

انجمن آهن و فولاد ایران

سمپوزیوم فولاد ۹۵

۱۰ و ۱۱ اسفندماه ۱۳۹۵

تبریز هتل کایا لاله پارک

تأثیر درصد نورد سرد زمان و دمای آنیل بر خواص مکانیکی فولاد زنگ نزن آستنیتی Fe-13Cr-10Mn-1Ni با استفاده از عملیات ترمومکانیکی مارتنزیت

سمانه شریعتی، عباس نجفی زاده، هومن حسنی، علی الشیعی اصفهان، فولاد شهر، مؤسسه آموزش عالی صنعتی فولاد، کد پستی ۸۴۹۱۶۶۳۷۶۳

چکیده

یکی از روشهای افزایش استحکام در فلزات کاهش اندازه دانه است و بدلیل اینکه افت چندانیت در انعطاف پذیری ایجاد نمیکند روش مناسبی به شمار میرود فرآیند ترمومکانیکی پیشرفته شامل نورد سرد و آنیل متعاقب یکی از مناسب ترین راه ها برای تولید فولاد فوق ریزدانه و بهبود خواص مکانیکی است. در این پژوهش سعی شده با استفاده از درصدهای مختلف نورد سرد و آنیل بازگشتی در دماها و زمان های مختلف خواص مکانیکی فولاد Fe-13Cr-10Mn-1Ni بر اساس مکانیزم بازگشت مارتنزیت ناشی از کرنش، بهبود یابد. بدین منظور نمونه ها در دو درصد متفاوت ۵۰ و ۹۰ تورد سرد شدند و پس از آنیل در دمای ۷۵۰۰ و مدت زمان ۱۵-۱۴۰۰، ثانیه خواص مکانیکی آنها مورد مقایسه قرار داده شد. بر اساس نتایج بدست آمده شرایط رسیدن به حالت بهینه استحکام و انعطاف پذیری در هر دو نمونه با درصدهای متفاوت نورد سرد تعیین گردید.

کلمات کلیدی استحکام و انعطاف پذیری مارتنزیت ناشی از کرنش فولاد فوق ریزدانه

مقدمه

فولادهای زنگ نزن آستنیتی اغلب به دلیل خواص خوردگی و جوش پذیری مناسب جهت کاربردهای بسیاری مورد استفاده قرار می گیرند ولی یکی از مشکلات این فولادها استحکام تسلیم پایین آنهاست. از جمله روش های بهبود استحکام، کاهش اندازه دانه است. طبق رابطه مشهور هال - پچ کاهش اندازه دانه در یک ماده پلی کریستال اثرات سودمندی در افزایش استحکام ماده دارد. روش های متعددی جهت تولید آزمایشگاهی مواد نانو ساختار رواج یافته اند. اما در این روش ها مقدار انعطاف پذیری به مقدار قابل

قبول نمی رسد و اغلب در مقایسه با مواد دانه درشت کمتر است [۱]. از جمله دلایل پایین بودن انعطاف پذیری در مواد نانو ساختار فوق ریز دانه، می توان به ناپایداری پلاستیک اشاره کرد. در دانه های بسیار ریز، ایجاد دانسیته بالایی از نابجایی ها ناممکن است و این امر منجر به کاهش قابل ملاحظه ای در قابلیت کرنش سختی مواد فوق ریز دانه می شود. در سالهای اخیر تولید فولادهای پر استحکام که همزمان دارای انعطاف پذیری بالایی نیز باشند موضوع تحقیقات بسیاری بوده است [۲ و ۱]. روشهای مختلفی از طرف محققین جهت بهبود انعطاف پذیری در مواد نانو ساختار ارائه شده است. از جمله این روش ها استفاده از فرآیندهای ترمومکانیکی است. در سالهای اخیر به منظور تولید ساختارهای فوق ریز دانه در آلیاژهای آستنیتی نیمه پایدار، توجه ویژه ای به روش استحاله مارتنزیتی در اثر کرنش و استحاله بازگشت آن که به اختصار به آن فرآیند SIMRT گفته می شود، معطوف شده است [۳]. فولادهای نانو ساختار/فوق ریز دانه به دست آمده از فرآیند SIMRT داکتیلیته مناسبی از خود نشان می دهند و کرنش سختی خوبی دارند. این فرآیند بر روی فولادهای

