توسعه فولادهای نانو ساختار بینیتی به روش عملیات حرارتی دومرحلهای

میلاد فوقانی' ، علیرضا کلاهی*' ، مهدی علیزاده ' ، یحیی پالیزدار'

^اپژوهشگاه مواد و انرژی ، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته ، کرج، ایران.

تاريخ ثبت اوليه: ١٣٩٥/١٠/٢٢، تاريخ دريافت نسخهٔ اصلاح شده: ١٣٩٥/١٠/٢٩، تاريخ پذيرش قطعى: ١٣٩٥/١١/١

چکیده امروزه فولادهای نانوساختار بینیتی به دلیل خواص مکانیکی ویژه، از جمله استحکام، سختی بالا، چقرمگی قابل قبول و همچنین هزینههای تولید نسبی پایین مورد توجه قرار گرفتهاند. مشکل اصلی برای صنعتی شدن این نوع فولادها مدت زمان طولانی استحاله همدمای بینیتی است که به موجب آن، زمان و هزینههای تولید افزایش مییابد. در این پژوهش برای کاهش زمان تولید و تسریع استحاله همدمای بینیتی از فولاد کربن متوسط بهجای فولاد پرکربن، و برای جلوگیری از رشد صفحات ضخیم از عملیات آستمپریتگ دومرحلهای استفاده شده است. برای انجام عملیات حرارتی، نمونهها ابتدا در دمای ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۵ دقیقه آستنیته شده و سپس در کوره حمام نمک قرار داده شدند تا در بازه های زمانی ۱ تا ۲۱ ساعت در دمای بین ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۵ دقیقه آستنیته شده و سپس در کوره حمام نمک قرار داده شدند تا در بازه های زمانی ۱ تا ۲۱ ساعت در دمای بین ۲۵۰ تا ۲۰۰ سانتیگراد در طی یک یا دومرحله، استحاله همدمای بینیتی انجام شود. نمونهها تحت بررسیهای ریزساختاری، آزمون کشش، سختی سنجی ویکرز و پراش پرتو ایکس قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش مقدار کربن و اعمال آستمپرینگ دومرحلهای به سبب کاهش زمان استحاله و همچنین کاهش دمای ایکس قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش مقدار کربن و اعمال آستمپرینگ دومرحلهای به سبب کاهش زمان استحاله و همچنین کاهش دمای مکانیکی در این فولاد شد.

کلمات کلیدی: فولادهای کربن متوسط، بینیت نانو ساختار، آستمپرینگ دومرحلهای، خواص مکانیکی.

Development of Nanostructured Bainitic Steel by Utilizing the Two Steps Austempering Heat Ttreatment

Milad Foughani¹, Alireza Kolahi^{*1}, Mehdi Alizadeh¹, Yahya Palizdar¹

¹Materials and Energy Research Center (MERC), Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Karaj, Iran.

Abstract Special mechanical properties of nano structure bainitic steel such as high tensile strength, hardness, toughness and low manufacturing cost have attracted considerable attention in the past few years. However, the main problem for this type of steels to be industrialized, long austempering process period which increases production costs. In this research, in order to accelerate the bainitic transformation, carbon concentration was decreased and two steps austempering process was employed to prevent the bainite laths thickening. Specimens were austenetized at 1000 °C for 15 min and were kept in the salt bath between 1-12 hours at temperatures in the range of 250-300°C in one step or two step bainite transformation. Standard metallography, XRD and scanning electron microscopy techniques were utilized for the microstructural characterization and the tensile and hardness test were employed for mechanical properties evaluation. The obtained results show that two steps austempering process and lower carbon concentration lead to lower austempering period as well as formation of more stable retained austenite which results in higher mechanical properties.

Keywords: Medium Carbon Steels, Nanostructure Bainite, Two Steps Austempering, Mechanical Properties.

