

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان  
مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



## تأثیر شرایط عملیات حرارتی بر تشکیل فاز گرافیت در فولاد آلیاژی پر کربن

علیرضا کیانی رشید

### چکیده

در این پژوهش تأثیر عملیات حرارتی بر گرافیت زایی فولاد آلیاژی پر کربن مطالعه شده است. تشکیل فاز گرافیت در فولاد باعث بهبود قابلیت ماشینکاری، استحکام بعد از کوئنچ کردن و تمپر کردن و پتک کاری سرد می شود. این نوع از فولادها برای کاربردهایی که نیاز به صلابت و مقاومت سایشی دارند خیلی مناسب هستند. مورفولوژی گرافیت با شکل متمایل به کروی و با اندازه و توزیع بهینه در آلیاژهای آهنی خیلی اثرگذار می باشد. عملیات حرارتی متشکل از نگهداری در  $920^{\circ}\text{C}$  و به مدت ۵ hr و عملیات حرارتی بعدی همدم تا سقف ۵ hr و در درجه حرارت  $750^{\circ}\text{C}$  بکار گرفته شد. نتایج بدست آمده نشان می دهد که مقدار گرافیت با افزایش زمان عملیات حرارتی افزایش می یابد. سیمای کلیدی پژوهش حاضر این می باشد که با وجود اهمیت اصولی، از پتانسیل کاربردی بسیار خوبی نیز برخوردار می باشد.

واژه های کلیدی: گرافیت زایی، فولاد، ریزساختار، عملیات حرارتی، آستیت.

## ۱ - مقدمه

با توجه به محدودیت های شدید در ارتباط با ایجاد کربن آزاد (گرافیت) در ریزساختار فولادها، پژوهش های انجام شده در این زمینه بسیار محدود می باشند. درصد ناکافی کربن فولادها، امکان تهیه ریزساختارهای میکروسکوپی با گرافیت آزاد در چنین آلیاژهایی را عمدتاً دشوار و گاهی غیر ممکن می سازد.

اصولاً فولادها، آلیاژ دوتایی از آهن و کربن می باشند، در صورتیکه در چندین عنصر سیلیسیم (Si) به عنوان عنصر سوم و اصلی مطرح می باشد. حضور Si عاملی جهت تجزیه سمنتیت ( $Fe_3C$ ) در ساختار میکروسکوپی می باشد و از آنجائیکه مقدار کربن چدن ها بیشتر از میزان حلالیت محلول آستنیت در درجه حرارت یوتکتیک می باشد. بنابراین، چدن ها شامل مقدار قابل توجهی کربن آزاد (گرافیت) هستند. در صورتیکه فولادهای موجود فاقد کربن آزاد می باشند [۵-۱].

کاربردهای ویژه این فولادها که موجب علاقمندی در گرافیت زایی در فولادها گردیده است، عبارتند از: ارزانی، سهولت ماشین کاری آنها، امکان بکارگیری در دماهای بالا، افزایش مقاومت اکسیداسیون در درجه حرارت های بالا، افزایش قابل ملاحظه مقاومت سایشی، کاهش محدودیت های شکل پذیری از قبیل: نورد و فورجینگ و ظرفیت بالای جذب ارتعاش و استحکام کششی منطقی همراه با استحکام فشاری خیلی بالا. این نوع فولادها برای کاربردهایی که نیاز به صلابت و مقاومت سایشی دارند بسیار مناسب هستند و جذابیت ویژه ای را در زمینه صنایع خودرو سازی فراهم می سازند.

در بسیاری از فولادها، نیاز به قابلیت ماشینکاری خوب، پتک کاری سرد و سختی پذیری مناسب می باشد. بهر حال، این خواص عمدتاً در ارتباط با هم می باشند و حضور کربن آزاد (گرافیت)، یکی از راه حل های ممکن جهت رسیدن به این خواص می باشد. قابلیت های ماشین کاری و پتک کاری سرد فولادها به مقدار کافی با تبدیل سمنتیت به گرافیت و گرافیت زایی افزایش می یابد [۷و۶]. استحکام فولاد با انحلال گرافیت در حین کوئنچ کردن افزایش نشان می دهد. این اثرات بهر حال به شدت بستگی به توزیع و قطر ذرات گرافیت دارد [۸و۱۰-۶].

