

# بررسی استحاله‌های فازی در فولاد سرد کار ۱/۲۳۰۴ در حین سرد کردن پیوسته

محمد رضا خانزاده قره شیران<sup>۱\*</sup>، کامران امینی<sup>۲</sup>

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، باشگاه پژوهشگران جوان، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، اصفهان، ایران

\*khanzade@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۳/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۱۴)

## چکیده:

در تحقیق حاضر با استفاده از دستگاه دیلاتومتری، رفتار فولاد سرد کار ۱/۲۳۰۴ در حین سرد کردن پیوسته مورد مطالعه قرار گرفت. عملیات حرارتی نمونه‌ها شامل آستنیت‌زدن تحت خلاء و به دنبال آن کوئنچ با سرعت‌های مختلف با استفاده از گاز نیتروژن بود. بررسی نمودارهای دیلاتومتری منجر به رسم نمودار CCT (استحاله در سرد کردن پیوسته) فولاد گردید. با توجه به نتایج به دست آمده بازه دمایی استحاله‌های فازی فریت-پرلیت، بینیت و مارتنزیت به ترتیب  $713-596^{\circ}\text{C}$ ،  $468-360^{\circ}\text{C}$ ،  $268-253^{\circ}\text{C}$  تعیین گردید. همچنین استحاله فریت-پرلیت در سرعت‌های سرد کردن بیشتر از ۷۲۰ ثانیه، استحاله بینیت در سرعت‌های سرد کردن ۷۲۰ تا ۱۲۰۰ ثانیه و استحاله مارتنزیت در سرعت‌های سرد کردن کمتر از ۱۲۰۰ ثانیه رخ می‌دهد. هم‌چنین از آنجا که دمای پایان استحاله مارتنزیتی در این فولاد کمتر از صفر درجه سانتیگراد است، با طراحی سیکل‌های عملیات حرارتی زیر صفر، دمای پایان استحاله مارتنزیتی در فولاد مذکور ۸۷- درجه سانتیگراد مشخص گردید.

## واژه‌های کلیدی:

فولاد ۱/۲۳۰۴، دیلاتومتری، نمودار CCT، استحاله فازی

## ۱- مقدمه:

اندازه کافی داکتیل باشد تا مقاومت زیادی در برابر ایجاد ترک داشته باشد. برای حصول چنین شرایطی از یک فولاد با ترکیب ۰/۸٪ کربن، همراه با مقادیری از عناصر کاربیدزا مانند کروم، مولیبدن و گاهی اوقات همراه با نیکل استفاده می‌شود [۱]. نتایج نشان داده است که ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی بر روی عمق ترک‌هایی که بر اثر شوک حرارتی ایجاد می‌شوند موثر است و فولاد‌های یوتکتوئید حاوی ۵-۳٪ کروم همراه با اندکی

غلتهای کاری و پشتیبان نورد سرد عمدتاً از نوع غلتهای فولادی فورج و سخت کاری شده هستند. برای حصول مقاومت سایشی بالا عمدتاً این غلتهای در سختی حدود HRC ۶۸ کاربری دارند. برای آنکه این غلتهای در مقابل خرد شدن مقاوم باشند بایستی ریز ساختار لایه سخت شده که تحت تنش قرار می‌گیرد، حداقل کار سختی را از خود نشان دهد. این ریز ساختار باید به

رفتار فولاد ۱/۲۳۰۴ که در ساخت غلطکهای نورد سرد کاربرد دارد در حین سرد کردن پیوسته مطالعه گردید. نتایج بدست آمده منجر به رسم نمودار CCT این فولاد گردید. علاوه بر این رفتار استحاله مارتنزیت در دماهای زیر صفر ارزیابی گردید.

## ۲- روش تحقیق:

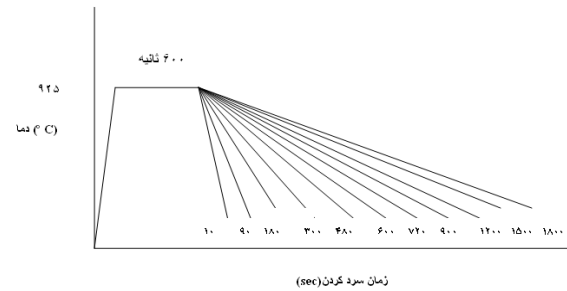
در جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد ۱/۲۳۰۴، آورده شده است. نمونه های دیلاتومتری مطابق با استاندارد SEP 1681، به صورت استوانه هایی به قطر ۴ میلی متر و طول ۱۰ میلی متر تهیه شدند. در سیکل هایی که نیاز به سرعت سرد کردن بالا وجود داشت نمونه های دیلاتومتری به صورت تو خالی با ضخامت پوسته ۰/۲ میلی متر تهیه گردیدند. جهت انجام آزمونهای دیلاتومتری از دستگاه دیلاتومتر 805A/D که در مجتمع فولاد آلیاژی اصفهان موجود است، استفاده گردید [۱۱]. نمونه ها در خلا  $5 \times 10^{-4}$  mbar تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. سیکل های عملیات حرارتی شامل عملیات آستنیت کردن در  $925^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان ۱۰ دقیقه و سپس سرمایش تا دمای محیط در مدت زمان های مختلف (سرعت های مختلف) است. در شکل ۱ شماتیک سیکل های حرارتی که توسط دیلاتومتر بر روی نمونه ها انجام گرفته است آورده شده است. سرمایش نمونه ها تا دمای محیط به وسیله گاز نیتروژن و در سیکلهای زیر صفر، سرد کردن توسط نیتروژن مایع انجام گردید. برای اچ کردن نمونه ها از محلول نایتال ۵٪ و برای بررسی ریز ساختار نمونه ها از میکروسکوپ Olympus مدل PGM3 و میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل JEOL2010 استفاده گردید. ریز سختی سنجی توسط دستگاه KOOPA مدل MH1 و با نیروی ۲۰۰ گرم صورت پذیرفت. برای رسم منحنی جامینی نیز نمونه تحت اتمسفر گاز آرگون تا دمای  $925^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰ دقیقه حرارت داده شد و سپس در دستگاه جامینی قرار گرفت. سختی سنجی از نمونه جامینی نیز به وسیله سختی سنج ساخت کمپانی EMCO مدل 4U750 صورت پذیرفت

