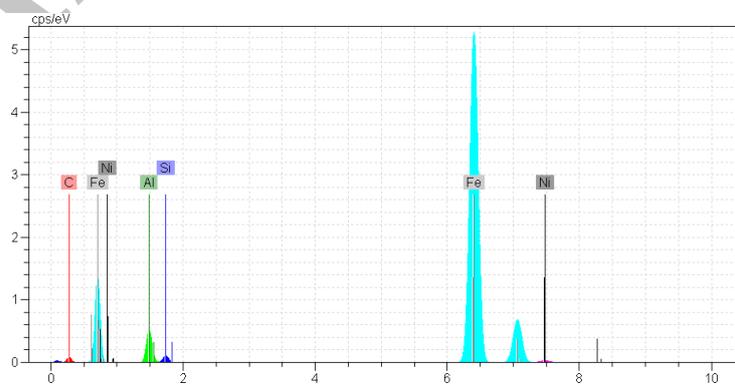


شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه دوفازی شده. آستنیته جزئی به مدت ۲ دقیقه در دمای ۹۵۰°C. ساختار شامل گرافیت‌های کروی و فریت و مارتنزیت.



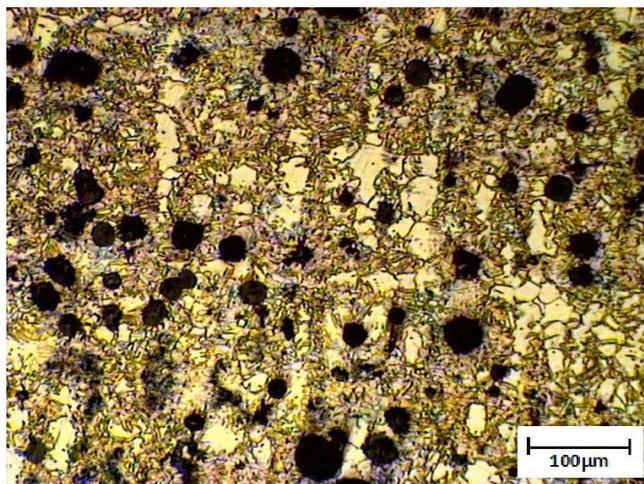
الف

C	Al	Si	Ni	Fe	درصد
۰/۴	۱/۵۷	۰/۲۱	۰/۶۶	۹۷/۱۶	

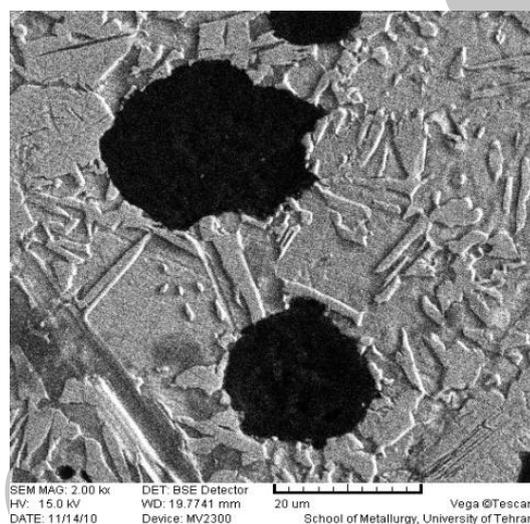


ب

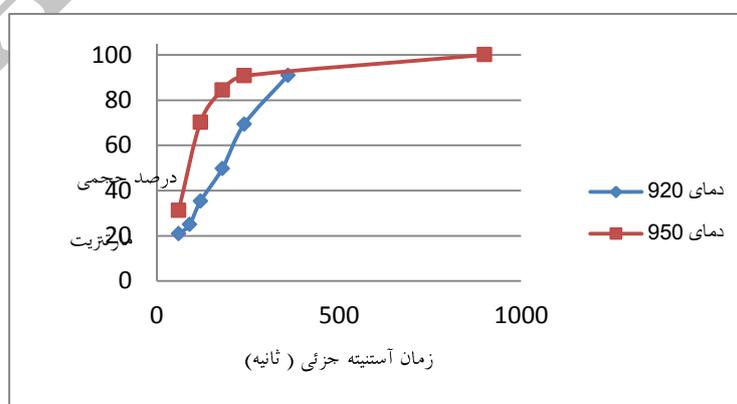
شکل ۱۱- الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه دوفازی شده. آستنیته جزئی به مدت ۲ دقیقه در دمای ۹۵۰°C. ساختار شامل گرافیت کروی و فریت و مارتنزیت- ب) آنالیز نقطه ای گرفته شده با EDS از فاز A نشان داده شده در الف.



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپ نوری نمونه دوفازی شده. آستنیته جزئی به مدت ۳ دقیقه در دمای  $950^{\circ}\text{C}$ . ساختار شامل گرافیت‌های کروی و فریت و مارتنزیت.



شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه دوفازی شده. آستنیته جزئی به مدت ۳ دقیقه در دمای  $950^{\circ}\text{C}$ . ساختار شامل گرافیت‌های کروی و فریت و مارتنزیت.



شکل ۱۴- تغییرات درصد مارتنزیت تشکیل شده بر حسب زمان آستنیته جزئی در دماهای گوناگون.