

مقایسه ریزساختار و رفتار مکانیکی فولاد Mo40 در شرایط دو فازی فریتی-مارتنزیتی و

کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده

محسن کاشفی^{۱*}، سید صادق قاسمی بنادکوکي^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۳، ش.ص: ۷۷-۸۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۰)

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی رفتار خستگی فولاد Mo40 با ریزساختارهای دو فازی فریتی-مارتنزیتی و کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده است. بدین منظور ابتدا نمونه‌هایی از این فولاد تحت عملیات حرارتی نرماله در دمای 860°C به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفتند و در هوا خنک شدند. سپس نمونه‌های دو فازی توسط عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی در دمای 740°C به مدت ۴۰ دقیقه تهیه شدند. برای مقایسه نمونه‌های کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده بعد از حرارت دادن در دمای 860°C و کوئنچ در آب در دمای 600°C به مدت ۳۰ دقیقه تحت عملیات حرارتی بازگشت قرار گرفتند. آزمون‌های مکانیکی به همراه بررسی‌های متالوگرافی نوری و الکترونی نمونه‌ها انجام گردید. نتایج سختی نشان می‌دهد که سختی نمونه دوفازی از سختی نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده بیش تر است. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد، استحکام کششی نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده بیش از نمونه دوفازی است، درحالی‌که استحکام خستگی نمونه دوفازی از نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده بیش تر است. این نتایج ناشی از استحکام دهی فاز سخت مارتنزیت بازگشت داده نشده در نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی در مقایسه با نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده با مارتنزیت بازگشت داده شده است.

واژه‌های کلیدی: فولاد Mo40، فریت، مارتنزیت، کارسختی، استحکام خستگی.

^۱ - دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

^۲ - دانشیار دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

*- نویسنده مسئول مقاله: Mohsen_kashefi67@yahoo.com

بیشگفتار

بهبود خواص مکانیکی فولادها از طریق عملیات حرارتی امکان پذیر است. فولادهای دو فازی، یکی از پرمصرفترین آلیاژهای مهندسی در صنایع خودروسازی، خصوصاً بدنه و شاسی خودرو می‌باشند که از طریق پروسه‌های عملیات حرارتی مختلف تولید می‌شوند. یکی از روش‌های ایجاد ریزساختارهای دو فازی فریتی-مارتنزیتی روش آنیل میان بحرانی در ناحیه دوفازی $(\gamma+\alpha)$ بین دماهای AC_1 و AC_3 است که عمدتاً برای فولادهای کم آلیاژ و کم کربنی استفاده می‌شود [۱ و ۲]. فولادهای دو فازی دارای مجموعه مناسبی از استحکام کششی و فرم پذیری بوده که این مجموعه خواص مکانیکی، سبب کاهش وزن خودرو و متعاقباً کاهش مصرف سوخت می‌شود. علاوه بر استحکام و فرم پذیری بالا، پتانسیل کارسختی عالی، جوش پذیری و مقاومت به ضربه بالا سبب شده است که از این فولادها علاوه بر صنایع خودروسازی در خطوط انتقال نفت و گاز، مخازن تحت فشار، دکل‌های فشار قوی، سازه‌های فلزی پیشرفته استفاده شود [۳-۵]. یکی از خواص مهندسی فولادهای دو فازی مقاومت به خستگی آن‌ها است. در فولادهای دو فازی همانند دیگر آلیاژهای مهندسی شکست نهایی ناشی از تنش‌های سیکلی در اثر جوانه‌زنی و رشد ترک اتفاق می‌افتد. اخیراً مطالعاتی در مورد ارتباط بین رفتار خستگی با جوانه‌زنی و رشد ترک به همراه مورفولوژی‌های متفاوت فازهای فریت و مارتنزیت در فولادهای دوفازی انجام شده است. تایانک و همکاران [۶] اثر تغییرات درصد کربن را بر رفتار خستگی فولادهای دو فازی فریتی-مارتنزیتی بررسی و نشان دادند که با افزایش مقدار کربن استحکام خستگی افزایش می‌یابد. اوکایاسو و همکارانش [۷] اثر اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید را با استفاده از فرآیند فشار در کانال‌های هم مقطع زاویه-دار $ECAP^1$ بر رفتار خستگی فولادهای دو فازی فریتی-مارتنزیتی بررسی نمودند. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که انجام این فرآیند، سبب کاهش اندازه فازهای فریت و مارتنزیت شده و باعث بهبود مقاومت به خستگی ریزساختارهای دو فازی فریتی-مارتنزیتی در مقایسه با فریتی-پرلیتی شده است. مولایی و اکرامی [۸] با مقایسه رفتار خستگی دو دسته از نمونه‌های دو فازی فریتی-