گرافیت زایی به معنای تشکیل گرافیت در ریزساختار میکروسکوپی آلیاژها و به ویژه آلیاژهای آهنی می باشد. وجود کربن آزاد و به عبارتی گرافیت باعث تغییرات جدی در کلیه خواص این دسته از مواد می شود. در این آلیاژها سه مرحله مهم از گرافیت زایی وجود دارد. گرافیت زایی در طول انجماد، گرافیت زایی بوسیله رسوب کربن از آستنیت (حالت جامد) و گرافیت زایی در طول استحاله اوتکتیک (حالت جامد). در بعضی از موارد محدود، گرافیت زایی در ۳ زیر محدوده دگرگونی پائینتر از  $523^{\circ}C$  اتفاق

می افتد که از اهمیت کمتری برخوردار بوده و نیازمند زمان های طولانی در این درجه حرارت های نسبتاً پایین می باشد.

عناصر آلیاژی به روشهای بسیار متفاوتی روی خواص آلیاژها اثر می گذارند. در این ارتباط دسته بندی های متفاوتی قائل گردیده اند و بعضی از محققین بر این باور می باشند که آنها را می توان به چهار گروه اصلی تقسیم کرد. الف) عناصر کاربید زا همانند کروم، وانادیم، تلریم، مولیبدن، ازت، بیسموت و ارسنیک. این عناصر عمدتاً موجب تشکیل پرلیت میگردند. ب) عناصر گرافیت زا همانند سیلیسیم، آلومینیوم و مس. ج) عناصری که اثر تخریبی روی ساختمان گرافیت دارند، همانند: سرب، تلریم، بیسموت و آنتیموان. د) عناصری که باعث افزایش جذب هیدروژن و نهایتاً موجب ایجاد حفرات ناشی از هیدروژن می شوند و از مهمترین این عناصر آلومینیوم است.

در همین ارتباط فولاد آلیاژی با ۱/۰۵ درصد وزنی کربن انتخاب و با تهیه نمونه های متعدد و انجام فرآیند های عملیات حرارتی مناسب اقدام به گرافیت زایی در ساختار آن گردید که نتایج بدست آمده با توجه به آزمایشات متالوگرافی و مشاهده ریزساختار، بیانگر درصد بالایی از کربن با شکل و توزیع مناسب و موفقیت در تولید خانواده جدیدی از این آلیاژها می باشد [۱۱].

## ۲ - مواد و روش تحقیق

در این پژوهش جهت مطالعه و بررسی گرافیت زایی در فولادها، فولاد پر کربن حاوی ۱/۰۵ درصد وزنی کربن با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ انتخاب گردید. فولاد پر کربن علاوه بر دارا بودن ۱/۰۵ درصد وزنی کربن، از عناصر آلیاژی دیگری همانند منگنز، سیلیسیم، مس، تنگستن و کروم نیز برخوردار می باشد. تعیین ترکیب شیمیایی بر اساس اطلاعات ارسالی توسط کارخانه سازنده و با توجه به تجزیه شیمیایی توسط کوانتومتر می باشد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد (درصد وزنی)

C	Mn	Si	Ni	Mo	Cu	W	Al	Cr	P	S	Ti	Sn	Fe
۱/۰۵	۰/۹۹	۰/۳۲	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۱۶	۱/۳۰	۰/۰۲	۰/۹۸	۰/۰۱۴	۰/۰۰۹	۰/۰۰۳	۰/۰۳	باقیمانده

## ۲-۱ - تهیه نمونه ها

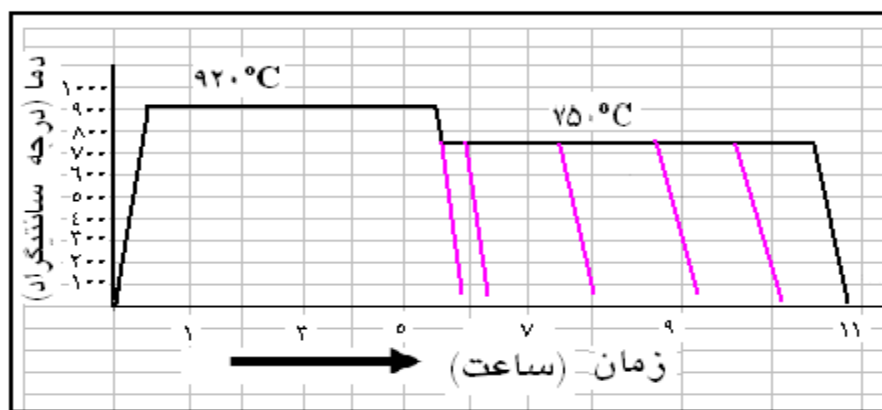
به کمک دستگاه برش متالوگرافی مدل MT100 (ساخت ایتالیا)، نمونه هایی با ضخامت ۱۰ mm از میله هایی به قطر تقریبی ۳ cm مقطع زده شد. جهت جلوگیری از تغییر در ساختار میکروسکوپی اولیه از جریان کافی آب بهره گرفته شد.