۱– مقدمه

فولادهای نانوساختار بینیتی دارای خواص مکانیکی مناسب از جمله استحکام و سختی بالا و چقرمگی قابل قبول میباشند که از این رو جایگزین خوبی برای فولادهای مارایجینگ^۱ هستند. با این حال این نوع فولاد ها به دلیل عدم نیاز به عناصر آلیاژی گرانقیمت و همچنین عدم نیاز به ذوب و ریخته گری در خلاء، نسبت به فولادهای مارایجینگ و سایر فولادهای آلیاژی هزینهی تولید پایین تری دارند و از این رو مورد توجه بسیاری از محققان و صنعتگران قرار گرفته اند [1و7].

جهت دستیابی به این ساختارهای نانومتری بینیتی در فولادها نیاز است که این نمونهها را پس از آستنیته کردن، در دمایی پایین تر از دمای شروع استحاله بینیتی و بالاتر از دمای شروع استحاله مارتنزیت در زمانهای طولانی مدت (در برخی از تحقیقات تا ۷۲ ساعت) نگهداری کرد تا استحاله همدمای بينيتي اتمام يابد. در نتيجه مشكل اصلى صنعتى شدن اين نوع فولادها طولاني بودن مدت زمان عمليات حرارتي أستميرينگ و تكميل استحالهي بينيتي مي باشد [٣]. در تحقيقات انجام شده توسط سایر محققان برای سرعت بخشیدن به استحاله بینیتی از افزودن عناصر آلياژي استفاده شده است ولي افزودن اين عناصر خود موجب افزایش هزینه های تولید می شود [۴]. افزایش دمای این استحالههای همدما نیز به دلیل افزایش سرعت نفوذ كربن مىتواند سرعت استحاله را افزايش دهد ولى با افزايش نفوذ، ضخامت صفحات فريت بينيتي افزايش یافته و خواص مکانیکی افت میکند و در نتیجه برای حصول خواص مکانیکی بهتر، استحالهها در کمترین دمای ممکن انجام مي گير د [۵].

بهطور کلی دو مورفولوژی از آستنیت در فولادهای بینیتی وجود دارد: اول آستنیتهای ورقهای غنی از کربن که در میان صفحات فریت بینیتی قرار گرفتهاند و دوم آستنیتهای اولیهی بلوکه شده. از آنجاییکه آستنیت در فولادهای کم کربن و کربن متوسط در دمای پایین پایداری نسبی کمی دارد، ممکن است در طول خنکشدن نهایی تا دمای محیط، به مارتنزیت تبدیل شود. این مارتنزیت و آستنیتهای بلوکی اولیه

سخت و شکنندهاند و در نهایت باعث کاهش چقرمگی در فولاد میشوند. این آستنیتهای اولیهی باقیمانده باعث ناپایداری ساختار میشوند و در نهایت در اثر اعمال بار به مارتنزیت تبدیل میشوند. بنابراین حذف این مورفولوژی از آستنیت در این نوع فولادها امری بسیار ضروری است[۵–۷]. کربن یکی از پایدارکنندههای فریت در ساختار فولاد است و می تواند باعث به تعویق افتادن استحالهی بینیتی شود. از اینرو برای کاهش زمان استحالهی بینیتی می توان کربن را در این نوع فولادها کاهش داد ولی از مشکلاتی که کاهش کربن در تولید این نوع فولادها میتواند ایجاد کند کاهش پایداری آستنیت باقیمانده و افزایش دمای شروع استحالهی مارتنزیتی^۲ (Ms) مى باشد [٨]. گزارش شده است كه عمليات حرارتى آستمپرینگ دومرحلهای توانسته موجب توزیع ظریفتری از بینیت در ساختار گردد و خواص مکانیکی از جمله استحکام کشش تا ۱۵۶۰ مگاپاسکال و افزایش طول نسبی تا ۱۳/۵ درصد در این نوع از فولاد ها افزایش یافته است [۵].

