

Research Paper

The effect of thermomechanical process on the nanobainitic medium carbon steels

Meysam Pourshadloo¹, *Yahya Palizdar², Alireza Kolahi²

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

2- Assistant Professor, Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center (MERC), Karaj, Iran.

Citation: Pourshadloo M, Palizdar Y, Kolahi A. The effect of thermomechanical process on the nanobainitic medium carbon steels. Metallurgical Engineering 2019; 22(1): 21-31 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.98253.1219>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2019.98253.1219>

ABSTRACT

In the recent years attempts were made in order to develop nanostructured bainitic steels which have shown an outstanding combination of strength and toughness. The austenite grain size has a significant influence on phase transformation and mechanical properties of bainitic steels. The martensite treatment including cold rolling and subsequent annealing of microstructures with high percentage of martensite is one of the most effective thermo-mechanical methods for the grain refinement in steels. The present study aims to investigate the effects of thermomechanical and austempering processes on the microstructure and mechanical properties of the medium carbon high aluminium nanobainitic steel. In this regard, nanostructured bainitic steels with lower carbon content (0.45 wt%) than conventional super bainitic steel were cast and hot rolled. To obtain the bainitic structure the specimens were austenitized at 1030 °C for 20 min and quenched in water. The specimens were subjected to 20% reduction in thickness by cold rolling and subsequent annealing at 600 °C for 20 min. The specimens were austenitized and transformed isothermally at 340 °C and finally were quenched in water. The microstructure was characterized by X-ray diffraction (XRD), optical (OM) and field emission scanning electron microscopy (FESEM) as well as tensile test for mechanical properties. The results showed that no significant changes were obtained in properties due to the increase in the rate of bainitic transformation and low changes in the austenite grain size. For specimens with a coarse austenite grain size (47 μm) the strength of 1279 MPa and elongation of 23% and for specimens with a fine austenite size (33 μm) the strength of 1231 MPa with a elongation of 19%, were obtained.

Keywords: Bainitic steel, Nano structure, Martensite process, Medium carbon high aluminum steel.

Received: 23 November 2018 | Accepted: 10 April 2019

■ ■
* **Corresponding Author:**

Yahya Palizdar, PhD

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

Tel: +98 (26) 36280040

E-mail: y.palizdar@merc.ac.ir

تاثیر فرآیند ترمومکانیکی بر روی فولادهای بینیتی نانو ساختار کربن متوسط

میثم پورشادلو^{۱*}، یحیی پالیزدار^۲، علیرضا کلاهی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.
۲- استادیار، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

چکیده

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای توسعه نسل جدیدی از فولادها تحت عنوان فولادهای نانو ساختار بینیتی انجام شده است. اندازه دانه آستنیت اولیه از پارامترهای موثر در تشکیل ریزساختار بینیتی می‌باشد. فرآیند مارتنزیت از جمله فرآیندهای ترمومکانیکی پیشرفته است که مشتمل بر نورد سرد ریزساختار مارتنزیتی و آنیل متعاقب آن می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است تا تاثیر تلفیق فرآیند مارتنزیت و فرآیند آستمپرینگ بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای نانو ساختار بینیتی بررسی شود. فولاد مورد استفاده در این پژوهش از نوع کربن متوسط و آلومینیوم بالا بوده که طراحی و سپس ریخته‌گری شده و در نهایت نورد داغ شده است. این فولاد در دمای °C ۱۰۳۰ به مدت ۲۰ دقیقه آستنیت شده و سپس در آب کوئنچ گردید تا ساختار مارتنزیت حاصل گردد. نمونه‌ها به میزان ۲۰ درصد توسط نورد سرد کاهش مقطع داده شده و سپس در دمای °C ۶۰۰ به مدت ۲۰ دقیقه آنیل شدند. نمونه‌ها مجدداً در دما و زمان مشابه آستنیت شده و در دمای °C ۳۴۰ تحت عملیات آستمپرینگ قرار گرفتند. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی انجام گرفت و به منظور ارزیابی خواص مکانیکی از آزمون کشش استفاده شد. به دلیل تشدید نرخ استحاله بینیتی و تغییرات کم اندازه دانه آستنیت اولیه تفاوت زیادی در خواص مشاهده نشد. استحکام کشش نهایی برای نمونه‌ها با اندازه دانه بزرگ (۴۷ μm) ۱۲۷۹ مگاپاسکال با ازدیاد طول ۲۳ درصد و برای نمونه‌ها با اندازه دانه ریزتر (۳۳ μm) ۱۲۳۱ مگاپاسکال با ازدیاد طول ۱۹ درصد به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: فولاد بینیتی، نانو ساختار، فرآیند مارتنزیت، فولاد کربن متوسط آلومینیوم بالا.

دریافت: ۱۳۹۷/۹/۲ | پذیرش: ۱۳۹۸/۱/۲۱

۱. مقدمه

فولاد می‌شود. میکروساختار حاوی فریت بینیتی و آستنیت باقیمانده‌ی غنی از کربن می‌باشد [۴،۵].

در سال‌های اخیر جهت تولید مواد فوق ریز دانه و نانو ساختار از روش‌های مختلفی استفاده شده است. این روش‌ها را بطور کلی به دو دسته فرآیندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید و فرآیندهای ترمومکانیکی^۱ پیشرفته تقسیم می‌کنند. فرآیند مارتنزیت یکی از فرآیندهای ترمومکانیکی پیشرفته است که شامل نورد سرد و آنیل ساختار مارتنزیتی می‌باشد. تشکیل میکروساختار فوق ریز دانه به ریزساختار مارتنزیت نسبت داده می‌شود که در اثر تغییر شکل پلاستیک به دانه‌های ریزتری تقسیم می‌شود. دانسیته بالای نابجایی‌ها که در اثر نورد سرد حاصل می‌شود و غلظت بالای کربن محلول در ساختار مارتنزیتی نیز به تقسیم دانه‌ها در اثر تغییر شکل ناهمگن کمک می‌کنند [۶]. به نظر می‌رسد فرآیند مارتنزیت

فولادها از جمله مهم‌ترین آلیاژهای صنعتی هستند که کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف از جمله صنعت خودرو پیدا کرده‌اند. از روش‌های مهم افزایش استحکام فولادها می‌توان به توسعه نسل جدیدی از فولادها تحت عنوان فولادهای نانو ساختار بینیتی نام برد. فولاد نانو ساختار بینیتی فولادی است که بینیت حاصله با انجام استحاله در دماهای کمتری ایجاد می‌شود [۱،۲]. در واقع در این گستره‌ی دمایی به دلیل قابلیت نفوذ پایین کربن در حین عملیات آستمپرینگ، تنها امکان نفوذ در مسیرهای کوتاه وجود دارد و در نتیجه ضخامت صفحات فریت بینیتی ایجاد شده بسیار کم و نهایتاً ساختار بینیتی حاصل بسیار ظریف خواهد بود [۳]. عناصر موجود در این فولادها مانند Al و Si با تاثیرگذاری بر روی نیروی محرکه شیمیایی از رسوب سازی سمنتیت از آستنیت جلوگیری می‌کنند که موجب بالا رفتن چرمگی

1. Thermomechanical process

* نویسنده مسئول:

دکتر یحیی پالیزدار

نشانی: کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته.

