

IMES

مجموعه عناوین مقالات  
اولین همایش بین المللی  
ششمین همایش مشترک  
انجمن مهندسی متالورژی ایران  
انجمن علمی ریخته گری ایران<sup>+</sup>



حامیان همایش:

گروه صنعتی فولادین ذوب آمل



ستاد ویژه توسعه فناوری نانو



گروه مینا



مرکز پژوهش متالورژی رازی



مرکز تحقیقات و نوآوری سایبا



۱۶ الی ۱۸ آبان ماه ۱۳۹۱  
دانشگاه تهران  
پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران  
دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

به نام خداوند متعال



گواهی ارائه مقاله بر

اولین همایش بین المللی و ششمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن علمی ریخته گری ایران

دانشگاه مهندسی متالورژی و مواد، مدرس، دانشگاه عالی غیرانتفاعی، تهران، 16-18 آبان ماه 1391

نماینده انجمن موز فلورزی بنیت برخواستن مکتبگی در لاله خاوری بنگال گروه موبدین (BOZ)

شماره حساب: راه، حسین علمی، شمس، شماره گشایش

گواهی می‌شود مقاله فوق مورد پذیرش گنیت علمی همایش به دستور ارائه به صورت پوستر و چاپ در مجموعه مقالات همایش قرار گرفته است. گنیت علمی همایش (شرکت و ارائه مقاله توسط نویسنده بجز مجرم شکر و نامزدی بوده، بویژه روز آفرین ایشان را در راه خاوری علمی سین عزیزان ایران، آرزو باد.

دکتر شهرام رایگان  
دبیر همایش  
گرم

دکتر حسین اشوری  
دبیر علمی همایش

## تأثير تغيير مورفولوژی بينيت بر خواص مکانیکی فولاد حاوی نیکل کروم مولیبدن (BOZ)

علیرضا حبيب زاده<sup>۱</sup>، حسین قاسمی طبسی<sup>۱</sup>، علیرضا کیانی رشید<sup>۲</sup>

### چکیده

یکی از راه های افزایش استحکام و چقرمگی در فولادها، ایجاد فاز بینیت از طریق عملیات حرارتی آستمپر کردن می باشد. در این پژوهش تاثیر تغییر مورفولوژی بینیت روی فولاد حاوی کروم، نیکل و مولیبدن (Din:34CrNiMo6) که در ساخت قطعات خودرو از قبیل میل لنگ ها، چرخ دنده ها و دسته پیستون ها کاربرد دارد، بررسی شده است. جهت دستیابی به مناسب ترین فرایند برای بررسی تغییر مورفولوژی بینیت دماهای ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سلیسیوس و مدت زمان های ۱ و ۱۰ دقیقه برای عملیات حرارتی آستمپرینگ در نظر گرفته شد. بعد از فرایند عملیات حرارتی، ریز ساختار نمونه ها با میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین با آزمون های سختی سنجی و خمش سه نقطه مشخص شد که با افزایش دمای آستمپر کردن سختی، استحکام، کرنش و انرژی خمشی نمونه های آستمپر شده به مدت ۱۰ دقیقه، کاهش می یابد و در نمونه یک دقیقه، سختی و استحکام کاهش اما کرنش و انرژی خمشی افزایش می یابد که دلیل آن افزایش حجم ساختار بینیتی است و کاهش آن در نمونه ۱۰ دقیقه به دلیل تغییر ساختار بینیت پائینی به بینیت بالایی است. در واقع نمونه های آستمپر شده به مدت ۱۰ دقیقه در دماهای مختلف که حجم ساختار بینیتی در آن ها تقریباً ثابت است، نشان دهنده تغییر خواص مکانیکی با تغییر مورفولوژی بینیت می باشند. با توجه به نتایج آزمون ها مشاهده شد که قابل انعطاف ترین نمونه ها به ترتیب عبارتند از قطعاتی که دارای ریزساختاری از نوع بینیت پائینی، مارتنزیت تمپر شده و بینیت بالایی را دارا باشند. همچنین نمونه آستمپر شده به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۳۰۰°C که ریزساختاری شامل بینیت پائینی و مارتنزیت دارد، بهترین خواص مکانیکی را از خود نشان می دهد.

کلمات کلیدی: آستمپر کردن، بینیت، مورفولوژی، استحکام خمشی، BOZ.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی مهندسی مواد-متالورژی صنعتی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی مهندسی مواد-متالورژی صنعتی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد

## مقدمه

فولاد BOZ (DIN:34CrNiMo6) از خانواده فولادهای حاوی نیکل، کروم، مولیبدن می باشد که بعد از عملیات حرارتی (سیکل صنعتی کوئنچ-تمپر) استحکام کششی آن به  $900-1180 \text{ N/mm}^2$  می رسد. این خانواده از فولادها علاوه بر استحکام کششی بالا، شکل پذیری خوب، مقاومت به ضربه بالا و سختی پذیری عالی، همچنین از مقاومت به سایش قابل قبولی برخوردارند. این فولادها مناسب جهت ساخت قطعات با سطح مقطع بزرگ تحت تنش های بالا در هواپیما و اتومبیل نظیر محورها، چرخ دنده ها، میل لنگ ها، دسته پیستون ها، طوقه ها و سایر قطعاتی هستند که استحکام و داکتیلیتی بالا را همزمان نیاز دارند. با توجه به کاربردهای این فولاد برای رسیدن به استحکام خستگی و سختی سطحی بالا، عمدتاً از فرآیند نیتروre کردن استفاده می شود [۱-۲].