در شکل (۱) شماتیکی از عملیات آستمپرینگ دومرحلهای نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود پس از آستنیته کردن نمونهها، آنها را در دمایی بالاتر از دمای Ms ترکیب اولیه فولاد در کوره نگه داشته تا اولین مرحلهی استحاله همدمای بینیتی انجام شود. با انجام این استحاله، مقدار کربن آستنیت باقیمانده افزایش یافته و با افزایش استحکام آن، دمای استحاله مارتنزیتی (Ms) کاهش مییابد. برای اجرای مرحله دوم عملیات حرارتی، دمای نمونه ها را تا دمایی بالاتر از دمای Ms آستنیت باقی مانده کاهش میدهیم. بهطور دقیقتر میتوان بیان نمود که در مرحله اول استحاله همدمای بینیت، صفحات فریت بینیتی جوانه زده و رشد میکند و پس از رشد مقداری از فریتهای بینیتی به دلیل نفوذ کربن به زمینه آستنیت و همچنین افزایش پایداری آستنیت باقیمانده در دمای پایینتر و کاهش Ms، میتوانیم این مرحله از عملیات حرارتی را متوقف کنیم و مرحله بعدی را در دمایی پايينتر ادامه دهيم كه اين كاهش دما خود باعث حصول نتایجی بدین شرح میشود: ۱- تشکیل لایههای نازکتری از فریت بینیتی به دلیل کاهش سرعت و میزان نفوذ کربن، ۲- پایدار کردن آستنیت و جلوگیری از تشکیل مارتنزیت در

ساختار نهایی به دلیل آنکه وجود مارتنزیت در ساختار نهایی باعث کاهش شدید چقرمگی می شود و ۳- افزایش درصد کربن در آستنیت باقی مانده که باعث افزایش استحکام آستنیت شده و از رشد عرضی فریت ها در زمینه آستنیت جلوگیری می کند [۹–۱۱].



درصد عناصر آلیاژی فولاد مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این تحقیق

عنصر	С	Si	Mn	Cr	Al	Fe
درصد وزنی	•/۴٨	۱/۶	۲/۱	•/٩٣	١	Bal.

فولاد مورد نظر در کوره القایی ذوب و سپس در قالب y شکل به ظرفیت ۱۰ کیلوگرم ریخته گری شد. شمش تهیه شده جهت دستیابی به فولادی تمیز و بدون حفره، تحت تصفیه سرباره الکتریکی (ESR) قرار گرفت. به منظور کاهش ضخامت و اصلاح ریزساختار غیرهمگن ریخته گری، شمش در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه حرارت دهی گردید و بلافاصله توسط دستگاه نورد طی ۶ مرحله با کرنشهای تقریبی برابر از ضخامت ۱۵۰ میلی متر تا ضخامت کرنش های تقریبی برابر از ضخامت ۱۵۰ میلی متر تا ضخامت

از شمش نورد داغ شده، نمونههایی به ابعاد ۱۰میلیمتر ۲۰۰میلیمتر ۲۰۰ میلیمتر توسط ماشینکاری آماده گردیدند و جهت از میان بردن ساختار تغییر شکل ناشی از نورد، نمونهها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد آستنیته شده و سپس در کوره تا دمای محیط سرد شدند. برای انجام عملیات

www.SID.ir

حرارتی با توجه به نمودار TTT^۲ فولاد موردنظر که توسط نرم افزار MUCG83 بهدست آمد [۱۲] و در شکل (۲) نشان داده شده است، ابتدا نمونه ها در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۵ دقیقه آستنیته شده سپس در کوره حمام نمک قرار داده شده اند تا در بازه های زمانی ۱ تا ۱۲ ساعت در دمای بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد، استحاله همدمای بینیتی یک و دومرحلهای انجام شود. جزئیات انجام این عملیات حرارتی به صورت شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می شود نمونه ها پس از آستنیته کردن در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد، به مدت یک ساعت در کوره حمام نمک در دمای ۲۹۰ درجه سانتی گراد قرار می گیرند. نمونه ۱ پس از یک ساعت از کوره خارج شده و در هوا سرد شد و نمونه ۲ پس از چهار ساعت از کوره خارج شده و در هوا سرد شد. نمونههای ۳، ۴ و ۵ پس از یک ساعت نگهداری در دمای ۲۹۰ درجه سانتیگراد به کوره حمام نمک دیگری در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد منتقل شدند و به ترتیب هر کدام پس از ۳ و ۶ و ۱۲ ساعت از کوره خارج و در هوا سرد شدند.



