

بررسی تاثیر عملیات بازپخت بر ریزساختار و خواص کششی فولادهای سه فازی فریت-بینایت-مارتنزیت

امیر طالبی^{۱*}، رضا بختیاری^۲، بیژن عباسی خزایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مواد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد. amir.talebi1368@gmail.com

۲- استادیار گروه مهندسی مواد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی کرمانشاه r.bakhtiari@razi.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی مواد دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی کرمانشاه biabkh@yahoo.com

Effect of tempering treatment on microstructure and tensile properties of a ferrite- bainite- martensite triple-phase steel

A. Talebi^{1,*}, R. Bakhtiari², B. Abbasi Khazaei²

1- M. Sc. Student of Materials Engineering, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, E-Mail: amir.talebi1368@gmail.com

2- Assistant Professor, Ph. D. of Materials Engineering, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, E-Mail: r.bakhtiari@razi.ac.ir

2- Assistant Professor, Ph. D. of Materials Engineering, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, E-Mail: biabkh@yahoo.com

چکیده

فولادهای دوفازی با خواص منحصر بفردي نظیر تسلیم پیوسته، نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی کم، سرعت کار سختی بالا و درصد ازدیاد طول همگن و قابل توجه در کاربردهای مختلفی نظیر خودروسازی همواره مورد توجه میباشند. فولادهای سه فازی نیز گسترش یافته فولادهای دوفازی بوده که ریزساختار آنها شامل فازهای فریت، مارتنزیت و بینایت می باشد. در این تحقیق، ریزساختار سه فازی با کسر حجمی فریت برابر با ۳۴٪ برای فولاد AISI4140 با استفاده از عملیات حرارتی مناسب ایجاد شده است. در ادامه، عملیات حرارتی بازپخت در دماهای ۲۵۰، ۴۵۰ و ۶۵۰°C به مدت ۹۰ min در مورد ریزساختار سه فازی انجام شده و بررسی های ریزساختاری و آزمون های مکانیکی شامل سختی سنجی و کشش مورد استفاده قرار گرفته اند. بررسی ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی وجود سه فاز در ریزساختار و امکان بازپخت مارتنزیت و تشکیل کاربیدهای ثانویه حین بازپخت را تایید نمود. نتایج آزمون کشش، کاهش پیوسته استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی و افزایش انعطاف پذیری با افزایش دمای بازپخت را نشان داد. بررسی سطوح شکست نمونه های کششی نیز نشان داد که در دمای ۶۵۰°C رفتار نرم تر بوده که مطابق با دیگر نتایج آزمون های مکانیکی در این دمای بازپخت می باشد.

واژه های کلیدی: عملیات بازپخت، مارتنزیت، بینایت، فریت، خواص کششی

Abstract

Dual phase steels have unique properties such as continuous yielding, low ratio of yield strength to tensile strength, high work hardening rate and homogenous elongation percent which are applicable for vehicle industries. Triple phase steels are a developed type of dual phase steels which contains ferrite, bainite and martensite. In this study, triple phase microstructure with 34Vol.% ferrite was obtained for AISI4140 steel using appropriate heat treatment. Then, tempering was performed for triple phase microstructures at 250, 450 and 650oC temperatures for 90 min and microstructural studies and mechanical tests including tensile and hardness were used for the related microstructures. Microstructural studies using optical and scanning electron microscopes revealed the three phases as well as tempered martensite and secondary carbides formed during tempering. The results of tensile test showed continuously reduction of yield strength and ultimate tensile strength and also increase of elongation with increasing tempering temperature. The fracture surfaces of tensile tested specimens showed more ductile behavior at 650oC tempering temperature which was in agreement with other mechanical properties.

Keywords: Tempering treatment, Ferrite, Bainite, Martensite, Tensile properties.

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد بررسی بدست آمده با آنالیز کوانتومتری (درصد وزنی)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
BaCe	0.416	0.342	0.741	0.015	0.0214	1.13	0.0273	0.221
AL	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn
0.0311	0.0041	0.0119	0.00067	0.0018	0.0034	0.0016	0.0024	0.00075
As	Zr	Ca	Sb	Ta	B	Zn
0.0015	<0.0005	<0.0004	<0.0005	<0.001	<0.00079	<0.0023

مقدمه

مارتنزیت و انباشتگی کربن در نابعایی‌ها در فریت نسبت داده شده است (Kampa & Celottob & Hanlonb, 2012). آقای عنازاده و خیر ندیش گزارش داده‌اند که فرایند باز پخت فولادهای دو فاز در دماهای بالاتر از ۲۰۰°C سبب کاهش استحکام تسلیم می‌شود و استحکام نهایی را نیز کاهش می‌دهد و در دماهای باز پخت بالاتر از ۳۰۰°C تسلیم به صورت پیوسته است (Anazadeh Sayed & Kheirandish, 2012). آقای کمپ و همکارش چنین بیان کردند که باز پخت چند ثانیه‌ای می‌تواند تا حدود قابل توجهی استحکام تسلیم را افزایش می‌دهد و خمش پذیری را بهبود ببخشد در حالی که استحکام کشش نهایی ضرورتاً مشابه باقی بماند (Kampa & Celottob & Hanlonb, 2012).

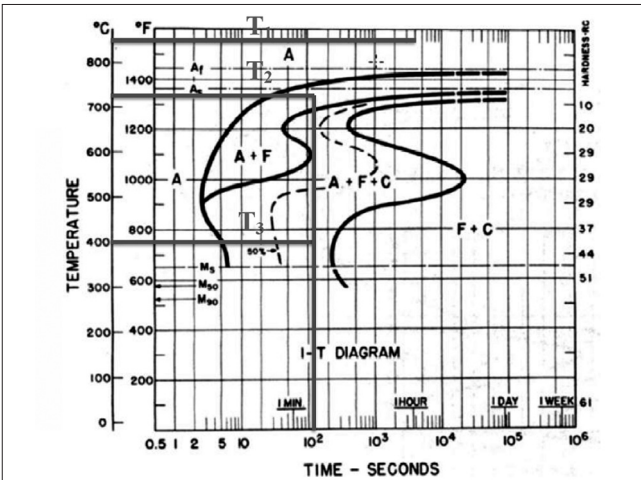
باتوجه به اینکه فولادهای دو فاز و سه فاز، استحکام بالا، نقطه تسلیم پیوسته و جوش پذیری مناسبی دارند، ولی به علت جدایش بین فاز سخت و فاز نرم شکل پذیری آنها محدود بوده و در نهایت می‌تواند منجر به شکست گردد. در این تحقیق و در راستای بهبود بخشی میزان شکل پذیری، تاثیر عملیات بازپخت بر ریز ساختار و خواص مکانیکی فولادهای سه فاز فریت-بینایت-مارتنزیت مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