ترکیبی از استحکام و چقرمگی بالا هدف اصلی در طراحی و توسعه فولادهای کربن متوسط کم آلیاژ با استحکام بالا بوده است. در یک مقدار ثابت کربن می توان خواص مکانیکی بهتری را در ریزساختار بینیت پایینی نسبت به ریزساختار مارتزیت تمپر شده مشاهده نمود [۳-۵]. برای رسیدن به این مهم عملیات حرارتی آستمپر کردن با شرایط مختلف بهبود و توسعه یافته است. این فرآیند که شامل آستیته کردن در دمایی بین  $790-915^\circ\text{C}$  و نگهداری در این دما و سپس سرد کردن در حمام نمک مذاب با دمایی بین  $250-550^\circ\text{C}$  و سپس سرد کردن تا دمای اتاق در هوا می باشد، نسبت به سیکل صنعتی این فولاد کوتاه تر بوده و از لحاظ اقتصادی نیز به صرفه تر است [۶-۸]. هدف از آستمپر کردن به جای کوئنچ-تمپر عبارت است از افزایش استحکام به ضربه و انعطاف پذیری برای یک سختی مشخص و ثابت و همچنین حذف یا کاهش احتمال ترک برداشتن، تغییر شکل دادن و یا ایجاد تنش های داخلی در ضمن عملیات حرارتی، که این اهداف در فرآیند آستمپر کردن با کوئنچ در حمام نمک مذاب و کمینه کردن شوک های حرارتی حاصل می شود [۹-۱۱].

ریزساختار حاصل از فرآیند آستمپر کردن، بینیت می باشد. هرچند تلاش های بسیاری برای به عمومیت درآوردن تعریف بینیت شده است، غالب ترین و مناسب ترین توصیفی که یافت می شود عبارت است از ریزساختاری شامل مخلوط غیر لایه ای از فریت و سمنتیت، که در دو دسته بینیت بالایی و بینیت پایینی تقسیم بندی می شود. بینیت پایینی با انجام استحاله در دماهای پایین و نزدیک  $M_s$  و بینیت بالایی با انجام استحاله در دماهای بالاتر و زیر دمای تشکیل پرلیت به وجود می آید. اگر فرآیند دکربوره شدن یک صفحه فریتی غالب باشد بینیت بالایی و اگر رسوب سمنتیت از فریت سریع تر باشد بینیت پایینی به وجود خواهد آمد. در واقع تفاوت عمده بینیت بالایی و پایینی در نوع رسوب کارید می باشد که باعث به وجود آمدن اختلاف فاحش در خواص مکانیکی این دو ریزساختار می شود [۱۲-۱۳]. به وجود آمدن بینیت در دماهای پایین تر باعث تشکیل صفحات بسیار ریز بینیت می شود که این ریز شدن ساختار باعث افزایش استحکام فولاد مورد نظر به واسطه کاهش عیوب می شود. با کاهش دما و تقریباً به طور خطی استحکام به مقادیر خیلی بالایی می رسد. در بخشی از گستره دمایی استحاله بینیت، در کنار این استحکام زیاد شکل پذیری مناسبی نیز وجود دارد [۱۴-۱۵].

هرچند تاکنون پژوهش های زیادی در زمینه عملیات حرارتی آستمپر کردن فولادها صورت گرفته است ولی روی این دسته از فولادها که غالباً به صورت کوئنچ-تمپر مورد استفاده قرار می گیرند، تحقیقات کافی انجام نشده است. با توجه به اینکه نتیجه فرآیند آستمپر کردن در مدت زمان ۱۰ دقیقه در دماهای مختلف برای این فولاد حجم تقریباً ثابتی از

ريزساختار بينيتي مي باشد مي توان تاثير تغيير مورفولوژي اين ريزساختار را در اين تحقيق مشاهده کرد و با نتيجه اين فرآيند در مدت زمان يك دقيقه که حجم ريزساختار بينيتي افزايش پيدا مي کند، مقايسه نمود.

