



اثر عملیات حرارتی تمپر و کوئنچ بر خواص مکانیکی و ریزساختار اتصال فولاد AISI 4130 به AISI 4340 با فرایند GTAW

مهدی میزابی اصل^۱، مجید بلباسی^{۲*}، محمد عمار مفید^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: majid.belbasi@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۴ آذر ۱۴۰۲

پذیرش: ۲ فروردین ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

AISI 4130

فولادهای 4340

دمای تمپر

محیط خنک کننده

جوشکاری GTAW

فولادهای AISI 4130 و AISI 4340 به دلیل مجموعه‌ای از خواص مطلوب مانند استحکام بالا، انرژی ضربه مناسب، جوش‌پذیری مطلوب از پرکاربردترین فولادها در صنایع دفاعی و هوافضا به شمار می‌روند. در این پژوهش اثر دمای تمپر و نوع محیط خنک کننده بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار مقطع جوش اتصال فولاد کم آلیاژ با کربن متوسط AISI 4340 به فولاد AISI 4130 بررسی گردید. ریزساختار جوش شامل فازهای مارتنزیت و فریت بود. ریزساختار مارتنزیت به همراه بینیت و فریت در منطقه HAZ هر دو فولاد مشاهده شد با این تفاوت که در منطقه HAZ فولاد AISI 4340 فریت سوزنی بیشتری جایگزین مارتنزیت شده و در منطقه HAZ فولاد AISI 4130 مارتنزیت کمتر نسبت به بینیت و افزایش کسر حجمی فریت مشاهده شد. نتایج استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش دمای تمپر، استحکام تسلیم و استحکام نهایی کاهش یافته است. مشاهده پروفیل سختی در منطقه جوش و منطقه HAZ هر دو فلز نشان می‌دهد که با افزایش دمای تمپر از ۲۵۰ به ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد بدلیل کاهش چگالی نابجائی‌ها در مرز دانه‌ها، سختی کاهش یافته است. نتایج ریزساختاری نشان داد، نمونه‌های سرد شده در محیط پلیمر، بدلیل تشکیل مارتنزیت بیشتر و آستنیت باقیمانده کمتر، از استحکام بالاتری برخوردار است. مقادیر استحکام نهایی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول در نمونه تمپر شده در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و سرد شده در محیط خنک کننده پلیمر به ترتیب مقادیر ۱۷۰۵ مگاپاسکال، ۱۴۸۰ مگاپاسکال و ۷٫۴ درصد می‌باشد.

The effect of temper heat treatment and quench environment on the mechanical properties and microstructure of AISI 4130 to AISI 4340 steel connection by GTAW

Mehdi MizabiAsl¹, Majid Belbasi^{2*}, Mohammad Ammar Mofid²

1- MSc Graduate, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: majid.belbasi@iau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 25 November 2023

Accepted: 21 March 2024

Keywords:

AISI 4130

4340 Steels

Tempering Temperature

Cooling Environment

GTAW Welding

Abstract

AISI 4130 and AISI 4340 steels are among the most widely used steels in the defense and aerospace industries due to a set of desirable properties such as high strength, suitable impact energy, and favorable weldability. In this research work, the effect of tempering temperature and the type of cooling medium on the mechanical properties and microstructure of the weld joint of low alloy steel with medium carbon AISI 4340 to AISI 4130 steel was investigated. The weld microstructure consisted of martensite and ferrite phases. The microstructure of martensite along with bainite and ferrite was observed in the HAZ area of both steels, with the difference that in the HAZ area of AISI 4340 steel, more acicular ferrite replaced martensite, and in the HAZ area of AISI 4130 steel, more acicular ferrite replaced martensite, and in the HAZ area of AISI 4130 steel, martensite was less than bainite and an increase in the volume fraction of ferrite was observed. The results of the yield strength and ultimate strength of the samples showed that with the increase in tempering temperature, the yield strength and ultimate strength decreased. Observing the hardness profile in the welding zone and the HAZ zone of both metals shows that with the increase of the tempering temperature from 250 to 450 °C the hardness has decreased due to the decrease in the density of dislocations in the grain boundaries. Microstructural results showed that samples cooled in polymer environment have higher strength due to the formation of more martensite and less residual austenite. The values of ultimate strength, yield strength and percentage of elongation in the sample tempered at 250 °C and cooled in the polymer cooling environment are 1705 MPa, 1480 MPa and 7.4%.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

MizabiAsl M, Belbasi M, Ammar Mofid M. The Effect of Temper Heat Treatment and Quench Environment on the Mechanical properties and Microstructure of AISI 4130 to AISI 4340 steel Connection By GTAW. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Mar 20;11(1):28-38. doi: 10.22034/IJME.2024.423695.1876 [In Persian]