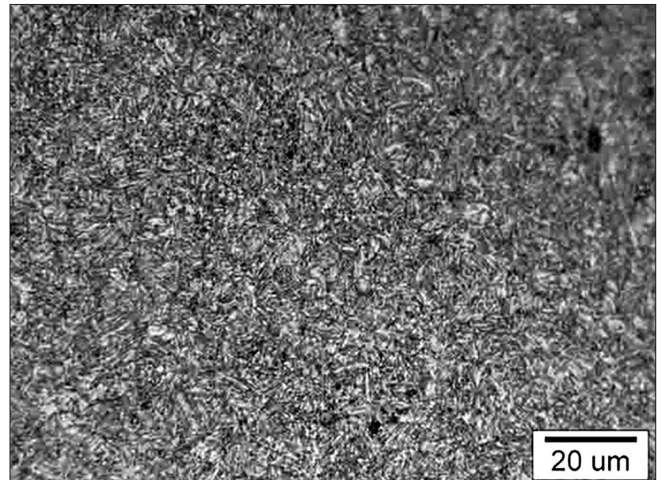
ماده اولیه بصورت میله‌های فولادی با قطرهای ۱۰ و ۲۰ میلیمتر در این تحقیق به کار گرفته شده است. ترکیب این فولاد توسط دستگاه کوانتومتری با استاندارد ASTM E 415-08 اندازه گیری شد و به صورت جدول زیر ارائه گردید. آنالیز نشان می‌دهد که این ترکیب مطابق با فولاد AISI 4140 می‌باشد. ریزساختار اولیه این فولاد نیز بررسی گردید که نشان دهنده ساختار فریتی-پرلیتی بود.

برای سه فاز کردن نمونه و بدست آوردن ریز ساختار فریت و بینایت و مارتنزیت از روش سه فاز کردن پیوسته استفاده شد، به این صورت که ابتدا میله‌های فولاد ۱۴۰ در دمای ۸۵۰°C به مدت ۶۰ دقیقه نرماله شده و سپس از کوره خارج شده و وارد کوره ۷۲۰°C به مدت ۳ دقیقه نگهداری شده و سپس برای تشکیل

به علت خواص مکانیکی برتر مثل رفتار تسلیم پیوسته، ترکیب مناسب از استحکام - نرمیت و شکل پذیری بهتر و پرداخت عالی سطحی در مقایسه با سایر فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا (HSLA) با ترکیب شیمیایی مشابه، فولادهای دو فاز در دهه‌های گذشته توسعه یافته‌اند. دلیل اصلی برای استفاده از فولادهای دو فاز در کاربردهای استحکام بالا مثل اتومبیل و صنایع هوا و فضا کاهش هزینه‌ها می‌باشد (Bakhtiari & Ekrami, 2009). فولادهای دو فاز (DP) به وسیله ی زمینه نرم فریت با جزایر کوچک مارتنزیت یا بینایت توصیف می‌شوند. ذرات فاز سخت، سختی قابل توجهی را ارائه می‌دهند و این در حالی است که ماتریس فریتی نرمیت خوبی را فراهم می‌سازد و سبب بهبود استحکام و چقرگی و تسلیم پایدار و استحکام تسلیم پایین و استحکام کششی بالا و... می‌باشد بسیاری از محققان گزارش داده‌اند علی رغم نام کلی «دوفازی» این فولادها شامل سه یا چند فاز هستند زمینه نرم نوعاً فریتی است (Zare & Ekrami, 2011). هر چند فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا (HSLA) استحکام بالایی دارند اما شکل پذیری آنها با مشکلات فراوانی روبه رو بوده است بنابراین انعطاف پذیری مورد نیاز برای طراحی قطعات خصوصاً زمانی که ساخت قطعات پیچیده مدنظر است شدیداً محدود می‌شود نتیجه این امر افزایش روز افزون کاربردهای فولادهای دو فاز در زمینه‌ها مختلف است (London & Nelson & Shyned & Nelson, 1988). خاصیت و ویژگی‌هایی مثل استحکام تسلیم و شکل پذیری عالی، رفتار تسلیم شدگی پیوسته و... خواص قابل توجهی از فولادهای دو فاز هستند این خواص مطلوب به طور مطلق به ریز ساختار فولادهای دو فاز مربوط است (Zare & Ekrami, 2011). باز پخت به طور موفقیت آمیزی برای بهبود استحکام / افزایش طول فولادهای دو فاز، پس از انیل درون بحرانی به کار گرفته شده است (Anazadeh Sayed & Kheirandish, 2012). در اکثر تحقیقات گزارش شده است که باز پخت سبب بهبود خواص مکانیکی از طریق بهبود ریز ساختار تغییر شکل یافته و رسوب کاربید در فاز فریت و



شکل ۲- نمودار T-T-T فولاد ۴۱۴۰.



شکل ۱- ریزساختار اولیه ی فولاد ۴۱۴۰.

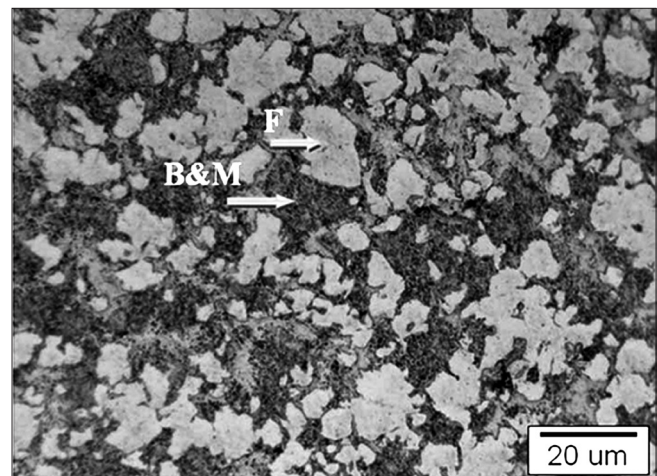
نتایج و بحث

ریزساختار سه فازی فریت- بینایت- مارتنزیت

هدف از انتخاب دماها تشکیل ریز ساختار فریت مارتنزیت و بینایت با مورفولوژی بینایت بالایی با کسر حجمی بالای ۵۰٪ از فازهای سخت بود، شکل ۳، تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به نمونه‌های سه فازی شده را نشان می‌دهد. با توجه به انتخاب دمای بالای آستمپرینگ (۴۰۰°C)، بینیت تشکیل شده در این ساختار سه فازی از نوع بینایت بالا و توفال شکل است. البته محققین قبلی مشاهده ترکیبی از بینایت بالا و بینایت پایین را در این دما برای فولاد ۴۳۴۰ را گزارش داده‌اند. (Bakhtiari & Ekrami, 2009)

محلول اچ رنگی مورد استفاده در این حالت، فریت را به رنگ روشن و بینایت و مارتنزیت را به رنگ قهوه ای نشان می‌دهد (Bakhtiari & Ekrami, 2009). در شکل ۲، دانه‌های فریت که زمینه را تشکیل می‌دهند به رنگ روشن و فاز بینایت به رنگ قهوه ای و فاز مارتنزیت به صورت نقطه‌های تیره تر در لکه‌های قهوه ای رنگ دیده می‌شود. تیره ظاهر شدن بینایت در تصاویر میکروسکوپی، به دلیل ناهمواری‌های ناشی از حکاکی فریت بینایتی در اطراف ذرات ریز سمنتیت است (Bakhtiari & Ekrami, 2009). به منظور تعیین درصد فازها، بر روی نمونه‌های سه فازی آنالیز تصویری انجام گرفت و میزان فاز فریت به میزان ۳۳/۴٪ و مجموع دو فاز مارتنزیت و بینایت به میزان ۶۶/۶٪ اندازه گیری شد که این مقدار، میزان مطلوب برای این آزمایش می‌باشد.