مارتنزیتی با کسرهای حجمی مارتنزیت یکسان اما به ترتیب با مورفولوژی‌های مارتنزیت شبکه‌ای و مارتنزیت فیبری نشان دادند که نمونه‌های دو فازی با مورفولوژی مارتنزیت فیبری استحکام خستگی بالاتری نسبت به نمونه‌های دو فازی با مورفولوژی مارتنزیت شبکه‌ای دارند. بنابر نتایج به‌دست آمده از تحقیقات محققین بر رفتار خستگی فولادهای دو فازی شکست نهایی در این فولادها ناشی از تنش‌های سیکلی در اثر جوانه زنی و رشد ترک در فاز سخت مارتنزیت است. مقایسه انجام شده بین ریزساختارهای فریتی-مارتنزیتی و فریتی-پرلیتی در ارتباط با سرعت رشد ترک خستگی در یک فولاد کم آلیاژ استحکام بالا نشان داد که سرعت رشد ترک خستگی در نمونه‌های دو فازی فریتی-مارتنزیتی در مقایسه با نمونه‌های فریتی-پرلیتی، به دلیل مقاومت بیشتر فاز مارتنزیت در برابر شیوع و رشد ترک، کم‌تر است [۹]. ادریس و همکارانش [۱۰] سرعت رشد ترک در ریزساختار دو فازی فریتی-مارتنزیتی با کسرهای حجمی مختلفی از فریت و نمونه کاملاً مارتنزیتی مطالعه و دریافتند که سرعت رشد ترک در فولادهای دوفازی شامل ۳۵٪ مارتنزیت در مقایسه با ریزساختارهای دوفازی حاوی کسر حجمی مارتنزیت بیشتر تر و نمونه کاملاً مارتنزیتی کندتر است. این مباحث پراکنده در مورد رفتار خستگی فولادهای دو فازی فریتی-مارتنزیتی وجود دارد؛ اما در حالت کلی می‌توان پارامترهای موثر بر استحکام خستگی فولادهای دوفازی را شامل کسر حجمی، میزان برهم کنش، مورفولوژی فریت، مارتنزیت و میزان کربن فولاد در نظر گرفت. تحقیقات متعددی بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا را با ریزساختارهای دوفازی فریتی-مارتنزیتی و یا دوفازی فریتی-بینیتی در رابطه با رفتار خستگی این فولادها بررسی نموده‌اند؛ اما در این پژوهش سعی بر آن شده تا اثر تغییر ریزساختار فولاد Mo40 در حالت دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP740 را علاوه بر خواص مکانیکی و فیزیکی بر رفتار خستگی نیز بررسی و با ریزساختار کاملاً مارتنزیتی بازگشت داده شده QT مقایسه شود.

مواد و روش‌ها

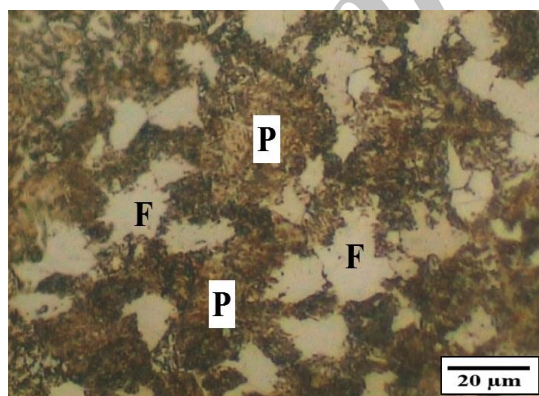
فولاد مورد استفاده در این پژوهش از نوع HSLA (کم آلیاژ استحکام بالا) Mo40 با ترکیب شیمیایی کربن

¹ -equal channel angular pressing

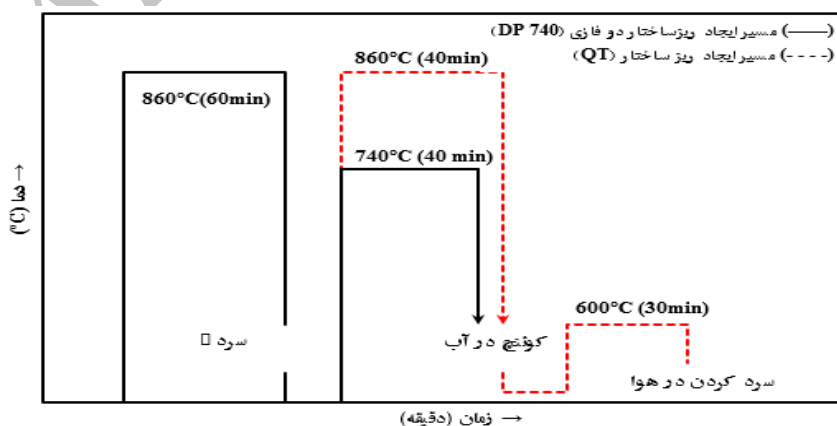
شده QT پس از آستنیت‌شدن در دمای 860°C به مدت ۴۰ دقیقه و کوئنچ در آب، در دمای 600°C به مدت ۳۰ دقیقه تحت عملیات حرارتی بازگشت قرار گرفتند. شماتیک عملیات حرارتی جهت دستیابی به ریزساختارهای دو فازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 و کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT در شکل ۲ ارائه شده است. نمونه‌های متالوگرافی به روش متداول پولیش کاری و سپس با استفاده از محلول نایتال ۲٪ اچ شدند. بررسی ریزساختارها با استفاده از میکروسکوپ‌های نوری مدل Olympus PMG3 و الکترونی روبشی گسیل میدانی FE-SEM انجام شد. اطلاعات کششی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آزمون کشش مدل SANTAM STM150 و سختی سنجی به روش ویکرز تحت بار 30kg انجام و به ترتیب متوسط اطلاعات سه نمونه کششی و سختی سنجی گزارش شد. آزمون خستگی توسط دستگاه مدل Hi Tech با مشخصات فرکانس 97HZ و 5800rpm انجام شد.

(۰,۴۶)، سیلیسیم (۰,۳۴)، منگنز (۱,۰۳)، گوگرد (۰,۰۰۴۹)، فسفر (۰,۰۱۵۵)، کروم (۱,۰۴)، مولیبدن (۰,۱۶۳) و آهن (۹۶,۹۳) درصد وزنی استفاده شد. به منظور نرماله کردن ریزساختار فولاد دریافتی، ابتدا نمونه‌ها در دمای 860°C به مدت یک ساعت آستنیت‌شده و سپس در هوا تا دمای محیط سرد شدند. مثالی از تصویر میکروسکوپی نوری نمونه نرماله شده در شکل ۱ ارائه شده که حاوی فاز روشن فریت F و کلنی‌های قهوه‌ای رنگ پرلیت P است.