۱- مقدمه

از ویژگی‌های بارز فولادهای فوق مستحکم، استحکام ویژه بالا (نسبت استحکام به وزن) آن‌هاست [۱، ۲]. استفاده از این فولادها در مخازن تحت فشار با ضخامت کم موجب کاهش قابل توجه وزن سازه‌های فولادی شده است [۳، ۴]. از آنجایی که در شرایط استحکام بالای این فولادها، احتمال شکست ترد وجود دارد [۵، ۶]، مقاومت به ضربه بالا همراه با انعطاف‌پذیری مناسب در مقادیر استحکام تسلیم بالاتر، برای این فولادها بسیار مهم و ضروری است. عملیات حرارتی یکی از فرایندهای مورد استفاده برای بهبود خواص مکانیکی که ترکیبی از استحکام، سختی و چقرمگی را به همراه دارد [۷]. در فولادهای کم آلیاژ می‌توان با تغییر پارامترهای عملیات حرارتی مانند دما و زمان آستنیت‌زدن، سرعت و محیط سرد کردن، دما و زمان بازپخت، انواع تغییرات را در ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی و رفتار شکست آن‌ها ایجاد کرد [۸، ۹]. مشکلی که این فولادها پس از سخت شدن خواهند داشت چقرمگی، نرمی و خواص ضربه پایین و همچنین حساسیت به شکست ترد مخصوصاً در دماهای پایین می‌باشد [۱۰]. این دسته از فولادها قابلیت جوش‌پذیری پائینی دارند. با توجه به کربن معادل بالا در صورت لزوم در حالت آنیل شده، جوشکاری شوند. در جوشکاری این فولادها، اعمال پیش‌گرم، پس‌گرم و کنترل دمای بین پاسی، به دلیل حساسیت بالای منطقه جوش و منطقه HAZ^۱ به ترک سرد ضرورت دارد. همچنین می‌بایست از یک فرایند جوشکاری محافظت شده در برابر هیدروژن با تمرکز حرارتی بالا نظیر TIG^۲، پرتو الکترونی و لیزر استفاده شود [۱۱، ۱۲]. پس از اتمام عملیات جوشکاری، قطعات جهت حصول خواص مکانیکی مورد نظر تحت عملیات حرارتی کوئنچ تمپر قرار می‌گیرند [۱۳]. خواص مکانیکی این فولادها به ریزساختار فولاد بستگی دارد که توسط دمای تمپر کنترل می‌شود [۱۴]. در پژوهشی یودو و همکاران [۱۵] به بررسی اثر دمای تمپر بر سختی و ریزساختار فولاد ST60 پرداختند. در این پژوهش عملیات کوئنچ در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و سپس عملیات بازپخت در دمای ۴۵۰ الی ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام گردید. نتایج نشان داد پس از عملیات بازپخت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ریزساختار شامل فازهای مارتنزیت تمپر شده به همراه مقادیری بینیت است. توکور و همکاران [۱۶] نشان دادند که در اثر بازپخت فولاد کم آلیاژ با ۳۵ درصد کربن در محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش دمای بازپخت مقادیر سختی، استحکام تسلیم و استحکام نهایی کاهش می‌یابد. با افزایش دمای بازپخت از ۲۵۰ به ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد درصد ازدیاد طول، افزایش و بعد از آن کاهش یافته است. لیم و همکاران [۱۷] گزارش نمودند که رفتار شکست فولاد AISI 4340 در دمای بازپخت ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، از نوع ترد مرز دانه‌ای بوده که ناشی از تشکیل کاربید در مرز دانه‌های آستنیت اولیه می‌باشد. با افزایش دمای بازپخت به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاربیدهای کرومی M₂₃C₆ (M می‌تواند فلز Fe، Cr، Mo و Mn باشد)، با تشکیل درون لایه‌های مارتنزیت و در طول مرز دانه‌های آستنیت اولیه، باعث افزایش انرژی ضربه و تغییر رفتار شکست از ترد به نرم می‌شود.

با توجه به استفاده از این دو فولاد در ساخت مخازن جدار نازک تحت فشار در صنایع هوافضا جهت کاهش وزن سازه‌ها در شرایط کاری پیچیده و حساس از جمله تغییرات دمایی، تغییرات فشار داخلی و خارجی، شوک‌های حرارتی و بارگذاری استاتیکی و دینامیکی در گستره‌ی دمای محیط و دماهای بالاتر، تحقیق حاضر به بررسی اتصال این دو فولاد با سیم جوش ER120SG و انجام عملیات حرارتی، جهت به‌دست آوردن خواص مکانیکی مطلوب به منظور کاهش حادته‌ای هزینه‌های سنگین در صنایع حساس پرداخته است.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش از ورق فولادی AISI 4130 و AISI 4340 با ابعاد 280×250×4 mm در شرایط آنیل کامل بر اساس استاندارد AWS D1.17 استفاده گردید. ترکیب شیمیایی فولادها در جدول ۱ نشان داده شده است. نمونه‌ها پس از جوشکاری تحت عملیات آستنیت‌زدن در دمای ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۰ دقیقه و سپس کوئنچ در محیط روغن و پلیمر پایه آب (۹۰ درصد آب و ۱۰ درصد پلی اتر) و عملیات بازپخت در دماهای ۲۵۰، ۳۵۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۰ دقیقه، در کوره الکتریکی القایی قرار گرفتند.

¹ Heat Affected Zone

² Tungsten Inert Gas

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولادهای AISL 4130, 4340

نوع فولاد	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu
AISI 4340	0.42	0.22	0.64	1.68	0.73	0.22	0.16
AISI 4130	0.31	0.22	0.43	0	0.82	0.19	0.01

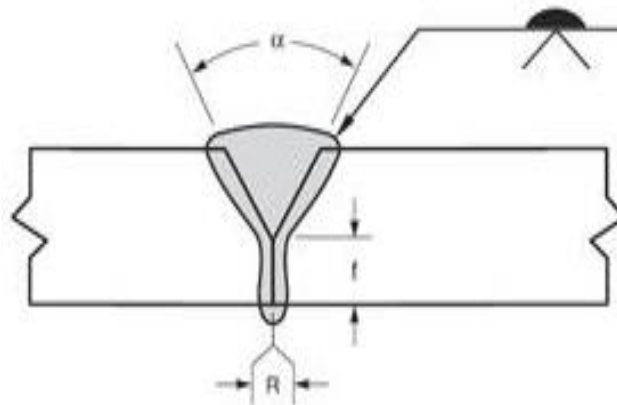
۲-۱- فرایند جوشکاری

فرایند جوشکاری GTAW بصورت غیر اتومات با استفاده از سیم جوش ER120SG با قطر 2.4 mm با سرعت 2.5 mm/s بصورت دو پاسه با شدت جریان ۱۵۰ آمپر انجام شد. از کرنومتر دیجیتالی مدل H543 جهت محاسبه سرعت جوشکاری استفاده شد. برای محافظت از منطقه جوش از گاز محافظ آرگون با خلوص 99.99% استفاده شد. جهت جلوگیری از اعوجاج و تاب برداشتن قطعات در حین جوشکاری از فیکسچر استفاده شد. برای کنترل دمای پیش‌گرم از دما سنج لیزری و گچ حرارتی بهره گرفته شد. در جدول ۲ ترکیب شیمیایی سیم جوش مورد استفاده شده در این تحقیق نشان داده شده است.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی سیم جوش مورد استفاده

نام عنصر	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Cu	S
درصد	0.048	0.045	1.65	0.011	0.048	0.48	3.4	0.294	0.012

شماتیک طرح اتصال جوشکاری بر اساس استاندارد AWS در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۸]. عملیات پیش‌گرم در دمای ۲۰۰-۲۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه انجام شد. نمونه‌ها پس از جوشکاری جهت تنش‌گیری بمدت یک ساعت در دمای ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

شکل ۱ شماتیک طرح اتصال جوشکاری شده $F=2\text{mm}$, $R=1\text{mm}$, $a=25\text{mm}$

۲-۲- آزمون‌های خواص مکانیکی

آزمون سختی‌سنجی به روش میکرو ویکرز مطابق استاندارد ISO6507-(2005) برای رسم پروفیل سختی نمونه‌های مقطع جوشکاری شده پس از عملیات حرارتی بازپخت استفاده شد. برای بررسی خواص کششی نمونه‌ها مطابق شکل ۲ از ورق‌های جوشکاری شده پس از اتمام عملیات حرارتی سه نمونه آزمون کشش از هر دمای تمپر که عمود بر خط جوش بودند، به‌صورت جداگانه تهیه شد. آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 در دمای محیط با سرعت 5 mm/min با دقت دهم مگاپاسگال انجام شد. آزمون ضربه شاریبی جهت تعیین انرژی ضربه طبق استاندارد ISO148، با سه نمونه تست ضربه از فلز جوش و HAZ هر دو فلز ساخته و در دمای محیط آزمایش شدند.