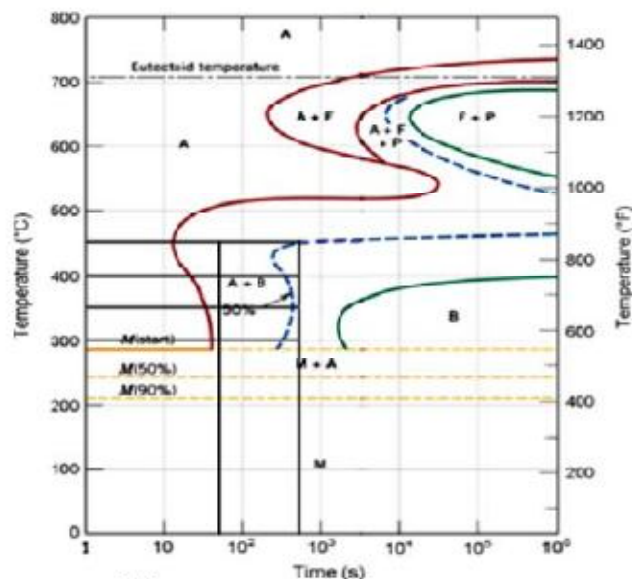
## مواد و روش تحقيق

فولاد مورد استفاده در اين پروژه به شکل ميلگرد به قطر ۲۰ ميليمتر و از خانواده فولادهای کربن متوسط کم آلياژ با استحکام بالا مي باشد که نام تجاري آن BOZ و در استاندارد DIN، 34CrNiMo6 نام دارد. براي اطمینان از درستي نوع فولاد مورد استفاده، آزمون طيف سنجي انتشاري (کوانتومتری) انجام شد. ترکيب شيميايي به دست آمده به شرح جدول ۱ مي باشد که با استاندارد فولاد BOZ مطابقت مي کند.

جدول ۱- ترکيب شيميايي فولاد مورد استفاده در اين پژوهش

نماد عنصر آلياژي	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
درصد وزني عنصر آلياژي	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۶۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۱/۴۹	۱/۴۵	۰/۲	۰/۰۵

نمونه های تهیه شده ابتدا در دمای ۹۰۰ درجه آستينيه شده و سپس با توجه به نمودار TTT و دمای Ms به دست آمده براي اين آلياژ که ۲۹۸°C مي باشد در دانه دمایی وسيعی که مورفولوژي های متفاوتی از بينيت و مارتزيت به وجود مي آيد، آستمپر شدند [۱۶]. نمونه ها در در دماهای ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ °C و مدت زمان های ۱ و ۱۰ دقيقه در کوره حمام نمک مذاب قرار گرفتند و سپس در هوا سرد شدند. نمودار TTT فولاد AISI4340 که در واقع همان فولاد 34CrNiMo6 در استاندارد AISI را در زير مشاهده مي کنيد.



شکل ۱- دیاگرام TTT فولاد AISI4340 [۱۷]

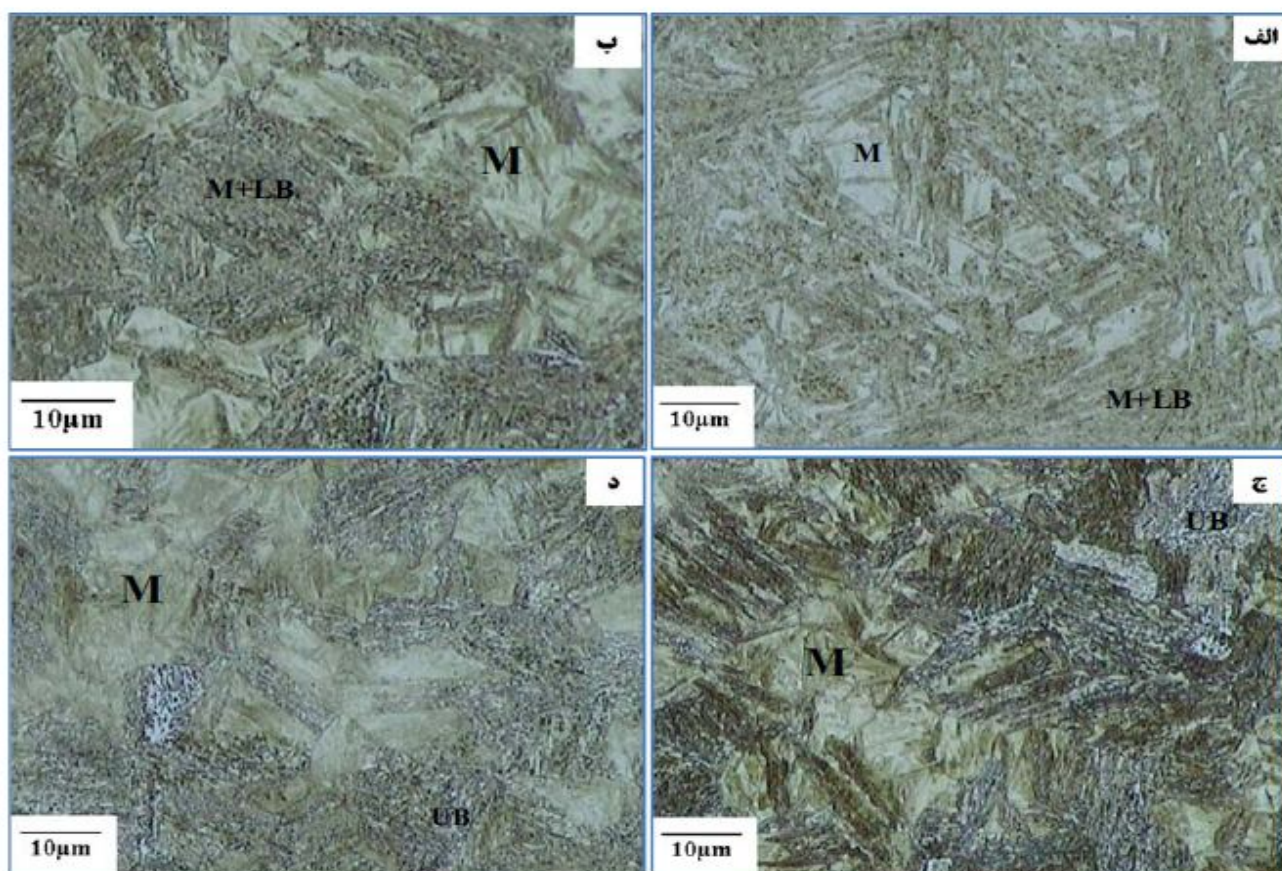
پس از فرايند عمليات حرارتي، نمونه ها متالوگرافي و سپس در محلول نايټال ۲ درصد حکاکي شد و توسط ميکروسکوپ های نوري ريزساختار آنها به دقت مورد مطالعه گرفت. آزمون سختي سنجي براي نمونه ها با توجه به مقياس HRC و