تلفن: ۰۴۰ ۳۶۲۸۰۰۲۶ (۲۶) ۹۸+

پست الکترونیکی: y.palizardar@merc.ac.ir

فرآیند مارتنزیت، فولاد کم کربن نانو ساختار/فوق ریز دانه با اندازه دانه ۱۸۰ نانومتر ایجاد کردند.

اثر اندازه دانه آستنیت اولیه بر روی تحولات فازی و خواص مکانیکی فولادها به خوبی مشهود است اما با این حال تفاوت‌هایی در تاثیر این پارامتر بر تحولات فازی به دلیل متفاوت بودن نوع دگرگونی‌ها وجود دارد [۱۵]. اندازه دانه آستنیت یکی از پارامترهای مهم در تسریع استحاله بینیتی است که توسط کنترل تعداد نقاط هسته‌زایی و نرخ رشد تاثیر مهمی در مورفولوژی فولادهای بینیتی دارد. در واقع یک نوع رقابت بین چگالی نقاط هسته‌زایی و پتانسیل رشد در دانه‌های درشت آستنیت حین تحول بینیتی وجود دارد [۱۶]. مطالعات متعددی در زمینه اثر دمای آستنیت‌زدن و اندازه دانه آستنیت اولیه بر نرخ استحاله بینیتی انجام شده است و همواره تلاش شده است تا استحاله بینیتی تشدید شود. اما در این مطالعات تاثیر اندازه دانه آستنیت بر روی تحول بینیتی، متفاوت گزارش شده است. در برخی مقالات به این امر اشاره شده است که با افزایش اندازه دانه آستنیت فولادهای بینیتی، خواص بهتری حاصل می‌شود. فریت بینیتی از مرزدانه آستنیت جوانه زده و به سمت داخل دانه رشد می‌کند و جوانه بعدی از نوک فریت بینیتی قبلی ایجاد شده و رشد می‌کند تا دسته‌ی فریت بینیتی تشکیل شود [۱۷]. این جوانه زنی از نوک جوانه قبلی تا زمانی که اندازه آستنیت بزرگ‌تر از طول دسته‌ی بینیتی باشد ادامه می‌یابد. در مقابل زمانی که اندازه آستنیت فقط به بزرگی چند میکرومتر باشد، مورفولوژی بینیتی متفاوت می‌شود بطوریکه کربن عمدتاً بجای نوک از کناره‌ی صفحات فریت بینیت پس زده می‌شود بنابراین صفحات فریت بینیت به صورت لایه‌ای کنار یکدیگر تشکیل شده و میان آن‌ها آستنیت باقیمانده و یا سمنتیت (در حالتی که Si کم است) ایجاد می‌شود [۳].

با کاهش اندازه دانه مساحت مرزدانه‌ها زیاد می‌شود و نرخ تحول بینیتی به دلیل افزایش نقاط هسته‌زایی تشدید می‌شود که این اثر توسط ریس^۹ نشان داده شده است اما مکانیزم دیگری که باید به آن توجه داشت این است که وقتی اندازه دانه آستنیت کوچک است، فرآیند رشدی که توسط هسته‌زایی از نوک جوانه‌ها اتفاق می‌افتد متوقف شده و سینتیک تحول بینیتی به نرخ هسته‌زایی از مرزدانه‌ها محدود می‌شود [۱۸]. لذا دمای نگهداری هم‌دما در دانه‌های کوچک آستنیت می‌تواند نقش مهمی در نرخ تحول بینیتی داشته باشد چون صفحاتی که کنار یکدیگر رشد می‌کنند کربن را پس می‌زنند و این پس زدن به شدت تحت تاثیر دمای نگهداری هم‌دما است. در نتیجه یک رقابت میان رشد صفحات و نفوذ کربن در دانه‌های کوچک آستنیت وجود دارد در حالی که این اثر برای دانه‌های بزرگ آستنیت که جوانه‌ی جدید از نوک صفحه‌ی قبل رشد می‌کند وجود ندارد [۱۹].

9. Rees

در مقایسه با روش‌های تغییر شکل پلاستیکی شدید برای صفحات و قطعات بزرگ نیز مناسب بوده و پتانسیل بیشتری را برای کاربرد عملی دارد [۷]. سوچی^۲ و همکارانش [۸] از فرآیند مارتنزیتی جهت دستیابی به ساختار بسیار ریز دانه در فولاد کم کربن استفاده نمودند که ساختار نهایی گزارش شده شامل دانه‌های بسیار ریز فریت و کاربیدهای رسوبی بود. تیانفو^۳ [۹] موفق به تولید فولاد نانو ساختار در محدوده اندازه دانه ۲۰ تا ۳۰۰ نانومتر شد. او فولاد کم کربن را پس از آستنیت‌زدن و رسیدن به ساختار مارتنزیت به میزان ۹۳٪ نورد سرد کرد و سپس نمونه‌ها به مدت ۶۰ تا ۴۸۰ دقیقه در دمای ۱۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد آنیل شدند. فروهرا^۴ و همکارانش [۱۰] از فرآیند مارتنزیتی جهت دستیابی به ساختار بسیار ریز دانه استفاده کردند؛ آن‌ها نشان دادند که با افزایش میزان نورد سرد بر روی ساختار مارتنزیت اندازه دانه آستنیت اولیه کاهش می‌یابد. ونگ^۵ [۱۱] با ۷۷٪ پیش کرنش فولاد کم کربن در دمای ۷۷۰ درجه سانتی‌گراد و سریع سرد کردن به ساختار فریت و مارتنزیت رسید و سپس این ساختار را به میزان ۳۳٪ در دمای محیط تغییر شکل داده و بعد از آنیل به مدت زمان ۴۵ دقیقه در ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد فریت هم‌محور ۴۰۰ نانومتری و کاربیدهای ریز نانومتری حاصل شد. مظاهری^۶ و همکاران [۱۲] خواص ریزساختاری و مکانیکی فولادهای دوفازی ایجاد شده با استفاده از فرآیند نورد سرد و آنیل میان بحرانی فولاد دارای ۱/۱۵ درصد وزنی منگنز بررسی کردند. آن‌ها ریزساختار اولیه فریت-پرلیتی را در دمای ۸۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه آستنیت‌زدن و سپس در دمای ۷۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۱۰۰ دقیقه آنیل کردند و بعد از آن نمونه‌ها به سرعت در آب سرد شدند. در ادامه ریزساختار دوفازی فریتی-مارتنزیتی حاصل به میزان ۸۰٪ نورد سرد شد و در دماهای ۷۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۸ دقیقه آنیل و فولاد دو فازی فوق ریز دانه با میانگین اندازه دانه فریت ۱-۲ میکرومتر ایجاد شد. رضایی^۷ و همکاران [۱۳] در ساخت فولادهای نانو ساختار، از روش ترمومکانیکی پیشرفته استفاده نمودند. به همین منظور، فاز آستنیت تحت عملیات تغییر شکل در زیر دمای M_s به مارتنزیت تبدیل شد و در ادامه‌ی فرآیند تغییر شکل، مارتنزیت خرد شده و مکان‌های مناسب جوانه زنی برای برگشت مارتنزیت به آستنیت در حین عملیات آنیل بعدی فراهم شد که منجر به ریزدانه‌گی و تولید فولاد نانو ساختار گردید. قاسمعلی^۸ و همکاران [۱۴] با استفاده از