مولیبدن مقاومت به شوک حرارتی به مراتب بالاتری نسبت به فولاد های ۱-۲٪ کروم از خود نشان می دهند [۲-۵]. بنابراین عملیات حرارتی سختکاری این غلطکها اهمیت زیادی دارد. در فولادها با افزایش درصد کربن و عناصر آلیاژی دمای شروع و پایان استحاله مارتنزیتی کاهش پیدا می کند. به نحوی که حتی ممکن است دمای پایان استحاله مارتنزیتی به کمتر از صفر درجه سانتیگراد کاهش پیدا کند. بنابراین پس از کوئنچ تا دمای محیط در ساختار فولاد، مقداری آستنیت باقیمانده وجود خواهد داشت. آستنیت باقیمانده باعث کاهش سختی و مقاومت سایشی می شود. از طرفی در شرایط کاری غلتک، احتمال تبدیل آستنیت باقیمانده به مارتنزیت وجود دارد. مارتنزیت حاصله تمپر نشده بوده و لذا بسیار ترد بوده و می تواند منجر به شکست غلطک شود. همچنین استحاله مذکور همراه با ۴٪ افزایش حجم ناخواسته است که منجر به ناپایداری ابعادی می گردد [۶-۷]. در صورت مشخص بودن مشخصه های استحاله مارتنزیت (دمای شروع و پایان استحاله) می توان با طراحی سیکل عملیات حرارتی مناسب همراه با عملیات زیر صفر به منظور حذف یا کاهش آستنیت باقیمانده از مشکلات ذکر شده جلوگیری نمود. دیلاتومتری ابزاری قدرتمند جهت تعیین استحاله های فازی جامد-جامد می باشد. با استفاده از آنالیز اطلاعات منحنی های دیلاتومتری، دیاگرام های  $\text{CCT}^2$  و  $\text{CCT}^1$  تعیین می گردد و امکان پیشگویی ریز ساختار را در سرعت های گرمایش و سرمایش مختلف مهیا می کند [۸]. دیاگرام های CCT به صورت وسیعی در طراحی پارامتر های بهینه فرایند و به دست آوردن مستقیم ریز ساختار و خواص مکانیکی فولاد ها در حین پروسه های صنعتی کاربرد دارند. با توسعه تکنیک های شبیه سازی می توان ارتباط بین ریز ساختار، خواص و پارامتر های فرایند را به وسیله نمودار های CCT پیشگویی کرد [۹-۱۰]. در تکنیک دیلاتومتری به دلیل توانایی نشان دادن واقعی تغییرات ابعادی اتفاق افتاده در نمونه، بیشترین کاربرد صنعتی در جهت تعیین دماهای استحاله های فازی در فولاد در دو حالت گرمایش  $(\text{Ac}_1, \text{Ac}_3)$  و سرمایش  $(\text{Ar}_1, \text{Ar}_3)$  وجود دارد. در تحقیق حاضر

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد ۱/۲۳۰۴ مورد استفاده در تحقیق.

(درصدوزنی)

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni	%S	%P	%Fe
۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۲۵	۳	۰/۵	۰/۱۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۵	باقیمانده



شکل (۱): نمودار شماتیک سیکل های حرارتی که توسط دستگاه دیلاتومتر به نمونه ها اعمال گردیده است.

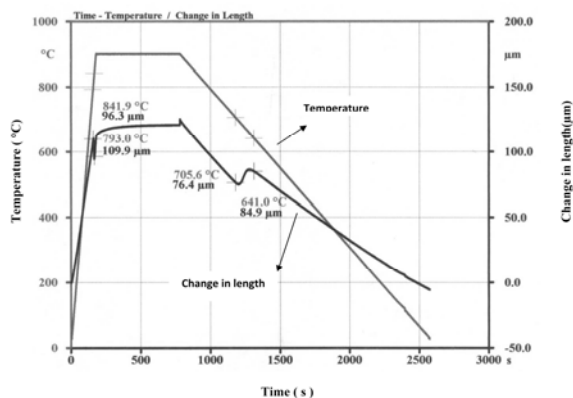
### ۳- نتایج و بحث:

در دستگاه دیلاتومتری تغییرات ابعادی (انبساط و انقباض) نمونه، در اثر گرم و سرد کردن و استحاله های فازی که همراه با انبساط و انقباض است، توسط یک پتانسیومتر بسیار حساس اندازه گیری و ثبت می شود. با توجه به منحنی های بدست آمده می توان به پیش بینی استحاله های فازی به شرح ذیل پرداخت.

