

Research Paper

Effect of bainite volume fraction , resulting from Intercritical heat treatment on mechanical properties and Fracture Mechanics of bainite–ferrite dual phase steel

*Reza Piri¹, Behrouz GHasemi², Mardali Yousefpour³

1- Master, Faculty of Metallurgical and Materials Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Metallurgical and Materials Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Metallurgical and Materials Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Citation: Piri R, GHasemi B, YousefpourM. Effect of bainite volume fraction , resulting from Intercritical heat treatment on mechanical properties and Fracture Mechanics of bainite–ferrite dual phase steel. Metallurgical Engineering 2017; 20(1) 46-54 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.49091.1095>

doi : <http://dx.doi.org/10.22076/me.2017.49091.1095>

ABSTRACT

In this research, under intercritical heat treatment cycles (Austenitising at 850°C for 1 hour, Then transferring each sample to the furnace at temperatures of 770, 760 and 750°C for 15 minutes, transferring to the salt bath of 360°C for 15 minutes and finally cooling down to room temperature in air) of the AISI 4140 steel, samples of ferritic-bainitic dual phase structures with several percentages of bainite were attained. Then the mechanical properties of the samples have been studied by mechanical tests. Results show that by increasing the bainite volume fraction, the yield strength and the ultimate tensile strength are increased while the ductility and Impact energy is decreased. by investigating the fracture surfaces of the samples by SEM, it was seen that the mode of fracture in dual phase steels is like a mixture of brittle and ductile fractures, and manganese sulfide impurity particles are the places of the nucleation, growth and propagation of cracks and also with increasing the volume fraction of bainite, the ratio of brittle fracture to ductile fracture increases.

Keywords: Ferrite – Bainite , Bainite volume fraction, Manganese sulfide

■ ■

* *Corresponding Author:*

Reza Piri, MSc.

Address: Faculty of Metallurgical and Materials Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Tel: +98 (81) 34586464

E-mail: Rezapiri11@gmail.com

تاثیر کسر حجمی بینیت حاصل از عملیات حرارتی بین بحرانی بر خواص مکانیکی و رفتار شکست فولاد دوفازی فریتی - بینیتی

رضا پیری^۱، بهروز قاسمی^۲، مردعلی یوسف پور^۳

- ۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
 ۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
 ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

چکیده

در این تحقیق توسط چرخه‌های عملیات حرارتی بین بحرانی (آستنیت‌نهدن در 850°C به مدت ۱ ساعت، سپس انتقال هر یک از نمونه‌ها به کوره با دماهای به ترتیب 770°C و 750°C به مدت ۱۵ دقیقه، انتقال به حمام نمک 360°C به مدت ۱۵ دقیقه و در نهایت سرد کردن تا دمای محیط در هوا) از فولاد AISI ۴۱۴۰ نمونه‌هایی با ساختارهای دو فازی فریتی - بینیتی با درصد‌های مختلف فاز بینیت حاصل گردید. سپس خواص مکانیکی نمونه‌ها توسط آزمون‌های مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد با افزایش کسر حجمی بینیت، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی افزایش می‌یابد در حالی که انعطاف‌پذیری و انرژی ضربه کاهش می‌یابد. با بررسی سطوح شکست نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی، مشاهده شد که نوع شکست در نمونه‌های دو فازی به صورت مخلوطی از شکست ترد و نرم بوده و ذرات ناخالصی سولفید منگنز منشأ و محل رشد و اشاعه ترک می‌باشد و نیز با افزایش کسر حجمی بینیت، نسبت شکست ترد به نرم افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: فریتی - بینیتی، کسر حجمی بینیت، سولفید منگنز

۱. مقدمه

خاطر همین ویژگی‌های منحصر به فرد فولادهای دوفازی، این فولادها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بیشترین استفاده از فولادها در صنعت اتومبیل و بدنه خودروها از فولادهای دوفازی می‌باشد که دلیل آن منحصر بفرد بودن این فولاد از نظر استحکام و انعطاف پذیری است [۱-۳].

در حین جوشکاری فولادهای فریتی - مارتنزیتی، مارتنزیت موجود در نواحی متأثر از جوش، بازپخت شدید شده و سبب افت سختی و استحکام قابل ملاحظه در این نواحی می‌شود. بنابراین برای فاز دوم، از بینیت بجای مارتنزیت در این فولادها که تحت جوشکاری قرار می‌گیرند استفاده گردید و سبب شد تحقیقاتی بر روی فولادهای فریتی - بینیتی انجام گیرد. در حقیقت فولادهای دوفازی فریتی - بینیتی زمانی استفاده می‌شود که نیاز به چقرمگی و انعطاف پذیری بیشتر بوده و استحکام در اولویت دوم باشد [۴-۶].

علاوه بر استحکام و انعطاف پذیری بالا، این فولادها نسبت به فولادهای معمول HSLA از خواص منحصر به فرد دیگری

افزایش تقاضای صنعت اتومبیل سازی به مواد سبک وزن جهت کاهش مصرف سوخت منجر به گسترش تولید ورق‌های فولادی استحکام بالای جدید شده است. از آنجا که شکل پذیری خیلی از فولادها با افزایش استحکام، کاهش می‌یابد، بسیاری از کارهایی که برای تولید فولادهای استحکام بالا انجام می‌شود بر روی بهینه کردن شکل پذیری متمرکز شده است. تحقیق بر روی فولادهای دوفازی از سال ۱۹۷۵ میلادی آغاز شده است. مطالعات نشان داده اند که آنیل میان بحرانی فولادهای کم آلیاژی در محدوده ی دو فازی آستنیت و فریت فولادهایی با ریز ساختار فریت - مارتنزیت یا بینیت تولید می‌کند که علاوه بر استحکام بالا، انعطاف پذیری بهتری نسبت به سایر فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا که به روش‌های مختلف دیگری از رسوب سختی یا سخت گردانی محلول جامد سخت شده اند، دارا می‌باشد. حضور همزمان این دو ویژگی در فولادهای معمولی دیگر غیرممکن است و به

* نویسنده مسئول:

مهندس رضا پیری

نشانی: سمنان، دانشگاه سمنان، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد.

