

## تأثیر شرایط عملیات حرارتی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI 410 بر انرژی

## ضربه در دمای زیر صفر

کیومرث یوسفی<sup>۱</sup>، یوسف پاینده<sup>۲</sup>، بهمن میرزاخانی<sup>۳</sup>، مهدی رئوفی<sup>۴</sup>، وحید حسن بیگی<sup>۴</sup>

y-payandeh@Araku.ac.ir

## چکیده

در صنایع نفت و گاز به طور گسترده از فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۴۱۰ به دلیل مقاومت به خوردگی در محیط های ترش بکار می رود. انرژی ضربه پایین این فولاد بویژه در دمای زیر صفر نسبت به سایر فولاد های زنگ نزن، استفاده از این فولاد را در صنعت محدود ساخته است. انرژی ضربه مورد نیاز این فولاد طبق استاندارد API-6a در دمای ۱۸- حداقل ۲۰ ژول می باشد. در این پژوهش اثر شرایط مختلف عملیات حرارتی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی فولاد ۴۱۰ مورد بررسی قرار گرفته است. پس از انتخاب ترکیب شیمیایی و تهیه فولاد، نمونه های بریده شده در دمای ۹۱۰ درجه سانتی گراد آستنیته گشته و در روغن کوئنچ شدند. سپس عملیات تمپر یک و دو مرحله‌ای، در دماها و زمان‌های مختلف طبق استاندارد روی فولاد انجام شد. نمونه ها تحت بررسی های ریزساختاری و سختی سنجی به روش راکولسی قرار گرفتند. با بررسی نتایج، شرایط مناسب عملیات حرارتی انتخاب شد. به منظور انجام آزمون های ضربه در دمای ۱۸- درجه سانتی گراد و کشش در دمای محیط، نمونه‌هایی تحت این شرایط عملیات حرارتی شدند. ریزساختار نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز نقطه ای EDS مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان می دهد، وجود کاربید های زنجیره ای و نحوه توزیع آنها بر انرژی ضربه تاثیر منفی داشته اند. دلیل این مساله، ضعیف شدن مرزدانه ها و کاهش نیروی محرکه شکست می باشد. بررسی ریز ساختاری نمونه نشان داد که افزایش زمان تمپر دوم می تواند منجر به ظریف تر شدن تیغه های مارتنزیتی شده و در نهایت افزایش انرژی ضربه شود. در نهایت با انتخاب مناسبی از زمان در دو مرحله‌ی تمپر، سیکل‌های بهینه نهایی برای رسیدن به خواص ضربه ای مناسب تعیین شد.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن مارتنزیتی، عملیات حرارتی، تمپر دو مرحله‌ای، خواص مکانیکی

## ۱- مقدمه

فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، به دلیل خواص مکانیکی خوب، مقاومت به خوردگی و مقاومت به اکسیداسیون بالا به طور وسیعی در صنایع مختلف استفاده می‌شوند [۱]. این فولادها به از دست دادن چقرمگی، ناشی از تردی مرز دانه به دلیل رسوب کاربید کروم، حساس هستند [۳]. یکی از مهمترین فولاد های زنگ نزن مارتنزیتی فولاد ۴۱۰ می باشد که قابلیت عملیات حرارتی بالایی دارد و پرمصرف ترین فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی می باشد و در قطعات شیرالات سرچاهی، محور پمپ، موتورهای جت و.. مورد استفاده قرار می