همچنین میکروسختی برای تشخیص فازها، انجام شد. آزمون خمش سه نقطه نیز با توجه به کاربردهای فولاد مورد نظر توسط دستگاه Zwick و استاندارد E290ASTM انجام گردید [۱۸].

## نتایج و بحث

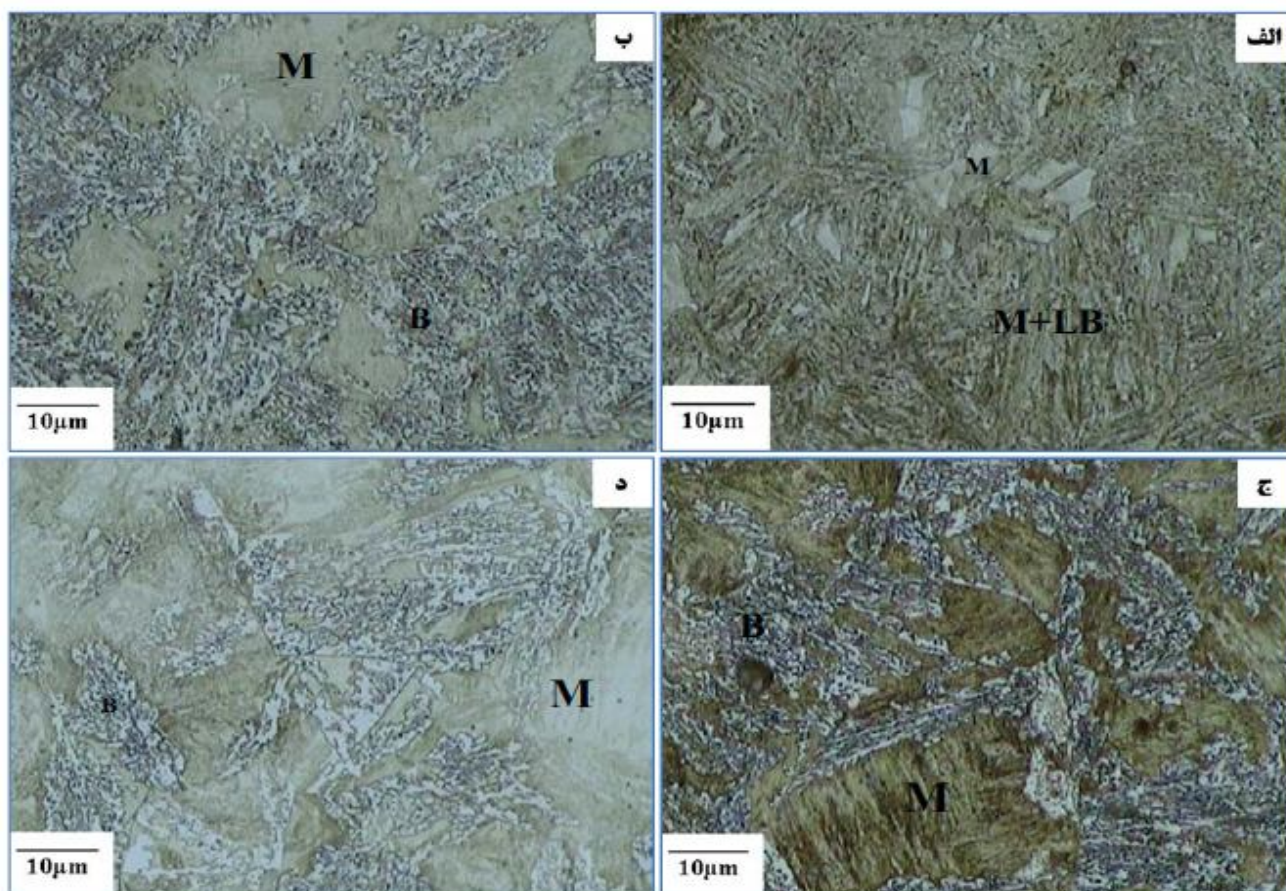
### الف) ریزساختار

شکل ۲ ریزساختار میکروسکوپی حاصل از عملیات متالوگرافی پس از اچ کردن در نایتال ۲ درصد مربوط به نمونه های آستمپر شده در درماهای ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۱ دقیقه می باشد. با توجه به دیاگرام TTT و همان طور که در تصاویر مشخص است با افزایش دما در مدت زمان ۱ دقیقه در فرآیند آستمپر کردن درصد حجمی فاز مارتنزیت کاهش و درصد حجمی ساختار بینیت افزایش می یابد. همچنین مورفولوژی آن ها نیز تغییر کرده و با افزایش دما ریزساختار به سمت درشت شدن تمایل پیدا می کند. در تصویر A مقدار بسیار کمی از آستنیت به بینیت تبدیل شده و بقیه آستنیت تحول نیافته با سرد کردن تا دمای محیط تبدیل به مارتنزیت می شوند. با افزایش دما حجمی از آستنیت که طی استحاله همدمما به بینیت تبدیل می شود افزایش یافته و ریزساختار از حالت بسیار ریز و غیر قابل تفکیک در دمای ۳۰۰ درجه به ریز ساختاری درشت و تقریباً قابل تفکیک در دمای ۴۵۰ درجه تبدیل می شود.