#### ۳-۱- دگرگونی پرلیتی و بینیتی:

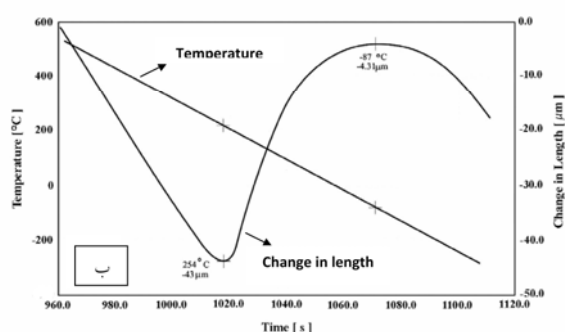
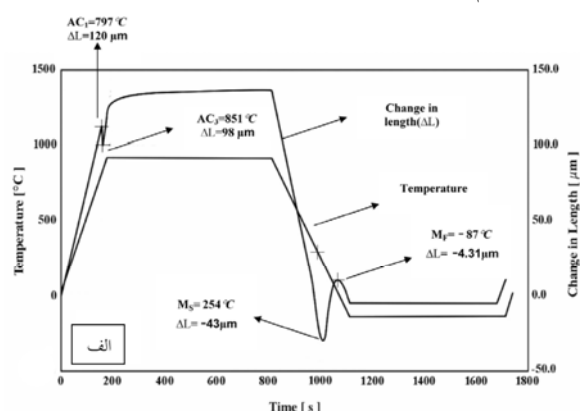
در شکل ۲ نمونه ای از نمودارهای دیلاتومتری آورده شده است. مشاهده می گردد با افزایش دما از ۲۵ درجه سانتیگراد طول نمونه به دلیل انبساط افزایش یافته تا آنکه در دمای ۷۹۳ درجه سانتیگراد بدلیل تغییر فاز از ناحیه دو فازی فریت + سمانتیت به ناحیه دو فازی فریت + آستنیت کاهش طول نمونه رخ می نماید. این دما، دمای شروع استحاله آستنیتی ( $Ac_1$ ) می باشد. در ادامه افزایش دما، کاهش طول نمونه ادامه دارد تا آنکه در دمای ۸۴۱/۹ درجه سانتیگراد تمام فریت تبدیل به آستنیت می شود. این دما، پایان استحاله آستنیتی ( $Ac_3$ ) می باشد. از این پس مجدداً با گرم کردن نمونه افزایش طول نمونه رخ می نماید. نمونه سپس در دمای ۹۲۵ درجه سانتیگراد به مدت زمان ۱۰ دقیقه نگهداری می شود که در این فاصله طول نمونه ثابت خواهد بود.

در مرحله بعد نمونه با سرعت آهسته در مدت زمان ۱۸۰۰ ثانیه تا دمای محیط سرد می شود. در حین سرد شدن، کاهش طول نمونه رخ می نماید تا آنکه استحاله پرلیتی با افزایش طول نمونه شروع می شود. پایان افزایش طول نمونه در حین سرد کردن، دمای پایان استحاله پرلیتی است. بنابراین دمای شروع و پایان استحاله آستنیت به فریت- پرلیت ( $Ar_1$  و  $Ar_3$ ) به ترتیب ۷۰۵ و ۶۴۱ درجه سانتیگراد می باشد. از این پس با کاهش دما تا دمای محیط، کاهش طول نمونه وجود خواهد داشت. ریزساختار حاصل از عملیات حرارتی نمونه بالا که مخلوطی از فریت پرلیت است در شکل ۳ آورده شده است. در شکل ۴ نمونه ای دیگر از سیکل های دیلاتومتری آورده شده است در این سیکل نمونه در مدت زمان ۱۵۰۰ ثانیه تا دمای محیط سرد شده است. همانطوریکه از شکل مشخص است دمای شروع و پایان استحاله آستنیت به فریت- پرلیت ( $Ar_1$  و  $Ar_3$ ) به ترتیب ۶۹۸ و ۵۹۶ درجه سانتیگراد می باشد. اما پس از این نیز با کاهش دما، تغییر در شیب خط تغییرات طول، ادامه دارد که مربوط به تبدیل آستنیت باقیمانده به بینیت است. بنابراین دمای شروع و پایان استحاله بینیت به ترتیب ۴۲۹ و ۳۶۰ درجه سانتیگراد است. از این پس و با تبدیل کامل آستنیت به پرلیت و بینیت با کاهش دما (سرد کردن نمونه)، کاهش طول نمونه رخ خواهد داد.



شکل (۲): نمونه ای از نمودارهای دیلاتومتری بدست آمده از فولاد ۱/۲۳۰۴ که بعد از آستنیت شدن در ۹۲۵°C به مدت ۱۰ دقیقه در مدت زمان ۱۸۰۰ ثانیه به دمای محیط رسیده است

خواهد شد این افزایش طول تا دمای ۸۷- درجه سانتیگراد در حین سرد کردن فولاد ادامه دارد. بنابراین دمای پایان استحاله مارتنزیتی (دمای پایان افزایش طول در حین سرد کردن) در فولاد مذکور ۸۷- درجه سانتیگراد است. از این پس با سرد کردن نمونه، طول آن کاهش خواهد یافت. در شکل ۵ ب ناحیه استحاله مارتنزیت در بزرگنمایی بالاتری نشان داده شده است. تشکیل مارتنزیت از آستنیت در ضمن کاهش دما به طور پیوسته انجام می شود و در این فولاد با سرد کردن فولاد تا دمای زیر صفر تمام آستنیت به مارتنزیت تبدیل می شود [۱۲-۱۳].