آستنیتی نیمه پایدار انجام می شود و در آن طی انجام کار سرد بر روی فولاد نیمه پایدار، ساختار آستنیتی با شبکه کریستالی fcc به مارتنزیت (a) با شبکه کریستالی bcc تبدیل می شود. در اثر ادامه کار سرد ساختار تماماً مارتنزیتی شده و لایه های مارتنزیت به وجود آمده شکسته می شوند. پس از انجام درصد بالایی از کار سرد، آنیل بازگشتی بر روی نمونه ها انجام می شود و سبب استحاله بازگشت مارتنزیت (a) به آستنیت نانو ساختار فوق ریز دانه می گردد.

فرآیند SIMRT بر روی آلیاژهای آستنیتی متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. مانند آلیاژهای سری ۲۰۰ [۴]، سری ۳۰۰ [۵] و آلیاژهای سه تایی Fe-Cr-Ni ۶ [۶]. با این وجود همچنان افت شدید انعطاف پذیری و سختی یکی از چالش های اصلی در این رابطه است. بر این اساس در این پژوهش سعی شده با مقایسه شرایطی مثل درصد نورد سرد و دما و زمان آنیل، شرایط بهینه فرآیند ترمومکانیکی جهت حصول ساختار فوق ریز دانه در این فولاد تعیین گردید.

روش تحقیق

در ابتدا به منظور انحلال کاربیدها و فاز مضر فریت دلتا عملیات آنیل انحلالی به مدت ۱۵۰ دقیقه در دمای ۱۲۰۰°C انجام گرفت. سپس عملیات ترمومکانیکی شامل نورد سرد و آنیل بر روی نمونه های آماده شده اعمال گردید. در این پژوهش نورد سرد نمونه ها با ضخامت اولیه ۱۲ میلیمتر توسط دستگاه نورد

دو غلتکی نوع RM-125D 2/4 انجام شد. به منظور بررسی تأثیر درصد نورد سرد، نمونه ها در مقادیر ۵۰٪ و ۹۰٪ تحت نورد سرد قرار گرفتند و نهایتاً در دمای ۷۵۰°C و زمانهای ۶۰-۱۲۰۰ ثانیه، به منظور بازگشت مارتنزیت به آستنیت تحت عملیات آنیل بازگشت قرار گرفتند. میزان مارتنزیت در نمونه های نورد شده و نمونه های آنیل شده بوسیله دستگاه فریتوسکوپ مدل FMP30E-S ساخت شرکت Fisher آلمان اندازه گیری شد. نمونه های آزمون کشش براساس استاندارد ASTM-E8 تهیه شدند و با دستگاه Hounsfield با سرعت نک ۲ mm/min انجام شد. همچنین جهت بررسی ساختار نمونه ها میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ SEM-TKD مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

نمونه های آنیل انحلالی شده به عنوان نمونه های اولیه جهت انجام فرآیند نورد سرد مورد استفاده قرار گرفتند. شکل ۱ منحنی تغییرات میزان تشکیل مارتنزیت ناشی از کرنش را بر حسب درصد کاهش ضخامت، در کرنش اعمالی در دمای محیط و نرخ کرنش ثابت در فولاد زنگ کم نیکل مورد تحقیق نشان می دهد. در ۵۰٪ کاهش ضخامت، فولاد کاملاً ساختار مارتنزیتی داشته و در ضمن حداقل میزان نورد سردی است که می توان ساختار تماماً مارتنزیتی بدست آورد. با ادامه فرآیند تغییر شکل تا ۹۰٪ نورد

سرد، مقدار مارتنزیت تغییر چندانی نداشته و فقط دچار تغییر شکل می شود. اثر دما و زمان آنیل بازگشتی بر روی رفتار بازگشت مارتنزیت ناشی از کرنش در نمونه با ۵۰٪ و ۹۰٪ نورد سرد در شکل ۲ برای آنیل در دمای ۷۵۰°C ارائه شده است. برای درک اثر درصد نورد سرد بر نرخ بازگشت، تحت شرایط ثابت دمای آنیل، دو نمونه با درصد نورد مختلف با یکدیگر مورد مقایسه قرار