برای ایجاد ریزساختار دو فازی فریتی-مارتنزیتی DP 740، نمونه‌ها در دمای میان بحرانی 740°C به مدت ۴۰ دقیقه حرارت داده شده و سپس در آب کوئنچ شدند تا آستنیت شبه پایدار ایجاد شده طی آنیل میان بحرانی در ناحیه دوفازی $(\gamma+\alpha)$ به مارتنزیت تبدیل شود. همچنین به منظور مقایسه، نمونه‌های کوئنچ مستقیم بازگشت داده



شکل ۱- ریزساختار نمونه‌ی نرماله شده حاوی فریت F و پرلیت P



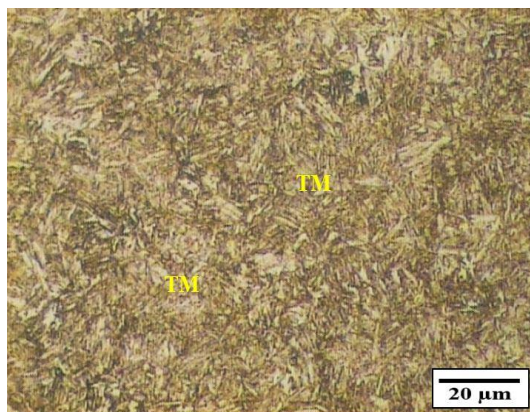
شکل ۲- مسیر عملیات حرارتی‌های مورد استفاده جهت دستیابی به ریزساختار دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 و کوئنچ بازگشت داده شده QT

نتایج و بحث

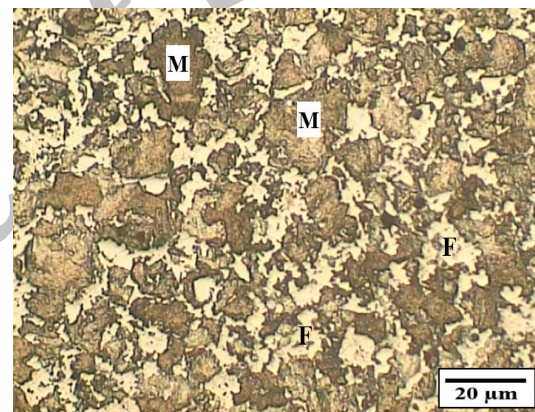
بررسی‌های نوری و الکترونی ریزساختارها

به منظور مقایسه، تصاویر میکروسکوپی نوری و الکترونی نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 و ریزساختار کوئنچ مستقیم و بازگشت داده شده QT در شکل ۳ نشان داده شده است. ریزساختار نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 حاوی فاز پیوسته و نرم فریت (مناطق روشن) و ۷۰٪ مارتنزیت (نواحی قهوه‌ای رنگ) است که به ترتیب با حروف F و M مشخص شده در شکل ۳(الف) ارائه شده است. شکل ۳(ب) نشان دهنده ریزساختار نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT حاوی مارتنزیت بازگشت داده شده به صورت بسته‌هایی با لایه‌های موازی و منظم با جهت گیری‌های منحصر به فرد و متفاوت در پاکت‌های مارتنزیت بازگشت داده شده

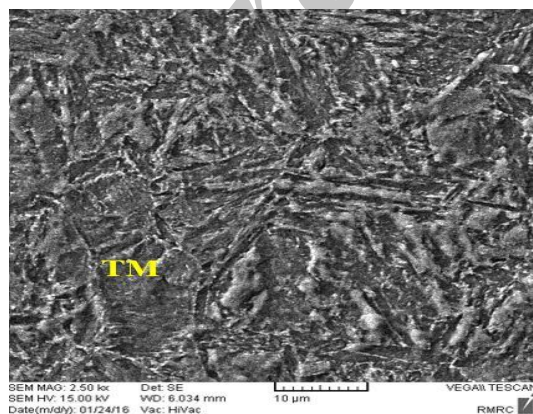
هستند. به منظور بررسی دقیق‌تر تصاویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی FE-SEM از ریزساختار نمونه دوفازی DP 740 آنیل میان بحرانی شده و نمونه کوئنچ مستقیم و بازگشت داده شده QT در شکل ۳ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، ریزساختار نمونه دوفازی DP 740 آنیل میان بحرانی شده در دمای 740°C (شکل ۳(ج)) حاوی فاز فریت (F) با مورفولوژی پیوسته همراه با مقادیر کمی ذرات کاربید حل نشده (F+C) و جزایر مارتنزیتی (M) است. ذرات کاربیدی حل نشده (مناطق F+C) در فاز فریت ناشی از عدم زمان و دمای کافی برای نفوذ بیش‌تر اتم‌های کربن در آستنیت شبه پایدار اولیه در طی آنیل میان بحرانی در ناحیه دوفازی $\alpha+\gamma$ است. از طرفی حرارت دادن و قرارگیری در دمای بالاتر از A_{c1} نزدیک به دمای تشکیل کاربیدهای کروی سبب تشکیل ذرات کاربیدی حل نشده طی عملیات آنیل میان بحرانی می‌شود [11].