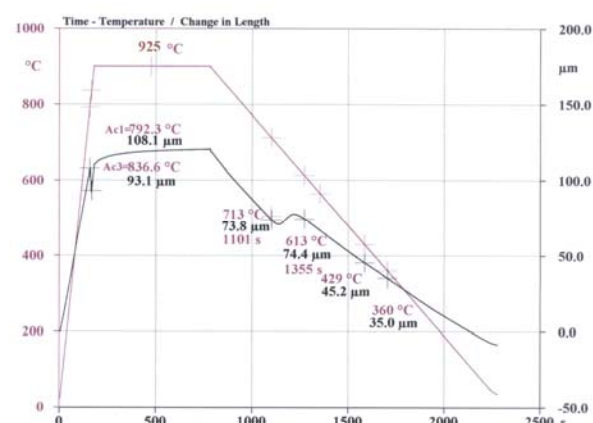


شکل (۵): نمونه ای از نمودارهای دیلاتومتری بدست آمده جهت تعیین دمای شروع و پایان استحاله مارتنزیت ( $M_s$  و  $M_p$ ): نمونه در دمای  $925^\circ\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه آستنیت و بدنبال آن در مدت زمان ۳۰۰ ثانیه تا دمای  $150-$  درجه سانتیگراد سرد شده است و (ب) ناحیه استحاله مارتنزیتی در شکل الف، که در بزرگنمایی بالاتر نشان داده شده است.

۲-۲-۳- بررسی دگرگونی مارتنزیتی در سرد کردن منقطع (سرد کردن از دمای آستنیت تا دمای محیط - نگهداری در دمای محیط به مدت ۱ دقیقه - سرد کردن تا دمای  $150-$  درجه سانتیگراد)



شکل (۳): ریز ساختار حاصله از نمونه ای که عملیات حرارتی اشاره شده در شکل ۳ بر روی آنها انجام گرفته است.



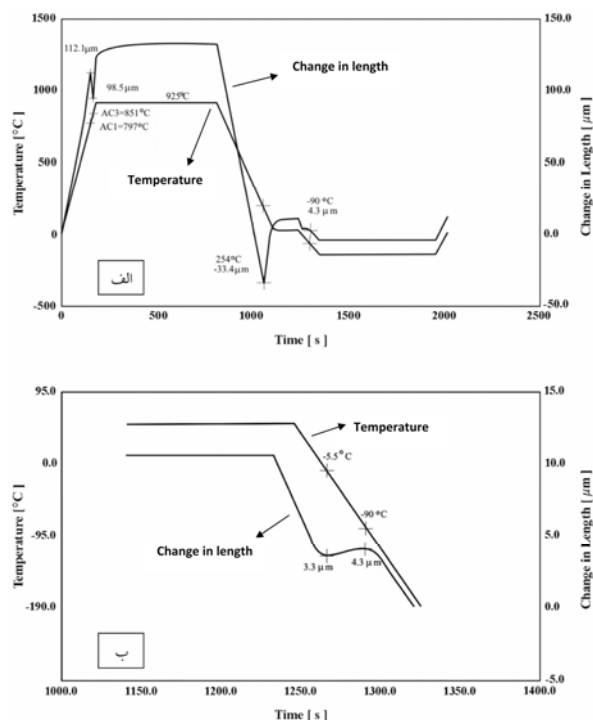
شکل (۴): نمونه ای از نمودارهای دیلاتومتری بدست آمده از فولاد  $1/2304$  که بعد از آستنیت شدن در  $925^\circ\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه در مدت زمان ۱۵۰۰ ثانیه به دمای محیط رسیده است.

### ۲-۳- بررسی دگرگونی مارتنزیتی:

۲-۳-۱- بررسی دگرگونی مارتنزیتی در سرد کردن مستقیم (سرد کردن از دمای آستنیت تا دمای  $150-$  درجه سانتیگراد)

همانطوریکه از شکل ۵ الف مشخص است، نمونه دیلاتومتری پس از آستنیت شدن در دمای  $925^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد به مدت زمان ۱۰ دقیقه، در مدت زمان ۳۰۰ ثانیه تا دمای  $150-$  درجه سانتیگراد سرد می شود. همانطوریکه مشخص است بدلیل سرعت سرد کردن بالا، استحاله پرلیتی و بینیتی در دمای بالا و میانی در فولاد انجام نمی شود و لذا با کاهش دما، کاهش طول نمونه وجود خواهد داشت تا آنکه در دمای  $254^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد، دگرگونی مارتنزیتی با افزایش طول نمونه شروع

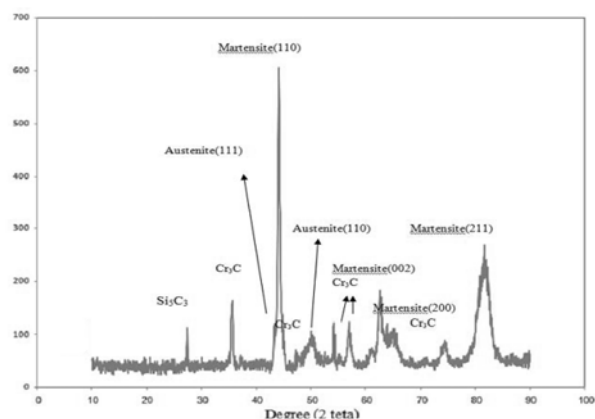
نمی‌شود. تحت این شرایط دمای  $M_s$  دوم (۵/۵- درجه سانتیگراد) وجود دارد که مربوط به شروع دوباره استحاله پس از توقف در دمای محیط و تامین نیروی محرکه لازم برای شروع استحاله مارتنزیتی است. وجود دمای  $M_s$  مرحله دوم در استحاله مارتنزیتی در حین سرد کردن تا دماهای زیر صفر، توسط محققین دیگر و در مورد فولاد D2 به اثبات رسیده است [۱۴].



