

بررسی تاثیر اندازه دانه آستنیت اولیه بر ساختار فولادهای نانو ساختار بینیتی کربن متوسط

زهرا جهانگیری^۱، یحیی پالیزدار^{۲*}، محمد جعفر مولایی^۳، علیرضا کلاهی^۲

^۱ شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۲ پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

^۳ دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۷/۰۳/۰۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۷/۰۶/۲۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۷/۰۷/۰۳

چکیده در سالهای اخیر فولادهای بینیتی نانو ساختار، به دلیل دارا بودن ترکیب مناسبی از استحکام و انعطاف پذیری، توسعه یافته اند. تاثیر پارامترهای موثری نظیر زمان و دمای استحاله هم دما و هم چنین ترکیب شیمیایی بر تعیین خواص نهایی این فولادها مورد تحقیق گسترده قرار گرفته است. این در حالی است که تاثیر پارامتر اندازه دانه آستنیت اولیه هنوز به صورت گسترده در فولادهای نانو ساختار بینیتی با کربن پایین مورد بررسی قرار نگرفته و تاثیر ریز دانه بودن آستنیت اولیه بر خواص نهایی مورد سوال است. هدف از این پژوهش، بررسی نقش اندازه دانه آستنیت اولیه بر ریز ساختار نهایی و خواص مکانیکی فولادهای بینیتی نانو ساختار با کربن متوسط است. در این تحقیق، پس از تعیین ترکیب فولاد مورد نظر، ذوب و ریخته گری آن در کوره القایی انجام شد و پس از عملیات ذوب مجدد تحت سرباره الکتریکی (ESR)، تحت عملیات نورد گرم قرار گرفت.

کلمات کلیدی: فولادهای بینیتی نانو ساختار، اندازه دانه آستنیت اولیه، عملیات آستمپر، ریز ساختار، استحکام کششی.

The Effect of Austenite Grain Size on the Microstructure of the Medium Carbon Nanobainitic Steel

Z. Jahangiri¹, Y. Palizdar^{2*}, M. J. Molaei³, A. Kolahi²

¹ science and engineering, nanotechnology and advanced materials department, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

² materials science and engineering, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran.

³ materials science and engineering, Shahroud University of Technology, Shahroud, Iran.

Abstract Carbide free bainitic steel, so called supper bainitic or nano-structured bainitic steel has attracted considerable attentions due to its remarkable combination of strength and ductility. Unfortunately, the effect of prior austenite grain size has not been investigated for the low carbon nano-structured bainitic steels. In this research, attempts were made to understand the effect of prior austenite grain size effect on the microstructure of carbide free medium carbon bainitic steel. The steel was cast by using induction furnace under argon gas atmosphere. The ingot was electro-slag-remelted (ESR) to obtain clean steel followed by hot rolling.

Keywords: Nano-structured bainitic steel, prior austenite grain size, Austempering treatment, Microstructure, Tensile strength.

۱- مقدمه

بینیتی را از طریق کاهش تعداد مواضع جوانه‌زنی افزایش دهد، اما در دمای دماغه منحنی C که شروع استحاله بینیتی و حدود 534°C است، تاثیری ندارد. تحت شرایط هم‌دمای مشابه، کاهش اندازه دانه آستنیت منجر به افزایش کسر حجمی بینیت تشکیل شده می‌شود.

در پژوهشی [۱۴]، تاثیر اندازه دانه آستنیت روی استحاله بینیتی و خواص مکانیکی فولادی با ترکیب $1/6\text{Co}$ wt% - $1/0\text{Al}$ - $0/24\text{Mo}$ - $1/0\text{Cr}$ - $2/0\text{Mn}$ - $1/5\text{Si}$ - $0/8\text{C}$ - Fe مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که ریزکردن اندازه دانه آستنیت از $53\ \mu\text{m}$ به $3\ \mu\text{m}$ می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی به استحاله بینیتی سرعت بخشد؛ اما حدود نیمی از بینیت ساختار نانوبینیتی به صورت معمول نبوده و مقدار ناخواسته‌ای آستنیت بلوکه‌ای که برای چقرمگی فولاد مضر است، در ساختار باقی می‌ماند. زمانی که اندازه دانه آستنیت اولیه متوسط است (m $118\ \mu\text{m}$)، آستنیت باقی‌مانده بلوکه شده‌ای در ساختار دیده نمی‌شود که در این حالت بهترین چقرمگی ضربه ($51\ \text{j.cm}^{1/2}$) و استحکام کششی ($2034\ \text{MPa}$) و درصد ازدیاد طول (۱۴ درصد) به‌دست می‌آید. با اینکه آستنیت بلوکه‌ای باقی‌مانده دارای مقدار کربن بالایی است، به راحتی می‌تواند تحت یک فشار اعمالی خارجی به مارتنزیت تبدیل شود. از این رو، آستنیت فیلمی شکل باقی‌مانده به‌خاطر مورفولوژی ویژه آن از لحاظ مکانیکی بسیار پایدارتر از آستنیت بلوکه‌ای باقی‌مانده است. بنابراین انتقال از آستنیت بلوکه‌ای به آستنیت باقی‌مانده فیلمی شکل موجب بهبود قابل‌توجه چقرمگی ضربه، استحکام و داکتیلیته (نرمی) فولاد نانوبینیتی می‌شود.

در پژوهشی دیگر [۱۵]، اثر اندازه دانه آستنیت روی سینتیک استحاله هم‌دمای بینیتی در فولاد پرکربن نانوساختار بینیتی مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این مطالعه $1/30\text{Mn}$ - $0/91\text{Si}$ - $0/95\text{C}$ - Fe بود. نتایج تجربی نشان داد که استحاله بینیتی با استفاده از آستنیت دانه‌درشت شدت می‌یابد؛ زیرا در این صورت دانه‌های درشت آستنیت مواضع جوانه‌زنی کمتری فراهم می‌کنند که برای رشد تیغه‌های بینیتی مفید است. بدین معنی که یک اندازه دانه آستنیت بحرانی وجود دارد که در زیر این مقدار، اثر اندازه دانه متمایز است و در اندازه‌های بالاتر، اثر آن آشکار نیست. بر اساس یافته‌های این پژوهش، مشخص

