

## بررسی تأثیر پارامترهای عملیات حرارتی بعد از تغییر شکل بر خواص ریزساختاری و مکانیکی فولاد 9Cr-1Mo

مهرناز روزبهانی<sup>\*</sup>، ویدا سلیمانی<sup>۱</sup> و بیت‌اله اقبالی<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

\*mz\_roozbahani@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۸۹/۰۵/۱۴، تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۸/۱۶)

### چکیده

فولادهای 9Cr-1Mo به لحاظ خواص مهندسی برجسته‌ای مثل ضریب انبساط حرارتی پایین، مقاومت عالی در برابر تورم ناشی از تشعشع، استحکام کششی بالا و مقاومت به خزش و ... کاربردهای وسیعی در صنایع گوناگون از قبیل: صنایع شیمیایی، پتروشیمی، نیروگاه‌ها، راکتورهای تأسیسات استراتژیک دارند. در این پژوهش، هدف ریخته‌گری آزمایشگاهی نوعی از این فولادها و اصلاح ریزساختار حاصل از ریخته‌گری بود. پس از عملیات ذوب و آلیاژسازی، برای اصلاح ریزساختار غیرهمگن و درشت‌دانه، نمونه‌ها در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد پیشگرم شده و تحت تغییر شکل گرم در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد تا کرنش ۱/۵ قرار گرفتند. نمونه‌های تغییر شکل پلاستیک داده شده در سه منطقه فازی آستنیت، آستنیت + فریت و فریت به مدت زمان‌های مختلف تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. با استفاده از بررسی‌های ریزساختاری و آزمایش‌های مکانیکی، شرایط بهینه از نظر دست‌یابی به ریزساختار ریز و همگن متشکل از دانه‌های ظریف فریت در کنار فاز پراکنده مارتنزیت مربوط به عملیات حرارتی در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و نگهداری به مدت زمان ۱۲۰ دقیقه تشخیص داده شد.

### واژه‌های کلیدی:

عملیات حرارتی، فولاد 9Cr-1Mo، تغییر شکل گرم، تحولات ریزساختاری.

### ۱- مقدمه

الکتریکی و اجزای راکتورهای هم‌جوشی و شکافت هسته‌ای به کار برده می‌شوند.  
این فولادهای مقاوم به حرارت معمولاً ۹٪ کروم، ۱/۰-۲/۰٪ کربن، حدود ۱-۲٪ عناصر دیرگداز مثل Mo، W و مقادیر جزئی V، Nb و ... دارند. به این دسته از فولادها، فولادهای

فولادهای زنگ‌نزن 9Cr-1Mo، به طور وسیعی در تجهیزات تولید انرژی با استفاده از سوخت فسیلی، ژنراتورهای بخار، صنایع پتروشیمی و تجهیزات شیمیایی و مهندسی، توربین‌های گازی و صنایع هواپیمایی و هوا-فضا و تجهیزات انرژی

شده با انجام عملیات شکل دهی گرم و سپس آنیل در دما و مدت زمان مناسب چنین نتیجه ای حاصل شود.

## ۲- روش تحقیق

برای انجام تحقیق حاضر، ابتدا ترکیب شیمیایی مناسب فولاد 9Cr-1Mo طراحی و محاسبه گردید. سپس با تهیه مواد شارژ لازم، عملیات ذوب و آلیاژسازی در یک کوره القایی آزمایشگاهی انجام گرفت. مذاب به دست آمده با دمای فوق‌گداز مناسب به داخل قالب‌های ماسه‌ای Y شکل ریخته‌گری شد. ریزساختار نمونه ریخته شده از لحاظ نوع فازهای تشکیل‌دهنده، کسر حجمی فازها و مورفولوژی و نحوه توزیع آنها مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور اصلاح ریزساختار ریختگی غیر همگن و درشت دانه، از Y بلوک ریخته‌گری شده نمونه‌هایی به ابعاد 1150 × 35 × 25 mm برش داده شد. این قطعات در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد پیشگرم شده و در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد از بزرگترین بعد توسط دستگاه پرس هیدرولیک تحت تغییر شکل تا کرنش ۱/۵ قرار گرفتند. نمونه‌ها بلافاصله پس از پایان تغییر شکل در آب کوئنچ شدند. آنگاه نمونه‌های تغییر شکل پلاستیک داده شده در دماهای مختلف مربوط به سه منطقه فازی فریت (۸۰۰ درجه سانتی‌گراد)، آستنیت + فریت (۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) و آستنیت (۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) به مدت زمان‌های مختلف تحت عملیات حرارتی آنیل قرار گرفتند. برای بررسی تغییرات ریزساختاری، پس از عملیات سمباده‌زنی و پولیش، نمونه‌ها با محلول ماربل اچ شدند و در نهایت ریزساختار توسط میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. سختی نمونه‌ها از روش ویکرز و تحت بار اعمالی ۳۰ Kg به دست آمد. از نمونه‌های آنیل شده در ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های کشش با ابعادی مطابق استاندارد Jis Z2201 ساخته شدند و آزمایش کشش با نرخ کرنش  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  و در دمای محیط انجام گرفت.