شکل ۲- ریزساختار میکروسکوپی حاصل از عملیات متالوگرافی پس از اچ کردن در نایتال ۲ درصد، نمونه های آستمپر شده به مدت ۱ دقیقه و در درماهای الف) ۳۰۰°C، ب) ۳۵۰°C، ج) ۴۰۰°C، د) ۴۵۰°C.

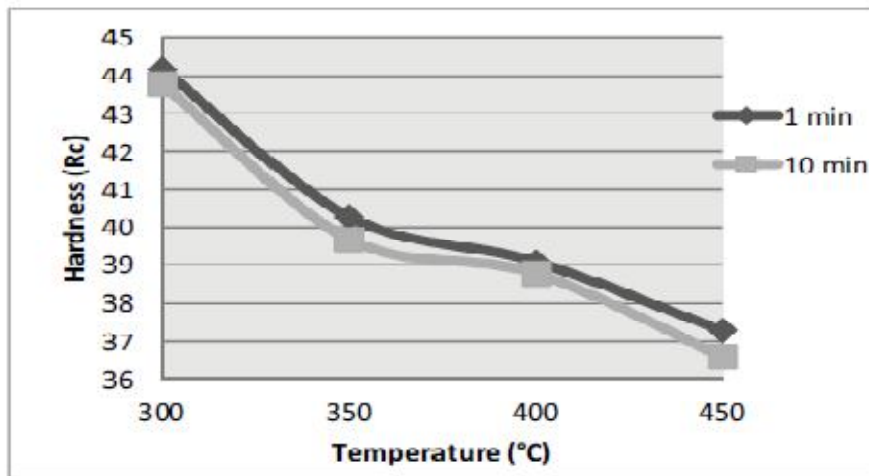
شکل ۳ ریزساختار میکروسکوپی حاصل از عملیات متالوگرافی پس از اچ کردن در نایتال ۲ درصد مربوط به نمونه های آستمپر شده در درماهای ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ دقیقه می باشد. با توجه به دیاگرام TTT و همان طور که در تصاویر ب، ج و د مشاهده می شود با افزایش دما در مدت زمان ۱۰ دقیقه در فرآیند آستمپر کردن درصد حجمی ساختار بینیت (نواحی غیر قهوه ای) تقریباً ثابت می ماند و تنها مورفولوژی این ساختار تغییر پیدا کرده و به سمت درشت شدن تمایل پیدا می کند. در واقع این پدیده، همان تبدیل بینیت پایینی به بالایی است که با افزایش دمای استحاله صورت می گیرد.



شکل ۳- ریزساختار میکروسکوپی حاصل از عملیات متالوگرافی پس از اچ کردن در نایتال ۲ درصد، نمونه های آستمپر شده به مدت ده دقیقه و در درماهای الف) ۳۰۰°C (ب) ۳۵۰°C (ج) ۴۰۰°C (د) ۴۵۰°C.