شکل ۳. شماتیک عملیات حرارتیهای اجرا شده بر روی نمونهها. جهت آمادهسازی نمونهها برای بررسیهای ریزساختاری ابتدا سطح نمونهها توسط سنبادههای ۸۰ تا ۳۰۰۰

سنباده خورده و در نهایت سطح آنها توسط نمد و محلول آلومینا هفت میکرومتر پولیش گردید. به منظور اچ کردن شیمیایی نمونهها از نایتال ۲٪ وزنی استفاده شد و ساختار نمونهها توسط میکروسکوپ نوری Olympus مدل PM63 با حداکثر بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر و میکروسکوپ الکترونی TESCAN MIRA 3 مدل 3 TESCAN MIRA 3 روبشی نشر میدانی⁽FESEM) مدل 3 TESCAN MIRA با بینیتی تشکیل شده و آستنیت باقیمانده از پراش پرتو ایکس^۲ART استفاده شد. برای تعیین خواص مکانیکی نمونهها، از آزمون کشش با نرخ کرنش دو میلیمتر بر دقیقه و براساس استاندارد EATM AST و جهت تعیین سختی از آزمون سختی سنجی ویکرز با بار ۳۰ کیلیوگرم نیرو استفاده شد.

۳– نتایج و بحث

بررسی ریزساختار: شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه شماره ۱ و ۵ را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود با دومرحلهای شدن استحاله (شکل ۴-ب) صفحات ظریف تر شدهاند. هم چنین می توان آستنیت باقی مانده بلوکی را در ساختار تشخیص داد. همان طور که مشاهده می-شود در نمونه ۱ به دلیل تکمیل نشدن استحاله، مقدار زیادی از آستنیت بلوکی قابل رویت است ولی به دلیل آن کهاز لحاظ کمی نمی توان ساختارهای فریت بینیتی نانومتری را با میکروسکوپ نوری تشخیص داد، بررسی با میکروسکوپ الکترونی ضروری است.



(آستمپرینگ تکمرحلهای) و ب) نمونه ۵ (آستمپرینگ دومرحلهای).

شکل (۵) میکروساختار نمونهها که در زمانهای مختلف تحت عملیات حرارتی تکمرحلهای قرار گرفتهاند را توسط ميكروسكوپ الكترونى روبشى نشر ميدانى نشان مىدهد. ریزساختار بهدست آمده شامل بستههای بینیتی است که این بستهها خود از لایههای نانومتری فریت بینیتی و دو مورفولوژی از آستنیت باقیمانده، یعنی فیلم های نازک آستنیت باقیمانده در میان لایههای فریت و آستنیتهای بلوکی تشکیل شده اند. شکل ۵-الف نمونه شماره ۱ را نشان میدهد. همان-طور که پیش بینی شده بود در این مرحله از فرآیند به دلیل تكميل نشدن استحاله و همچنين بالا بودن دماي عمليات حرارتی، لایههای ضخیمتری از فریت بینیتی مشاهده میشود و همچنین آستنیتهای باقیمانده بلوکی نیز به مقدار زیادی در ریزساختار دیده میشوند. شکل ۵–ب ریزساختار نمونه ۲ را نشان میدهد که به مدت چهار ساعت در همان دمای نمونه ۱ نگهداری شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش مدت زمان عملیات حرارتی، آستنیتهای موجود در زمینه کاهش یافته و صفحات بینیتی در زمینه افزایش یافته است.

شکل (۶) ریزساختار نمونه ها را که در زمان های مختلف تحت عملیات حرارتی دومرحله ای قرار گرفته اند توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نشان می دهد. شکل ۶-الف مربوط به نمونه شماره ۳ می باشد که پس از یک ساعت طی کردن مرحله اول استحاله به مدت سه ساعت جهت انجام مرحله دوم استحاله در دمای ۲۵۰ درجه ساعت جهت انجام مرحله دوم استحاله در دمای ۲۵۰ درجه ساعت جهت انجام مرحله دوم استحاله در دمای شدن ساتی گراد نگه داری شده است. همان طور که از مقایسه این سانتی گراد نگه داری شده است. همان طور که از مقایسه این استحاله و کاهش دمای مرحله ی دوم صفحات موجود در ساختار ظریفتر شده اند که این امر می تواند به دلیل کاهش نفوذ کربن و هم چنین افزایش استحکام آستنیت باقی مانده و ممانعت از رشد عرضی صفحات فریت باشد [۱۳].