فریتی/مارتنزیتی اطلاق می‌شود زیرا با توجه به دی‌گرام استحاله سرد کردن پیوسته (CCT)، این فولادها حین سرد شدن در هوا از دماهای نرماله کردن معمولی، مارتنزیتی می‌شوند در حالی که سرد کردن نمونه‌ها در کوره منجر به رخ دادن استحاله نفوذی و ایجاد ریزساختار فریتی می‌شود [۱، ۲، ۳ و ۴].

کاربرد مواد فلزی و آلیاژها مستلزم به کارگیری روش‌های فرآوری جدیدی شامل شکل دهی و عملیات حرارتی و یا تلفیق آنها است. نیاز به قطعات با استحکام مطلوب در دمای محیط و مشکلاتی که در بحث شکل دهی و تولید قطعات در این دماها به خاطر پایین بودن قابلیت شکل‌پذیری عارض می‌گردد، تفکر استفاده از فرآیندهای شکل دهی گرم بر مبنای اصل کاهش استحکام مواد و اغلب افزایش قابلیت شکل‌پذیری آنها با افزایش دما را توسعه داده است. به علاوه توسعه روزافزون تکنولوژی و نیاز آن به تولید قطعات با خواص متنوع نشان داده است که در بسیاری از موارد تنها فرآیندهای شکل دهی نمی‌توانند تأمین‌کننده ویژگی‌های لازم در قطعات مهندسی باشند و از این رو، عملیات حرارتی پس از شکل دهی به منظور ایجاد خواص مورد نیاز در قطعات صنعتی گسترش یافته است [۵].

بنابراین بررسی اثرات اعمال تغییر شکل گرم و نیز عملیات حرارتی بعد از تغییر شکل بر تحولات ریزساختاری و خواص مکانیکی آلیاژها در جهت بهینه کردن شرایط شکل دهی و عملیات حرارتی برای دستیابی به خواص مطلوب در محصولات نهایی دارای اهمیت است [۵].

در زمینه اثرات عملیات تغییر شکل گرم و عملیات آنیل پس از آن بر خواص و ریزساختار فولاد پرکروم 9Cr-1Mo اطلاعات زیادی در دسترس نیست.

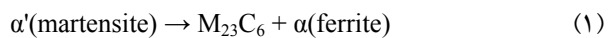
در تحقیق حاضر ابتدا، فولاد پرکروم 9Cr-1Mo ریخته‌گری شد. با توجه به دو فازی بودن ریزساختار ریختگی (فریتی-مارتنزیتی) و اینکه بررسی‌های پیشین نشان داده که در فولادهای دوفازی فریتی-مارتنزیتی، امکان بهبود داکتیلیته و چقرمگی با ایجاد ریزساختاری با اندازه دانه خیلی ریز و توزیع یکنواختی از فازهای فریت و مارتنزیت وجود دارد [۶]، در تحقیق حاضر سعی

که با اعمال کرنش، فاز فریت به صورت باندهایی موازی که عمود بر جهت اعمال کرنش آرایش یافته‌اند، در زمینه مارتنزیتی مشاهده می‌شود. حضور دانه‌های ریز فریت در این باندها و نیز تغییر در توزیع اندازه واحدهای مارتنزیتی به خوبی مشهود است. برای این فولاد، دمای  $A_{C1} = 827^{\circ}\text{C}$  و دمای  $A_{C3} = 907^{\circ}\text{C}$  است، پس تغییر شکل فولاد در منطقه تک‌فازی فریت انجام شده است. در این شرایط تبلور مجدد آستنیت رخ نمی‌دهد و انرژی حاصل از تغییر شکل در داخل نمونه ذخیره می‌شود [۷].

ظهور دانه‌های ریز فریت در ریزساختار تغییر شکل یافته را می‌توان ناشی از تبلور مجدد دینامیکی فریت در دمای تغییر شکل و استحاله تحت کرنش فریت دانست.

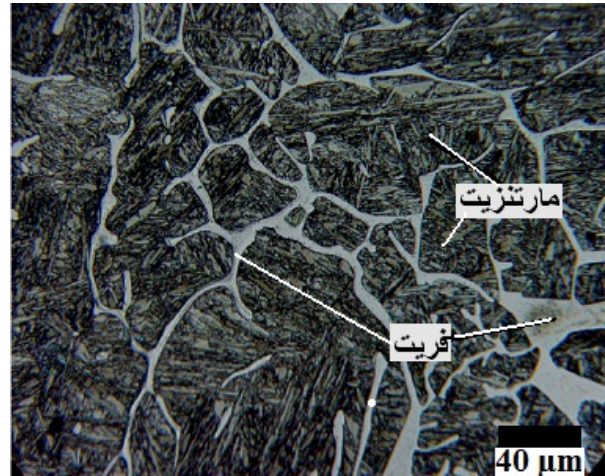
در شکل (۳) تحولات ریزساختاری اتفاق افتاده در جریان آنیل در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان‌های مختلف نشان داده شده است.