شکل ۲ شماتیک نمونه تست کشش بر اساس استاندارد ASTM E8

۲-۳- بررسی های ریزساختاری

برای بررسی های ریزساختاری نمونه های جوشکاری شده از میکروسکوپ نوری مدل HR3-TRF-p استفاده شد. برای آماده سازی نمونه ها، ابتدا برش کاری توسط فرایند وایرکات با ابعاد 10×20 mm انجام شد. ریزساختار نمونه ها پس از حکاکی با محلول نایتال 2% بررسی شد. سطح شکست نمونه های آزمون ضربه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل S-CRL01446، مطالعه شد. آنالیز شیمیایی رسوبات، بوسیله دستگاه^۱ EDS متصل به آن انجام شد.

۳- نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی فلز جوش در جدول ۳ نشان داده شده است. میانگین میزان رقت فلز پایه، با توجه به تقسیم میزان وزن فلز پایه ذوب شده بر کل وزن سیم جوش و فلز پایه ذوب شده، تقریباً ۴۸ درصد محاسبه شده است. طبق جدول ۳ دو عنصر Ni و Mn که درصد بالایی از عناصر موجود در فلز جوش را دارند، بعنوان عناصر آستنیت زا شناخته شده که با کاهش دمای یوتکتوئید، موجب وسعت و پایداری آستنیت می شوند که موجب افزایش آستنیت باقیمانده در ساختار نهایی می گردد [۱۹].

جدول ۳ ترکیب شیمیایی فلز جوش

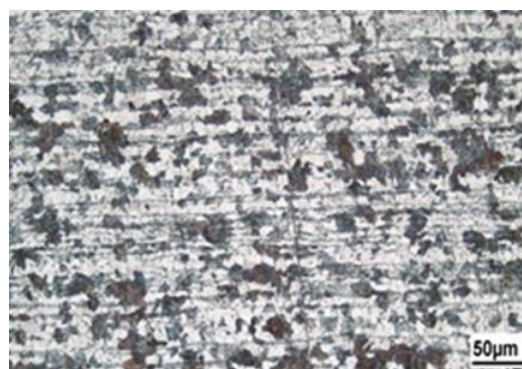
نام عنصر	Fe	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
درصد	94.9	0.16	1.39	0.48	0.52	0.36	1.8	0.011	0.015

۳-۱- بررسی ریزساختار

تصویر ریزساختار اولیه نمونه های عملیات حرارتی شده در حالت آنیل کامل برای فلز پایه AISI 4130 و AISI 4340 را در شکل ۳ نشان می دهد. ریزساختار دارای فازهای فریت پرویوتکتوئید و پرلیت می باشد. فریت پرویوتکتوئید^۲ به رنگ روشن و پرلیت به رنگ تیره می باشد.



(ب)



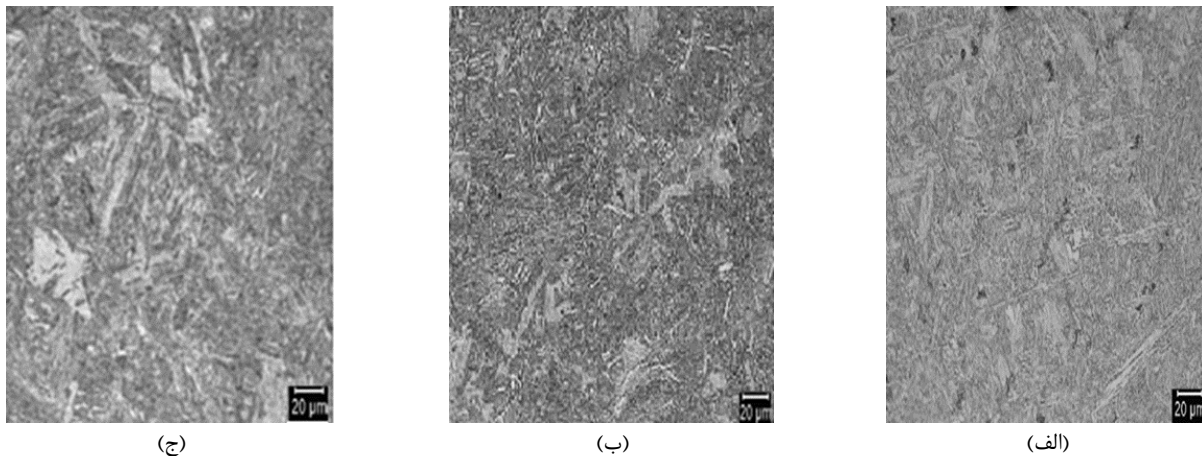
(الف)