تلفن: ۳۴۵۸۶۴۶۴ (۸۱) ۰۹۸+

پست الکترونیکی: Rezapiri11@gmail.com

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد AISI 4140

Ni	Mo	Cr	Mn	P	S	Si	C
۰/۰۹	۰/۱۹	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۹	۰/۲۱	۰/۳۹

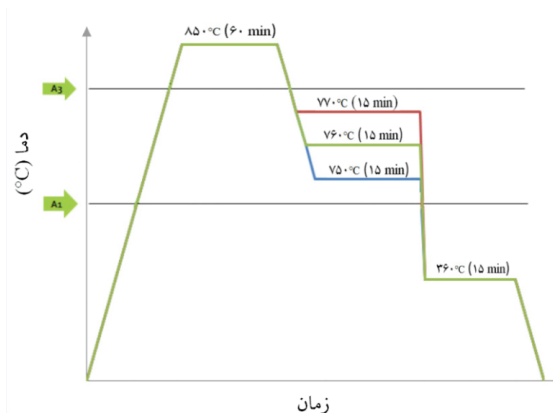
مرسوم بالای دمای AC_1 ، در منطقه تک فازی آستنیت به منظور دستیابی به ۱۰۰٪ آستنیت با همان درصد کربن اولیه آلیاژ انجام می‌شود. در طی سرمایش ممکن است مارتنزیت، بینیت، فریت، پرلیت با توجه به نرخ سرد کردن و سختی پذیری آلیاژ بدست آید [۱۶]. عملیات حرارتی بین بحرانی بین دمای AC_1 و $AC_1 + \alpha$ در دیاگرام فازی در ناحیه دوتایی ($\gamma + \alpha$) یا ناحیه بین بحرانی انجام می‌شود. با تبرید از دمای بین بحرانی نواحی که فریت موجود است در ساختار دو فازی باقی می‌ماند در حالی که آستنیت به مارتنزیت یا بینیت و حتی پرلیت می‌شود. این استحاله‌ها بستگی به نرخ تبرید و سختی پذیری آلیاژ دارند. [۱۴ و ۱۶ و ۱۷].

فولاد AISI 4140 که جز فولادهای HSLA است و از دسته فولادهای کروم مولیبدن دار با کربن متوسط می‌باشد در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. این نوع فولادها که به فولادهای Mo40 هم مشهور هستند دارای تولید جهانی می‌باشد و کاربرد فراوانی در صنایع مختلف دارد [۱۸]. هدف از انجام این تحقیق بررسی چگونگی تغییرات استحکام، انعطاف پذیری، سختی و انرژی ضربه فولاد AISI 4140 در برابر تغییرات کسر حجمی بینیت و همچنین اثر کسر حجمی بینیت بر رفتار و نوع شکست این فولاد می‌باشد.

۲. مواد و روش تحقیق

در این مطالعه فولاد میکروآلیاژی AISI 4140 با قطر اولیه‌ی ۲۰ mm انتخاب شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (۱) آمده است.

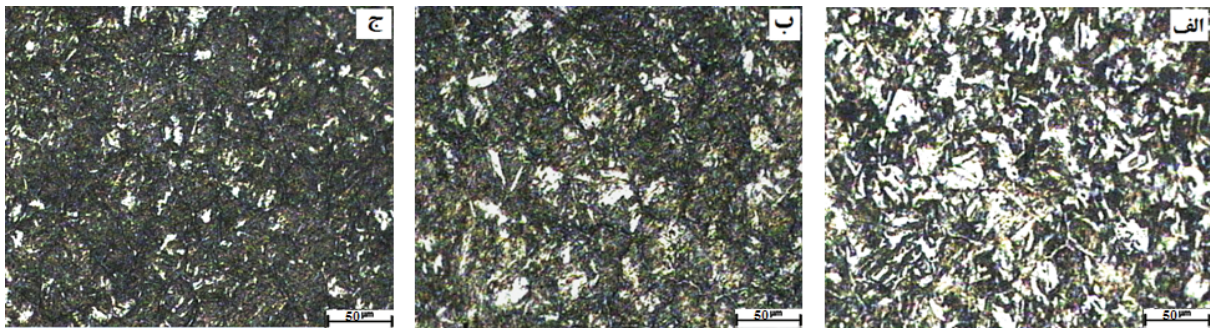
در ابتدا محدوده دقیق دوفازی این فولاد با بهره‌گیری از تست دیلاتومتری بدست آمد. بدین منظور یک نمونه با قطر ۵ mm و ارتفاع ۲۲ mm با دقت بالا تراشکاری و دو سطح آن با دقت تراز شد و در دستگاه قرار گرفت و با آزمایش دیلاتومتری محدوده دمای بین بحرانی $742/1 - 781/2^{\circ}C$ بدست آمد. پس از مشخص شدن محدوده بین بحرانی، دماهای ۷۵۰، ۷۶۰ و $770^{\circ}C$ به عنوان دماهای بین بحرانی انتخاب شدند. سپس سه نمونه‌ها پس از آماده سازی تا دمای $850^{\circ}C$ به مدت یک ساعت آستنیت‌شدند و در ادامه جهت دوفازی کردن هر نمونه به ترتیب در کوره عملیات حرارتی جدا گانه با دماهای ۷۵۰، ۷۶۰ و $770^{\circ}C$ به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفتند تا ساختار دوفازی فریت و آستنیت تشکیل شود سپس نمونه‌ها را از کوره خارج و داخل حمام نمک (نیترات سدیم) $360^{\circ}C$ به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شدند و سپس از حمام نمک خارج و در هوا تا دمای محیط سرد شدند. شماتیک عملیات حرارتی ذکر شده در شکل (۱) آمده است.