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

۲- استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

۳- استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

۴- کارشناس ارشد متالورژی، شرکت ماشین سازی اراک

گیرد [۸] این فولاد در صنایع نفت و گاز به دلیل تامین شرایط خوردگی در محیط‌های ترش بر اساس استاندارد NACE MR0175 در ساخت تجهیزات سرچاهی بکار می‌رود [۲]. در این فولاد میزان کربن می‌تواند تا ۰/۱۵ درصد وزنی افزایش یابد و مقدار کروم بین ۱۱/۵ تا ۱۳/۵ درصد می‌باشد. فورج پذیری فولاد ۴۱۰ به دلیل استحکام بالا در دماهای بالا نسبتاً "ضعیف است و ایجاد تغییرات سطح مقطع آن دشوار می‌باشد. همچنین حساسیت زیادی نسبت به دماهای فورج دارد بطوری که بالا بودن دمای فورج می‌تواند سبب رشد دانه آستنیت اولیه و کاهش تافنس ضربه شود و پایین بودن دما نیز احتمال ترک خوردن قطعات را افزایش می‌دهد. ریزساختار آلیاژ شامل مارتنزیت تیغه‌ای، فریت دلتا همراه با کسر حجمی کوچکی از آستنیت باقی مانده<sup>۵</sup> است. ترکیب شیمیایی، پایداری آستنیت باقی مانده را در این فولادها تعیین می‌کند. علاوه بر این، عملیات حرارتی تمپر<sup>۶</sup> دو مرحله‌ای، با تغییر زمان تمپر، به منظور بهبود قابل توجه چقرمگی این مواد [۱۰] مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق فولاد AISI 410 مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. از آنجاییکه هدف، بالا بردن انرژی ضربه فولاد می‌باشد با توجه به تاثیر عناصر آلیاژی بر انرژی ضربه فولاد، با افزودن عناصر مولیبدن و نیکل، به آنالیز استاندارد، ترکیب شیمیایی مناسب تری برای کمک به هدف، انتخاب شد [۹ و ۱۱]. ترکیب شیمیایی فولاد در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد مورد مطالعه (درصد وزنی)

عنصر	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	S	P	Cu	V	Al
درصد	۰/۱۳	۱۲/۱۶	۰/۷۹	۰/۳	۰/۴۳	۰/۷۱	۰/۰۰۷	۰/۰۱۸	۰/۰۸	۰/۰۸۵	۰/۰۳۰

این فولاد طی مراحل ذوب در کوره قوس و کنورتور تحت خلاء، بصورت شمش دوازده وجهی و بطول ۱۵۰۰ میلی متر ریخته شد. سپس شمش بوسیله پرس ۱۶۰۰ تن هیدرولیکی در بازه دمایی ۱۲۰۰ - ۹۰۰ درجه سانتی گراد کوبش و آهنگری شد و به میلگرد قطر ۳۰۰ میلی متر تبدیل شد. میلگرد حاصله تحت عملیات آنیل قرار گرفت، بریده شد و نمونه‌های استاندارد کشش و ضربه در جهت طول میلگرد تهیه گردید. تعداد ۱۶ نمونه جهت عملیات حرارتی تهیه و شماره گذاری شدند.

جهت عملیات حرارتی، کلیه نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. سپس با نرخ گرمایشی ۱۱۰ درجه سانتی گراد بر ساعت تا دمای ۹۵۰ درجه سانتی گراد گرم و در این دما به

۵- Retained Austenite

۶- Temper Heat Treatment

مدت ۷۰ دقیقه نگهداری و سپس در روغن سرد شدند. جهت مقایسه تغییرات ریز ساختاری، یک نمونه (شماره ۴) بصورت کوئنچ شده کنار گذاشته شد. مابقی نمونه ها طبق جدول (۲) به منظور بررسی تاثیر زمان تمپر اول و دوم بر انرژی ضربه، عملیات حرارتی در زمان های مختلف قرار گرفتند. آزمون ضربه شاری با دستگاه Santam در دمای ۱۸- درجه سانتی گراد بر روی نمونه های به ابعاد ۵۵ × ۱۰ × ۱۰ میلی متر انجام گرفت. همچنین آزمون کشش مطابق استاندارد روی نمونه های عملیات حرارتی شده انجام گرفت. آزمون سختی سنجی بر روی نمونه ها به روش راکول سی با دستگاه Swiss Rock 180 انجام گرفت. برای بررسی ریز ساختار نمونه ها در محلول حاوی اسید کلریدریک، اسید نیتریک و اسید سیتریک اچ شدند. ریز ساختار نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی بررسی شد.