## ۲-۲ - پوليش کردن

در اين تحقيق جهت متالوگرافي، ابتدا نمونه های تهيه شده قبل و بعد از عمليات حرارتي مربوط مانت گردیدند. سپس نمونه های مانت شده کد گزاری شد تا کليه ی مشخصات مربوط به فرآيند توليد آن ها محفوظ باقی بماند. جهت پرداخت سطوح از دستگاه پوليش ايتاليایی متالوگرافي مدل MP800V استفاده شد. در مرحله پوليش نمونه ها از کاغذهای سمباده متفاوت و طبق روند فزاينده ای در مش مربوط به آنها بهره گرفته شد. در اين ارتباط از کاغذهای ضد آب با مش ۸۰، ۱۸۰، ۲۸۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ با ذرات سایای کارييد سيليسيم استفاده شد. در تمامی اين فرآيندها از جريان کافی در آماده سازی بهره گرفته شد تا ذرات کنده شده از سطوح باعث خراش بر سطح نمونه ها نشده و ذرات ساينده از کاغذ سمباده های قبلی موجب اختلال در سطح نمونه ها نشوند. در مرحله نهايي از پودر اکسيد آلومينيوم و خمير الماس جهت پرداخت استفاده شد.

## ۳-۲ - عمليات حرارتي نمونه های فولادی

جهت انجام عمليات حرارتي نمونه های فولادی و تعيين فرآيندهای گرافيت زايی، تعداد کافی از هر نوع فولاد انتخاب و پس از آماده سازی، جهت جلوگیری از سوختن کربن و به ویژه کربن سطحی، نمونه ها در شرايط کنترل شده قرار گرفتند. نمونه ها در درون کوره الکتریکی قرار داده شد و دمای کوره تا  $920^{\circ}\text{C}$  افزايش يافت. در اين دما نمونه ها به مدت ۵ ساعت نگهداری و سپس تعدادی از نمونه ها از کوره خارج و سريعاً "سرد شدند. نمونه های ديگر نيز پس از خروج از اين کوره، در کوره ديگری با دمای  $750^{\circ}\text{C}$  و به مدت ۵ ساعت قرار گرفته و سپس در هوا سرد گردیدند (شکل ۱).



شکل ۱. سيكل عمليات حرارتي گرافيت زايی در فولاد آلياژی پرکربن. فولاد در دمای  $920^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵ ساعت آستنيتيه شده و مرحله دوم عمليات حرارتي به شکل تکدما در درجه حرارت  $750^{\circ}\text{C}$  و تا سقف ۵ ساعت انجام شده است.

## ۴-۲ - بررسی ريز ساختار

۵

در این پژوهش با توجه به اهمیت بررسی تشکیل گرافیت در ریزساختار آلیاژها، نمونه ها قبل از اچ کردن و پس از پولیش باید در زیر میکروسکوپ مشاهده شوند. در این ارتباط جهت مشاهده گرافیت ها نیازی به محلول حکاکی نبوده و پس از آماده سازی سطح توسط کاغذ سنباده های مناسب و استفاده از مراحل نهایی پولیش با خمیر الماس امکان مشاهده گرافیت فراهم می شود. علاوه بر کربن آزاد (گرافیت) بخش دیگری از کربن به صورت حل شده در ساختار های فریت و یا سمنتیت باقی خواهد ماند. زمان های طولانی تر نگهداری نمونه ها در درجه حرارت های مناسب گرافیت زایی باعث تجزیه بیشتر کاربید آهن و بوجود آمدن کربن آزاد فراوان تری در ریزساختار خواهد شد.

## ۲-۵ - سختی سنجی

در ارتباط با تعیین سختی نمونه ها و بررسی تأثیر عملیات حرارتی انجام شده، نمونه های با کیفیت سطحی مناسب تهیه و قبل و بعد از عملیات حرارتی از نقاط مختلف نمونه سختی سنجی شد که مقادیر متوسط بدست آمده در جدول ۲ ارائه شده است. معیار سختی سنجی راکول B (HRB) و نوع دستگاه Instruments (ساخت انگلستان) و میزان بارگذاری ۱۰۰ کیلوگرم می باشد.

جدول ۲. سختی نمونه های فولاد قبل و بعد از عملیات حرارتی

نوع فولاد	میزان سختی بر حسب برینل		
	قبل از عملیات حرارتی	بعد از عملیات حرارتی <sup>۱</sup>	بعد از عملیات حرارتی <sup>۲</sup>
فولاد پرکربن	۹۴/۷	۹۳/۳	۹۳/۱

(۱) در دمای °C ۹۲۰ به مدت ۵ hr آستنیت شده و سپس سریع سرد شده است.