شکل ۳ ریزساختار فولاد پایه الف (AISI 4340) و ب (AISI 4130) در شرایط آنیل کامل

¹ Energy Dispersive Spectroscopy

² Proeutectoid

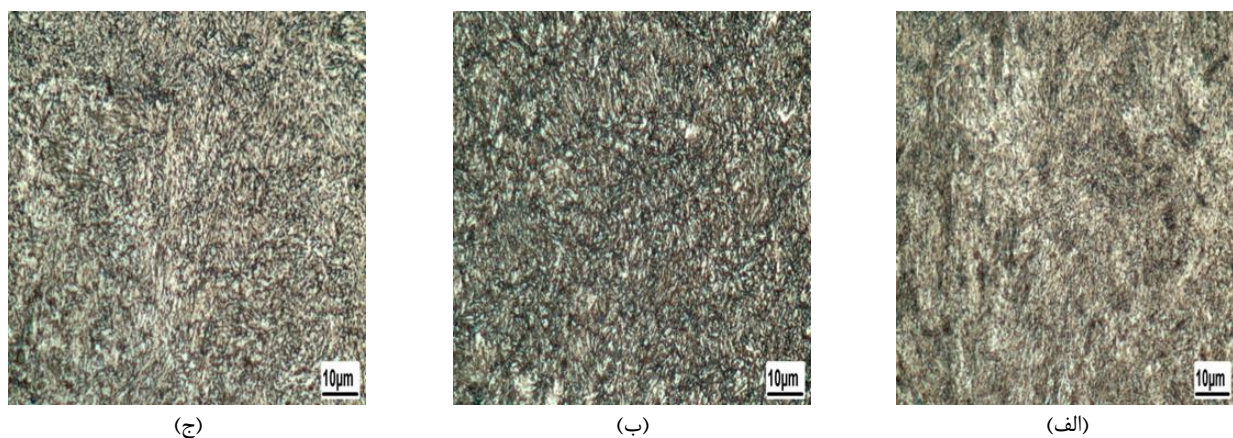
در شکل ۴ تصویر ریزساختار مقطع جوش و منطقه HAZ فولادهای AISI 4130 و AISI 4340 نمونه جوشکاری شده را نشان می‌دهد. ریزساختار در منطقه جوش شکل ۴-الف شامل فاز مارتنزیت و فریت می‌باشد. ریزساختار در منطقه HAZ هر دو فولاد، بر اساس نرخ سرد شدن که از منطقه جوش بسمت فلز پایه در حال کم شدن است شامل مارتنزیت، بینیت و فریت می‌باشد. با این تفاوت که در منطقه HAZ فولاد AISI 4340 فریت سوزنی بیشتری جایگزین مارتنزیت شده است. همچنین میزان مارتنزیت کمتر نسبت به بینیت و افزایش کسر حجمی فریت با رشد غیریکنواخت در HAZ فولاد AISI 4130 از تفاوت‌های منطقه HAZ این دو فولاد در تصویر شکل ۴ می‌باشد.



شکل ۴ ریزساختار نمونه جوشکاری شده (الف) منطقه جوش، (ب) منطقه HAZ فولاد AISI 4340 و (ج) منطقه HAZ فولاد AISI 4130

۳-۲- اثر دمای تمپر بر ریزساختار منطقه جوش

در شکل ۵ ریزساختار نمونه جوشکاری شده که در دماهای ۲۵۰، ۳۵۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تمپر شدند را نشان می‌دهد. ریزساختار در نمونه تمپر شده در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، شامل مارتنزیت تمپر شده و آستنیت باقیمانده است. طبق تحقیقات انجام شده ذرات سفید رنگ پراکنده در ریزساختار کاربیدهای انتقالی مانند کاربید اپسیلین^۱ و یا کاربید اتا^۲ هستند که در دمای تمپر زیر ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود [۱۷-۲۰]. مورفولوژی مارتنزیت در تمام نمونه‌ها لایه‌ای بوده که از مشخصه های فولادهای کربن متوسط در شرایط کوئنچ مستقیم و تمپر شده می‌باشد. طبق شکل ۵-ب با افزایش دمای تمپر به ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد کسر حجمی کاربید افزایش یافته است با افزایش دمای بازپخت به ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، در شکل ۵-ج ساختار مارتنزیت کاملاً بازپخت شده به همراه کاربیدهای درشت و کروی در ریزساختار تشکیل شده است.



شکل ۵ تصاویر ریزساختار مقاطع جوش فولادهای AISI 4130, 4340 تمپر شده در دماهای (الف) ۲۵۰، (ب) ۳۵۰ و (ج) ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد

¹ Epsilon Carbide

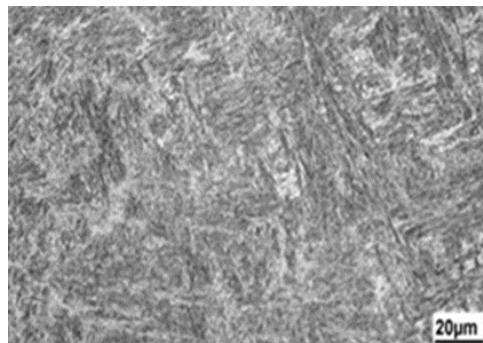
² Eta Carbide

۳-۳- اثر محیط کوئنچ بر خواص مکانیکی

تأثیر محیط کوئنچ بر روی ریزساختار در نمونه‌های کوئنچ شده که در دو محیط پلیمر (۹۰% آب + ۱۰% پلیمر) و روغن در شکل ۶ نشان داده شده است طبق شکل ۶-الف نمونه‌ای که در محیط پلیمر کوئنچ شده ریزساختار آن شامل مارتنزیت و مقدار کمی آستنیت باقی مانده است. در محیط پلیمر بدلیل مقدار زیاد آب (حدود ۹۰%) و افزایش سرعت سرد شدن، مارتنزیت بیشتری تشکیل شده که بالاترین سختی را نیز در بین نمونه‌ها داشت. اما نمونه‌ای که در محیط روغن کوئنچ شده با توجه به دیاگرام CCT^۱ این فولادها، همان‌طور که در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود ریزساختار شامل بینیت و مارتنزیت است. وجود فاز بینیت در ریزساختار منجر به کاهش سختی و استحکام در این نمونه‌ها شده و عدد سختی در منطقه جوش این نمونه کاهش یافته و به ۳۹۸ ویکرز رسیده است.



(ب)



(الف)

شکل ۶ ریزساختار نمونه‌های مقطع جوش کوئنچ شده در محیط (الف) پلیمر و (ب) روغن

۳-۴- اثر دمای تمپر بر خواص مکانیکی

در مقاطع جوش فولاد AISI 4130 با کربن معادل ۰,۶۲% پدیده نرم‌شدگی در منطقه HAZ با حداقل سختی ۳۹۸ ویکرز نزدیک فلز پایه است. همچنین بدلیل درشت شدن ریزساختار، تشکیل مارتنزیت کمتر نسبت به فاز بینیت و فریت، میزان نرمی و افت سختی نسبت به فلز جوش بیشتر شده است. با توجه به پدیده نرم‌شدگی و کاهش سختی در ناحیه HAZ فولاد AISI 4130، شکست در این ناحیه در تمامی نمونه‌ها مشاهده شد که تصویر شکست نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.