جدول (۲): شرایط مختلف عملیات حرارتی انجام گرفته روی نمونه ها

شماره نمونه	زمان تمپر اول ( دقیقه )	زمان تمپر دوم ( دقیقه )	انرژی ضربه ( ژول )	سختی ( راکول سی )
۱	۲۵	۲۵	۳۷/۳	۲۲
۲	۲۵	۲۰	۲۲/۶	۲۳
۳	۲۰	----	۲۳/۲	۲۲
*۴	----	----	۱۳/۱	۳۹
۵	۲۰	۲۰	۳۷/۸	۲۱
۶	۲۰	۲۵	۳۹/۱	۲۳
۷	۲۰	۳۵	۳۳/۸	۲۲
۸	۲۰	۳۰	۲۹/۱	۲۳
۹	۲۵	----	۳۱/۱	۲۱
۱۰	۳۰	----	۲۸/۸	۲۲
۱۱	۲۵	۳۰	۲۵/۶	۲۰
۱۲	۲۵	۳۵	۳۳/۱	۲۱
۱۷	۳۰	۲۰	۳۰	۲۲
۱۸	۳۰	۲۵	۳۳/۲	۲۳
۱۹	۳۰	۳۵	۳۸/۶	۲۲
۲۰	۳۰	۳۰	۲۹/۴	۲۱

## \*۴ حالت کوئنچ

این مطالعه و پژوهش به دلیل پایین بودن انرژی ضربه فولاد در مقایسه با سایر فولادهای زنگ نزن بویژه در دماهای پایین (زیر صفر درجه سانتی گراد) صورت گرفته است و پراکندگی نتایج تست ضربه و وابستگی شدید

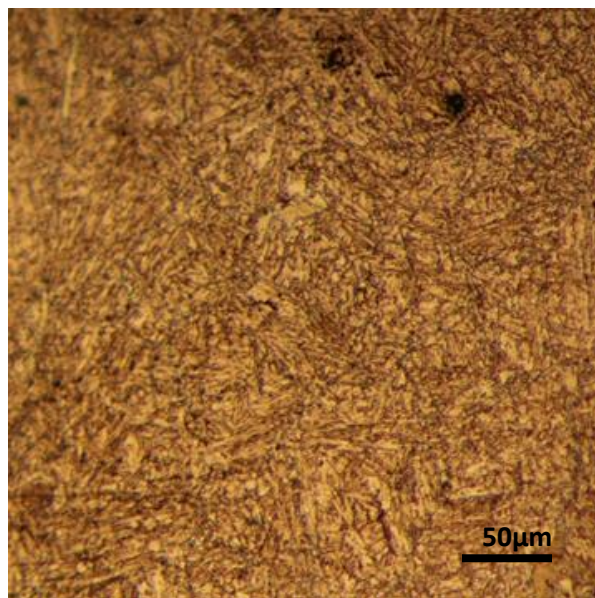
آن به شرایط عملیات حرارتی، ما را به سمت بررسی شرایط عملیات حرارتی این فولاد، بر مقاومت ضربه آن در دماهای زیر صفر سوق داده است. بدین منظور پس از تهیه فولاد با ترکیب های شیمیایی مشخص، عملیات آستنیته سازی و کوئنچ در روغن و سپس عملیات تمپر (بازپخت) یک و دو مرحله ای، که مناسب برای بالابردن انرژی ضربه است [۱۰] در زمان های مختلف روی فولاد مذکور انجام شد. در مرحله اول سختی سنجی به روش راکول سی انجام گرفت و با بررسی اولیه نتایج، شرایط بهینه عملیات حرارتی انتخاب و نمونه هایی برای بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی عملیات حرارتی شدند. به منظور بررسی های ریزساختاری از متالوگرافی نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و برای تعیین خواص مکانیکی از آزمون های کشش و ضربه استفاده شد. در نهایت با انتخاب ترکیب مناسبی از دما در دو مرحله ی تمپر و ضمن کاهش زمان، که برای عملیات حرارتی قطعات بزرگ صنعتی اهمیت زیادی دارد، سیکل بهینه نهایی برای دستیابی به خواص مکانیکی مناسب تعیین شد.

