

# تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI ۴۳۱

محمد رضا هداشهرضا<sup>۱\*</sup>، علی شفیعی<sup>۲</sup>، کامران امینی<sup>۳</sup>، محمد علی سلطانی<sup>۴</sup> و علی نقیان<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرمجلسی، اصفهان، ایران

۴ و ۵- کارشناس ارشد فولاد آلیاژی اصفهان، اصفهان، ایران

\*mohammadhoda67@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۱/۲۳، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۳/۲۵)

## چکیده

فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی بدلیل خواص مکانیکی عالی و خواص خوردگی متوسط، کاربردهای زیادی در ژنراتورهای بخار و صنایع غذایی (مانند mixer blade) دارند. در تحقیق حاضر برای بررسی ریزساختار، از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی و برای بررسی خواص مکانیکی از آزمون‌های ضربه، کشش و سختی استفاده شد. همچنین تاثیر دمای عملیات آستنیت‌سازی کردن (۱۰۳۰°C، ۹۷۰°C)، زمان تمبر و دمای تمبر بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی فولاد مذکور مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه برای دستیابی به بالاترین انرژی ضربه و استحکام به طور همزمان عملیات آستنیت‌سازی کردن دوپل (آستنیت‌سازی در دمای ۱۰۳۰°C، کوئنچ در روغن، عملیات تمبر در دمای ۲۰۰°C، آستنیت‌سازی مجدد در دمای ۹۷۰°C، کوئنچ در روغن، عملیات تمبر در دمای ۶۵۰°C) بررسی گردید. نتایج نشان داد با افزایش دمای آستنیت‌سازی از ۹۷۰°C به ۱۰۳۰°C انرژی ضربه افزایش و سختی و استحکام کششی تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین در عملیات آستنیت‌سازی کردن دوپل بالاترین خواص انرژی ضربه و استحکام کششی و سختی به دست می‌آید. دلیل این مسئله در ارتباط با آن است که در عملیات آستنیت‌سازی اول که در دمای بالا انجام می‌شود کاربیدها در زمینه (آستنیت) حل می‌شوند. عملیات تمبر در دمای پایین (۲۰۰°C) منجر به رسوب کاربیدهایی می‌شود که در عملیات آستنیت‌سازی دوم که در دمای پایین‌تر انجام می‌شود مانع رشد دانه‌های آستنیت شده و بنابراین یک ساختار ریز دانه از آستنیت ایجاد می‌گردد. و بنابراین ترکیب بهینه‌ای از استحکام و انرژی ضربه بدست می‌آید. همچنین پدیده سختی ثانویه در فولاد مذکور در محدوده دمایی ۴۲۰°C-۳۵۰°C مشاهده شد.

## واژه‌های کلیدی:

فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI ۴۳۱، انرژی ضربه، استحکام کششی، عملیات آستنیت‌سازی کردن دوپل

## ۱- مقدمه

صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۴]. در این میان فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI ۴۳۱ در نازل راکت، اجزا آگروز اتومبیل، غلطک‌های چرم سازی، قطعات ماشین کاغذ سازی،

فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی به طور همزمان با دارا بودن خواص مکانیکی بهینه، مقاومت به خوردگی و مقاومت به سایش بالا به طور گسترده در صنایع پتروشیمی، دریائی و هوا- فضا و

کاربیدهای دندریتی رسوب کرده روی مرز فریت دلتا منجر به کاهش انرژی ضربه شده است. در حالی که وانگ و همکارانش [۹] معتقد بودند که حضور فریت دلتا در ریز ساختار، انرژی ضربه فولاد زنگ نزن مارتنزیتی ۱۳Cr-۴Ni را کاهش می‌دهد. در مطالعه‌ای که توسط کالیاری و همکارانش [۱۰] بر روی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی Ni-Mo به منظور تاثیر دمای تمپر بر روی سختی انجام گرفت، پدیده سختی ثانویه در محدوده‌ی دمایی  $560^{\circ}\text{C}$  -  $500^{\circ}\text{C}$  مشاهده شد. با توجه به لزوم دستیابی به استحکام و انرژی ضربه بالا در فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI ۴۳۱، در تحقیق حاضر تاثیر دمای عملیات آستنیت‌زدن، تاثیر عملیات آستنیت‌زدن دوبل و تاثیر دما و زمان تمپر در فولاد مذکور بر استحکام، انرژی ضربه و ریزساختار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI ۴۳۱ مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI ۴۳۱ (درصد وزنی)