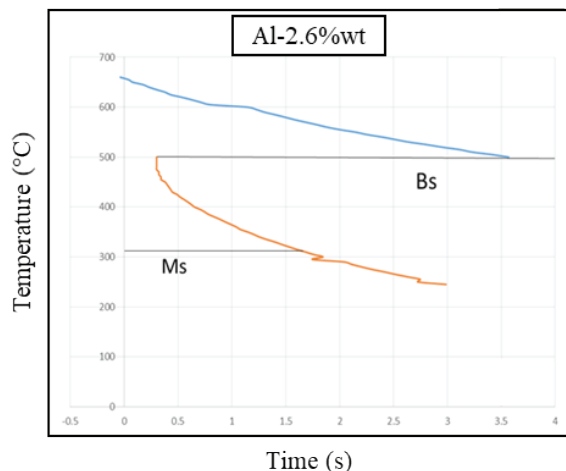
2. Suji
3. Tianfu
4. Furuhera
5. Wang
6. Mazaheri
7. Rezaee
8. Ghassemali

۲. مواد و روش تحقیق

طراحی آلیاژ طبق نظریه متئو و بادشیا و انتقال منحنی به سمت راست یعنی مقدار کربن آستنیت بیشتر توسط تنظیم مقدار عناصر آلیاژی بوده است. فولاد مورد استفاده در این تحقیق از نوع کربن متوسط و آلومینیوم بالا است که با استفاده از نرم افزار ترمومکانیکی MUCG-83 ترکیبات سایر عناصر آلیاژی نیز تعیین گردید که در جدول ۱ مشخص شده است. با استفاده از نرم افزار ترمومکانیکی MUCG-83 و نرم افزار اکسل منحنی زمان-دما-دگرگونی (TTT) به منظور بررسی دما و زمانهای استحاله مطابق شکل ۱ تهیه شد که با توجه به آن دمای استحاله همدمای بینیتی ۳۴۰ درجه سانتیگراد تعیین شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده.

عنصر	درصد وزنی
Fe	Base
C	0.45
Si	0.58
Mn	1.6
Cr	0.9
Al	2.6



شکل ۱. نمودار TTT رسم شده به کمک نرم افزار MUCG-83.

آلیاژ طراحی شده در کوره القایی تحت حفاظت گاز آرگون ذوب و در ادامه شمش ریخته‌گری شده به منظور تهیه ذوب تمیز که عاری از تخلخل و حفره باشد از ذوب مجدد تحت سرباره الکتریکی (ESR) استفاده گردید و سپس

15. Time-Temperature-Transformation

16. Electroslog remelting

و نرخ رشد و میزان فاز بینیت ایجاد شده بیشتر می‌شود. این افزایش فاز تا یک دما مشخص آستنیته کردن ادامه دارد. در این حالت هرچند که تعداد نقاط هسته‌زایی کمتر شده اما نرخ رشد تأثیر بیشتری نسبت به نقاط هسته‌زایی داشته است [۲۰، ۲۱].

سایر محققین نیز تأثیر کاهش اندازه دانه آستنیت اولیه بر بهبود خواص مکانیکی فولادهای بینیتی را بررسی کردند. ریز کردن اندازه دانه آستنیت نرخ تحول بینیتی را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد که این اثر به دلیل افزایش تغییرات انرژی آزاد حین تحول آستنیت به فریت بینیت توسط بیشتر شدن چگالی نقاط هسته‌زایی سطح دانه‌های آستنیت در ساختارهای ریز دانه است [۵، ۲۳]. لان^{۱۰} و همکاران [۲۲] تأثیر اندازه دانه آستنیت اولیه متفاوت را بر روی دگرگونی بینیتی در فولاد کم کربن بررسی کردند. طبق رابطه زیر با کاهش اندازه دانه آستنیت، S_{V_0} که ناحیه تأثیر گذاری بر هسته‌زایی در مرز دانه‌های آستنیت است، بیشتر می‌شود که نشان دهنده‌ی افزایش نقاط هسته‌زایی دگرگونی بینیتی برای دانه‌های ریز آستنیت است.

معادله ۱.

$$S_{V_0} = \frac{2000}{D_a}$$

آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با کاهش اندازه دانه آستنیت اولیه مقدار S_{V_0} افزایش می‌یابد و سبب می‌شود که تحول بینیت بیشتری در زمان ثابت نگهداری در دمای ثابت تشکیل شود.

ریس^{۱۱} و بادشیا [۲۰] و ماتئو^{۱۲} و همکارانش [۲۴]، نشان داده‌اند که کاهش اندازه دانه‌های آستنیت اولیه به خصوص با استفاده از دماها و زمان‌های کمتر آستنیته کردن و در نتیجه افزایش مکان‌های جوانه زنی فریت بینیتی در کوتاه کردن زمان دگرگونی موثر بوده و اندازه تیغه‌های بینیتی را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. بادشیا^{۱۳} [۲۵] اظهار کرد که تأثیر اندازه دانه آستنیت بر روی سینتیک کلی تحول توسط نرخ رشد فریت بینیتی تعیین می‌شود بطوریکه وقتی تحول به وسیله نرخ رشد پایین محدود شده است؛ ریز کردن اندازه دانه باعث تشدید و در مقابل زمانی که نرخ رشد تحول بالا است ریز کردن اندازه دانه باعث به تعویق افتادن نرخ کل می‌شود. در پژوهش حاضر تأثیر اندازه دانه آستنیت اولیه متفاوت حاصل از فرآیند ترمومکانیکی و همچنین فرآیند آستمپرینگ^{۱۴} متعاقب بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای بینیتی نانوساختار کربن متوسط و آلومینیوم بالا مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند.

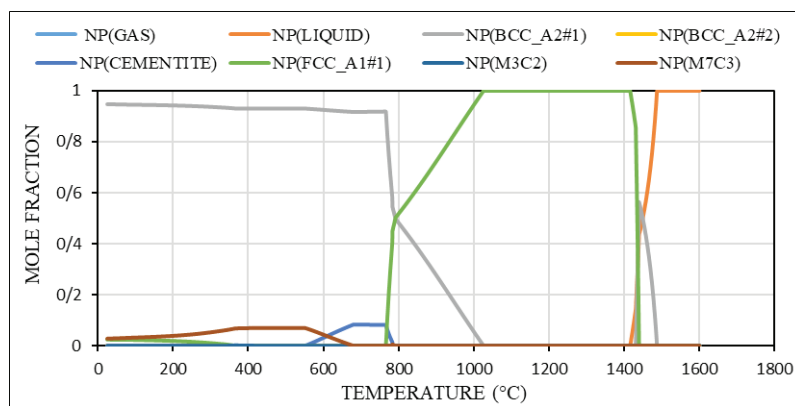
10. Lan

11. Rees

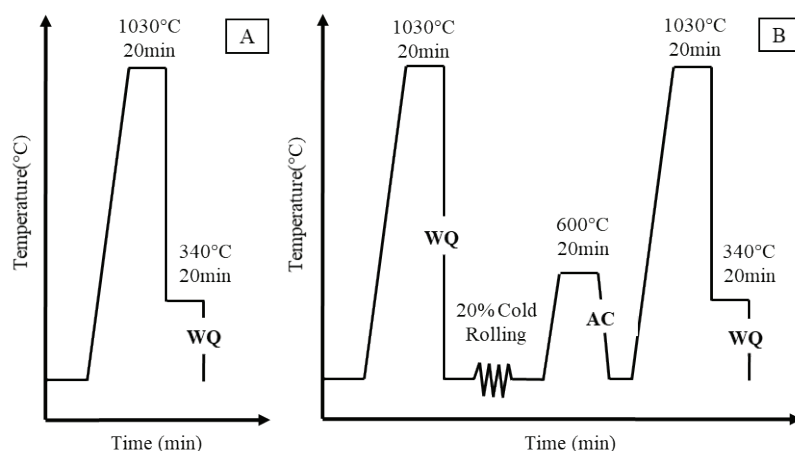
12. Mateo

13. Bhadeshia

14. Austempering process



شکل ۲. نمودار کسر حجمی فازی در دماهای مختلف.