(۲) در دمای °C ۹۲۰ به مدت ۵ hr آستنیت شده و سپس به کوره دیگری با دمای °C ۷۵۰ منتقل و به مدت ۵ hr در این دما نگهداری و نهایتاً در هوا سرد شده است.

## ۳ - یافته ها

### ۳-۱ - ریز ساختار میکروسکوپی قبل از عملیات حرارتی

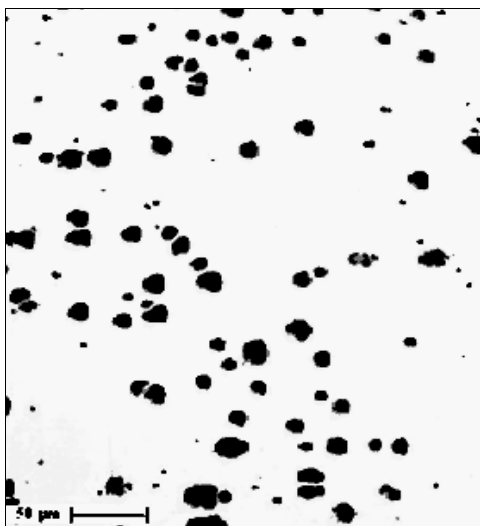
جهت بررسی تغییرات ریز ساختاری، ابتدا چگونگی حضور گرافیت نمونه ها قبل از عملیات حرارتی و به کمک میکروسکوپ نوری و بدون استفاده از محلول حکاک تحقیق گردید که هیچ نوع گرافیتی مشاهده نگردید و لکه های سیاه رنگ موجود در تصاویر نشاندهنده ناخالصی ها در سطح و به ویژه وجود اکسید ها می باشد که با پولیش کردن سطح، درصد بالایی از آنها حذف گردید. نمونه ای از این ساختار های میکروسکوپی در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۲ ریز ساختار نمونه فولادی قبل از عملیات حرارتی و قبل از اچ کردن و بدون استفاده از محلول حکاک می باشد.



شکل ۲. ریز ساختار نمونه فولادی پر کربن (۱/۰۵ درصد کربن) قبل از عملیات حرارتی از محلول اچ استفاده نشده است و لکه های سیاه بواسطه حضور نواحی اکسیدی می باشد.

### ۲-۳ - ساختار میکروسکوپی بعد از عملیات حرارتی اولیه

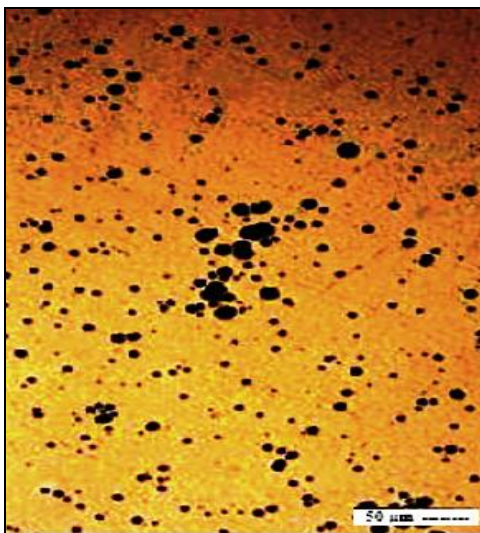
با انجام عملیات حرارتی اولیه و آستنیت کردن در  $920^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵hr و سرد کردن سریع بعد از خروج از کوره تغییرات جدی در ریز ساختار مشاهده می شود. درصد بالای گرفت آزاد که عمدتاً نیز به شکل کروی هستند بیانگر عملیات حرارتی مناسب جهت گرافیت زایی است. شکل ۳ نشاندهنده چگونگی توزیع ذرات گرافیت در ریز ساختار فولاد پر کربن بعد از این مرحله عملیات حرارتی می باشد. در این ریزساختار حضور درصد بالای گرفت آزاد قابل توجه می باشد.



شکل ۳. ریز ساختار نمونه فولادی پر کربن (۱/۰۵ درصد کربن) بعد از عملیات حرارتی آستنیت کردن در دمای  $920^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵ ساعت و سرد کردن در هوا- از محلول اچ استفاده نشده است.

### ۳-۳ - عملیات حرارتی ثانویه

جهت انجام عملیات حرارتی متفاوت و تأثیر تحولات تکدما در دماهای پایینتر، تعداد دیگری از نمونه ها ابتدا در دمای  $920^{\circ}\text{C}$  و به مدت ۵hr آستینیت شده و سپس به کوره دیگری با دمای  $750^{\circ}\text{C}$  منتقل و به مدت ۵hr در این دما نگهداری شدند و نهایتاً در هوا سرد شدند. در این ارتباط شکل ۴ ریز ساختار نمونه های فولادی را نشان می دهد. چگونگی توزیع ذرات گرافیت نیز در این شکل نمایش داده شده است.



