

# بررسی اثر عملیات حرارتی بعد از کربن دهی سطحی بر

## رفتار خستگی فولاد CE2

حسن شریفی<sup>۱</sup>، مهدی امیدی<sup>۲</sup>، حسن علی طیبیان<sup>۳</sup>

۱ و ۲- مری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

Sharifi\_h@iust.ac.ir

### چکیده

نوع عملیات حرارتی پس از انجام عملیات کربن دهی، می تواند تأثیر به سزایی بر رفتار خستگی فولاد CE2 داشته باشد. در این پژوهش، خواص مکانیکی فولاد CE2 با انجام دو فرایند عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم و کوئنچ یک مرحله ای پس از کربن دهی بررسی شد. نتایج نشان می دهد که با استفاده از عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله ای، خصوصیات مکانیکی فولاد مذکور از قبیل سختی و استحکام کششی نسبت به کوئنچ مستقیم افزایش یافت. سطح شکست نمونه های خستگی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه قرار گرفت. مطالعه سطح شکست نمونه های خسته شده نشان داد که در نمونه های حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم، گسیختگی به صورت ترد بیش از ۵۰ درصد مقطع شکست را دربر گرفته است در صورتی که در نمونه های حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله ای گسیختگی به صورت ترد در کمتر از ۲۰ درصد سطح مقطع شکست را دربر دارد.

### واژه های کلیدی:

خستگی، کربن دهی سطحی، عملیات حرارتی

### ۱- مقدمه

می شود، لذا کنترل کردن این مقوله توسط پارامترهای بهینه سازی بسیار حائز اهمیت است [۱]. عملیات کربوراسیون سطحی در محدوده حرارتی ۹۰۰ تا ۱۰۴۰ درجه سانتیگراد به در حالت جامد انجام می شود. نحوه عملیات به این صورت است که آلیاژ در محیط غنی از کربن (مایع، جامد، گاز) تا دمای معینی گرم شده و مدتی در این دما نگه داشته می شود. تحت این شرایط کربن اتمی به داخل آلیاژ نفوذ می کند و به این ترتیب لایه پر کربن به دست می آید [۲]. برای رسیدن به سختی مناسب، نمونه وارد محیط خنک کننده مناسب می گردد.

هدف اصلی از کربن دهی سطحی به دست آوردن یک سطح سخت و مقاوم در برابر سایش می باشد که با اشباع کردن سطح قطعه از کربن و سپس سرد کردن سریع حاصل می شود. تحقیقات نشان می دهد یکی از تأثیرات بسیار مهم عملیات کربورایزینگ تأثیر بر حد خستگی فولاد می باشد. از آنجائی که بیش از ۹۰ درصد از کار افتادگی ها و شکست قطعات و یا سازه ها حین کار مربوط به خستگی و شکست ناشی از آن

دمای معین تجاوز نمی‌کند. انتخاب مقادیر کربن سطح مورد نظر بستگی به ترکیب شیمیایی آلیاژ دارد، زیرا به‌طور کلی افزایش مقدار کربن دمای یوتکتوئید و دمای  $M_s$  را در فولادهای هیپوئوتکتوئید کاهش می‌دهد [۳].

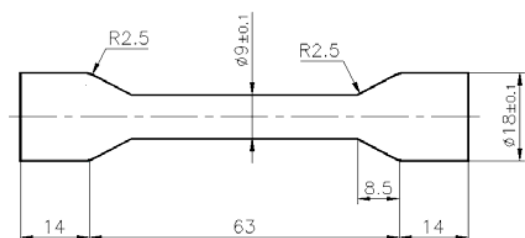
استحکام خستگی به شدت تحت تأثیر دو عامل ریزساختار سطح و تنش‌های پس ماند سطح است، از طرف دیگر خود این دو عامل نیز تحت تأثیر مقدار کربن سطح و روش سرد کردن هستند [۴].

