

تأثیر اعمال حرارتی مختلف بر دماهای استحاله آستنیت در فولاد API-X70 با ساختار نواری

یادداشت فنی

بهمن میرزاخانی^{۱*}^۱ دانشگاه اراک، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، اراک، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۳/۰۹/۰۱، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۴/۰۹/۱۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۰۹/۲۳

چکیده عملیات تولید فولادهای میکروآلیاژی نوردی شامل مجموعه‌ای از عملیات حرارتی و کار گرم است که به عملیات ترمومکانیکی موسوم می‌باشد. تعیین دماهای بحرانی استحاله آستنیت بعد از پایان تغییر شکل گرم و شناسایی عوامل موثر بر آنها منجر به کنترل تحولات ریزساختاری در طی فرآیند تولید و در نتیجه دستیابی به ترکیب بهینه خواص مکانیکی در این فولادها می‌شود. در این مقاله، تأثیر دما و زمان آستنیت‌دهی و سرعت سرد کردن بر رفتار استحاله آستنیت فولاد API-X70 با ساختار نواری فریت-پرلیت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های تهیه شده در جهت نورد (RD)، جهت عرضی نورد (TD) و جهت عمود بر نورد (ND) از صفحه فولاد تحت آزمایش دیلاتومتری و مطالعه ریزساختاری واقع شدند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما و زمان آستنیت‌دهی، به دلیل انحلال بهتر عناصر به خصوص کربن در ساختار و رشد دانه‌های آستنیت، دمای شروع و پایان تجزیه آستنیت کاهش می‌یابد و ساختار از فریتی-پرلیتی به فریتی-بینیتی تبدیل می‌شود. همچنین تغییرات کم سرعت سرد شدن، تأثیر زیادی بر دماهای بحرانی فولاد ندارد ولی با افزایش بیشتر سرعت سرمایش، ساختار به صورت کاملاً بینیتی درآمده و دماهای شروع و پایان تجزیه آستنیت به شدت کم می‌شود. نتایج دیلاتومتری و متالوگرافی نوری نیز هر دو بیانگر این است که جهت نمونه دیلاتومتری تأثیر بسیار کمی بر دماهای بحرانی دارد.

کلمات کلیدی: عملیات حرارتی، تجزیه آستنیت، فولاد میکروآلیاژی، ریزساختار.

The Influence of Different Heat Treatments on the Phase Transformation Temperatures of API-X70 Steel Containing Banded Structure

Bahman Mirzakhani¹¹Arak University, Faculty of Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Arak, Iran.

Abstract The production of microalloy steel plates is associated with the combination of heat treatments and hot working known as thermo-mechanical process. Superior mechanical properties of the milled products could be obtained by controlling the microstructural evolution during hot rolling process and accurate identification of phase transformation temperatures. In this paper, the influence of austenitizing time and temperature, cooling rates, banded structure of ferrite and perlite and microalloying element on the phase transformation of austenite in API-X70 steel were investigated. The dilatometry test and microstructure analysis were carried out on the samples with different direction (RD, TD and ND) to the steel plate. The results indicate that increasing of austenitizing time and temperature decrease of the start and the finish temperature of austenite decomposition; this was associated with changing of microstructure from ferrite-perlite to ferrite-bainite. The impact of small changes of cooling rate was found to be insignificant on the phase transformation temperatures. However, by increasing the cooling rate, the microstructure becomes bainitic and the critical temperatures decrease rapidly. Both the dilatometry data and the microstructure micrographs prove that the sample direction has negligible effect on critical temperatures.

Keywords: Heat Treatment, Austenite Decomposition, Microalloy Steel, Microstructure.

۱- مقدمه

فولادهای میکروآلیاژی را می‌توان یک موفقیت متالورژیکی دانست. این فولادها اگر چه دارای استحکام بالایی هستند، اما میزان عناصر آلیاژی بالنسبه کمی دارند. در واقع مشخصات مکانیکی مطلوب آنها، تحت تاثیر واکنش متقابل بین تغییر شکل گرم و عناصر میکروآلیاژی نظیر نایوبیم، تیتانیم و وانادیم (در حدود کمتر از ۰/۱ درصد وزنی) است. کارپذیری عالی، جوش‌پذیری مناسب این فولادها، منجر به استفاده آنها در لوله‌های انتقال نفت و گاز، سازه‌ها، صنعت اتومبیل و مخازن تحت فشار شده است [۱].

عملیات تولید فولادهای میکروآلیاژی نوردی شامل مجموعه‌ای از عملیات حرارتی و کار گرم است که به عملیات ترمومکانیکی موسوم می‌باشد. در این عملیات تغییر شکل پلاستیک و استحاله فاز به صورت پشت سر هم به گونه‌ای طرح‌ریزی می‌شوند که با یکدیگر وارد عمل شده و ریزساختاری با بهترین خواص ایجاد نماید [۲]. بعد از پیش گرم و تغییر شکل گرم، در ادامه سرد کردن، فاز آستنیت ناپایدار شده و به فریت/پرلیت تبدیل می‌شود. نحوه تحول آستنیت به فریت، اندازه دانه نهایی و خواص مکانیکی فولاد را تعیین می‌کند. اندازه دانه‌های فریت نهایی به اندازه دانه‌های آستنیت اولیه و اندازه دانه‌های آستنیت تبلور مجدد یافته بستگی دارد. گزارش شده که کنترل محدوده دمایی استحاله حتی پس از آن که آستنیت تحت تغییر شکل سنگین قرار گرفت، برای به حداقل رساندن اندازه دانه‌های فریت از اهمیت خاصی برخوردار است زیرا با افزایش نرخ جوانه‌زنی فریت در مرز دانه‌های آستنیت و کاهش سرعت رشد فریت امکان دستیابی به دانه‌های ریزتر فریت وجود دارد. این اثرات معمولاً با آلیاژسازی یا سرد کردن کنترل شده حاصل می‌شود. منگنز و مولیبدن عناصری هستند که معمولاً برای توازن دمای بحرانی Ar_3 جهت رسیدن به بیشترین اصلاح دانه استفاده می‌شود [۳].