شکل ۴. ریز ساختار نمونه فولادی پر کربن (۱/۰۵ در صد کربن) بعد از عملیات حرارتی آستینیت کردن در دمای  $920^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵ ساعت و سپس رساندن به دمای  $750^{\circ}\text{C}$  و نگه داشتن در این دما به مدت ۵ ساعت - از محلول اچ استفاده نشده است.

با توجه به مشاهدات میکروسکوپی، مقدار گرافیت بیشتری در ریزساختار مشهود می باشد که بواسطه مرحله ثانویه جوانه زایی در این سیکل عملیات حرارتی است. تحقیقات نشان می دهد که با نگهداری نمونه های فولادی در درجه حرارت های بالا، امکان رسوب گرافیت به عنوان یک فاز تعادلی تر در قیاس با فاز سمنتیت در محل های مناسب می شود. نمونه ای از این موقعیت های مطلوب، گرافیت های تشکیل شده در مرحله اول عملیات حرارتی می باشند.

#### ۴ - بحث

عملیات انحلالی و آستینیت شدن در فولادهای هایپر یوکتوئید و با ساختار اولیه سمنتیتی-پرلیتی در چندین مرحله صورت می گیرد. نخست دگرگونی پرلیت به آستینیت می باشد. جوانه زایی دانه های آستینیت در ریزساختار قبلی کمی بالاتر از درجه حرارت یوکتوئید انجام می شود و عموماً فصل مشترک بین



کولونی های پرليت مناسبترين محل ها جهت جوانه زایی آستنيت می باشند. انحلال پرليت معمولاً خیلی سريع می باشد که بواسطه فواصل ديفیوزیونی نسبتاً کوچک کربن در حد فاصل لایه ای پرليت می باشد. مرحله دوم دگرگونی سمنتيت پری یوکتوئيد به آستنيت می باشد که در درجه حرارت های بالاتری در قیاس با سمنتيت ثانويه شکل گرفته و بنابراین شرایط پایداری را در قیاس با پرليت برخوردار می باشد. این دگرگونی صرفاً در درجه حرارت های بالاتر از خط  $(\gamma + \text{cem})/\gamma$  در دیاگرام فازی آهن - کربن اتفاق می افتد [۱۲].

تشکیل آستنيت همراه با یکنواخت تر شدن آن می باشد که با توزیع کربن همراه است و نهایتاً رشد دانه ها را شاهد می باشیم که یک پدیده غالب در درجه حرارت های بالا و یا برای زمان های طولانی آستنيتيه کردن می باشد [۱۳]. و اما در زمان های طولانی تر و در عملیات حرارتی همدم، شرایط به نفع تشکیل گرافيت تغییر کرده و این فاز پایداری در قیاس با سمنتيت تشکیل می شود و به عبارتی این فاز که ناشی از تجزیه سمنتيت و به ویژه در حضور عناصر قوی گرافيت زایی همانند Al و Si می باشد، در شرایط تعادلی تر مشاهده می شود. با انجام عملیات حرارتی ثانويه که در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  انجام شده است، به جای فاز سمنتيت، فاز گرافيت ظاهر شده و با افزایش زمان نگهداری شاهد رشد بیشتر این نودول های گرافيت در زمینه می باشیم [۱۱].

گرافيت زایی در فولادها نیازمند زمان های بسیار طولانی است [۱۴] که باعث کاهش تمایل به تولید این نوع از فولادها از نظر اقتصادی می شود. بهر حال بر اساس تحقیقات محدود که اخیراً انجام شده است، شاهد گرافيت زایی در فولادها و در زمان های بسیار کوتاهتری در مرحله ی بازپخت آن ها می باشیم. در همین ارتباط افزایش جوانه زایی گرافيت در روی ذرات غریبه [۱۵ و ۱۶] و یا کمک به ناپایداری کاربيدها که قفل کننده کربن هستند انجام می گیرد و معمولاً همراه با افزودن عنصر Si [۱۵، ۱۷ و ۱۸] و کاهش عناصر پایدارکننده کاربيد همانند Mn و Cr [۱۹ و ۲۰] می باشد. در همین ارتباط گروهی از محققین [۲۱] با افزودن Si و Al، امکان ناپایداری کاربيد آهن (سمنتيت) را فراهم کرده اند و حتی نشان داده شده است که این عناصر به عنوان ذراتی جهت جوانه زایی گرافيت نیز عمل می کنند. بر اساس این تحقیقات، در یک فولاد با کربن متوسط محتوی مقادیر بالای Si و Al، عمل گرافيت زایی و کامل شدن این فرایند صرفاً پس از آنیل کردن فقط ۲ تا ۴ ساعت در  $680^{\circ}\text{C}$  صورت گرفته است.