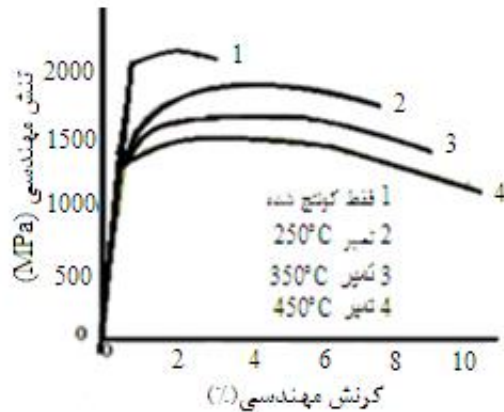
شکل ۷ تصویر نمونه کشش شکسته شده از منطقه HAZ فولاد AISI 4130

شکل ۸ نمودارهای تنش-کرنش مهندسی حاصل از آزمایش کشش برای نمونه‌های تمپر شده در دماهای مختلف در مقایسه با نمونه تمپر نشده را نشان می‌دهد. نمونه فقط کوئنچ شده، دارای استحکام بالا و درصد ازدیاد طول کمتر نسبت به بقیه نمونه‌ها می‌باشد این خصوصیات از ویژگی ریزساختارهای مارتنزیتی بدون تمپر است. دلیل این امر را می‌توان ناشی از دگرگونی آستنیت با شبکه کریستالی (FCC) به مارتنزیت فوق اشباع از کربن با شبکه کریستالی (BCT) دانست. در اثر این دگرگونی، اعوجاج زیادی همراه با تنش‌های داخلی در ساختار ایجاد شده که باعث افزایش استحکام و کاهش انعطاف پذیری می‌شود [۹-۲۱].

¹ Continuous Cooling Transformation

² Face Centered Cubic

³ Body Centered Tetragonal



شکل ۸ منحنی تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های کوئنچ شده و تمپر شده در دماهای مختلف

جدول ۴ استحکام تسلیم، استحکام نهایی و درصد ازدیاد طول به دست آمده برای نمونه‌ها را در دمای تمپر مختلف نشان می‌دهد. با افزایش دمای تمپر از ۲۵۰ به ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد مقادیر استحکام نهایی و استحکام تسلیم به ترتیب از ۱۷۰۵ و ۱۴۸۰ به ۱۳۵۳ و ۱۲۲۱ مگاپاسکال کاهش یافته است. در اثر عملیات حرارتی تمپر، تنش‌های داخلی که بعنوان نیروهای محرکه جهت بازیابی عمل می‌کنند کاهش یافته و یا حذف می‌شوند. همچنین با افزایش دمای تمپر، کربن فوق اشباع از شبکه مارتنزیت خارج شده و ساختار فرعی ناهنجاری‌ها از بین می‌رود [۲۱]. در نتیجه استحکام در دمای تمپر ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر کاهش یافته است. با افزایش دمای تمپر، درصد ازدیاد طول نمونه‌ها با درشت‌تر شدن اندازه کاربیدهای ریزساختار و همچنین با کاهش فاز سخت مارتنزیت، افزایش یافته است که این عامل باعث افزایش درصد ازدیاد طول بیشتر در نمونه‌های دمای تمپر ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد شده است.

جدول ۴ خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده در دماهای تمپر مختلف

دمای تمپر (°C)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	درصد ازدیاد طول (%)	اختلاف استحکام تسلیم و نهایی
فقط کوئنچ شده	1822	2012	2.6	130
°C 250	1480	1705	7.4	225
°C 350	1412	1570	8.6	158
°C 450	1221	1350	9.8	132

۳-۵- اثر دمای تمپر بر کارسختی

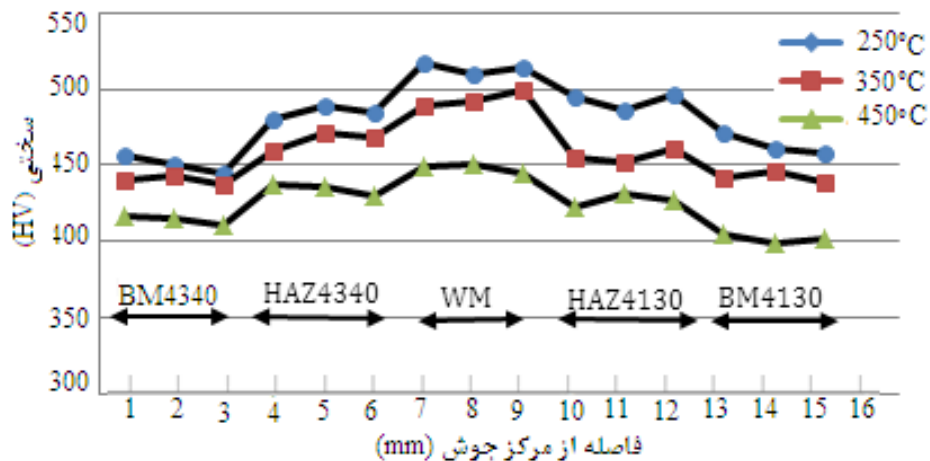
اختلاف میان استحکام تسلیم و استحکام نهایی می‌تواند به عنوان مقدار کرنش سختی در نظر گرفته شود [۲۲، ۲۳]. در جدول ۴ اختلاف مقادیر استحکام تسلیم و نهایی نمونه‌های تمپر شده در دماهای مختلف آورده شده است. طبق جدول ۴ نمونه فقط کوئنچ شده کمترین مقدار کار سختی را از خود نشان می‌دهد که این امر اهمیت فرایند تمپر در افزایش کارسختی در اتصال دو فولاد را نشان می‌دهد که با انجام تمپر در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد درصد ازدیاد طول رشد چشم‌گیری نسبت به نمونه بدون تمپر را نشان می‌دهد.

در دمای پایین تمپر ناهنجاری‌های زیادی در ساختار فرعی حضور دارند؛ همچنین ذرات ریز کاربید انتقالی^۱ در ریزساختار وجود دارند که اندر کنش‌های ناهنجاری با یکدیگر و با ذرات کاربید انتقالی در هنگام اعمال تنش، سبب ایجاد کارسختی می‌شود. با افزایش میزان تغییر شکل، این پدیده شدت یافته و نرخ کارسختی افزایش می‌یابد. در دمایی ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، اختلاف استحکام تسلیم و نهایی زیاد است. اما با افزایش دمای تمپر و خروج کربن از شبکه کریستالی BCT مارتنزیت، کاهش تنش‌های داخلی و همچنین تبدیل کاربیدهای انتقالی ریز به سمنتیت درشت، نرخ کارسختی کاهش یافته و استحکام تسلیم و نهایی بهم نزدیک می‌شوند [۲۴]. تشکیل کاربیدهای ریز با توزیع یکنواخت که باعث افزایش قابل ملاحظه دانسیته ناهنجاری‌ها در ریزساختار می‌شود [۲۴]. علت اصلی افزایش کارسختی بالای نمونه تمپر شده در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بود.