شکل ۳. مراحل ترمومکانیکی فرآیندهای انجام شده.

دهنده‌ی کسر حجمی فازها در دماهای مختلف است دمای آستنیت به ۱۰۳۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۲۰ دقیقه انتخاب شد که مطابق شکل ۳ نمونه‌های آستنیت شده به سرعت در آب کوئنچ گردیدند تا ساختار مارتنزیتی به دست آید. به منظور از بین بردن لایه‌های اکسیدی و تمیز شدن سطح، نمونه‌ها بعد از عملیات حرارتی به وسیله‌ی سنگ مغناطیس پرداخت شدند و در ادامه به کمک دستگاه نورد سرد دو غلتکی با قطر غلتک ۲۵۰ میلی‌متر طی ۱۰ پاس به میزان ۲۰ درصد کاهش سطح مقطع، نورد سرد شده و سپس در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه آنیل و در هوا سرد شدند. نمونه‌ها مجدداً در دما و زمان مشابه آستنیت شده و در نهایت نمونه‌های استحاله یافته در دمای ۳۴۰ درجه‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه، در آب کوئنچ شدند.

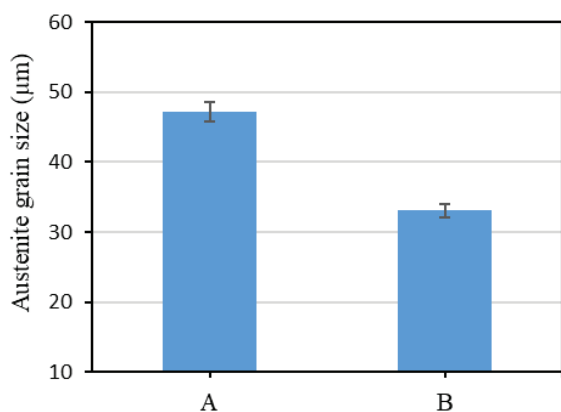
برای تعیین استحکام کششی نهایی، استحکام تسلیم و ازیاد طول نسبی از آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8 استفاده شد. برای هر یک از فولادهای A و B سه نمونه مورد آزمون قرار گرفته و میانگین آن‌ها ارائه گردید. به منظور مشاهده‌ی مرزدانه‌های آستنیت اولیه نمونه‌های پولیش

شمش تهیه شده از ضخامت ۷۰ میلی‌متر طی ۲۰ پاس تا ضخامت ۱۱ میلی‌متر تحت نورد داغ قرار گرفت. از شمش نورد داغ شده نمونه‌هایی به ابعاد ۱۰ × ۲۰ × ۱۴۰ میلی‌متر برای انجام عملیات حرارتی، بررسی‌های ریزساختاری و انجام فرآیند ترمومکانیکی توسط برش جت آبی تهیه شدند. به دلیل اهمیتی که دمای آستنیت کردن بر روی ریزساختار بینیتی و اندازه دانه آستنیت اولیه دارد عملیات حرارتی برای پیدا کردن دما و زمان بهینه انجام شد بطوریکه در حین آن، فولاد بطور کامل آستنیت شده و همزمان اندازه دانه‌ها کوچکترین مقدار باشد و در اثر طولانی بودن زمان در دماهای بالا، دانه‌ها رشد نکنند. برای بررسی تاثیر عملیات ترمومکانیکی دو مسیر زیر طراحی شد:

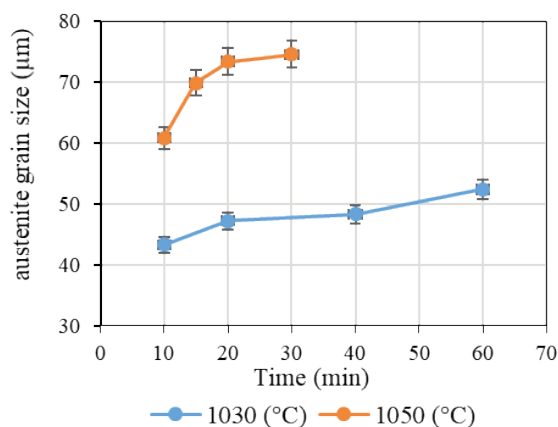
A. فرآیند آستمپر به تنهایی و بدون عملیات مکانیکی قبلی انجام شد.

B. ساختار مارتنزیت بدست آمده از کوئنچ نمونه‌ها در آب، نورد سرد و آنیل شده و سپس تحت عملیات آستمپر قرار گرفت.

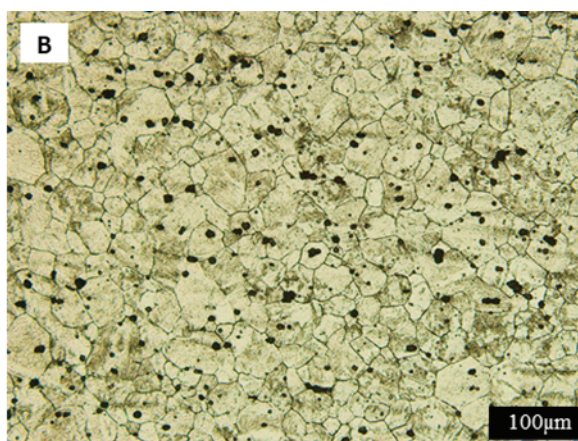
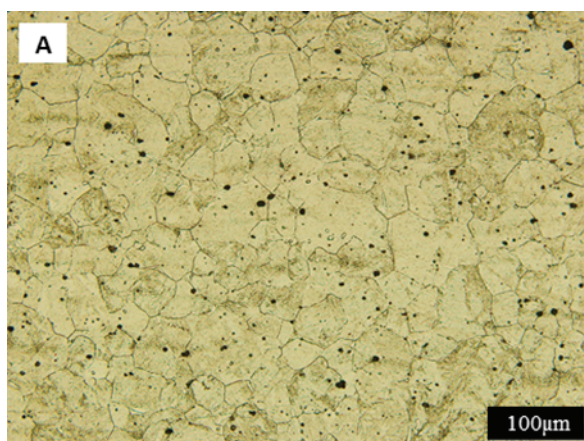
با توجه به نمودار Thermo-Calc در شکل ۲ که نشان



شکل ۵. کاهش میران اندازه دانه آستنیت اولیه برای فولاد A و B.



شکل ۴. نمودار اندازه دانه آستنیت بر حسب دما و زمان متفاوت.



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ نوری قبل از تشکیل بینیت.