افزایش عمق کربن‌دهی به افزایش عمق اکسایش درونی و افزایش مقدار آستنیت و کاربیدهای آزاد باقی مانده منجر می‌شود که هر یک از این عوامل بالا اثر معکوسی بر توزیع تنش پس ماند دارند. زیاد شدن عمق کربن‌دهی از یک حد معین، مقاومت در برابر خردشدگی سطح را بهبود می‌بخشد ولی این امر افزایش مقاومت در برابر خستگی خمشی را تضمین نمی‌کند. نوع کاربیدهای شبکه‌ای باعث افزایش مقدار آستنیت باقیمانده در ریزساختار می‌شود و حد خستگی خمشی را کاهش می‌دهد. در شرایطی که کاربیدهای شبکه‌ای به کاربیدهای کرووی شکل تبدیل شود، با توجه به عملیات حرارتی مناسب حد خستگی خمشی افزایش می‌یابد. معمولاً طی فرآیند کربن‌دهی، اکسیژن به داخل فولاد نفوذ می‌کند و با عناصر آلیاژی مثل Cr، Ni و Mg اکسید می‌شوند. در این شرایط سختی‌پذیری در پوسته شدیداً کاهش می‌یابد و به‌جای ساختار مارتنزیت، پرلیت در سطح شکل می‌گیرد و آستنیت باقی مانده در ساختار افزایش می‌یابد. با انجام اکسیداسیون و کاهش عناصر آلیاژی سطح دمای  $M_s$  بالا رفته و در یک منطقه نازکی از سطح با کاهش تنش‌های پس ماند فشاری روبرو می‌شویم، در نهایت افزایش مقدار آستنیت باقی مانده در سطح و کاهش تنش‌های پس ماند فشاری و تولیدات استحاله غیر مارتنزیتی، استحکام خستگی کاهش می‌یابد [۵].

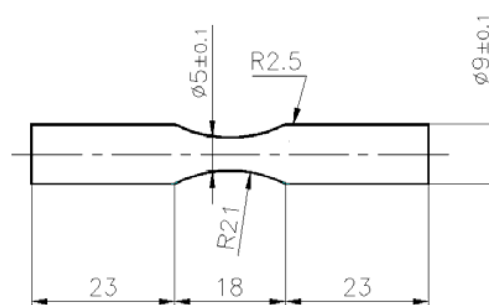
از معایب این فرایند می‌توان به اعوجاج قطعه و ایجاد آستنیت باقی مانده بعد از سرد کردن نمونه و ایجاد ترک اشاره کرد. اگر قطعه کربن‌دهی شده حساس به ترک خوردگی و حاوی زوایای تیز باشد، بعد از اتمام عملیات کربن‌دهی، ابتدا قطعه را در هوا سرد می‌کنند (عملیات حرارتی نرماله) بنابراین اندازه دانه‌های رشد کرده در عملیات کربن‌دهی، ریزتر و یکنواخت‌تر می‌شوند. پس از آن مطابق با کربن سطح، دمای آستنیت را انتخاب کرده و دوباره آن را گرم کرده و در محیط مناسب سرد می‌کنیم [۲].

گرچه هر کدام از روش‌های کربن‌دهی دارای مشخصات ویژه‌ای می‌باشند، بنابراین نتایج حاصل از آن روش ممکن است با نتایج حاصل از روش‌های دیگر متفاوت باشد، اما بدون توجه به روش مورد استفاده، کربن‌دهی همیشه توسط یک اتمسفرگازی شامل فاز منواکسید کربن (CO) انجام می‌گیرد. میزان کربن جذب شده در آستنیت عمدتاً توسط سرعت نفوذ کربن از سطح فولاد به داخل آستنیت و دیگری واکنش  $2CO(g) \rightarrow CO_2(g) + C$  کنترل می‌شود. در این رابطه C کربن اتمی است که توسط آستنیت جذب سطح می‌شود. در حالت تعادل هر نسبتی از CO به  $CO_2$  دارای یک پتانسیل کربن مشخصی بوده، که در نتیجه کربن آستنیت را در حد ثابت و مشخصی حفظ می‌کند [۳].

عوامل مؤثر بر کربن‌دهی سطحی شامل دمای کربن‌دهی، زمان کربن‌دهی و فشار جزئی  $CO/CO_2$  محیط می‌باشد. به‌طور تقریبی برای هر ۲۰ درجه سانتیگراد افزایش دما، ضریب نفوذ تقریباً ۲ برابر می‌شود. تأثیر مستقیم زمان کربن‌دهی بر عمق نفوذ کربن است. زمان معمولی برای کربن‌دهی سطحی چند ساعت می‌باشد و خیلی به ندرت از این مدت تجاوز می‌کند. هر قدر زمان کربن‌دهی سطحی طولانی باشد، غلظت کربن در قشر سطحی یک فولاد کربنی از حد انحلال کربن در آستنیت در آن



شکل (۲): ابعاد نمونه کشش بر حسب میلیمتر مطابق با استاندارد ASTM A370 - B.



