

به نام خدا



مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

www.Iran-mavad.com



ارزیابی تأثیر اندازه دانه آستنیت اولیه در فرآیند مارتزیت و بررسی خواص مکانیکی حاصله

هومن حسنی^۱، عباس نجفی زاده^۲، علی شفیعی^۳، مهدی ایزدجو^۴، سمانه شریعتی^۵

چکیده

یکی از راه‌های کاهش اندازه دانه که در سال‌های اخیر بدان توجه بسیار شده است، فرآیند حرارتی-مکانیکی مارتزیت است که مشتمل بر نورد سرد و آنیل متعاقب می‌باشد. میزان ریزش اندازه دانه‌ها در فولادها توسط این فرآیند به متغیرهای مختلفی بستگی دارد. در این پژوهش تأثیر اندازه دانه آستنیت اولیه بر میزان کرنش اعمالی در حین نورد سرد و خواص مکانیکی حاصله در فولاد ساده کم کربن مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ‌های OM و SEM/EBSD انجام گرفت و به منظور ارزیابی خواص مکانیکی از آزمون‌های سختی سنجی و کشش استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد با کاهش اندازه دانه آستنیت اولیه، میزان کرنش اعمالی در حین نورد سرد جهت رسیدن به خواص مکانیکی مناسب کاهش خواهد یافت که این یک مزیت صنعتی محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی: اندازه دانه آستنیت اولیه، فرآیند مارتزیت، نورد سرد، خواص مکانیکی.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، اصفهان- فولادشهر- موسسه آموزش عالی صنعتی فولاد- کدپستی

۸۴۹۱۶۶۳۷۶۳ (Hoomat_sahoo@yahoo.com)

۲- استاد مهندسی مواد، اصفهان- فولادشهر- موسسه آموزش عالی صنعتی فولاد- کدپستی ۸۴۹۱۶۶۳۷۶۳

۳- دانشیار مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد - دانشگاه صنعتی اصفهان

۴- دانشجوی دکترای مهندسی مواد، استرالیا- دانشگاه سیدنی- دانشکده مهندسی هوافضا، مکانیک، مکاترونیک

۵- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، اصفهان- فولادشهر- موسسه آموزش عالی صنعتی فولاد- کدپستی

۸۴۹۱۶۶۳۷۶۳

مقدمه

خواص فلزات به شدت تحت تأثیر اندازه دانه می باشد. رابطه شناخته شده هال-پچ که افزایش در استحکام تسلیم را با کاهش اندازه دانه نشان می دهد در محدوده وسیعی از فلزات قابل استفاده است [۱].

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{1/2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که σ_y تنش تسلیم، σ_0 تنش اصطکاکی شبکه برای حرکت یک نابجایی منفرد، d اندازه دانه ها و k یک ثابت در ارتباط با میزان تأثیر مرزدانه ها در حرکت نابجایی ها می باشند. از این روست که امروزه ریز دانه کردن به عنوان یکی از روش ها جهت افزایش استحکام مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. همچنین این روش در میان مکانیزم های استحکام بخشی، تنها روشی است که استحکام و چقرمگی را به طور همزمان بهبود می بخشد. به منظور تولید مواد فوق ریز دانه دو روش عمده وجود دارد: یکی روش های موسوم به تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD) است که بعضی از آنها عبارتند از: نورد پیوندی تجمعی (ARB)، پیچش تحت فشار بالا (HPT) و فشار زاویه ای با کانال های برابر (ECAP). در این فرآیندها برای رسیدن به دانه های با اندازه زیر میکرون کرنش بسیار زیادی در گستره ۴ تا ۶ نیاز است. علاوه بر این طراحی صحیح مسیر کرنش نیز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. پیچیدگی این روش ها نشان می دهد که برای تولید فولادهای فوق ریز دانه در مقیاس صنعتی با این روش ها نیاز به سرمایه گذاری بالایی است [۵-۲]. یکی دیگر از روش های تولید مواد فوق ریز دانه استفاده از فرآیندهای حرارتی-مکانیکی پیشرفته و مخصوصاً فرآیند مارتنزیت است. این فرآیند شامل نورد سرد و آنیل ریز ساختار مارتنزیتی می باشد و اولین بار توسط سوچی و همکارانش در سال ۲۰۰۲ ابداع شد. نظر به اینکه این فرآیند تنها به وسیله نورد سرد و آنیل انجام می شود به نظر می رسد که در مقایسه با روش های تغییر شکل پلاستیکی شدید برای صفحات و قطعات بزرگ نیز مناسب بوده و پتانسیل بیشتری برای کاربرد عملی دارد [۹-۶].