گرفتند. در دمای ۷۵۰°C نرخ بازگشت برای هر دو درصد نورد به شدت افزایش پیدا می کند، به طوری که پس از زمان ۴ دقیقه امکان بازگشت تقریباً به طور کامل فراهم می شود. تحت این شرایط در مدت زمان ۴ دقیقه آنیل، در حدود ۹۳٪ بازگشت در نمونه با ۵۰٪ نورد رخ می دهد و طی همین زمان برای نمونه ۹۰٪ نورد؛ ۹۸٪ بازگشت در ساختار رخ می دهد. مطابق با نرخ بازگشت

برای ساختار سلول - نابجایی به خصوص در زمانهای اولیه آنیل، در مقایسه با مارتنزیت لایه ای بیشتر است. در مورد ساختار سلول - نابجایی پس از ۵ دقیقه تقریباً تمامی ساختار دچار بازگشت می شود و استحاله بازگشتی کامل می شود. با افزایش زمان آنیل بازگشتی در هر دو نمونه ۵۰٪ و ۱۹۰ نورد سرد از جنس فولاد مورد پژوهش، مارتنزیت به صورت پیوسته به آستنیت تبدیل می شود در حالی که در برخی تحقیقات گذشته با افزایش زمان آنیل، آستنیت بازگشت یافته مجدداً به مارتنزیت تبدیل می شود. این تفاوت را می توان نتیجه رسوب برخی کاربیدها و از جمله کاربید کروم و نیوبوم در

مرزخانه های فولاد دانست که باعث تخلیه کربن زمینه و در نهایت افزایش دمای M فولاد می شود. شکل ۳ میانگین مقادیر سختی نمونه ها با درصدهای مختلف نورد را به عنوان تابعی از زمان آنیل نشان می دهد. همانطور که مشخص است، مقادیر سختی تمام نمونه ها با افزایش زمان آنیل به صورت پیوسته کاهش می یابد. این امر را می توان با کاهش چگالی عیوب کریستالی، کاهش کسر حجمی مارتنزیت در ریز ساختار و همچنین رشد دانه های آستنیت با افزایش دما و زمان آنیل توجیه نمود. همچنین مشاهده

می شود که نرخ کاهش سختی، به خصوص برای زمانهای اولیه آنیل با افزایش دما بالاتر است. زیرا در دماهای بالاتر، مقدار و نرخ بازگشت، کاهش چگالی عیوب و همچنین رشد اندازه دانه ها به شدت بالاست. مشاهده می شود که در بعضی از شرایط سختی نمونه ۵۰٪ نورد سرد شده از سختی نمونه ۹۰٪ نورد سرد شده بیشتر است. این امر می تواند به کسر مارتنزیت بالاتر درون ساختار، آستنیت ناشی از مارتنزیت لایه ای به دلیل نرخ بازگ کمتر و همچنین جلوگیری این مارتنزیت تغییر شکل نیافته از رشد

شدید دانه ها، نسبت داده شود. شکل ۴ منحنی تنش-کرنش مهندسی نمونه آنیل انحلالی شده، نمونه های ۵۰٪ نورد سرد شده و آنیل شده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۴ دقیقه و همچنین ۹۰٪ نورد سرد شده و آنیل شده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۴ دقیقه را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود، نمونه آنیل انحلالی شده دارای استحکام تسلیم پایین ۲۵۰ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول بالای ۶۸٪ است. در حالی که نمونه ۹۰٪ نورد سرد شده دارای استحکام تسلیم بسیار بالا (۱۱۲۰ MPa) و درصد ازدیاد طول بسیار اندک (کمتر از ۱٪) است. آنیل نمونه ۹۰٪ نورد سرد شده در دمای ۷۵۰°C به مدت ۴ دقیقه، استحکام تسلیم مناسب ۱۱۲۰ MPa و ازدیاد طول یکنواخت خوب ۵۰٪ را از خود نشان می دهد. با افزایش زمان آنیل، استحکام تسلیم نمونه ها کاهش اما درصد ازدیاد طول اندکی افزایش می یابد.