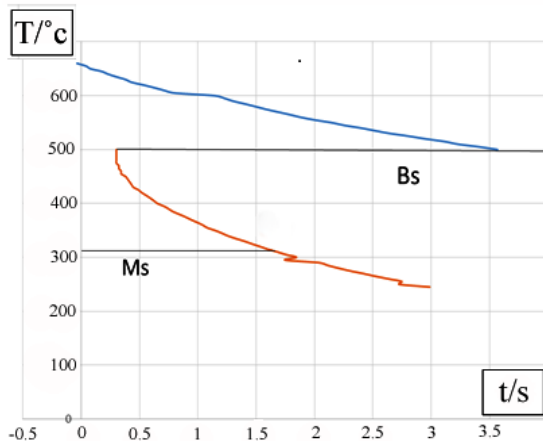
فولادهای بینیتی نانوساختار دسته جدیدی از فولادهای استحکام بالا هستند که کربن و سیلیسیم بالا (تا ۲ wt%) دارند [۲-۱]. طبق پژوهش‌های صورت گرفته، با انجام عملیات حرارتی آستمپرینگ در محدوده 200°C تا 300°C ، استحکام کششی و چقرمگی شکست فولادهای بینیتی نانوساختار به ترتیب به $2/3\ \text{GPa}$ و $130\ \text{MPa.m}^{1/2}$ می‌رسد [۵-۱]. این ترکیب عالی از خواص مکانیکی ناشی از صفحات فریت بینیتی بسیار ریز و توزیع آستنیت فیلمی شکل ظریف بین صفحات است [۹-۵]. ریزساختار بینیتی در فولادهای با کربن و سیلیسیم بالا شامل صفحات ظریف فریت بینیتی که توسط نواحی آستنیت باقی‌مانده غنی از کربن از هم جدا شده‌اند، است [۱۰ و ۸، ۲-۴]. در این فولادها فیلم‌های نانومتری آستنیت باقی‌مانده جایگزین سمنتیت بین‌لایه‌ای می‌شود که این مساله در بهبود چقرمگی تاثیر زیادی دارد [۱۱]. کاربرد این فولادها بسیار گسترده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از این فولادها در صنایع نظامی مثل صفحات مقاوم و زره نظامی که در آنها استحکام و چقرمگی ضربه بالایی نیاز است، اشاره کرد. همچنین فولادهای بینیتی نانوساختار به دلیل خواص سایشی عالی در ریل‌های راه‌آهن نیز کاربرد دارند [۱۲].

پارامترهای مختلفی بر خواص نهایی این نوع فولادها تاثیرگذار است. از جمله پارامترهایی که بر خواص مکانیکی این فولادها اثر می‌گذارد اندازه دانه آستنیت است. اندازه دانه آستنیت همواره به عنوان یکی از پارامترهای موثر و تاثیرگذار بر ساختار و خواص نهایی فولادها مطرح بوده است. لان و همکارانش [۱۳]، تاثیر اندازه دانه آستنیت روی استحاله هم‌دمای بینیتی در فولاد میکروآلیاژی کم کربن را با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، دو اندازه دانه کاملاً متفاوت از آستنیت، یکی با میانگین اندازه دانه ریز ($20\ \mu\text{m}$) و دیگری با میانگین اندازه دانه درشت ($260\ \mu\text{m}$) با دماهای حرارت‌دهی حداکثر مختلف، به‌دست آمد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با کاهش دمای نگه‌داری تا 540°C مورفولوژی ریزساختار هم‌دما از بینیت به فریت بینیتی، تغییر می‌کند. دانه آستنیت درشت می‌تواند سینتیک استحاله بینیتی را به تعویق انداخته و زمان جوانه‌زنی استحاله

جلوگیری کرده و از طرفی سرعت استحاله‌ی بینیتی را افزایش دهد تا مشکل زمان‌بر بودن تهیه این ریز ساختار را مرتفع سازد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این پژوهش

عنصر	Fe	Al	Cr	Mn	Si	C
درصد وزنی	Bal	۲/۶	۰/۹۰	۱/۵۹	۰/۵۸	۰/۴۵



شکل ۱. نمودار TTT فولاد کربن متوسط به کار گرفته شده در این

تحقیق که با استفاده از نرم‌افزار MUCG83 محاسبه شده است.

عملیات ذوب و آلیاژسازی فولاد در کوره القایی با جداره نسوز Al_2O_3 و فرکانس متوسط با ظرفیت تقریبی ۵۰ کیلوگرم و ریخته‌گری مذاب به روش قالب‌گیری ماسه‌ای با استفاده از چسب سیلیکات سدیم و گاز CO_2 انجام شد. دمای فوق‌گداز $1000^\circ C$ و دمای بار ریزی $1600^\circ C$ در نظر گرفته شد. در ادامه برای به‌دست آوردن فولادی تمیز و عاری از تخلخل، شمش تهیه شده تحت تصفیه سرباره الکتریکی قرار گرفت. سپس به منظور کاهش ضخامت شمش ریخته شده و اصلاح ریزساختار غیرهمگن ریخته‌گری شده، شمش در دمای $1200^\circ C$ به مدت چهار ساعت درون کوره المنی حرارت‌دهی شد و بلافاصله پس از آن توسط دستگاه نورد طی شش مرحله با کرنش‌های تقریباً برابر، ضخامت آن از ۷۰ mm تا ۱۱ mm کاهش داده شد. از شمش نورد داغ شده، نمونه‌هایی برای اجرای عملیات حرارتی به منظور متالوگرافی و بررسی ریزساختار برش داده شده، آماده‌سازی سطحی و اچ شدند. هم‌چنین نمونه‌های آزمون کشش نیز بر اساس استاندارد ASTM E8 به وسیله دستگاه برش سیمی تهیه شدند.

شد که طول و ضخامت تیغه‌های فریت بینیتی به اندازه دانه آستنیت وابسته است. هم‌چنین افزایش اندازه دانه آستنیت، می‌تواند منجر به افزایش کسر حجمی فریت بینیتی شود. در فولادهای بینیتی نانو ساختار دانه‌های آستنیت درشت، نرخ رشد تیغه‌های فریت بینیتی را افزایش داده و مواضع جوانه‌زنی استحاله بینیتی را کاهش می‌دهند. رشد نقش بسیار مهم‌تری نسبت به جوانه‌زنی، برای سرعت بخشیدن به استحاله بینیتی در فولادهای نانو ساختار بینیتی دارد. این در حالی است که عمده تحقیقات صورت گرفته در خصوص تاثیر اندازه دانه آستنیت اولیه، بر روی فولادهای نانوبینیتی پرکربن صورت گرفته و اطلاعات زیادی در خصوص این تاثیر در فولادهای با کربن متوسط و پایین موجود نیست.

هدف از این پژوهش بررسی تاثیر اندازه دانه آستنیت اولیه بر ریزساختار نهایی و خواص مکانیکی حاصل از عملیات حرارتی آستمپر و در نتیجه خواص نهایی فولاد نانو ساختار بینیتی با کربن متوسط است.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، ترکیب شیمیایی متناسب با ترکیب متعارف فولادهای بینیتی انتخاب شد؛ اما میزان کربن در این فولاد نسبت به فولادهای بینیتی معمول کمتر است. کربن یکی از پایدارکننده‌های آستنیت در ساختار فولاد است و می‌تواند باعث به تعویق افتادن استحاله‌ی بینیتی شود، بنابراین کاهش مقدار این عنصر می‌تواند موجب تسریع تحول بینیتی شود. عناصر کروم و منگنز نیز که به‌طور معمول به مقدار ۱ تا ۱% Wt به عنوان افزایش‌دهنده سختی به این فولادها افزوده می‌شود، نیز در این آلیاژ حضور دارند. ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. منحنی‌های دما-زمان-دگرگونی، که به کمک مدل ترمودینامیکی MUCG83 به‌دست آمده و هم‌چنین دماهای M_s و B_s نیز در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، آلومینیوم فولاد مورد نظر خارج از محدوده طراحی شده برای نرم‌افزار است. به منظور کاهش تاثیرات مخرب عنصر آلیاژی سیلیسیم، در این پژوهش از جایگزین مناسب یعنی آلومینیوم استفاده شده است تا علاوه بر حل مشکلات حاصل از حضور سیلیسیم، از رسوب سمیتیت

در جدول ۳) در این دما نگه‌داری شدند. در نهایت پس از اتمام زمان معین شده، نمونه‌ها از حمام نمک خارج شده و در آب کوئنچ شدند. ترکیب حمام نمک مذکور نیز در جدول ۴ آورده شده است.