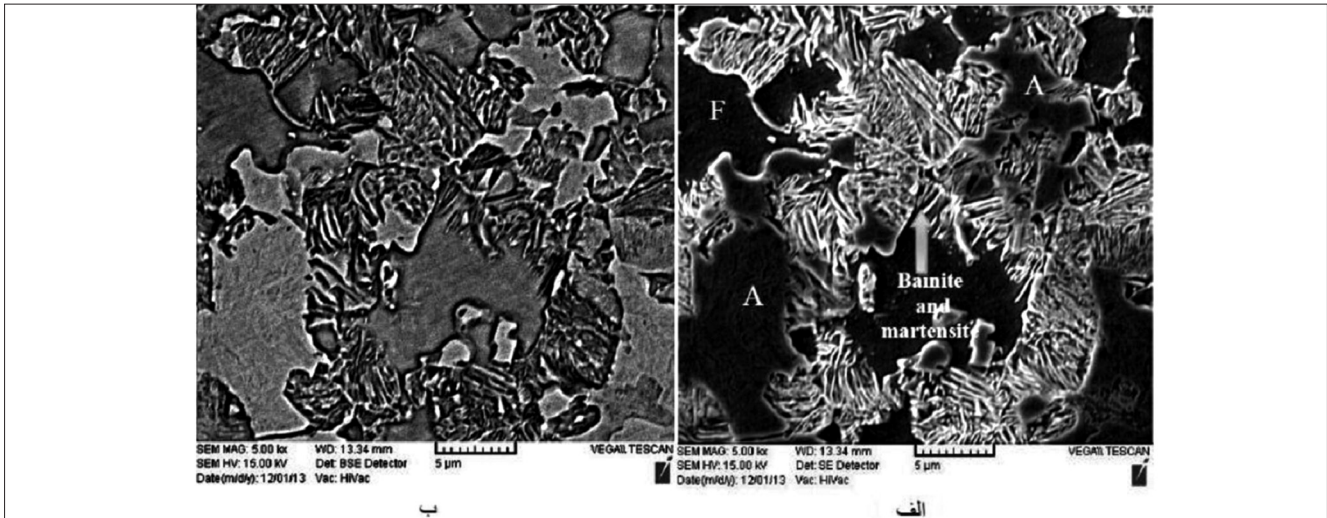
شکل ۴، تصویر SEM در حالت الکترون‌های ثانویه را از ریز ساختار سه فازی شده نشان می‌دهد. با توجه به استفاده از محلول نایتال و انجام اچ میکروسکوپی جهت مطالعات SEM، در تمامی تصاویر دو فاز مارتنزیت و بینیت به رنگ روشن و فاز فریت



شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار سه فازی و اچ شده توسط محلول رنگی.

بینایت، به طور مستقیم وارد کوره حمام نمک با دمای ۴۰۰°C شده و به مدت ۳ دقیقه نگهداری شدند و در نهایت در آب کوئنچ گردیدند. چگونگی انتخاب دماهای نرماله سازی و دمای دوفازی و حمام نمک در شکل ۲ نشان داده شده است. جهت عملیات بازپخت فولاد سه فازی، نمونه‌های سه فازی شده به مدت ۹۰ دقیقه در دماهای مختلف ۲۵۰°C و ۴۵۰°C و ۶۵۰°C قرار گرفتند و در ادامه در کوره سرد گردیدند. نمونه‌ها پس از آماده سازی متالوگرافی با محلول اچ رنگی با ترکیب ۱۶ g Na₂S₂O₅، ۵g K₂S₂O₃ و ۱۰۰ ml آب مقطر اچ شدند. مقدار کسر حجمی فریت نیز با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری Olympus اندازه گیری شد.

آزمون سختی ویکرز بر اساس استاندارد ASTM E384 انجام گردید. نمونه‌های آزمون کشش نیز با استاندارد ASTM E8/E8M آماده سازی شده و توسط دستگاه یونیورسال با سرعت ۱mm/min تحت آزمون کشش قرار گرفتند.



شکل ۴- تصویر SEM از ریز ساختار سه فازی: الف) الکترون ثانویه و ب) الکترون برگشتی.

در این تحقیق نیز زمان ۹۰ دقیقه انتخاب گردید (Lopez Ferreira, 1985, London et al., 1988, ATLAS SPECIALTY METALS, 2005). دماهای بازپخت پایین تر از 250°C نمی‌توانند تاثیر زیادی بر خواص مکانیکی داشته باشند و دماهای بالاتر از 650°C نیز خواص مکانیکی را به شدت کاهش می‌دهند (Davut & Hakan GÜR, 2006). بنابراین، نمونه‌های سه فازی در سه دمای 250°C ، 450°C و 650°C و برای مدت زمان ۹۰ دقیقه مورد عملیات بازپخت قرار گرفتند.

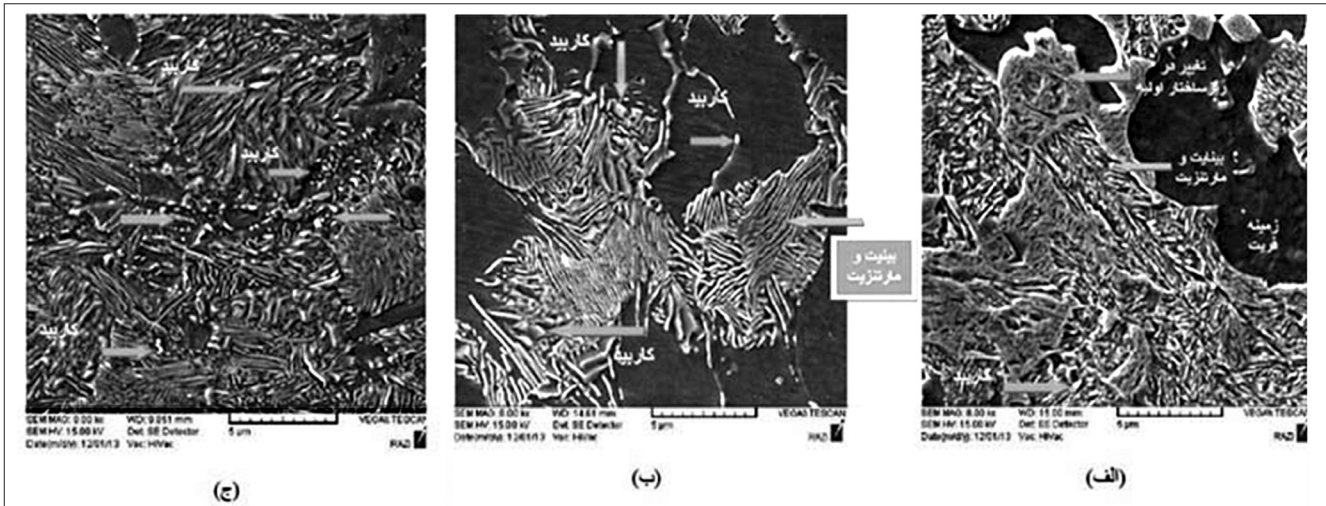
شکل ۵، نشان دهنده ریزساختار SEM برای نمونه‌های بازپخت شده در دماهای مختلف می‌باشد. همان طور که در این تصاویر قابل مشاهده است، با انجام عملیات بازپخت در دمای 250°C تا حدودی تجزیه ریزساختار بینیتی-مارتنزیتی نسبت به حالت اولیه رخ داده و در برخی مناطق، کاربید ریز دانه تشکیل شده است (شکل ۵-الف). در شکل ۵-ب که مربوط به دمای بازپخت 450°C می‌باشد، لکه‌های سفید همانند شکل ۵-الف ایجاد شده که نشانگر کاربید است. در شکل ۵-ج نیز کاربیدها به میزان بیشتری قابل مشاهده هستند که نشان دهنده تجزیه بیشتر ساختار اولیه سه فازی در دمای بازپخت بالاتر می‌باشد.