در این دما فولاد 9Cr-1Mo در ناحیه تک‌فازی فریتی قرار می‌گیرد. آنیل در ناحیه تک‌فازی فریتی سبب تجزیه مارتنزیت به فریت و کاربید  $M_{23}C_6$  می‌شود [۸].

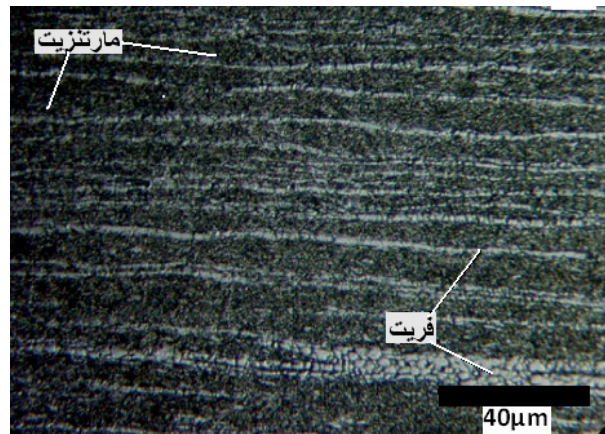


به نظر می‌رسد که پس از آنیل به مدت ۳۰ دقیقه، فرآیندهای نرم‌شوندگی درون فاز فریت حاصل از تجزیه مارتنزیت، به سرعت پیشرفت کرده و دانه‌های تبلور مجدد یافته با مرزهای موج‌دار در طول مرز واحدهای مارتنزیتی جوانه زده‌اند، در بعضی از نقاط، مرز دانه‌هایی به صورت رگه‌های ضعیف‌تری دیده می‌شود و در بخش‌های دیگر مرزهای موج‌دار با ظاهری مشخص‌تر ایجاد شده‌اند.

با افزایش زمان آنیل به ۶۰ دقیقه، تعداد این مرزهای موج‌دار افزایش یافته و توزیع یکنواخت‌تری در تمام سطح نمونه مشاهده می‌شود. در زمان نگهداری ۱۲۰ دقیقه تقریباً در تمام ریزساختار دانه‌های تبلور مجدد یافته فریتی و مرزهای موجی شکل دیده می‌شود. در مدت زمان آنیل ۲۴۰ دقیقه دانه‌های تبلور مجدد یافته درشت‌تر شده و نیز در باندهای فریتی موجود از قبل دانه‌های تبلور مجدد یافته فریتی مشاهده می‌شود.



شکل (۱): تصاویر میکروسکوپی از ریزساختار ریختگی فولاد 9Cr-1Mo.



شکل (۲): تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع پرس شده.

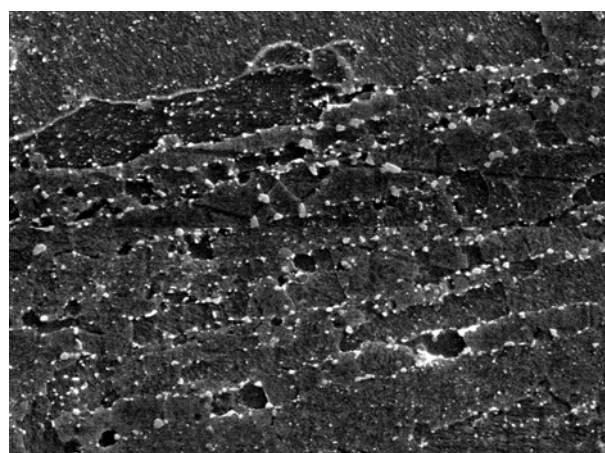
### ۳- نتایج و بحث

پس از انجام مرحله ذوب‌ریزی، نتیجه تست کوانتومتری درصد عناصر موجود در ترکیب فولاد را شامل ۹/۵٪ کروم، ۰/۰۷٪ کربن، ۰/۹۶٪ مولیبدن، ۰/۶۲٪ منگنز و ۰/۵٪ نیکل و مقادیر جزئی از عناصری چون Si، Al، V مشخص نمود.

شکل (۱) ریزساختار فولاد را در شرایط ریختگی نشان می‌دهد. ریزساختار ریختگی دوفازی است که فاز فریت با کسر حجمی ۱۵٪، فاز مارتنزیت زمینه را احاطه کرده است.

در شکل (۲) ریزساختار نمونه فولادی پس از تغییر شکل نشان داده شده است.

ریزساختار متشکل از فاز فریت در مرزهای زمینه مارتنزیتی است



SEM MAG: 5.00 kx DET: SE Detector DATE: 08/16/02 HV: 30.0 kV VAC: HiVac Device: TS5136MM Vega ©Tescan Digital Microscopy Imaging

شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از نمونه آئیل شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۲۰ دقیقه.

و متوسط مشاهده می شود [۹].