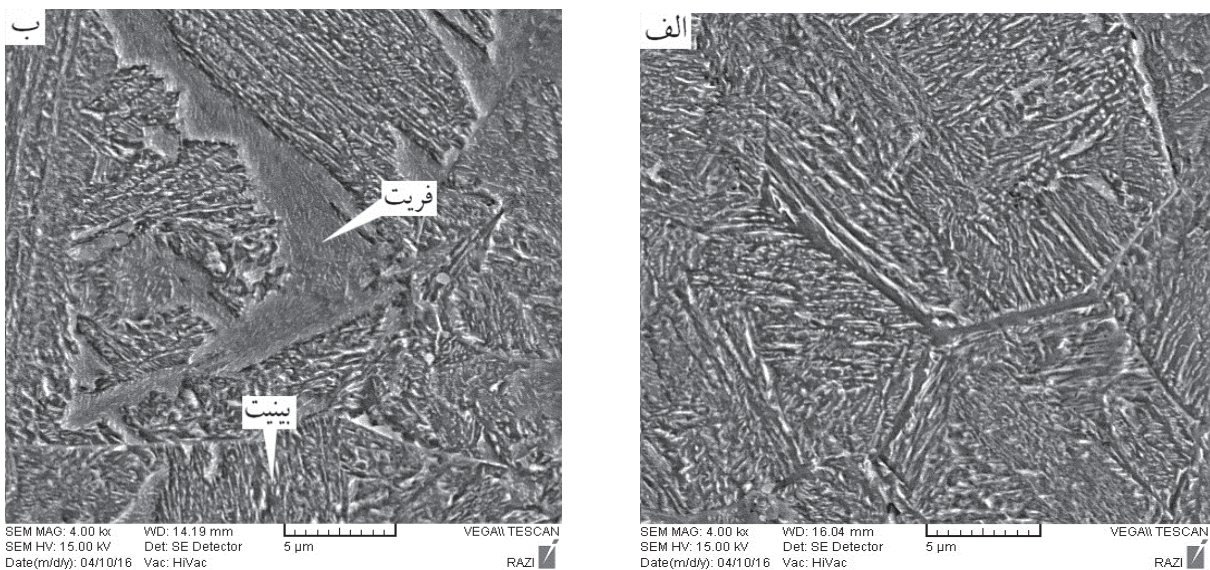
شکل ۱. شماتیک چرخه‌های عملیات حرارتی طراحی شده.

مانند انرژی ضربه بالا، نرخ کارسختی اولیه بالا و نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی پایین برخوردار می‌باشند [۹-۷]. سطح استحکام این فولادها بیشتر مرتبط با مقدار فاز سخت تر در ریزساختار است. فولادهای دوفازی معمولاً دارای نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی پایینی هستند، بنابراین افزایش طول و انعطاف پذیری بیشتری دارند (این نسبت برای فولادهای دوفازی تقریباً ۰/۶ و برای فولادهای HSLA تقریباً ۰/۸ است). بعلاوه رفتار کار سختی فولادهای دوفازی متفاوت با فولادهای HSLA می‌باشد. فولادهای HSLA به محض تغییر شکل، شکل پذیری خود را از دست می‌دهند اما بخاطر زمینه فریت نرم در فولادهای دوفازی، این مواد شکل پذیری خود را در حین تغییر شکل حفظ کرده و توزیع کرنش در عرض مقطع تغییر فرم یافته بهتر می‌شود [۱۰] و به همین دلیل در بسیاری از برنامه‌های کاربردی که به تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیکی نیاز باشد از فولادهای دوفازی استفاده می‌شود [۱۱]. محققان برای آنکه ساختار فریتی-مارتنزیتی یا فریتی-بینیتی را از ساختارهای فریتی-پرلیتی حاصل از عملیات متدوال بر روی فولادهای کم کربن یا HSLA متمایز کنند، نام دوفازی را بر روی این نوع ریزساختارها و این نوع فولادها نهادند [۱۲].

عملیات حرارتی بین بحرانی مهمترین روش برای تولید فولادهای دوفازی می‌باشد. این نوع عملیات حرارتی شبیه عملیات حرارتی مرسوم نرماله کردن یا کوئنچ تمپر است [۱۳]. در اثر عملیات حرارتی بین بحرانی به یک ریزساختار دوفازی فریتی-مارتنزیتی یا فریتی-بینیتی به جای ریزساختار فریتی-پرلیتی مرسوم می‌رسیم. اصطلاح دوفازی به حضور فازهای فریت-مارتنزیت یا فریت-بینیت اشاره می‌کند هر چند مقادیر اندکی پرلیت و آستنیت باقی مانده ممکن است وجود داشته باشد [۱۴ و ۱۵]. اکثر عملیات حرارتی‌های



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ نوری از ساختارهای نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دماهای بین بحرانی مختلف: الف) ۷۷°C (۸۸٪ بینیت)، ب) ۷۶°C (۶۹٪ بینیت)، ج) ۷۷°C (۵۳٪ بینیت).



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از قسمت‌های مختلف ریزساختار حاصل از عملیات حرارتی الف) نمونه ۱۰۰٪ بینیتی ب) نمونه دوفازی فریتی - بینیتی (۶۹٪ بینیت).

دستگاه ضربه شاریبی SIT-300AC این آزمون انجام شد. در انتها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) و با مدل Philips XL30، سطح مقطع شکست نمونه‌ها بعد از تست ضربه شاریبی مورد بررسی قرار گرفت.

