

تأثیر فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی بر ساختار و خواص مکانیکی فولاد AISI 4130

سعید حسین رضا، مجید طاووسی* و محمدرضا دهنوی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۲۷)

چکیده: در پژوهش حاضر تأثیر عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد AISI 4130 مورد بررسی قرار گرفته است. فرایند مورد بحث در دمای کوئنچ ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد و سه دمای پارتیشن‌بندی ۲۷۰، ۳۳۰ و ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد دنبال شد. مشخصه‌یابی ساختار فازی نمونه‌های حاصل توسط آزمون‌های پراش سنج پرتو ایکس و میکروسکوپی الکترونی روبشی انجام شد. خواص مکانیکی نمونه‌ها نیز توسط آزمون سختی سنجی و آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8 دنبال شد. نتایج حاصل نشان داد که با انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در فولاد AISI 4130 با حفظ درصد ازدیاد طول (در حدود ۹/۶ درصد)، استحکام کششی تا حدود ۱۴۵۰ مگاپاسکال قابل افزایش است. این مقدار افزایش، در حدود ۲۰ درصد بیشتر از استحکام حاصل از فرایند معمول کوئنچ و تمپر در مورد این فولاد است. شرایط بهینه عملیات کوئنچ و پارتیشن‌بندی، دمای پارتیشن‌بندی ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۲۰ دقیقه تعیین شد. انجام پارتیشن‌بندی در دماهای پایین‌تر قادر به پایدارسازی فاز آستنیت نبوده، پارتیشن‌بندی در دماهای بالاتر تجزیه آستنیت و رسوب کاربید را به دنبال دارد.

واژه‌های کلیدی: کوئنچ و پارتیشن‌بندی، فولاد AISI 4130، خواص مکانیکی، ریزساختار، آستنیت.

The Effect of Quenching and Partitioning (Q&P) Process on the Structural and Mechanical Properties of AISI 4130 Steel

S. Hossain Reza, M. Tavoosi* and M.R. Dehnavi

Department of Materials Engineering, Malek- Ashtar University of Technology, Shahin-Shahr, Isfahan, Iran

ABSTRACT

In this study, the effect of quenching and partitioning (Q&P) heat treatment on the structural and mechanical properties of AISI 4130 steel was investigated. The Q&P process was followed at a quench temperature of 270 °C and three different partitioning temperatures of 270, 330, and 380 °C. The phase and structural characterization of the prepared specimens were done using X-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), respectively.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Ma.tavoosi@gmail.com

The mechanical properties of the samples were also monitored by hardness and tensile test according to ASTM E8 standard. The results showed that the tensile strength can be increased up to 1450 MPa while maintaining the elongation percentage (about 9.6%) by performing the Q&P process on the AISI 4130 steel. This strength is about 20% greater than that of obtained by the usual quench and tempering process in this steel. Optimum partitioning temperature and time for AISI 4130 steel were determined to be 330 °C and 120 minutes, respectively. Partitioning at lower temperatures could not stabilize the austenite phase, while partitioning at higher temperatures caused the decomposition of the austenite phase and carbide precipitation.

Keywords: Quenching and partitioning, AISI 4130 steel, Mechanical properties, Microstructure, Austenite.

۱- مقدمه

برای حصول خواص مکانیکی مورد نظر در فولادها به‌طور معمول از عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر استفاده می‌شود که البته به دلیل نوع ریزساختار مارتنزیتی حاصل، افزایش بیشتر استحکام منجر به کاهش چقرمگی می‌شود. در این رابطه همواره تلاش بر این بوده تا با ابداع فولادهای نوین، روش‌های جدید عملیات حرارتی و حصول ریزساختارهای چند فاز، ترکیب مناسبی از خواص مکانیکی شامل استحکام بالا و چقرمگی قابل قبول ایجاد شود. در این خصوص فولادهای دو فاز، چند فاز و فولادهای بینیتی بدون کاربرد قابل توجه هستند (۱).

در سال‌های اخیر، اسپیر و همکاران موفق به توسعه عملیات حرارتی جدیدی تحت عنوان فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی شدند (۱ و ۲). در این فرایند پس از کوئنچ فولاد از دمای آستنیت تا دمایی مابین دمای شروع و پایان تشکیل مارتنزیت (M_s^2 و M_f^3)، اجازه داده می‌شود تا درصد مناسبی از فاز مارتنزیت در زمینه ای از آستنیت تشکیل شود. پس از آن با انجام عملیات حرارتی دمای پایین، کربن از فاز مارتنزیت به آستنیت نفوذ کرده و به این صورت فاز آستنیت پایدار خواهد شد. در نهایت ریزساختار حاصل در اثر اعمال این عملیات حرارتی شامل تیغه‌های مارتنزیت و آستنیت باقیمانده پایدار شده می‌باشد. اگر چه علاوه بر این دو فاز، فازهای دیگری مانند بینیت و کاربید نیز می‌توانند تشکیل شوند. در نهایت ریزساختار حاصل از این فرایند باعث حصول خواص مکانیکی بهتری نسبت به روش‌های دیگر عملیات حرارتی می‌شود. در این شرایط ضمن حفظ درصد ازدیاد طول، استحکام کششی و استحکام تسلیم بیشتری نسبت به روش‌های کوئنچ و تمپر و یا