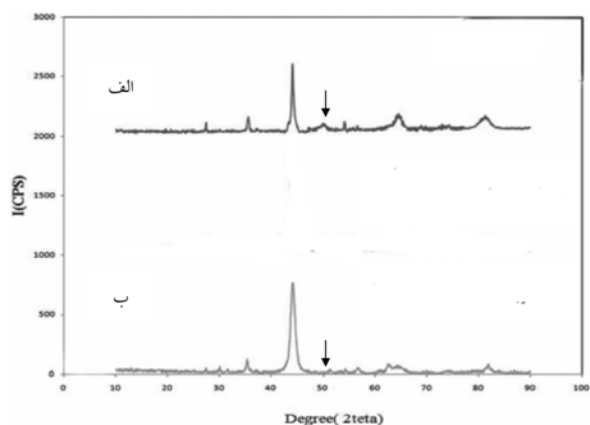
شکل (۶): نمونه‌ای از نمودارهای دیلاتومتری بدست آمده در سرد کردن منقطع: الف) نمونه در دمای  $925^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه آستنیت و بدنبال آن در مدت زمان ۱۸۰ ثانیه تا دمای محیط سرد شده و بعد از نگهداری در دمای محیط به مدت ۱ دقیقه در مدت زمان ۲ دقیقه تا دمای  $-150^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد سرد شده است و ب) ناحیه استحاله مارتنزیتی در شکل الف، که در بزرگنمایی بالاتر نشان داده شده است.

در شکل ۷ ریز ساختار دو نمونه سرد شده تا دمای محیط و سرد شده تا دمای  $-150^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است. ریز ساختار نمونه کوئنچ شده تا دمای محیط که در شکل ۷ الف آورده شده است، حضور آستنیت باقیمانده را در کنار مارتنزیت نشان می‌دهد. اما در نمونه‌ای که تا دمای  $-150^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد سرد

در شکل ۶ الف نمونه‌ای از سیکل‌های دیلاتومتری برای بررسی تاثیر عملیات کوئنچ منقطع بر دمای پایان استحاله مارتنزیتی آورده شده است. همانطوریکه از شکل مذکور مشاهده می‌گردد با افزایش دما طول نمونه به دلیل انبساط حجمی افزایش می‌یابد تا آنکه در دمای  $797^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد بدلیل تغییر فاز از ناحیه دو فازی فریت+سمانتیت به ناحیه دو فازی فریت+آستنیت، طول نمونه کاهش می‌یابد بنابراین دمای شروع استحاله آستنیتی ( $AC_1$ )،  $797^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد می‌باشد. در ادامه با افزایش دما باقیمانده فریت به آستنیت تبدیل می‌شود بنابراین دمای پایان استحاله آستنیتی ( $AC_3$ )،  $851^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد می‌باشد. پس از این با افزایش دما، طول نمونه افزایش می‌یابد. در ادامه نمونه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای  $925^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد نگهداری و سپس در مدت ۳ دقیقه تا دمای محیط سرد می‌شود که در این حین، طول نمونه کاهش خواهد یافت تا آنکه در دمای  $254^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد ( $M_s$ ) دگرگونی مارتنزیتی با افزایش طول نمونه شروع خواهد شد و با رسیدن دما به دمای محیط، دگرگونی مارتنزیتی متوقف می‌شود (نمونه کوئنچ تا دمای محیط). نمونه دیگر بعد از نگهداری در دمای محیط، در مدت ۲ دقیقه تا دمای  $-150^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد سرد می‌گردد (نمونه کوئنچ تا دمای  $-150^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد). با کاهش دما از دمای محیط طول نمونه کاهش می‌یابد تا آنکه با فراهم شدن نیروی محرکه لازم، استحاله مارتنزیتی در  $5/5^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد با افزایش طول نمونه شروع می‌شود و تا  $-90^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد افزایش طول نمونه ادامه خواهد داشت. از این پس با کاهش دما طول نمونه کاهش خواهد یافت. بنابراین دمای پایان استحاله مارتنزیتی ( $M_f$ ) این فولاد که پایان افزایش طول نمونه در حین سرد کردن است،  $-90^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد تعیین می‌شود. در شکل ۶ ب ناحیه استحاله مارتنزیتی در دمای زیر صفر در بزرگنمایی بالاتر نشان داده شده است. همچنین در حالت سرد کردن منقطع با سرد کردن فولاد از دمای محیط، استحاله مارتنزیتی بلافاصله شروع



شکل (۸): الگوی پراش پرتو X از فازهای موجود در نمونه کوئنچ تا دمای محیط.