۳. نتایج و بحث

شکل (۲) تصاویر میکروسکوپ نوری ساختارهای حاصل از عملیات حرارتی در دماهای بین بحرانی مختلف را نشان می‌دهد. مناطق روشن در این تصاویر فاز فریت و مناطق تیره فاز بینیت می‌باشد و با توجه به این شکل مشاهده می‌شود با افزایش دمای بین بحرانی درصد فاز بینیت افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۲) و نتایج آنالیز تصویری مشاهده می‌شود با افزایش دمای بین بحرانی درصد حجمی فاز بینیت افزایش پیدا می‌کند.

شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از فازها و قسمت‌های مختلف تشکیل شده در ریزساختار نمونه ۱۰۰٪

همچنین یک نمونه تا دمای ۸۵۰°C به مدت یک ساعت آستنیته و سپس مستقیماً در حمام نمک با دمای ۳۶۰°C به مدت ۱۵ دقیقه آستمپرینگ شد تا ساختار کاملاً بینیتی برای مقایسه با ساختارهای دوفازی، حاصل شود.

نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی، آماده سازی و پولیش شده و به وسیله محلول نایتال ۴٪ اچ شدند و با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل BP-OLYMPUS و الکترونی (SEM) مدل VEGA\TESCAN ریزساختارهای حاصل، بررسی شد. برای تعیین درصد فازهای مختلف تشکیل شده در ریزساختار، تصاویر نوری نمونه‌ها توسط نرم افزار Image Pro-Plus6.0 مورد آنالیز قرار گرفتند.

در ادامه نمونه‌های کشش پس از اعمال چرخه‌های عملیات حرارتی، با استاندارد E_gM آماده سازی و به وسیله دستگاه کشش Santam و با دقت ۱mm/min، این آزمون انجام و نتایج ثبت گردید. برای آزمون ضربه بعد از اعمال چرخه‌های عملیات حرارتی نمونه‌ها در ابعاد ۱۰ mm × ۱۰ mm × ۵۵ mm آماده سازی و توسط

جدول ۲. خواص کششی نمونه‌های عملیات حرارتی شده با درصد‌های مختلف فاز بینیت.

درصد از دیاد طول کل	درصد از دیاد طول یکنواخت	نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نهایی	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	درصد بینیت نمونه
۰/۲۵ ± ۲۷/۲	۱۹/۳ ± ۰/۳۱	۰/۸۹	۱۲۶۶/۴ ± ۲۷/۷۳	۱۱۲۸/۳ ± ۱۸/۰۳	۱۰۰
۲۹/۱ ± ۰/۸۸	۲۰/۳ ± ۰/۵۶	۰/۸۸۵	۱۲۰۴/۲ ± ۳۱/۱۶	۱۰۶۶/۱ ± ۳۰/۸۶	۸۸
۳۰ ± ۰/۹۰	۲۱/۶ ± ۰/۲۹	۰/۷۷۳	۱۱۰۱/۷ ± ۱۹/۵۲	۸۵۲ ± ۲۵/۲۵	۶۹
۳۲/۴ ± ۰/۵۸	۲۲/۵ ± ۰/۷۷	۰/۷۵۹	۹۵۹/۳ ± ۲۴/۸۳	۷۲۸/۸ ± ۲۰/۳۴	۵۳

همچنین نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی نهایی در ساختار فریتی - بینیتی کمتر از ساختار بینیتی می‌باشد که این خاصیت از ویژگی‌های مهم فولادهای دوفازی محسوب می‌شود و با افزایش درصد حجمی فریت این نسبت کاهش بیشتری پیدا می‌کند. این پدیده نشان می‌دهد که افزایش درصد حجمی فریت تاثیر بیشتری بر تنش تسلیم دارد و استحکام تسلیم نسبت به استحکام کششی با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد.

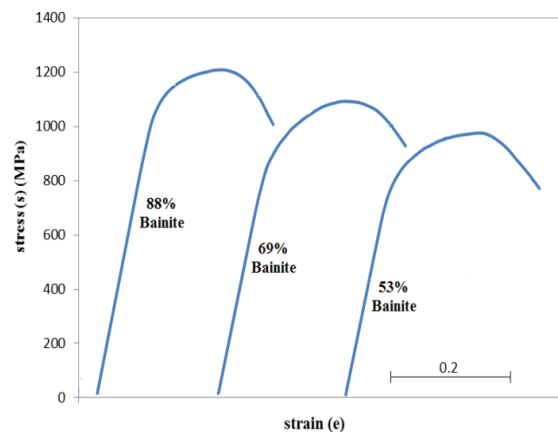
شکل (۴) نشان می‌دهد رفتار ناحیه الاستیک در هر چهار ساختار فریتی - بینیتی مشابه بوده ولی ناحیه تغییر شکل پلاستیک آنها متفاوت می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی برای ساختارهای فریتی-بینیتی با درصد متفاوت بینیت بسیار شبیه هم بوده و با منحنی تنش-کرنش مهندسی برای ساختار بینیتی اختلاف دارند. این پدیده نشان می‌دهد که افزایش درصد حجمی فریت تاثیر زیادی بر رفتار کششی ساختارهای دوفازی فریتی-بینیتی فولاد مورد استفاده ندارد.

با توجه به جدول (۲) می‌توان مشاهده کرد ساختار کاملاً بینیتی کمترین مقدار درصد از دیاد طول یکنواخت و درصد از دیاد طول کل را دارا می‌باشد و با افزایش درصد حجمی فریت این مقادیر افزایش می‌یابد. علت این امر وجود فاز نرم فریت است که دارای انعطاف پذیری بالاتری نسبت به بینیت می‌باشد.