مکانیزم تشکیل ساختار فوق ریز دانه در فولادهای کربنی توسط فرآیند مارتنزیت بر مبنای افزایش مکان های جوانه زنی از طریق کوئچ کردن و خرد شدن لایه های مارتنزیتی حاصل در مرحله تغییر شکل است [۱۰]. بنابراین اندازه دانه بدست آمده از طریق این فرآیند تابعی از اندازه دانه اولیه و میزان کرنش اعمالی در حین نورد سرد می باشد. به این صورت که با کاهش اندازه دانه های اولیه، مرزدانه ها افزایش یافته و در نتیجه مکان های جوانه زنی و نرخ جوانه زنی افزایش می یابد و در نتیجه به کرنش اعمالی کمتری برای دستیابی به دانه های بسیار ریز پس از

عملیات آنیل نیاز خواهد بود. لازم به ذکر است مرزدانه‌های اولیه در فرآیند مارتنزیت به صورت مرز دانه‌های آستنیت اولیه در ساختار مارتنزیت که در حین استحاله مارتنزیتی (تحول آستنیت به مارتنزیت) باقی مانده‌اند تعریف می‌شوند [۱۱]. یکی از روش‌های ریز کردن اندازه دانه آستنیت در فولادهای کم کربن، استحاله بازگشتی از مارتنزیت لایه‌ای نورد سرد شده می‌باشد. کمترین اندازه دانه بدست آمده با استفاده از این روش در فولادهای کم کربن $5 \mu\text{m}$ و در فولادهای کم آلیاژ کربن متوسط از طریق اصلاح کردن با Mn و Mo، $0.9 \mu\text{m}$ گزارش شده است [۱۲ و ۱۳].

هدف از پژوهش حاضر آن است که با شروع از یک ریزساختار مارتنزیتی حاصل از مارتنزیت لایه‌ای نورد سرد شده به عنوان ساختار اولیه در فرآیند مارتنزیت، تأثیر اندازه دانه آستنیت اولیه بر میزان کرنش اعمالی در حین نورد سرد در این فرآیند مورد بررسی قرار گیرد و خواص مکانیکی حاصله با خواص مکانیکی حاصل از فرآیند مارتنزیت معمول در یک فولاد ساده کم کربن مقایسه شود.

مواد و روش تحقیق

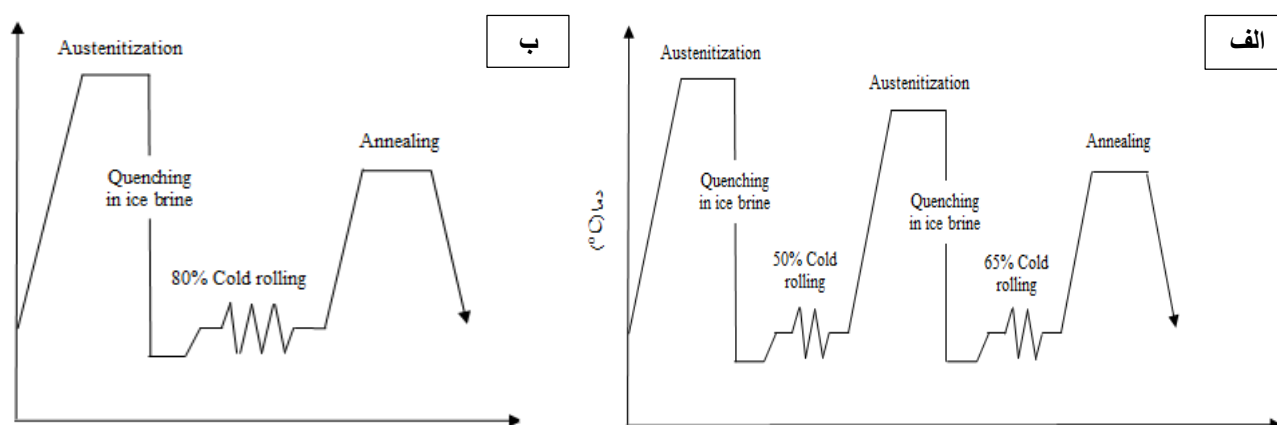
ماده مورد استفاده در پژوهش حاضر فولادی مطابق استاندارد St52 به شکل ورق با ضخامت اولیه ۶ mm به صورت نورد داغ شده بود. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده (برحسب درصد وزنی)