%C	%Cr	%Ni	%Mo
۰/۱۷	۱۵/۳۸	۱/۷۷	۰/۱۲
%Mn	%Cu	%W	%Si
۰/۳۷	۰/۲	۰/۰۷	۰/۲۵

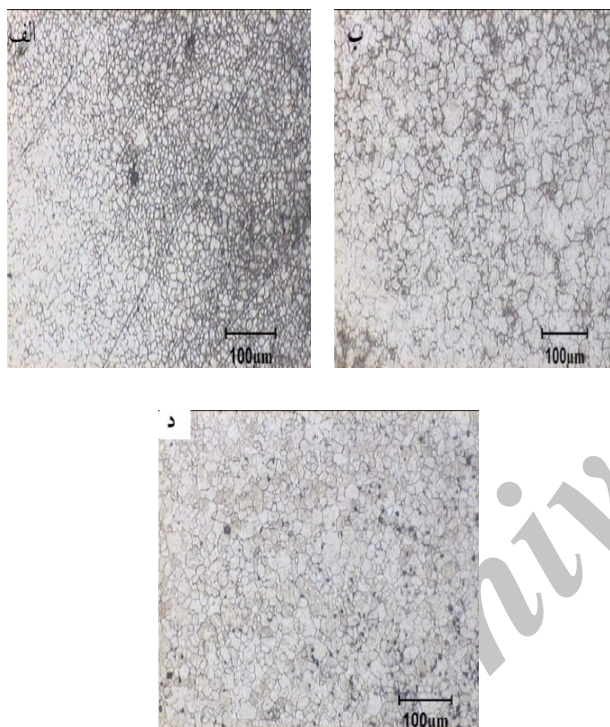
این فولاد طی مراحل ذوب در کوره قوس الکتریکی به صورت شمش‌هایی به قطر ۳۹۷ mm و طول ۲۰۰۰ mm ریخته‌گری می‌شود. سپس این شمش‌ها در محدوده دمایی  $1110^{\circ}\text{C}$  -  $1150^{\circ}\text{C}$  آهنگری شده و عملیات آنیل در دمای  $780^{\circ}\text{C}$  انجام می‌شود. سپس نمونه‌های استاندارد کشش و ضربه را به صورت طولی و به شکل بلوک از سطح دیسک انتخاب و توسط اری نواری برش داده می‌شود. در نهایت نمونه - های کشش و ضربه به صورت نیمه تمام و مجزا آماده سازی می‌شوند.

قالب‌های بلور شیشه و قطعات مورد استفاده در دریا استفاده می‌شود [۴]. می‌توان این دسته از فولاد (فولاد AISI ۴۳۱) را توسط عملیات حرارتی به بالاترین سختی و سطح استحکام رساند، در حالی که چقرمگی عالی داشته باشد. بر خلاف سایر فولادهای زنگ نزن، در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، عملیات حرارتی نقش بسیار بالایی دارد و به دست آوردن خواص مکانیکی مناسب، بستگی شدیدی به دما و زمان آستنیت‌زدن، سرعت سرد کردن، دما و زمان تمپر دارد. بنابراین کنترل پروسه عملیات حرارتی برای تشکیل مارتنزیت لایه‌ای، کمترین مقدار فریت دلتا و آستنیت باقی‌مانده بسیار ضروری است [۵-۶]. بنابراین در فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی استحکام و انرژی ضربه وابستگی زیادی به مقدار کربن و عناصر آلیاژی موجود در آستنیت دارد [۷]. عملیات حرارتی پیشنهادی برای فولاد AISI ۴۳۱ شامل: الف) آستنیت‌زدن در محدوده دمایی  $950^{\circ}\text{C}$  -  $1050^{\circ}\text{C}$  و به دنبال آن کوئنچ در روغن، ب) عملیات تمپر در دماهای  $200^{\circ}\text{C}$  -  $300^{\circ}\text{C}$  برای دستیابی به استحکام بالا و انرژی ضربه متوسط و عملیات تمپر در محدوده دمایی  $600^{\circ}\text{C}$  -  $700^{\circ}\text{C}$  برای استحکام متوسط و انرژی ضربه بالا می‌باشد. برای دستیابی به اپتیمم مقدار از تافنس و استحکام بالا بایستی سیکل عملیات حرارتی با دقت انجام گیرد [۴]. در مطالعه‌ای که توسط ناصری و همکارانش [۷] در فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI ۴۲۰ مورد تحقیق قرار گرفت، دما و زمان آستنیت‌زدن بر روی انرژی ضربه و استحکام کششی انجام شده، بالاترین انرژی ضربه و استحکام کششی در دمای آستنیت‌زدن  $1050^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان ۱۲۰ min به دست آمده است. این محققین بالاتر بودن انرژی ضربه در دمای  $1050^{\circ}\text{C}$  را به دلیل کاهش میزان فسفر در مرز دانه‌ها دانسته‌اند، در حالی که بالاتر بودن استحکام کششی را ناشی از میزان افزایش نفوذ و در نتیجه افزایش انحلال کاربیدها در زمینه دانسته‌اند که این عامل باعث افزایش میزان تراگونالیت و همچنین افزایش میزان عیوب شبکه مانند دوقلوبی‌ها و نابجایی‌ها شده است. در مطالعه‌ای که توسط شفر [۸] بر فولاد کروم- مارتنزیتی به منظور تاثیر فریت دلتا و کاربیدهای دندریتی بر روی انرژی ضربه انجام گرفت،

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تأثیر دمای آستنیت بر خواص مکانیکی و ریز ساختار

در شکل (۱) اندازه دانه‌های آستنیت اولیه برای نمونه‌های SA1، SA2 و DA آورده شده است. همان‌طوریکه مشاهده می‌شود با افزایش دمای آستنیت از  $970^{\circ}\text{C}$  به  $1030^{\circ}\text{C}$  عدد اندازه دانه‌های آستنیت اولیه از ASTM 9 به ASTM 8 کاهش می‌یابد.