### ب) نتایج حاصل از سختی سنجی

شکل ۴ تغییرات سختی را برحسب دمای آستمپر کردن در دو حالت ۱ دقیقه و ۱۰ دقیقه نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش دمای آستمپر کردن سختی نیز کاهش می یابد. این رفتار می تواند مربوط به تغییر مورفولوژی و تبدیل بینیت پایینی به بینیت بالایی باشد. در بینیت پایینی به دلیل پایین بودن دمای استحاله و عدم انجام نفوذ در زمان های بسیار کم مثل ۱ یا ۱۰ دقیقه، فریت بینیتی غنی از کربن می ماند و این می تواند توضیحی برای سختی بیشتر بینیت پایینی باشد [۱۹]. همچنین با افزایش زمان نیز به دلیل تشکیل بینیت بیشتر و مارتنزیت کمتر، سختی کاهش می یابد.

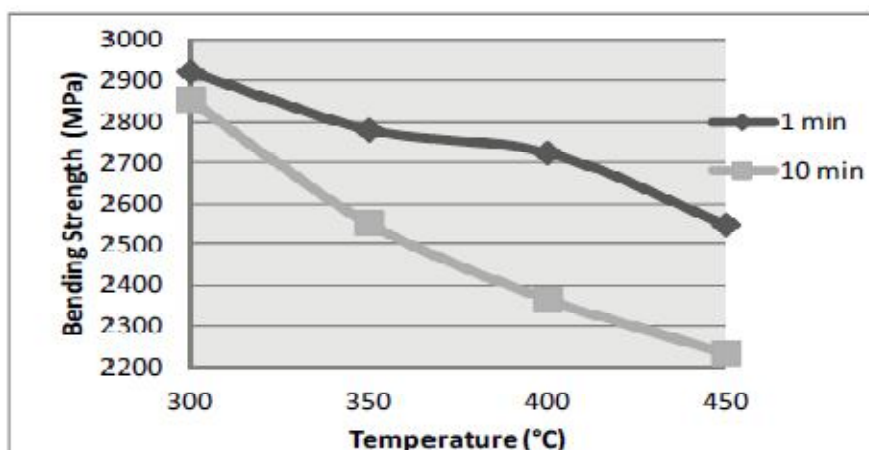


شکل ۴- نمودار تغییرات سختی بر حسب دمای آستمپر کردن.

ج) نتایج حاصل از آزمون خمشی سه نقطه

#### استحکام خمشی

شکل ۵ تغییرات استحکام خمشی را بر حسب دمای آستمپر کردن در دو حالت ۱ و ۱۰ دقیقه نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش دمای آستمپرینگ استحکام خمشی این فولاد کاهش می یابد و البته این کاهش برای تنش تسلیم نیز اتفاق می افتد. این کاهش مربوط به تغییر مورفولوژی بینیت از بینیت پایینی به بینیت بالایی می باشد. نکته ای مهمی که از این نمودار می توان استخراج کرد اختلاف بسیار کم استحکام خمشی در نمونه آستمپر شده در دمای  $300^{\circ}\text{C}$  و مدت زمان های ۱ و ۱۰ دقیقه می باشد که این اختلاف با افزایش دما شدیداً افزایش پیدا کرده است.



شکل ۵- نمودار تغییرات استحکام خمشی بر حسب دمای آستمپر کردن.

با توجه به پایین بودن دمای تشکیل بینیت پایینی و انجام نگرفتن نفوذ در این دما و مدت زمان های کم ۱ و ۱۰ دقیقه، بینیت پایینی با فریت بینیتی سوزنی شکل، تشکیل می شود و این سبب تقسیم شدن دانه های آستنیت اولیه به بخش های کوچک