در این شرایط دو نوع نودول گرافيت قابل تشخیص می باشد که با توجه به بررسی های ریزساختاری آن ها می باشد. اولین نوع، نودول های گرافيتي هستند که نسبتاً از اندازه بزرگتری (با قطر حدود  $5\mu\text{m}$ ) برخوردار بوده، مورفولوژی بی قاعده ای دارند و در اولین مراحل بازپخت تشکیل شده اند. برای چنین نودول هایی اثبات گردیده است که مکانیزم جوانه زایی شامل رسوب کربن بر روی ذرات قبلی می

باشد که این ذرات، اکسیدهای غنی از آلومینیوم و یا نیتrideها می باشند. بی قاعدگی این ذرات احتمالا بواسطه مراکز جوانه زایی چندتایی در سطح ذرات است که بستگی به مورفولوژی و ساختار ذرات دارد یا به عبارتی میزان تطابق سطوح ذرات با سطوح بسل گرافیت در شبکه کریستالی آن ها در میزان کروی بودن نودول ها موثر می باشد.

نوع دوم گرافیت ها از کروی بودن بیشتری برخوردار هستند و مورفولوژی با قاعده تری را دارا هستند ولی اندازه آن ها کوچکتر و دارای قطری حدود ۲ تا ۳ میکرومتر می باشند و چنین به نظر می رسد که در هسته آن ها از ذرات خارجی و بیگانه خبری نمی باشد. تحقیقات دقیقتر در این زمینه که به کمک میکروسکوپ های الکترونی عبوری (TEM) انجام شده است، نشان می دهد که نواحی مرکزی این ذرات که نواحی نسبتا کوچکی هستند از نظم کریستالی کمتری در قیاس با لایه های خارجی تر برخوردار هستند [۲۱]. در هر صورت این دو نوع از نودول های گرافیت مشاهده شده دارای اندازه ی به مراتب کوچکتری در قیاس با گرافیت های موجود در ریزساختار معمول چدن ها می باشند [۵، ۱۱ و ۲۲]. ضمنا با توجه به گستردگی کار و لزوم مطالعات جامعتر نیاز به تعریف پروژه های متعدد دیگری در همین راستا می باشد. از جمله این پژوهش ها، بررسی قابلیت های ماشینکاری و تعیین مقاومت سایشی و خواص مکانیکی این خانواده جدید از آلیاژهای فولادی می باشد.

## ۵ - نتیجه گیری

- هدف از مرحله نخستین عملیات حرارتی گرافیت زایی در این نوع از فولاد، بدست آوردن ساختاری یکنواخت تر و فراهم سازی شرایط لازم جهت گرافیت زایی است. در این ارتباط از دماهای متفاوتی جهت عملیات انحلالی استفاده شد که بهینه ترین فرآیند، دمای  $920^{\circ}\text{C}$  و به مدت ۵ ساعت می باشد.
- حضور درصد بالای گرافیت و به ویژه در سطح قطعات نشاندهنده شرایط مناسب عملیات حرارتی جهت راسب شدن کربن فوق اشباع در فاز اولیه و به شکل کره های گرافیت است.
- نکته قابل توجه یکنواختی و توزیع نسبتا خوب این فاز در زمینه است و از تراکم قابل قبولی نیز برخوردار می باشد.
- از حدود شصت سال پیش، عموما پذیرفته شده است که در طول انجماد چدن، گرافیت مستقیما از مذاب شکل گرفته و نتیجه تجزیه کاربرد های از پیش شکل گرفته و یا آستنیت فوق اشباع نمی باشد. بهر حال، باید توجه داشت که تحت شرایط ویژه گرافیت می تواند توسط چنین

مکانیزم هایی شکل بگیرد که در گرافیت زایی چدنهای مالیل و فولادهای پر کربن اثبات شده است.

➤ در تصویر ۴ با ادامه یافتن فرآیند عملیات حرارتی در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  تغییراتی در شکل، اندازه و نحوه توزیع گرافیت ها ایجاد می شود. به نظر می رسد مقدار بیشتری از کربن فوق اشباع فرصت راسب شدن را پیدا کرده اند و ترجیحا این کربن ها بر روی گرافیت های قبلی راسب شده اند.

➤ پایین بودن در صد کربن در چنین آلیاژهایی عامل اصلی در محدودیت تشکیل گرافیت و تغییرات جدی در ریزساختار می باشد و عملاً "بیشترین این تحولات در دمای  $920^{\circ}\text{C}$  و در مرحله عملیات حرارتی آستنیت کردن و همراه با تشکیل آستنیت می باشد.