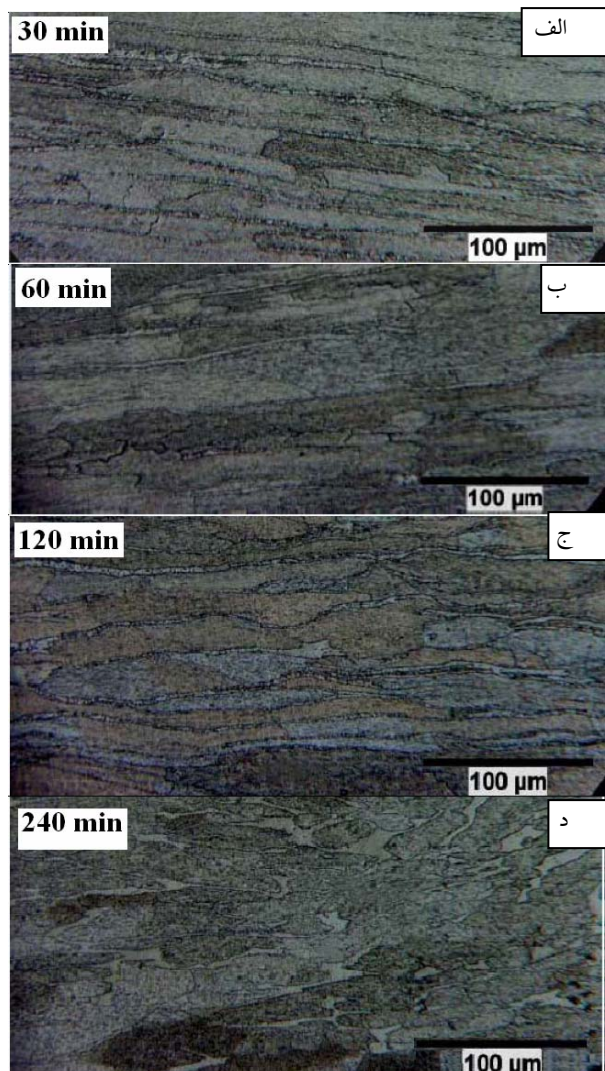
در جوانه زنی توسط برآمدن مرز بخشی از مرز توسط ناخالصی ها قفل می شود یا اینکه مرزهای فرعی به طور موضعی به واسطه حرکت ناشی از کرنش مرز به طرف بیرون خم می شوند و ناحیه پشت مرز مهاجرت کرده که عاری از نابجایی ها است، به عنوان هسته عمل می کند [۸].

در نمونه های آئیل شده در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی گراد، قفل شدن مرزها توسط رسوبات ( $M_{23}C_6$ ) می تواند دلیل رخ دادن این مکانیزم باشد. مرزهای آستنیت- فریت و مارتنزیت- فریت، مکان های ترجیحی جوانه زنی کاربیدها هستند و به علاوه کاربیدها، درون دانه های فریت هم رسوب می کنند [۱۰].

در شکل (۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه آئیل شده به ۱۲۰ دقیقه نشان داده شده است.

در این مدت زمان، هنوز ساختار کاملاً فریتی نشده است و ذرات رسوب کاربید به وضوح مشاهده می شوند. این رسوبات در مرز مشترک باندهای فریتی و فاز مارتنزیت به تعداد زیاد موجود هستند و به تعداد کمتری درون فاز فریت رسوب یافته اند. در این نوع کاربیدها معمولاً عناصر M Fe, Cr, Mo است.

تغییرات سختی با افزایش زمان آئیل و ایجاد تحولات ریزساختاری در شکل (۵) آورده شده است. کاهش سختی با

