

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



بررسی خواص مکانیکی فولاد کم کربن نانوساختار شده به روش نورد سرد- آنیل

احسان قاسمعلی^۱، محسن عسکری پیکانی^۲، محمد نصر اصفهانی^۳، احمد کرمانپور^۴، عباس نجفی زاده^۵

چکیده

در این تحقیق ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد کم کربن (C ۰/۱۳٪) در طی فرایند نورد سرد و آنیل مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها در محدوده دمایی ۹۵۰ تا ۱۰۵۰ °C بمدت ۵۰ دقیقه آستنیته و سپس در محلول آب نمک + یخ + الکل کوئنچ شدند. میزان فاز مارتنزیت در ریزساختار، بوسیله متالوگرافی رنگی تخمین زده شد. بمنظور کاهش تردی ساختار مارتنزیتی، نمونه‌های کوئنچ شده در دمای ۱۸۰ °C بمدت ۳۰ دقیقه پیرسازی شدند. این نمونه‌ها به میزان ۹۰٪ نورد سرد و سپس در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۶۰۰ °C آنیل شدند. بررسی‌های میکروسکوپی نشان دهنده ریزساختار چند فازی شامل دانه‌های هم محور فریت و بسته‌های کوچک مارتنزیت تمپر شده بود. نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان داد که محدوده دمایی مناسب جهت آنیل برای فولاد مورد استفاده در محدوده ۴۰۰ تا ۵۰۰ °C می‌باشد. متوسط اندازه دانه‌های فریت در حدود ۲۰۰ نانومتر بود که بعد از آنیل در دمای ۴۵۰ °C بمدت ۹۰ دقیقه حاصل گردید. این فولاد نانوساختار دارای استحکام نهایی ۱۵۸۵ MPa و درصد ازدیاد طول ۱۴٪ بود.

واژه‌های کلیدی: اندازه دانه نانو، فولاد کم کربن، نورد سرد، آنیل، خواص مکانیکی، فرایند مارتنزیتی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان، ehsan_gh@ma.iut.ac.ir

۲و۳- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، paykani2004@yahoo.com

۴- استادیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ahmad_k@cc.iut.ac.ir

۵- استاد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، a-najafi@cc.iut.ac.ir

۱- مقدمه

در طول دو دهه اخیر، مطالعات گسترده‌ای بر روی روش‌های تولید مواد نانوساختار و بسیار ریزدانه انجام شده است [۱-۱۰]. در میان روش‌های فوق، فرایند مارتنزیتی یکی از فرایندهای ترمومکانیکی پیشرفته است که شامل سه مرحله (۱) کوئنچ، (۲) نورد سرد و (۳) آنیل می‌باشد. این فرایند مزایایی نظیر امکان تولید نمونه‌های بدون میکروتخلل و آلودگی، میزان تغییر شکل پلاستیکی کم نسبت به سایر روش‌های مکانیکی و قابلیت تولید صنعتی را داراست [۵].

Tsuji و همکاران از فرایند مارتنزیتی جهت دستیابی به ساختار بسیار ریز دانه در فولاد کم کربن استفاده کردند [۱۱-۱۳]. ساختار نهایی شامل دانه‌های بسیار ریز فریت و بسته‌های بسیار ریز مارتنزیت تمپر شده بود. متوسط اندازه دانه فولادهای کم کربن بسیار ریز دانه که توسط این محققین تولید گردیده در محدوده ۱۸۰ تا ۳۱۶ نانومتر گزارش شده است [۱۱-۱۳]. با این وجود، توجه کمی به خواص مکانیکی فولادهای کم کربن بسیار ریز دانه و نانوساختار شده است.

هدف از این تحقیق، بررسی تغییرات ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد کم کربن (C: ۰/۱۳) با ساختار اولیه مارتنزیت طی فرایند نورد سرد و سپس آنیل (فرایند مارتنزیتی) در شرایط متفاوت به منظور دستیابی به ساختار دانه‌ای نانومتری در این فولاد می‌باشد.