### ۳- نتایج و بحث

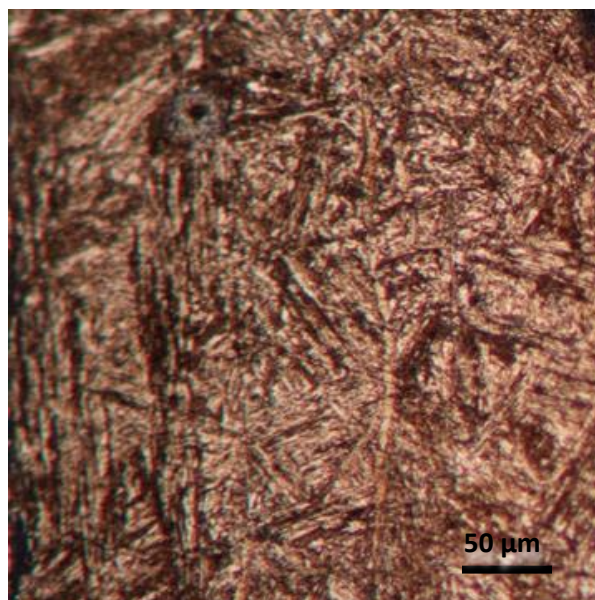
#### ۳-۱ تاثیر زمان تمپر دوم بر انرژی ضربه

جهت مشخص نمودن تاثیر فرآیند تمپر دوم بر رفتار مقاومت به ضربه این فولاد، ۳ نمونه به مدت زمان ۱۲۵، ۱۵۰ و ۱۷۵ دقیقه در دمای ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد تمپر شدند. سپس ۴ نمونه‌ی دیگر ابتدا در دمای ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵۰ دقیقه تمپر اول شدند و پس از آن هر یک از آنها به ترتیب در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰ و ۱۷۵ دقیقه تمپر دوم شدند. در نهایت تست‌های متالوگرافی و ضربه در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد روی آنها انجام شد که نتایج آن در ادامه آورده شده است. در بررسی نمونه های ۱۷ تا ۲۰ که در زمان تمپر اول ۱۵۰ دقیقه، تمپر دوم انجام گرفته است، مشاهده شد که با افزایش زمان تمپر دوم، انرژی ضربه افزایش می یابد. تصاویر متالوگرافی نمونه ها در شکل‌های (۱)، (۲)، (۳) و (۴) نشان از ظریف تر شدن ساختار مارتنزیتی با افزایش زمان تمپر دوم می دهد که می تواند دلیلی بر بالارفتن انرژی ضربه نمونه باشد.

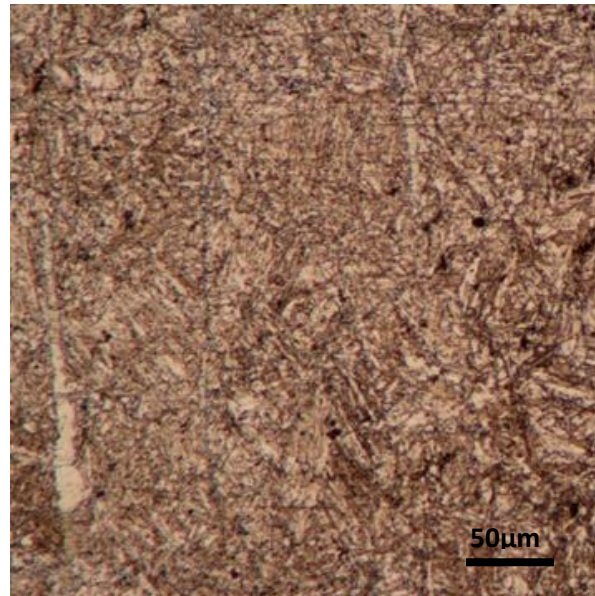
شکل (۲) تغییرات انرژی ضربه نمونه را با افزایش زمان تمپر دوم نشان می دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان تمپر دوم به ۱۷۵ دقیقه، انرژی ضربه بهبود چشم گیری داشته است.