لازم به ذکر است که شرایط (دما و زمان) آستنیت شدن نمونه‌های A_1 و A_2 مطابق با نمونه A_0 و نمونه‌های B_1 و B_2 مطابق با نمونه B_0 است (نمونه A_0 فقط جهت تعیین اندازه دانه آستنیت اولیه و میزان فریت باقی‌مانده در ساختار نمونه‌های A_1 و A_2 پیش از عملیات آستمبر و نمونه B_0 نیز جهت تعیین اندازه دانه آستنیت اولیه و میزان فریت باقی‌مانده در ساختار نمونه‌های B_1 و B_2 پیش از عملیات آستمبر طراحی شده است).

جدول ۳. شرایط عملیات حرارتی آستنیت کردن و آستمبر

شرایط عملیات حرارتی آستمبر	شرایط عملیات حرارتی آستنیت کردن			نوع فولاد
	دما (°C)	زمان (دقیقه)	دما (°C)	
۲۰ (دقیقه)	۳۴۰	۱۰	۱۱۰۰	A_1
		۴-۶-۸-۱۰	-۱۰۵۰-۱۱۰۰ ۹۵۰-۱۰۰۰	A_2
۱۸۰	۳۰۰	۱۰	۱۱۰۰	B_1
		۴-۶-۸-۱۰	-۱۰۵۰-۱۱۰۰ ۹۵۰-۱۰۰۰	B_2

جدول ۴. مشخصات حمام نمک مورد استفاده در این پژوهش

درصد وزنی	ترکیبات حمام نمک
۴۵	سدیم نیتريد
۵۵	پتاسیم نیترات

نمونه‌های برش داده شده (نمونه‌های A_0 و B_0 ذکر شده در جدول ۲)، داخل کوره‌ای الممتی (شرکت کربولیت (Carbolite) مدل CWF 1200) که از قبل به دمای آستنیت (دماهای مشخص شده در جدول ۲) رسیده، قرار گرفتند و در این دما به مدت زمان معین (زمان‌های مشخص شده در جدول ۲) نگه‌داری و سپس در آب کوئنچ شدند. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص شده است، نمونه A_0 به مدت ۱۰ دقیقه در دمای 1100°C آستنیت و سپس در آب کوئنچ شد و نمونه B_0 در ابتدا در دمای 1100°C به مدت ۱۰ دقیقه آستنیت و سپس در آب کوئنچ شده، بار دیگر در دمای 1050°C به مدت هشت دقیقه آستنیت و سپس در آب کوئنچ شد. سپس دوباره در دمای 1000°C به مدت شش دقیقه آستنیت و در آب کوئنچ شد و در نهایت در دمای 950°C به مدت چهار دقیقه آستنیت و سپس در آب کوئنچ شد. لازم به ذکر است، با توجه به نتایج تجربی مشخص شد، فولاد مورد نظر در دمای 1100°C دارای ساختاری تقریباً کامل آستنیت است، از همین رو این دما به عنوان دمای آستنیت در این پژوهش انتخاب شد.

جدول ۲. شرایط عملیات حرارتی آستنیت کردن

نوع فولاد	شرایط عملیات حرارتی آستنیت کردن		
	تعداد مراحل	دما (°C)	زمان (دقیقه)
A_0	۱ مرحله	۱۱۰۰	۱۰
B_0	۴ مرحله	-۱۰۰۰-۱۰۵۰-۱۱۰۰	۴-۶-۸-۱۰
		۹۵۰	

در جدول ۳ نیز شرایط انجام عملیات هم‌دمای آستمبر نمونه‌ها آورده شده است. نمونه‌ها که در ابتدا طبق شرایط ذکر شده در جدول ۳ به دمای آستنیت رسیده و در آن دما به مدت معین نگه‌داری شده است، در ادامه به منظور انجام عملیات حرارتی آستمبر به سرعت از کوره خارج و به داخل حمام نمک مذابی که از قبل به دمای معین (دماهای مشخص شده در جدول ۳) رسانیده، منتقل شده و به مدت زمان معین (مشخص شده

وجود عنصر آلومینیوم در ترکیب این فولاد، امکان حضور فاز فریت در ساختار حتی در مقادیر بسیار پایین آن، وجود دارد؛ زیرا آلومینیوم به عنوان یکی از عناصر پایدارکننده فاز فریت مطرح است [۱۶].

جدول ۵. مقادیر فریت باقی مانده و اندازه دانه آستنیت اولیه پس از عملیات حرارتی آستنیت-کوئچ

نام نمونه	اندازه دانه آستنیت اولیه (μm)	مقدار فریت (درصد)
A ₀	۱۰۰	کمتر از ۰/۵
B ₀	۲۰	۴

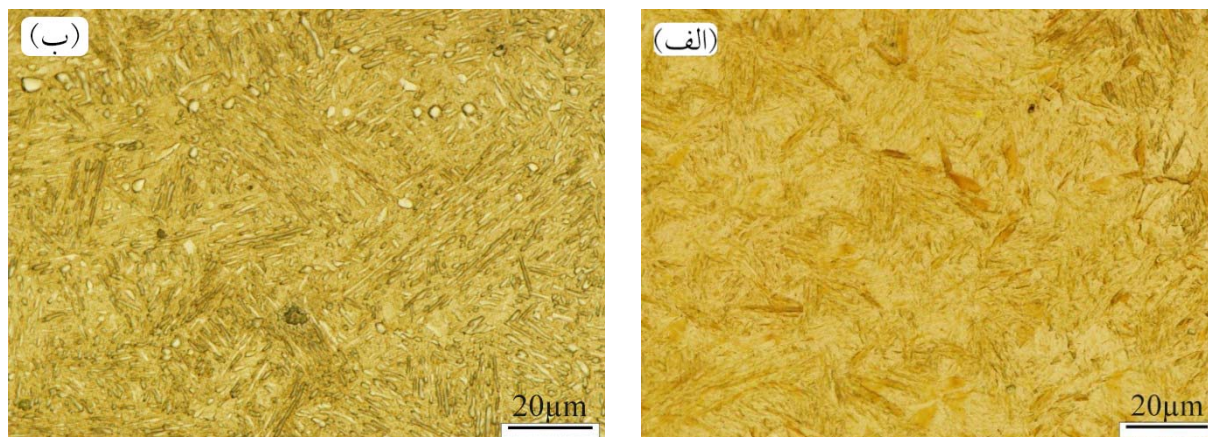
بر اساس مطالعات و پژوهش‌های دیگر [۱۷]، روش آسان برای کاهش اندازه دانه یک فولاد، گرم کردن آن تا ناحیه آستنیت، انتخاب دمای مناسب و حداقل زمان ممکن توقف در این دما و سپس خنک کردن هرچه سریع‌تر آن تا دمای اتاق است. از آنجا که، کاهش اندازه دانه اولیه موجب کوچکتر شدن اندازه دانه جدید می‌شود، در نتیجه تکرار چندین مرتبه این چرخه موجب هر چه ریزتر شدن دانه خواهد شد. با توجه به هدف این پژوهش که بررسی تاثیر اندازه دانه آستنیت اولیه روی ساختار نهایی فولادهای نانو ساختار بینیتی و خواص مکانیکی آنها است، اندازه دانه آستنیت اولیه نمونه‌ها نیز به دست آمد که مقادیر آن در جدول (۵) گزارش شده است. شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها پس از اچ اندازه دانه را نشان می‌دهد. همانطور که در تصاویر نیز مشاهده می‌شود، نمونه‌ای که در یک دما (۱۱۰۰ °C) آستنیت شده است، اندازه دانه درشت‌تری دارد و نمونه‌ای که سیکل چند مرحله‌ای را طی کرده است، اندازه دانه آستنیت ریزتری دارد. هم‌چنین نمونه‌هایی که عملیات آستمپر روی آنها انجام شده بود، پولیش و اچ شدند. شکل ۴ نیز تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های آستمپر شده پس از اچ را نشان می‌دهد.