به طور کلی واکنش‌های بازپخت در فولادهای دو فازی ترکیبی از واکنش‌هایی می‌باشد که برای هر یک از فازها به طور جداگانه رخ می‌دهد. بنابراین می‌توان بازپخت در فاز مارتنزیت و بینیت را بصورت رسوب کاربیدها و تغییر شکل آستنیت باقیمانده انتظار داشت. علاوه بر این، تفکیک کربن در محل نابجایی‌ها، رسوب کاربید در فاز فریت و رهایش تنش اضافی در فاز مارتنزیت می‌تواند در طول بازپخت رخ دهند (Anazadeh Sayed & Kheiran-dish, 2012). ریزساختار سه فازی بازپخت شده شامل مارتنزیت بازپخت شده و رسوبات ثانویه می‌باشد که بستگی به ترکیب و

به رنگ تیره دیده خواهد شد. به دلیل مشاهده مورفولوژی و تمایز بهتر فازها، از سیستم الکترون‌های ثانویه در تصویربرداری توسط SEM استفاده گردید. در شکل ۴، فاز زمینه که همان فاز فریت است به رنگ تیره می‌باشد و ریز ساختارهای تیغه‌ای روشن تر شامل ریز ساختار ترکیب بینیت و مارتنزیت می‌باشد. در مقالاتی ذکر شده است که وجود فاز بینیت می‌تواند در کنار فازهای کاربیدی باشد که این مساله تا حدودی در شکل ۴ قابل مشاهده است. البته در مجموع با قطعیت بالا نمی‌توان تمایز فازهای بینیت و مارتنزیت را در این ریزساختار بیان نمود (Bakhtiari & Ekrami, 2009). در تصاویر SEM مربوطه، لکه‌های سفید دیده می‌شود که روشن تر از فاز فریت است و می‌تواند آستنیت باقی مانده باشد. همچنین برخی از جزایر متفاوت از فاز فریت دیده می‌شود، بنابراین برای اطمینان بیشتر، از تصاویر SEM در حالت الکترون‌های برگشتی نیز استفاده شد که در شکل ۴ نشان داده شده است. در این تصویر، وجود یک فاز متفاوت از فریت، بینیت، و مارتنزیت قابل مشاهده است. آستنیت از پایداری خوبی برخوردار بوده و این امکان وجود دارد که در حین تغییر شکل به مارتنزیت تبدیل شود (Baik & Kim & Jin & Kown, 2001). پایداری فاز آستنیت در فولادهای چند فازی به اندازه نسبی آنها در ریز ساختار و حالت تنش اعمالی و میزان کربن موجود در آن بستگی دارد (Baik & et al, 2001, Sakuma & matlock & Krauss, 1990, Sakuma & Itami & Kawano & Kimura & Hiwatashi & and Sakata, 1996).

ریزساختار سه فازی بازپخت شده

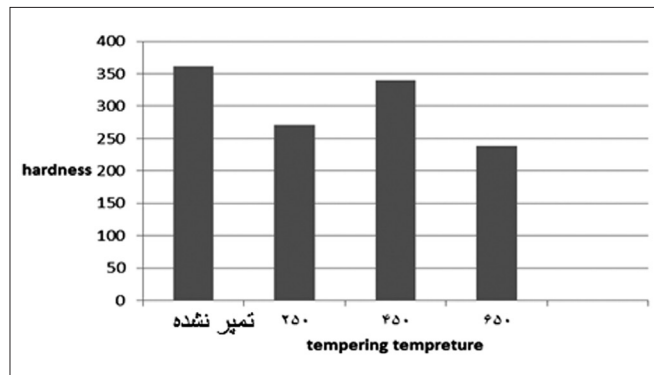
مطابق تحقیقات قبل، زمان بازپخت ۹۰ دقیقه بهترین زمان بازپخت برای فولاد مورد بررسی گزارش شده است. بنابراین



شکل ۵- تصویر SEM از ریزساختارهای سه فازی بازپخت شده در دماهای الف) ۲۵۰، ب) ۴۵۰ و ج) ۶۵۰°C.

علاوه بر این، در دمای ۴۵۰°C سختی به صورت ناگهانی افزایش یافته است. در فولادهای حاوی عناصر مولیبدن و وانادیوم و کروم که جهت استحکام بخشی در فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرند این امکان وجود دارد که استحکام بازیابی گردد و علت آن کاربیدهای ثانویه بسیار ریز و پراکنده تشکیل شده توسط این عناصر است که بازیابی می‌گردند و تشکیل آنها در دماهای بالای بازپخت و زمان‌های طولانی بازپخت ایجاد می‌شوند. آقای یان گزارش دادند که در فولادهای Cr, Mo, V بیشترین اثر تقویت کنندگی به رسوب کاربدهای MC غنی از وانادیوم یا M_2C غنی از MO مربوط بوده و به صورت کروی و یا سوزنی بر روی صفحات مارتنزیت رسوب می‌کنند. (Yan et al., 2008, Bhat et al., 2012) افزایش سختی را می‌توان به رسوب کاربیدهای انتقالی بسیار ریز در بین صفحات مارتنزیت در دمای بالاتر بازپخت نیز مربوط دانست. در دمای بازپخت ۶۵۰°C، به علت کاهش بیش از حد مقدار مارتنزیت سختی مجدداً کاهش یافته است. لازم به ذکر است در این حالت اثر کاهش مقادیر مارتنزیت در دمای بالای بازپخت از اثر افزایش رسوبات کاربیدی موثرتر بوده که در مجموع منجر به کاهش سختی شده است.

کاهش سختی در اثر افزایش دمای بازپخت از سوی سایر محققین گزارش شده است (HoneyCombe & Bhadeshia, 2006). آقای یان و همکارش و نیز آقای بات و همکارانش گزارش دادند که در فولادهای Cr, Mo, V در دمای بالای ۵۰۰°C رسوب کاربید از نوع M_3C و M_7C_3 می‌باشد که دارای اثر سخت گردانی کمتری نسبت به بقیه کاربیدها می‌باشد و نیز با درشت شدن کاربیدها سختی کاهش می‌یابد که این موضوع می‌تواند دلیل کاهش سختی در دمای ۶۵۰°C باشد. (Yan et al., 2008, Bhat et al., 2012)



شکل ۶- نمودار تغییرات عدد سختی با افزایش دمای بازپخت در مقایسه با نمونه بازپخت نشده.