عنصر	C	Mn	Si	Al	Cr	Mo	Fe
Wt. %	۰/۲	۱/۱	۰/۳۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	باقی مانده

نمونه‌هایی به ابعاد $120 \times 25 \times 6 \text{ mm}^3$ از این فولاد تهیه و سپس به مدت ۶۰ دقیقه تا دمای 950°C آستنیت شدند و پس از آن در محلول برین با دمای 10°C - کوئنچ شدند. نمونه‌های کوئنچ شده به میزان ۵۰٪ کاهش در ضخامت تحت نورد سرد قرار گرفتند. سپس در دمای 850°C تا مدت ۵ دقیقه آستنیت بازگشتی شده و به منظور دستیابی به یک ساختار مارتنزیتی بار دیگر به سرعت در محلول برین کوئنچ شدند. در ادامه نمونه‌های کوئنچ شده حاصل از استحاله بازگشتی تا ۶۵٪ کاهش در ضخامت تحت نورد سرد قرار گرفتند. در انتها نیز عملیات آنیل بر روی نمونه‌های نورد سرد شده در دمای 550°C در زمان‌های ۲۰، ۵۰ و ۸۰ دقیقه انجام گرفت و سپس نمونه‌ها در هوای آرام تا دمای محیط سرد شدند. در این گزارش از این به بعد از این فرآیند با عنوان فرآیند نوین

یاد می شود. فرآیند مارتنزیت معمول (فرآیند مرجع) نیز به شرح زیر طراحی شد. نمونه های کوئنچ شده از دمای 950°C تا 80% کاهش در ضخامت تحت نورد سرد قرار گرفتند و در دمای 550°C در زمانهای ۲۰، ۵۰ و ۸۰ دقیقه آنیل شده و در هوای آرام تا دمای محیط سرد شدند. شمای این دو فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور مشاهده مرز دانه های آستنیت اولیه در نمونه های کوئنچ شده، نمونه ها پس از سمباده زنی و پولیش با یک محلول فوق اشباع از اسید پیکریک با دمای حدود 70°C به مدت ۳۰ ثانیه اچ شدند و سپس دانه های آستنیت اولیه با استفاده از میکروسکوپ نوری مشاهده شد. جهت بررسی ریز ساختار از میکروسکوپ های OM و SEM/EBSD و به منظور ارزیابی خواص مکانیکی از آزمون کشش استفاده شد. نمونه های آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM-E8 آماده شد.