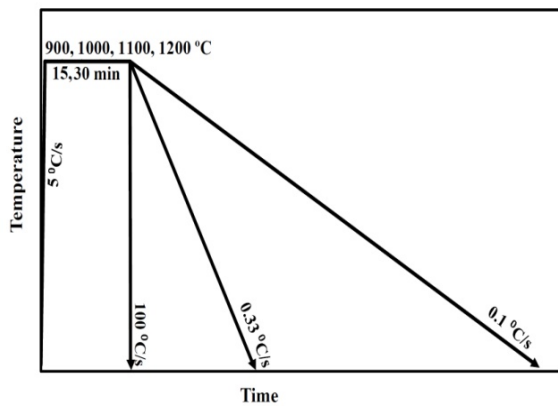
آزمایش دیلاتومتري یکی از موثرترین روش‌ها برای مطالعه استحاله فازی جامد-جامد آلیاژها است. تغییرات شیب منحنی تغییرات طول نمونه برحسب دما در این آزمایش، بیانگر تحولات فازی است [۴-۸]. Kai و همکارانش [۵] با استفاده از

آزمایش دیلاتومتري با تغییر سرعت سرمایش از دمای نرماله، استحاله فولادهای میکروآلیاژی وانادیوم‌دار را بررسی کردند. نتایج تجربی این محققین نشان داد که ریزساختار نهایی با افزایش سرعت سرد کردن از مخلوطی از فریت و پرلیت به فریت و بینیت خشن تبدیل می‌شود. فولاد وانادیوم‌دار در مقایسه با فولاد بدون وانادیوم، میزان بینیت بیشتری دارد و نمودارهای CCT آن جابجا می‌شود. Phadke و همکارانش [۶] از روش محاسباتی برای بررسی استحاله فازی پس از نورد استفاده کردند. آنها با استفاده از تاریخچه دمایی قطعه بعد از نورد و اطلاعات استحاله فازی هم‌دم، تبدیل آستنیت به فریت، پرلیت، بینیت و مارتنزیت را مدل‌سازی کردند. در فولادهای کم کربن مثل فولادهای میکروآلیاژی در طی نورد گرم پایانی، ساختار فریت و پرلیت در جهت نورد به صورت نواری قرار می‌گیرند که به ساختار نواری^۱ معروف است [۱]. Shanmugan و Pathak [۷] تاثیر ساختار نواری را بر چقرمگی شکست و دمای تبدیل تردی به نرمی یک فولاد میکروآلیاژی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که ساختاری نواری پراکنده می‌تواند سبب بهبود مقاومت به ضربه شود. همچنین با افزایش تعداد نوارهای فریت-پرلیت، دمای تبدیل تردی به نرمی کاهش نشان می‌دهد. Isasti و همکارانش [۸] با استفاده از آزمایش دیلاتومتري و EBSD، نمودارهای CCT را برای ترکیب‌های شیمیایی مختلف از فولادهای دارای نایوبیم و مولیبدن به دست آوردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نایوبیم سبب کاهش منطقه استحاله فریت می‌شود ولی افزایش نایوبیم از ۰/۰۳ تا ۰/۰۶ درصد بر سینتیک استحاله فولاد اثر قابل توجهی ندارد. افزودن مولیبدن نیز باعث کاهش اندک دمای شروع استحاله‌ها در نمودارهای CCT می‌شود.

هدف اصلی از عملیات ترمومکانیکی فولادهای میکروآلیاژ، اصلاح ساختار دانه به منظور رسیدن به ترکیب بهینه‌ای از استحکام و چقرمگی می‌باشد. دستیابی به ترکیب بهینه خواص مکانیکی در فولادهای میکروآلیاژی به کنترل صحیح ریزساختار در طی فرآیند ترمومکانیکی بستگی دارد. بدین منظور تعیین دماهای بحرانی استحاله فولاد و شناسایی عوامل موثر بر آنها از اهمیت بالایی برخوردار است تا بتوان برنامه فرآیند ترمومکانیکی مناسبی را برای خط تولید طراحی

^۱. Banded structure

سرعت سرد کردن پس از آستنیت و جهت نمونه دیلاتومتری ماشین کاری شده از صفحه فولاد اولیه بر رفتار استحاله فولاد و دماهای بحرانی آن به کمک آزمایش دیلاتومتری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور طبق شکل (۲) نمونه‌ها بعد از گرم شدن تا دمای آستنیت موردنظر، در این دما برای مدت زمان تعریف شده نگهداری و سپس با سرعت‌های مختلف تا دمای محیط سرد شدند و نتایج دیلاتومتری آنها مورد مقایسه و مطالعه قرار گرفت. به منظور مشاهده ریزساختار نمونه‌های مختلف به صورت کیفی، بررسی ریزساختاری به کمک میکروسکوپ نوری انجام شد و برای آشکارسازی ساختار از محلول حکاکی نایتال ۲٪ استفاده گردید.