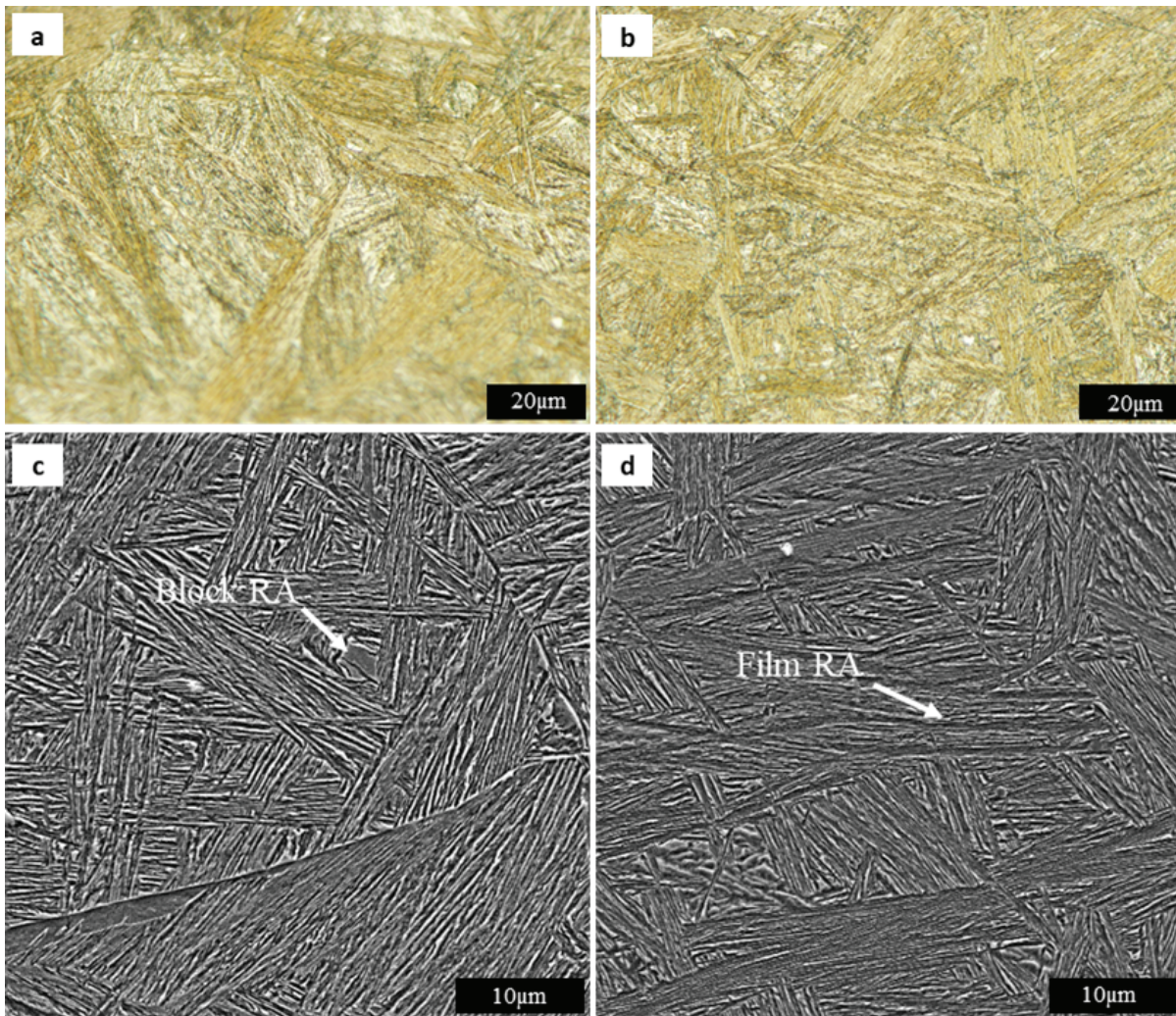
۳. نتایج و بحث

شکل ۴ رشد اندازه آستنیت اولیه را بصورت تابعی از دما و زمان آستنیت کرده برای فولاد مورد نظر نشان می‌دهد. با اعمال ۲۰ درصد نورد سرد و آنیل متعاقب بر روی فولاد B اندازه دانه آستنیت آن در حدود ۳۰ درصد نسبت به حالت بدون نورد (فولاد A) کاهش یافته که به صورت کمی در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین شکل ۶ تصاویر ریزساختار میکروسکوپ نوری نمونه‌های کوئچ شده قبل از

تشکیل بینیت را نشان می‌دهد که با توجه به تصاویر به صورت کیفی نیز مشخص است اعمال فرآیند ترمومکانیکی باعث تغییرات ریزساختاری و کاهش اندازه دانه آستنیت اولیه در فولاد B شده است. ریزساختار بینیتی نمونه‌های A و B که در دمای ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه عملیات حرارتی شده‌اند در شکل ۷ ارائه شده است. در شکل ۷ (a) و (b) تصاویر میکروسکوپ نوری که یک نمای کلی از تیغه‌ای بودن ساختار شامل صفحات فریت بینیتی که در زمینه‌ای از آستنیت باقیمانده توزیع شده‌اند را نشان می‌دهد. شکل ۷ (c) و (d) نیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی

شده با محلول فوق اشباع اسید پیکریک حکاکی شدند. اندازه دانه آستنیت اولیه به روش تقاطع خطی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری ضخامت صفحات فریت بینیتی با استفاده از روش تقاطع خطی تصاویر FESEM انجام شد. برای حکاکی شیمیایی نمونه‌های متالوگرافی جهت بررسی‌های ریزساختار بینیتی از محلول نایتال ۴٪ استفاده شد. بررسی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری Olympus مدل PM63 با حداکثر بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی^{۱۷} (FESEM) مدل TESCAN MIRA3 LUM و با ولتاژ ۱۵ کیلوولت انجام گرفت. به منظور شناسایی فازی، تعیین مقدار کمی آستنیت باقیمانده و مقدار فریت بینیتی تشکیل شده تعدادی از نمونه‌ها تحت پراش پرتو ایکس مرحله‌ای دستگاه با مدل Philips pw370 قرار گرفتند و از پرتوی تکفام k_{α} کبالت با طول موج ۱,۷۹ آنگستروم استفاده شد. الگوهای پراش بدست آمده از پراش پرتوی ایکس در نرم افزار XPert HighScore وارد شده و مورد تحلیل قرار گرفت.

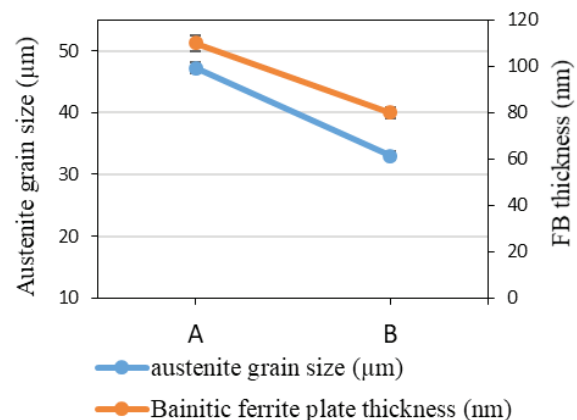
17. Field Emission Scanning Electron Microscope



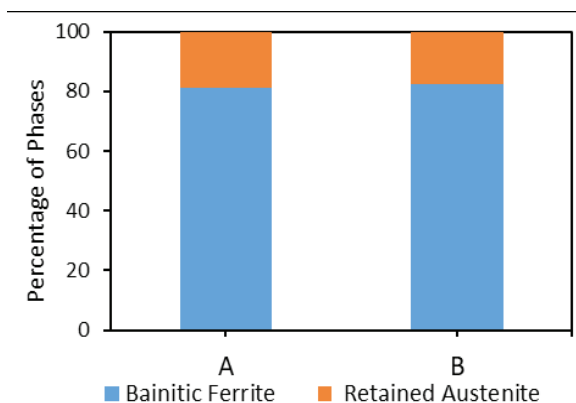
شکل ۷. تصاویر ریزساختاری نمونه‌های (A) a و c و (B) b و d.