برای تعیین اندازه دانه آستنیت اولیه و بررسی میزان فریت باقی مانده در ریزساختار نمونه‌های آستنیت-کوئچ شده (A₀) و (B₀) و هم‌چنین برای کنترل ریزساختار نهایی به دست آمده از عملیات آستمپر نمونه‌ها (A₁، A₂، B₁ و B₂)، از میکروسکوپ نوری (Olympus مدل BX61 با حداکثر بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر) و نرم‌افزار تحلیل تصویر دیجی مایزر^۱ (ورژن 4.6.1) استفاده شد. علاوه بر این، برای بررسی ریزساختار نمونه‌های آستمپر شده و اطمینان از تشکیل ساختارهای نانوبینیتی و اندازه‌گیری ضخامت تیغه‌های فریت بینیتی از میکروسکوپ الکترونی روبشی (TESCAN مدل MIRA 3 LMU) استفاده گردید. به منظور شناسایی فازی، تعیین مقدار کمی آستنیت باقی مانده و مقدار فریت بینیتی تشکیل شده، تعدادی از نمونه‌ها تحت پراش پرتو ایکس (با تابش کبالت با طول موج ۱/۷۹ Å، ولتاژ و شدت جریان دستگاه به ترتیب ۴۰ KV و ۳۰ mA) قرار گرفتند. گستره تغییرات ۲θ برابر با ۳۰ تا ۱۱۰ درجه انتخاب شد و سرعت اسکن نیز ۲ /min^o بود. الگوهای پراش حاصل از پراش پرتوی ایکس با استفاده از نرم‌افزار X'Pert HighScore مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. هم‌چنین برای تعیین استحکام کششی و درصد افزایش طول نسبی، نمونه‌هایی که طبق استاندارد ASTM E8 آماده شده بودند توسط دستگاه کشش (Gotech مدل Gt-7052-D30) با سرعت حرکت فک ۲ mm/min و بر اساس استاندارد ASTM E8 تحت کشش قرار گرفتند.

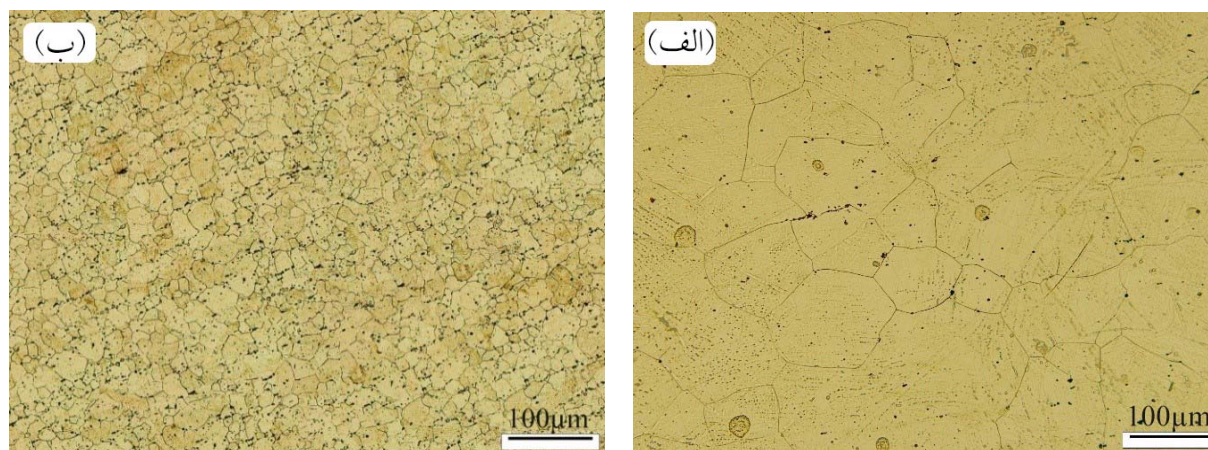
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختاری

بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌های اولیه پس از عملیات آستنیت-کوئچ که سنباده‌زنی، پولیش و اچ شده بودند، با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی انجام شد. بر اساس تصاویر میکروسکوپ نوری (شکل ۲)، درصد فریت نمونه‌ها محاسبه شد که مقادیر آن در جدول ۵ آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص شد که میزان فریت باقی مانده در نمونه‌ها بسیار پایین است و این می‌تواند دلیلی بر آستنیت شدن کامل آنها باشد. البته لازم به ذکر است که در هر صورت به دلیل



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های؛ (الف) A_0 و (ب) B_0



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها پس از آستنیت‌شدن؛ (الف) نمونه A_0 و (ب) نمونه B_0