شکل ۲. چرخه‌های عملیات حرارتی مختلف استفاده شده برای انجام آزمایش دیلاتومتری.

۳- نتایج و بحث

در تولید فولادهای میکروآلیاژی لازم است که سرد کردن به صورت کنترل شده انجام گردد تا ریزساختار مطلوب با بهترین خواص مکانیکی حاصل شود. تحولات متالورژیکی که در طی سرد شدن فولاد پس از پایان تغییرشکل گرم اتفاق می‌افتد، بر ساختار و در نتیجه خواص مکانیکی نهایی محصولات اثر می‌گذارند. به همین جهت در این مقاله رفتار استحاله فولاد در شرایط مختلف و تاثیر عناصر میکروآلیاژی و رسوبات آنها بر آن با استفاده از نتایج دیلاتومتری مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

در شکل (۳) منحنی‌های تغییرات طول نمونه بر حسب دما، در ضمن سرد کردن از دمای آستنیت نشان داده شده است.

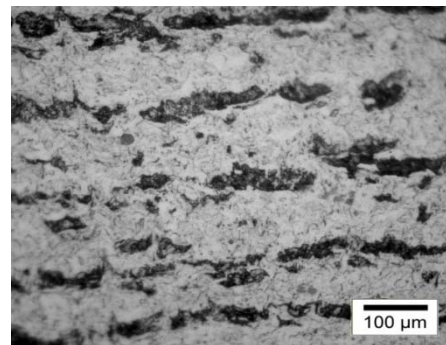
نمود. در این تحقیق با استفاده از آزمایش دیلاتومتری و بررسی ریزساختار، تاثیر ساختار نواری و چرخه‌های عملیات حرارتی مختلف بر دماهای بحرانی استحاله فازی در طی سرد شدن غیرهمدمای آستنیت در فولاد میکروآلیاژی نایوبوم- وانادیوم - تیتانیوم دار، مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

به دلیل ویژگی‌های ممتاز فولادهای میکروآلیاژی، امروزه این فولادها کاربرد وسیعی در صنایع مختلف از جمله خطوط انتقال نفت و گاز پیدا کرده‌اند. ترکیب شیمیایی فولاد میکروآلیاژی API-X70 مورد استفاده در تحقیق حاضر در جدول ۱ آورده شده است. تجزیه شیمیایی توسط دستگاه طیف‌سنجی نشر نور انجام گرفت. این فولاد، یک فولاد فریتی- پرلیتی با ساختار نواری (Banded structure) بوده که در شکل (۱) ریزساختار فولاد اولیه نمایش داده شده است.

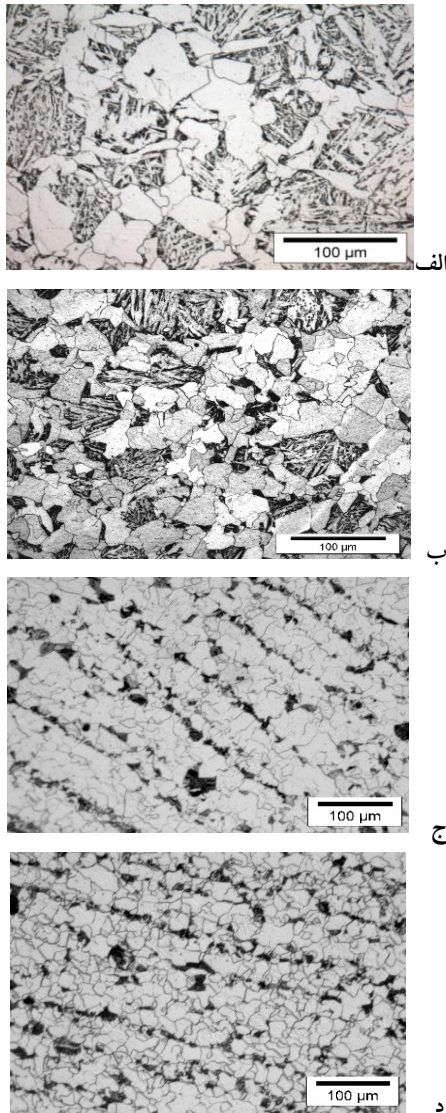
جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد API-X70 مورد استفاده (wt%).

C	Si	Mn	S	P	Nb	V	Ti	N	Fe
۰/۰۹	۰/۳۲	۱/۶۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰۲	بقیه



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی نوری ریزساختار اولیه نمونه تهیه شده در جهت نورد.

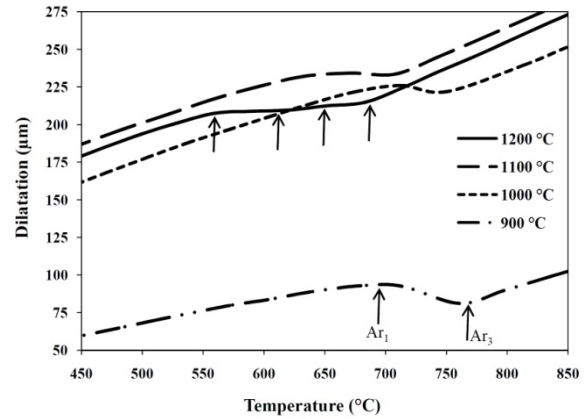
یکی از موثرترین روش‌ها برای مطالعه استحاله‌های فازی در فولادها، آزمایش دیلاتومتری است. در این پژوهش برای انجام آزمایش دیلاتومتری از دستگاه Bähr Dil 805 A/D استفاده گردید. نمونه‌های دیلاتومتری به شکل استوانه‌ای توپر به قطر 4 ± 0.2 mm و طول 10 ± 0.2 mm از صفحه فولاد اولیه در جهت نورد (RD)، جهت عرضی (TD) و عمود بر جهت نورد (ND) ماشین کاری شدند. سپس تاثیر دما و زمان آستنیت،