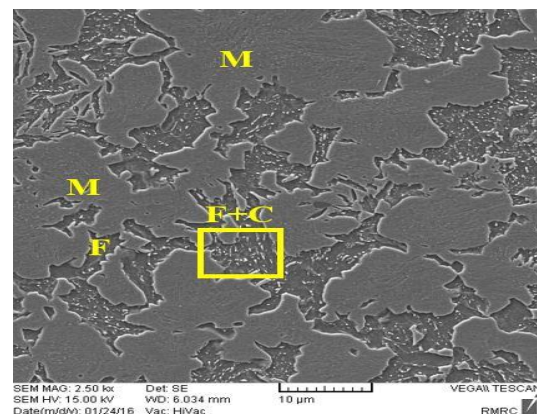
(ب)



(ف)



(د)



(ج)

شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختارهای: (الف) نمونه‌ی دو فازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 حاوی فریت (مناطق روشن) و مارتنزیت (مناطق تیره) و (ب) نمونه‌ی کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ریزساختارهای: (ج) نمونه‌ی دو فازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 و (د) نمونه‌ی کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT. فازهای فریت، مارتنزیت و مارتنزیت بازگشتی به ترتیب با حروف F، M و TM نشان داده شده است

نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT به دلیل کاهش میزان کربن مارتنزیت و همچنین انجام عملیات بازگشت که باعث افزایش چقرمگی و داکتیلیته فاز سخت مارتنزیت می‌شود و نهایتاً سختی را کاهش می‌دهد.

رفتار کششی نمونه‌های دوفازی

نتایج آزمون کششی نمونه‌های عملیات حرارتی شده در شرایط مختلف دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 و کوئنچ مستقیم و بازگشت داده شده QT در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق با جدول ۱ مشاهده می‌شود که استحکام تسلیم و کششی نهایی در نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 به ترتیب برابر با ۷۷۳ و ۸۹۳ MPa در حالیکه استحکام تسلیم و کششی نهایی در نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT برابر با ۸۹۱ و ۹۶۳ MPa است. ملاحظه می‌شود که میزان استحکام تسلیم و کششی نهایی در نمونه‌ی کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT بالاتر از نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 است.

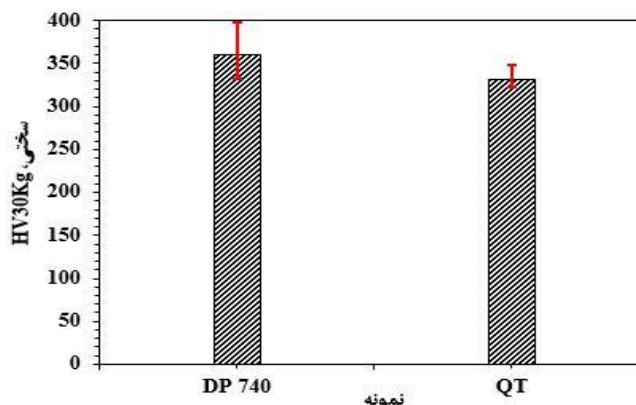
شکل ۵ نمودارهای آزمون کشش نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 و کوئنچ مستقیم و بازگشت داده شده QT را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که پدیده تسلیم در نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 به صورت پیوسته و در نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT به صورت غیر پیوسته همراه با تسلیم بالایی و پایینی رخ داده است. در همین ارتباط اصلی‌ترین عامل در تسلیم شدن پیوسته در فولادهای دوفازی فریتی-مارتنزیتی چگالی بالای نابجایی‌های متحرک و مارتنزیت است. از دلایل دیگر عدم وجود نقطه تسلیم در ریزساختارهای دوفازی فریتی-مارتنزیتی که موجب غیر یکنواختی در پدیده تسلیم می‌شود می‌توان به نبود باندهای لودرز اشاره نمود [۱۳]. در کنار این عامل، چگالی بالای نابجایی‌های متحرک، تکثیر آرام نابجایی‌ها در حین تغییر شکل پلاستیکی و سرعت کم حرکت نابجایی‌ها در اثر تنش‌های وارده عوامل تاثیر گذار دیگر می‌باشند؛ اما پدیده تسلیم غیر پیوسته در نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT ناشی از تشکیل رسوبات کاربیدی است که موجب قفل شدن نابجایی‌ها می‌شود است [۱۴].

ذرات کاربیدی حل نشده در نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 با توجه به نزدیک بودن به دمای کروی سازی و همچنین عدم زمان و دمای کافی طی دگرگونی پرلیت به آستنیت حین آنیل میان بحرانی به صورت حل نشده باقی مانده است. شکل ۳ (د) نشان دهنده ریزساختار الکترونی از نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT حاوی مارتنزیت بازگشت داده شده است. ملاحظه می‌شود که فاز مارتنزیت بازگشت داده شده به صورت پاکت‌های منحصر به فرد از آستنیت شبه پایدار اولیه در طی دگرگونی مارتنزیتی به وجود آمده‌اند و هر پاکت مارتنزیتی حاوی بسته‌هایی با لایه‌های موازی و منظم با جهت گیری‌های متفاوت تشکیل شده‌اند.