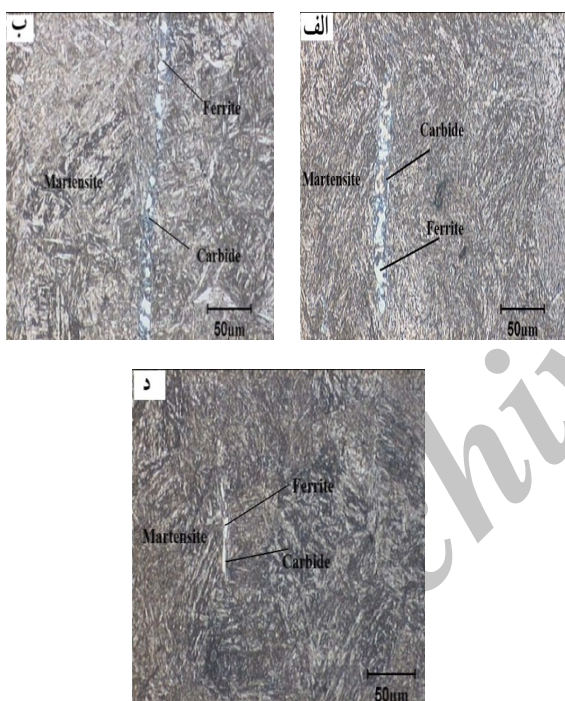


شکل (۱): ریز ساختار میکروسکوپ نوری از نمونه‌ها: الف) SA1، ب) SA2، ج) DA

دلیل این مسئله آن است که با افزایش دمای آستنیت، کاربیدهای آلیاژی در آستنیت حل شده و با حل شدن این کاربیدها که موانع رشد دانه‌های آستنیت می‌باشند، دانه‌ها رشد می‌کند. در نمونه‌ای که تحت عملیات آستنیت دابل قرار گرفته است عدد اندازه دانه‌های آستنیت ASTM 9-8 است. اندازه‌ی دانه‌های آستنیت اولیه در نمونه DA در مقایسه با نمونه SA1 درشت‌تر است.

جهت عملیات حرارتی، نمونه‌ها با نرخ گرمایشی  $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$  تا دمای  $620^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان 30 min پیشگرم شدند. سپس نمونه‌ها با همان نرخ حرارتی جهت مقایسه تأثیر دمای آستنیت بر خواص مکانیکی تا دمای  $970^{\circ}\text{C}$  (SA1) و  $1030^{\circ}\text{C}$  (SA2) به مدت زمان 45 min آستنیت شده و در روغن  $30^{\circ}\text{C}$  کوئنچ شدند، در نهایت عملیات تمپر در دمای  $650^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان 2h انجام شد. همچنین به منظور ترکیب بهینه‌ای از استحکام و انرژی ضربه، عملیات آستنیت کردن دو مرحله‌ای (DA) شامل آستنیت کردن در دمای  $1030^{\circ}\text{C}$ ، کوئنچ در روغن  $30^{\circ}\text{C}$ ، تمپر در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان 2h، آستنیت کردن مجدد در دمای  $970^{\circ}\text{C}$ ، کوئنچ در روغن  $30^{\circ}\text{C}$  و عملیات تمپر در دمای  $650^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان 2h انجام شد. به منظور بررسی تأثیر دمای تمپر بر استحکام، سختی و انرژی ضربه نمونه‌های آستنیت شده در دمای  $970^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان 45 min (SA1) پس از کوئنچ در روغن  $30^{\circ}\text{C}$  در دماهای  $250^{\circ}\text{C}$ ،  $350^{\circ}\text{C}$ ،  $420^{\circ}\text{C}$ ،  $580^{\circ}\text{C}$  و  $650^{\circ}\text{C}$  تحت عملیات تمپر به مدت زمان 2h قرار گرفتند. به منظور بررسی تأثیر زمان تمپر، نمونه SA1 در دمای  $650^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان 2h، 4h، 6h تمپر گردید. آزمون کشش در دمای محیط بر روی نمونه‌های عملیات حرارتی شده مطابق با استاندارد DIN 250125 بانرخ  $4\text{mm}/\text{min}$  توسط دستگاه کشش ZWICK Z 250 انجام گرفت. همچنین آزمون ضربه شیاری (شارپی) مطابق استاندارد E10045 بر روی نمونه‌های عملیات حرارتی شده با ابعاد  $10 \times 10 \times 50\text{mm}$  انجام گرفت. عملیات سختی سنجی با استفاده از دستگاه سختی EMC0 مدل M4U 750 بر روی نمونه‌های ضربه (عملیات شده) و پالیش شده در واحد برینل با نیروی اولیه 10 کیلوگرم و نیروی نهایی 187/5 صورت گرفت. برای بررسی ساختار نمونه‌ها از دستگاه پراش پرتو X مدل PW3710 و تابش پرتو  $\text{Cu}_{K\alpha}$  استفاده شد. عدد اندازه دانه‌ها در نمونه‌های SA1، SA2 و DA مطابق با استاندارد ASTM E112 و توسط اکسیداسیون سطحی تعیین گردید. برای بررسی ساختار نمونه‌ها از محلول اچ ویلا و ریز ساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری Olympus، مدل 3 PMG بررسی شد.