شکل (۱): ابعاد نمونه‌های خستگی به میلیمتر مطابق با استاندارد ASTM E - 466.

در فرایند دوم عملیات حرارتی، نمونه‌ها در دمای ۹۲۰ درجه سانتیگراد و زمان ۹۰ دقیقه کربوره و در هوای محیط سرد شدند. مجدداً نمونه‌ها تا دمای ۷۸۰ درجه سانتیگراد گرم شده و به مدت ۳۰ دقیقه نگهداری و پس از آن در محیط روغن سرد شدند. عملیات حرارتی تمپر در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۶۰ دقیقه انجام شد. به این فرایند از این پس کوئنچ یک مرحله‌ای اطلاق می‌گردد. نمونه‌های آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM A370 - B تهیه شد، که شمایی از اندازه‌های آن در شکل (۲) قابل مشاهده می‌باشد.

آزمون کشش با سرعت ۰/۲ میلیمتر بر دقیقه و در دمای محیط در مورد نمونه‌های عملیات حرارتی شده و عملیات حرارتی نشده انجام شد. سطح نمونه‌های متالوگرافی توسط سنباده‌های شماره ۱۲۰ تا ۲۵۰۰ و پس از آن به وسیله پودر آلومینا پرداخت گردید.

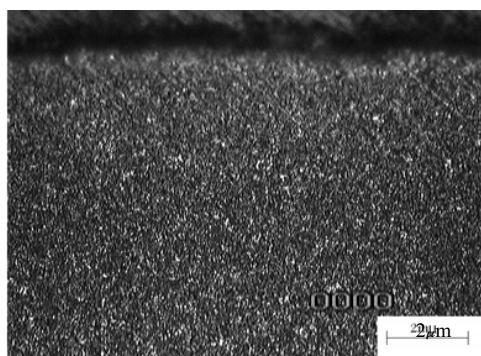
سطوح آماده شده توسط محلول اچ نایتال ۲ درصد حکاکی شدند. از میکروسکوپ نوری جهت تهیه تصاویر نمونه‌های مختلف عملیات حرارتی شده و عملیات حرارتی با بزرگنمایی مختلف استفاده شد.

## ۲- روش تحقیق

نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق مطابق با استاندارد DIN ۱/۷۱۳۱ تهیه شد و ترکیب شیمیایی آن به وسیله دستگاه کوانتومتر تأیید و در جدول (۱) ارائه گردید. ابتدا جهت سهولت در امر ماشین کاری، نمونه را تحت عملیات حرارتی تمپر زیر دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت قرار داده، سپس عملیات ماشین کاری با بیشترین دقت و کمترین سرعت در جهت اعمال کمترین کار سختی در سطح نمونه آزمایش انجام پذیرفت، شمایی از اندازه‌های آن در شکل (۱) قابل مشاهده می‌باشد به منظور دستیابی به کیفیت مناسب سطح نمونه‌های خستگی، سطح نمونه‌های تراشیده شده به وسیله کاغذ سنباده از شماره ۶۰۰ تا ۲۵۰۰، مطابق با استاندارد ISO/373 پرداخت شد. دو فرایند عملیات حرارتی برای نمونه‌های فولادی اتخاذ گردید. فرایند اول شامل کربوره کردن در دمای ۹۲۰ درجه سانتیگراد و زمان ۹۰ دقیقه و سپس کاهش دما تا ۸۷۰ درجه سانتیگراد و نگهداری به مدت ۱۵ دقیقه می‌باشد. پس از آن نمونه‌ها از دمای ۷۸۰ درجه سانتیگراد تا ۲۳ درجه سانتیگراد در محیط روغن سرد شد. عملیات حرارتی تمپر در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و زمان ۶۰ دقیقه انجام شد. این فرایند از این پس کوئنچ مستقیم اطلاق می‌گردد.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد مورد مطالعه.

ترکیب شیمیایی						
عنصر	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr
cE <sub>2</sub>	۰/۱۷۶	۰/۳۵۳	۱/۱۰۹	۰/۰۱۴	۰/۰۰۹	۱/۰۱۳



شکل (۵): ریزساختار قسمت سخت شده نمونه حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم.