شکل (۵) تغییرات سختی بر حسب کسر حجمی بینیت حاصل از عملیات حرارتی بین بحرانی را نشان می‌دهد. با افزایش دمای بین بحرانی سختی نمونه‌ها به دلیل افزایش کسر حجمی بینیت افزایش یافته است. با توجه به اینکه سختی بینیت بالاتر از فریت می‌باشد هرچه کسر حجمی بینیت در ریزساختار نمونه‌ها بیشتر شود سختی افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از آزمون ضربه نمونه‌های تحت عملیات حرارتی بین بحرانی در شرایط مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است.

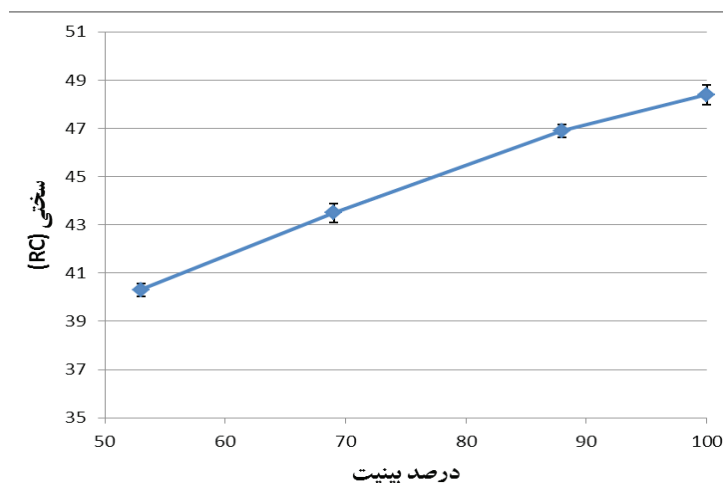
همان گونه که از این نتایج مشخص است با افزایش کسر حجمی بینیت (فاز سخت) و در نتیجه کاهش کسر حجمی فریت (فاز نرم)، انرژی جذب شده کاهش می‌یابد زیرا بینیت فاز ترد می‌باشد و با افزایش کسر حجمی آن انرژی کمتری برای شکست نیاز می‌باشد.



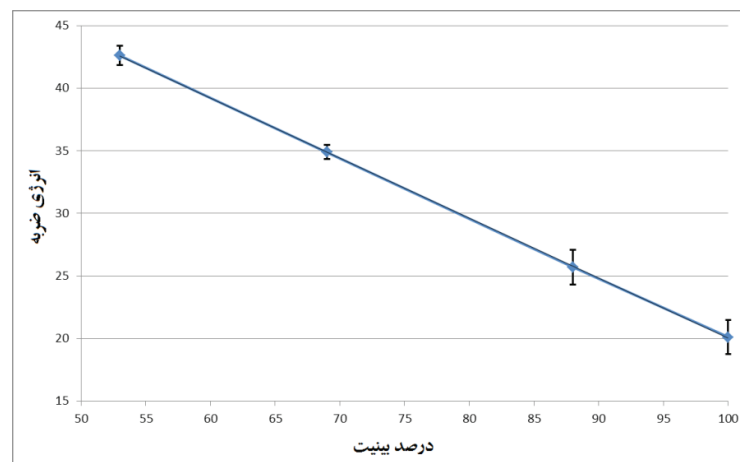
شکل ۴. نمودارهای تنش - کرنش مهندسی نمونه‌های حاصل از عملیات حرارتی با درصد‌های مختلف بینیت.

بینیتی و دوفازی فریتی-بینیتی (با ۶۹% بینیت) را نشان می‌دهد. دمای آستمپرینگ برای انجام چرخه‌های عملیات حرارتی ۳۶۰°C انتخاب شده است و با توجه به نزدیک بودن این دما به دمای m_s این فولاد (۳۴۰°C) [۱۹]، فاز بینیت تشکیل شده در نمونه‌ها، که دارای تیغه‌های ظریف نیز می‌باشد، از نوع بینیت پایینی است.

شکل (۴) نمودار تنش-کرنش مهندسی نمونه‌های دوفازی با درصد‌های مختلف بینیت را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود نمودار تنش کرنش نمونه‌ها فاقد نقطه تسلیم بالایی و پایینی می‌باشد که این از خصوصیات مهم فولادهای دوفازی به حساب می‌آید [۲۰]. نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که ساختار ۱۰۰% بینیتی دارای بیشترین مقدار استحکام تسلیم و استحکام کششی می‌باشد و با افزایش کسر حجمی فریت استحکام تسلیم و نهایی کاهش می‌یابد. علت کاهش استحکام در ساختارهای فریتی-بینیتی نسبت به ساختار کاملاً بینیتی وجود نایجایی‌های متحرک در فاز فریت می‌باشد. با افزایش درصد حجمی فریت، بر تعداد نایجایی‌های متحرک افزوده شده و در نتیجه تسلیم در تنش‌هایی پایین‌تری رخ می‌دهد. تسلیم زودتر به معنی پایین تر بودن نسبت $\frac{YS}{UTS}$ می‌باشد. به علاوه به دلیل کاهش نرخ کارسختی در اثر افزایش درصد حجمی فریت، استحکام کشش نیز با افزایش درصد حجمی فریت کاهش می‌یابد.



شکل ۵. نمودار تغییرات سختی با کسر حجمی بینیت.



شکل ۶. نمودار تغییرات انرژی ضربه با کسر حجمی بینیت.