خواص مکانیکی

سختی سنجی

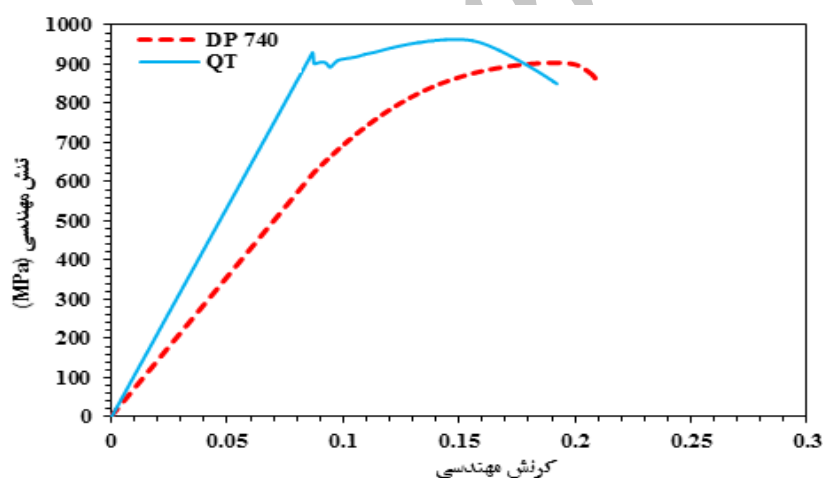
نتایج سختی سنجی در مقیاس ویکرز نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 آنیل میان بحرانی شده به مدت ۴۰ دقیقه در دمای ۷۴۰°C و نمونه کوئنچ و بازگشت داده شده در شکل ۴ و جدول ۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که سختی نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 بیش از نمونه کوئنچ مستقیم و بازگشت داده شده QT است. به گونه‌ای که سختی نمونه DP 740 برابر با ۳۵۹ و نمونه‌ی کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT برابر با HV30 ۳۳۱ است. بالا بودن سختی در نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 که دارای فاز نرم فریت است ناشی از حضور فاز سخت مارتنزیت بازگشت داده نشده است. در ارتباط با سختی بالای نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی می‌توان به کار سخت شدن فریت در اثر استحاله آستنیت به مارتنزیت در مجاور فاز فریت، افزایش کربن مارتنزیت در اثر تشکیل فریت و کاهش اندازه دانه‌های فریت و بسته‌های مارتنزیت اشاره نمود. استحاله آستنیت به مارتنزیت، سبب انبساط حجمی شدید به میزان ۰.۸٪ می‌شود که باعث افزایش چگالی نابجایی در نواحی فریت مجاور مارتنزیت و در نتیجه افزایش سختی فاز فریت می‌شود. از طرفی افزایش کسر حجمی مارتنزیت بازگشت داده نشده باعث افزایش سختی می‌شود [۱۲]. در مقابل سختی در



شکل ۴-مقایسه سختی نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 و کوئنچ مستقیم و بازگشت داده شده QT

جدول ۲-مقایسه سختی، خواص مکانیکی، مشخصات کارسختی و استحکام خستگی نمونه‌های DP 740 و QT

نمونه	سختی (HV30Kg)	استحکام M Pa		رفتار کارسختی			استحکام خستگی MPa	
		YS	UTS	n_1	n_2	K_1		K_2
DP 740	۳۵۹	۷۷۳	۸۹۳	۰,۵۱	۰,۲۶	۲۴۴۰	۱۴۵۷	۴۴۰
QT	۳۳۱	۸۹۱	۹۶۳	۰,۲۷	---	۱۸۹۰	---	۳۳۰

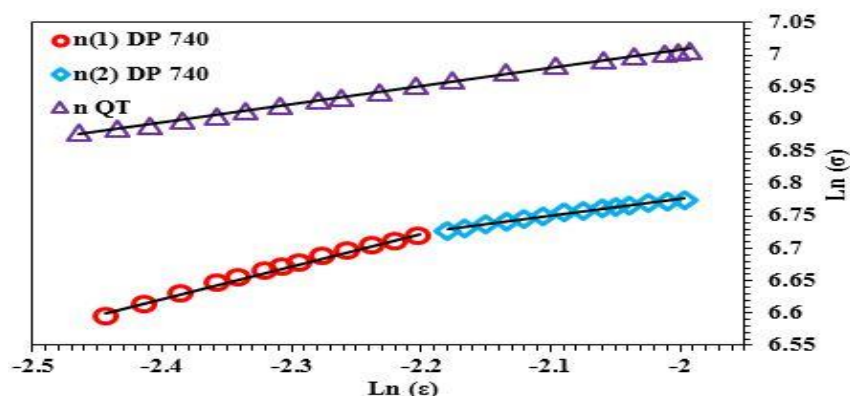


شکل ۵-نمودار کششی و مقایسه رفتار تسلیم نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP740 و کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT

بررسی آهنگ کار سختی

کار سختی در نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT به صورت خطی و یک مرحله‌ای است. تحقیقات مختلف در ارتباط با رفتار کارسختی در فولادهای دوفازی فریتی-مارتنزیتی به صورت غیر خطی است و مقدار ثابتی برای n و K موجود نیست. همچنین برخی محققین معتقدند که فولادهای دوفازی دارای رفتار کارسختی دو مرحله‌ای و حتی فولادهای سه فاز دارای رفتار کار سختی سه مرحله‌ای هستند.

آهنگ کار سختی که تغییرات $\log(\sigma)$ بر حسب $\log(\epsilon)$ است برای نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 و کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT در شکل ۶ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که آهنگ کار سختی در نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 به صورت غیر خطی و دو مرحله‌ای است در حالیکه آهنگ