بهترین ترکیب استحکام و انرژی ضربه بدست می آید به نحوی که انرژی ضربه در حد ۸۴٪ و استحکام کششی در حد ۱/۵٪ در مقایسه با نمونه SA۱ افزایش داشته است. بالان و همکارانش [۴] بهبود انرژی ضربه و استحکام کششی را در عملیات آستنیت کردن دوبل در فولادی مشابه با فولاد تحقیق حاضر به دلیل ایجاد یک ساختار هموزن از آستنیت با دانه‌های ریز و عاری از کاربیدهای حل نشده دانسته‌اند. ریزساختار حاصل از نمونه‌های SA۱، SA۲ و DA در شکل (۲) آورده شده است. این تصاویر حضور مارتنزیت لایه‌ای تمپر شده، فریت دلتا و کاربید را نشان می‌دهد.



شکل (۲): ریزساختار میکروسکوپ نوری از نمونه‌های: الف) SA۱،

ب) SA۲ و ج) DA

الگوی پراش پرتو X نمونه SA۱ نیز حضور کاربیدهای از نوع  $M_{23}C_6$  را تایید می‌نماید (شکل (۳)). در مطالعه‌ای که توسط Rao و Thomas [۱۱ و ۱۲] و Sarrikay [۱۳] بر روی فولاد Fe-۴Cr-۰/۳C، در مورد تاثیر عملیات آستنیت کردن دوبل انجام شده است، این محققین حل شدن کاربیدها در دمای بالا را

دلیل این مسئله در ارتباط با حل شدن بیشتر کاربیدهای آلیاژی در نمونه DA است. این در حالی است که اندازه دانه‌های آستنیت اولیه در نمونه DA در مقایسه با نمونه SA۲ ریزتر است. در حقیقت در نمونه DA در عملیات آستنیت اول کاربیدهای آلیاژی حل شده و رشد دانه رخ می‌دهد اما عملیات تمپر در دمای  $200^{\circ}C$  منجر به رسوب کاربیدهایی می‌شود (تشکیل این کاربیدها ناشی از خروج کربن از محلول جامد فوق اشباع مارتنزیت است) که جلوی رشد دانه‌ها را در عملیات آستنیت دوم در دمای  $970^{\circ}C$  گرفته و بنابراین اندازه دانه‌های آستنیت اولیه نسبت به نمونه SA۱ درشت‌تر و نسبت به نمونه SA۲ ریزتر است. نتایج حاصل از انرژی ضربه و استحکام کششی نهایی در نمونه‌های SA۱، SA۲ و DA، در جدول (۲) آورده شده است.

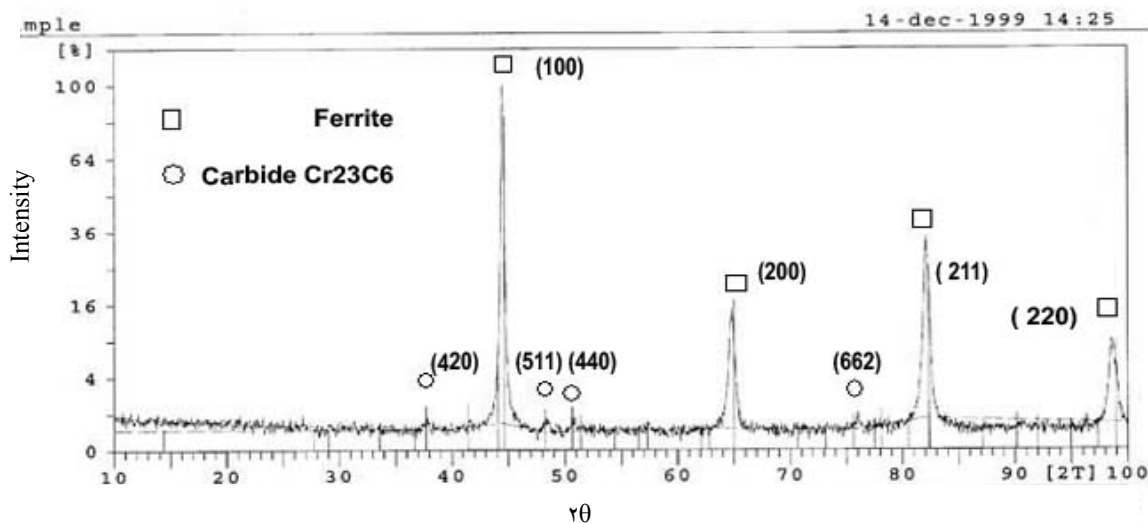
جدول (۲): نتایج حاصله از انرژی ضربه، استحکام کششی نهایی و سختی در شرایط آستنیت کردن مختلف

کد نمونه	انرژی ضربه (J)	استحکام کششی نهایی (Mpa)	سختی (HB)
SA۱	۴۴	۹۰۱	۲۸۰
SA۲	۳۴	۹۰۸	۲۸۵
DA	۸۱	۹۱۲	۲۹۱