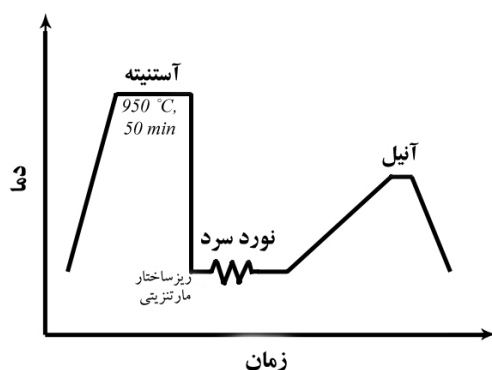
۲- مواد و روش تحقیق

جدول ۱ ترکیب شیمیایی ورق فولاد کم کربن نورد گرم شده مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. بمنظور سهولت در انجام نورد سرد، نمونه‌هایی به ابعاد ۴۵×۳۰×۶/۵ mm از ورق مذکور جدا گردید.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد کم کربن مورد استفاده در این تحقیق (درصد وزنی).

C	Mn	Si	S	P	Fe
۰/۱۳	۰/۵۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸	باقیمانده

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد اولین مرحله فرایند مارتنزیتی، دستیابی به حداکثر مقدار مارتنزیت در ریزساختار می‌باشد. بمنظور انتخاب دمای بهینه آستنیت کردن، نمونه‌ها در محدوده دمایی ۹۵۰ تا ۱۰۵۰ °C بمدت ۵۰ دقیقه در اتمسفر براده چدن آستنیت و سپس در محلول آب نمک + اتانول + یخ کوئنچ گردیدند. برای کاهش تردی فاز مارتنزیت، نمونه‌های کوئنچ شده، در دمای ۱۸۰ °C بمدت ۳۰ دقیقه نگهداری و سپس به میزان ۹۰٪ نورد سرد گردیدند. نمونه‌های نورد سرد شده، در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۶۰۰ °C در زمانهای ۵ تا ۱۲۰ دقیقه در اتمسفر براده چدن تحت عملیات آنیل قرار گرفتند.



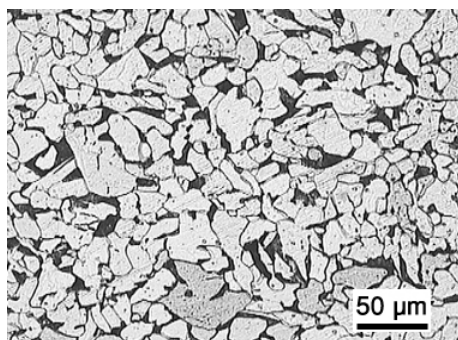
شکل ۱. شماتیک فرایند مارتنزیتی.

ساختار نمونه‌ها توسط محلول اچ نایتال ۲٪ حکاکی شد و از دستگاه SEM PHILIPS XL30 با ولتاژ ۱۵ کیلو ولت بمنظور بررسی ریزساختار استفاده گردید. اندازه دانه نمونه‌ها بوسیله نرم افزار آنالیز تصویری (Image-Tools 3.0) اندازه گیری شد. در فولادهای کم کربن با درصد کربن کمتر از ۰/۲ درصد وزنی، شبکه ساختمانی فاز مارتنزیت بسیار نزدیک به شبکه مکعبی بوده و بنابراین بوسیله روشهایی نظیر پراش پرتو ایکس امکان تخمین میزان فاز مارتنزیت وجود ندارد [۱۴]. یکی از ساده‌ترین روش‌ها جهت حل این مشکل، استفاده از متالوگرافی رنگی است [۱۵]. در این روش، بر مبنای ترکیب شیمیایی، هر فاز به رنگ متفاوتی در نور پلاریزه آشکار می‌گردد. در تصاویر میکروسکوپ نوری با استفاده از محلول اچ رنگی، فاز مارتنزیت به رنگ آبی و قهوه‌ای مایل به آبی (فاز تیره‌تر) آشکار می‌شود. رنگ‌های نارنجی و زرد (فاز روشن‌تر) نشان دهنده فازهای پرلیت و فریت است [۱۵]. در این تحقیق محلول اچ رنگی شامل ۳ گرم پتاسیم متابی سولفیت ($K_2S_2O_5$)، ۱۰ گرم سدیم دی سولفات ($Na_2S_2O_3$) و ۱۰۰ میلی لیتر آب دیونیزه شده بود.

نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E8M با عرض ۱۲/۵ mm و طول باریکه ۵۰ mm جهت آزمون کشش آماده گردید. آزمون کشش در دمای محیط با استفاده از دستگاه Hounsfield H50KS با نرخ کرنش $10^{-4} \times 1/5$ بر ثانیه انجام شد. آزمون سختی به روش ویکرز انجام گرفت.

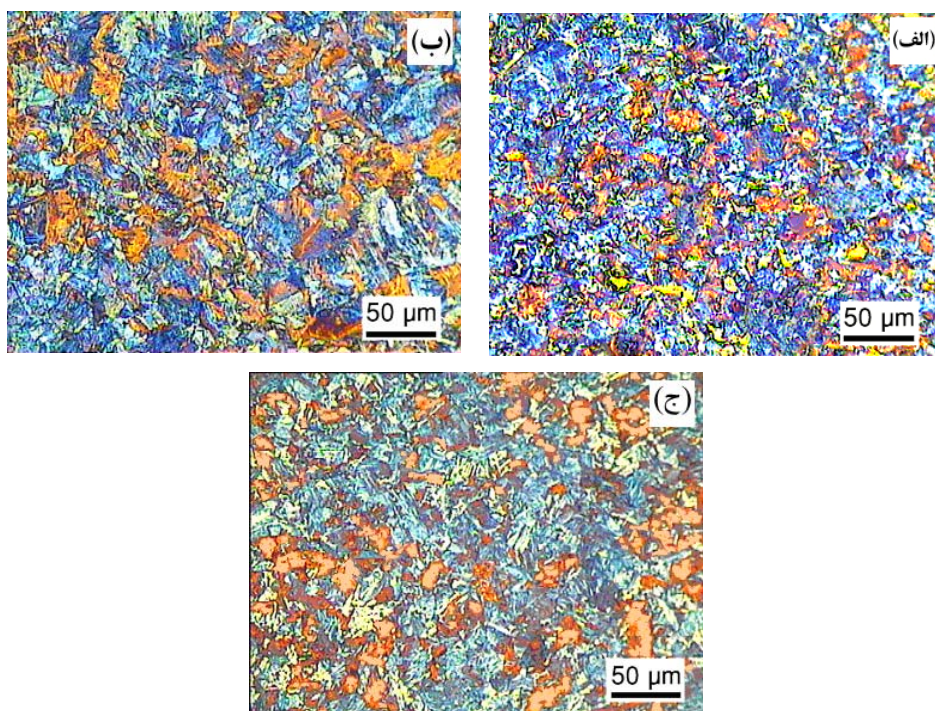
۳- یافته‌ها

شکل ۲ ساختار میکروسکوپی نمونه‌های فولاد کم کربن خام را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، ریزساختار شامل ۹۰ درصد پرلیت و کمتر از ۱۰ درصد فریت با متوسط اندازه دانه حدود ۲۰ میکرون است.



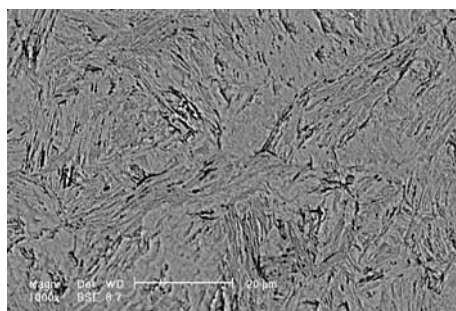
تصویر ۲. ساختار نمونه خام اولیه شامل فازهای فریت و پرلیت.