نگهداری هم‌دمای برای دستیابی به ساختارهای بینیتی، حاصل خواهد شد (۴-۱). در این زمینه تحقیقات متعددی به‌ویژه بر روی فولادهای متوسط آلیاژ پر سیلیسیم انجام شده است. در این زمینه می‌توان به پژوهش بیگ و همکاران در مورد یک نمونه فولاد متوسط کربن- پر سیلیسیم با مقدار منگنز در حدود ۴/۵ درصد وزنی اشاره نمود که با انجام عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی، موفق به ایجاد ریزساختار متشکل از دو فاز مارتنزیت و آستنیت پایدار شده شدند (۲). در پژوهشی دیگر کالدران و همکاران تأثیر عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی بر ریزساختار و خواص مکانیکی دو نوع فولاد کم کربن- پر سیلیسیم با مقدار منگنز حدود ۳ درصد وزنی را مورد بررسی قرار دادند (۵). در این تحقیق نشان داده شد که رفتار خستگی این فولادها به واسطه ممانعت فاز آستنیت پایدار شده از رشد ترک بهبود یافته است. شیرعلی و همکاران نیز با بررسی تأثیر دما و زمان پارتیشن‌بندی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد ۱/۵۱۴۲ نشان دادند که با افزایش دما و زمان پارتیشن‌بندی، مارتنزیت بیشتر بازگشت داده شده، استحکام و سختی کاهش می‌یابد و از طرفی ازدیاد طول افزایش پیدا می‌کند (۶). در این زمینه تحقیقات انجام شده توسط دیگر محققین همچون واردن و همکاران در مورد تأثیر عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای ساده کربنی و اسپیر و همکاران در بررسی مبنای ترمودینامیکی فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی و تأثیر آن بر ساختار و خواص فولادها قابل توجه است (۷ و ۸).

با وجود مطالعات گسترده ای که در مورد فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در مورد فولادهای مختلف انجام شده است، نتایج

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق فولاد AISI 4130 مورد استفاده در تحقیق

| عنصر | C | Si | Cr | Mo | Ni | Si | Mn | S | P | Cu | Nb | V |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|
| درصد اتمی | ۰/۳۳ | ۰/۴۵ | ۱/۰۵ | ۰/۲۰ | ۰/۱۴ | ۰/۴۵ | ۰/۸۳ | ۰/۰۱۶ | ۰/۰۲ | ۰/۰۶ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۱ |

حاصل از صفحات (۱۱۰)، (۲۰۰)، (۲۱۱) و (۲۲۰) فریت (مارتنزیت) و بر اساس رابطه (۱) محاسبه گردید (۹):

$$V_f = \frac{\left(\frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}} \right)}{\left(\frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \frac{I_{\gamma j}}{R_{\gamma j}} \right) + \left(\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \frac{I_{\alpha j}}{R_{\alpha j}} \right)} \quad (1)$$

در این رابطه V_f کسر آستنیت باقیمانده، q و p تعداد صفحات مورد بررسی، I شدت اندازه‌گیری شده برای هر صفحه، R مقدار شدت تئوری برای هر صفحه، γ آستنیت و α مارتنزیت می‌باشند.

آزمون سختی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سختی‌سنج Koopa مدل UV1 مطابق استاندارد ASTM E10-13 (سختی برینل با نیروی یک کیلوگرم) و آزمون کشش با استفاده از دستگاه کشش ۴۰ تنی مدل STM-400 و مطابق با استاندارد ASTM E8-13 انجام شد. در مورد هر نمونه، آزمون‌های تعیین خواص مکانیکی سه بار تکرار شد و مقدار متوسط گزارش شد.

۳- نتایج و بحث

به‌منظور بررسی دقیق فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در مورد فولاد AISI 4130، تلاش شد تا تمامی نمونه‌ها در شرایط یکسانی از عملیات آستنیت و کوئنچ قرار گرفته، تنها تأثیر دما و زمان پارتیشن‌بندی مورد بررسی واقع شود. در این رابطه، بر طبق فعالیت‌های تحقیقاتی قبلی انجام گرفته، دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان دمای آستنیت کردن و دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد نیز به‌عنوان دمای کوئنچ تعیین شد. تحت این شرایط، اندازه دانه‌های آستنیت اولیه در حدود ۱۲ میکرومتر و درصد حجمی آستنیت استحاله نیافته پس از کوئنچ با توجه به رابطه کایستین-ماربرگر^۶ (K-M) در حدود ۳۷ درصد

بررسی‌ها نشان می‌دهد این فرایند در مورد فولاد کم آلیاژ AISI 4130 و تأثیر آن بر خواص مکانیکی و ریزساختار حاصل تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این تحقیق تلاش شده تا فرایند مذکور در مورد این فولاد با دقت بیشتری مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از فولاد کم آلیاژ AISI 4130 با ترکیب استاندارد (مطابق جدول ۱) جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شد. دمای شروع و پایان استحاله برشی مارتنزیت در مورد این فولاد در حدود ۳۶۰ و ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. نمونه‌های تهیه شده از این فولاد در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه آستنیت شده و سپس در حمام نمک با ترکیب ۵۰ درصد وزنی نیترات پتاسیم و ۵۰ درصد وزنی نیترات کلسیم در دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد کوئنچ گردید. عملیات حرارتی پارتیشن‌بندی در مورد نمونه‌های مورد بحث در حمام نمک و در سه دمای پارتیشن‌بندی ۲۷۰، ۳۳۰ و ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان نگهداری ۱۵ تا ۳۶۰ دقیقه دنبال شد. بررسی‌های فازی نمونه‌های حاصل توسط روش پراش‌سنجی پرتوایکس^۴ با بهره‌گیری از دستگاه مدل AW-XDM300 تحت ولتاژ ۴۰ کیلوولت و جریان ۰/۰۵ آمپر انجام شد. در این روش از پرتو تک‌فام $\text{CuK}\alpha$ با طول موج ۱/۵۴۰۴ آنگستروم و فیلتر نیکلی استفاده شده و زاویه پراش (2θ) در محدوده ۳۰ تا ۱۱۰ درجه انتخاب شد. بررسی‌های ساختاری نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ مدل Quanta-FEG450 دنبال شد. کسر حجمی آستنیت باقیمانده در نمونه‌های مورد بررسی مطابق با استاندارد ASTM E975-13 و با استفاده از پراش حاصل از صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰) و (۳۱۱) آستنیت و پراش‌های