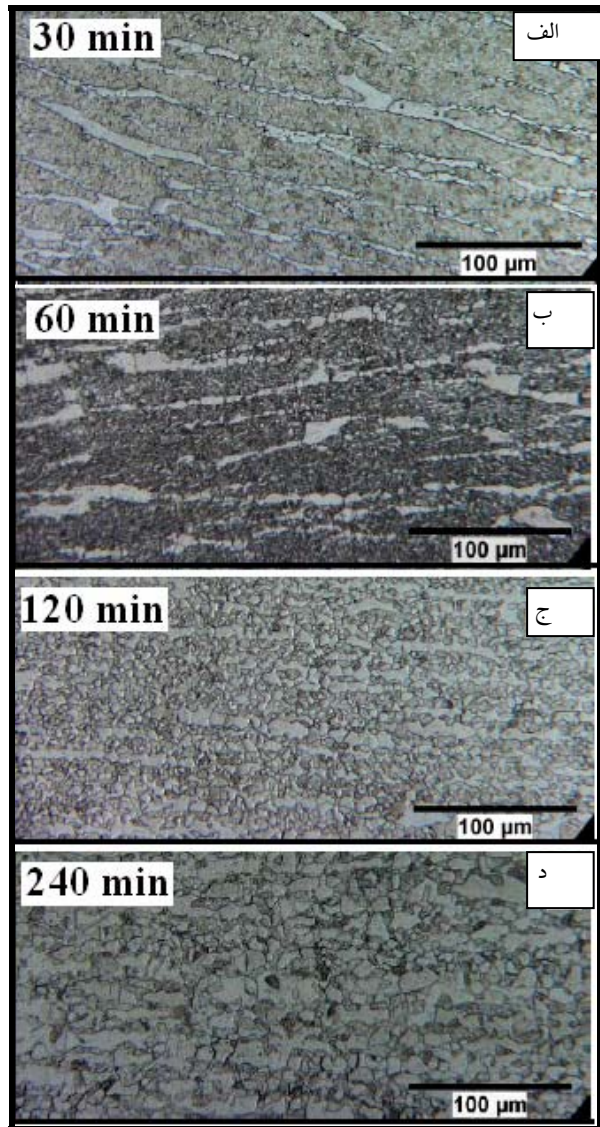


شکل (۳): تأثیر مدت زمان آئیل بعد از پرس گرم بر ریزساختار فولاد 9Cr-1Mo در دمای آئیل  $800^{\circ}\text{C}$

بنابراین ریزساختار دوفازی فریتی- مارتنزیتی فولاد 9Cr-1Mo پس از آئیل به مدت زمان ۲۴۰ دقیقه، در این دما به ریزساختار کاملاً فریتی استحاله پیدا کرده است (شکل ۳-د).

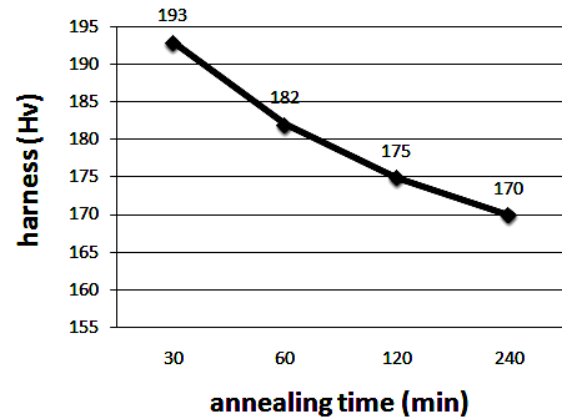
حضور مرزدانه های موج دار در نقاط مختلف نمونه نشان دهنده پیشرفت فرآیندهای نرم شوندگی شده و انجام تبلور مجدد تحت مکانیزم برآمده شدن مرز [۹].

این مکانیزم شامل برآمده شدن بخشی از مرزدانه اولیه است که باعث باقی ماندن ناحیه عاری از نابجایی در پشت مرز در حال مهاجرت می شود. وقوع این مکانیزم به ویژه در کرنش های پایین



شکل (۶): تأثیر مدت زمان آئیل بعد از پرس گرم بر ریزساختار فولاد 9Cr-1Mo در دمای آئیل ۹۰۰°C.

مطابق شکل (۷) این فرآیند توسط تنظیم زاویه تماس در نقطه اتصال سه گانه مرزدانه و مرز فازی آغاز می‌شود. نیروی محرکه برای پیشرفت بعدی به سمت ساختار کروی‌تر و شکسته شدن لایه‌های فازی توسط کاهش انرژی سطحی فراهم می‌شود [۱۱]. ظهور دانه‌های جدید فریت در ریزساختار با افزایش زمان آئیل، مبین انجام استحاله آستنیت به فریت است.



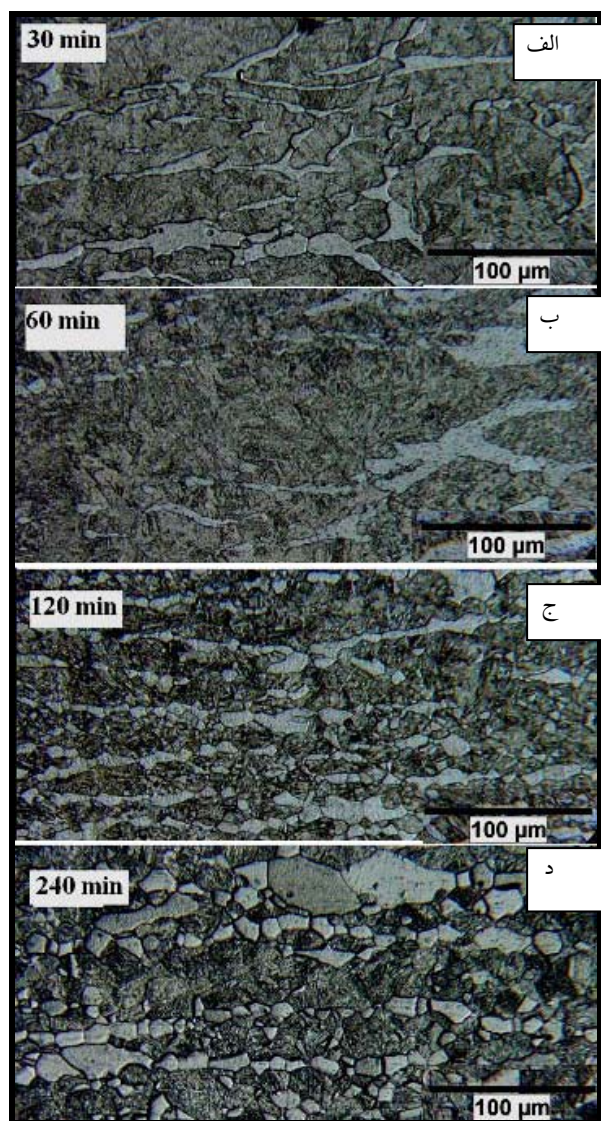
شکل (۵): تغییرات سختی نمونه‌های آئیل شده در دمای ۸۰۰°C با زمان‌های آئیل مختلف.