در شکل ۶-ب ریزساختار نمونه ۴ که شش ساعت جهت تکمیل استحاله بینیتی در مرحله دوم نگهداری شده است و در شکل-ج ریزساختار نمونه ۵ که ۱۲ ساعت در مرحله دوم نگهداری شده است نشان داده شدهاند. همان طور که مشاهده می شود با افزایش زمان استحاله در مرحله دوم، میزان آستنیتهای باقیمانده بلوکی کاهش یافته و به لایه های نازک فریت و آستنیت غنی از کربن تبدیل شده است.



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه های آستمپر شده به روش تکمرحلهای که با دو بزرگنمایی نشان داده شده اند (لایه های تیره رنگ در تصویر میکروسکوپ الکترونی نشاندهنده فریت و زمینه روشن نشاندهنده آستنیت میباشد) ؛ الف) نمونه شماره ۱، ب) نمونه شماره ۲.



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی نمونه های آستمپر شده به روش دومرحلهای که با دو بزرگنمایی نشان داده شدهاند؛ الف) نمونه ۳، ب) نمونه ۴، ج) نمونه ۵.

همچنین ضخامت صفحات بینیتی که در مرحله اول تشکیل شدهاند کمتر از ۲۰۰ نانومتر می باشد ولی در مرحله دوم با کاهش دما از رشد این صفحات ضخیم تر جلوگیری شده و لایه های نازک با ضخامت کمتر از ۱۰۰ نانومتر در این دما جوانه زده و رشد کردهاند.

از دلایل جلوگیری از رشد صفحات ضخیم تر در دمای پایین تر این است که با کاهش دما قدرت نفوذ کربن کاهش یافته و نمی تواند از صفحات ضخیم تر خارج شود پس در عمل رشد صفحات ضخیم تر پایان می یابد. با ادامه یافتن استحاله در مرحله دوم ساختار یکپارچهای از بینیت تشکیل شده است که نشاندهنده تکمیل استحاله می باشد و نمونههای پایانی، یکنواختی ساختاری بهتری را نشان می دهند که این یکنواختی می تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی شود.

فازیابی: در شکل (۷) منحنی حاصل از پراش پرتو ایکس نشان داده شده است. منحنی اول مربوط به نمونه ۱ (آستمیرینگ تکمرحلهای) می باشد که پیک های کامل مشخصي در ناحيه مربوط به صفحات استنيت مشاهده شد، كه این گواهی بر وجود میزان آستنیت قابل ملاحظهای در این نمونه میباشد که از تصاویر میکروسکوپی نیز همین نتایج قابل استنتاج بود. منحنی های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب نشان دهنده نمونه-های ۲، ۳ و ۴ می باشد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش زمان استحاله (نمونه ۲) در دمای آستمپرینگ مشابه نمونه اول، پیکهای مربوط به صفحات فریت نسبت به نمونه اول افزایش و پیکهای آستنیت کاهش یافتهاند که همین موضوع در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز مشاهده گردید. نمونههای ۳ و ۴ تحت عملیات دومرحلهای قرار گرفتهاند با این تفاوت که نمونه ۳، سه ساعت و نمونه ۴، شش ساعت در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد نگهداری شدهاند. همانطور که مشاهده می شود با پیشرفت استحاله به روش دومرحلهای، پیکهای مربوط به صفحات آستنیت کاهش یافته وپیکهای صفحات فریت بینیتی افزایش مییابد. به بیان دیگر حجم فريت بينيتى افزايش يافته و حجم أستنيتهاى اوليه باقىمانده كاهش يافته كه با توجه به تصاوير ميكروسكوپ الكتروني روبشی در شکل (۶) نیز این امر تایید می شود و این خود نشان دهنده بینیتی شدن فولاد مورد نظر بیش از ۹۰٪ در این روش است. باید خاطر نشان کرد که میزان حجم آستنیتها کاهش

يافته ولى به دليل نفوذ كربن استحكام آن افزايش مىيابد.