جدول ۲- خواص مکانیکی نمونه تهیه شده پس از انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد به زمان‌های نگهداری مختلف

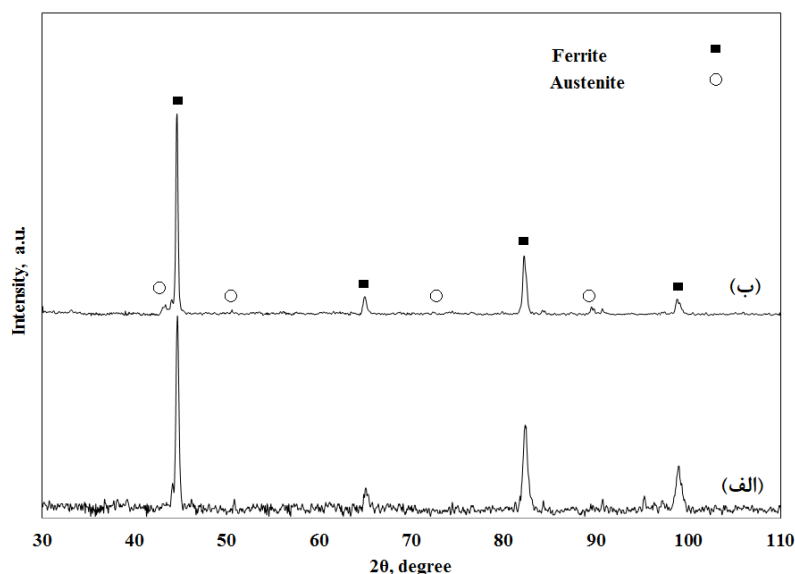
| زمان نگه داری (دقیقه) | | | | |
|-----------------------|------|------|------|----------------|
| ۱۵ | ۶۰ | ۱۸۰ | ۳۶۰ | |
| ۴۷۳ | ۴۷۰ | ۴۶۸ | ۴۶۵ | سختی (HB) |
| ۱۳۸۹ | ۱۴۱۷ | ۱۳۹۰ | ۱۴۱۰ | استحکام (MPa) |
| ۳/۶۸ | ۳/۹ | ۴/۴ | ۵/۸ | ازدیاد طول (%) |

برآورد شد (۱۰). این موضوع در تطابق کامل با محاسبات انجام شده بر مبنای مدل ارائه شده توسط اسپیر و همکاران قرار دارد (۴). با استفاده از این مدل ترمودینامیکی، با فرض انتقال کامل کربن به آستنیت و بدون رسوب کاربید، دمای بهینه کوئنچ و بالاترین مقدار آستنیت باقیمانده پایدار شده به ترتیب در حدود ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۸ درصد برآورد شد که به نتایج این تحقیق است. پس از انتخاب دمای مناسب آستنیت و کوئنچ، تلاش شد تا دمای مناسب پارتیشن‌بندی انتخاب شود. در مرحله پارتیشن‌بندی، لازم است با ممانعت از رسوب کاربید و یا تشکیل بینیت، کربن از فاز مارتنزیت به آستنیت نفوذ نموده و با غنی نمودن آن، موجب پایداری آن شود. در این ارتباط سه دمای ۲۷۰، ۳۳۰ و ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان دماهای پارتیشن‌بندی مورد آزمون انتخاب شده، تلاش شد تا تأثیر زمان نگهداری بر نوع ساختارهای فازی و خواص مکانیکی نهایی مورد بررسی واقع شود.

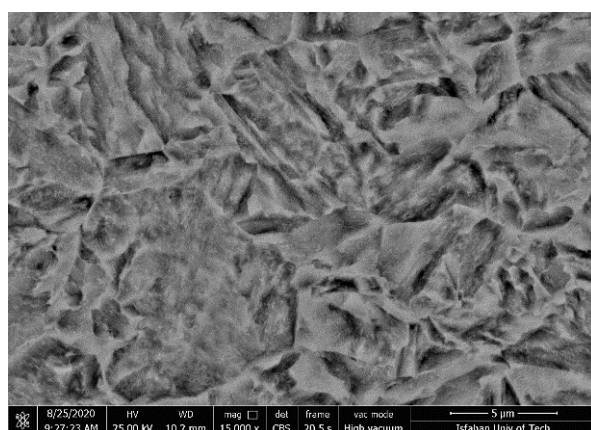
خواص مکانیکی حاصل از نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده در دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های مختلف تا ۳۶۰ دقیقه در جدول (۲) خلاصه شده است. با توجه به این جدول، تفاوت معنی‌داری میان استحکام کششی نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده در زمان‌های نگهداری مختلف در این دما وجود ندارد. در مورد تمامی نمونه‌ها مقدار استحکام کششی به‌طور متوسط در حدود ۱۴۱۰ مگاپاسکال برآورد می‌شود. علاوه بر این، سختی نمونه‌های مختلف نیز تقریباً یکسان است و به‌طور متوسط ۴۶۵ برینل را به خود اختصاص داده است.