سیکل عملیات حرارتی آن ماده دارد، رسوبات ثانویه شامل MC و M_3C و M_7C_3 و M_6C و غیره است که در آن نشان دهنده Fe, Cr, Mo, V یا سایر عناصر شکل دهنده کاربیدهاست، کاربیدهای MC شامل کاربید وانادیوم با غلظت پایین آهن، کروم و مولیبدن هستند در حالی که کاربیدهای M_7C_3 شامل مقادیر بزرگتری از Cr, Fe, V می‌باشد (Yan & Shi & Fan & Xu, 2008, Bhat & Garrison, 2008, Zackay, 2012).

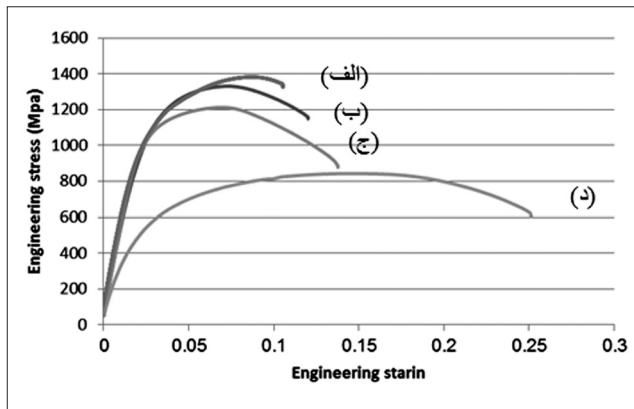
سختی سنجی

شکل ۶، مقایسه مقادیر عدد سختی را برای دماهای مختلف بازپخت نشان می‌دهد. مطابق این شکل، ابتدا با افزایش دمای بازپخت، مقدار سختی کاهش می‌یابد که در ارتباط با تغییر ساختار در اثر عملیات بازپخت و کاهش تترآگونالیت مارتنزیت است (HoneyCombe & Bhadeshia, 2006). فرایند بازپخت معمولاً منجر به کاهش سختی می‌شود که دلیل آن می‌تواند تجزیه کاربیدها باشد که این در توافق با کاهش سختی در دمای ۲۵۰°C است.

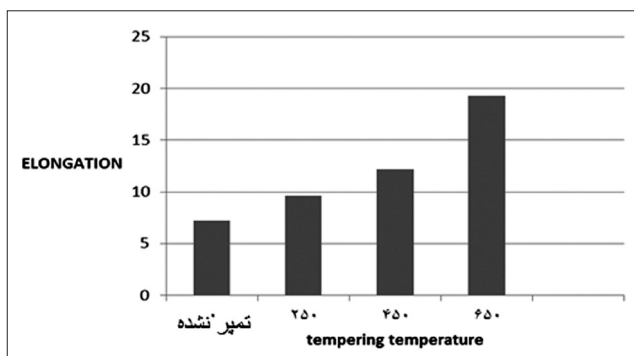
خواص کششی

شکل ۷ منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمون کشش را برای دماهای مختلف بازپخت در مقایسه با نمونه بازپخت نشده نشان می‌دهد. رفتار تسلیم پیوسته در تمامی دماها مشاهده می‌گردد. در فولادهای دو فازی با بیش از ۱۵٪ تا ۲۰٪ حجمی فریت، رفتار تسلیم پیوسته گزارش گردیده است. دلیل تسلیم پیوسته را می‌توان پیرکرنشی فاز فریت ذکر کرد که در نتیجه اختلاف قابلیت انحلال اتم‌های درون شبکه در دمای بین بحرانی و دمای آستمپرینگ محدود می‌گردد (Zare & Ekrami, 2011). علاوه بر آن، تسلیم پیوسته در فولادهای سه فازی از طریق نابجایی‌های موجود در فصل مشترک فریت-مارتنزیت و مرزهای فرعی درون فازی فریت و بینایت در مرحله اولیه تغییر شکل پلاستیک قابل توجیه است (Zare & Ekrami, 2011). البته در حالاتی نیز پیرکرنشی فاز فریت، در نتیجه اختلاف حلالیت فاز بین نشین در دمای تابکاری بین بحرانی و دمای دگرگونی بینایت می‌تواند سبب رفتار تسلیم نابپیوسته شود (Bakhtiari & Ekrami, 2009). زارع و همکارانش برای فولادهای دو فازی فریت و مارتنزیت با کسر حجمی مارتنزیت ۳۱ درصد بیان کردند که حتی پس از عملیات بازپخت، تسلیم پیوسته مشاهده شده است (Zare & Ekrami, 2011). علاوه بر این، شکل ۷ نشان می‌دهد که مدول الاستیک تا دمای بازپخت ۴۵۰°C مستقل از ریز ساختار می‌باشد (Zare & Ekrami, 2011).

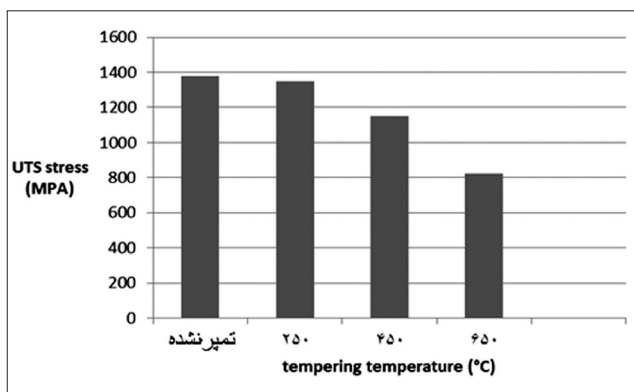
شکل ۸، مقایسه از دمای طول نمونه‌های بازپخت شده در دماهای مختلف و بازپخت نشده را نشان می‌دهد. باتوجه به این شکل، با انجام عملیات بازپخت و افزایش دمای بازپخت تا دمای ۶۵۰°C، مقدار ازدیاد طول به طور پیوسته افزایش می‌یابد که این در توافق با تاثیر بازپخت و کاهش مقادیر فاز سخت مارتنزیت می‌باشد. شکل ۹ مربوط به استحکام کشش نهایی می‌باشد که استحکام کشش نهایی با افزایش دمای بازپخت پیوسته کاهش می‌یابد. دلیل کاهش پیوسته استحکام کشش نهایی و دلیل افزایش پیوسته ازدیاد طول، ریز ساختار ایجاد شده در اثر عملیات بازپخت می‌باشد. زیرا در اثر عملیات بازپخت کاهش تترانوالیته مارتنزیت اتفاق می‌افتد و جوانه زنی کاربید در دو فاز سخت مارتنزیت و بینایت رخ می‌دهد. آقای یان و همکارش و نیز آقای بات و همکارانش گزارش دادند که در فولادهای Cr, Mo, V با درشت شدن کاربیدهای ثانویه استحکام کاهش می‌یابد و نیز گزارش دادند که در دمای ۷۰۰°C، چگالی نابجاییها کاهش می‌یابد که با کاهش چگالی نابجاییها استحکام کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند دلیل کاهش استحکام و افزایش ازدیاد طول در دمای ۶۵۰°C باشد (Yan et al., 2008, Bhat et al., 2012).



شکل ۷- منحنی تنش-کرنش مهندسی برای نمونه‌های بازپخت شده در دماهای (ب) ۲۵۰، (ج) ۴۵۰ و (د) ۶۵۰°C در مقایسه با (الف) نمونه بدون بازپخت.



شکل ۸- تغییرات درصد ازدیاد طول در دماهای مختلف بازپخت در مقایسه با نمونه بازپخت نشده.