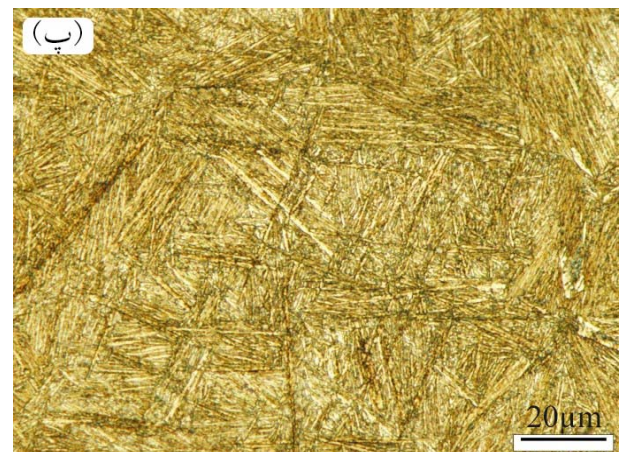
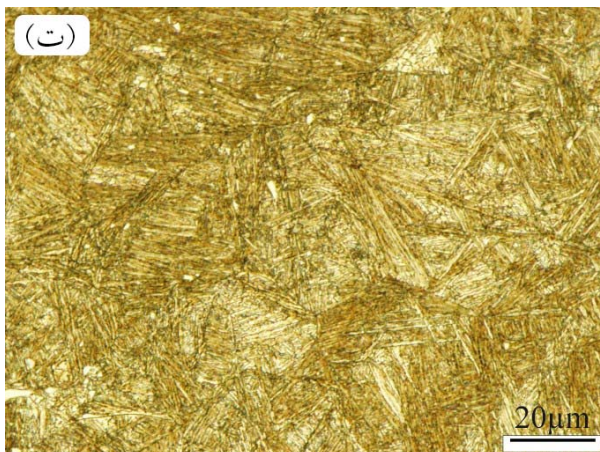
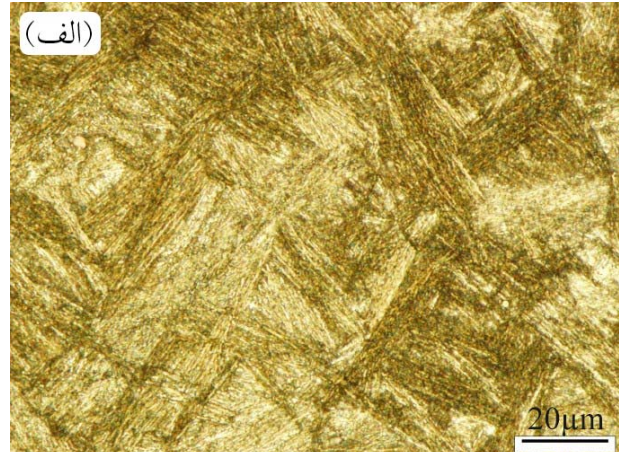
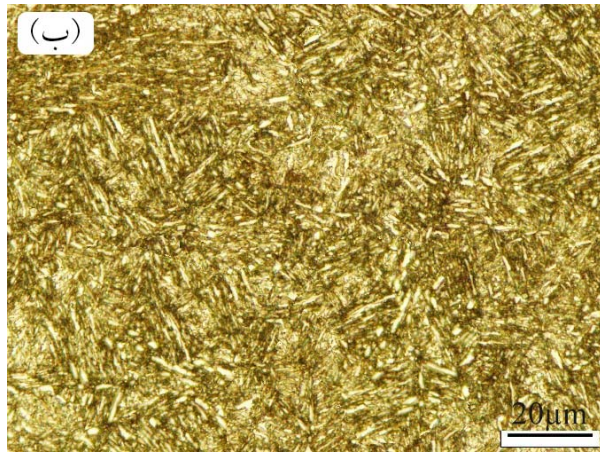
بیش تری برای رسیدن به مرز دانه نیاز داشته و به محض رسیدن به مرز دانه رشد طولی آن‌ها متوقف شده و تیغه‌ها دیگر فرصت ضخیم‌تر شدن ندارند، بنابراین طولی‌تر هستند [۱۳]. همان‌طوری‌که در تصاویر شکل ۵ ملاحظه می‌شود، ساختار فولاد پس از عملیات حرارتی آستمپر شامل تیغه‌های فریت بینیتی نانومتری (به رنگ تیره)، آستنیت فیلمی شکل (به رنگ روشن) و مقدار کمی بلوک‌های آستنیتی نانومتری (که در اثر کوئچ کردن از دمای آستمپر به مارتنزیت تبدیل شده است) می‌باشد. لازم به ذکر است، هنگامی‌که آستنیت اولیه در حین مرحله آستمپر نتواند به بینیت تبدیل شود به صورت بلوک‌هایی باقی می‌ماند که این بلوک‌ها پس از کوئچ کردن فولاد به مارتنزیت تغییر فاز می‌دهد [۱۸]. براساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان دریافت که در ریزساختار نمونه‌هایی

در ادامه برای مشاهده ریزساختار ایجاد شده ناشی از عملیات حرارتی آستمپر، تعیین ضخامت تیغه‌های فریت بینیتی و مشاهده آستنیت باقی‌مانده فیلمی شکل، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) استفاده شد. شکل ۵، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های آستمپر شده را نشان می‌دهد. هم‌چنین در جدول ۶، میانگین ضخامت تیغه‌های فریت بینیتی نمونه‌ها گزارش شده است.

براساس این تصاویر می‌توان به تیغه‌ای بودن ساختار پی برد و این می‌تواند احتمالی بر بینیتی شدن ساختار فولاد مورد بررسی باشد. از طرفی، با مقایسه طول تیغه‌های نمونه‌ها، با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌توان به این نکته پی برد، هنگامی‌که اندازه دانه آستنیت اولیه درشت‌تر است، تیغه‌های تشکیل شده حین عملیات حرارتی آستمپر فرصت

شاید چندمرحله‌ای بودن عملیات آستنیت‌زدن نمونه‌ها باشد؛ زیرا در هر مرحله از آستنیت‌زدن، دما کاهش می‌یابد و فرصت کافی برای آستنیت‌زدن کامل ساختار وجود دارد.

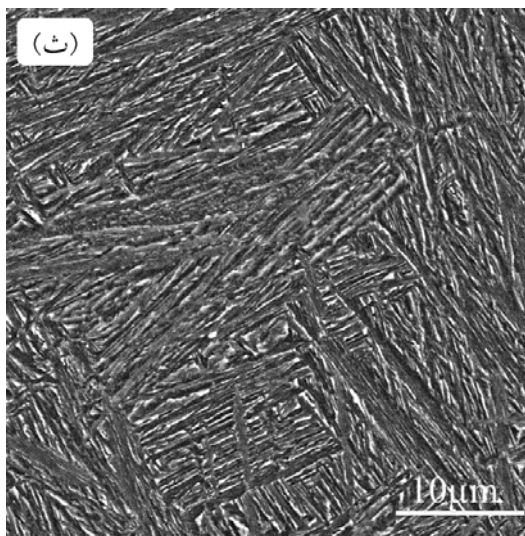
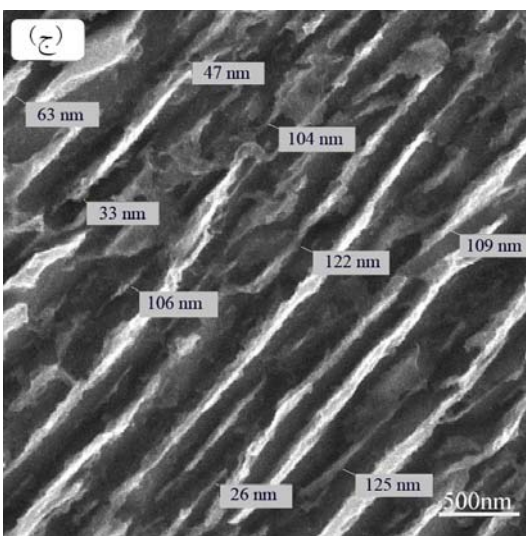
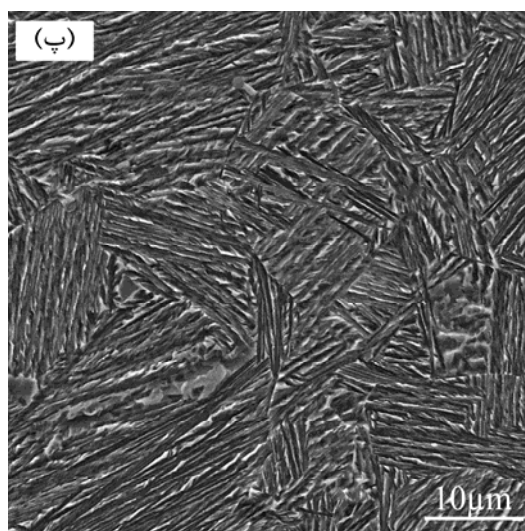
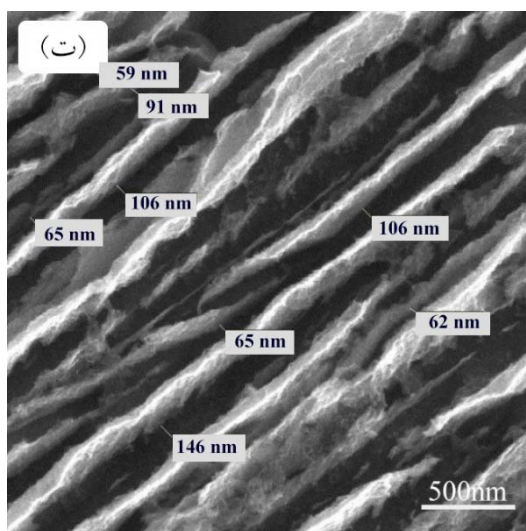
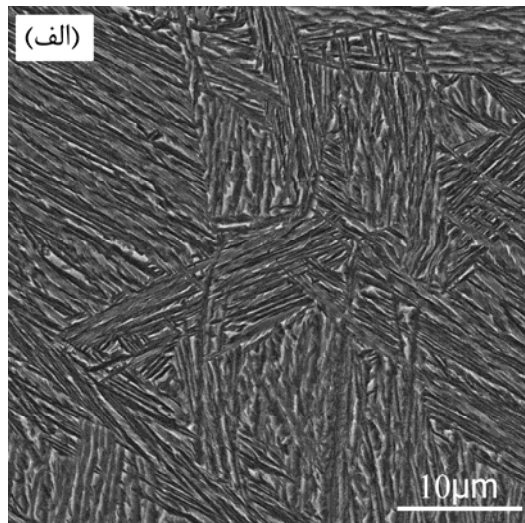
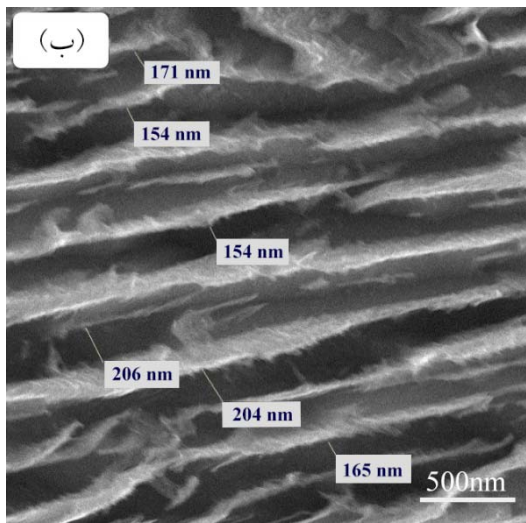
که به صورت چندمرحله‌ای آستنیت‌زدن شده (شکل ۵) با وجود پایین بودن دمای آستنیت‌زدن در مرحله آخر قبل از کوئنچ (950°C)، هیچ‌گونه فاز فریت بلوکه‌شده‌ای وجود ندارد. دلیل این پدیده