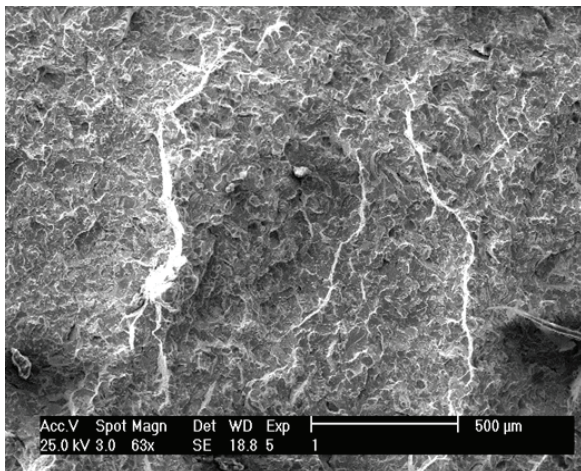
در این قسمت سطوح شکست نمونه‌ها بعد از چرخه‌های مختلف عملیات حرارتی توسط میکروسکوپ SEM مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود، نوع شکست در نمونه‌های عملیات حرارتی شده بصورت مخلوطی از شکست ترد (شکست درون دانه ای) به دلیل حضور فاز بینیت و شکست نرم (مرز دانه‌ای) به علت حضور فاز نرم فریت که بیشتر در مرز دانه‌ها تشکیل شده اند می‌باشد و هر دو مد شکست در نمونه‌ها دیده می‌شود.

سطوح صافی که در مقطع شکست دیده می‌شود مشخصه شکست ترد است که در امتداد صفحات معینی (صفحه کلیواژ) اتفاق می‌افتد. پیدایش این سطوح در فولاد را می‌توان به چند عامل نسبت داد که عبارتند از: کلنی‌های کاربید آهن، آخال‌های کروی شکل سولفید منگنز و ذرات ثانویه به ویژه کاربید تیتانیوم [۱۲ و ۲۲]. در صورتی که کاربیدهای آهنی، آخال‌های سولفیدی یا ذرات ثانویه، عامل پیدایش

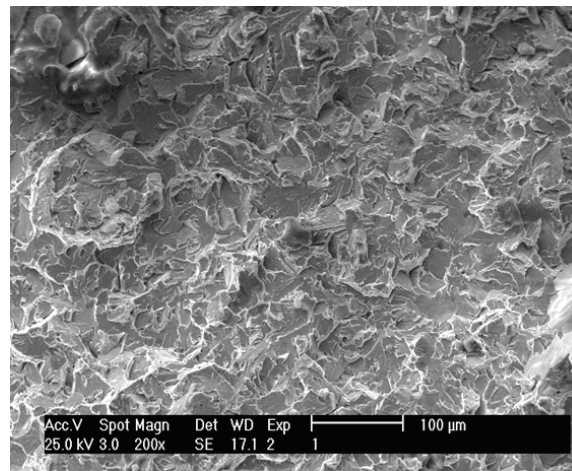
سطوح روشن در شکست ترد باشند، وجود حفره در محل شروع ترک اجتناب ناپذیر خواهد بود [۳۲ و ۲۴]. با توجه به ساختار میکروسکوپی، شکست نرم که بصورت مسیره‌های رودخانه‌ای در شکل (۸) مشخص است می‌تواند از یک سطح آزاد شروع شود (همانند شکست ترد). سطح آزاد از یک ذره تشکیل می‌شود که این ذره می‌تواند فاز ثانویه پراکنده شده یا ترکیب MnS باشد. جدایش زمینه‌ی فلزی از ذره کوچک در فصل مشترک زمینه/ذره می‌تواند این سطح آزاد را بوجود آورد. شکست از ذره کوچک می‌تواند این سطح آزاد را تشکیل دهد و در ادامه سطح آزاد پیرامون ذره کوچک، یک حفره را بوجود می‌آورد. این حفره توسط کرنش پلاستیکی و تنش هیدرواستاتیکی رشد می‌کند و سرانجام این حفرات به اندازه معین رشد و به حفرات مجاور خود می‌پیوندد [۲۵]. در تصاویر مقاطع شکست نمونه‌های عملیات حرارتی شده، این ذرات و حفره‌های مجاور آنها دیده شدند. این ذرات توسط آزمون EDS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مشخص گردید آخال‌های

در این قسمت سطوح شکست نمونه‌ها بعد از چرخه‌های مختلف عملیات حرارتی توسط میکروسکوپ SEM مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود، نوع شکست در نمونه‌های عملیات حرارتی شده بصورت مخلوطی از شکست ترد (شکست درون دانه ای) به دلیل حضور فاز بینیت و شکست نرم (مرز دانه‌ای) به علت حضور فاز نرم فریت که بیشتر در مرز دانه‌ها تشکیل شده اند می‌باشد و هر دو مد شکست در نمونه‌ها دیده می‌شود.