همان‌طور که مشاهده می‌شود استحکام کششی نهایی و سختی با افزایش دمای آستنیت از  $970^{\circ}C$  به  $1030^{\circ}C$  تغییر چندانی نمی‌کند. دلیل این مسئله در ارتباط با تاثیر دو پارامتر مهم در عملیات آستنیت کردن است: (۱) افزایش کروم و کربن به صورت محلول جامد در آستنیت با افزایش دمای آستنیت کردن که منجر به افزایش سختی و استحکام می‌شود و (۲) افزایش مقدار آستنیت باقی‌مانده با افزایش دمای آستنیت که دارای اثر مخرب بر روی سختی و استحکام کششی است. بنابراین سختی و استحکام کششی نهایی با افزایش دمای آستنیت تغییرات چندانی ندارد. همچنین به دلیل ریزتر بودن دانه‌های آستنیت، انرژی ضربه در نمونه SA۱ در مقایسه با نمونه SA۲ بالاتر است. در نمونه DA

مربوط به آستنیته کردن اول و ایجاد یک ساختار هموزن از آستنیت با دانه‌های ریز و عاری از کاربیدهای حل نشده، دانسته‌اند که منجر به خواص بهینه انرژی ضربه و استحکام شده است. بنابراین عملیات DA منجر به حل شدن کاربیدها بدون تغییر محسوس در اندازه دانه‌های آستنیت می‌شود [۴]. بنابراین در تحقیق حاضر در عملیات آستنیته کردن دوبل بدلیل حل شدن کاربیدها در عملیات آستنیت اول در دمای بالا

مربوط به آستنیته کردن اول و ایجاد یک ساختار هموزن از آستنیت با دانه‌های ریز و عاری از کاربیدهای حل نشده، دانسته‌اند که منجر به خواص بهینه انرژی ضربه و استحکام شده است. بنابراین عملیات DA منجر به حل شدن کاربیدها بدون تغییر محسوس در اندازه دانه‌های آستنیت می‌شود [۴]. بنابراین در تحقیق حاضر در عملیات آستنیته کردن دوبل بدلیل حل شدن کاربیدها در عملیات آستنیت اول در دمای بالا

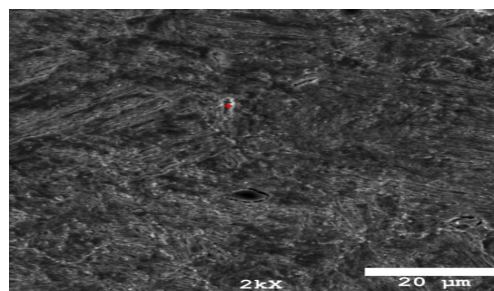


شکل (۳): الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه SA1

### ۳-۲- تأثیر دمای تمپر

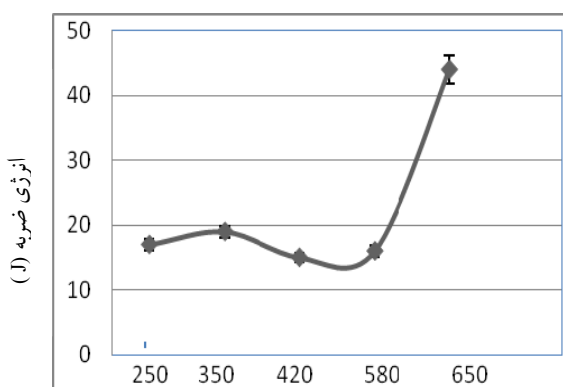
برای بررسی تأثیر دمای تمپر بر خواص مکانیکی، نمونه‌ی آستنیته شده در دمای  $970^{\circ}\text{C}$  (SA1)، در دماهای  $250^{\circ}\text{C}$ ،  $350^{\circ}\text{C}$ ،  $420^{\circ}\text{C}$ ،  $580^{\circ}\text{C}$ ،  $650^{\circ}\text{C}$  به مدت زمان ۲ ساعت تمپر گردید. نتایج حاصل از ارتباط سختی با دمای تمپر در شکل (۵) آورده شده است. همان‌طوریکه مشاهده می‌گردد سختی در محدوده  $250^{\circ}\text{C}$  تا  $350^{\circ}\text{C}$  کاهش می‌یابد. این کاهش در ارتباط نرم شدن ساختار در اثر عملیات تمپر و کاهش تراگونالیتیه مارتنزیت است. اما در محدوده‌ی  $350^{\circ}\text{C}$  تا  $420^{\circ}\text{C}$  سختی به دلیل پدیده‌ی سختی ثانویه که ناشی از رسوب و تشکیل کاربیدهای آلیاژی  $M_7C_3$  است، افزایش می‌یابد. در ادامه در

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز نشان دهنده کمترین مقدار کاربیدهای حل نشده در نمونه DA می‌باشد (شکل ۴).