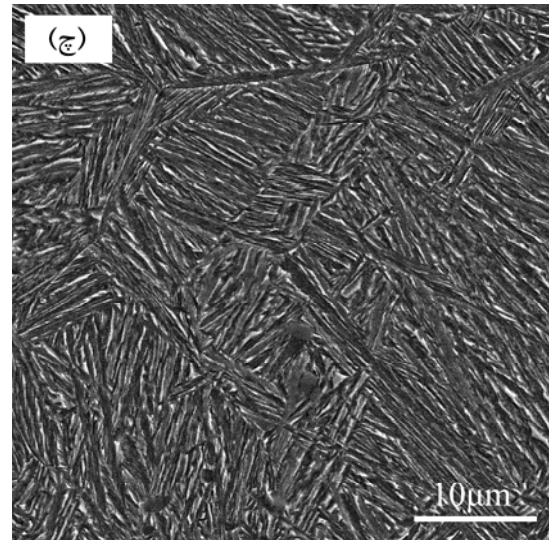
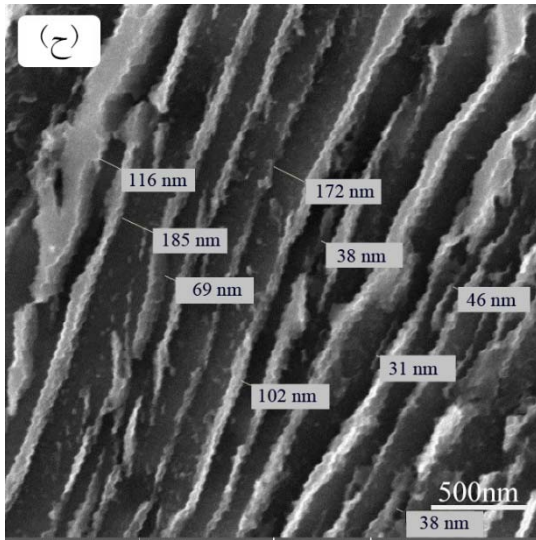


شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌ها پس از آستمپر شدن؛ (الف) نمونه A_1 ، (ب) نمونه A_2 ، (پ) نمونه B_1 و (ت) نمونه B_2

نمونه‌های B_1 و B_2 نسبت به نمونه‌های A_1 و A_2 باشد. گزارش شده است [۱۹] که ضخامت تیغه‌های فریت بینیتی را با کاهش دمای استحاله می‌توان کم کرد. هم‌چنین براساس تصاویر میکروسکوپ الکترونی (شکل ۵) مشاهده می‌شود، در نمونه‌هایی که در دماهای بالاتری آستمپر شده‌اند، آستنیت بلوکه‌شده وجود دارد و نمونه‌هایی که در دماهای پایین‌تری آستمپر شده‌اند، مورفولوژی آستنیت باقی‌مانده به صورت فیلمی شکل است [۲۰].

هم‌چنین از مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌هایی که به صورت تک‌مرحله‌ای (شکل ۵ الف و ب) و (۵ ث و ج) و نمونه‌هایی که به صورت چندمرحله‌ای آستنیت‌زدن شده‌اند (شکل ۵ پ و ت) و (۵ چ و ح) چنین برمی‌آید که ضخامت تیغه‌های فریت بینیتی در B_1 نسبت به A_1 و در B_2 نسبت به A_2 کمتر است. کاهش دمای عملیات آستمپر از 340°C به 300°C و افزایش زمان آن از ۲۰ دقیقه به ۱۸۰ دقیقه می‌تواند دلیلی بر کاهش ضخامت تیغه‌های فریت بینیتی در





شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پس از عملیات حرارتی آستمپر برای نمونه‌های: A₁ (الف و ب)، A₂ (پ و ت)، B₁ (ث و ج) و B₂ (چ و ح)

یک از این فازها که توسط روش ریتولد به دست آمده، نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج برمی‌آید، مقدار مارتنزیت نمونه ای که دارای اندازه دانه درشت‌تر و زمان آستمپر کمتری است، حدود ۴۴ درصد است. با توجه به شرایط عملیات حرارتی آستمپر این نمونه، زمان برای رشد تیغه‌های فریت بینتی کافی نبوده و مقدار کربن آستنیت زمینه پایین است. این امر باعث می‌شود تا قسمتی از آستنیت‌ها بعد از کوئنچ، تبدیل به مارتنزیت شوند. از طرفی، با توجه به نتایج حاصل از پراش اشعه ایکس، در نمونه‌هایی که در دمای کمتر و زمان بیشتر آستمپر شده‌اند کسر حجمی فاز فریت بینتی نمونه با اندازه دانه ریزتر بیشتر از نمونه با اندازه دانه درشت‌تر است. از این رو، به نظر می‌رسد جوانه‌زنی فریت بینتی در این نمونه بیشتر بوده است.