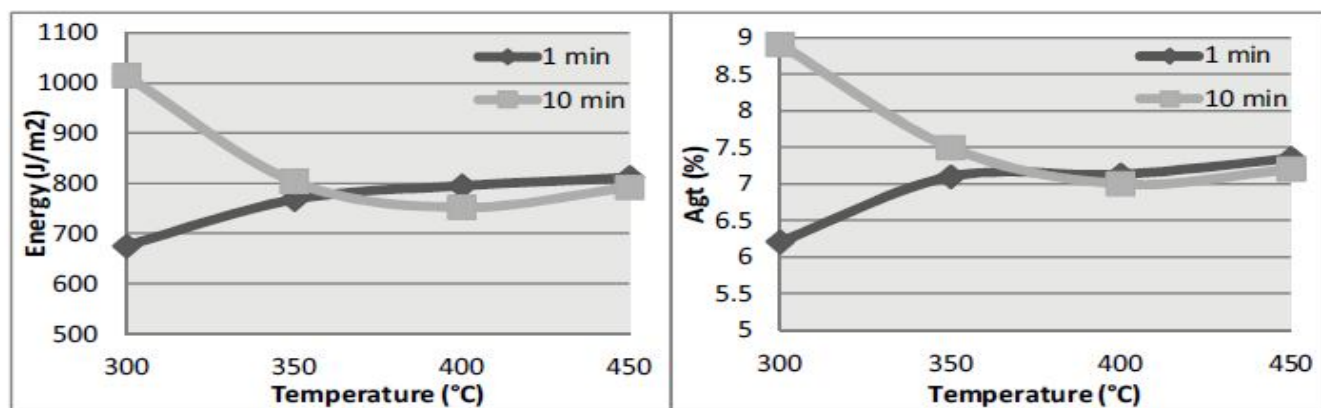


تر می شود. این امر باعث کاهش اندازه بسته های مارتنزیت که پس از استحاله ناقص آستنیت به بینیت پایینی ایجاد شده است، خواهد شد. نازک شدن تیغه های بینیتی و کاهش اندازه بسته های مارتنزیت مطابق با قانون Hall-Pitch منجر به افزایش استحکام فولاد می شود [۲۰-۲۱]. علاوه بر این در بینیت پایینی اندازه کاربیدها ریزتر و توزیع آن ها یکنواخت تر می باشد [۲۲]. همچنین چگالی نابه جایی ها و احتمال تجمع نابه جایی ها در بینیت پایینی بیشتر است [۲۳].

### کرنش و انرژی خمشی

شکل ۶ تغییرات کرنش و انرژی خمشی را بر حسب دمای آستمپر کردن در دو حالت ۱ و ۱۰ دقیقه نشان می دهد. همان طور که در شکل ها نیز مشاهده می شود برای نمونه های آستمپر شده به مدت ۱۰ دقیقه، با افزایش دما، کرنش و انرژی خمشی سیر کاهشی پیدا کرده که این مربوط به همان تغییر مورفولوژی بینیت، از بینیت پایینی به بالایی می باشد. در بینیت پایینی ذرات کاربیدی ریزتر می باشند و ترک های احتمالی که در ذرات کاربیدی به وجود می آیند به سختی پیشرفت می کنند که این باعث افزایش استحکام شکست و افزایش سطح زیر منحنی تنش-کرنش و نتیجتاً افزایش کرنش و انرژی خمشی خواهد شد [۱۳]. اما افزایش اندکی که در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  دیده می شود و سیر کاهشی را برهم می زند، به دلیل کاهش اندکی در حجم بینیت تشکیل شده می باشد که با توجه به دیاگرام TTT این فولاد قابل درک می باشد.

در مورد نمونه های آستمپر شده به مدت ۱ دقیقه، مشاهده می شود که با افزایش دما کرنش و انرژی خمشی آن ها افزایش پیدا می کند. در اینجا می توان گفت هرچند با افزایش حجم بینیت نسبت به مارتنزیت تمپر شده جذب انرژی افزایش پیدا می کند، اما تبصره این مطلب نوع بینیت تشکیل شده می باشد، در واقع بینیت پایینی است که انعطاف پذیری بسیار بیشتری نسبت به ماتنزیت تمپر شده دارد، اما جذب انرژی بینیت بالایی حتی اندکی از مارتنزیت تمپر شده کمتر می باشد [۲۴-۲۶]. به همین دلیل است که در نمودارهای شکل ۶ مشاهده می کنیم که کرنش و انرژی خمشی در دماهای آستمپر کردن  $400^{\circ}\text{C}$  و  $450^{\circ}\text{C}$  درجه سلسیوس، در نمونه های آستمپر شده به مدت ۱ دقیقه که درصد ماتنزیت تمپر شده بیشتر و بینیت بالایی کمتری نسبت به نمونه آستمپر شده به مدت ۱۰ دقیقه، را دارند، بیشتر می باشد. نکته مهمی که این دو نمودار بیان می کند اختلاف بسیار زیاد کرنش و انرژی خمشی برای نمونه آستمپر شده در دمای  $300^{\circ}\text{C}$  و مدت زمان های ۱ و ۱۰ دقیقه می باشد.



شکل ۶- نمودارهای تغییرات کرنش و انرژی خمشی بر حسب دمای آستمپر کردن.

## نتیجه گیری

- مورفولوژی بینیت در نمونه های آستمپر شده در دمای ۳۰۰ و ۳۵۰ درجه سلسیوس، بینیت پایینی بوده و برای نمونه های آستمپر شده در دمای ۴۰۰ و ۴۵۰ درجه سلسیوس بینیت بالایی می باشد.
- برای نمونه های آستمپر شده به مدت ۱۰ دقیقه درصد حجمی بینیت تشکیل شده تقریباً ثابت بوده و با افزایش دما تنها مورفولوژی بینیت تغییر می کند، با افزایش دما از ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه سلسیوس، تنش تسلیم، استحکام خمشی، سختی، کرنش و انرژی خمشی کاهش می یابد.
- برای نمونه آستمپر شده به مدت ۱ دقیقه، با افزایش دما علاوه بر تغییر مورفولوژی بینیت، حجم آن نیز افزایش پیدا می کند. کرنش و انرژی خمشی نیز با افزایش دما کاهش پیدا یافته و به مقدار اندک افزایش پیدا می کند. اما سختی و استحکام همچنان کاهش می یابد.
- نمونه آستمپر شده در دمای ۳۰۰°C به مدت ۱۰ دقیقه که ریز ساختاری شامل بیش از ۵۰ درصد بینیت پایینی و مابقی مارتزیت، بهترین خواص مکانیکی را از خود نشان می دهد. در بحث استحکام و سختی با اینکه نسبت به حالت ۱ دقیقه در همین دما استحکام کمتری دارد، اما این اختلاف بسیار کم بوده و در عوض در بحث کرنش و انرژی خمشی با اختلاف بسیار زیاد از حالت یک دقیقه پیشی می گیرد. همچنین در مقایسه با سایر دماهای آزمایش شده نیز بهترین خواص مکانیکی را می توان در دمای ۳۰۰°C مشاهده نمود. در واقع می توان گفت با سختی و استحکام مشابه، بیشترین انعطاف پذیری را می توان در نمونه آستمپر شده در دمای ۳۰۰°C و به مدت ۱۰ دقیقه، مشاهده کرد.