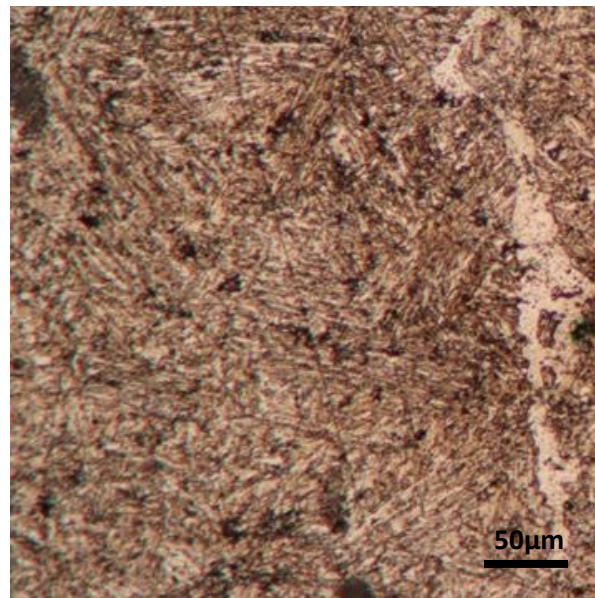
شکل (۱): تصویر متالوگرافی نمونه ۱۷



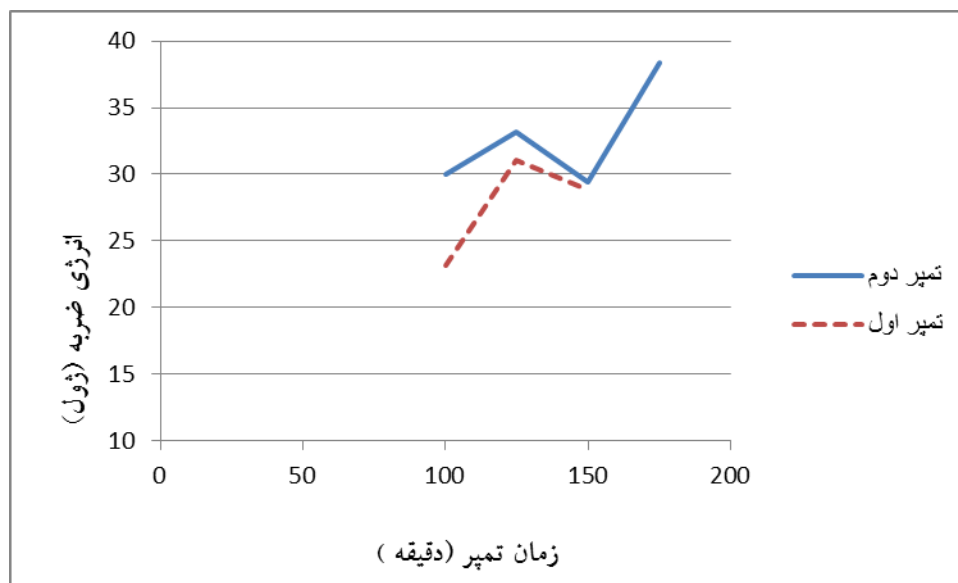
شکل (۲): تصویر متالوگرافی نمونه ۱۸



شکل (۳): تصویر متالوگرافی نمونه ۱۹



شکل (۴): تصویر متالوگرافی نمونه ۲۰