شکل ۹- تغییرات استحکام کشش نهایی در دماهای مختلف بازپخت در مقایسه با نمونه بازپخت نشده.

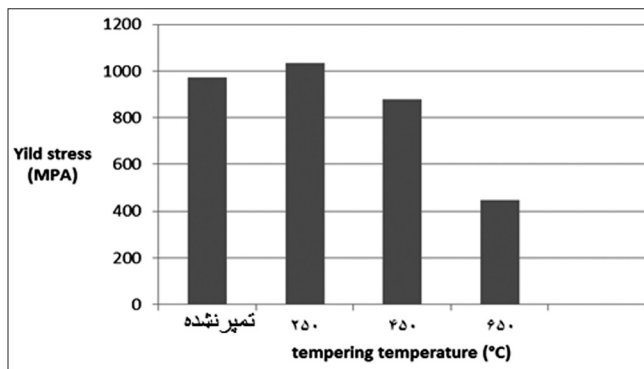
با توجه به شکل ۱۰ که تغییرات استحکام تسلیم را نشان می‌دهد، می‌توان دید که در دمای بازپخت ۲۵۰°C، استحکام تسلیم افزایش یافته است. علت این افزایش را می‌توان به تغییر کسر حجمی فریت و نیز آرایش مجدد نابجایی‌ها در فریت در طول بازپخت مربوط کرد (Anazadeh Sayed & Kheirandish, 2012, Bakhtiari & Ekrami, 2009). علت دیگر می‌تواند کربن مازاد در مارتنزیت باشد که به صورت کاربیدهای ریز، از ساختار

فرتی-مارتنزیتی، گزارش شده است که در دمای بازپخت بالاتر از ۲۰۰°C، استحکام تسلیم و استحکام کششی با افزایش دمای بازپخت کاهش می‌یابد (Zare & Ekrami, 2011). در این تحقیق نیز در دماهای بازپخت بالاتر از ۲۵۰°C، استحکام تسلیم و استحکام کششی روند کاهشی داشته‌اند. در این حالت کاهش مقادیر فاز سخت مارتنزیت بر تشکیل کاربیدهای جدید غلبه داشته و استحکام را در مجموع کاهش داده است.

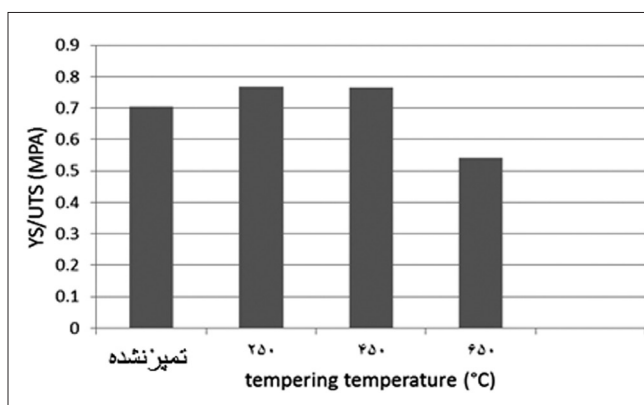
مقایسه اختلاف بین استحکام تسلیم و استحکام کشش نهایی (YS-UTS) و نسبت استحکام تسلیم به استحکام کشش نهایی (YS/UTS) برای نمونه بازپخت نشده و دماهای مختلف بازپخت به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. این دو پارامتر را می‌توان به عنوان معیاری برای بیان کرنش سختی به کار برد (Zare) (Bakhtiari & Ekrami, 2009) (Akbarpour & Ekrami, 2008) (Zare, 2008) (Ekrami, 2008) البته لازم به ذکر است که این دو پارامتر به صورت تجربی بوده و لزوماً رفتار دقیق را نشان نمی‌دهند. همان طور که در شکل ۱۱ می‌توان دید، نسبت استحکام تا دمای بازپخت ۲۵۰°C افزایش یافته است. هر چقدر نسبت استحکام به مقدار یک نزدیک تر شود، نمونه رفتار تردتری را نشان می‌دهد و هرچقدر این نسبت کمتر شود به معنای رفتار نرم تر مواد می‌باشد. مطابق شکل ۱۲، اختلاف استحکام کششی و استحکام تسلیم تا دمای ۴۵۰°C کاهش یافته و در دمای ۶۵۰°C مجدداً افزایش یافته است. این کاهش بر خلاف رفتار بازپخت می‌باشد که این موضوع را می‌توان به پدیده پیر کرنشی دینامیکی نسبت داد. در دمای ۴۵۰°C مقدار YS/UTS تقریباً ثابت و نیز مقدار اختلاف استحکامی کاهش یافته است که با توجه به تشکیل ذرات کربید در بین صفحات مارتنزیت این تغییرات در دمای ۴۵۰°C قابل توضیح است (HoneyCombe & Bhadeshia, 2006). در دمای بازپخت ۶۵۰°C، هر دو پارامتر نسبت و اختلاف استحکام رفتار نرم تری را در مقایسه با دیگر دماهای بازپخت نشان می‌دهند. علت این امر را می‌توان به تشکیل جوانه‌های کاربید از طریق خروج کربن از ساختار مارتنزیت و کاهش تراکونالیته آن و افزایش رشد کاربیدها در اثر دمای بالای بازپخت نسبت داد. البته این افزایش تاثیر کمتری را نسبت به کاهش مقدار مارتنزیت داشته است.

شکست نگاری نمونه‌های کششی

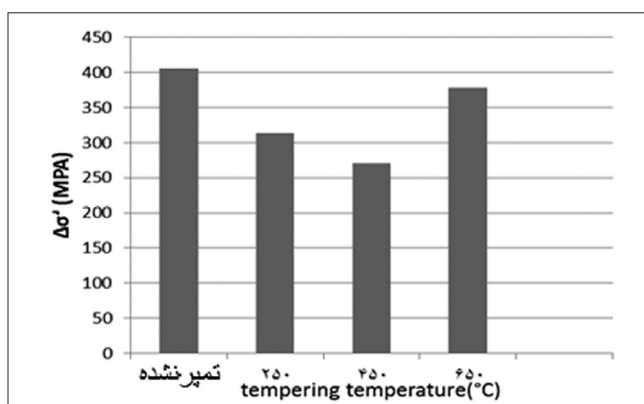
تصاویر میکروسکپ استریو از سطوح شکست نمونه‌های کششی در دماهای مختلف بازپخت و بازپخت نشده در شکل ۱۳ نشان داده است. تصاویر SEM از سطوح شکست گفته شده نیز در شکل ۱۴ قابل مشاهده می‌باشد. در شکل ۱۳-الف (نمونه بازپخت



شکل ۱۰- تغییرات استحکام تسلیم در دماهای مختلف بازپخت در مقایسه با نمونه بازپخت نشده.