## مراجع

- [1] Unterweiser, P.M., Heat Treater's Guide: Standard Practices and Procedures for Steel, 1982, OH, ASM International, Materials Park.
- [2] Prabhudev, K.H., Handbook of Heat Treatment of Steels, 2000, New York, McGraw-Hill.
- [3] Smith, W.F., Structure and Properties of Engineering Alloys, 1981, New York, McGraw-Hill.
- [4] Krauss, G., Steels Processing, Structure, and Performance, 2005, OH, ASM International, Materials Park.
- [5] Tartaglia, J., Lazzari, k., Hui, G., and Hayrynen, K. "A comparison of mechanical properties and hydrogen embrittlement resistance of austempered vs quenched and tempered 4340 steel", 2008, Met. Trans. A., 39A, 559-562.
- [6] Keough, J.R., Laird, W.J., Godding, A.D., ASM Metals Handbook, vol. 4, Heat Treating, 1991, OH, ASM International, Materials Park.
- [7] Krauss, G., Steels Heat Treatment and Processing Principles, 1990, OH, ASM International, Materials Park.
- [8] Brooks, Ch.R., Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels, 1996, OH, ASM International, Materials Park.

[۹] محمد علی گل‌عذار، اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها، ۱۳۸۰، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.

[10] Peterman, G.L., "Aus – bay Quenching: High Strength without Distortion", Met. Prog., 1966, 73-76.

[11] Klopp, W.D., Aerospace Structural Metals Handbook, Vol. 1, Ferrous alloys, 1987.

[12] Honeycombe, R.W.K., Bhadeshia, H.K.D.H., Steels Microstructure and Properties, 2<sup>nd</sup> edn., 1995, Metallurgy & Materials Science, Edward Arnold.

[13] Bhadeshia, H.K.D.H., Bainite in Steels, 2<sup>nd</sup> edn., 2001, London, IOM Communications Ltd.

[14] Caballero, F.G., Bhadeshia, H.K.D.H. "Very Strong Bainite", Solid State and Materials Science 8, 2004, 251-257.

[15] Dieter, G.E., Mechanical Metallurgy, 1976, McGraw-Hill series in materials science and engineering.

[16] Totten, G.E., Howas, M.A.H., Steel Heat Treatment Handbook, 1997, New York, Marcel Dekker, First Indian Reprinted (2005).

[17] Chandler, H. Heat Treaters' Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels, 2<sup>nd</sup> edn., 1995, ASM International.

[18] ASTM E290, Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility, 1990.

[19] Pickering, F.B., Transformation and Hardenability in Steels, 1967, Chicago, Climax Molyb. Co.

[20] Lanzillotto, C.A.N., Pickering, F.B., Metal Science, 16, 1982, 371–382.

[21] Tomita, Y. "Improvement in Lower Temperature Mechanical Properties of 0.4 pct C-Ni-Cr-Mo Ultrahigh Strength Steel with the Second Phase Lower Bainite", Met. Trans. A, 14A., 1983, 485-492.

[22] Bakhtiari, R., Ekrami, A. "The Effect of Bainite Morphology on the Mechanical Properties of a High Bainite Dual Phase (HBDP) steel", J. Materials Science and Engineering A, 525, 2009, 159–165.

[23] Sajjadi, S.A., Zebarjad, S.M., "Isothermal Transformation of Austenite to Bainite in High Carbon Steels", J. Materials Processing Technology, 189, 2007, 107–113.

[24] Zhang, X.Z., Knott, J.F., "Cleavage Fracture in Bainitic and Martensitic Microstructure", Acta. Mater., 47., 1999, 3483-3495.

[25] Tomita, Y., "Heat Treatment for Improvement in Lower Temperature Mechanical Properties of 0.4 pct C- Cr- Mo Ultrahigh Strength Steel", Met. Trans. A, 14A., 1983, 2387-2393.

[26] Tomita, Y., "Modified Heat Treatment for Lower Temperature Improvement of the Mechanical Properties of Two Ultrahigh Strength Low Alloy Steels", Met. Trans. A, 16A., 1985, 83-91.