شکل ۵ تصاویر SEM-TKD از دانه بندی و اندازه دانه آستنیت را برای نمونه آنیل شده در دمای ۷۵۰°C و مدت زمان ۴ دقیقه، برای دو درصد متفاوت نورد نشان می دهد. همانگونه که از شکل ها نمایان است، دانه های نمونه ۵۰٪ نورد سرد شده کشیده تر و نشان دهنده بازگشت کسر زیادی از مارتنزیت لایه ای است. ولی دانه های نمونه ۹۰٪ نورد سرد شده ریزتر و معرف بازگشت از مارتنزیت سلول-نابجایی است. در نهایت می توان نتیجه گرفت حتی با کاهش کار مکانیکی (درصد نورد سرد پایین تر) می توان تحت شرایط دما و زمان آنیل بازگشتی به شرایط بهینه مکانیکی دست یافت.

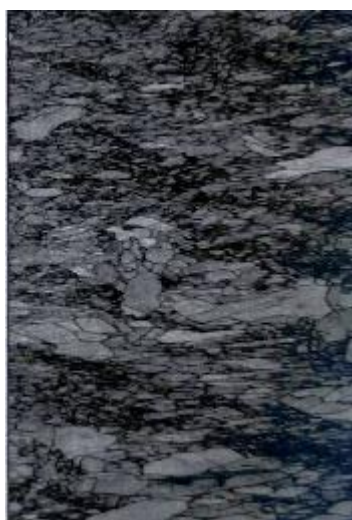
نتیجه گیری

در این پژوهش فولاد زنگ نزن آستنیتی Fe-13Cr-10Mn-INi پس از فرآیند تولید و آنیل انحلالی تحت نورد سرد و آنیل قرار گرفت. نتایج بدست آمده را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱) انجام عملیات نورد سرد در دمای محیط منجر به ایجاد ساختار ۱۰۰٪ مارتنزیتی، با استحکام تسلیم در حدود ۱۳۰۰ MPa برای کاهش ضخامت ۵۰٪ و ۱۱۲۰ MPa برای کاهش ضخامت ۹۰٪، شد.

۲) مقادیر سختی تمام نمونه ها با افزایش زمان آنیل، به دلیل رشد دانه های آستنیت و کاهش دانسیته عیوب کریستالی، به صورت پیوسته کاهش یافت.

۳) بهترین شرایط آنیل بازگشتی از نقطه نظر ایجاد ساختار فوق ریزدانه و بهبود خواص مکانیکی، برای نمونه های ۵۰٪ و ۹۰٪ نورد سرد شده، در دمای ۷۵۰ °C و مدت زمان ۴ دقیقه بدست آمد. سختی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نمونه ۹۰٪ نورد شده به ترتیب ۴۳۰۷، ۱۲۴۰ MPa و ۵۰٪ و در شده به ترتیب ۴۳۰۷، ۱۱۰۰ MPa و ۲۸٪ بدست آمد.



- 1] Y.M. Wang, E. Ma, "Three strategies to achieve uniform tensile deformation in a nanostructured metal", *Acta Materialia*,52,2004,1699-1709
- [2] E. Ma, "Eight routes to improve the tensile ductility of bulk nanostructured metals and alloys", *JOM*,2006,49-53
- [3] Y.K. Lee, J.E. Jin, Y.Q. Ma, "Transformation-induced extraordinary ductility in an ultrafine-grained alloy with nanosized precipitates", *Scripta Materialia*,5,2007 ,707-710
- [4] S.S.M. Tavares, J.M. Pardal, M.J. Gomes da Silva, "Deformation induced martensitic transformation in a 201 modified austenitic stainless steel", *Materials Characterization* ,60,2009,907-911
- [5] S. Rajasekhara, L.P. Karjalainen, A. Kyrolainen, P.J. Ferreira, "Microstructure evolution in nano/submicron grained AISI 301LN stainless steel", *Materials Science and Engineering A*,527,2010,1986-1996
- [6] K. Tomimura, S. Takaki, Y. Tokunaga, "Reversion mechanism from deformation International, 31, 1991 1431-1437 induced martensite to austenite in metastable austenitic stainless steels", *ISIJ*