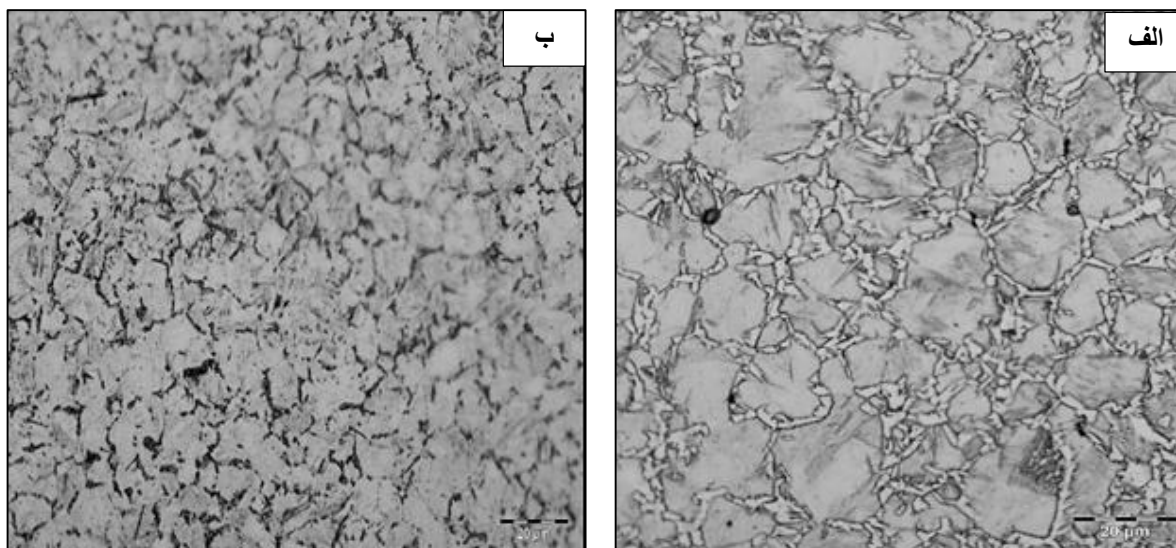


شکل ۱. شمای فرآیندهای مورد استفاده در این پژوهش (الف) فرآیند نوین و (ب) فرآیند مرجع (مارتنزیت).

نتایج و بحث

ریز ساختار نمونه های کوئنچ شده (کوئنچ در محلول برین بعد از آستنیت کردن در دمای 950°C به مدت ۶۰ دقیقه) قبل از استحاله بازگشتی و بعد از ۵۰٪ نورد سرد کردن و بازگشت دادن در دمای 850°C تا مدت ۵ دقیقه در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است اندازه دانه آستنیت اولیه از حدود $9/5\ \mu\text{m}$ پس از کوئنچ در مرحله اول به حدود $4/9\ \mu\text{m}$ پس از کوئنچ در مرحله دوم رسیده است. همچنین استحکام کششی و سختی این نمونه ها به ترتیب $952\text{--}1374\ \text{MPa}$ و $335\text{--}419\ \text{HV}$ بود. مطابق با رابطه هال-پچ (رابطه ۱) استحکام و سختی در مواد درشت دانه با ریشه دوم اندازه دانه آنها نسبت عکس دارد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که استحاله بازگشتی از مارتنزیت لایه ای نورد سرد شده باعث کاهش اندازه دانه آستنیت

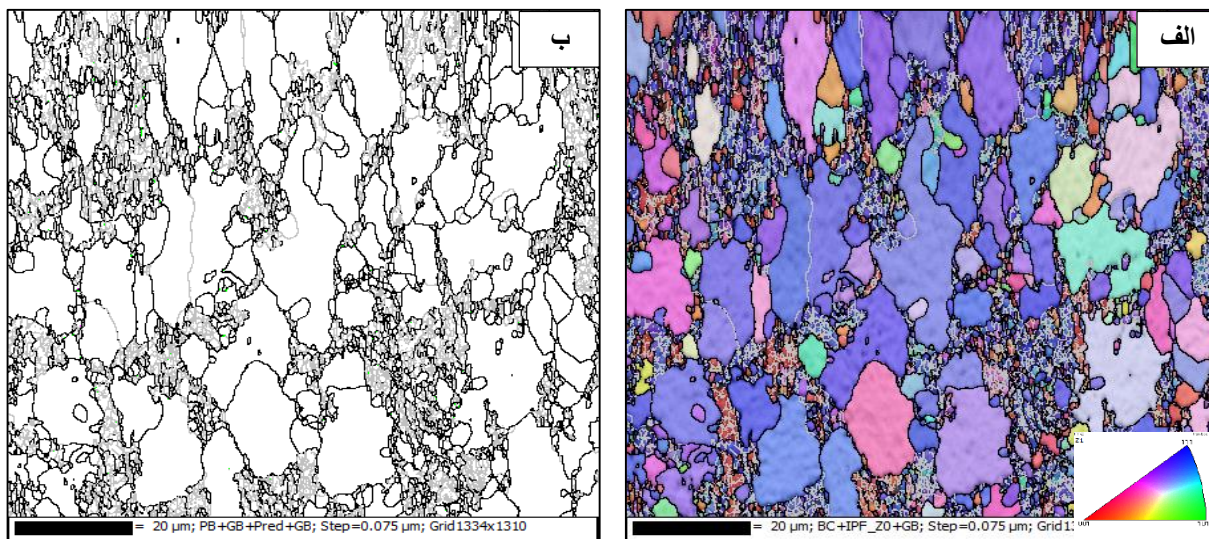
اولیه و افزایش استحکام و سختی شده است.