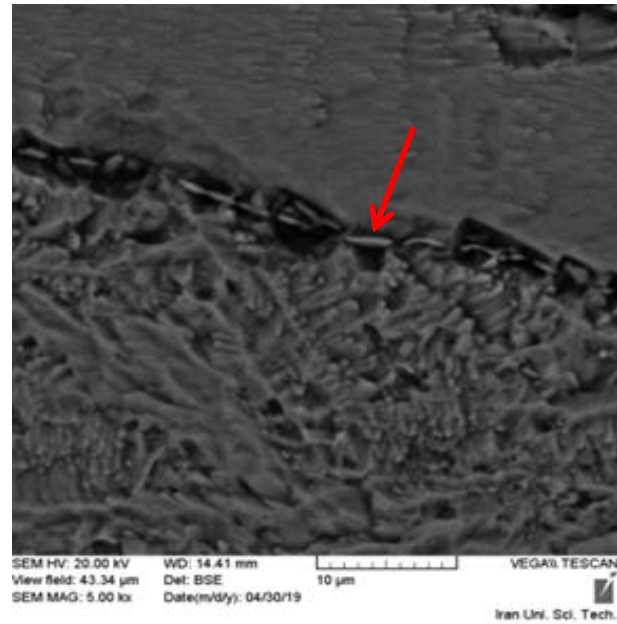
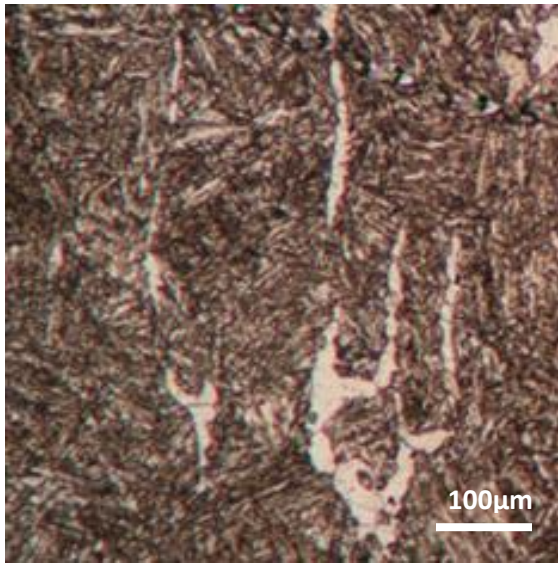


شکل (۲): نمودار تغییرات انرژی ضربه با زمان تمپر

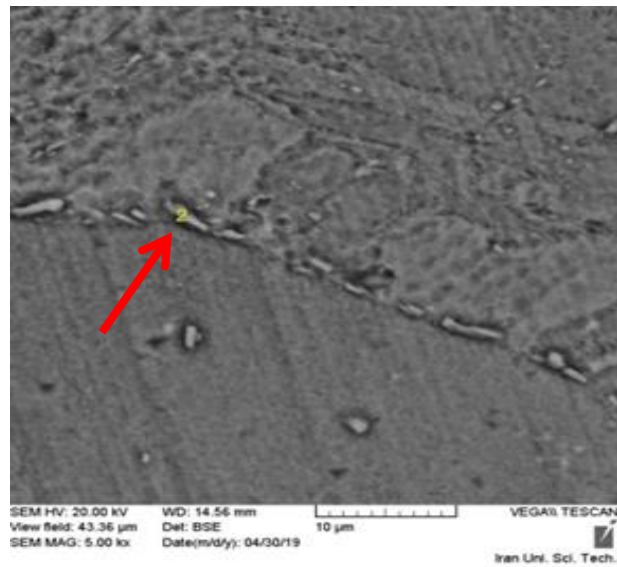
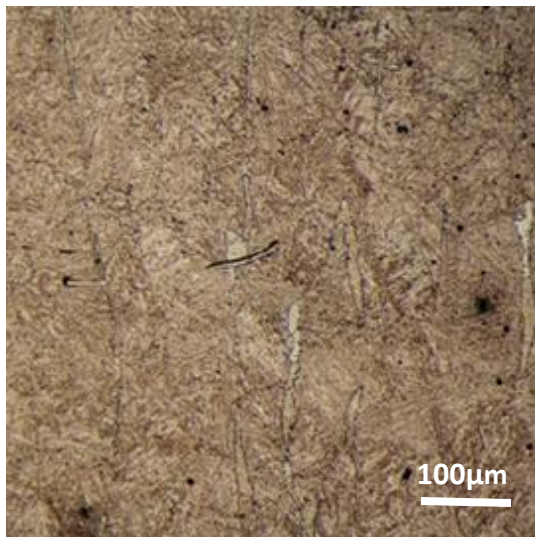
### ۲-۳ تا تیر ریز ساختار بر انرژی ضربه