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های آستنیت شده در (الف) 1200°C ، (ب) 1100°C ، (ج) 1000°C و (د) 900°C به مدت ۱۵ دقیقه و سرد شده با سرعت 0.33°C/s تا دمای اتاق.

همان‌گونه که در شکل (۴) دیده می‌شود، ساختار نواری فریت-پرلیت حتی بعد از آستنیت کردن در دماهای 900°C و 1000°C دست نخورده باقی مانده است ولی با افزایش بیشتر دمای آستنیت به دلیل افزایش سرعت نفوذ به صورت نمایی، انحلال بیشتر فازها و در نتیجه یکنواختی بیشتر ترکیب شیمیایی در ساختار اتفاق می‌افتد به طوری که در تصاویر ساختاری نمونه‌های آستنیت شده در دماهای 1100°C و 1200°C اثری از ساختار نواری دیده نمی‌شود. تصویر متالوگرافی در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب حضور فازهای بینیت و مارتنزیت را در ساختار تایید می‌کند زیرا همان‌طور که گفته شد، انحلال بیشتر عناصر میکروآلیاژی سختی‌پذیری فولاد

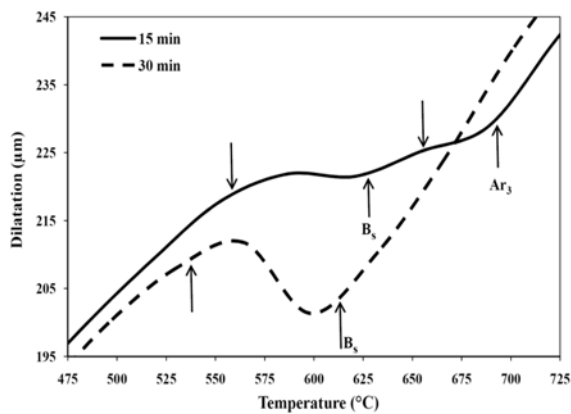
این نمونه‌ها در دماهای 900°C ، 1000°C ، 1100°C و 1200°C به مدت ۱۵ دقیقه آستنیت شدند و سپس با سرعت ثابت 0.33°C/s تا دمای اتاق سرد گردید. تمام نمونه‌های دیلاتومتری در این بررسی در جهت ثابت RD تهیه شدند.



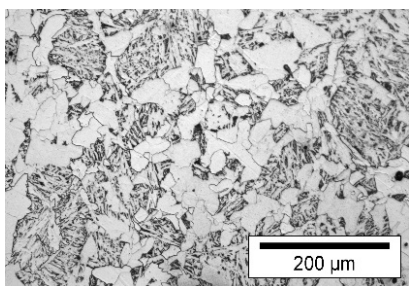
شکل ۳. منحنی دیلاتومتری ضمن سرد شدن با سرعت 0.33°C/s از دماهای آستنیت مختلف؛ زمان آستنیت ۱۵min و RD.

همان‌طور که از نمودار شکل (۳) مشخص است، با افزایش دمای آستنیت از 900°C به 1000°C دمای بحرانی Ar_1 کاهش ولی دمای Ar_3 تقریباً ثابت می‌ماند. با افزایش بیشتر دمای آستنیت، دماهای استحاله کاهش می‌یابند. دماهای بحرانی Ar_3 و Ar_1 به ترتیب دماهای آغاز و پایان تجزیه غیرهم‌دمای آستنیت هستند. دلیل تغییرات دماهای بحرانی را این‌گونه می‌توان تحلیل نمود که تا دمای آستنیت کردن 1000°C ، انحلال عناصر به خصوص کربن به خوبی در ساختار صورت نمی‌گیرد. از طرف دیگر با افزایش دمای آستنیت کردن احتمال انحلال رسوبات عناصر میکروآلیاژی به خصوص کربونیت‌ریدهای وانادیوم و نایوبیوم بیشتر می‌شود. عناصر وانادیوم و نایوبیوم، باعث جلوگیری از تبلور مجدد آستنیت تغییرشکل یافته می‌گردند، این عناصر می‌توانند با تشکیل کاربیدها، نیت‌ریدها و کربونیت‌ریدها جلوی رشد دانه‌ها را گرفته و با ایجاد رسوب، دمای تجزیه آستنیت را کاهش می‌دهند که باعث کم شدن فاصله بین دمای شروع و پایان تجزیه آستنیت می‌شوند و رشد دانه‌های فریت در این بازه را محدود می‌کنند. گزارش شده [۸ و ۹] این عناصر علاوه بر کاهش منطقه استحاله فریت، سبب افزایش سختی‌پذیری فولاد نیز می‌گردند. تصاویر متالوگرافی در شکل (۴) دلیل این مدعا است.