برخلاف موارد مورد ذکر، افزایش زمان نگهداری در این دما منجر به افزایش درصد ازدیاد طول از حدود ۳/۷ تا حدود ۵/۸ درصد شده است.

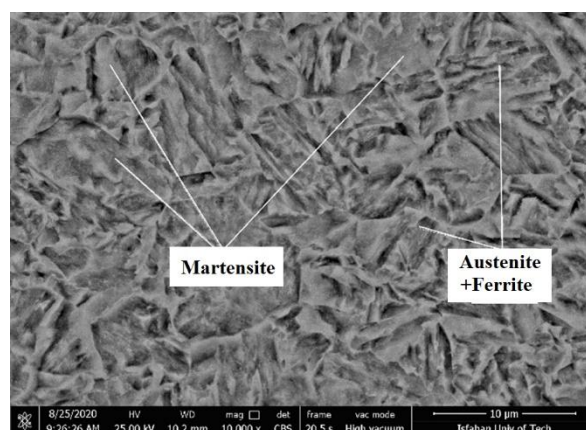
به‌منظور بررسی دقیق دلیل تغییرات فازی و ساختاری با تغییر زمان نگهداری در دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد، الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های مورد بحث در دو زمان نگهداری ۱۵ و ۳۶۰ دقیقه در شکل (۱) ارائه شده است. با توجه شکل (۱-الف)، الگوهای پراش مربوط به نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده در دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه شامل پیک‌های مربوط به فاز مارتنزیت (فریت) و آستنیت باقیمانده می‌باشد. شدت پیک‌های مربوط به آستنیت باقیمانده در مورد نمونه پارتیشن‌بندی شده در زمان نگهداری ۱۵ دقیقه بسیار ضعیف بوده، نشان از پایداری درصد کم فاز آستنیت در این زمان نگهداری دارد. این موضوع با نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایشات کلارک مشابه است (۱۱). با توجه به نتایج ارائه شده مشخص است که درصد فاز آستنیت پایدار شده در این دما به دلیل نرخ پایین نفوذ کربن و عدم ایجاد ساختار آستنیت همگن غنی از کربن، بسیار کم بوده است. آستنیت پایداری نشده در حین سرمایش تا دمای اتاق به مارتنزیت جدید استحاله یافته است (۱۲). این موضوع به‌خوبی با توجه به تصاویر میکروسکوپی ارائه شده در شکل (۲) قابل اثبات است. تشکیل مارتنزیت جدید، درصد ازدیاد طول کم نمونه را موجب شده است. مطابق شکل (۱-ب)، با افزایش زمان نگهداری به حدود ۳۶۰ دقیقه، بر شدت پیک‌های فاز آستنیت پایداری شده



شکل ۱- الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه تهیه شده پس از انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در دمای 270°C درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های (الف) ۱۵ و (ب) ۳۶۰ دقیقه.



(ب)

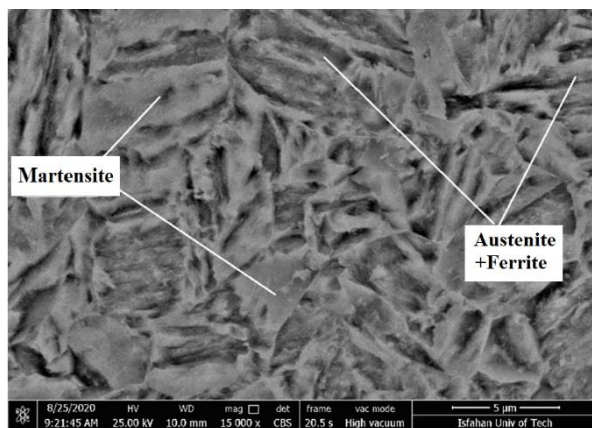


(الف)

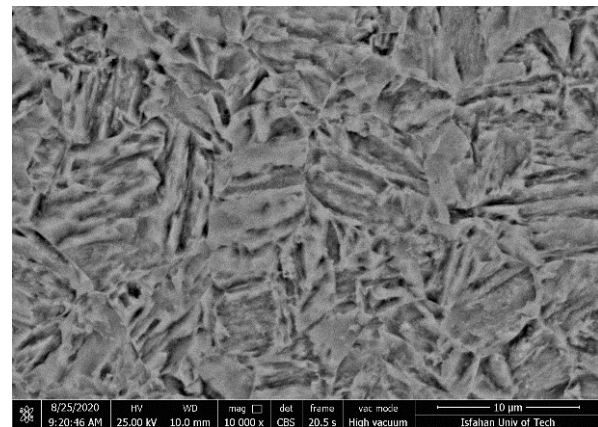
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه تهیه شده پس از انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در دمای 270°C درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۱۵ دقیقه در دو بزرگنمایی مختلف.