به منظور دستیابی به حداکثر مقدار مارتنزیت در ریزساختار، بر اساس دیاگرام آهن-کربن، دماهای ۹۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۵۰ °C جهت آستنیت کردن نمونه‌ها انتخاب گردید. شکل ۳ نشان دهنده تصاویر متالوگرافی رنگی نمونه‌های کوئنچ شده از سه دمای آستنیت متفاوت ذکر شده می‌باشد.



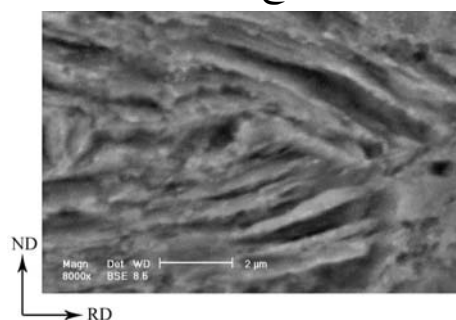
شکل ۳. تصاویر متالوگرافی رنگی نمونه‌های کوئنچ شده در (الف) ۹۵۰ °C، (ب) ۱۰۰۰ °C و (ج) ۱۰۵۰ °C.

تصویر میکروسکوپ الکترونی ساختار مارتنزیتی نمونه کوئنچ شده از دمای ۹۵۰ °C در شکل ۴ نشان داده شده است.



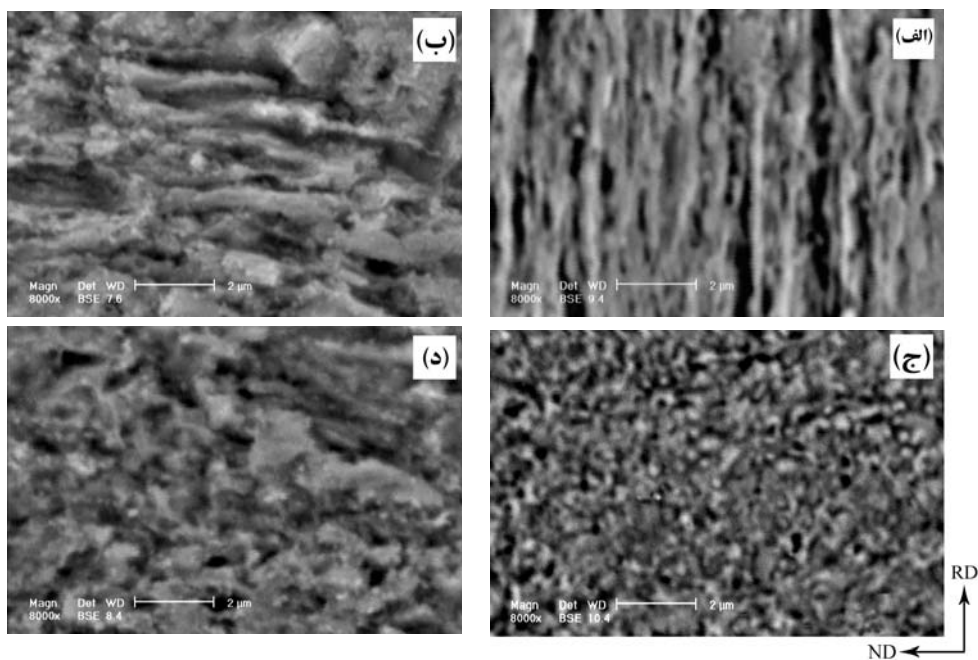
شکل ۴. تصوير میکروسکوپ الکترونی رویشی ساختار مارتنزیتی قبل از نورد سرد.

شکل ۵ تیغه های مارتنزیتی خرد شده بعد از کوئنچ و ۹۰ درصد نورد سرد فولاد کم کربن را نشان می دهد.