آزمون کشش: در شکل (۸) نتایج حاصل از آزمون کشش و تغییرات افزایش طول نسبی و استحکام در نمونهها مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که مشاهده می شود نمونههای ۲، ۳ و ۴ که ساختار بینیتی دارند نسبت به نمونه آئیل شده، بدون آن که کاهش چندانی در افزایش طول نسبی از خود نشان بدهند، استحکام بسیار بالاتری دارند.



شکل ۸. نتایج آزمون کشش.

بنابراین خواص مکانیکی بهبود قابل توجهی یافته و این نوع فولادها میتوانند در کاربردهای با استحکام بالا بهکار گرفته شوند. با جایگزینی آستمپرینگ دومرحلهای (نمونههای ۳و۴) بهجای عملیات مرسوم آستمپرینگ (نمونه ۲) توانستهایم استحکام را بهبود بخشیم در حالیکه درصد افزایش طول نسبی نیز تغییر چندانی نکرده است. این امر به دلیل آن است که هم در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۶ و هم از نتایج XRD میزان آستنیت بلوکه اولیه در نمونههای ۳ و کاهش یافته و میزان بینیت افزایش مییابد و این تغییرات به

بهبود خواص مکانیکی کمک مینماید. تولید ورقههای غنی از کربن آستنیتی و همچنین فریتهای بینیتی ظریفتر و جایگزین شدن این ساختار بهجای آستنیت بلوکی نیز در اصلاح خواص مکانیکی از اهمیت فراوانی برخوردار است [۵]. با مقایسه نمونه های ۳ و ۴ میتوان به این نتیجه رسید که افزایش زمان آستمپرینگ دومرحلهای تاثیر چندانی بر استحکام و انعطاف پذیری نمی گذارد و تصاویر میکروسکوپی الکترونی شکل ۶ هم تفاوت چندانی میان این نمونه ها نشان ندادند.

سختی سنجی: شکل (۹) تغییرات سختی نمونهها که به روش ویکرز انجام شده را نشان میدهد. مشابه با نتایج آزمون کشش در اینجا نیز سختی نمونههای آستمپر شده بسیار بالاتر از نمونه اولیه میباشند به نحوی که سختی نمونه شماره ۲ که به مدت چهار ساعت طی عملیات حرارتی تکمرحلهای قرارگرفته، حدود یک و نیم برابر نمونه آنیل است.

درنمونه ۳ که آستمپرینگ دومرحلهای را طی نموده سختی نسبت به نمونه تکمرحلهای افزایش یافته است. این افزایش سختی که با کمک کاهش دما در مرحله دوم حاصل می شود به این دلیل است که در دماهای پایین نیرومحرکه جوانه زنی بالا رفته و استحکام آستنیت افزایش می یابد که این امر سبب کاهش ضخامت تیغههای فریت بینیتی می شود. از دیگر عوامل کاهش دما افزایش کسر حجمی لایههای نازک آستنیت و کاهش کسر حجمی آستنیت بلوکه شده می باشد که باعث افزایش کسر حجمی فریت بینیتی می شود [۵]. اما سختی نمونه شماره ۴ تفاوت چندانی با نمونه شماره ۳ نداشته است و مشابه با نتایج آزمون کشش و بررسی ریز ساختار، افزایش زمان آستمپرینگ دومر حلهای تاثیر مثبتی بر خواص مکانیکی نمی-گذارد.



شکل ۹. نتایج سختیسنجی ویکرز.