مقدار آستنیت باقیمانده افزایش داشته است (۱۴). البته مطابق تصاویر میکروسکوپی الکترونی نمونه مورد بحث پس از پارتیشن‌بندی به مدت زمان ۳۶۰ دقیقه در دمای 270°C درجه سانتی‌گراد در شکل (۳)، هنوز نشانه‌هایی از فاز مارتنزیت بلوکی^۷ در ریزساختار وجود دارد که خواص مکانیکی نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مشابه قبل، خواص مکانیکی نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده

افزوده شده و درصد این فاز به حدود ۷ درصد رسیده است. در این حالت به نظر می‌رسد که زمان نگهداری بیشتر منجر به نفوذ کربن به سمت فاز آستنیت، غنی شدن این فاز از کربن و پایدارسازی آن شده است (۱۳). پایدارسازی درصد بیشتر آستنیت باقیمانده در ساختار، دلیل افزایش درصد ازدیاد طول نمونه‌ها با افزایش زمان نگهداری می‌باشد. در تحقیقی که ژانگ و همکاران نیز انجام دادند، به‌طور مشابه ازدیاد طول با افزایش



(ب)



(الف)

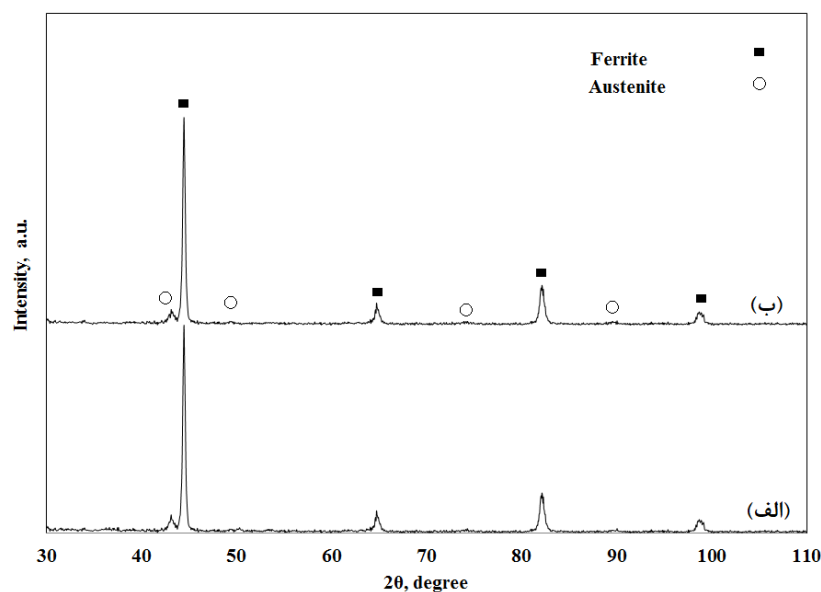
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه تهیه شده پس از انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در دمای 270° درجه سانتی‌گراد به مدت زمان 360 دقیقه در دو بزرگنمایی مختلف.

جدول ۳- خواص مکانیکی نمونه تهیه شده پس از انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در دمای 330° درجه سانتی‌گراد به زمان‌های نگهداری مختلف

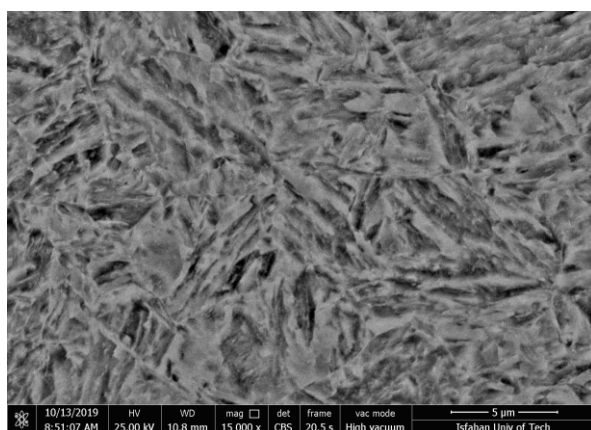
| زمان نگهداری (دقیقه) | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|
| ۱۵ | ۳۰ | ۶۰ | ۱۲۰ | ۱۸۰ | ۳۶۰ |
| ۳۸۰ | ۳۹۵ | ۴۱۰ | ۴۱۲ | ۳۴۸ | ۳۴۶ |
| ۱۳۸۹ | ۱۳۹۵ | ۱۴۴۳ | ۱۴۵۰ | ۱۳۲۰ | ۱۲۹۵ |
| ۶/۹ | ۷/۵ | ۹/۴ | ۹/۶ | ۱۰/۸ | ۱۱/۵ |
| ازدیاد طول (%) | | | | | |
| استحکام (مگاپاسکال) | | | | | |
| سختی (برینل) | | | | | |

زمان‌های نگهداری ۱۵ و 120 دقیقه در شکل (۴) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در مورد تمامی نمونه‌ها، ساختار متشکل از فاز مارتنزیت تبغی‌ای به همراه آستنیت پایدار شده است. نکته جالب توجه در این الگوها، افزایش شدت پیک‌های فاز آستنیت باقیمانده با افزایش زمان نگهداری تا زمان 120 دقیقه می‌باشد. نتایج حاصل از پراش‌سنجی پرتو ایکس در مورد نمونه‌های مورد بحث اثبات می‌کند که با افزایش زمان نگهداری در دمای 330° درجه سانتی‌گراد، نفوذ تدریجی کربن از مارتنزیت به سمت فاز آستنیت رخ داده و در نهایت فاز آستنیت باقیمانده (14 درصد حجمی) پایدار شده است. حضور مقدار آستنیت باقیمانده بیشتر و در زمان کوتاه‌تر در نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده در دمای 330° درجه نسبت به دمای 270°