¹ Transition Carbide

۳-۶- اثر دمای تمپر بر ریز سختی

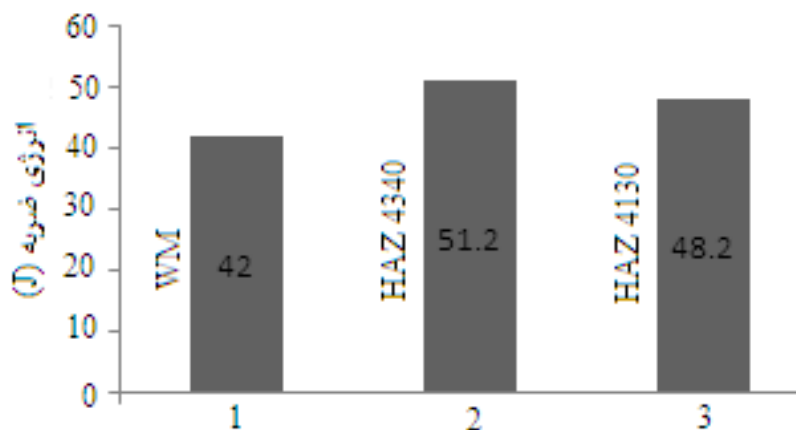
شکل ۹ تغییرات ریزسختی نمونه‌ها را در منطقه جوش، HAZ و فلز پایه که در دماهای ۲۵۰، ۳۵۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تمپر شدند، نشان می‌دهد. با افزایش دمای تمپر، در تمامی منحنی‌ها کاهش عدد سختی مشاهده می‌شود. این رفتار به این دلیل است که با افزایش دمای تمپر، کربن فوق اشباع در شبکه مارتنزیت، با تشکیل کاربیدهای انتقالی کاهش یافته است. هم چنین با افزایش دمای تمپر، چگالی نابه‌جائی‌ها در مرز دانه‌ها و تنش‌های پسماند ناشی از تشکیل مارتنزیت که عامل افزایش سختی و استحکام در نمونه‌ها می‌باشد، کاهش یافته است [۲۴، ۲۵]. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش دمای تمپر، از ۲۵۰ به ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد عدد سختی بطور میانگین در مناطق سه گانه، جوش، HAZ و فلز پایه کاهش یافته است.



شکل ۹ نمودار تغییرات سختی مقطع جوش تمپر شده در دماهای مختلف

۳-۷- انرژی ضربه

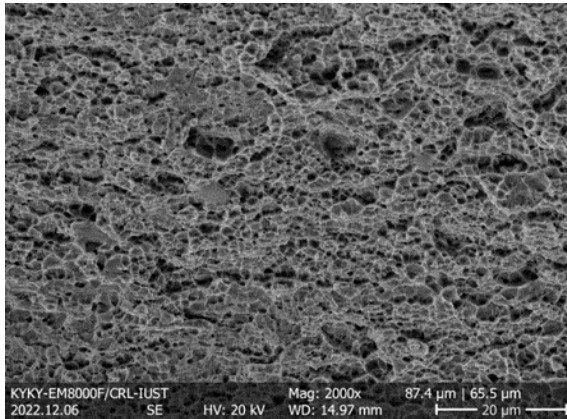
تغییرات انرژی ضربه حاصل از شکست نمونه‌ها در دمای تمپر ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد در منطقه جوش و HAZ هر دو فلز در دمای محیط در شکل ۱۰ نشان می‌دهد. با توجه به اختلاف ترکیب شیمیایی و ریزساختار در منطقه HAZ هر دو فلز، مقادیر انرژی ضربه نیز متفاوت است. فلز جوش با ریزساختار مارتنزیت بیشتر و فریت کمتر، کمترین مقدار انرژی ضربه را نشان داد؛ اما در منطقه HAZ فولاد AISI 4340 با تشکیل ریزساختار بینیت و جایگزینی فریت سوزنی به جای مارتنزیت، بیشترین مقدار انرژی ضربه را داشت. در HAZ فولاد AISI 4130 با افزایش ریزساختار بینیت بجای مارتنزیت و افزایش فاز فریت، انرژی ضربه کمتری نسبت به HAZ فولاد AISI 4340 به دست آمد.



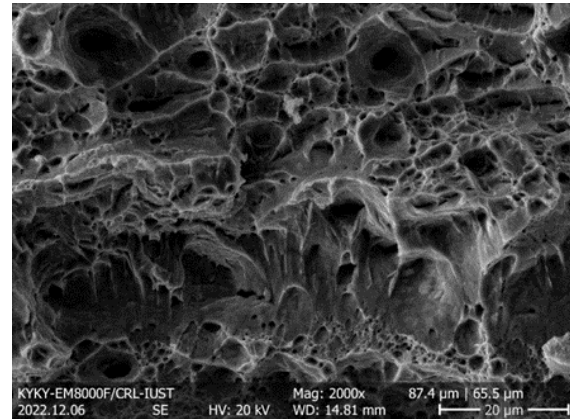
شکل ۱۰ نمودار انرژی ضربه

۳-۸- شکست نگاری

شکل ۱۱ تصویر SEM سطح شکست آزمون ضربه نمونه جوشکاری شده و HAZ فولاد AISI 4340 را نشان می دهد. در نمونه جوشکاری شده، شکست، ترکیبی از شکست نرم و ترد می باشد که به آن شبه رخ برگی می گویند. گسیختگی گود شده به همراه فرورفتگی فنجانی شکل در تصویر شکل ۱۰-الف مشخص می باشد. سطح شکست نیمه ترد در منطقه جوش از انرژی ضربه پائین ساختار مخلوط مارتنزیت و فریت می باشد. اما در سطح شکست منطقه HAZ نمونه شکل ب سطوح کلیواژ^۱ یا شبه کلیواژ مشاهده نشد و دیمپلها^۲ به وضوح رویت شد. به دلیل وجود حفره های زیاد در اندازه های مختلف نوع غالب شکست، شکست نرم می باشد.