شکل (۳): ریز ساختار فولاد CE2 قبل از عملیات حرارتی.



شکل (۴): ریزساختار فولاد CE2 قبل از عملیات حرارتی.

فریت جهت گیری خاصی ندارند و به صورت نامنظم زمینه را در بر گرفته است. از آنجائیکه فولاد مذکور دارای مقادیر ۱ تا ۱/۳ درصد منگنز است، لذا حضور ساختار پرلیتی در زمینه فریت توجیه می‌یابد.

شکل شماره (۵) بیانگر حضور ساختارهای مارتنزیتی در سطح نمونه‌های حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم می‌باشد.

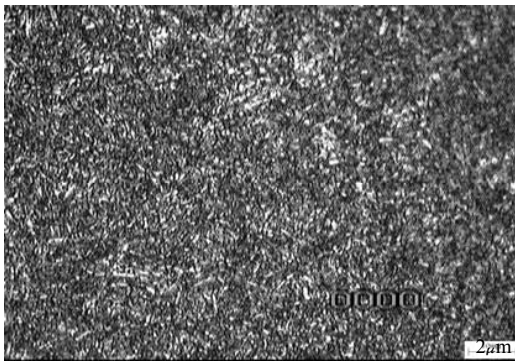
تصویر شماره (۶) ریزساختار مناطق سخت شده سطح و عمق نمونه‌های کربوره شده را نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از سطح فاز آستنیت باقیمانده افزایش می‌یابد. حضور آستنیت باقیمانده به صورت مناطق سفید رنگ در شکل شماره (۷) با وضوح بیشتری قابل مشاهده است. شکل (۸) ریزساختار سطح لایه سخت شده حاوی ساختارهای مارتنزیتی حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای را نشان می‌دهد که در مقایسه با نمونه‌های حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم شکل (۵) ملاحظه می‌گردد

سطح شکست نمونه‌های آزمایش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی برای تعیین محل اشاعه ترک در نمونه‌های خسته شده مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش سختی سنجی در مقیاس ماکرو و به روش برینل با نیروی اعمالی ۶۲/۵ کیلوگرم انجام شد.

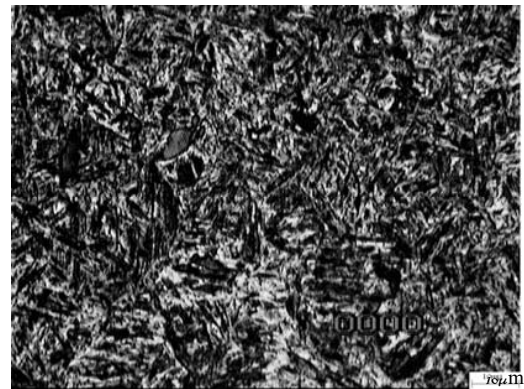
نمونه‌های آزمون خستگی طبق استاندارد ASTM E - 466 تهیه شد، که شمایی از اندازه‌های آن در شکل (۲) قابل مشاهده می‌باشد. آزمون خستگی از نوع خمشی دورانی با تعداد ۲۸۵۰ دور بر دقیقه در دمای محیط در مورد نمونه‌های عملیات حرارتی شده و عملیات حرارتی نشده انجام شد.

### ۳- نتایج و مباحث

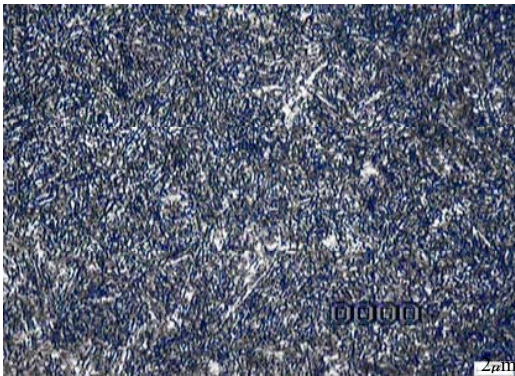
در شکل‌های (۳) و (۴) ریزساختار نمونه عملیات حرارتی نشده ارائه شده است. فاز روشن فریت و ساختار تیره رنگ پرلیت را نشان می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌شود که دانه‌های



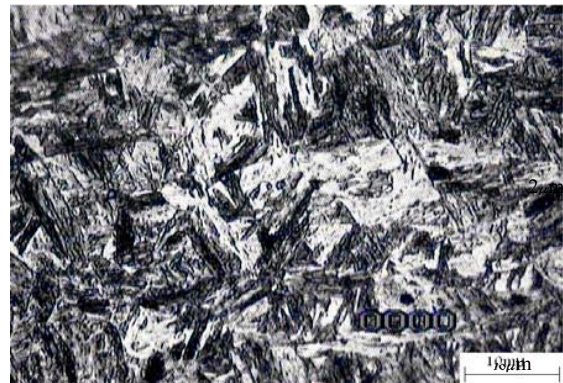
شکل (۹): ریزساختار قسمت سطح لایه سخت شده حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای.