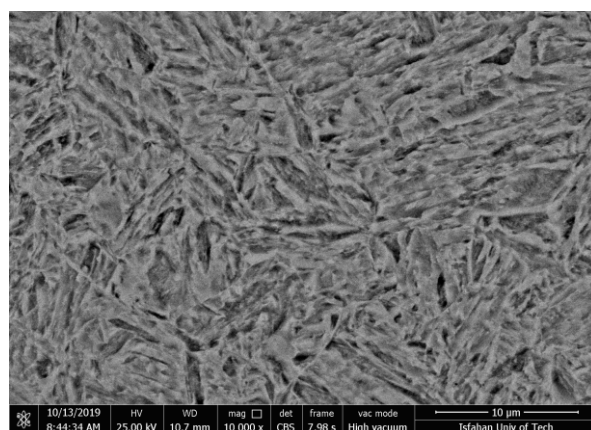
در دمای 330° درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های مختلف تا 360 دقیقه، در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به نتایج، تغییرات استحکام، سختی و درصد ازدیاد طول با زمان نگهداری در دمای 330° درجه سانتی‌گراد قابل توجه است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان نگهداری در دمای 330° درجه سانتی‌گراد تا حدود 120 دقیقه، استحکام (سختی) به صورت جزئی افزایش یافته و از حدود 1389 مگاپاسکال (380 برینل) به حدود 1450 مگاپاسکال (412 برینل) رسیده است. برخلاف این موضوع، درصد ازدیاد طول نمونه‌ها با افزایش زمان نگهداری از حدود $6/9$ تا $9/6$ درصد افزایش داشته است. در راستای بررسی دلیل خواص مکانیکی با افزایش زمان نگهداری الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه‌های مورد بررسی در



شکل ۴- الگوهای پراش پرتوایکس نمونه تهیه شده پس از انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در دمای 330°C درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های الف) ۱۵ و ب) ۱۲۰ دقیقه.



(ب)



(الف)

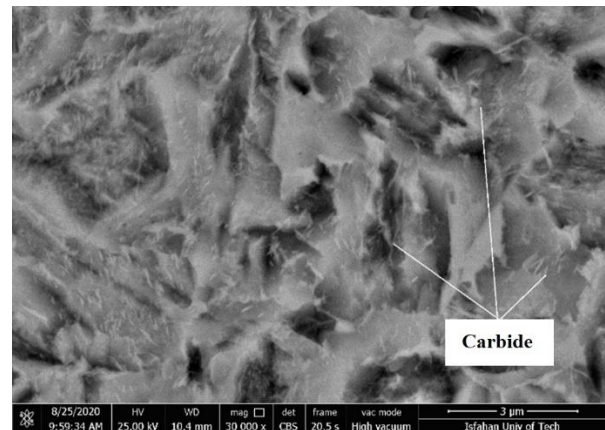
شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه تهیه شده پس از انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در دمای 330°C درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۱۲۰ دقیقه در دو بزرگنمایی مختلف.

درجه سانتی‌گراد ناشی از افزایش سرعت نفوذ کربن در دمای بالاتر 330°C درجه سانتی‌گراد است. سانتافیمیا و همکاران نیز نشان دادند که با افزایش دمای پارتیشن‌بندی مقدار حداکثر آستنیت باقیمانده در زمان‌های کوتاه‌تر پارتیشن‌بندی به دست خواهد آمد (۱۵). با توجه به تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه پارتیشن‌بندی شده در دمای 330°C درجه

سانتی‌گراد ناشی از افزایش سرعت نفوذ کربن در دمای بالاتر 330°C درجه سانتی‌گراد است. سانتافیمیا و همکاران نیز نشان دادند که با افزایش دمای پارتیشن‌بندی مقدار حداکثر آستنیت باقیمانده در زمان‌های کوتاه‌تر پارتیشن‌بندی به دست خواهد آمد (۱۵). با توجه به تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه پارتیشن‌بندی شده در دمای 330°C درجه

جدول ۴- خواص مکانیکی نمونه تهیه شده پس از انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به زمان‌های نگهداری مختلف

| زمان نگهداری (دقیقه) | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|
| ۱۵ | ۳۰ | ۶۰ | ۱۲۰ | ۱۸۰ | ۳۶۰ |
| ۴۱۵ | ۳۸۵ | ۳۹۳ | ۳۸۶ | ۳۴۰ | ۳۲۶ |
| سختی (برینل) | | | | | |
| ۱۴۲۱ | ۱۴۲۸ | ۱۳۸۷ | ۱۳۵۰ | ۱۲۰۴ | ۱۱۶۵ |
| استحکام (مگاپاسکال) | | | | | |
| ۹/۴ | ۹/۳ | ۹/۷ | ۹/۸ | ۱۱/۴ | ۱۱/۸ |
| ازدییاد طول (%) | | | | | |



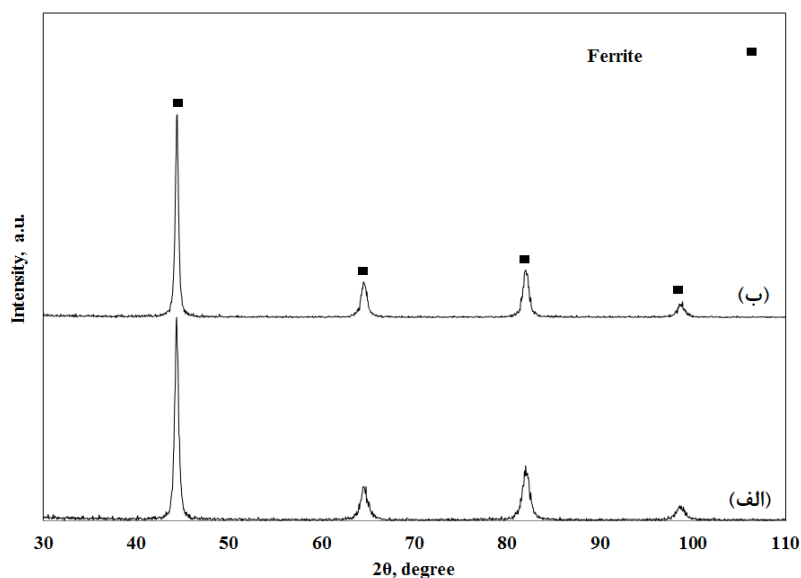
شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه تهیه شده پس از انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۳۶۰ دقیقه.