در بررسی ریز ساختار مشاهده شد که وجود و رسوب کاربیدهای زنجیری در مرزها (پیکان قرمز) باعث کاهش استحکام و داکتیلیتی خواهد شد. بررسی‌ها نشان داده است [۵] که تافنس ضربه با شیب بیشتری کاهش پیدا خواهد کرد. حتی تحقیقات نشان داده است که تغییر شکل کاربیدها از حالت پیوسته به ریز و کروی در افزایش انرژی ضربه نقش چشم‌گیری دارند [۸]. انجام تمپر دو مرحله‌ای در کاهش میزان رسوبات کاربیدی خیلی موثر است [۶]. شکل‌های (۳) و (۴) تصاویر متالوگرافی و SEM نمونه‌های ۳ و ۵ را نشان می‌دهد. با توجه به پایین بودن عدد اتمی کربن، مشخص کردن ترکیب شیمیایی دقیق کاربیدها در SEM-EDS مشکل است. با این وجود، آنالیز XRD نمونه حاکی از وجود رسوبات کاربیدی نوع Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> می‌باشد.

شکل (۵)

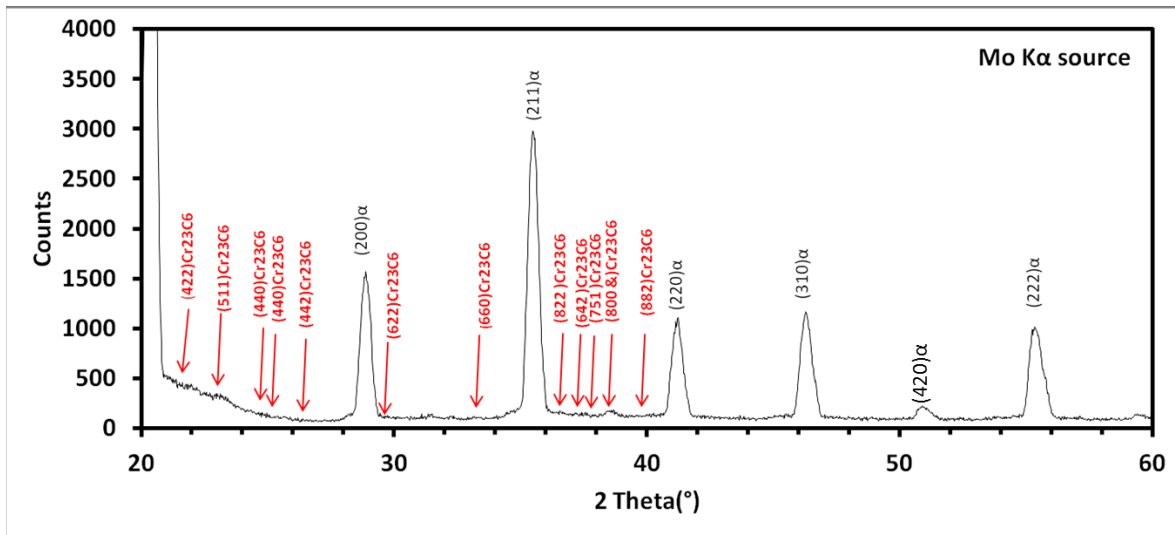


شکل (۳) : تصاویر متالوگرافی نوری و الکترونی نمونه ۳



شکل (۴) : تصاویر متالوگرافی نوری و الکترونی نمونه ۵





شکل (۵): آنالیز XRD نمونه (پیک‌های مربوط به کاربیدهای نوع Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> مشخص است)

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش فولاد زنگ نزن مازتنزیتی ۴۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. از آنجاییکه هدف اصلی با لا بردن مقدار انرژی ضربه فولاد مد نظر بوده است بنابراین با توجه به تاثیر و نقش عناصر آلیاژی در نزدیک شدن به هدف، با افزودن مقدار حدود ۱ درصد نیکل و ۰/۵ مولیبدن فولاد ریخته گری و تولید شد. سپس با انجام عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر یک و دومرحله ای در زمان‌های مختلف، با توجه به اهمیت ویژه عامل زمان از نظر اقتصادی، به یک بهینه زمان با ساختار مناسب دست یافتیم و نتایج زیر حاصل شد.