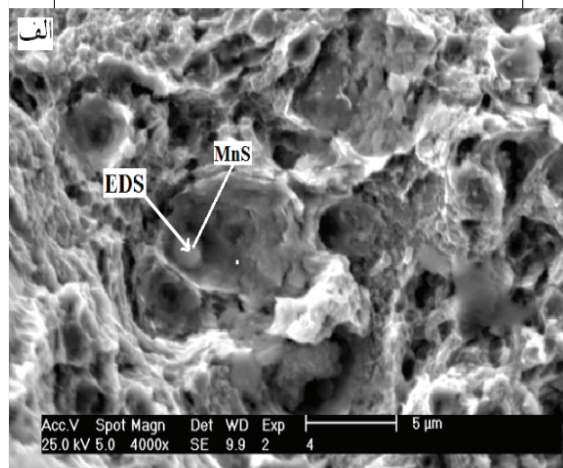
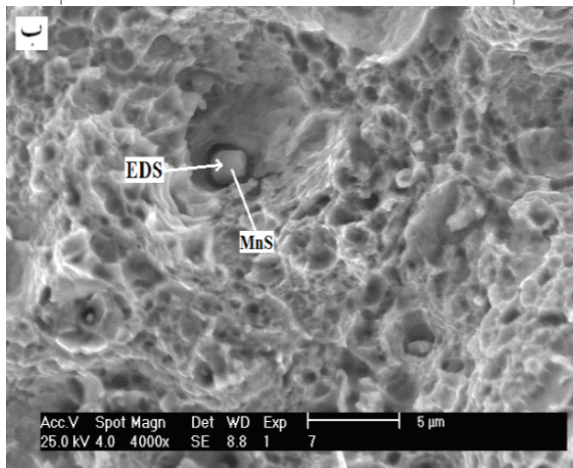
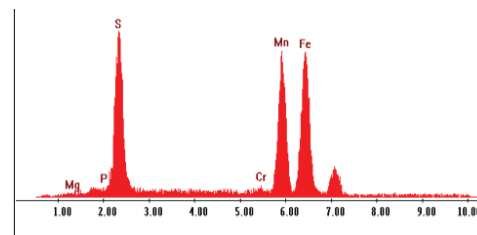
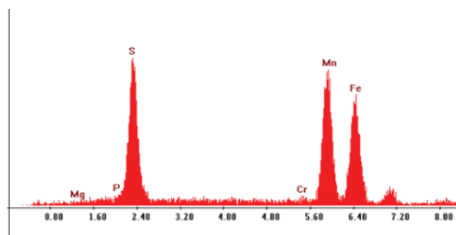
سطوح صافی که در مقطع شکست دیده می‌شود مشخصه شکست ترد است که در امتداد صفحات معینی (صفحه کلیواژ) اتفاق می‌افتد. پیدایش این سطوح در فولاد را می‌توان به چند عامل نسبت داد که عبارتند از: کلنی‌های کاربید آهن، آخال‌های کروی شکل سولفید منگنز و ذرات ثانویه به ویژه کاربید تیتانیوم [۱۲ و ۲۲]. در صورتی که کاربیدهای آهنی، آخال‌های سولفیدی یا ذرات ثانویه، عامل پیدایش



شکل ۸. مسیره‌های رودخانه‌ای تشکیل و اشاعه ترک در یک نمونه فریتی-بینیتی.



شکل ۷. سطح مقطع شکست نمونه بعد از عملیات حرارتی بین بحرانی با ۶۹ درصد بینیت.



شکل ۹. تصاویر میکروسکوپی از مناطق شکست نرم دو نمونه عملیات حرارتی شده: الف) ۱۲ درصد فریت، ب) ۴۷ درصد فریت

مد شکست در مسیره‌های رودخانه‌ای ترک به صورت نرم می‌باشد یعنی مسیره‌های ترک تشکیل شده است از حفرات ریز و درشت که به یکدیگر پیوند خورده اند. نوع مسیره‌های اشاعه ترک مشخص کننده میزان انرژی صرف شده (انرژی ضربه) جهت شکست می‌باشد. در صورتی که این مسیره‌ها از عرض بزرگتر و حفره‌های بزرگتری برخوردار باشند نشان دهنده این است که ترک‌ها با سرعت پایین تر شروع به رشد می‌کنند در نتیجه ماده نیاز به صرف انرژی بیشتری جهت شکست دارد و بلعکس در صورتی که عرض این مسیره‌ها کوچک و حفره‌های تشکیل دهنده آن عمق و قطر کوچکتری

موجود در سطح شکست نرم، سولفید منگنز می‌باشد. در نتیجه سطوح شکست از ذرات سولفید منگنز آغاز و به مناطقی اشاعه می‌یابد که این ذرات حضور دارند و به علت اینکه عناصر آلیاژی و آخال‌های سولفید منگنز تمایل دارند در مرز دانه‌ها تجمع کنند، اشاعه ترک در مرز دانه‌ها ادامه پیدا می‌کند. با توجه به اینکه فریت عمدتاً در مرز دانه‌ها تشکیل شده است و حضور آخال‌های سولفید منگنز در این مناطق، نتیجه می‌شود این آخال‌ها عامل تسریع کننده شکست نرم می‌باشد. شکل ۸ مسیره‌های رودخانه‌ای را در یک نمونه فریتی-بینیتی نشان می‌دهد.

۴. نتیجه گیری

۱. استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی فولاد با افزایش کسر حجمی بینیت افزایش، در حالی که انعطاف پذیری و انرژی ضربه شارپی این فولاد، با افزایش کسر حجمی بینیت کاهش پیدا می کند.
۲. مطالعات شکست نگاری نشان داد نوع شکست این نمونه ها بصورت مخلوطی از شکست ترد و نرم بوده که شکست نرم به شکل مسیره های رودخانه ای می باشد.
۳. عامل اشاعه ترک، ذرات ریز و پراکنده سولفید منگنز (MnS) می باشد که این ذرات ترد در هنگام ضربه سطوح آزادی ناشی از جدایش فصل مشترک زمینه/ ذره بوجود می آورد و باعث اشاعه ترک و رشد آن تا زمان شکست در مسیر حضور این آخال ها می شود.
۴. با افزایش کسر حجمی بینیت، به دلیل افزایش سرعت رشد ترک و فرصت نداشتن دیمپل ها برای رشد و بزرگتر شدن، حفره های کوچکتری در سطوح شکست نرم بوجود می آید و عرض مسیره های رودخانه ای (مسیره های شکست نرم) هم کوچکتر می شود.
۵. با افزایش کسر حجمی بینیت انعطاف پذیری نمونه کاهش یافته در نتیجه درصد شکست ترد در سطوح شکست افزایش می یابد.

داشته باشند نشان دهنده ی آن است که سرعت رشد ترک بالا بوده و ماده انرژی ضربه پایین تری دارد.