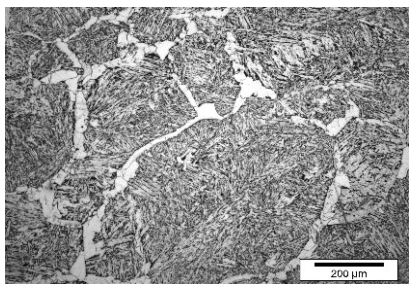
اولیه، مکان‌های جوانه‌زنی کاهش یافته و استحاله دیرتر شروع می‌شود. به عبارت دیگر با درشت شدن دانه‌های آستنیت سختی‌پذیری افزایش یافته است. این مساله در کنار انحلال بیشتر عناصر آلیاژی در آستنیت در نمونه آستنیت شده برای مدت ۳۰ دقیقه سبب می‌شود که ریزساختار آن در دمای محیط عمدتاً به صورت بینیتی بوده و دمای تشکیل بینیت آن طبق شکل ۵ در مقایسه با نمونه آستنیت شده برای مدت ۱۵ دقیقه، پایین‌تر باشد. لازم به ذکر است که تغییر شکل پلاستیک در آستنیت اولیه، موجب تسریع استحاله فولادها می‌شود. محققین بیان کرده‌اند که چگالی بالای نابجایی‌ها در آستنیت کرنش یافته به جوانه‌زنی سریع‌تر فازهای بعدی منجر می‌شود [۸].



شکل ۵. تاثیر زمان آستنیت بر منحنی دیلاتومتری ضمن سرد شدن (دمای آستنیت 1200°C).



الف



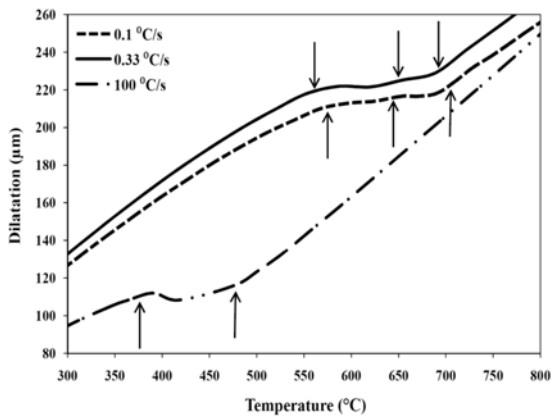
ب

شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های آستنیت شده در دمای 1200°C به مدت (الف) ۱۵ دقیقه و (ب) ۳۰ دقیقه و سرد شده با سرعت 0.33°C/s تا دمای اتاق.

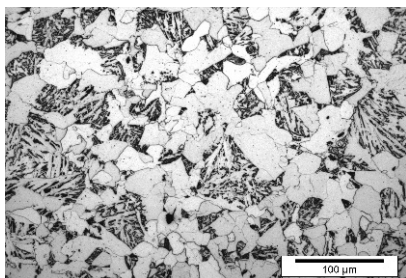
را افزایش می‌دهند، به طوری که در نمونه آستنیت شده در دمای 1200°C ، کسر حجمی این فازها بیشتر است. این پدیده در نمودار دیلاتومتری مربوط به دمای آستنیت 1200°C در شکل (۳) قابل رویت است به طوری که باعث بروز تغییر شیب‌های متوالی در منحنی دیلاتومتری مربوط به دمای آستنیت 1200°C می‌شود.

به منظور بررسی تاثیر زمان آستنیت کردن بر رفتار استحاله فولاد، دو نمونه دیلاتومتری در جهت TD، طبق چرخه حرارتی شکل (۲) در دمای ثابت 1200°C برای مدت زمان‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه آستنیت شده و سپس با سرعت 0.33°C/s تا دمای محیط سرد گردیدند. نتایج دیلاتومتری حاصل در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، دمای شروع تجزیه آستنیت با افزایش زمان آستنیت به شدت کاهش یافت. تحولات ریزساختاری این دو نمونه با استفاده از تصاویر ریزساختار حاصل از متالوگرافی نوری آن‌ها که در شکل (۶) نمایش داده شده؛ بهتر قابل تشریح است. برای نمونه آستنیت شده به مدت ۱۵ دقیقه تحولات فازی با تشکیل فریت پرویونکتوئید آغاز می‌گردد به نحوی که سبب اولین تغییر در شیب منحنی طبق شکل (۵) می‌شود. با ادامه سرمایش نمونه، طبق تصویر طرح‌وار منحنی CCT در شکل (۷)، فریت سوزنی و بینیت بقیه ساختار را در برمی‌گیرد ولی در این نمونه کسر حجمی بینیت در مقایسه با فریت پلی‌گونال و سوزنی کم است. با افزایش زمان آستنیت کردن، کسر حجمی قابل توجهی از ساختار به بینیت تعلق گرفته و مقدار بسیار کمی فریت پرویونکتوئید در مرز دانه‌های آستنیت اولیه مشاهده می‌شود به طوری که در منحنی دیلاتومتری نمونه آستنیت شده به مدت ۳۰ دقیقه، تغییرات متوالی در شیب منحنی اتفاق نمی‌افتد. با افزایش زمان آستنیت کردن دانه‌های آستنیت رشد بیشتری را خواهند داشت زیرا پدیده رشد دانه یک پدیده نفوذی است که نیاز به زمان دارد. میانگین اندازه دانه آستنیت برای دو زمان آستنیت ۱۵ و ۳۰ دقیقه در تحقیق دیگر انجام شده [۱۰] به ترتیب برابر $102\mu\text{m}$ و $155\mu\text{m}$ به دست آمد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش زمان آستنیت از ۱۵ دقیقه به ۳۰ دقیقه، دانه‌ها 50% رشد داشته‌اند. از آنجایی که جوانه‌زنی فاز فریت و پرلیت و شروع استحاله از مرز دانه‌های آستنیت آغاز می‌شود، بنابراین با درشت شدن دانه‌های آستنیت