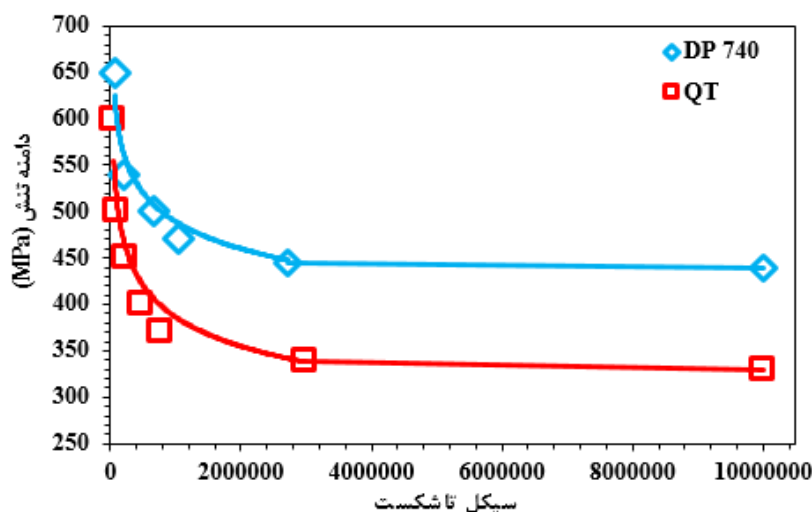
شکل ۶- نتایج آهنگ کارسختی دو مرحله‌ای نمونه‌ی دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 و نمونه‌ی کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT

رفتار خستگی

در شکل ۷ رفتار خستگی نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 آنیل میان بحرانی شده در دمای 740°C و نمونه کاملاً مارتنزیتی بازگشت داده شده QT با هم مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که برای هر دسته از نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 و کوئنچ بازگشت داده شده QT در تنش‌های سیکلی بالا تعداد سیکل‌های منجر به شکست کم است؛ اما با کاهش تنش-های سیکلی، تعداد سیکل‌های منجر به شکست افزایش یافته است، به گونه‌ای که حد خستگی در تعداد سیکل $N=10^7$ مشخص شده است. به عنوان مثال نمونه‌های خستگی دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 در تنش اعمالی 650MPa تعداد 75000 سیکل را تحمل می‌نمایند. درحالی‌که با کاهش تنش‌های سیکلی به استحکام خستگی 440MPa تعداد سیکل‌های منجر به شکست به شدت تا 10^7 سیکل افزایش یافته است.

بررسی شکل ۷ و جدول ۱ نشان می‌دهد که استحکام خستگی نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 برابر با 440MPa و استحکام خستگی نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT برابر با 330MPa است. مشاهده می‌شود که بر خلاف خواص کششی (جدول ۱) استحکام خستگی نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 بیش از نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT است. این نتایج نشان می‌دهد که رفتار خستگی نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 ناشی از حضور فاز مستحکم مارتنزیت بازگشت داده نشده است.

به بیان دیگر، فولادهای دوفازی دو مرحله تغییر شکل دارند به صورتی که در مرحله اول میزان تنش اعمالی از حد تسلیم فاز فریت بیش تر بوده ولی از مارتنزیت کم تر است که فاز فریت به صورت پلاستیک و مارتنزیت به صورت الاستیک تغییر شکل خواهند یافت. و در مرحله دوم هر دو فاز فریت و مارتنزیت به صورت پلاستیک تغییر شکل خواهند داشت [۱۴]. برای مقایسه دقیق تر مقادیر کارسختی (n) و ضرایب استحکام (k) مرحله اول ($k1$; $n1$) و مرحله دوم ($k2$; $n2$) برای نمونه‌های مورد پژوهش در جدول ۱ آمده است. نتایج نشان می‌دهد، در نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 با آهنگ کارسختی دو مرحله‌ای، توان کارسختی ($n1$) و ضریب استحکام مرحله اول بیش از توان کارسختی ($n2$) و ضریب استحکام ($k2$) مرحله دوم است. این پدیده به دلیل تفاوت در شروع تغییر شکل پلاستیک فازهای نرم فریت و سخت مارتنزیت است. در نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740، به صورتی که مرحله اول کارسختی مربوط به تغییر شکل فاز نرم (فریت) و مرحله دوم آن مربوط به تغییر شکل همزمان هر دو فاز فریت و مارتنزیت می‌باشد [۱۵]. رفتار کارسختی نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT به صورت خطی یک مرحله‌ای است و در مقایسه با نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 دارای توان کارسختی ($n1$) و ضریب استحکام ($k1$) مرحله اول کمتری است.



شکل ۷- نمودار S-N خستگی از نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 و کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT

مارتنزیت که مسیرهای مرجح برای رشد ترک خستگی هستند از بین رفته‌اند. این پدیده سبب می‌شود که مسیر انتخابی برای جوانه زنی و رشد ترک خستگی عمدتاً در داخل فاز سخت مارتنزیت باشد به عبارت دیگر، در نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 فاز فریت پیوستگی دارد و در نتیجه شیوع و رشد ترک در فاز نرم فریت به راحتی کند می‌شود، در حالیکه در نمونه‌های با کسر حجمی مارتنزیت بالا شیوع و رشد ترک در فاز سخت مارتنزیت است. فاز مارتنزیت یک فاز ترد و شکننده است و توزیع کرنش در ناحیه پلاستیک نوک ترک کم‌تر از فاز نرم فریت است. در نتیجه رشد ترک در شدت تنش‌های کمتری ادامه یافته که باعث کاهش استحکام خستگی در نمونه‌های با کسر حجمی بالای مارتنزیت می‌شود. این نکته آشکار است که در نمونه‌های کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT با فاز مارتنزیت بازگشت داده شده مسیرهای فصل مشترک مرجح فریت / فریت و فریت / مارتنزیت برای شیوع و رشد ترک کاهش یافته است. حال اگر ترک خستگی در فاز سخت مارتنزیت متوقف شود، به دلیل تجمع کرنش در اثر تنش‌های سیکلی و مقاومت بالای مارتنزیت در برابر شیوع و رشد ترک، ریز ترک‌هایی عمود بر ترک‌های اصلی خستگی ایجاد می‌شوند. با پیشرفت این ریز ترک‌ها و به هم پیوستن آن‌ها، ترک‌های بزرگ‌تر دیگری بوجود می‌آید که در نتیجه سرعت رشد ترک‌های خستگی بیش از پیش افزایش یافته و باعث کاهش استحکام خستگی می‌شود [۱۶]. از دیگر عوامل موثر بر شیوع و رشد ترک‌های خستگی می‌توان به میزان کرنش محلول در مارتنزیت اشاره