(FESEM) را نشان می‌دهد. میکرو ساختار بدست آمده در این نمونه‌ها شامل بسته‌های بینیتی است که این بسته‌ها خود از لایه‌های نازک فریت بینیتی و آستنیت باقیمانده تشکیل شده است. آستنیت باقیمانده دارای دو مورفولوژی فیلم‌های نازک میان صفحات فریت بینیتی و آستنیت‌های بلوکی است [۲۰]. فاز فریت به دلیل اینکه در زمان‌های کوتاه‌تری حکاکی می‌شود به رنگ تیره و آستنیت باقیمانده به رنگ روشن و با برجستگی زیاد است [۲۶].

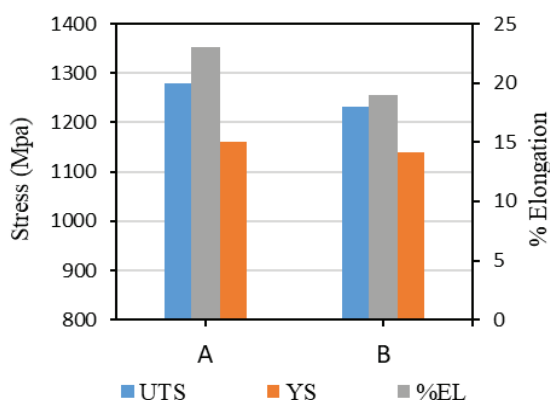
شکل ۸ نشان می‌دهد که انجام عملیات ترمومکانیکی باعث افزایش نرخ هسته‌زایی و ظریف‌تر شدن ریزساختار بینیتی می‌گردد. به این ترتیب که با کاهش اندازه دانه آستنیت اولیه مساحت ناحیه تاثیر گذار بر روی هسته‌زایی فریت بینیت در مرزدانه‌های آستنیت اولیه بیشتر می‌شود [۲۷]. همچنین کار مکانیکی و تغییر شکل آستنیت قبل از استحاله بینیتی بر روی چگالی نقاط هسته‌زایی تاثیر گذار بوده و سبب می‌شود که هسته‌زایی علاوه بر مرزدانه‌ها در داخل دانه‌های آستنیت نیز اتفاق بیافتد [۲۸].



شکل ۸. نمودار تغییرات ضخامت صفحات فریت بینیتی و اندازه دانه آستنیت برای فولادهای A و B.



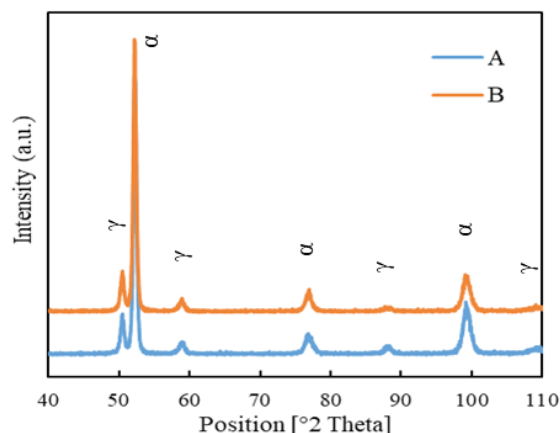
شکل ۱۰. کسر حجمی فازهای فریت بینیتی و آستنیت باقیمانده در فولادهای A و B.



شکل ۱۱. مقایسه نتایج حاصل از آزمون کشش در فولادهای A و B.

اعمال نورد سرد و کاهش ۳۰ درصدی اندازه دانه آستینیت اولیه توسط فرآیند ترمومکانیکی تأثیر محسوس بر روی خواص نداشته است که دلیل این امر را می‌توان اینگونه بیان کرد که:

۱. کاهش اندازه دانه عموماً می‌تواند به افزایش نرخ استحاله کمک کند. اما این در حالی است که در فولاد مورد بحث سعی شده است با تغییر ترکیب شیمیایی نرخ استحاله تسریع شود. میزان کربن ترکیب فولاد نسبتاً پایین است که سبب کاهش استحکام فاز زمینه آستینیت می‌شود. استحکام آستینیت بر ضخامت صفحات فریت بینیتی تأثیر گذار می‌باشد؛ به این صورت که آستینیت ضعیف‌تر در برابر حرکت و پیش‌روی فصل مشترک مقاومت کمتری از خود نشان می‌دهد و همچنین پس زدن کربن به درون آستینیت نیز راحت‌تر انجام شده و سبب تشدید تحول بینیتی می‌گردد [۳۰]. همچنین به دلیل وجود عنصر آلیاژی آلومینیوم که با افزایش نیرو محرکه استحاله آستینت به فریت بینیتی باعث افزایش سرعت تحول می‌گردد. بنابراین در زمان‌های کمتری می‌توان به ساختار دو فازی فریت بینیتی و آستینت باقیمانده رسید

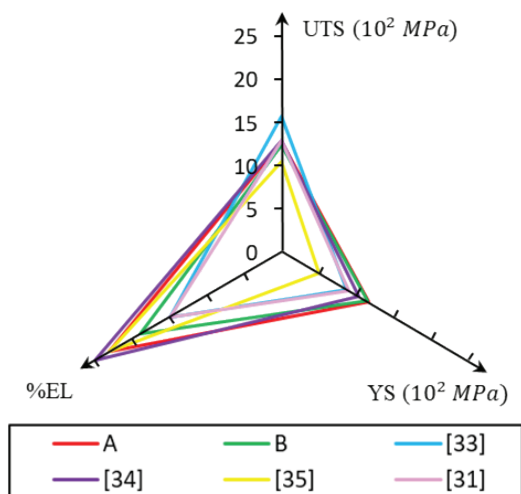


شکل ۹. الگوی پراش پرتو ایکس پس از استحاله هم‌دما برای فولادهای A و B.