- حصول مقدار انرژی ضربه ۳۹ ژول با انجام تمپر اول در دما و زمان، بترتیب ۶۸۰ درجه و ۱۰۰ دقیقه و تمپر دوم در دما و زمان، به ترتیب ۶۵۰ درجه سانتی گراد و ۱۲۵ دقیقه و سرد کردن در روغن - زمان کل عملیات کوتاه شده.
- افزایش زمان تمپر دوم، تا ۱۷۵ دقیقه در بیشتر نمونه، منجر به بالا بردن تافنس ضربه می شود.
- زمان تمپر دوم، در خشن یا ظریف شدن لایه‌های مارتنزیتی تاثیر گذار است و بالطبع، مقدار انرژی ضربه را تحت تاثیر قرار می دهد.
- تمپر دوم در کاهش، رسوبات کاربیدی موثر می باشد که خود از افت خواص مکانیکی بویژه تافنس ضربه جلول گیری می کند.

## مراجع :

- 1- ASM Handbook, Volume 4, Heat treating.
- 2- M.C. Tsai , C.S. Chiou 1, J.S. Du 2, J.R. Yang, Phase transformation in AISI 410 stainless steel, Materials Science and Engineering A332 (2002) 1–10.
- 3- E. Mabruri, Z. A. Syahlan, Sahlan, S. Prifiharni, M. S. Anwar, Influence of Austenitizing Heat Treatment on the Properties of the Tempered Type 410-1Mo Stainless Steel, Materials Science and Engineering 202 (2017) 012085.
- 4- Siska Prifiharni, Hadi Perdana, Toni B. Romijarso, The Hardness and Microstructure of The Modified 13Cr Steam Turbine Blade Steel in Tempered Conditions, International Journal of Engineering and Technology, Vol 8 No 6 Dec 2016-Jan 2017.
- 5- X.P. Ma, L.J. Wang, C.M. Liu, S.V. Subramanian, Role of Nb in low interstitial 13Cr super martensitic stainless steel, Materials Science and Engineering A 528 (2011), 6812– 6818.
- 6- Kulkarni Srivatsa, Perla Srinivas, G Balachandran V Balasubramanian Improvement of Impact toughness by modified hotworking and heat treatment in 13%Cr Martensitic Stainless Steel Materials Science & Engineering A S0921-5093(16)31113-3.
- 7- Gabriela Nicoleta , Niculae Napoleon research regarding, the heat-treatment influence on the properties of CA-15 martensitic stainless steel , 2000 Ploies “Petroleum-Gas” University Ploiesti
- 8- Chakraborty, G., Das, C. R., Albert, S. K., Bhaduri, A. K., and Paul, V. T., Study on tempering behaviour of AISI 410 stainless steel, Materials Characterization, 100 (2015) 81–87.
- 9- Wang, P., Xiao, N., Lu, Sh., Li, D., and Li, Y., Investigation of the mechanical stability of reversed austenite in 13%Cr–4%Ni martensitic stainless steel during the uniaxial tensile test, Materials science & Engineering, 586 (2013) 292–300.
- 10- Wang, P., Xiao, N., Lu, Sh., Li, D., and Li, Y., Investigation of the mechanical stability of reversed austenite in 13%Cr–4%Ni martensitic stainless steel during the uniaxial tensile test, Materials science & Engineering, 586 (2013) 292–300
- 11- Outokumpu Stainless Steels Handbook, High performance stainless steel, Outokumpu Oyj, (2013).