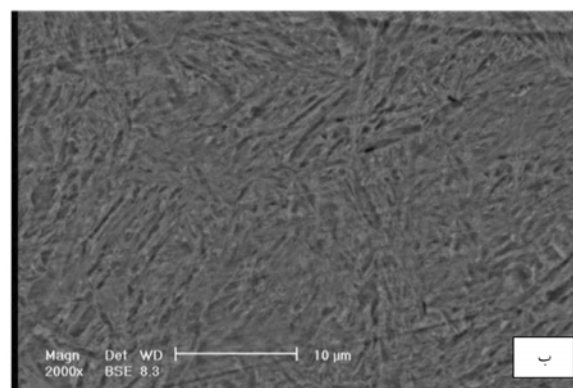
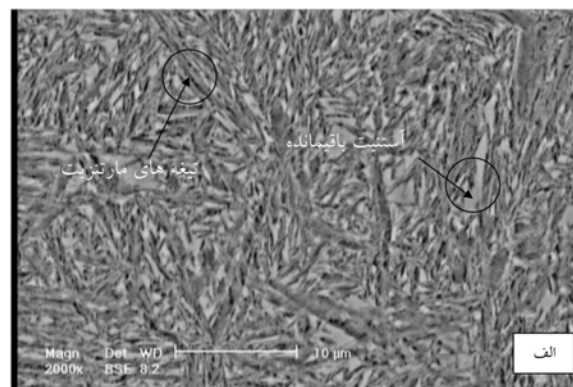


شکل (۹): الگوی پراش پرتو X برای نمونه های: الف) کوئنچ تا دمای محیط و ب) کوئنچ تا دمای ۱۵۰- درجه سانتیگراد.

### ۳-۳- نمودار CCT

در جدول ۲ دماهای شروع و پایان استحاله های دمای بالا (فریتی-پرلیتی)، دمای میانی (بینیتی) و دما پایین (مارتنزیتی)، به همراه مقادیر ریز سختی مربوط به فاز های مختلف آورده شده است. جمع بندی نتایج منجر به رسم نمودار CCT فولاد گردید که در شکل ۱۰ آورده شده است. همانطوریکه مشخص است محدوده استحاله فریتی-پرلیتی، در محدوده دمایی  $713^{\circ}\text{C}$  -  $596^{\circ}\text{C}$  و این استحاله در نمونه هایی که در مدت زمان بیشتر از ۷۲۰ ثانیه سرد شده بودند مشاهده گردید. هم چنین استحاله بینیتی در محدوده دمایی،  $468^{\circ}\text{C}$  -  $360^{\circ}\text{C}$  و در نمونه هایی که در محدوده زمانی ۷۲۰ تا ۱۲۰۰ ثانیه سرد شده بودند مشاهده گردید. دمای شروع استحاله مارتنزیتی با توجه به سرعت سرد کردن، در رنج

شده است (شکل ۷ ب) مناطق آستنیت باقیمانده در ساختار مشاهده نمی شود. همچنین سختی نمونه کوئنچ شده تا دمای ۱۵۰- درجه سانتیگراد (۹۱۵HV) در مقایسه با نمونه کوئنچ شده تا دمای محیط (۸۹۵HV) بدلیل حذف آستنیت باقیمانده، بالاتر است. افزایش در سختی، در اثر سرد کردن فولاد تا دمایی پایین تر از دمای پایان استحاله مارتنزیت توسط محققین دیگر هم اثبات شده است [۱۵-۱۶]. بررسی فازهای موجود در نمونه ها با استفاده از پراش پرتو ایکس حضور فازهای مارتنزیت، آستنیت باقیمانده و کاربیدهای آلیاژی از نوع  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ،  $\text{Si}_3\text{C}_3$  را در نمونه ها تایید می نماید (شکل ۸). همچنین همانطوریکه از شکل ۹ مشخص است در اثر سرد کردن فولاد تا دمای ۱۵۰- درجه سانتیگراد، آستنیت باقیمانده با توجه به کاهش در شدت پیکهای (۱۱۰) و (۱۱۱) آستنیت، کاهش یافته است.



شکل (۷): تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه: الف) کوئنچ تا دمای محیط و ب) کوئنچ تا دمای ۱۵۰- درجه سانتیگراد.