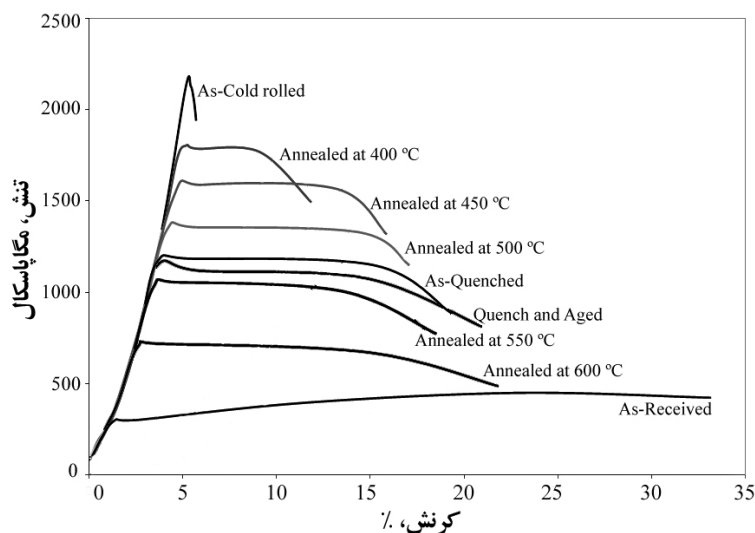
شکل ۵. تصوير میکروسکوپ الکترونی رویشی نمونه کوئنچ شده از دمای 950°C در آب نمک و یخ بعد از ۹۰٪ نورد سرد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه های کوئنچ شده بعد از ۹۰ درصد نورد سرد و آنیل در دمای 450°C در زمان های متفاوت در شکل ۶ نشان داده شده است.



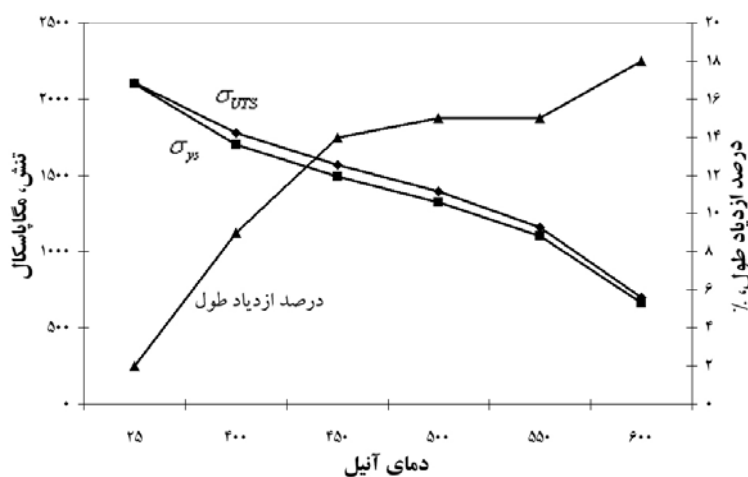
شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی نمونه ۹۰ درصد نورد سرد شده: (الف) قبل از آنیل، و آنیل شده در دمای 450°C ب مدت (ب) ۴۵ دقیقه، (ج) ۹۰ دقیقه، (د) ۱۴۰ دقیقه.

شکل ۷ نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های ۹۰ درصد نورد سرد و آنیل شده در دماهای مختلف ب مدت ۹۰ دقیقه را نشان می‌دهد.



شکل ۷. مقایسه رفتار تنش-کرنش فولاد کم کربن در شرایط متفاوت.

شکل ۸ نشان دهنده تغییرات تنش تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول نمونه‌های نورد سرد و آنیل شده در دماهای مختلف ب مدت ۹۰ دقیقه بر حسب دمای آنیل است. نتایج آزمایش‌های کشش و سختی در جدول ۲ خلاصه شده است. همان روند حاکم بر استحکام کششی، در مورد سختی نیز مشاهده گردید.