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های کوئنچ شده (کوئنچ در محلول برین بعد از آستنتیه کردن در دمای 950°C به مدت ۶۰ دقیقه): (الف) قبل از استحاله بازگشتی، (ب) بعد از ۵۰٪ نورد سرد کردن و بازگشت دادن در دمای 850°C تا مدت ۵ دقیقه.

شکل ۳ تصاویر EBSD نمونه آنیل شده در دمای 550°C به مدت ۸۰ دقیقه را پس از ۶۵٪ نورد سرد در فرآیند نوین نشان می‌دهد. توزیع دو اندازه‌ای دانه‌ها که ناشی از حضور همزمان دانه‌های ریز و درشت است به خوبی در ریزساختار این نمونه مشاهده می‌شود. این ریزساختار شامل دانه‌های فوق ریز ($<1\mu\text{m}$) با میانگین اندازه 490nm و دانه‌های درشت ($>1\mu\text{m}$) با میانگین اندازه $3/3\mu\text{m}$ می‌باشد که کسر حجمی دانه‌های درشت حدود ۵۵٪ می‌باشد.

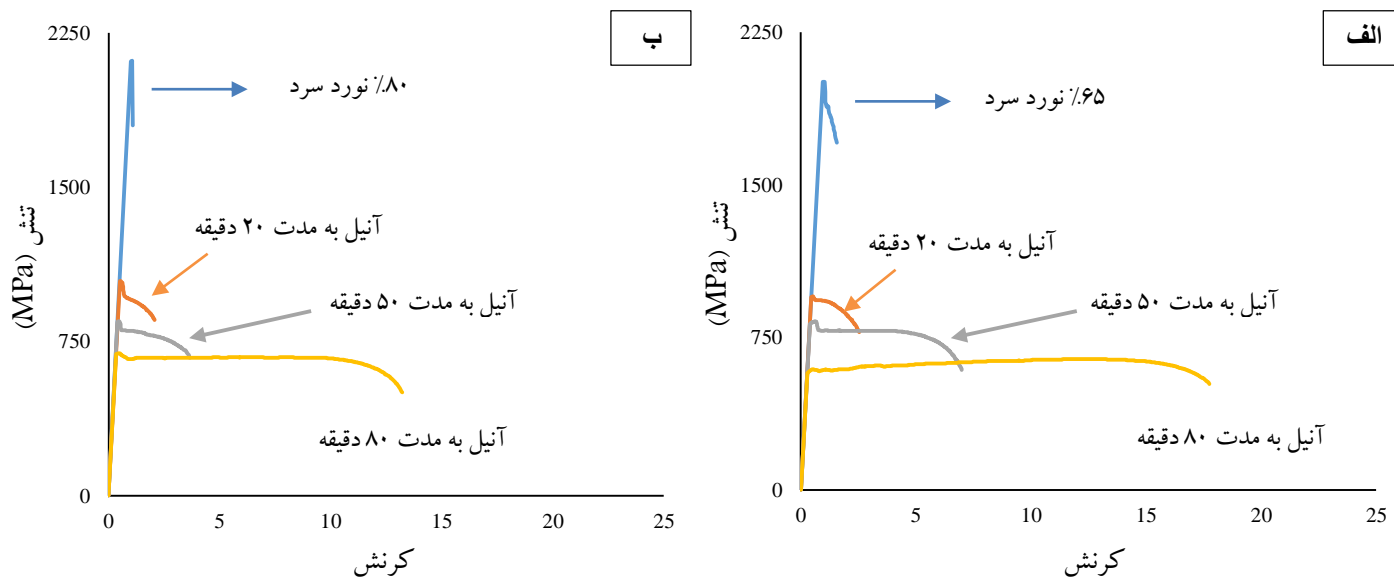
در شکل ۴ منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌ها پس از نورد سرد و آنیل متعاقب در دمای 550°C در زمانهای مختلف در فرآیند نوین و فرآیند مرجع نشان داده شده است. نمونه‌ها در فرآیند مرجع پس از اعمال کار سرد به میزان ۸۰٪ دارای استحکام کششی در حدود 2116MPa شده‌اند در حالیکه استحکام کششی نمونه‌ها در فرآیند نوین تنها پس از اعمال ۶۵٪ نورد سرد به 2007MPa رسیده است. اینگونه می‌توان نتیجه‌گیری کرد هرچه اندازه دانه ساختار اولیه در فرآیند مارتنزیت ریزتر باشد، در مرحله نورد سرد به کرنش اعمالی کمتری برای دستیابی به