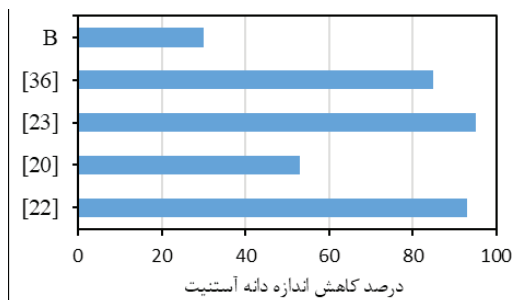
الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های A و B پس از استحاله هم‌دما در ۳۴۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۹ ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود الگوی پراش شامل پیک‌های مربوط به دو فاز آستینت و فریت می‌باشد. ذرات سمنتیت احتمالاً به دلیل وجود میزان آلومینیوم بالا که اجازه تشکیل کاربیدها منجمله سمنتیت را نمی‌دهد به مقدار ناچیز تشکیل شده که قابل شناسایی با آزمون پراش پرتو ایکس نیستند بنابراین در الگوی پراش هیچگونه پیکی مربوط به سمنتیت مشاهده نمی‌شود [۲۹]. آستینت‌های بلوکی می‌توانند به هنگام کوئنچ شدن در آب تحت استحاله برشی قرار گیرند و به مارتزیت تبدیل شوند اما به دلیل کم بودن میزان آن و محدودیت روش XRD قابل شناسایی با این آزمون نیستند. دلیل تحول آستینت به مارتزیت را می‌توان اینگونه بیان کرد که در حین استحاله بینیتی، کربن توسط فریت‌های بینیتی پس زده شده و به درون تیغه‌های آستینت نفوذ می‌کند و با افزایش میزان کربن، تیغه‌های آستینت در محیط پایدار می‌شوند اما در آستینت‌های بلوکی چون صفحات فریت بینیتی در فواصل دورتری قرار می‌گیرند لذا آستینت از کربن کمتری غنی شده و بالطبع پایداری کمتری داشته و احتمال استحاله‌ی برشی در آن وجود دارد.

کسر حجمی فازهای فریت و آستینت باقیمانده در شکل ۱۰ برای دو فولاد A و B نشان داده شده است. میزان کسر حجمی فریت بینیتی برای نمونه A برابر ۸۱ درصد و برای نمونه B به میزان ۸۲٫۴ درصد بدست آمد که بیانگر مصرف زیاد آستینت در زمان ۲۰ دقیقه و کامل شدن استحاله در زمان‌های کوتاه برای هر دو فولاد است.

آزمون‌های کشش که بر روی نمونه‌ها با ریزساختار بینیتی حاصل از فولادهای A و B انجام گرفت، منتج به نمودار تغییرات درصد ازدیاد طول نسبی، استحکام کشش نهایی و استحکام تسلیم نشان داده شده در شکل ۱۱ گردید. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمون‌ها مشاهده می‌شود که



شکل ۱۳. مقایسه خواص مکانیکی فولادهای بینیتی این تحقیق با نتایج سایر محققان.



شکل ۱۴. مقایسه میزان کاهش اندازه دانه آستنیت اولیه.

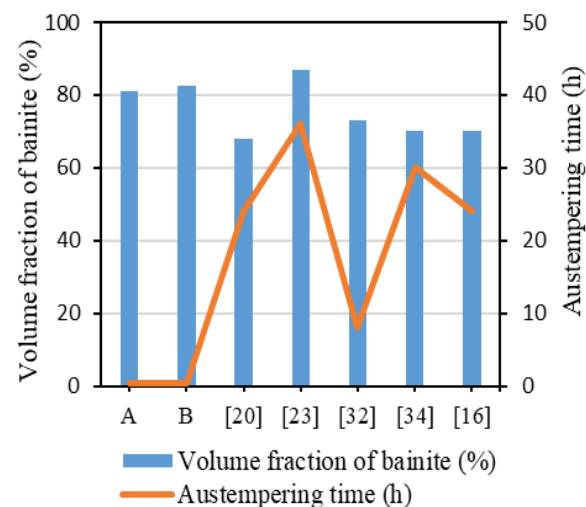
۴. نتیجه گیری

با اعمال فرآیند ترمودینامیکی و بررسی تاثیر اندازه دانه آستنیت اولیه بر روی ریزساختار و نرخ استحاله بینیتی می توان نتایج حاصل را به صورت زیر خلاصه کرد:

۱. با افزایش میزان آلومینیوم تا ۲٫۶ درصد و کاهش کربن تا ۰٫۴۵ درصد نرخ استحاله بینیتی تشدید شد بطوریکه با انجام عملیات آستمپرینگ در دمای ۳۴۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ دقیقه می توان به ریزساختاری شامل ۸۰ درصد فریت بینیتی دست یافت.
۲. استحکام کششی ۱۲۷۹ Mpa و استحکام تسلیم ۱۱۶۰ Mpa با ازدیاد طول ۲۳ درصد برای فرآیند آستمپر و استحکام کششی ۱۲۳۱ Mpa و استحکام تسلیم ۱۱۴۰ Mpa با ازدیاد طول ۱۹ درصد برای فرآیند ترمومکانیکی بدست آمد که نشان دهنده ی خواص مطلوب برای زمان های ۲۰ دقیقه می باشد.
۳. این مطالعه نشان داد که به دلیل تغییر ترکیب شیمیایی، تشدید نرخ استحاله بینیتی تاثیر فرآیند ترمومکانیکی و کاهش اندازه دانه آستنیت اولیه بر روی تحول بینیتی را غیر قابل تشخیص می کند.

[۳۱]. به همین دلیل تنها با ۲۰ دقیقه نگهداری در محدوده دمای تشکیل بینیت برای هر دو فولاد A و B می توان به خواص مطلوبی دست یافت که قابل مقایسه با فولادهای سوپر بینیتی دیگر هستند. درستی این ادعا را میتوان با بررسی خواص مکانیکی نیز تأیید کرد. با توجه به شکل ۱۲ و نتایج حاصل از آزمون XRD و بررسی کسر حجمی دو فاز غالب یعنی فریت بینیتی و آستنیت باقیمانده می توان نتیجه گرفت که ریزساختار نمونه های A و B ریزساختار فولاد بینیتی بوده اما با این تفاوت که در زمان های به مراتب کمتر ایجاد شده اند. همچنین همانگونه که در شکل ۱۳ مشاهده می شود مقادیر استحکام کشش نهایی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نمونه های A و B هم تراز با فولادهای سوپر بینیتی دیگر است. بنابراین با توجه به توضیحات گفته شده مشخص است که نرخ استحاله بینیتی در این فولاد سریع است.

۲. تغییرات اندازه دانه آستنیت اولیه به منظور بررسی تأثیر این پارامتر بر روی خواص در مقایسه با مقالات آن چنان قابل ملاحظه نیست (شکل ۱۴). به عبارتی دیگر دست یافتن به تغییرات قابل ملاحظه در خواص مکانیکی بر اساس تغییر در اندازه دانه آستنیت اولیه در نرخ تغییرات بالاتر از ۵۰ درصد اتفاق افتاده است و احتمالاً یکی از دلایل عدم حصول تغییرات قابل توجه در نمونه B عدم ایجاد تغییر مناسب در میزان اندازه دانه می باشد. پس با توجه به کم بودن میزان کاهش سطح مقطع در حین تغییر شکل و انجام عملیات حرارتی آستمپر بعد از کار ترمومکانیکی و همچنین زیاد بودن نرخ استحاله بینیتی در این نوع از فولاد اثر کار ترمومکانیکی و کاهش اندازه دانه آستنیت اولیه را غیر قابل تشخیص می کند.



شکل ۱۵. مقایسه درصد حجمی فریت بینیتی ایجاد شده.