➤ اگرچه اختلاف در ترکیب شیمیایی فولاد می تواند نقش مهمی در تشکیل گرافیت داشته باشد، مجموعه نتایج بدست آمده بیانگر بهره گیری از روش های خاص عملیات حرارتی جهت تشکیل گرافیت یا کربن آزاد در ریزساختار فولادها می باشد. تفاوت در ترکیب شیمیایی آلیاژها اگرچه می تواند موثر باشد ولی عامل محدود کننده در این زمینه نمی باشد.

➤ گرافیت زایی ترجیحا در دمای  $920^{\circ}\text{C}$  انجام گرفته و مقدار قابل قبولی گرافیت و به ویژه در سطح نمونه ها بوجود آمده است. حضور در صد بالای گرافیت در سطح باعث افزایش مقاومت سایشی و کار آیی مناسبی از قطعات پس از تولید و در مرحله سرویس خواهد بود.

➤ نتایج نشان می دهد که با نفوذ در عمق نمونه، از تعداد گرافیت ها کاسته می شود و پژوهش های انجام شده توسط سایر محققین نیز در این زمینه همسویی خوبی را نشان می دهد که در بخش های قبلی به آن اشاره گردید.

➤ از مجموعه نتایج این آزمایشات دسترسی به نوع خاصی از فولاد ها با درصد معقولی از گرافیت یا کربن آزاد می باشد. نکته قابل توجه امکان گرافیت زایی در فولادها با کنترل فرآیند صحیح عملیات حرارتی می باشد.

## ۶ - تشکر و قدردانی

بدینوسیله از همکاری آقایان: محسن خمري، حمیدرضا نورزایی و فریدون اوکاتی صادق و سرکار خانم فائقه طباطبایی به پاس تلاش های موثر آزمایشگاهی تشکر می گردد. اعتبار مربوط به انجام این تحقیق توسط معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان تامین گردیده است که بدینوسیله تقدیر می گردد.

- [1] H.T. Angus, Cast Iron, 1978, Physical and Engineering Properties, Butterworths & Co (Publishers) Ltd., London.
- [2] R. Elliott, Cast Iron Technology, 1988, Butterworths & Co. (Publishers) Ltd., London.
- [3] I.C.H. Hughes, Ductile Iron, Metals Handbook, Casting, 1988, BCIRA International Center for Cast Metals Technology, Great Britain, Ninth edition, Vol. 15, 647-666.
- [4] P.R. Beely, Foundry Technology, 1972, Butterworths Scientific, Great Britain, The Camelot Press Ltd., Southampton.
- [5] A.R. Kiani-Rashid, and D.V. Edmonds, 'Graphite Phase Formation in Al-Alloyed Ductile Irons', International Journal of Engineering, No.3, **15**, 2002, 261 – 272.
- [6] Takashi. Iwamoto, Toshiyuki. Hoshino, Akihiro, Matsuzaki and Keniti. Amano, 'Effect of Boron and Nitrogen on Graphitisation and Hardenability in 0.53%C Steels', ISIJ International, Japan, Vol. 42, Supplement, 2002, S77-S81.
- [7] M.J. Olney and G.C. Smith, 'Surface Effects Occurring During the Heating and Cooling of Plain Carbon Steels', Journal of The iron and Steel institute, 1959, 107-116.
- [8] Phase Diagram for Iron – Carbon System, Hagane no Netsushoti, ISLI, 1969.
- [9] G.R. Speich, 'Surface Graphitization of a Hypereutectoid Iron-Carbon Alloy', Transactions of the metallurgical society of AIME, vol.221, 1961, 417-419.
- [10] F.J. Derbyshire, A.E.B. Presland and D.L. Trimm, 'Graphite Formation by the Dissolution-precipitation of Carbon in Cobalt - Nickel and Iron', Carbon, vol.13, 1975, 111-113.
- [11] علیرضا کیانی رشید، محسن خمیری، حمیدرضا نورزایی، سیده فائقه طباطبایی، 'گرافیت زایی در فولادها، طرح پژوهشی، معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان، اردیبهشت ۱۳۸۴.
- [12] A. Jacot, and M. Rappaz, 'A Combined Model for the Description of Austenitization, Homogenization and Grain Growth in Hypoeutectoid Fe-C Steels During Heating', Acta Metallurgica, vol. 47, No. 5, 1999, 1645-1651.
- [13] T. Akbay, R.C. Reed and C. Atkinson, Acta metal., **43**, 1995, 2013-2031.
- [14] C.R. Austin and M.C. Fetzner, 'Factors Controlling Graphitization of Carbon Steels at Subcritical Temperatures', Trans. of the A.S.M. **35**, 1945. 485.
- [15] T. Mega, R. Morimoto and J. Shimomura, , Surface Interface Analysis (UK) 24, 1990, 375.
- [16] Y. Kawahata, M. Morita, F. Togashi and T. Tohno, CAMP-Iron Steel Inst Jpn 3, 1990, 754.
- [17] S. Katayama, and M.Toda, 'Machinability of medium carbon graphitic steel' J. Material Processing Technology **62**, 1996. 358-362.
- [18] T. Iwamoto, T. Hoshino, K. Amano and Y. Nakano, Van Tyne, C.J., 'Fundamental and Applications of Microalloying Forging Steels', TMS/Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale (PA), 1996, 277.
- [19] W.C. Leslie, and G.C. Rauch, Precipitation of carbides in low-carbon Fe-Al-C alloys, Metallurgical and Materials Transactions A , 1978, 343.
- [20] H.J. Goldschmidt, Intersitital alloys, 1967, Butterworths, London, 117.
- [21] K. He, H.R.Daniels, A. Brown, R. Brydson, and D.V. Edmonds, 'An Electron Microscopic Study of Spheroidal Graphite Nodules Formed in a Medium Carbon Steel by Annealing', Proceedings of 15<sup>th</sup> International congress on electron