۳۶۰ دقیقه در جدول (۴) خلاصه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با گذشت زمان نگهداری نمونه در این دما، استحکام (سختی) به تدریج افت نموده و از مقدار ۱۴۲۱ مگاپاسکال (۴۲۵ برینل) در زمان‌های ابتدایی فرایند به حدود ۱۱۶۵ مگاپاسکال (۳۲۶ برینل) در زمان پارتیشن‌بندی ۳۶۰ دقیقه رسیده است. در این حالت درصد ازدیاد طول افزایش یافته و به بیشترین مقدار خود یعنی حدود ۱۱/۸ درصد می‌رسد. به‌منظور بررسی دلیل کاهش استحکام (سختی) و افزایش انعطاف‌پذیری نمونه‌های مورد بحث با گذشت زمان نگهداری، الگوهای پراش نمونه‌ها در شکل (۷) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، الگوهای پراش مربوط به نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد تنها شامل پیک‌های مارتنزیت (فريت) می‌باشد و نشانی از فاز آستنیت در آن‌ها وجود ندارد. این موضوع بدان معنی است که در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد که کمی بالاتر از دمای شروع مارتنزیت فولاد مورد بررسی است، فاز آستنیت باقیمانده به فاز بینیت استحاله یافته است. علاوه بر این، فاز مارتنزیت نیز تمپر شده و کاربید سمیتیت در زمینه رسوب نموده است. این موضوع به‌خوبی با توجه به مشاهده رسوبات کاربیدی در تصاویر میکروسکوپی نمونه مورد بررسی پس از گذشت ۳۶۰

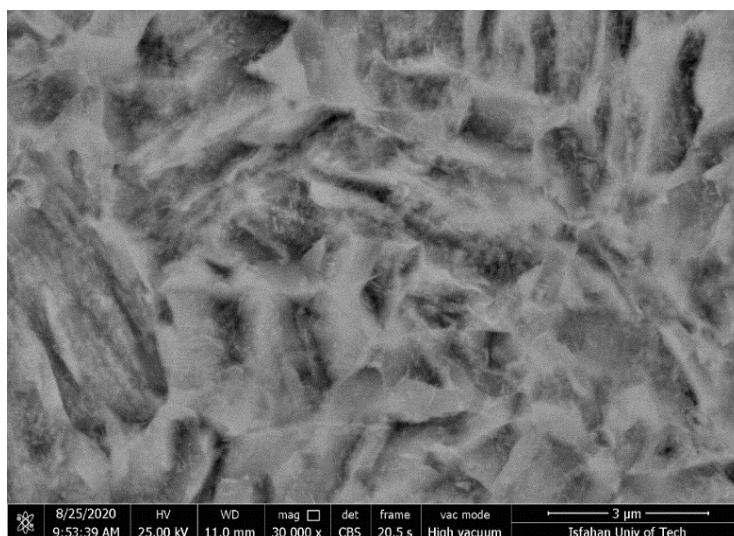
مورد این نمونه (بدون کاهش قابل توجه در درصد ازدیاد طول)، در حدود ۲۰ درصد بیشتر از استحکام حاصل از فرایند معمول کوئنچ و تمپر در مورد این فولاد می‌باشد. در تحقیقی مشابه که توسط فنگ و همکاران بر روی فولاد 42CrMo4 انجام شده نیز مشاهده می‌شود که با افزایش زمان نگهداری ایزوترم در زیر دمای شروع مارتنزیت، علاوه بر استحکام کششی و تسلیم، مقدار ازدیاد طول نیز افزایش داشته است اگر چه دلیل این افزایش استحاله کامل آستنیت استحاله نیافته به بینیت پائینی عنوان شده است (۱۶).

در هر حال، افزایش بیشتر زمان نگهداری منجر به کاهش استحکام (سختی) به حدود ۱۲۹۵ مگاپاسکال (۳۴۶ برینل) شده است. در این حالت، درصد ازدیاد طول تا حدود ۱۱/۵ درصد افزایش داشته است. کاهش تدریجی استحکام و سختی و افزایش درصد ازدیاد طول در زمان‌های بالاتر می‌تواند به بازپخت فاز مارتنزیت و تشکیل کاربید نسبت داده شود (۱۷). این موضوع به‌خوبی با توجه به ریزساختار نمونه مورد بحث پس از گذشت ۳۶۰ دقیقه از زمان پارتیشن‌بندی در دمای ۳۳۰ درجه در شکل (۶) قابل اثبات است.

خواص مکانیکی نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده در دمای ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های نگهداری مختلف تا



شکل ۷- الگوهای پراش پرتوایکس نمونه تهیه شده پس از انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در دمای 380° درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های الف) ۱۵ و ب) ۱۲۰ دقیقه.



شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه تهیه شده پس از انجام فرایند کوئنچ و پارتیشن‌بندی در دمای 380° درجه سانتی‌گراد به مدت زمان 360° دقیقه.