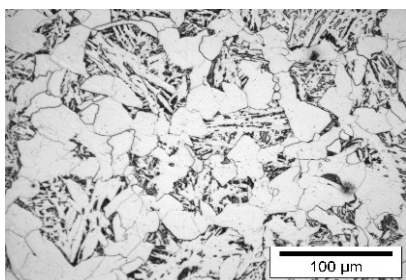
شده سپس با سرعت ثابت 0.33°C/s تا دمای محیط سرد شدند. همان‌گونه که منحنی‌های دیلاتومتری نشان می‌دهند، با تغییر جهت نمونه دیلاتومتری، دماهای بحرانی استحاله فولاد ثابت می‌ماند. بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که در هر دو دمای آستنیت، منحنی‌های مربوط به جهت‌های RD و TD کاملاً شبیه یکدیگر است و این منحنی‌ها با منحنی جهت ND تفاوت جزئی دارند.



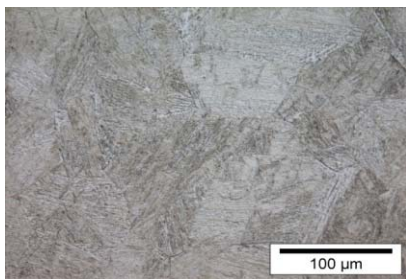
شکل ۸. تاثیر سرعت سرد کردن بعد از آستنیت کردن در دمای 1200°C و زمان 15min بر منحنی دیلاتومتری ضمن سرد شدن.



الف



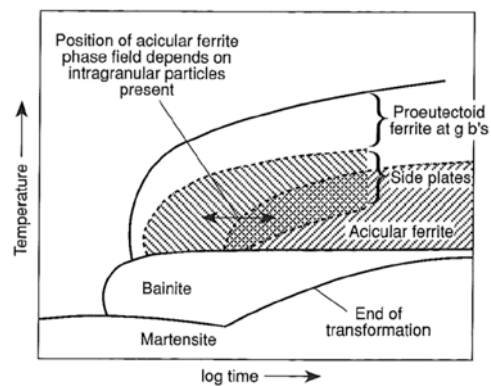
ب



ج

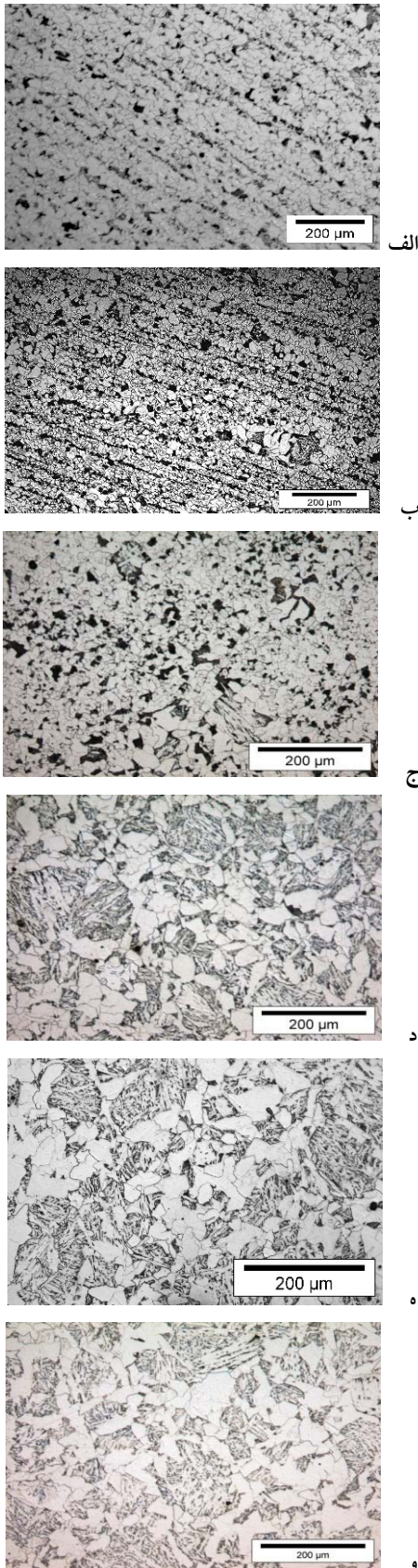
شکل ۹. تصاویر میکروسکوپ نوری نمونه‌های آستنیت شده در دمای 1200°C به مدت 15min و سرد شده با سرعت‌های (الف) 0.1°C/s ، (ب) 0.33°C/s و (ج) 100°C/s .