Microscopy, Durban, South Africa, Physics, Materials and Earth Sciences, Microscopy Society of Southern Africa, vol. 1., 2002, 667-8.

[۲۲] علیرضا کیانی رشید، 'گرافیت زایی در فولادها'، پیام فولاد: فصلنامه علمی - خبری انجمن آهن و فولاد ایران، شماره ۲۰، پاییز ۱۳۸۴، صفحات ۳۱-۲۴.

## ۸ - جداول و اشکال

### ۸-۱ - جداول

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد (درصد وزنی)

جدول ۲. سختی نمونه های فولاد قبل و بعد از عملیات حرارتی

### ۸-۲ - اشکال

- شکل ۱. سیکل عملیات حرارتی گرافیت زایی در فولاد آلیاژی پرکربن. فولاد در دمای  $920^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵ ساعت آستنیته شده و مرحله دوم عملیات حرارتی به شکل تکدما در درجه حرارت  $750^{\circ}\text{C}$  و تا سقف ۵ ساعت انجام شده است.
- شکل ۲. ریز ساختار نمونه فولادی پرکربن ( $1/05$  در صد کربن) قبل از عملیات حرارتی - از محلول اچ استفاده نشده است و لکه های سیاه بواسطه حضور نواحی اکسیدی می باشد.
- شکل ۳. ریز ساختار نمونه فولادی پرکربن ( $1/05$  در صد کربن) بعد از عملیات حرارتی آستنیته کردن در دمای  $920^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵ ساعت و سرد کردن در هوا - از محلول اچ استفاده نشده است.
- شکل ۴. ریز ساختار نمونه فولادی پرکربن ( $1/05$  در صد کربن) بعد از عملیات حرارتی آستنیته کردن در دمای  $920^{\circ}\text{C}$  به مدت ۵ ساعت و سپس رساندن به دمای  $750^{\circ}\text{C}$  و نگه داشتن در این دما به مدت ۵ ساعت - از محلول اچ استفاده نشده است.

## The Influence of Heat treatment Conditions on Graphite Phase Formation of High carbon Alloyed Steel

A.R. Kiani-Rashid

[fkiana@yahoo.com](mailto:fkiana@yahoo.com) or [kianirashid@gmail.com](mailto:kianirashid@gmail.com)

## Abstract

Effect of heat treatment on the graphitisation has been studied in alloyed and high carbon steel. Graphite phase formation in steels improves machining ability, strength after quenching and tempering and cold forging. This kind of steels is more suitable for applications that needs toughness and wear resistance. Graphite morphology in a near nodular form of optimum size and distribution was found to be most effective in ferrous alloys. Heat treatment comprised holding at 920°C for 5hr followed by isothermal heat treatment at 750°C for different holding times up to 5hr. It was found that the amount of graphite showed increase with increasing isothermal heat treatment. The key feature of the present study is that, despite its fundamental significance, it has a well-focused application potential.

**Keywords:** Graphitisation, Steel, Microstructure, Heat treatment, Austenite.

---

1) Asistant of Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, IRAN, Tel. No. 0098 511 7683199, Fax. No. 0098 511 8763305, P. O. Box No 91775-1111  
[fkiana@yahoo.com](mailto:fkiana@yahoo.com) or [kianirashid@gmail.com](mailto:kianirashid@gmail.com)