References:

- [1] Bhadeshia HK. Nanostructured bainite. In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 2010 Jan 8 (Vol. 466, No. 2113, pp. 3-18). The Royal Society.
- [2] Caballero FG, Bhadeshia HK, Mawella KJ, Jones DG, Brown P. Very strong low temperature bainite. *Materials science and technology*. 2002 Mar 1;18(3):279-84.
- [3] Bhadeshia HK. Bainite in steels 2nd ed. The Institute of Materials, London. 2001.
- [4] Podder AS. Tempering of a mixture of bainite and retained austenite (Doctoral dissertation, University of Cambridge).
- [5] Garcia-Mateo C, FG C, HKDH B. Acceleration of low-temperature bainite. *ISIJ international*. 2003 Nov 15;43(11):1821-5.
- [6] Song R, Ponge D, Raabe D, Speer JG, Matlock DK. Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2006 Dec 15;441(1-2):1-7.
- [7] Murty SN, Torizuka S, Nagai K, Kitai T, Kogo Y. Dynamic recrystallization of ferrite during warm deformation of ultrafine grained ultra-low carbon steel. *Scripta materialia*. 2005 Sep 1;53(6):763-8.
- [8] Tsuji N, Ueki R, Minamino Y, Saito Y. A new and simple process to obtain nano-structured bulk low-carbon steel with superior mechanical property. *Scripta Materialia*. 2002 Feb 28;46(4):305-10.
- [9] Tianfu J, Yuwei G, Guiying Q, Qun L, Tiansheng W, Wei W, Furen X, Dayong C, Xinyu S, Xin Z. Nanocrystalline steel processed by severe rolling of lath martensite. *Materials Science and Engineering: A*. 2006 Sep 25;432(1-2):216-20.
- [10] Furuhashi T, Kikumoto K, Saito H, Sekine T, Ogawa T, Morito S, Maki T. Phase transformation from fine-grained austenite. *ISIJ international*. 2008 Aug 15;48(8):1038-45.
- [11] Wang TS, Zhang FC, Zhang M, Lv B. A novel process to obtain ultrafine-grained low carbon steel with bimodal grain size distribution for potentially improving ductility. *Materials Science and Engineering: A*. 2008 Jun 25;485(1-2):456-60.
- [12] Mazaheri Y, Kermanpur A, Najafizadeh A, Saeidi N. Effects of initial microstructure and thermomechanical processing parameters on microstructures and mechanical properties of ultrafine grained dual phase steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2014 Aug 26;612:54-62.
- [13] Rezaee A, Kermanpur A, Najafizadeh A, Moallemi M. Production of nano/ultrafine grained AISI 201L stainless steel through advanced thermo-mechanical treatment. *Materials Science and Engineering: A*. 2011 Jun 15;528(15):5025-9.
- [14] Ghassemali E, Kermanpur A, Najafizadeh A. Microstructural evolution in a low carbon steel during cold rolling and subsequent annealing. *Journal of nanoscience and nanotechnology*. 2010 Sep 1;10(9):6177-81.
- [15] Garcia-Junceda A, Capdevila C, Caballero FG, de Andres CG. Dependence of martensite start temperature on fine austenite grain size. *Scripta Materialia*. 2008 Jan 1;58(2):134-7.
- [16] Wang XL, Wu KM, Hu F, Yu L, Wan XL. Multi-step isothermal bainitic transformation in medium-carbon steel. *Scripta Materialia*. 2014 Mar 1;74:56-9.
- [17] Pereloma E, Edmonds DV, editors. Phase transformations in steels: Diffusionless transformations, high strength steels, modelling and advanced analytical techniques. Elsevier; 2012 May 11.
- [18] Rees GI, Bhadeshia HK. Bainite transformation kinetics part 1 modified model. *Materials Science and Technology*. 1992 Nov 1;8(11):985-93.
- [19] Jacques PJ. Experimental investigation of the influence of the austenite grain size on the mechanism and kinetics of the bainite transformation in steels. In *Journal de Physique IV (Proceedings)* 2003 Oct 1 (Vol. 112, pp. 297-300). EDP sciences.
- [20] Hu F, Hodgson PD, Wu KM. Acceleration of the super bainite transformation through a coarse austenite grain size. *Materials letters*. 2014 May 1;122:240-3.
- [21] Xu G, Liu F, Wang L, Hu H. A new approach to quantitative analysis of bainitic transformation in a superbainite steel. *Scripta Materialia*. 2013 Jun 1;68(11):833-6.
- [22] Lan LY, Qiu CL, Zhao DW, Gao XH, Du LX. Effect of austenite grain size on isothermal bainite transformation in low carbon microalloyed steel. *Materials Science and Technology*. 2011 Nov 1;27(11):1657-63.
- [23] Jiang T, Liu H, Sun J, Guo S, Liu Y. Effect of austenite grain size on transformation of nanobainite and its mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2016 Jun 1;666:207-13.
- [24] Garcia-Mateo C, FG C, HKDH B. Acceleration of low-temperature bainite. *ISIJ international*. 2003 Nov 15;43(11):1821-5.
- [25] Matsuzaki A, Bhadeshia HK. Effect of austenite grain size and bainite morphology on overall kinetics of bainite transformation in steels. *Materials Science and Technology*. 1999 May 1;15(5):518-22.
- [26] Garcia-Mateo C, Caballero FG, Bhadeshia HK. Mechanical properties of low-temperature bainite. In *Materials Science Forum* 2005 (Vol. 500, pp. 495-502). Trans Tech Publications.
- [27] Kvackaj T, Mamuzic I. A quantitative characterization of austenite microstructure after deformation in nonrecrystallization region and its influence on ferrite microstructure after transformation. *ISIJ international*. 1998 Nov 15;38(11):1270-6.
- [28] Pereloma E, Edmonds DV, editors. Phase transformations in steels: Diffusionless transformations, high strength steels, modelling and advanced analytical techniques. Elsevier; 2012 May 11.
- [29] Amel-Farzad H, Faridi HR, Rajabpour F, Abolhasani A, Kazemi S, Khaledzadeh Y. Developing very hard nanostructured bainitic steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2013 Jan 1;559:68-73.
- [30] Singh SB, Bhadeshia HK. Estimation of bainite plate-thickness in low-alloy steels. *Materials Science and Engineering: A*. 1998 Apr 30;245(1):72-9.

- [31] Garcia-Mateo C, Caballero FG, Sourmail T, Kuntz M, Cornide J, Smanio V, Elvira R. Tensile behaviour of a nanocrystalline bainitic steel containing 3 wt% silicon. *Materials Science and Engineering: A*. 2012 Jul 15;549:185-92.
- [32] Singh K, Kumar A, Singh A. Effect of Prior Austenite Grain Size on the Morphology of Nano-Bainitic Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018 Apr 1;49(4):1348-54.
- [33] Lan HF, Du LX, Li Q, Qiu CL, Li JP, Misra RD. Improvement of strength-toughness combination in austempered low carbon bainitic steel: The key role of refining prior austenite grain size. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017 Jul 5;710:702-10.
- [34] Kumar A, Singh A. Toughness dependence of nano-bainite on phase fraction and morphology. *Materials Science and Engineering: A*. 2018 May 29.
- [35] Hajiannia I, Shamanian M, Atapour M, Ghassemali E, Saeidi N. Development of Ultrahigh Strength TRIP Steel Containing High Volume Fraction of Martensite and Study of the Microstructure and Tensile Behavior. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018 Jun 1:1-8.
- [36] Lee SJ, Park JS, Lee YK. Effect of austenite grain size on the transformation kinetics of upper and lower bainite in a low-alloy steel. *Scripta Materialia*. 2008 Jul 1;59(1):87-90.