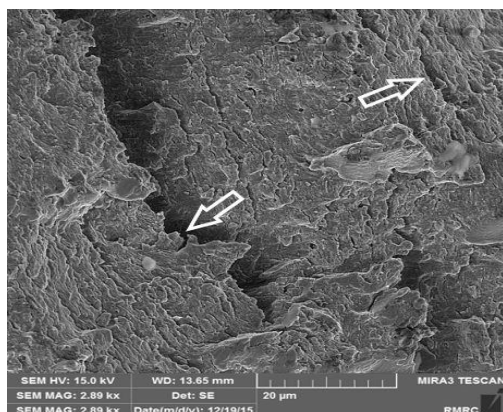
بررسی‌های میکروسکوپ نوری و الکترونی ریزساختارها نشان می‌دهد که در نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 فاز نرم فریت به صورت فاز پیوسته بوده و فاز سخت مارتنزیت نقش استحکام بخشی دارد. مضافاً فاز سخت مارتنزیت در ریزساختار دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 باعث کند شدن شیوع و رشد ترک از فصل مشترک فریت / فریت و فریت / مارتنزیت می‌گردد. لذا در ادامه و تا زمانی که ترک مسیر مجددی را به منظور رشد از فصل مشترک اولیه نیابد سرعت رشد کمتری دارد. این عامل سبب می‌شود که سرعت رشد ترک در اثر حضور مارتنزیت کاهش یافته و استحکام خستگی نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 بهبود می‌یابد. پدیده دیگری که باعث کند شدن شیوع و رشد ترک‌های خستگی در نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 شده است می‌تواند ناشی از کارسخت شدن فریت مجاور مارتنزیت در طی استحاله فازی آستنیت به مارتنزیت باشد. در اثر افزایش حجم ناشی از استحاله مارتنزیتی در فریت مجاور آستنیت، دانسیته نابجایی‌های متحرک در فریت افزایش یافته و باعث افزایش استحکام فریت و در نتیجه افزایش استحکام خستگی شود. کاهش استحکام خستگی در نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT ناشی از تغییر ریزساختار است. برخلاف نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 که فاز مارتنزیت به صورت جزیره‌ای توسط فاز نرم فریت احاطه شده است در نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT فاز سخت مارتنزیت بازگشت داده شده فاز پیوسته است (شکل ۳) که در نتیجه فصل مشترک فریت / فریت و فریت

سطح شکست نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 حاوی نواحی شکست ترد همراه با ریزترک‌های فوق العاده کوچک است (شکل ۸ الف). شکل‌های ۸ (ب) و (ج) سطح شکست خستگی نمونه کوئنچ و بازگشت داده شده QT که شامل نواحی گسترده‌ای از سطوح کلیواژی به همراه ترک‌های عمیق و ریزترک‌های خستگی است. بررسی رفتار شکست نمونه‌های خستگی نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی مارتنزیت میزان شکست ترد افزایش یافته است. نتایج بررسی استحکام خستگی و سطوح شکست نمونه‌ها در تطابق با یکدیگر هستند. نمونه DP 740 در مقایسه با نمونه QT دارای استحکام خستگی بالایی است. لذا همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سطح شکست خستگی نمونه DP 740 دارای ترک‌های به مراتب ریزتر نسبت به نمونه خستگی QT می‌باشد که همین موضوع در اثبات رفتار بهینه نمونه DP 740 است.

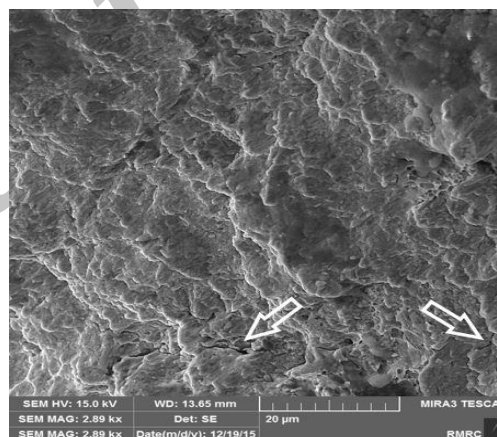
نمود که با افزایش کسر حجمی فریت افزایش می‌یابد. در نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 بدلیل افزایش کسر حجمی فریت فاز مارتنزیت دارای کربن بالاتری است. لذا افزایش کربن مارتنزیت در نمونه‌های دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 سبب افزایش خواص کششی فاز مارتنزیت و در نتیجه افزایش استحکام خستگی می‌شود. از طرفی مطابق با جدول ۱ توان کارسختی نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 برابر با ۰,۵۵ و نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT برابر با ۰,۲۷ است. توان کارسختی بالای نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 نسبت به نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT عامل تاثیر گذار مهم بر رفتار بهینه خستگی این نمونه است.