مراجع

- 1. Bhadeshia, H.KDH., High performance bainitic steels, Materials Science Forum, 500 (2005) 63-74.
- Bhadeshia, H.K.D.H., Nanostructured bainite, Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 466 (2113) 3-18.
- 3. Lee, Y.K., et al., Effect of isothermal transformation temperature on amount of retained austenite and its thermal stability in a bainitic Fe–3% Si–0.45% C–X steel, Scripta Materialia, 47 (12) (2002) 805-809.
- 4. podder, A.S., Tempering of a Mixture of Bainite and Retained Austenite, University of Cambridge, 2011.
- Wang, X.L., Wu, K.M., Hu, F., Yu, L., Wan, X.L., Multistep isothermal bainitic transformation in medium-carbon steel, Scripta Materialia, 74 (2014) 56-59.
- Garcia-Mateo, C., Caballero, F., Bhadeshia, H., Acceleration of Low-Temperature Bainite, ISIJ International, 43 (2003) 1821-1825.
- Hu, F., P. D. Hodgson, and K. M. Wu. "Acceleration of the super bainite transformation through a coarse austenite grain size." Materials letters 122 (2014): 240-243.
- Li, H.Y., Lu. X.W., Wu, X.C., Min, Y.A., Jin, X.J., Bainitic transformation during the two-step quenching and partitioning process in a medium carbon steel containing silicon, Materials Science and Engineering: A, 527 (2010) 6255-6259.
- Garcia-Mateo, C., Caballero, F.G., Bhadeshia, H.K.D.H., Development of hard bainite, ISIJ international, 43 (2003) 1238-1243.
- Bhadeshia, H.K.D.H., Bainite in steels: transformation, microstructure and properties, London: The Institute of Materials, University of Cambridge, (2001) 377-382.
- Zhang, M., Wang, T.S., Wang, Y.H., Yang, J., Zhang, F.C., Preparation of nanostructured bainite in mediumcarbon alloysteel, Materials Science and Engineering: A, 568 (2013) 123-126.
- 12. www.msm.cam.ac.uk/map/steel/programs/mucg83.html.
- 13. Keyto, S., Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure, Key to Steel Web Site. Actualizada en septiembre del, (2001).

۴- نتیجه گیری

- ۱- در این پژوهش نشان داده شد با کاهش درصد کربن
 به دلیل کاهش دمای تحول بینیتی میتوان در
 زمانهای بسیار کوتاهتری توسط عملیات آستمپرینگ
 به ساختار تمام بینیتی نانوساختار دست یافت.
 حداکثر زمان بهکار گرفته شده در این تحقیق ۱۲
 ساعت میباشد
- ۲- از مقایسه آزمونهای پراش پرتو ایکس، کشش و سختیسنجی با تصاویر میکروسکوپ الکترونی می توان نتیجه گرفت که فولاد تشکیل شده از صفحات بینیتی نانوساختار نسبت به فولاد اولیه خواص مکانیکی قابل توجهی از خود نشان می دهند.
- ۳- توسط عملیات حرارتی دومرحلهای با کاهش دمای استحاله در مرحله دوم به دلیل افزایش استحکام آستنیت و نیروی محرکه جوانهزنی، از افزایش ضخامت صفحات بینیتی جلوگیری شده و با توجه به نتایج XRD کسر حجمی فریت بینیتی افزایش یافته است. تصاویر ریزساختاری نیز گواهی بر این است. تصاویر ریزساختاری نیز گواهی بر این دمای استحاله، ضخامت صفحات فریت بینیتی کاهش یافته است. برای مقایسه خواص مکانیکی می توان به افزایش استحکام کششی ۲۰ درصدی و افزایش سختی ۱۲ درصدی نسبت به عملیات حرارتی تکمرحلهای اشاره کرد.
- ۴- افزایش زمان آستمپرینگ دومرحلهای تاثیر چندانی بر ریزساختاری نداشته و در نتیجه استحکام کششی و سختی نمونه نیز چندان تحت تاثیر قرار نمی گیرد. در نتیجه آستمپرینگ دومرحلهای کوتاه مدت، تاثیر بسیار قابل توجهی بر خواص مکانیکی ماده می گذارد و یک فولاد کربنمتوسط را به رده فولادهای استحکام بالای آلیاژی یا پرکربن نزدیک می نماید.