شکل (۴): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه DA

تمپر  $420^{\circ}\text{C}$  نتایج این مطالعه با نتایج بالان و همکارانش [۱۴] بر روی فولاد مشابه با تحقیق حاضر که سختی ثانویه در رنج دمایی  $350^{\circ}\text{C}$  -  $450^{\circ}\text{C}$  مشاهده گردید، دارای تطابق است. در شکل (۷) ارتباط دمای تمپر با انرژی ضربه آورده شده است. همان طوریکه مشاهده می گردد با افزایش دمای تمپر تا  $350^{\circ}\text{C}$  انرژی ضربه بدلیل نرم شدن ساختار و کاهش سختی افزایش می یابد، ولی در محدوده دمایی  $350^{\circ}\text{C}$  تا  $420^{\circ}\text{C}$  انرژی ضربه بدلیل افزایش سختی، ناشی از سختی ثانویه کاهش می یابد. در ادامه بدلیل نرم شدن ساختار و کاهش سختی، انرژی ضربه در محدوده  $450^{\circ}\text{C}$  تا  $650^{\circ}\text{C}$  افزایش می یابد.

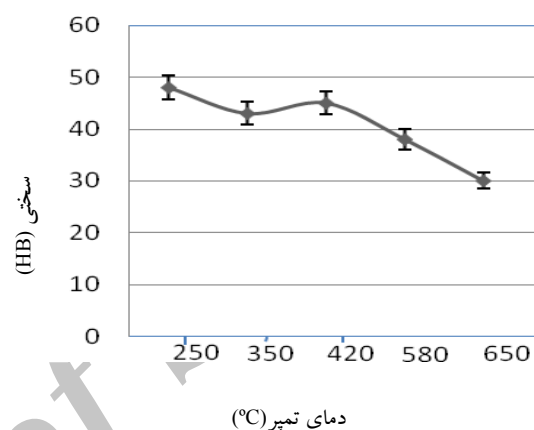


دمای تمپر (°C)

شکل (۷): تغییرات انرژی ضربه به عنوان تابعی از دمای تمپر

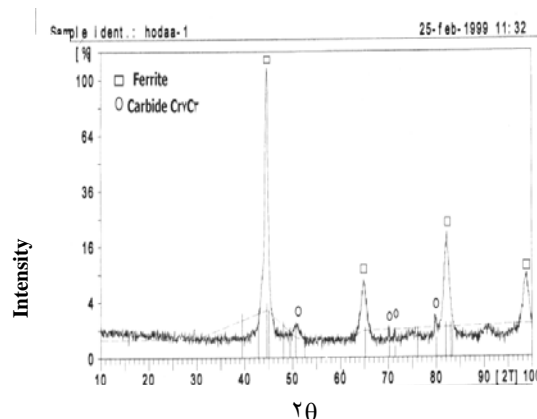
در شکل (۸) ارتباط استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم با دمای تمپر آورده شده است. همان طوریکه مشخص است با افزایش دمای تمپر در ابتدا استحکام کششی و تسلیم کاهش یافته اما در محدوده ای که سختی ثانویه رخ می دهد ( $350^{\circ}\text{C}$  تا  $420^{\circ}\text{C}$ )، استحکام تسلیم و کششی افزایش اما مجدداً در محدوده  $450^{\circ}\text{C}$  تا  $650^{\circ}\text{C}$  بدلیل نرم شدن ساختار، استحکام کاهش پیدا می کند.

دمای  $420^{\circ}\text{C}$  تا  $650^{\circ}\text{C}$  سختی بدلیل حل شدن کاربیدها و تبدیل کاربیدهای آلیاژی  $M_7C_3$  به  $M_{23}C_6$  و درشت شدن ساختار کاهش پیدا می کند (شکل (۶) الگوی پراش پرتو ایکس که نشان دهنده تشکیل کاربید آلیاژی  $M_7C_3$  در دمای تمپر  $420^{\circ}\text{C}$  می باشد).



شکل (۵): تغییرات سختی به عنوان تابعی از دمای تمپر

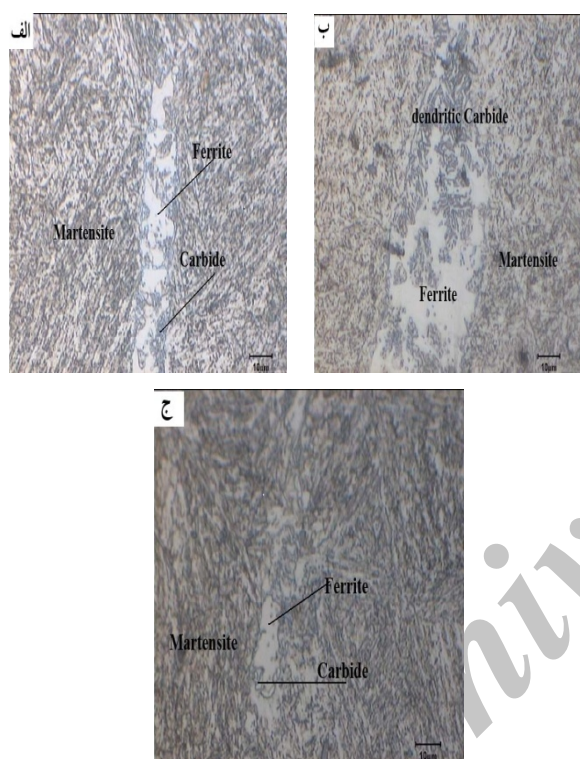
در مطالعه ای که توسط ناصری و همکارانش [۷] بر روی فولاد AISI ۴۲۰ انجام گرفت، پدیده سختی ثانویه در رنج دمایی  $400^{\circ}\text{C}$  -  $500^{\circ}\text{C}$  مشاهده گردید. این محققین دلیل این پدیده (سختی ثانویه) را رسوب کاربیدهای  $M_7C_3$  و دلیل کاهش سختی در دماهای تمپر  $500^{\circ}\text{C}$  -  $700^{\circ}\text{C}$  را تبدیل کاربیدهای  $M_7C_3$  به  $M_{23}C_6$  و درشت شدن ساختار دانسته اند.