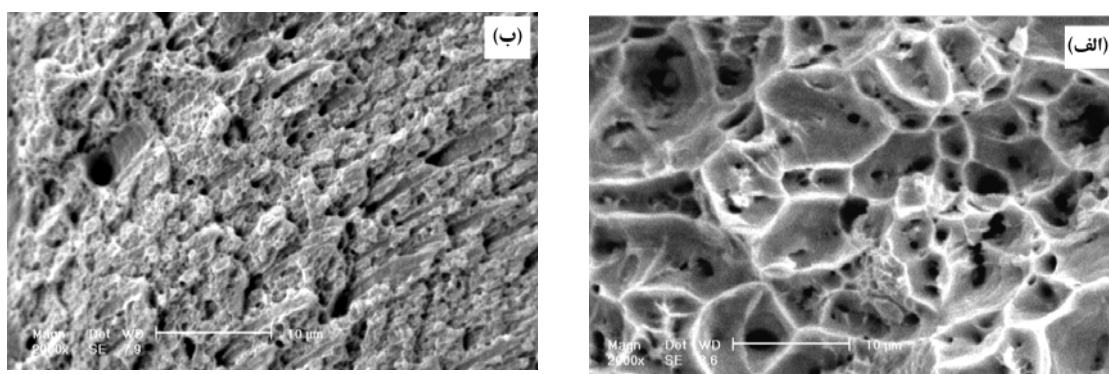


شکل ۸. تغییرات استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول در نمونه‌های ۹۰ درصد نورد سرد شده بر حسب دمای آنیل.

جدول ۲. خواص مکانیکی نمونه‌های ۹۰ درصد نورد سرد و آنیل شده در دماهای مختلف بمدت ۹۰ دقیقه.

نمونه	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	ازدياد طول (%)	سختی (VHN)
خام	۲۷۰	۴۱۰	۳۳	۱۸۰
کوئنچ شده	۱۱۵۰	۱۲۱۰	۱۶	۳۸۰
۹۰ درصد نورد سرد	۲۱۰۰	۲۱۸۰	۲	۶۲۰
آنیل در دمای °C ۴۰۰	۱۷۵۰	۱۷۸۰	۹	۴۵۰
آنیل در دمای °C ۴۵۰	۱۵۴۰	۱۵۸۵	۱۴	۴۰۷
آنیل در دمای °C ۵۰۰	۱۳۰۵	۱۳۷۰	۱۵	۳۵۲
آنیل در دمای °C ۵۵۰	۱۰۰۶	۱۰۵۴	۱۵	۲۷۴
آنیل در دمای °C ۶۰۰	۶۶۷	۶۹۸	۱۸	۱۹۶

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح شکست پس از آزمون کشش در تصویر ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح شکست (الف) نمونه اولیه (ب) ۹۰ درصد نورد سرد و آنیل شده در دمای °C ۴۵۰ بمدت ۹۰ دقیقه.

۴- بحث

باتوجه به شکل ۳، بیشترین مقدار مارتنزیت (۷۵ درصد) در دمای آستنیت °C ۹۵۰ بدست آمد (تصویر الف-۳). لازم به ذکر است که در تصاویر سیاه و سفید، فاز مارتنزیت به رنگ تیره و فازهای فریت و پرلیت به رنگ روشن دیده می‌شوند.

همانگونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، فاز مارتنزیت دارای پراکندگی همگنی در ریزساختار است که این امر در مرحله نورد سرد و آنیل بمنظور دستیابی به ساختار بسیار ریزدانه ضروری است.

تیغه‌های خرد شده مارتنزیتی قابل مشاهده در شکل ۵ همراه با دانسیته بالای نابجایی‌ها مکان‌های مناسبی جهت جوانه زنی دانه‌های جدید در حین مرحله تبلور مجدد و ریز شدن دانه‌هاست.

در شرایط نورد سرد تیغه‌های مارتنزیت با عرض ۲۵۰ میکرون عموماً در راستای موازی با جهت نورد قرار گرفته‌اند (شکل ۶- الف). ساختار نمونه آنیل شده در دمای 450°C بمدت ۴۵ دقیقه در تصویر ۶- ب نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، ریزساختار بصورت تبلور مجدد جزئی حاوی مقداری تیغه‌های مارتنزیت می‌باشد. تصویر ۶- ج ساختار تبلور مجدد کامل بعد از آنیل در دمای 450°C بمدت ۹۰ دقیقه را نشان می‌دهد. این ریزساختار شامل دانه‌های بسیار ریز فریت هم محور و بسته‌های بسیار ریز مارتنزیت تمپر شده است. متوسط اندازه دانه در این ریزساختار حدود ۲۰۰ نانو متر بود. با افزایش زمان آنیل، رشد دانه اتفاق افتاد (تصویر ۶- د).