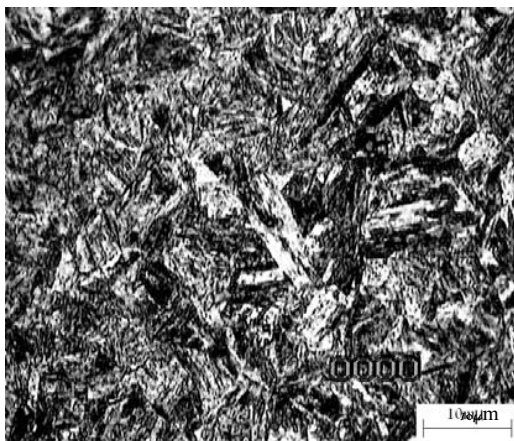
شکل (۶): ریزساختار فصل مشترک محدوده سخت شده و لایه‌های زیرین آن حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم.



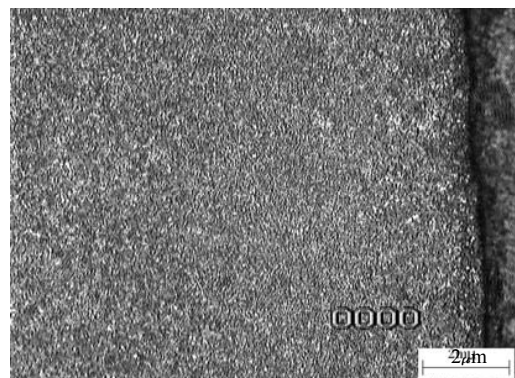
شکل (۱۰): ریزساختار فصل مشترک لایه سخت شده و لایه‌های زیرین آن حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای.



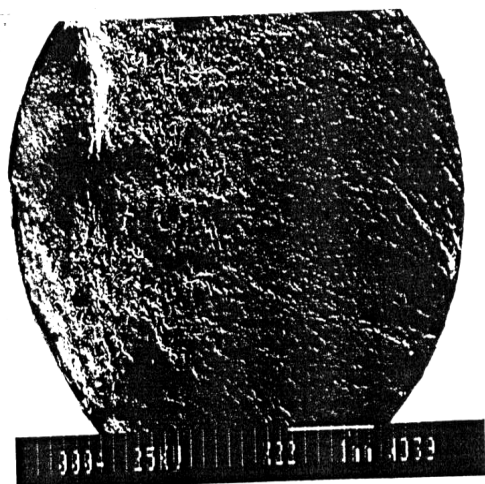
شکل (۷): ریزساختار مغز نمونه سخت شده حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم.



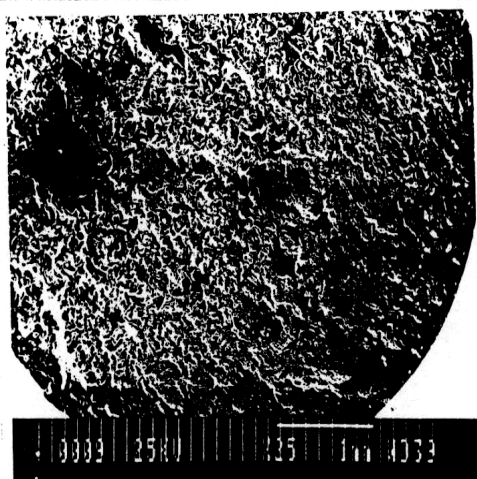
شکل (۱۱): ریزساختار مغز نمونه سخت شده حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای.



شکل (۸): ریزساختار قسمت سطح لایه سخت شده حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای.