افزایش زمان آئیل قابل مشاهده است. با استحاله زمینه مارتنزیتی به فریتی و نیز رخ دادن تبلور مجدد در زمینه فریتی به تدریج کاهش سختی مشاهده می‌شود. رخ دادن تبلور مجدد فریت و آزاد شدن تنش سبب کاهش سختی شده و پس از زمان آئیل ۲۴۰ دقیقه کمترین مقدار سختی (حدود ۱۷۰ Hv) حاصل شده است.

در شکل (۶) تحولات ریزساختاری اتفاق افتاده در جریان آئیل در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان‌های مختلف نشان داده شده است.

تغییراتی در باندهای فریت اولیه اتفاق افتاده و به تدریج باندهای فریتی اولیه خرد شده‌اند. به علاوه دانه‌های جدید فریت در ریزساختار ظاهر شده است. در نهایت در مدت زمان آئیل ۲۴۰ دقیقه (شکل ۶-د) دانه‌های فریت به تعداد فوق‌العاده زیاد در ساختار به صورت تقریباً همگن ظاهر شده‌اند.

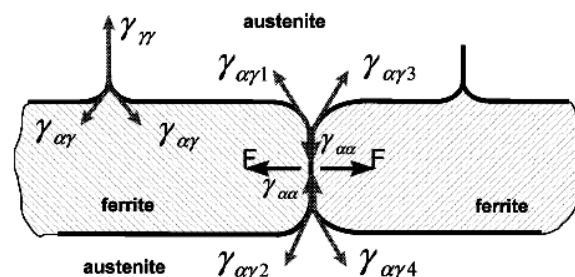
در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد فولاد 9Cr-1Mo در ناحیه دوفازی فریتی-آستنیتی قرار دارد. خرد شدن باندهای فریتی با افزایش زمان، در محل برخورد دانه‌ها رخ می‌دهد. در نقطه اتصال سه گانه که متشکل از یک مرزدانه و دو مرز بین فازی است، داخل شدن فاز ثانویه در طول مرزدانه‌ها در ساختار باند فریتی سبب شکسته شدن آن به اجزای ریزتر می‌شود.



شکل (۸): تأثیر مدت زمان آئیل بعد از پرس گرم بر ریزساختار فولاد 9Cr-1Mo در دمای آئیل ۱۰۰۰°C.

افزایش زمان آئیل سبب ایجاد دانه‌های جدید فریت بیشتری در زمینه مارتنزیتی شده است. اما مسأله مشخص این است که پس از زمان نگهداری ۲۴۰ دقیقه، ظهور دانه‌های فریت به تعداد زیاد در ساختار مشاهده نمی‌شود و ساختار همگن مشابه با دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده نمی‌شود، علاوه بر اینکه در مدت زمان مشابه دانه‌ها نیز درشت‌ترند.

با توجه به اینکه فولاد 9Cr-1Mo در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در ناحیه تک‌فازی آستنیت قرار دارد، به نظر می‌رسد



شکل (۷): طرح ساده‌ای از آرایش محل تماس دانه‌های فریت، آستنیت و کشش‌های سطحی در نقطه اتصال سه‌گانه [۱۱].

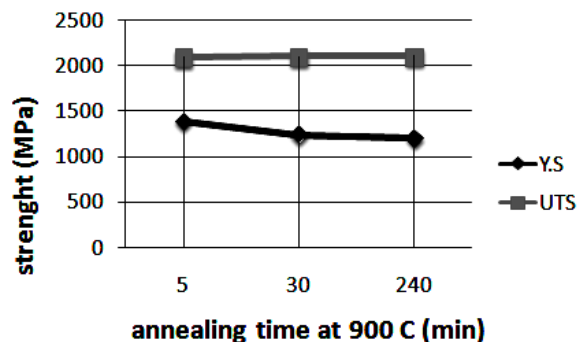
در فولادهای دوفازی، در صورت انجام آئیل در محدوده دمایی استحاله، رقابتی بین فرآیندهای نرم‌شوندگی و استحاله فازی جهت مصرف کردن نیروی محرکه حاصل از تغییر شکل وجود دارد معمولاً تحول فازی، کل انرژی ذخیره شده ناشی از تغییر شکل در ساختار را مصرف کرده و بدین وسیله می‌تواند وقوع تبلور مجدد را به طور کامل منتفی نماید [۵].

در صورت انجام تبلور مجدد آستنیت، پس از سرد شدن تعادلی آستنیت به فریت استحاله می‌یابد و افزایش دانه‌های فریت در ریزساختار توجیه می‌شود اما به دلیل سرد کردن غیرتعادلی نمونه‌های آئیل شده (کوئچ در آب)، ظهور دانه‌های فریتی به تعداد زیاد در ریزساختار مبین انجام استحاله فازی آستنیت به فریت است که این استحاله با صرف انرژی ذخیره شده ناشی از تغییر شکل، از انجام تبلور مجدد جلوگیری کرده است.