جدول ۶. اندازه دانه آستنیت اولیه، ضخامت تیغه‌های فریت بینتی نمونه‌ها و مقادیر خواص مکانیکی آن‌ها

نام نمونه	استحک ام تسلیم (Mpa)	استحک ام نهایی (MPa)	ازدیاد طول نسبی (%)	ضخامت تیغه فریت بینتی (mm)	اندازه دانه آستنیت اولیه (m) (μ)
A ₁	۱۱۱۶	۱۳۲۳	۷	۱۸۲	۱۰۰
A ₂	۱۰۳۲	۱۲۷۳	۱۴/۵	۲۹۵	۲۰
B ₁	۱۵۴۰	۱۷۳۰	۱۵	۸۱	۱۰۰
B ₂	۱۲۷۶	۱۴۷۰	۱۷	۸۸	۲۰

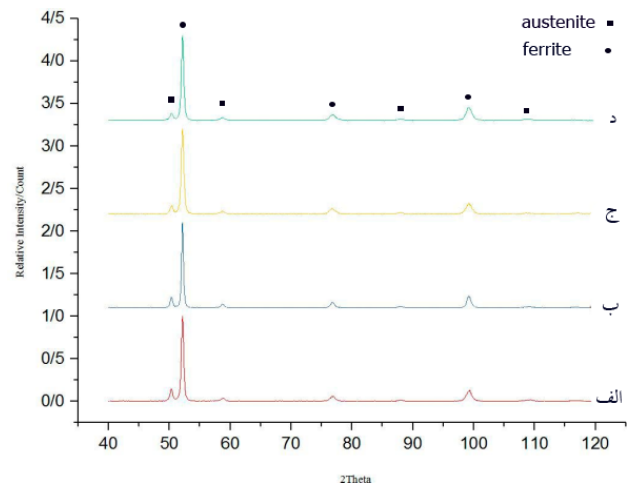
۳-۲- بررسی فازی

الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های آستمپر شده، در شکل ۶ نشان داده شده است. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های فولادی پس از انجام عملیات حرارتی آستمپر، با استفاده از نرم‌افزار X'pert HighScore تحلیل و بررسی شد. براساس این الگوها، فازهای فریت بینتی، آستنیت باقی‌مانده و مارتنزیت در این نمونه‌ها وجود دارد. در جدول ۷ مقادیر هر

تیغه‌های فریت بینیتی شده و کسر حجمی تیغه‌های فریت بینیتی به‌طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند که می‌تواند دلیلی بر افزایش استحکام در دماهای پایین باشد. از طرفی با کاهش دما، به مرور زمان آستنیت‌های بلوکه‌ای نیز کاهش خواهند یافت. براساس نتایج حاصل از آزمون کشش و هم‌چنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی، نمونه‌هایی که اندازه دانه آستنیت اولیه درشت‌تری داشته و در ادامه منجر به تیغه‌های طولی‌تر با ضخامت بالاتر شده است، استحکام کششی بالاتری دارد.

با مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش برای نمونه‌هایی که در دمای بالاتر آستمپر شده اند، مشاهده می‌شود (جدول ۶) که با وجود یکسان بودن دما و زمان عملیات آستمپر در این دو نمونه، میزان ازدیاد طول در نمونه با اندازه دانه درشت‌تر، به شدت پایین بوده و میزان استحکام کششی دو نمونه نزدیک به هم است که این می‌تواند ناشی از شکست ترد این نمونه باشد. از طرفی اندازه دانه آستنیت اولیه نمونه دیگر ریزتر است؛ که این ریز بودن اندازه دانه، نیروی محرکه لازم برای جوانه‌زنی فاز بینیت را فراهم می‌کند [۱۴] و هم‌چنین رشد تیغه‌های فریت بینیتی در اندازه دانه آستنیت ریزتر بیش‌تر است. بنابراین با افزایش تعداد جوانه‌ها و هم‌چنین رشد آن‌ها، زمینه آستنیتی نمونه‌های فولادی از کربن غنی‌تر شده و این مساله موجب پایداری آستنیت پس از مرحله کوئنچ (در دمای محیط) می‌شود. اما در نمونه‌ای که اندازه دانه آستنیت اولیه درشت‌تر است، محل‌های جوانه‌زنی استحاله بینیتی بسیار کم‌تر بوده و به همین دلیل آستنیت به میزان کافی از کربن غنی نشده است. از این‌رو آستنیت فاز پایداری در دمای محیط نبوده و در مرحله کوئنچ احتمال تشکیل فاز مارتنزیت زیاد و تشکیل این فاز می‌تواند دلیلی بر شکست ترد این نمونه در آزمون کشش باشد. در بررسی‌ها براساس الگوی پراش اشعه ایکس نیز مشخص شد که میزان فاز مارتنزیت نمونه‌ای که به‌صورت تک‌مرحله‌ای آستنینه شده و در دمای 340°C به مدت ۲۰ دقیقه آستمپر شده است، بالا بوده و در حدود ۴۴ درصد است.

البته با مقایسه نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های آستمپر شده در دمای پایین‌تر و زمان بیشتر با نمونه‌های آستمپر شده در دمای بالاتر و زمان کمتر، به نظر می‌رسد که زمان ۲۰ دقیقه برای تکمیل استحاله بینیتی در نمونه با اندازه درشت‌تر



شکل ۶. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی آستمپر کردن؛ (الف) A_1 ، (ب) A_2 ، (ج) B_1 و (د) B_2 .

جدول ۷. مقادیر فازهای موجود در نمونه‌های فولادی پس از انجام عملیات آستمپر

درصد فازهای موجود			نام نمونه
مارتنزیت	آستنیت	فریت	
44	11	45	A_1
0	16	84	A_2
2	14	84	B_1
0	10	90	B_2

۳-۳- استحکام کششی

خواص مکانیکی فولادها تحت تاثیر عوامل مختلفی از قبیل عملیات حرارتی، ترکیب شیمیایی، تغییر شکل پلاستیک اولیه و ... است. در این پژوهش، با توجه به ثابت بودن دیگر عوامل تنها شرایط عملیات حرارتی است که تعیین‌کننده خواص مکانیکی نمونه‌های فولادی است. نمونه‌های فولادی که براساس استاندارد ASTM E8 تهیه شده بودند، مورد آزمون کشش قرار گرفته و نتایج به‌دست آمده در جدول ۶ ارائه شده است. با توجه به مقادیر جدول ۶، مشاهده می‌شود که با کاهش دمای استحاله آستمپر مقادیر استحکام نمونه‌های فولادی افزایش پیدا کرده است. کاهش دما با افزایش نیروی محرکه جوانه‌زنی همراه است، به‌عبارتی وقتی دما کاهش پیدا می‌کند، فریت بینیتی بیشتری جوانه زده و شروع به رشد می‌کند. این موضوع مانع از پهن شدن

با داشتن استحکام نهایی 1730 MPa و ازدیاد طول ۱۵ درصد بهترین خواص مکانیکی را دارا بود. براساس نتایج به دست آمده از آزمون کشش و الگوی پراش اشعه ایکس مشخص شد که تشکیل فاز مارتنزیت، می تواند عاملی برای شکست ترد نمونهها باشد. در نمونه ای که دارای اندازه دانه آستنیت اولیه درشت تر و دمای آستمپر پایین تر است، تیغه های تشکیل شده در ساختار طولی تر بوده و به نظر می رسد ترک حین برخورد به این دانهها مجبور به دور زدن این تیغهها یا شکستن آنها است و این باعث اتلاف انرژی ترک حین دور زدن تیغهها شده و از این رو استحکام این نمونهها افزایش می یابد. مشخص شد که ریزساختارهای نانوبینیتی که دارای آستنیت های باقی مانده فیلمی شکل هستند نسبت به ریزساختارهایی که مورفولوژی آستنیت باقی مانده آنها بلوکه ای است، خواص مکانیکی مطلوب تری دارند.