تاثیر سرعت سرمایش بعد از آستنیت در دمای 1200°C به مدت 15min بر منحنی دیلاتومتری و ریزساختار فولاد به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده و جهت تمام نمونه‌ها در این بررسی جهت TD بوده است. در حقیقت، استحاله‌ها در صنعت به صورت غیرهم‌دما و در طی سرد کردن پیوسته اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود، با افزایش سرعت سرد شدن دماهای بحرانی استحاله کاهش می‌یابد. البته تغییرات کم سرعت سرمایش، تقریباً تاثیری بر دماهای استحاله ندارد زیرا تغییرات منحنی دیلاتومتری مربوط به سرعت‌های سرمایش 0.1°C/s و 0.33°C/s تقریباً مشابه یکدیگر است. تصاویر متالوگرافی نوری این دو نمونه در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب نیز، حاکی از یکسان بودن تحولات ریزساختاری آنها در طی سرد شدن است به طوری که ساختار هر دو نمونه در دمای محیط، به صورت فریتی-پرلیتی با مقادیر کم فریت سوزنی یا بینیت می‌باشد. با افزایش سرعت سرد کردن به 100°C/s ، ساختار شامل بینیت و مارتنزیت بدون هیچ‌گونه فریت پرویوتکتوئید در مرز دانه‌ها است. به گونه‌ای که در منحنی دیلاتومتری نمونه سرد شده با سرعت 100°C/s ، تغییرات شیب مشاهده شده مربوط به تشکیل بینیت می‌باشد. لازم به ذکر است که طبق شکل (۷) می‌توان گفت بینیتی که در ساختارهای شکل‌های ۹-الف و ۹-ب تشکیل می‌شود از نوع بینیت بالایی و بینیت تشکیل شده در ساختار شکل ۹-ج از نوع بینیت پایینی است.



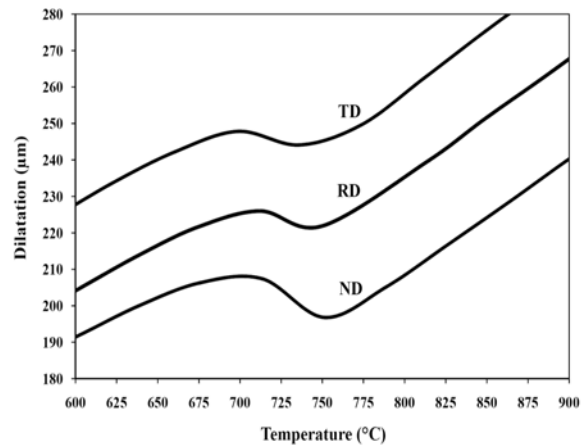
شکل ۷. طرح‌وار منحنی CCT فولادهای کم کربن، بیانگر محدوده تشکیل فریت سوزنی و بینیت [۱].

در شکل (۱۰) تاثیر جهت نمونه دیلاتومتری تهیه شده از صفحه فولاد اولیه، بر منحنی دیلاتومتری ضمن سرد شدن برای دو دمای آستنیت نشان داده شده است. بدین ترتیب که نمونه‌های تهیه شده در جهت RD، TD و ND از صفحه فولاد اولیه طبق چرخه گرمایی شکل (۲) در دو دمای 1200°C و 1000°C به مدت 15min آستنیت

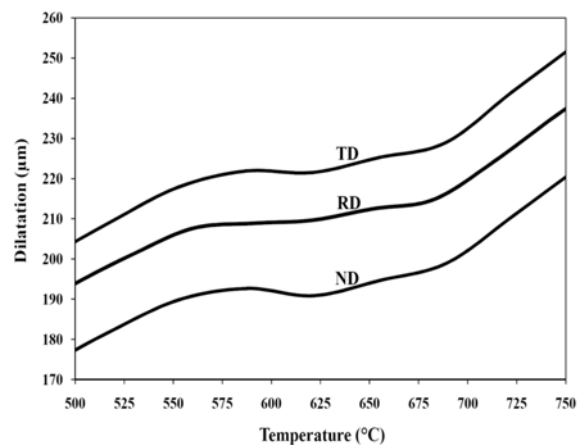


شکل ۱۱. تصاویر متالوگرافی نوری نمونه‌های آستنیت شده به مدت ۱۵ min و سرد شده با سرعت 0.33°C/s ؛ (الف) دمای آستنیت 1000°C و جهت RD، (ب) دمای آستنیت 1000°C و جهت TD، (ج) دمای آستنیت 1000°C جهت ND، (د) دمای آستنیت 1200°C و جهت RD، (ه) دمای آستنیت 1200°C و جهت TD و (و) دمای آستنیت 1200°C و جهت ND.

همان‌طور که تصویر متالوگرافی ساختار اولیه فولاد در شکل (۱) نشان می‌دهد، فولاد مورد بررسی یک فولاد میکروآلیاژی فریتی-پرلیتی با ساختار نواری است و ردیف‌های فریت و پرلیت در طی فرآیند تولید در جهت نورد کشیده شده و ساختار نواری را ایجاد نموده‌اند. برای نمونه با جهت‌های RD و TD، ساختار نواری فریت-پرلیت در راستای محور نمونه قرار دارد ولی برای جهت ND، محور نمونه عمود بر نوارهای فریت و پرلیت است. به نظر می‌رسد به همین دلیل منحنی‌های دیلاتومتری جهت RD و TD کاملاً مشابه و منحنی دیلاتومتری جهت ND با جهت‌های RD و TD تفاوت اندکی دیده می‌شود. تصاویر متالوگرافی در شکل (۱) نیز این مطلب را تایید می‌کند. در هر دو دمای آستنیت، ریزساختارهای نمونه‌های تهیه شده در جهت RD و TD کاملاً مشابه است. برای دمای آستنیت 1000°C ، ریزساختار نهایی فولاد شامل فریت و پرلیت بوده با افزایش دمای آستنیت به 1200°C و توزیع کربن در زمینه، ساختار نواری از بین رفته و ریزساختار نهایی به صورت ترکیبی از فریت چند وجهی و فریت سوزنی با مقادیر کم پرلیت و بینیت درمی‌آید.