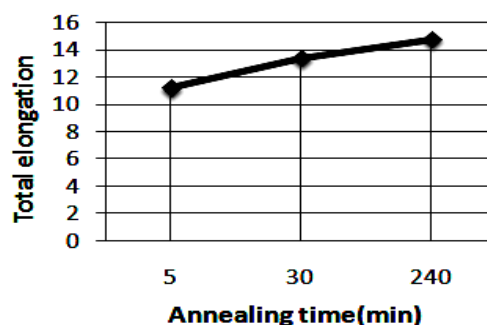
در شکل (۸) تحولات ریزساختاری اتفاق افتاده در جریان آئیل در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان‌های مختلف نشان داده شده است. نتیجه آئیل در این دما، تقریباً مشابه با دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

چنانچه از تصاویر میکروسکوپ نوری مشخص است در مدت زمان نگهداری ۳۰ دقیقه ریزساختار متشکل از باندهای فریتی در زمینه مارتنزیتی است و پس از ۶۰ دقیقه دانه‌های ریز فریت در زمینه شروع به جوانه‌زنی کرده‌اند.

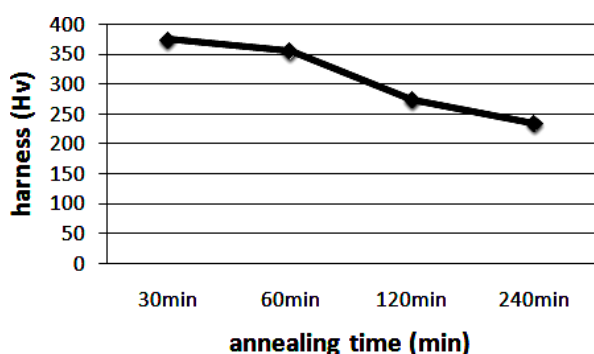
ایجاد ساختار بمبو شکل و پس از آن مرواریدی شدن باندهای فریتی موجود از قبل در زمان‌های آئیل بالاتر در اینجا نیز مشاهده می‌شود.



شکل (۱۰): تأثیر زمان آنیل بر استحکام تسلیم و UTS.



شکل (۹): تأثیر زمان آنیل بر ازدیاد طول مجموع.



شکل (۱۱): تغییرات سختی با افزایش دمای آنیل در دمای ۹۰۰°C.

در مورد فولاد 9Cr-1Mo نتایج تست کشش مبین بهبود داکتیلیته و چقرمگی با افزایش زمان آنیل است. از آنجا که افزایش زمان آنیل، افزایش مقدار فاز نرم فریت در ریزساختار و کاهش مقدار فاز سخت و ترد مارتنزیت را سبب شده، تنش تسلیم کاهش یافته و به تدریج ازدیاد طول مجموع که به عنوان معیار داکتیلیته در نظر گرفته شده، افزایش یافته است. بنابراین ریزساختار فولاد با توزیع همگن دانه‌های فریت در زمینه مارتنزیت تمپر شده ترکیب خوبی از استحکام و داکتیلیته را ارائه می‌کند. کاهش سختی با افزایش زمان نگهداری در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد را می‌توان ناشی از افزایش مقدار فاز نرم فریت دانست.

#### ۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر پس از انجام مرحله ریخته‌گری فولاد 9Cr-1Mo مارتنزیتی-فریتی، به منظور بهبود خواص مکانیکی و

فولاد در ناحیه تک‌فازی آستنیت سبب استحاله بازگشتی فریت به آستنیت شده است.

مکانیزم ایجاد تغییرات در باندهای فریتی (بمبو شکل شدن و سپس مرواریدی شدن) مشابه با دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد است که در اینجا مجدداً ذکر نمی‌شوند.

البته دمای نگهداری بالاتر سبب درشت‌تر شدن دانه نسبت به دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد شده است. با توجه به اینکه توزیع ریزساختار همگنی از آنیل در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد حاصل نمی‌شود، به نظر می‌رسد برای ایجاد ریزساختار مناسب از نظر ریزساختار و خواص مکانیکی، دمای آنیل ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد مناسب نمی‌باشد.

ریزساختار دوفازی ناشی از آنیل در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد با توزیع دانه همگن‌تر و ریزتر مناسب‌تر به نظر می‌رسد پس خواص مکانیکی نمونه‌های آنیل شده در مورد نمونه‌های آنیل شده در این دما در دمای محیط مورد بررسی قرار گرفت.

در نمودار شکل (۹) و (۱۰) تغییرات استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول مجموع با افزایش زمان برای نمونه‌های آنیل شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های نگهداری ۵، ۳۰ و ۲۴۰ دقیقه آورده شده است.