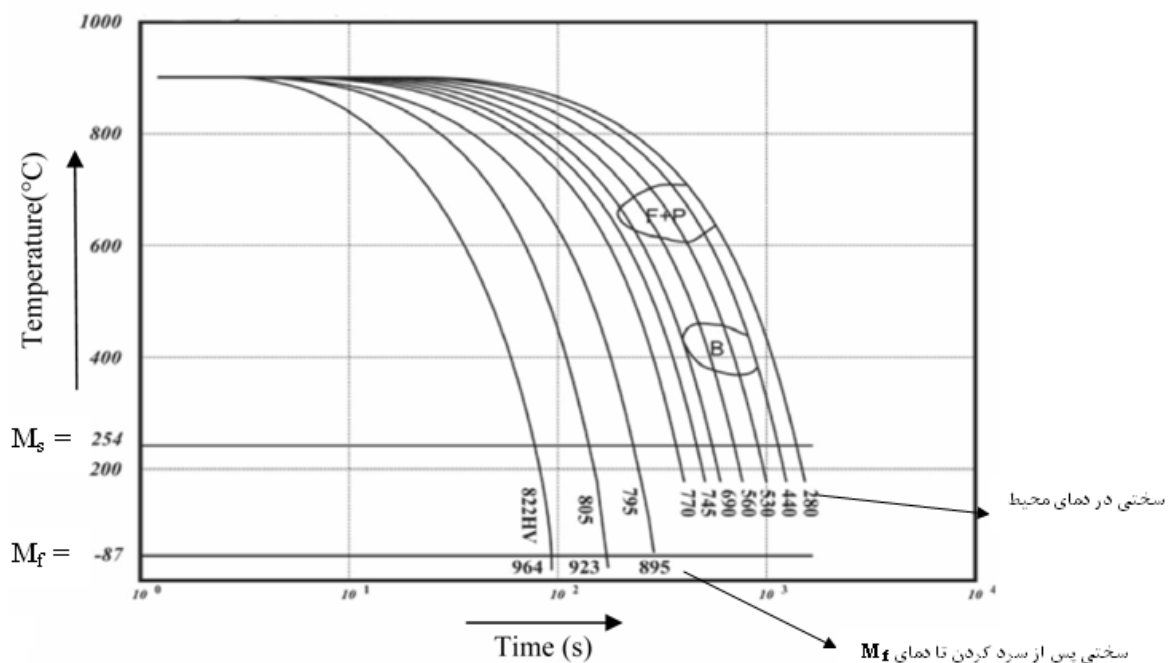
منحنی جامینی فولاد نیز در شکل ۱۱ آورده شده است همانطوریکه از منحنی مشخص است سختی پذیری فولاد مذکور بسیار بالا می باشد به نحوی که منحنی جامینی آن به صورت تقریباً خط راست است.

۲۶۸-۲۵۳°C و دمای پایان استحاله مارتنزیتی C<sup>o</sup> ۸۷- تعیین گردید. هم چنین استحاله مارتنزیتی در نمونه هایی که در زمان های سرد کردن کمتر از ۱۲۰۰ ثانیه، سرد شده اند مشاهده گردید. همچنین با توجه به جدول ۲ مشاهده می شود که با کاهش سرعت سرد کردن، سختی بدلیل ایجاد فازهای نرم کاهش می یابد.

جدول (۲): اطلاعات مربوط به دماهای شروع و پایان استحاله های فازی و ریز سختی مربوط به فولاد مورد مطالعه که در دمای ۹۲۵°C به مدت ۱۰ دقیقه آستنیته شده

و سپس در مدت زمانهای مختلف سرد گردیده است

کد نمونه	زمان سرد کردن (s)	دمای شروع استحاله پرلیت (°C)	دمای پایان استحاله پرلیت (°C)	دمای شروع استحاله بینیت (°C)	دمای پایان استحاله بینیت (°C)	دمای شروع استحاله مارتنزیت (°C)	دمای پایان استحاله مارتنزیت (°C)	ریز سختی (HV)
۱	۱۰	-----	-----	-----	-----	۲۵۳	-۸۷	۹۶۴
۲	۹۰	-----	-----	-----	-----	۲۵۴	-۸۷	۹۲۳
۳	۱۸۰	-----	-----	-----	-----	۲۵۵	-۸۷	۸۹۵
۴	۳۰۰	-----	-----	-----	-----	۲۵۷	-----	۷۹۵
۵	۴۸۰	-----	-----	-----	-----	۲۵۸	-----	۷۷۰
۶	۶۰۰	-----	-----	-----	-----	۲۶۵	-----	۷۴۵
۷	۷۲۰	۶۸۷	۶۰۷	۴۶۸	۳۸۱	۲۶۶	-----	۶۹۰
۸	۹۰۰	۶۷۹	۶۱۷	۴۶۵	۳۶۸	۲۶۶	-----	۵۶۰
۹	۱۲۰۰	۶۹۸	۵۹۶	۴۶۸	۳۶۸	۲۶۸	-----	۵۳۰
۱۰	۱۵۰۰	۷۱۳	۶۱۳	۴۲۹	۳۶۰	-----	-----	۴۴۰
۱۱	۱۸۰۰	۷۰۵	۶۴۱	-----	-----	-----	-----	۲۸۰



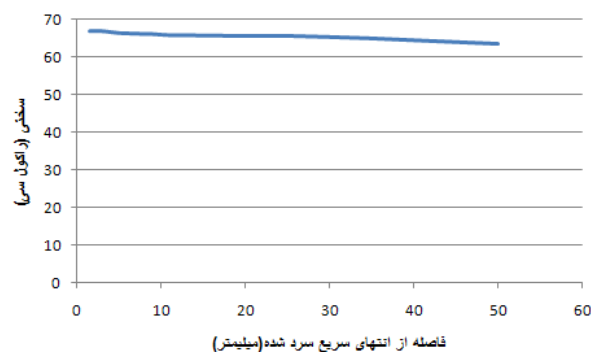
شکل (۱۰): نمودار استحاله در سرد کردن پیوسته فولاد ۱/۲۳۰۴.

۳- دمای شروع استحاله مارتنزیتی با توجه به سرعت سرد کردن، در رنج  $268-253^{\circ}\text{C}$  و دمای پایان استحاله مارتنزیتی  $87^{\circ}\text{C}$  تعیین گردید. بنابراین برای حذف یا کاهش مقدار آستنیت باقیمانده، استفاده از عملیات زیرصفر ضروری است.

۴- استحاله بینیتی در نمونه هایی که در مدت زمان ۷۲۰ تا ۱۲۰۰ ثانیه سرد شده بودند و در محدوده دمایی  $468-360^{\circ}\text{C}$  مشاهده گردید.