نگهداری از مقدار آستنیت استحاله نیافته کاسته شده است (۱۸ و ۱۹). در هر حال، تمپر شدن فاز مارتنزیت و رسوب کاربیدهای سمیتیت، دلیل کاهش تدریجی استحکام و افزایش درصد ازدیاد طول با افزایش زمان نگهداری در دمای 380° درجه سانتی‌گراد است (۶).

دقیقه نگهداری در دمای مورد بحث در شکل (۸) قابل اثبات است. لویز و همکاران نشان دادند که حتی با نگهداری ایزوترم در زیر دمای شروع مارتنزیت امکان تشکیل فاز بینیت وجود دارد و در این نمونه‌ها فازهای بینیت، مارتنزیت تمپر شده و مارتنزیت جدید مشاهده شده و همچنین با افزایش زمان

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر عملیات حرارتی کوئنچ و پارتیشن‌بندی بر ریزساختار و مکانیکی فولاد AISI 4130 مورد بررسی واقع شد. نتایج حاصل نشان داد که با انجام عملیات حرارتی مورد بررسی در مورد این فولاد در دمای پارتیشن‌بندی 330°C درجه سانتی‌گراد و زمان نگهداری 120° دقیقه، ریزساختاری متشکل از مارتنزیت تیغه‌ای و آستنیت پایدار شده ایجاد می‌شود. مقادیر استحکام و درصد ازدیاد طول نمونه بهینه پس از انجام عملیات کوئنچ و پارتیشن‌بندی در حدود 1450° مگاپاسکال و $9/6$ درصد تعیین شد. مقدار استحکام حاصل در این تحقیق در حدود 20 درصد

واژه‌نامه

1. quenching and partitioning
2. martensite start temperature (Ms)
3. martensite finish temperature (Mf)
4. X-ray diffractometer (XRD)

5. scanning electron microscope (SEM)
6. Koistinen- Marburger
7. blocky martensite

مراجع

1. Nguyen MT, Santofimia MJ, Sietsma J, Zhao L. Quenching and partitioning of low alloyed steels. Master Thesis; Technische Universiteit Delft 2008.
2. Bigg TD. Quenching and partitioning a new steel heat treatment concept. Phd Thesis; University of Leeds 2011.
3. Cooman BD, Speer JG. Quench and partitioning steel: a new AHSS concept for automotive anti-intrusion applications. Steel Research International 2006; 77: 634-640.
4. Speer J, Matlock DK, De Cooman BS, Schroth JG. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. Acta Materialia 2003; 51: 2611-2622.
5. Calderón D, Sabirov I, Molina-Aldareguia JM. Mechanical properties of advanced high-strength steels produced via quenching and partitioning. Phd Thesis; Universidad Carlos III de Madrid 2015.
6. Shirali A., Honarbakhsh Raof A, Bazaz Banaie S, Hasani MA, Karam Abian M. Effect of Partitioning Time and Temperature during Q&P Process on Mechanical Properties of 1.5142 Steel. Journal of Advanced Materials and Technologies 1393; 3: 1-8 (In Persian).
7. Vardhan AK, Shubhanyu V, Kumar U, Abhishek D. Effect of quenching and partitioning process in carbon steels. International Journal of Current Engineering and Technology 2017; 7: 831-834.
8. Speer JG, Rizzo FC, Matlock DK, Edmonds D. The quenching and partitioning process: background and recent progress. Materials Research 2005; 8: 417-423.
9. Jateczak CF. Retained austenite and its measurement by X-ray diffraction. SAE Transactions 1980; 89: 1657-1676.
10. Bohemen SMC. Bainite and martensite start temperature calculated with exponential carbon dependence. Materials Science and Technology 2012; 28: 487-495.
11. Clarke AJ, Speer JG, Matlock DK, Rizzo FC, Edmonds DV, Santofimia MJ. Influence of carbon partitioning kinetics on final austenite fraction during quenching and partitioning. Scripta Materialia 2009; 61: 149-152.
12. Santofimia MJ, Petrov RH, Zhao L, Sietsma J. Microstructural analysis of martensite constituents in quenching and partitioning steels. Materials Characterization 2014; 92: 91-95.
13. Speer JG, Edmonds DV, Rizzo FC, Matlock DK. Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation. Solid State and Materials Science 2004; 8: 219-237.
14. Zhang J, Ding H, Wang C, Zhao J, Ding T. Work

- hardening behaviors of a low carbon Nb microalloyed Si-Mn quenching-partitioning steel with different cooling styles after partitioning. *Materials Science & Engineering* 2013; 585: 132-138.
15. Santofimia MJ, Zhao L, Petrov R, Kwakernaak C, Sloof WG, Sietsma J. Microstructural development during the quenching and partitioning process in a newly designed low-carbon steel. *Acta Materialia* 2011; 59: 6059-6068.
 16. Feng J, Frankenbach T, Wettlaufer M. Strengthening 42CrMo4 steel by isothermal transformation below martensite start temperature. *Materials Science & Engineering A* 2017; 683: 110-115.
 17. Dlouhý HJ, Nový Z. Influence of parameters of q-p process on properties and microstructure of CMnSiMo steel. 19th International Conference on Metallurgy and Materials Hotel Relax; Roznov pod Radhostem: Czech Republic 2010.
 18. Navarro-López A, Hidalgo J, Sietsma J, Santofimia MJ. Influence of the prior athermal martensite on the mechanical response of Influence of the prior athermal martensite on the mechanical response of advanced bainitic steel. *Materials Science & Engineering A* 2018; 735: 343-353.
 19. Feng J, Frankenbach T, Wettlaufer M. Strengthening 42CrMo4 steel by isothermal transformation below martensite start temperature. *Materials Science & Engineering A* 2017; 683: 110-115.