نمودار شکل (۱۱) تغییرات سختی با دما را نشان می‌دهد. خواص کششی و شکل‌پذیری فولادهای دوفازی فریتی-مارتنزیتی متأثر از پارامترهایی مثل کسر حجمی اجزاء، اندازه و نحوه توزیع فازهای تشکیل‌دهنده ریزساختار است [۱۲].

- [2] R. L. Klueh, A. T. Nelson, "Ferritic / Martensitic Steels for Next Generation Reactors", Journal of Nuclear Materials, 371, pp. 37-52, 2007.
- [3] N. Parvathavarthini, S. Saroja and R. K. Dayal, "Influence of Microstructure on the Hydrogen Permeability of 9%Cr-1%Mo Ferritic Steel", Journal of Nuclear Materials, 264, pp. 35-47, 1999.
- [4] G. Gupta, B. Alexandereanu and G. S. Was, "Grain Boundary Engineering of Ferritic-Martensitic Alloy T91", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 35A, pp. 717-719, 2004.
- [۵] ک. دهقانی، ا. مؤمنی، متالورژی عملیات ترمودینامیکی (جلد اول: دسته‌بندی، مکانیزم‌های استحکام‌دهی و فرآیندهای ترمیم)، انتشارات فدک ایستاتیس، تهران، ۱۳۸۶.
- [6] H. Luo, J. Sietsma and S. Van der Zwaag, "A Novel Observation of Strain-Induced Ferrite-to-Austenite Retransformation after Intercritical Deformation of C-Mn Steel", Metallurgical and Materials Transaction A Vol. 35A, 2004.
- [7] T. Siwecki, G. Enberge, "Thermomechanical Processing in Theory, Modeling a Practice", Sweden, pp. 121-143, 1996.
- [8] B. K. Jha, P. Jha and C. D. Singh, "Process Technology for the Continuous Hot Band Annealing of 17%Cr Ferritic Stainless Steel", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 11, No. 2, pp.180-186, 2002.
- [9] M. Natori, Y. Futamura, T. Tsuchiyama, S. Takaki, "Difference in Recrystallization Behavior between Lath Martensite and Deformed Ferrite in Ultralow Carbon Steel", Scripta Materialia, Vol. 53, pp. 603-608, 2005.
- [10] I. Shimizu, "Theories and Applicability of Grain Size Piezometers: The Role of Dynamic Recrystallization Mechanisms", Journal of Structural Geology, 30, pp. 899-917, 2008.
- [11] J. Keichel, J. Foct and G. Gottstein, "Deformation and Annealing Behavior of Nitrogen Alloyed Duplex Stainless Steels. Part II: Annealing", ISIJ International, Vol. 43, pp. 1788-1794, 2003.
- [12] A. Bag, K. K. Ray and E. S. Dwarakadasa, "Influence of Martensite Content and Morphology on Tensile and Impact Properties of High-Martensite Dual-Phase Steels", Metallurgical and Materials Transaction A, Vol. 30A, pp. 1193-1202, 1999.
- ریزساختاری فولاد حاصل، پس از انجام یک مرحله شکل‌دهی گرم (فورج گرم یک‌جهته)، عملیات آنیل در منطقه تک‌فازی فریت (دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد)، دو فازی فریتی - مارتنزیتی (دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) و تک‌فازی آستنیتی (دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) اجرا شد.
- یافته‌های حاصل از این تحقیق به طور خلاصه عبارتند از:
- ۱- ریزساختار تغییر شکل یافته متشکل از باندهای فریتی در زمینه مارتنزیتی است.
- ۲- آنیل در محدوده تک‌فازی فریتی، سبب تبلور مجدد مارتنزیت و ایجاد ریزساختاری کاملاً فریتی پس از مدت زمان نگهداری ۲۴۰ دقیقه می‌شود.
- ۳- با افزایش زمان آنیل در محدوده تک‌فازی فریتی، سختی به سبب استحاله مارتنزیت به فریت و فرآیندهای نرم‌شوندگی کاهش می‌یابد.
- ۴- آنیل در ناحیه دوفازی فریتی - آستنیتی (دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) سبب ایجاد ریزساختار همگنی از دانه‌های فریت در زمینه مارتنزیتی پس از زمان ۲۴۰ دقیقه شده است.
- ۵- افزایش زمان آنیل در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد (ناحیه دوفازی  $\alpha + \gamma$ ) سبب افزایش کسر حجمی فاز فریت و در مقابل کاهش فاز مارتنزیت می‌شود. این پدیده ناشی از استحاله آستنیت به فریت است.
- ۶- آنیل در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد ریزساختار ناهمگنی از دانه‌های فریتی در زمینه مارتنزیتی ایجاد می‌کند.
- ۷- آنیل در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، علاوه بر ایجاد ریزساختار همگن، بهبود خواص مکانیکی یعنی بهبود همزمان چقرمگی و داکتیلیته را سبب شده است.

## ۶- پی‌نوشت

1- Bulging

## ۵- مراجع

- [1] R. L. Klueh, D. R. Harries, "High-Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications, Chapter 2: Development of High (7-12%) Chromium Martensitic Steels", American Society for Testing and Materials, WestConshohocken, PA, 2001.