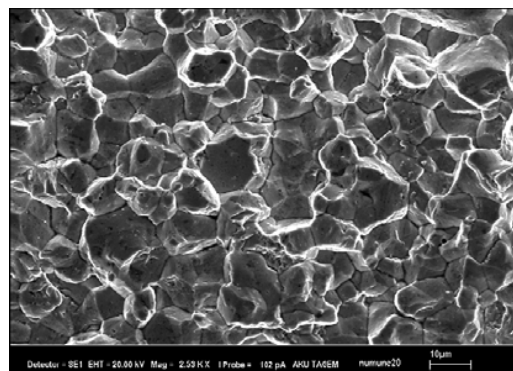


شکل (۱۴): مقطع شکست نمونه عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی.

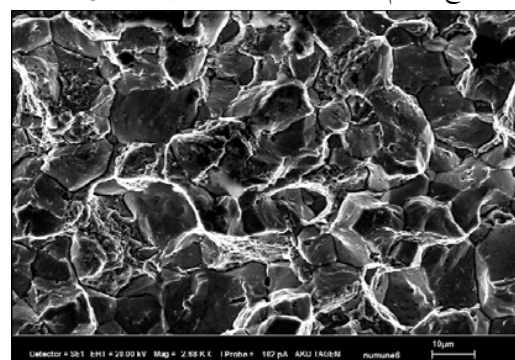


شکل (۱۵): مقطع شکست نمونه عملیات حرارتی شده کوئنچ یک مرحله‌ای توسط میکروسکوپ الکترونی.

بین دانه‌ای در پدیده‌های خستگی می‌شود در حالیکه عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای باعث ایجاد سطح مقطع شکست نرم در نمونه‌های خسته شده می‌شود. توپوگرافی شکست در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نیز بیانگر شکست نرم در نمونه‌های عملیات حرارتی شده به روش کوئنچ یک مرحله‌ای و شکست ترد در نمونه‌های عملیات حرارتی شده به روش کوئنچ مستقیم می‌باشد.



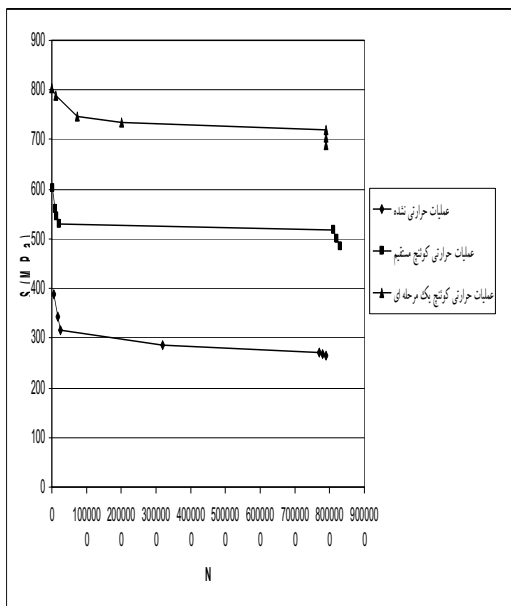
شکل (۱۲): مقطع شکست نمونه خستگی حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی.



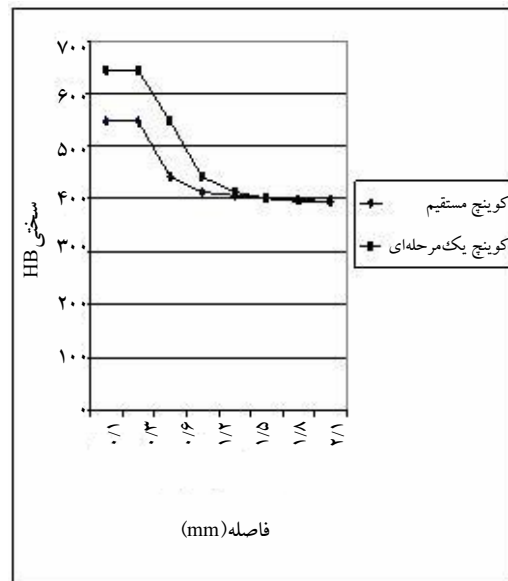
شکل (۱۳): مقطع شکست نمونه خستگی حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی.