شکل ۳. تصاویر EBSD نمونه آنیل شده در دمای 550°C به مدت ۸۰ دقیقه پس از ۶۵٪ نورد سرد در فرآیند نوین (الف) نقشه IPF همراه با مرزخانه ها و (ب) مرزخانه ها [خطوط مشکی مرزهای زاویه زیاد ($>15^{\circ}$) و خطوط خاکستری مرزهای زاویه کم ($<15^{\circ}$) هستند].

دانه های بسیار ریز پس از عملیات آنیل نیاز خواهد بود. استحکام کششی و ازدیاد طول نهایی بدست آمده از نمونه های آنیل شده در جدول ۲ خلاصه شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش زمان آنیل بعث کاهش چگالی نابجایی ها در حین تبلور مجدد، استحکام نمونه ها کاهش و انعطاف پذیری آنها افزایش می یابد. البته باید توجه داشت با اینکه استحکام نمونه ها در فرآیند مرجع به طور قابل توجهی کاهش یافته است اما ازدیاد طول کل آنها چندان افزایش نیافته است این در حالی است که ازدیاد طول نهایی نمونه ها در فرآیند نوین به طور چشمگیری افزایش یافته است و با این حال استحکام نمونه ها در این فرآیند به میزان کمی کمتر از فرآیند مرجع است.

ترکیب استحکام-انعطاف پذیری معمولاً توسط حاصلضرب استحکام کششی با ازدیاد طول کل بیان می شود. حاصل $UTS \times TE$ همه نمونه های آنیل شده برحسب زمان آنیل در دمای 550°C در هر دو فرآیند در جدول ۲ آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقادیر $UTS \times TE$ در فرآیند نوین بیشتر از فرآیند مرجع است. این امر می تواند به توزیع یکنواخت دانه های بسیار ریز در ساختار نمونه ها در فرآیند مرجع در مقایسه با نمونه ها در فرآیند نوین نسبت داده شود. بنابراین با توجه به شکل ۳ می توان نتیجه گرفت که تعادل استحکام-انعطاف پذیری به طور قابل توجهی از طریق ایجاد ساختاری با توزیع اندازه دانه دوگانه بهبود می یابد.



شکل ۴. منحنی های تنش- کرنش نمونه ها پس از ۶۵٪/نورد سرد و متعاقب آن آئیل در دمای ۵۵۰°C در زمانهای مختلف الف) فرایند نوین و ب) فرآیند مرجع.

جدول ۲. خواص مکانیکی نمونه ها پس از آئیل در دمای ۵۵۰°C در زمانهای مختلف.