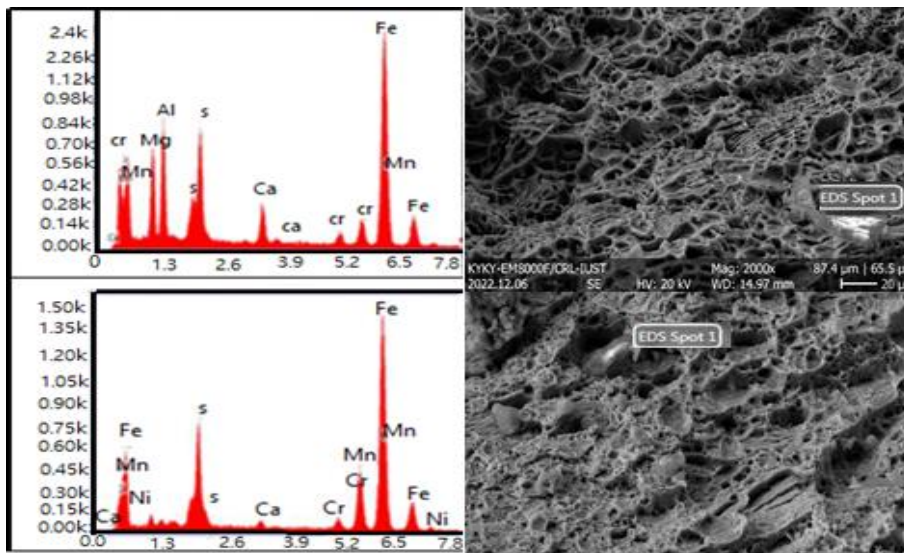
(ب)



(الف)

شکل ۱۱ تصاویر SEM از سطح شکست نمونه (الف) جوشکاری شده و (ب) منطقه HAZ فولاد AISI 4340

شکل ۱۲ آنالیز رسوبات ناخالصی ها در دیمپل های ایجاد شده در نمونه بازیخت شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد را با استفاده از EDS نشان می دهد. با توجه به نتایج، افزایش میزان گوگرد و منگنز، تشکیل MnS را محتمل نموده و با تشکیل سولفید منگنز از ایجاد سولفید آهن و رسوبات آن در مرز دانه جلوگیری کرده و تردی ناشی از گوگرد را کاهش داده است.



عنصر	وزن (%)	اتمی
O K	8.30	19.2
Mg K	10.18	15.11
Al K	10.34	11.72
S K	3.45	3.13
Ca K	1.64	1.15
Mn K	4.76	3.16
Fe k	51.11	33.17
عنصر	وزن (%)	اتمی
S K	121.45	19.9
Ca K	0.73	0.91
Cr K	0.63	0.69
Mn k	14.75	13.65
Fe K	70.60	64.25
Na k	0.73	0.64

شکل ۱۲ آنالیز EDS رسوبات و ناخالصی ها در سطح شکست نمونه تمپر شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد

¹ Cleavage

² Dimples

۴- نتیجه گیری

- (۱) در اثر انجام عملیات حرارتی تمپر در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد استحکام تسلیم و نهایی به ترتیب ۲۲٫۵ و ۲۹٫۵ درصد کاهش و درصد ازدیاد طول ۱۵۱ درصد افزایش نسبت به نمونه فقط کوئنچ شده را نشان می‌دهد.
- (۲) ریز ساختار منطقه HAZ هر دو فلز بر اساس نرخ سرد شدن شامل فازهای بینیت، مارتنزیت و فریت است. با این تفاوت که در ریزساختار HAZ فولاد AISI 4340 فریت سوزنی جایگزین مارتنزیت شده و در HAZ فولاد AISI 4130 با تشکیل ریزساختار بینیت به جای مارتنزیت و رشد غیریکنواخت دانه‌های فریت در این منطقه، به دلیل تاثیر متقابل سرعت جوانه‌زنی و رشد آن با تغییرات دما مشاهده شد.
- (۳) بررسی شکست نگاری از سطح شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد که شکست، در منطقه جوش نمونه بازپخت شده در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد مخلوطی از شکست ترد و نرم به دلیل انرژی ضربه پائین ساختار مخلوط بینیت و مارتنزیت می‌باشد؛ اما در منطقه HAZ فولاد AISI 4340، شکست نرم با انرژی ضربه بالا به دلیل تشکیل ریزساختار فریت سوزنی به جای مارتنزیت بدست آمد.
- (۴) محیط خنک کننده پلیمر بدلیل وجود مقدار زیاد آب در ترکیب خود و سرعت سرعتهای بیشتر، باعث افزایش مارتنزیت و کاهش آستنیت باقیمانده در ساختار شده که این رفتار، افزایش سختی و استحکام را در بر داشت، ولی محیط خنک کننده روغن با ایجاد ریزساختار بینیت و مارتنزیت، منجر به کاهش سختی، استحکام و افزایش انعطاف‌پذیری در نمونه‌ها شده است.
- (۵) ترکیب خواص مکانیکی مطلوب در دمای بازپخت ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، در محیط خنک کننده پلیمر و مقادیر استحکام نهایی و تسلیم به ترتیب ۱۷۰۵ و ۱۴۸۰ مگاپاسکال و درصد ازدیاد طول ۷٫۴ درصد می‌باشد.
- (۶) برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب در جوشکاری فولادهای با کربن بالاتر از ۰٫۳ درصد پیشنهاد می‌گردد جوشکاری در حالت آنیل شده با رعایت شرایط درست عملیات حرارتی پیش‌گرم، پس‌گرم و دمای بین پاسی، استفاده از فیلر کم کربن به همراه حرارت ورودی کم بسیار موثر خواهد بود.