که نمونه‌های حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای حاوی مارتنزیت ریزتر می‌باشد، بنابراین با افزایش سختی، در این نمونه‌ها روبرو هستیم. با توجه به شکل (۹) با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر بیانگر مارتنزیت بسیار یکنواخت‌تر نسبت به ساختار سطح نمونه حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم است. تصویر شماره (۱۰) در مقایسه با شکل (۶) حضور مارتنزیت ریزتر و کاهش آستنیت باقیمانده را در لایه‌های زیرین سطح کربوره شده نشان می‌دهد. شکل (۱۱) در مقایسه با شکل (۷) نیز بیانگر همگونی در ریزساختار عمق نمونه‌های عملیات حرارتی شده می‌باشد.

از مقایسه تصاویر شماره (۱۲) و (۱۳) می‌توان به این نتیجه رسید که عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم موجب ایجاد شکست



شکل (۱۷): نمودارهای S-N در حالت های مختلف عملیات حرارتی.



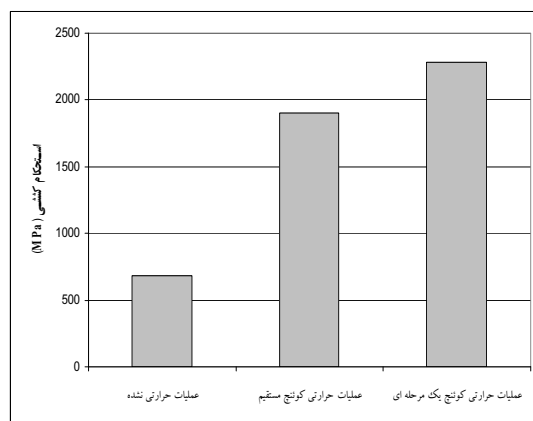
شکل (۱۶): نمودار تغییرات سختی با افزایش فاصله از سطح در نمونه های به دست آمده از عملیات حرارتی.

کاهش استحکام خستگی فولاد کربوره شده می شود. با انجام عملیات کربورایزینگ بروی فولاد مذکور، حد خستگی افزایش می یابد، به عبارتی همان گونه که در شکل (۱۸) مشخص است، با اعمال عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم بروی نمونه کربوره شده پس از کربن دهی، حد خستگی فولاد حدود ۱۵ درصد نسبت به نمونه های عملیات حرارتی نشده افزایش یافته است.

با انجام عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله ای استحکام خستگی حدود ۳۰ درصد نسبت به نمونه های عملیات حرارتی نشده، افزایش یافته است. شکل (۱۹) استحکام کششی نمونه های مختلف را با یکدیگر مقایسه می کند. نمونه های عملیات حرارتی نشده، حاوی فاز پرلایت در زمینه فریت دارای کمترین استحکام کششی می باشد. علت عمده اختلاف در استحکام کششی نمونه های عملیات حرارتی شده حضور آستنیت باقیمانده بیشتر در نمونه های حاصل از عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم می باشد.

با توجه به نمودارهای شکل (۱۶) می توان نتیجه گرفت که تغییر سختی از عمق به سطح، مربوط به گونه های متفاوت ساختارهای مارتنزیتی و پایداری فازهای تعادلی در عمق نمونه ها می باشد. میزان سختی یکسان در عمق نمونه ها به علت همگونی فازهای تعادلی می باشد. تفاوت سختی سطح در بین نمونه های عملیات حرارتی شده مربوط به توزیع متفاوت ساختارهای مارتنزیتی ناشی از نوع عملیات حرارتی و حضور فاز آستنیت می باشد، اما سختی اندک نمونه های عملیات حرارتی نشده مربوط به حضور فازهای تعادلی فریت و پرلایت می باشد.

با توجه شکل (۱۷) مشاهده می شود که در تنش های محدوده کم، فولاد به سوی شکست خستگی سیر نمی کند و حداقل تنش به کار گرفته شده در حین شکست، مطابق با حد خستگی تعریف شده نیست. همانگونه که ملاحظه می شود در نمونه های فولادی کربوره شده که به روش دوم عملیات حرارتی شده اند، بیشترین حد خستگی دیده می شود. مطابق با آنچه گفته شد، افزایش مقدار آستنیت باقی مانده در ساختار، موجب



شکل (۱۹): مقایسه استحکام کششی نمونه‌ها در حالت‌های

مختلف عملیات حرارتی.