UTS*E (MPa %)	E (%)	UTS (MPa)	Annealing time (min)	No
۲۰۸۶	۲	۱۰۴۳	۲۰	فرآیند مرجع
۳۰۵۳	۳/۶	۸۴۸	۵۰	
۹۱۲۱	۱۳/۲	۶۹۱	۸۰	
۲۳۷۷	۲/۵	۹۵۱	۲۰	فرآیند نوین
۵۸۰۳	۷	۸۲۹	۵۰	
۱۱۵۵۶	۱۸	۶۴۲	۸۰	

نتیجه گیری

۱. استحاله بازگشتی از مارتنزیت لایه‌ای نورد سرد شده باعث کاهش اندازه دانه آستنیت اولیه از $9/5 \mu\text{m}$ به $4/9 \mu\text{m}$ و افزایش سختی از 335 HV به 419 HV شد.
۲. نمونه‌ها در فرآیند مرجع پس از اعمال کار سرد به میزان 80% دارای استحکام کششی در حدود 2116 MPa شدند در حالیکه استحکام کششی نمونه‌ها در فرآیند نوین تنها پس از اعمال 65% نورد سرد به 2007 MPa رسیدند.
۳. با شروع از یک ریزساختار مارتنزیتی حاصل از مارتنزیت لایه‌ای نورد سرد شده به عنوان ساختار اولیه در فرآیند مارتنزیت به کرنش اعمالی کمتری برای دستیابی به دانه‌های بسیار ریز پس از عملیات آنیل نیاز خواهد بود.
۴. نمونه آنیل شده به مدت 80 دقیقه در فرآیند نوین به دلیل داشتن ساختاری با توزیع اندازه دانه دوگانه، دارای ترکیب استحکام-انعطاف پذیری بهتری در مقایسه با نمونه آنیل شده در همین مدت زمان در فرآیند مرجع است.

مراجع

- 1- M. A. Meyers, A. Mishra and D. J. Benson, "Mechanical properties of nanocrystalline materials", Prog. Mater. Sci, 51(4), 2006, 427-556.
- 2- R. Z. R. Z. Valiev, R. K. R. K. Islamgaliev and I. V. Alexandrov, "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation", Prog. Mater. Sci, 45(2), 2000, 103-189.
- 3- A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D. Y. Yang, F. Micari, G. D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski and A. Yanagida, "Severe plastic deformation (SPD) processes for metals", CIRP Ann. - Manuf. Technol, 57, 2008, 716-735.
- 4- C. Wang, F. Li, B. Chen, Z. Yuan and H. Lu, "Severe Plastic Deformation Techniques for Bulk Ultrafine-grained Materials", Rare Met. Mater. Eng, 41(6), 2012, 941-946.
- 5- L. S. Toth and C. Gu, "Ultrafine-grain metals by severe plastic deformation", Mater. Charact, 92, 2014, 1-14.
- 6- 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, vol. 50(16), 2002, 4177-4189.
- 7- 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", Scr. Mater, 46(4), 2002, 305-310.
- 8- B. Q. Han and S. Yue, "Processing of ultrafine ferrite steels", J. Mater. Process. Technol, 136(1-3) 1-3, 2003, 100-104.
- 9- R. Song, D. Ponge, D. Raabe, J. G. Speer, and D. K. Matlock, "Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels", Mater. Sci. Eng. A, 441(1-2), 2006, 1-17.

- 10- 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(1-2), 2004, 153-162.
- 11- N. Tsuji and T. Maki, "Enhanced structural refinement by combining phase transformation and plastic deformation in steels", Scr. Mater, 60(12), 2009, 1044-1049.
- 12- S. Morito, H. Saito, T. Ogawa, T. Furuhashi and T. Maki, "Effect of Austenite Grain Size on the Morphology and Crystallography of Lath Martensite in Low Carbon Steels", ISIJ Int, 45(1), 2005, 91-94.
- 13- T. Furuhashi, K. Kikumoto, H. Saito, T. Sekine, T. Ogawa, S. Morito, and T. Maki, "Phase Transformation from Fine-grained Austenite", ISIJ Int, 48(8), 2008, 1038-1045.