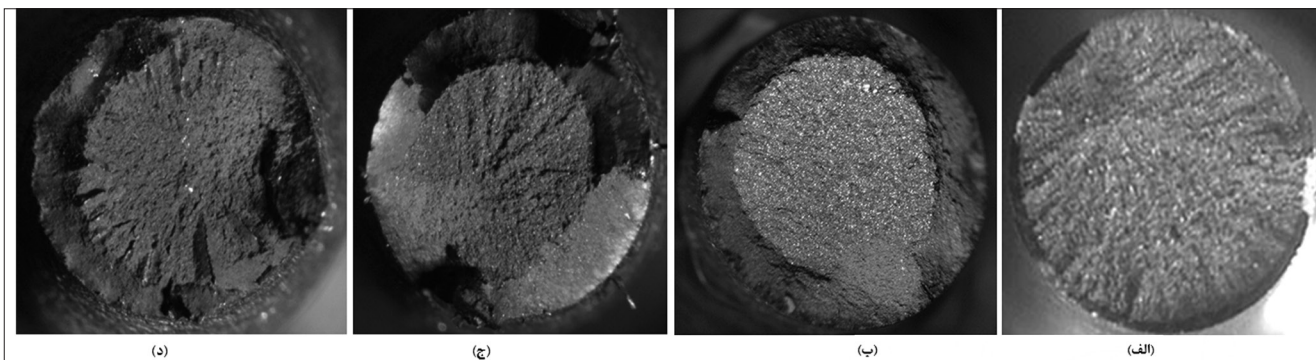


شکل ۱۱- نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی در دماهای مختلف بازپخت در مقایسه با نمونه بازپخت نشده.



شکل ۱۲- اختلاف استحکام کششی و استحکام تسلیم در دماهای مختلف بازپخت در مقایسه با نمونه بازپخت نشده.

مارتنزیت خارج می‌گردد. کاربیدهای تشکیل شده می‌توانند علت افزایش استحکام باشند (Anazadeh Sayed & Kheirandish, 2012). با تشکیل ذرات کاربید به صورت ریز دانه و یکنواخت در بینایت پایین، تنش‌های بالاتری برای عبور نابجایی‌ها از محل کاربیدها مورد نیاز خواهد بود. در نتیجه اگر ذرات کاربید به صورت یکنواخت و ریز دانه توزیع شوند، استحکام بالاتری بدست خواهد آمد (Bakhtiari & Ekrami, 2009). در تحقیق دیگری برای فولاد دو فازی



شکل ۱۳- تصاویر میکروسکپ استریو از سطح شکست آزمون کشش برای نمونه‌های بازیخت شده در دماهای (ب) ۲۵۰، (ج) ۴۵۰ و (د) ۶۵۰°C در مقایسه با (الف) نمونه بدون بازیخت.

تصاویر میکروسکپ استریو از نمونه بازیخت شده در دمای ۶۵۰°C (شکل ۱۳-د) نشان می‌دهد که ضخامت و اندازه شیارهای شعاعی نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر شده است. تصویر SEM از این سطح شکست (شکل ۱۴-د) نیز نشان می‌دهد که اندازه و عمق دیمپل‌ها نسبت به تصاویر دیگر افزایش یافته است. در نتیجه می‌توان گفت که در دمای بازیخت ۶۵۰°C رفتار شکست نسبت به تمامی نمونه‌های دیگر نرم تر می‌باشد. البته در شکل ۱۴-د، ترک‌های ثانویه نیز مشاهده می‌گردند که می‌توانند در محل کاربیدهای ثانویه تشکیل شده باشند.

نتیجه گیری:

در این تحقیق، عملیات حرارتی مناسب جهت ایجاد ساختار سه فازی فریت-بینایت-مارتنزیت برای فولاد ۴۱۴۰ انجام گردید. در ادامه، ساختارهای سه فازی تحت عملیات بازیخت در دماهای مختلف قرار گرفتند. نتایج بررسی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی نشان داد که:

۱- تا دمای بازیخت ۴۵۰°C کاربیدهای تشکیل شده حین بازیخت تاثیر بسزایی بر ریزساختار نشان نداده اند ولی در دمای بازیخت ۶۵۰°C، این تاثیر مشخص بوده است.

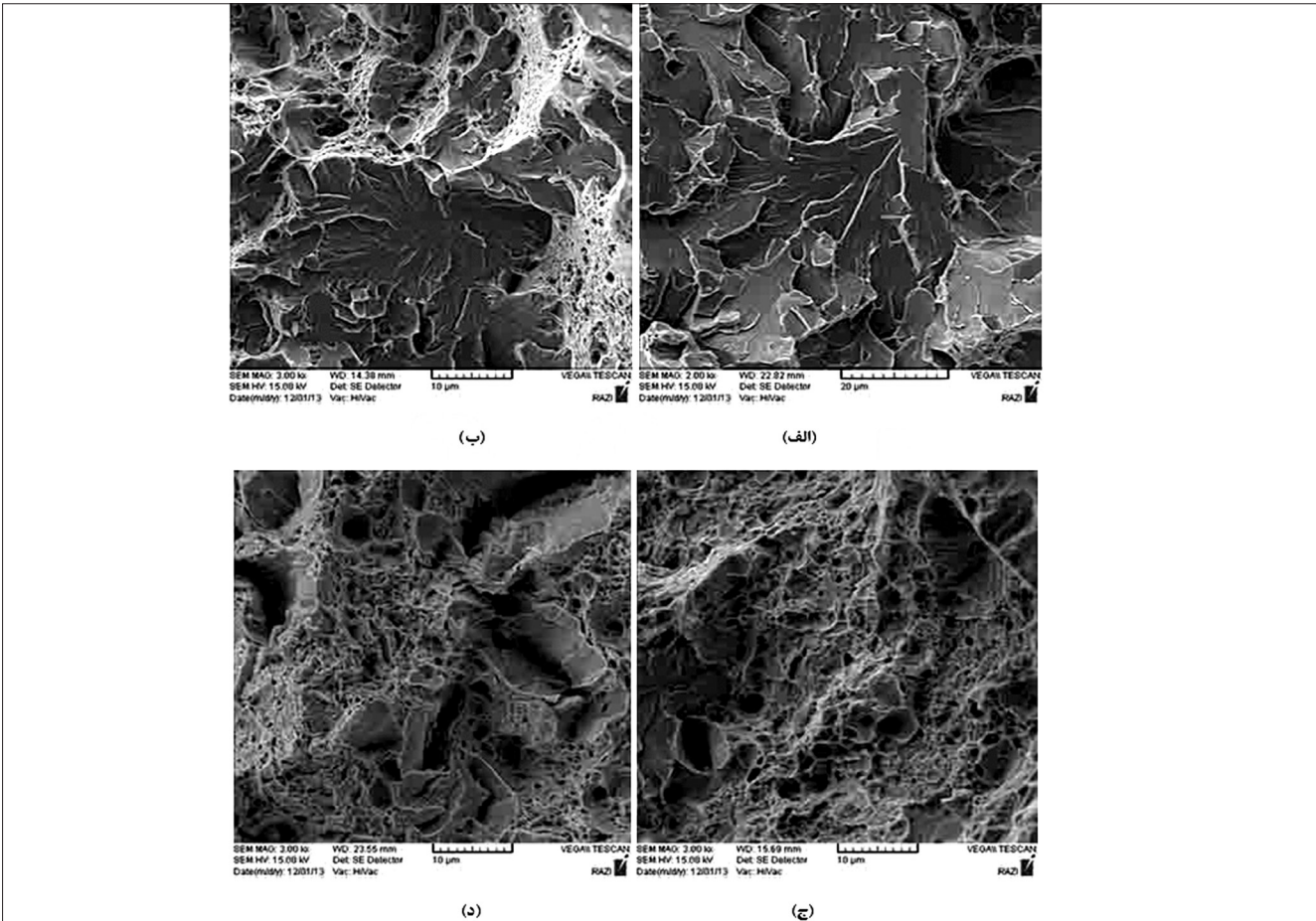
۲- در اثر افزایش دمای بازیخت، مقدار سختی بجز در دمای ۴۵۰°C کاهش یافته است.