۵- استحاله فریتی-پرلیتی، در نمونه هایی که در مدت زمان بیشتر از ۷۲۰ ثانیه سرد شده بودند و در محدوده دمایی  $713-596^{\circ}\text{C}$  مشاهده گردید.

۶- با توجه به آزمونهای دیلاتومتری انجام شده دمای شروع و پایان استحاله مارتنزیتی در سرد کردن منقطع (سرد کردن از دمای آستنیت تا دمای محیط، نگهداری به مدت ۱ دقیقه در دمای محیط و سرد کردن تا دماهای زیرصفر) به ترتیب  $254^{\circ}\text{C}$  و  $90^{\circ}\text{C}$  درجه سانتیگراد می باشد. در این نمونه دمای شروع استحاله مارتنزیتی مرحله دوم ( $5/5$ -درجه سانتیگراد) وجود دارد که مربوط به تامین نیروی محرکه استحاله در دماهای زیرصفر است.



شکل (۱۱): منحنی جامینی فولاد ۱/۲۳۰۴.

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به آزمونهای های انجام گرفته نتایج زیر حاصل گردید:  
۱- متوسط دماهای شروع و پایان استحاله آستنیتی برای سیکل گرمایش با سرعت  $292^{\circ}\text{C/min}$  به ترتیب  $793/2^{\circ}\text{C}$  و  $845/4^{\circ}\text{C}$  تعیین گردید.

۲- در فولاد مذکور در زمان های سرد کردن کمتر از ۱۲۰۰ ثانیه، ساختار شامل مارتنزیت یا مخلوطی از مارتنزیت و فاز های دیگر است.



- [16] D. Das, A.K. Dutta, V. Toppo and K.K. Ray, "Effect of Deep Cryogenic Treatment on the Carbide Precipitation and Tribological Behavior of D2 Steel", *Journal of Materials Manufacturing Process*, Vol. 22, No. 4, pp. 474-480, 2007.

۷- جمع بندی نتایج منجر به رسم نمودار CCT گردید.

#### ۵- مراجع:

- [1] J.M.Chilton, M.J.Roberts, "Factor influencing the performance of forged hardened steel rolls", *Iron steel Eng*, Vol.58, pp. 72-82, 1981.
- [2] K. Sakabe, H. Tabe" Some Investigations on the Thermal Shock Crack of Cold Strip Mill Work Roll Materials", *Transaction.ISIJ*, Vol. 57(5), pp 836-848, 1973
- [3] J. W. Linhart, "Differential Heat Treatment Of Rolls To Improve Life And Performance ", *Iron Steel Eng* , Vol.49, pp. 69-75, 1972.
- [4] K. Kudo, "On the Rolling Contact Fatigue Test of Back-Up Roll Material", *Transaction. ISIJ*, Vol.57 (1), pp. 47-58, 1973.
- [5] H. Shimoda,Y. Arakida,k.i Hori and K. Kudo, "Effect of the Hardness on the Damages due to Rolling Contact of Back-Up Roll Materials", *Transaction .ISIJ*, Vol.50(12), pp.2061-2063, 1973.
- [6] D.Das, A.K. Dutta and K.K.Ray, "Sub-Zero Treatments of AISI D2 Steel: Part I. Microstructure and Hardness", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 9, pp. 2182-2193, 2010.
- [7] K.Amini, S. Nategh and A.Shafyei, "Influence of Different Cryotreatments on Tribological Behavior of 80CrMo12 5 Cold Work Tool Steel", *Materials & Design*, Vol. 31, No. 12, pp. 4666-4675, 2010.
- [8] C. García de Andrés, F. G. Caballero, C. Capdevila L. F. Álvarez," Application of dilatometric analysis to the study of solid-solid phase transformations in steels ",*Materials Characterization*, Vol.48, pp. 101-111, 2002.
- [9] S.H. Zahiri , C.H.J. Davies, E.V.Pereloma," Simultaneous Prediction of Austemperability and Processing Window for Austempered Ductile Iron", *Mater. Sci, Technol.*, Vol . 19, pp. 1761-1770, 2003.
- [10] N. Saunders , S. Kucherenko, X. Li, A. P. Miodownik, J. P. Schille, " A new computer program for predicting materials properties ", *J Phase Equilibria*, Vol.22, pp. 463-469,2001.
- [11] H.Baehr, J.Stafflage,"Dilatometer 805 A/D Technical Data", Baehr -YhermoAnalyse GmbH , Postfach 1105, D-32603 Hullhorst, Germany,2000.
- [12] G.E.Totten, *Steel heat treatment equipment and process design*, Taylor and Francis; 2007.
- [13] R.E. Reed-Hill, Abbaschian R. *Physical metallurgy principles*, 3 nd ed., PWS Publishing Company, Boston, 1992.
- [14] I. Wierszyłowski, J. Samolczyk, S. Wiczorek, E. Andrzejewska and A. Marcinkowska, "The Influence of Deep Cryogenic Treatment on Transformation During Tempering of Quenched D2 Steel. Studies of XRD, Structures, DSC, Dilatometry, Hardness and Impact Energy", *Defect and diffusion forum*, Vol. 273-276, pp. 731-739, 2008.
- [15] S. Zhirafar, A. Rezaeian and M. Pugh, "Effect of Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of 4340 Steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 186, No. 1-3, pp. 298-303,2007.

#### ۶- پی نوشت

- 1 Continuous Heating Transformation  
2 Continuous Cooling Transformation