باتوجه شکل ۷، نمونه اولیه با ساختار فریت - پرلیت نمودار تنش - کرنش متداول برای فولادهای کم کربن همراه با افت تنش تسلیم و حضور باند لودر را نشان می‌دهد. بعد از کوئنچ و ۹۰٪ نورد سرد، استحکام تسلیم فولاد کم کربن تا 2100 MPa و استحکام کششی آن تا 2180 MPa افزایش یافته و درصد ازدیاد طول یکنواخت نسبت به حالت اولیه کاهش یافت. با افزایش دمای آنیل، درصد ازدیاد طول افزایش و استحکام کششی کاهش یافت.

همانگونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، با افزایش دمای آنیل، استحکام تسلیم و استحکام کششی کاهش و درصد ازدیاد طول افزایش یافت. افزایش دمای آنیل از دمای 400°C به 450°C منجر به افزایش ۳۶ درصدی انعطاف پذیری و کاهش ۱۰ درصدی استحکام کششی فولاد شد. درحالیکه با افزایش دمای آنیل از دمای 450°C به 500°C منجر به افزایش ۶ درصدی انعطاف پذیری و کاهش ۱۵ درصدی استحکام کششی شد. لذا می‌توان گفت که دمای آنیل بهینه جهت دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب، بین دمای 400°C تا 450°C بمدت ۹۰ دقیقه می‌باشد.

تصاویر شکست مواد اولیه، نشان دهنده دیمپل‌های هم محور عمیق است که مشخصه شکست نرم در فولادها می‌باشد (شکل ۹- الف). نمونه‌های نورد سرد و آنیل شده در دمای 450°C نیز شکست نوع نرم را نشان می‌دهند با این تفاوت که دیمپل‌ها در این حالت ریزتر بوده و حالت برشی دارند (تصویر ۹- ب). این شکل نشان می‌دهد که نوع شکست در این نمونه، شکست داکتیل برشی است. این نوع شکست مشخصه فلزات تبلور مجدد شده می‌باشد [۱۶]. ابعاد کوچک دیمپل‌های مذکور منسوب به ساختار بسیار ریز دانه در نمونه است.

۵- نتیجه گیری

۱- در فرایند مارتنزیتی، خرد شدن تیغه‌های مارتنزیت نقش مهمی در دستیابی به اندازه دانه نانو در فولادهای کم کربن ایفا می‌نماید.

- ۲- تغييرات ريزساختار و خواص مكانيكي فولاد مورد نظر نشان داد كه آنيل نمونه ۹۰ درصد نورد سرد شده در دمای °C ۴۵۰ بمدت ۸۰ تا ۹۰ دقيقه، منجر به ايجاد ريزساختاری با اندازه دانه حدود ۲۰۰ نانومتر، استحکام کششی ۱۵۸۵ Mpa و درصد ازدیاد طول يکنواخت ۱۴٪ گرديد.
- ۳- سطح شکست نمونه های نورد سرد-آنيل شده نشان دهنده ديمپل های برشی بسيار ريزی است كه تأيیدی بر ساختار بسيار ريزدانه فولاد کم کربن می باشد.