شکل (۹) مقایسه بین مناطق شکست نرم دو نمونه فریتی- بینیتی با ۱۲% فریت و ۴۷% فریت حاصل از عملیات حرارتی را نشان می دهد. همان گونه که در این شکل مشخص است در نمونه با ۴۷% فریت حفره های بزرگتری تشکیل شده است. حضور سولفید منگنز در سطوح شکست که باعث تسریع سرعت رشد ترک می شود در این شکل مشخص می باشد.

با افزایش کسر حجمی فاز فریت در نمونه های دوفازی، درصد شکست نرم نمونه ها افزایش می یابد در نتیجه با افزایش درصد فاز فریت، در مناطقی که شکست نرم در آن ها اتفاق افتاده است حفره های بیشتر و بزرگتری نسبت به نمونه ای که درصد فریت کمتری دارد تشکیل شده است. علت این امر به دلیل آن است که رشد و اشاعه ترک با افزایش فاز فریت، کندتر شده در نتیجه مسیره های رودخانه ای عریض تری تشکیل شده و حفره ها به علت کند بودن سرعت رشد ترک فرصت کافی برای رشد و بزرگ تر شدن پیدا می کند. در نتیجه با افزایش کسر حجمی فریت و کاهش بینیت، انعطاف پذیرتر شده و انرژی ضربه بالا رفته و مقاومت بیشتری در مقابل ضربه پیدا می کند.

References

- [1]. G.R. Speich, Fundamentals of dual-phase steels, Proceedings of the Metallurgical Society of AIME, Warrendale, USA, pp. 3-39, 1980.
- [2]. A.Ramazani a, S.Kazemiabnavi, R.Larson "Materials and Processes". Quantification of ferrite-martensite interface in dual phase steels, A first-principles study, Acta Materialia, vol 116, pp231-237, 2016.
- [3]. M.A. Maleque, Y.M. Poon, H.H. Masjuki, The effect of inter-critical heat treatment on the mechanical properties of AISI 3115 steel, in: Journal of Materials Processing Technology, pp.482-487, 2004.
- [4]. R. Bakhtiari, A. Ekrami, The effect of bainite morphology on the mechanical properties of a high bainite dual phase steel, materials science and engineering A vol 525, pp. 159-165, 2009.
- [۵]. م. مشهدی کریمی "مقایسه خواص مکانیکی فولاد فریتی- مارتنزیتی و فریتی- بینیتی" پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ۱۳۸۷.
- [6]. N. Saeidi*, A. Ekrami, Materials Science and Engineering A, vol 523, pp125-129, 2009.
- [7]. M.A. Maleque, Y.M. Poon, H.H. Masjuki, The effect of inter-critical heat treatment on the mechanical properties of AISI 3115 steel, Materials Processing Technology, pp.482-487, 2004.
- [8]. M. R. Akbarpour, A. Ekrami Materials Science and Engineering A, vol 477, pp 306-310, 2008.
- [9]. N. Saeidi*, A. Ekrami Materials Science and Engineering A, vol 527, pp 5575-5581, 2010.
- [10]. K.H Prabhudev, "Handbook of heat treatment of steels, New Delhi, Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd, 1987.
- [11]. N.Ishikawa, K.Yasuda, H.Sueyoshi, S.Endo, H.Ikeda, T.Morikawa, K.Higashida, Microscopic deformation and strain hardening analysis of ferrite-bainite dual-phase steels using micro-grid method, Acta Materialia, vol 97, pp 257-268, 2015.
- [12]. G.Krauss, "Principles of Heat Treatment of Steels" in: ASM Metal Handpark, pp 240- 245, 1980.
- [13]. A.K.SINHA, Physical metallurgy handbook, McGraw-Hill, 2002.
- [14]. M.S. Rashid, Formable HSLA and dual-phase steels, proceedings of the Metallurgical Society of AIME 16, ASM metals handbook, VOL 4 heat treating USA, 1979.
- [15]. G.R. Speich, "Fundamentals of dual-phase steels", in: Proceedings of the Metallurgical Society of AIME, Warrendale, USA, pp 3-39, 1980.
- [16]. ASM metals handbook, VOL 4, heat treating.
- [17]. Kastakin, O.G. et al, Calculation Models for Determining the Critical Points of Steel". In Metal Science and Heat Treatment, pp. 27-31, 1984.
- [18]. Key To Steel Software, third edition, 2005.
- [19]. Matthew Samler, Jominy End Quenching of 4140 Steel: The Effect of Time and Temperature on Austenitic Grain Growth, Project Number: 0505, 2010.
- [20]. H.K.D.H. Bhadeshia, "Bainite in steels: transformations, mi-

- microstructure and properties, London, IOM Communications, 2001.
- [21]. Rosenfield A., and Shetty D. K., Cleavage Fracture of Steel in the Upper Ductile-Brittle Transition Region, *Eng. Frac. Mech.*, Vol 17, pp 461-470, 1983.
- [22]. Kroon M., Faleskog J., Micromechanics of Cleavage Fracture Initiation in Ferritic Steels by Carbide Cracking, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol 53, pp171-196, 2005.
- [23]. B. Tanguy, J. Besson, R. Piques, Ductile to Brittle Transition of an A508 Steel Characterized by Charpy Impact test, experimental results, *Eng. Frac. Mech.*, Vol 72, pp 49-72, 2005.
- [24]. Tanguy B., Besson J., Piques R., Ductile to Brittle Transition of an A508 Steel Characterized by Charpy Impact Test, Part II: modeling of the Charpy transition curve, *Eng. Frac. Mech.*, Vol 72, pp 413-434, 2005.
- [25]. Alan F. Liu, *Mechanics and Mechanisms of Fracture, An Introduction*, ASM International, 2005.