۳- در منحنی تنش-کرنش مهندسی، در دماهای مختلف بازیخت، تسلیم پیوسته مشاهده گردید. با افزایش دمای بازیخت، مقادیر استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول بطور پیوسته و به ترتیب کاهش و افزایش یافتند. علاوه بر این، افزایش استحکام تسلیم در دمای ۲۵۰°C مشاهده شد و در ادامه با افزایش دمای بازیخت، این مقدار پیوسته کاهش یافت.

۴- سطوح شکست نمونه‌های آزمون کشش، رفتار نرم تری را

نشانده، سطح شکست بدون الگوی ستاره ای شکل، بدون لبه برشی و تقریباً صاف و بدون حفره می‌باشد که مشخصه سطح شکست از نوع ترد می‌باشد. در این شکل هیچ گونه لبه برشی دیده نمی‌شود که نشان دهنده این است که هیچ گونه باریک شدگی و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست رخ نداده است. با بررسی SEM از سطح شکست میانی نمونه کششی بازیخت نشده که در شکل ۱۴-الف نشان داده شده است، می‌توان دید که سطح شکست به صورت کلیواژ یا رخ برگی می‌باشد که نشانگر شکست ترد است (Zare & Ekrami, 2011).

در شکل ۱۳-ب (دمای بازیخت ۲۵۰°C)، می‌توان دید که سطح شکست در مقایسه با شکل ۱۳-الف، دارای مناطق لبه برشی می‌باشد که نشان دهنده رفتار نرم تر خواهد بود. دلیل ایجاد لبه برشی، گلویی شدن در نمونه آزمون کشش می‌باشد (Zare & Ekrami, 2011). در بررسی SEM از سطح شکست میانی نمونه کششی بازیخت شده که در شکل ۱۴-ب نشان داده شده است، حفرات کوچک و بزرگ غیر یکنواخت بصورت دیمپل‌هایی در سطح شکست مشاهده می‌گردند که بیانگر شکست نرم خواهند بود. در شکل ۱۳-ج (دمای بازیخت ۴۵۰°C)، در مقایسه با شکل‌های ۱۳-الف و ب، می‌توان الگوهای ستاره ای شکل را در سطح شکست مشاهده نمود. این الگوها شامل رشته‌های مرکزی با علائم شعاعی و مناطق لبه ای بیرونی می‌باشند. در مکانیزم شکست نرم ترکیب نابجاییها منجر به ایجاد مناطق رشته ای می‌شود و هرچقدر عمق و ضخامت علائم شعاعی زیاد تر باشد، میزان نرم بودن رفتار بیشتر خواهد بود (Bakhtiari & Ekrami, 2009). تصویر SEM از سطح شکست میانی نمونه کششی بازیخت شده در دمای ۴۵۰°C که در شکل ۱۴-ج نشان داده شده است، بیانگر افزایش تعداد و عمق دیمپل‌ها در سطح شکست در مقایسه با نمونه‌های بررسی شده قبل است. بدین ترتیب رفتار نرم تر در این دمای بازیخت قابل بیان است.



شکل ۱۴- تصاویر SEM از سطح شکست آزمون کشش برای نمونه‌های بازپخت شده در دماهای (ب) ۲۵۰، (ج) ۴۵۰ و (د) ۶۵۰°C در مقایسه با (الف) نمونه بدون بازپخت.

the mechanical properties of high strength dual-phase steels. *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol(538), 35– 41.

10-Lopez Ferreira, H. (1985). Martensite Tempering Embrittlement in a 4140 Steel. *Journal of Revista Latinoamericana de Metalurgiy Materiales*, Vol(5), 1-8.

11-London, B., Nelson, D.V., Shyned, J. C., Nelson, V. (1988). The Effect of Tempering Temperature on Near-Threshold Fatigue crack Behavior in Quenched and Tempered 4140 Steel. *Journal of Metallurgical and Materials Transactions*, Vol(19A), 1-6.

12-Olson, G.B., Azrin, M. (1992). Transformation behavior of TRIP steels. *Journal of metallurgical Transaction*, Vol(9A), 713-721.

13-Sakuma, Y., Matlock, D.K., Krauss, G. (1990). Mechanical behavior of an intercritically annealed and isothermally transformed low C alloy steel with ferrite-bainite-austenite microstructure. *Journal of Heat Treating*, Vol(8), 109-120.

14-Sakuma, Y., Itami, A., Kawano, O., Kimura, N., Hiwatashi, S. and Sakata, K. (1996). Next-generation high-strength sheet steel utilizing transformation-Induced plasticity (TRIP) effect. *Nippon steel Technical Report*, No(64), 20-25.

15-Yan, F., Shi, H., Fan, J., Xu, Z. (2008). An investigation of secondary Carbides in the spray-formed high alloyed Vanadis 4 steel during tempering. *Journal of Materials Characterization*, Vol(59), 883 – 889.

16-Zare, A., Ekrami, A. (2011). Influence of martensite volume fraction on tensile properties of triple phase ferrite-bainite-martensite steels. *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol(530), 440–445.

17-Zare, A., Ekrami, A. (2011). Effect of martensite volume fraction on work hardening behavior of triple phase (TP) steels. *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol(528), 4422–4426.

در دمای بازپخت ۶۵۰°C نشان داد که مطابق با نتایج دیگر خواص کششی می‌باشد.

منابع و مراجع

1-Akbarpour, M., Ekrami, A. (2008). Effect of ferrite volume fraction on work hardening behavior of high bainite dual phase (DP) steels. *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol(477), 306–310.

2-Anazadeh Sayed, A., Kheirandish, Sh. (2012). Effect of the tempering temperature on the microstructure and mechanical properties of dual phase steels. *Materials Science and Engineering*, Vol(532), 21– 25.

3-ATLAS SPECIALTY METALS, (2005). *The Atlas Specialty Metals Technical Handbook of Bar Products*. Atlas Specialty Metals.

4-Baik, S.C., Kim, S., Jin, Y.S., Kwon, O. (2001). Effect of alloying elements on mechanical properties and phase transformation of Cold rolled TRIP steel sheets. *ISIJ International*, Vol(41), No. 3, 290-297.

5-Bakhtiari, R., Ekrami, A. (2009). The effect of bainite morphology on the mechanical properties of a high bainite dual phase (HBDP) steel. *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol(525), 159–165.

6-Bhat, M. S., Garrison, W. M., Zackay, V. F. (2012). Relations between Microstructure and Mechanical Properties in Secondary Hardening Steels. *Journal of Materials Science and Engineering*, vol(41), 1- 15.

7-Davut, K., Hakan GÜR, C. (2006). Characterisation of Quenched and Tempered Steels by Magnetic Barkhausen Noise Method. Poster 108.

8-Honeycombe R.W.K., Bhadeshia H.K.D.H. (2006). *Steels Microstructure and Properties*. Third edition: London, 183-215.

9-Kampa, A., Celottob, S., Hanlon, D.N. (2012). Effects of tempering on