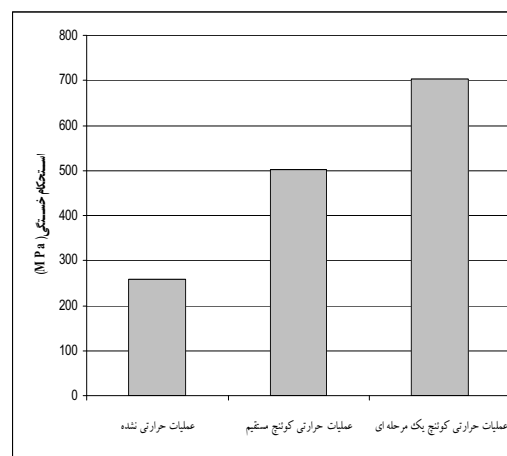
۶-انجام عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای پس از کربن‌دهی، موجب ۳۰ درصد افزایش استحکام خستگی فولاد کربوره CE2 نسبت به فولاد عملیات حرارتی نشده گشت، در صورتی که انجام عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم، موجب افزایش حدود ۱۵ درصد استحکام خستگی فولاد کربوره نسبت به فولاد عملیات حرارتی نشده می‌شود.

۷-انجام عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای، موجب حذف ترک‌ها و عیوب سطحی ناشی از سریع سرد شدن توسط سیکل کوئنچ مستقیم می‌گردد و نهایتاً از تأییدگی و تغییر ابعاد قطعات حین آبدهی جلوگیری می‌کند.

۸-اشاعه و محل ایجاد ترک خستگی سطح عموماً از بین دانه‌ها شروع شده و سپس با پیشروی به خارج از دانه رشد کرده و نهایتاً با ایجاد جاهای خالی پیوسته، شکست نهایی قطعه را در اثر خستگی ایجاد کرده است.

۹-بررسی سطوح نهایی شکست، در نمونه‌های عمیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای نشان می‌دهد که شکست عمدتاً از نوع شکست نرم بوده است.

۱۰-بررسی سطوح نهایی شکست، در نمونه‌های عمیات حرارتی کوئنچ مستقیم نشان می‌دهد که شکست عمدتاً از نوع شکست ترد بوده است.



شکل (۱۸): مقایسه استحکام خستگی نمونه‌ها در حالت‌های

مختلف عملیات حرارتی.

#### ۴- نتیجه گیری

۱-با انجام عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای، ساختار دانه اولیه فولاد یکنواخت‌تر و ریزتر گشته و بسته‌های مارتنزیتی کوچک‌تر به همراه آستنیت باقی مانده کمتر حاصل می‌گردد.

۲-با انجام عملیات کوئنچ یک مرحله‌ای بروی فولاد کربوره گازی CE2، سختی بیشتری نسبت به روش کوئنچ مستقیم حاصل می‌شود.

۳-با انجام عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای، ساختار دانه اولیه فولاد یکنواخت‌تر و ریزتر گشته و بسته‌های مارتنزیتی کوچک‌تر به همراه آستنیت باقی مانده کمتر حاصل می‌گردد.

۴-با انجام عملیات کوئنچ یک مرحله‌ای بروی فولاد کربوره گازی CE2، سختی بیشتری نسبت به روش کوئنچ مستقیم حاصل می‌شود.

۵-انجام عملیات حرارتی کوئنچ یک مرحله‌ای موجب افزایش استحکام کششی قابل ملاحظه نسبت به عملیات حرارتی کوئنچ مستقیم در فولاد کربوره شده، می‌شود.



## ۵- مراجع

- [1] Osman Asi, Ahmet Çetin Can, James Pineault and Mohammed Belassel, "The relationship between case depth and bending fatigue strength of gas carburized SAE 8620 steel", Surface & Coating Technology, No. 201, pp. 5979-5987, 2007.
- [2] Q.Y. Wang, C. Bathias, N. Kawagoishi and Q. Chen, "Effect of inclusion on subsurface crack initiation and gigacycle fatigue strength", International Journal of Fatigue, No.24, pp.1269-1274, 2002.
- [3] Masayuki Akita and Keiro Tokaji, "Effect of carburizing on notch fatigue behaviour in AISI 316 austenitic stainless steel", Surface & Coating Technology, No. 200, pp.6073-6078, 2006.
- [4] Ruchuan Yin, "Carburization of 310 stainless steel exposed at 800-1100 °C in 2%CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> gas mixture", Corrosion Science, No.47, pp.1896-1910, 2005.
- [5] E.Howard, B.Kubbs and J.Boyer, "Heat treater's guide", standard practices and procedures for steel, England, july 1981.