شکست نگاری نمونه‌های خستگی

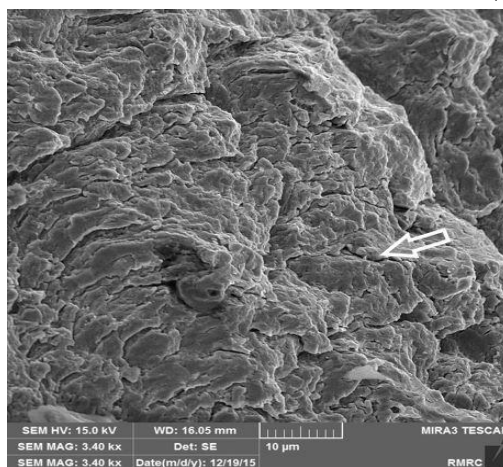
در شکل ۸ سطوح شکست نمونه‌های خستگی DP 740 و QT از ناحیه شکست نهایی نشان داده شده است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۸- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح شکست نهایی و جوانه زنی و رشد ترک خستگی در نمونه‌های: (الف) دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740، (ب) و (ج) کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده QT

نتیجه گیری

۱- ریزساختار نمونه‌های آنیل میان بحرانی شده به مدت ۴۰ دقیقه در دمای °C ۷۴۰ دوفازی فریتی-مارتنزیتی (DP 740) است. درحالیکه ریزساختار نمونه کوئنچ مستقیم و بازگشت داده شده (QT) حاوی فاز مارتنزیت بازگشت داده شده است.

۲- استحکام تسلیم و کششی نهایی نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی (DP 740) به ترتیب برابر با ۷۷۳ و ۸۹۳MPa که کم‌تر از استحکام تسلیم و کششی نهایی نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده (QT) (برابر با ۸۹۱ و ۹۶۳MPa) است. همچنین پدیده تسلیم در نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی به صورت پیوسته و در نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده به صورت غیر پیوسته و همراه با تسلیم بالا و پایین است.

۳- رفتار کارسختی در نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP740 به صورت غیر خطی و دو مرحله‌ای است درحالیکه رفتار کارسختی در نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده به صورت خطی و یک مرحله‌ای است. توان کارسختی و ضریب استحکام نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 مرحله اول و دوم نسبت به نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده بالاتر است.

۴- نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی (DP 740) با فاز پیوسته نرم فریت و جزایر سخت مارتنزیتی در مقایسه با نمونه کوئنچ مستقیم و بازگشت داده شده (QT) دارای استحکام خستگی بالاتری است. این پدیده به دلیل مقاومت بیش‌تر نمونه دوفازی فریتی-مارتنزیتی DP 740 در مقابل جوانه زنی و رشد ترک حین تنش‌های چرخه‌ای در مقایسه با نمونه کوئنچ مستقیم بازگشت داده شده است.

References:

1-Speich, G, R., "Fundamentals of dual phase steels", New York: AIME, (1981).

2-Rashid, M, S., "Formable HSLA and dual-phase steels", in proceedings of the metallurgical society of AIME, Michigan. M.S., USA, (1979).

3-Waterschoot, T, Vandeputte S, D., De, A and Cooman, B, "Static strain aging phenomena in cold-rolled dual-phase steels", Metallurgical and Materials Transactions, Vol.34, pp.781-791, (2003).

4-Garcia, C., hua, K., and deardo, A., "Metallurgy and continuous galvanizing line processing of high-strength dual-phase steel micro alloyed with niobium and vanadium", 8th international conference on zinc and zinc alloy coated steel sheet (galvatech 2011) genova, Italy, (2011).

5-Ghaheri, A., Shafyei, A and honarmand, M., "Effects of inter-critical temperatures on martensite morphology, volume fraction and mechanical properties of dual-phase

steels obtained from direct and continuous annealing cycles", Materials and design, Vol. 62, pp.305-319, (2014).

6-Tayanc, M., Aytac, A and Bayram, A., "The effect of carbon content on fatigue strength of dual-phase steels", materials and design, Vol. 28, pp1827-1835, (2007).

7-Okayasu. M., Sato, k., Mizuno, M., Hwang, D.Y and Shin, D.H., "Fatigue properties of ultra-fine grained dual phase ferrite/martensite low carbon steel", International journal of fatigue, Vol. 30 pp.1358-1365, (2008).

8-Molaeia, M, J., Ekrami, A., "the effect of dynamic strain aging on fatigue properties of dual phase steels with different martensite morphology", materials science and engineering Vol. 527, pp.235-238, (2009).

9-Shengci, l., yonglin, k and shuang k., "Effects of microstructure on fatigue crack growth behavior in cold-rolled dual phase

steels", Materials science & engineering, Vol. 612, pp. 153–161, (2014).

10-Roslinda, I., Yunan, P., "influence of ferrite fraction within martensite matrix on fatigue crack propagation: an experimental verification with dual phase steel". Materials science and engineering, Vol. 552, pp547– 554, (2012).

11- Cheng Ji, Lei Wang, Miao-Yong Zhu, "Effect of Subcritical Annealing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Scm435 Steel", Journal of Iron and Steel Research, International. 2015, 22(11): 1031-1036.

12-Fereiduni E., ghasemi banadkouki S, S., "Improvement of mechanical properties in a dual-phase ferrite–martensite AISI 4140 steel under tough-strong ferrite formation",

Materials and design, Vol. 56, pp. 232–240, (2014).

13-Krauss, G., "principles of heat treatment of steel", ASM, metal park, pp.240-245, (1980).

۱۴-دکتر محمد علی گل‌عذار، اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها، مرکز نشر دانشگاه صنعت اصفهان، چاپ هشتم، ویرایش دوم.

۱۵-دکتر شهرام خیراندیش، دکتر محسن اسدی اسدآباد. "فولاد های دوفازی". انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ اول، ۱۳۹۲.

16-Wan, C, M., Chou, K, C., Jahn, M, T and Kuo S. M., "Fatigue studies on dual-phase low carbon steel", Journal of materials science. Vol 16, pp. 2521-2526, (1981).

Archive of SID