References

- [1] Jandejsek I, Gajdoš L, Šperl M, Vavřík D. Analysis of standard fracture toughness test based on digital image correlation data. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017 Sep 1;182:607-20. doi: [10.1016/j.engfractmech.2017.05.045](https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2017.05.045)
- [2] Bakhshi S, Asadi Asadabad M, Bakhshi S, Bakhshi S. Influence of the heat treatment on the quantitative features of the fracture surfaces and the mechanical properties of AISI 4340 steel sheets. *Ironmaking & Steelmaking*. 2023 Mar 16;50(3):295-309. doi: [10.1080/03019233.2022.2107111](https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2107111)
- [3] Zare A, Ekrami A. Influence of martensite volume fraction on impact properties of triple phase (TP) steels. *Journal of materials engineering and performance*. 2013 Mar;22:823-9. doi: [10.1007/s11665-012-013-2](https://doi.org/10.1007/s11665-012-013-2) [In Persian].
- [4] Chentouf SM, Jahazi M, Fortin R. Influence of the quench process on microstructure evolution in a landing gear steel. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2014 Nov 14* (Vol. 46569, p. V08BT10A068). American Society of Mechanical Engineers. doi: [10.1115/IMECE2014-38636](https://doi.org/10.1115/IMECE2014-38636)
- [5] Tomita Y. Morphology control of ductile second phase and improved mechanical properties in high-strength low-alloy steels with mixed structure. *Journal of materials science*. 1992 Apr;27:1705-15.
- [6] Tomita Y, Okabayashi K. Improvement in lower temperature mechanical properties of 0.40 pct C-Ni-Cr-Mo ultrahigh strength steel with the second phase lower bainite. *Metallurgical Transactions A*. 1983 Feb;14:485-92. doi: [10.1007/BF02644225](https://doi.org/10.1007/BF02644225)
- [7] Puga-Patlán C, Lopez-Garcia RD, Medina-Juárez I, Maldonado-Reyes A, Reyes-Gallegos MM. Study of Cooling Medium Variables during Quenching in SAE 4340 Steel Using Statistical and Modeling Tools. *Metals*. 2023 Sep 20;13(9):1627. doi: [10.3390/met13091627](https://doi.org/10.3390/met13091627)
- [8] Blaoui MM, Zemri M, Brahami A. Effect of Heat Treatment Parameters on Mechanical Properties of Medium Carbon Steel. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2018 Nov;22(4):909-18. doi: [10.2478/mme-2018-0071](https://doi.org/10.2478/mme-2018-0071)
- [9] Vahdat SE, Nategh S, Mirdamadi S. Effect of microstructure parameters on tensile toughness of tool steel after deep cryogenic treatment. *International journal of precision engineering and manufacturing*. 2014 Mar;15:497-502. doi: [10/1007/s12541-014-0363-4](https://doi.org/10.1007/s12541-014-0363-4) [In Persian]
- [10] Mehrabi A, Sharifi H, Asadi Asadabad M, Amini Najafabadi R, Rajaei A. Improvement of AISI 4340 steel properties by intermediate quenching-microstructure, mechanical properties, and fractography. *International Journal of Materials Research*. 2020 Sep 16;111(9):711-79. [In Persian]

- [11] Irving B. The challenge of welding heat-treatable alloy steels. *Welding journal*. 1995;74(2):43-8. [In Persian]
- [12] Mirak A, Rezaimanesh M, Gaeni M. Effect off heat input on the. microstructure and mechanical properties off the low alloy quench and tempered steel welded joint (AISI 4340). *Metallurgical Engineering*. 2019 Oct;22:225-38. doi: [10.22076/ME.2020.113138.1258](https://doi.org/10.22076/ME.2020.113138.1258) [In Persian]
- [13] Mishler HW, Monroe RE, Rieppel PJ. *Welding of high-strength steels for aircraft and missile applications*. Defense Metals Information Center: Battelle Memorial Institute; 1959. doi: [10.21236/ada278522](https://doi.org/10.21236/ada278522)
- [14] Talebi A, Bakhtiari R, Abbasi Khazaei B, Ghobeiti-Hasab M. Effect of tempering temperature microstructure and work hardening behavior of a triple-phase AISI 4140 steel. *Journal of Iron and Steel Research*. 2021 Sep;23-9. dio: [10.22034/IJISSI.2022.76669.1132](https://doi.org/10.22034/IJISSI.2022.76669.1132)
- [15] Yudo H, Jokosisworo S. The effect of low tempering, medium tempering, and high tempering heating temperature variations in the type of medium carbon steel ST 60 on microstructure, hardness, and toughness. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021* (Vol. 1052, No. 1, p. 012047). IOP Publishing. doi: [10.1088/1757-899X/1/012047](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1/012047)
- [16] Wang KL, Li X, Dong XJ. Effect of tempering temperature on mechanical properties and microstructures of 800MPa microalloy low carbon bainitic steel. *Advanced Materials Research*. 2014 May 8;893:406-9. doi: [10.428/www.Scientific.net/AMR.893.406](https://doi.org/10.428/www.Scientific.net/AMR.893.406)
- [17] Lim NS, Bang CW, Das S, Jin HW, Ayer R, Park CG. Influence of tempering temperature on both the microstructural evolution and elemental distribution in AISI 4340 steels. *Metals and Materials International*. 2012 Feb;18:87-94. doi: [10.1007/s12540-012-0011-4](https://doi.org/10.1007/s12540-012-0011-4)
- [18] AWS D17. 1. *Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications*. 2nd ed. 2010.
- [19] Golzar MA. *Principles and Applications of Heat Treatment of Steels*. 2nd ed. Materials Engineering Isfahan University of Technology; 2014. [In Persian]
- [20] Thompson SW. A two-tilt analysis of electron diffraction patterns from transition-iron-carbide precipitates formed during tempering of 4340 steel. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2016 Oct;5:367-83. doi: [10.1007/s13632-016-0302-0](https://doi.org/10.1007/s13632-016-0302-0)
- [21] He BB, Xu W, Huang MX. Increase of martensite start temperature after small deformation of austenite. *Materials Science and Engineering: A*. 2014 Jul 15;609:141-6. doi: [10.1016/j.msea.2014.04.108](https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.108)
- [22] Akbarpour MR, Ekrami A. Effect of ferrite volume fraction on work hardening behavior of high bainite dual phase (DP) steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2008 Mar 25;477(1-2):306-10. doi: [10.1016/j.msea.2007.05.051](https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.051) [In Persian]
- [23] Bakhtiari R, Ekrami A. The effect of bainite morphology on the mechanical properties of a high bainite dual phase (HBDP) steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2009 Nov 15;525(1-2):159-65. doi: [10.1016/j.msea.2009.07.042](https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.07.042) [In Persian]
- [24] Dieter GE. *Mechanical Metallurgy*. 2nd ed. Mc Graw-Hill; 1976.
- [25] Lu W, Herbig M, Liebscher CH, Morsdorf L, Marceau RK, Dehm G, Raabe D. Formation of eta carbide in ferrous martensite by room temperature aging. *Acta Materialia*. 2018 Oct 1;158:297-312. doi: [10.1016/j.actamat.2018.07.071](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.071)