الف



ب

شکل ۱۰. تاثیر جهت نمونه دیلاتومتری تهیه شده از صفحه فولاد اولیه بر منحنی دیلاتومتری ضمن سرد شدن، زمان آستنیت ۱۵ و دمای آستنیت (الف) 1000°C و (ب) 1200°C .

۴- نتیجه گیری

سیاسگزار

از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه اراک به دلیل حمایت مالی طرح پژوهشی به شماره قرارداد ۹۲/۱۱۴۶۵ مورخ ۹۲/۱۰/۳۰ کمال تشکر و قدردانی می شود.

مراجع

1. T. Gladman, The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, The Institute of Materials, London, 1997.
2. C. Ouchi, Development of Steel Plates by Intensive Use of TMCP and Direct Quenching Processes, *ISIJ International*, 2001, 41, 542- 553.
3. L.J. Cuddy, Microstructures Developed during Thermo-mechanical Treatment of HSLA steels, *Metallurgical Transactions A*, 1981, 12, 1313- 1320.
4. C.G. Andres, F.G. Caballero, C. Capdevila, L.F. Alvarez, Application of Dilatometric Analysis to the Study of Solid-Solid Phase Transformation in Steels, *Materials Characterization*, 2002, 48, 101-111.
5. W. Kai, W. Li-jun, C. Wen-Feng, R. Hai-Peng, L. Chun-Ming, in Low Carbon Steels during Continuous Cooling Process, Ph.D. Thesis, School of Materials and Metallurgy Northeastern University, Shenyang, China, 2004.
6. S. Phadke P. Pauskar, R. Shivpuri, Computational Modeling of Phase Transformations and Mechanical Properties during the Cooling of Hot Rolled Rod, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 150, 107-115.
7. P. Shanmugam, S.D. Pathak, Some Studies on the Impact Behavior of Banded Microalloyed Steel, *Engineering Fracture Mechanics*, 1996, 53, 991-1005.
8. N. Isasti, D.J. Diola, M.L. Taheri, P. Uranga, Phase Transformation Study in Nb-Mo Microalloyed Steels Using Dilatometry and EBSD Quantification, *Metals & Materials Society*, ASM International, 2013.
9. J. Calvo, I.H. Jung, A.M. Elwazri, D. Bai, S. Yue, Influence of Chemical Composition on Transformation Behavior of Low Carbon Microalloyed Steels, *Materials Science and Engineering A*, 2009, 520, 90-96.
10. B. Mirzakhani, S. Khoddam, H. Arabi, M.T. Salehi, J.A. Sietsma, Coupled Thermal-Mechanical FE Model of Flow Localization during the Hot Torsion Test, *Steel Research International*, 2009, 80, 846-854.

از بررسی و مطالعه آزمایشگاهی رفتار استحاله فازی و ریزساختار فولاد میکروآلیاژی API-X70 به کمک آزمایش دیلاتومتری و متالوگرافی نوری، نتایج کلی زیر حاصل گردید:

۱- با افزایش دمای آستنیت از ۹۰۰ به ۱۰۰۰°C دمای بحرانی Ar_1 کاهش ولی دمای Ar_3 تقریباً ثابت می ماند. با افزایش بیشتر دمای آستنیت، دماهای تجزیه آستنیت به دلیل انحلال بهتر عناصر و رسوبات عناصر میکروآلیاژی کاهش می یابند به طوری که در تصاویر ساختاری نمونه های آستنیت شده در دماهای ۱۱۰۰°C و ۱۲۰۰°C اثری از ساختار نواری نبوده و فازهای بینیت و مارتنزیت در ساختار تشکیل می شود.

۲- دمای شروع تجزیه آستنیت، به دلیل رشد دانه ها و انحلال بهتر کربن و عناصر میکروآلیاژی، با زیاد شدن زمان آستنیت از ۱۵ به ۳۰ دقیقه، به شدت کاهش می یابد. در این حالت کسر حجمی قابل توجهی از ساختار به بینیت تعلق گرفته و مقدار بسیار کمی فریت پرویوتکتوئید در مرز دانه های آستنیت اولیه مشاهده می شود و شیب منحنی دیلاتومتری به طور متوالی تغییر می کند.

۳- با افزایش سرعت سرد شدن، دماهای شروع و پایان تجزیه آستنیت کاهش می یابد. البته تغییرات کم سرعت سرمایش، تاثیر ناچیزی بر دماهای استحاله دارد. با افزایش بیشتر سرعت سرد کردن، ساختار شامل بینیت و مارتنزیت بدون هیچ گونه فریت پرویوتکتوئید در مرز دانه ها است به گونه ای که در منحنی دیلاتومتری تغییرات شیب مشاهده شده مربوط به تشکیل بینیت است.

۴- جهت نمونه دیلاتومتری تهیه شده از صفحه فولاد اولیه، تاثیر زیادی بر دماهای بحرانی استحاله ندارد. منحنی های دیلاتومتری جهت RD و TD کاملاً مشابه و منحنی دیلاتومتری جهت ND با جهت های RD و TD تفاوت اندکی دارد. با افزایش دمای آستنیت به دلیل از بین رفتن ساختار نواری تاثیر ساختار نواری بر دماهای بحرانی کمتر می شود.