۶- منابع و مراجع

- [1] A. Najafizadeh, J.J. Jonas and S. Yue, "Grain refinement by dynamic recrystallization during the simulated warm-rolling of interstitial free steels", Metallurgical Transactions A 23A, (1992) 2607-2617.
- [2] P.D. Hodgson, M.R. Hikson and R.K. Gibbs, "Ultrafine ferrite in low carbon steel", Scripta Mater. 40 (1999) 1179-1184.
- [3] D.B. Witkin and E.J. Lavernia, "Synthesis and mechanical behavior of nanostructured materials via cryomilling", Prog. Mater. Sci. 51 (2006), 1-60.
- [4] G. E. Fougere, J. R. Weertman and R. W. Siegel, "Processing and mechanical behavior of nanocrystalline Fe", Nanostruc. Mater. 5 (1995), 127-134.
- [5] P.J. Hurley, P.D. Hodgson and B.C. Muddle, "Analysis and characterisation of ultra-fine ferrite produced during a new steel strip rolling process" Scripta Mater. 40 (1999) 433-438.
- [6] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev and I.V. Alexandrov, "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation", Prog. Mater. Sci. 45 (2000) 103-189.
- [7] J.W. Park, J.W. Kim and Y.H. Chung, "Grain refinement of steel plate by continuous equal-channel angular process", Scripta Mater. 51 (2004) 181-184.
- [8] E. Schafner and R. Pippan, "Effect of thermal treatment on microstructure in high pressure torsion (HPT) deformed nickel", Mater. Sci. Eng. A 387-389 (2004) 799-804.
- [9] Dong Hyuk Shin, Byung Cheol Kim, Yong-Seog Kim and Kyung-Tae Park, "Microstructural evolution in a commercial low carbon steel by equal channel angular pressing", Acta mater. 48 (2000) 2247-2255.
- [10] A. Ma, Y. Nishida, K. Suzuki, I. Shigematsu and N. Saito, "Characteristics of plastic deformation by rotary-die equal-channel angular pressing", Scripta Mater. 52 (2005) 433-437.
- [11] R. Ueji, N. Tsuji, Y. Minamino and Y. Koizumi, "Ultragrain refinement of plain low carbon steel by cold-rolling and annealing of martensite", Acta Mater. 50 (2002) 4177-4189.
- [12] N. Tsuji, R. Ueji, Y. Minamino and Y. Saito, "A new and simple process to obtain nano-structured bulk low-carbon steel with superior mechanical property", Scripta Mater. 46 (2002) 305-310.
- [13] R. Ueji, N. Tsuji, Y. Minamino and Y. Koizumi, "Effect of rolling reduction on ultrafine grained structure and mechanical properties of low-carbon steel thermomechanically processed from martensite starting structure", Sci. Technol. Adv. Mater. 5 (2004) 153-162.
- [14] D. Porter, "Phase Transformation in Metals and Alloys", Van Nostrand Reinhold, 1981.
- [15] E. Beraha, Color Metallography, Ohio American Society for Metals, 1977.
- [16] I. Barsoum and J. Faleskog, "Rupture mechanisms in combined tension and shear—Experiments", Int. J. Solids Struct. 44 (2007), 1768.

Investigating Mechanical Properties of a Nanostructured Low Carbon Steel Processed by Cold Rolling-Annealing Method

E. Ghassemali¹, M.A. Paykani², M.N. Esfahani³, A. Kermanpur⁴ and A. Najafizadeh⁵
ehsan_gh@ma.iut.ac.ir

Abstract

The microstructure evolution and improvement of mechanical properties of a 0.13% C low carbon steel during cold rolling and subsequent annealing (martensite process) were investigated. Specimens were austenitized at 950 °C for 50 min followed by quenching in ice-brine. The quenched specimens were cold rolled up to 90 % reduction and then annealed at temperatures from 400 to 600 °C for times ranging from 5 to 120 min. Microscopic observations showed a multi-phase structure composed of equiaxed ferrite grains and small blocks of tempered martensite. Results of mechanical tests showed that the optimum annealing temperature for the steel used was in the range of 400 to 450 °C. The mean ferrite grain size of about 200 nm was achieved by annealing at 450 °C for 90 min. This sample had the tensile strength of 1585 MPa with 14% uniform elongation.

Keywords: Nano grained structure; Low carbon steel; Cold rolling; Annealing; Mechanical properties; Martensite process.

1- MSc Student, Materials Dep., Isfahan University of Technology.

2- Graduate Student, Materials Dep., Isfahan University of Technology.

3- MSc Student, Materials Sci. & Eng. Dep., Sharif University of Technology.

4- Assistant Professor, Materials Dep., Isfahan University of Technology.

5- Professor, Materials Dep., Isfahan University of Technology.