شکل (۶): الگوی پراش پرتو ایکس به منظور شناسایی نوع

کاربید در دمای تمپر  $420^{\circ}\text{C}$

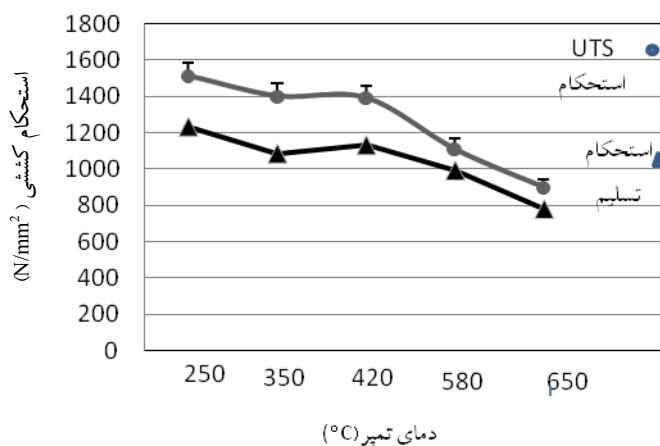
در مطالعه‌ای که توسط نینگ و همکارانش [۱۵] بر روی فولاد سوپر مارتنزیتی  $00Cr13Ni4Mo$  در دمای تمپر  $600^{\circ}C$  به مدت ۶ و ۱۲ ساعت انجام گرفت با افزایش زمان تمپر، دانه‌های آستنیت باقی مانده کشیده شده و درصد آستنیت باقی مانده افزایش می‌یابد. این محققین افزایش درصد آستنیت باقیمانده را، عامل افزایش در انرژی ضربه دانسته‌اند.



شکل (۱۰): تحولات ریز ساختاری در اثر عملیات آستنیت کردن تک مرحله‌ای در دمای  $970^{\circ}C$  به همراه کوئنچ در روغن  $30^{\circ}C$  و تمپر به مدت زمان، الف) ۲h، ب) ۴h، ج) ۶h (بزرگنمایی  $\times 500$ )

#### ۴- نتیجه گیری

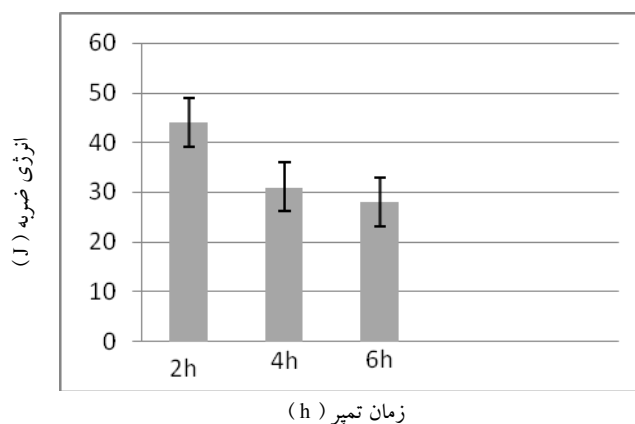
در تحقیق حاضر تأثیر دمای آستنیت، تأثیر عملیات آستنیت کردن دوپل و دما و زمان تمپر در فولاد زنگ نزن مارتنزیتی AISI ۴۳۱ بررسی گردید و نتایج ذیل به دست آمد.  
۱- با افزایش دمای آستنیت از  $970^{\circ}C$  به  $1030^{\circ}C$ ، اندازه دانه‌های آستنیت درشت شده و بنابراین انرژی ضربه کاهش ولی استحکام کششی و سختی تغییر چندانی نمی‌نماید.



شکل (۸): تغییرات خواص کششی به عنوان تابعی از دمای تمپر

#### ۳-۳ تأثیر زمان تمپر

به منظور بررسی تأثیر زمان تمپر، نمونه SA۱ در دمای  $650^{\circ}C$  به مدت زمان ۴، ۶ و ۱۲ ساعت تحت عملیات تمپر قرار گرفته و سپس آزمون ضربه بر روی این نمونه انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمون ضربه در شکل (۹) آورده شده است.



شکل (۹): تغییرات انرژی ضربه به عنوان تابعی از زمان تمپر

همچنین ریزساختار حاصل از نمونه‌ی ذکر شده در شکل (۱۰) آورده شده است. همان‌طوریکه از شکل (۱۰) (نمونه SA۱) مشخص است با افزایش زمان تمپر، ذرات کاربید رسوب کرده روی مرز فریت دلتا رشد پیدا کرده‌اند و بنابراین انرژی ضربه کاهش می‌یابد.