مراجع

1. Garcia-Mateo, C., Caballero, F.G., and Bhadeshia, H.K.D.H., Acceleration of Low-temperature Bainite, *ISIJ International*, 2003, 43(11), 1821-1825.
2. Garcia-Mateo, C., Caballero, F.G., and Bhadeshia, H.K.D.H., Mechanical Properties of Low Temperature Bainite, *Materials Science Forum*, 2005, 500-501, 495-502.
3. Caballero, F.G., Bhadeshia, H.K.D.H., Mavella, K.J.A., Jones, D.G., and Brown, P., Very Strong Low Temperature Bainite, *Material Science and Technology*, 2002, 18, 279-284.
4. Garcia-Mateo, C., Peet, M., Caballero, F. G., and Bhadeshia, H.K.D.H., Tempering of hard mixture of bainitic ferrite and austenite, *Materials Science and Technology*, 2004, 20, 814-818.
5. Bhadeshia, H.K.D.H., Bainite in steels, second editin, London: *IOM Communications Ltd*, 2001.
6. Caballero, F.G., and Bhadeshia, H.K.D.H., Very Strong Bainite, *Solid State and Material Science*, 2004, 8, 251-257.
7. Garcia-Mateo, C., Caballero, F.G., and Bhadeshia, H.K.D.H., Low temperature bainite, *Journal de physique colloque*, 2003, 112, 1238-1343.
8. Garcia-Mateo, C., Caballero, F.G., and Bhadeshia, H.K.D.H., Development of Hard Bainite, *ISIJ International*, 2003, 43(8), 1238-1243.
9. Bhadeshia, H.K.D.H., and Edmonds, D.V., Bainite in silicon steels: a new composition property approach I, *Metal Science*, 1983, 17, 411-419.
10. Wang, T.S., Yang, J., Shang, C.J., Li, X.Y., Zhang, B., and Zhang, F.C. Microstructures and impact toughness of low-alloy high-carbon steel austempered at low temperature, *Scripta Materialia*, 2009, 61, 434-437.
11. Caballero, F.G., Chao, J., Cornide, J., Garcia-Mateo, C., Santofimia, M.J., Capdevila, C., Toughness deterioration in

کافی نبوده است. از طرفی براساس پژوهشی دیگر [۲۱] نشان داده شد که ضخامت پایین تیغه های فریتی باعث بهبود استحکام در نمونه های فولادی خواهد شد که این موضوع در پژوهش حاضر (جدول ۶) نیز قابل تشخیص است.

عنصر کربن نیز نقش مؤثری در استحکام بخشی به فولادهای نانو ساختار بینیتی دارد. بدین ترتیب که پس از جوانه زنی و رشد تیغه های بینیتی، عنصر آلیاژی کربن به درون فاز آستنیت پس زده می شود تا فاز آستنیت غنی از کربن تشکیل شود. ولی به دلیل همگن نبودن توزیع کربن در آستنیت، میزان عنصر کربن در فیلم های نازک، بسیار بیشتر از بلوکه های آستنیت می باشد. بنابراین اگر ساختار دارای کسر حجمی بالایی از فیلم های نازک آستنیت باشد کربن در این فیلم ها توزیع می شود و استحکام این فاز را بالا می برد تا استحکام و چقرمگی هم زمان افزایش یابند. ولی در صورت حضور بلوکه های آستنیت و پایین بودن مقدار عنصر کربن در آنها و طی آن ناپایداری این فاز در حین اعمال تنش، فولاد مورد نظر به صورت ترد خواهد شکست. با افزایش دمای استحاله ی آستمپر، کسر حجمی تیغه های فریت بینیتی کاهش خواهد یافت که در نتیجه، استحکام کششی افت پیدا خواهد کرد [۵]. از طرفی با توجه پژوهش های دیگران [۱۴]، هر چقدر میزان آستنیت باقی مانده با مورفولوژی فیلمی شکل در ریزساختار فولادهای نانوبینیتی بیشتر باشد، خواص مکانیکی به دست آمده نیز بهبود می یابد. بنابراین بالا بودن خواص مکانیکی نمونه های آستمپر شده در دمای پایین تر و زمان بیشتر نسبت به نمونه های آستمپر شده در دمای بالاتر و زمان کمتر را می توان بدین صورت نیز تحلیل کرد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، نقش اندازه دانه آستنیت اولیه بر ریزساختار نهایی و خواص مکانیکی فولاد کربن متوسط مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج حاصل، مشخص شد هرچه اندازه دانه آستنیت اولیه ریزتر باشد، تعداد مواضع جوانه زنی در استحاله بینیتی بیش تر و رشد تیغه های فریت بینیتی سریع تر است. در نتیجه، استحاله کامل خواهد شد. هم چنین نتایج نشان داد که نمونه ای که دارای اندازه دانه آستنیت اولیه $100 \mu\text{m}$ بوده و در دمای 300°C به مدت ۱۸۰ دقیقه آستمپر شده (نمونه B₁)

advanced high strength bainitic steels," *Materials Science and Engineering A*, 2009, 525, 87-95.

12. Bhadeshia, H.K.D.H., High Performance Bainitic Steels, *Material Science Forum*, 2005, 500-501, 63-74.

13. Lan, L.Y., Qiu, C.L., Zhao, D.W., Gao, X.H., and Du, L. X., Effect of austenite grain size on isothermal bainite transformation in low carbon microalloyed steel, *Materials Science and Technology*, 2011, 27(11), 1657-1663.

14. Jiang, T., Liu, H., Sun, J., Guo, S., and Liu, Y., Effect of austenite grain size on transformation of nanobainite and its mechanical properties, *Materials Science and Engineering A*, 2016, 666, 207-213.

15. Hu, F., Hodgson, P.D., and Wu, K.M., Acceleration of the super bainite transformation through a coarse austenite grain size, *Materials Letters*, 2014, 122, 240-243.

۱۶. م. ع. گلغذاز، اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها، اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ چهارم، ۱۳۷۵.

17. Verhoeven, J.D., steel metallurgy for the non-metallurgist, Materials Park, Ohio 44073-0002: *ASM International*, 2007.

18. Avishan, B., Mateo, C.G., Yazdania, S., and Caballero, F.G., Retained austenite thermal stability in a nanostructured bainitic steel, *Materials Characterization*, 2013, 81, 105-110.

19. Huang, Y., Zhao, A-m., He, J-g., Wang, X-p., Wang, Z-g., and Qi, L., Microstructure, crystallography and nucleation mechanism of NANOBAIN steel, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013, 20(12), 1155.

20. Lee, Y.K., Shin, H.C., Jang, Y.C., Kim, S.H., Choi, C.S., 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*, 2002, 47, 805-809.

21. Bhadeshia, H.K.D.H., Nanostructured bainite, *Proc. R. Soc. A*, 2010, 466, 3-18.