- [5] C. Garica de Andres, L. F. Alvarez and V. Lopes, Effects of Carbide Forming Elements on the Reponse to Thermal Treatment of the X45Cr13 Martensitic Stainless Steel, Journal of Materials Science, pp. 4095-4100, 1998.
- [6] D. Manova, S. M. Mandl, H. Neumann, B. Rauschenbach, Wear Behaviour of Martensitic Stainless Steel After PHII SURFACE TREATMENT, SURFACE and Coating Technology, pp.137-140, 2005.
- [7] A. Nasery Isfahany, H. Saghafian and G. Borhani, The Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Corrosion Behavior of AISI 420 Martensitic Stainless Steel, Journal of Alloy And Compounds, pp. 3931-3936, 2011.
- [8] L. Schafer, Influence of Aferrite and Dendritic Carbides on the Impact and Tensile Properties of a Martensitic Chromium Steel, Journal of Nuclear Materials, pp. 1336-1339, 1998.
- [9] P. Wang, S. P. Lu, N. M. Xiao, D. Z. Li and Y.Y. Li, Effect of Delta Ferrite on the Impact Properties of low Carbon 13Cr-4Ni Martensitic Stainless Steel, Material Science and Engineering, pp. 3210-3216, 2010.
- [10] I. Calliari, M. Zanesco, M. Dabala, K. Brunelli and E. Ramous, Investigation of Microstructure and Properties of a Ni-Mo Martensitic Stainless Steel, Materials and Design, pp. 246-250, 2008.
- [11] B.V. Narasimha Rao and G. Thomas, Design of Fe-4Cr-0.4CMartensitic Steels Eliminating Quench Cracking, Mater. Sci.Eng, Vol 20, pp. 195-202, 1975.
- [12] B.V. Narasimha Rao and G. Thomas, Structure Property Relations and The Design of Fe-4Cr-C Base Structural Steels for High Strength and Toughness, Metall. Trans. A, Vol 11, pp. 441-457, March 1980.
- [13] M. Sarikaya, B.G. Steinberg, and G. Thomas, Optimization of Fe-Cr-C Base Structural Steels for Improved Strength and Toughness, Metall. Trans, Vol 13, pp. 2227-2237, Dec 1982.
- [14] K. P. Balan, A.Venugopal Reddy and D. S. Sarma, Austenite Precipitation During Tempering in 16Cr-2Ni Martensitic Stainless Steel, Scripta Materialia, pp. 901-905, 1998.
- [15] ZOU De-ning, HAN Ying, ZHANG Wei, FANG Xu- Dong, Influence of Tempring Process on Mechanical Properties of 00Cr13Ni4Mo Supermartensitic Stainless Steel, Journal Of Iron Steel, pp. 50-54, 2010.

۲- ترکیب بهینه از انرژی ضربه و استحکام کششی در شرایط عملیات آستنیت‌دهی کردن دوبل بدست آمد. دلیل این مسئله در ارتباط با حل شدن کاربیدها در مرحله اول آستنیت‌دهی کردن ( $1030^{\circ}\text{C}$ )، رسوب کاربیدهای زیاد در حین عملیات تمپر در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  و ایجاد یک ساختار دانه ریز از آستنیت در حین عملیات آستنیت‌دهی کردن مجدد ( $970$ ) است.

۳- با افزایش دمای تمپر تا  $350^{\circ}\text{C}$  سختی و استحکام کششی کاهش اما انرژی ضربه افزایش می‌یابد. در محدوده ی دمایی  $420^{\circ}\text{C}$  -  $350^{\circ}\text{C}$  پدیده ی سختی ثانویه در فولاد مذکور رخ می‌دهد که منجر به افزایش سختی، افزایش استحکام کششی و کاهش انرژی ضربه می‌گردد. در دماهای بالاتر از  $420^{\circ}\text{C}$ ، مجدداً با افزایش دمای تمپر سختی و استحکام کششی کاهش و انرژی ضربه زیاد می‌شود.

۴- با افزایش زمان تمپر از ۲ تا ۶ ساعت (در نمونه SA۱)، انرژی ضربه کاهش می‌یابد. دلیل این مسئله در ارتباط با درشت شدن ذرات کاربید روی مرز فریت دلتا است.

#### ۵- مراجع:

- [1] C. Garica de Andres, L.F. Alvarez, Optimization of Properties Obtained by Quenching Martensitic Stainless Steel X30-40Cr13 and X40-60CrMoV14, Journal of Material Science, pp. 1264-1268, 1993.
- [2] S. K. Bhabri, Intergranular Fracture in 13 wt% Chromium Martensitic Stainless Steel, Journal of Material Science, pp.1264-1268, 1986.
- [3] A. F. Candelaria and C.E. Pinedo, Influence of the Heat Treatment on the Corrosion Resistance of the Martensitic Stainless Steel Type AISI 420, Journal of Materials Science Letters, pp. 1151-1153, 2003.
- [4] K. P. Balan, A. Venugopal Reddy, and D. S. Sarma, Effect of Single and Double Austenitization Treatments on the Mrostructure and Mechanical Properties of 16 Cr-2Ni Steel, Journal of Materials Engineering and Performance, pp. 385-393, 1999.