نشریه علمی

تحقیقات در علوم مهندسی سطح و نانو مواد

سال ۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱ ۹

تعیین دما و زمان بهینه برگشت دادن به‌منظور حصول خواص مکانیکی مطلوب در ورق فولادی ASTM A517 Gr. B

بهرنگ اهدایی[۱]، رضا آبدیده*[۱]، محمد هیزم بر[۱]

[۱] شرکت فولاد اکسین خوزستان، اهواز، ایران

چکیده

ورق‌های فولادی ASTM A517 Gr. B یک گروه از فولادهای سازه آبدهی شده و برگشت داده شده با ترکیبی از خواص مکانیکی مناسب هستند. مهم‌ترین این خواص استحکام تسلیم بالا، جوش‌پذیری و چقرمگی خوب در دماهای پایین می‌باشد. استفاده از این فولادهای پر استحکام باعث کاهش هزینه و افزایش راندمان می‌گردد. در این تحقیق دما و زمان بهینه تمپر جهت حصول خواص مکانیکی مطلوب در ورق فولادی ASTM A517 Gr. B مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور تعداد نه ورق نورد شده از یک ذوب پس از فرآیند آبدهی، در سه دمای ۶۳۰، ۶۴۰ و ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶۷، ۷۷ و ۸۷ دقیقه برگشت داده شدند. نتایج آزمون‌های مکانیکی روی ورق‌های مذکور نشان داد که افزایش دما و زما نعملیات برگشت دادن سبب کاهش استحکام تسلیم و کششی، کاهش سختی و افزایش مقاومت به ضربه می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که تغییرات مقاومت به ضربه حساسیت بیشتری نسبت به متغیر دما دارد.

واژه‌های کلیدی: *فولاد ASTM A517 Gr. B، دمای برگشت دادن، زمان برگشت دادن ، خواص مکانیکی مطلوب.*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۵

Determination of optimized temperature and time of tempering to desired mechanical properties of ASTM A517 Gr. B steel plate

Behrang Ehdaei[1], Reza Abdideh *[1], Mohammad Hizombor [1]

[1] *Khouzestan oxin steel co, Ahvaz, Iran*

Abstract

ASTM A517 Gr. B steel plates are a group of structured steels quench-tempered with a combination of suitable mechanical properties. The most important of these properties are the high yield strength, weldability and good toughness in low temperatures. Using these high strength steels causes decreasing cost and increase in efficiency. In this paper optimized tempering temperature and time is studied to achieve to proper mechanical properties in ASTM A517 Gr. B steel plate. For this purpose, nine rolled plates from one melt are tempered after quenching process in three temperatures of 630, 640 and 650 °C for 67,77 and 87 minutes. Results of the mechanical tests on the plates showed that increasing temperature and time of tempering causes decreasing of yield strength and tensile strength, decreasing hardness and increasing of strength against impact. Results also show that sensitivity of changing impact strength is more than temperature term.

Keywords: *ASTM A517 Gr. B steel, tempering temperature, tempering time, proper mechanical properties.*

Received: 2022/01/02

Accepted: 2022/04/14

* نویسنده مسئول : رضا آبدیده

نشانی: اهواز ، شرکت فولاد اکسین خوزستان، اهواز

پست الکترونیکی : abdideh.reza@gmail.com

۱. مقدمه

فولادهای ساده کربنی و میکرو آلیاژی جزء دسته فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا با مقادیر محدودی عناصر کاربیدساز قوی جهت کنترل رشد دانه‌های آستنیت می‌باشند. فولاد ASTM A517 Gr. B ازجمله این فولادها می‌باشد. خانواده فولادهای A517 یک گروه از فولادهای سازه آبدهی و برگشت داده شده شده با ترکیبی از خواص مکانیکی مناسب هستند. مهم‌ترین این خواص استحکام تسلیم بالا، جوش‌پذیری و چقرمگی خوب در دماهای پایین می‌باشد. استفاده از این فولادهای استحکام بالا باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش راندمان می‌گردد. این فولادها در هفت زیرمجموعه ساخته‌شده با برخی شباهت‌ها و یا عدم تطابق‌ها به علت استحکام تسلیم و کشش بالا، چقرمگی و انعطاف‌پذیری خوب، مقاومت به خوردگی و جوش‌پذیری مناسب، به‌طور گسترده در سازه‌های استحکام بالا، مخازن تحت‌فشار، تجهیزات مورد استفاده در معادن، بدنه کشتی و ... استفاده می‌شوند. خواص مکانیکی ورق‌های فولادی مذکور بر اساس استاندارد ASTM در جدول ۱ آورده شده است[۱].

جدول ۱- خواص مکانیکی مورد نیاز ورق‌های فولادی ASTM A517 تا ضخامت‌های زیر ٦٥ میلی‌متر

استحکام تسلیم (Mpa)	استحکام کششی (Mpa)	درصد ازدیاد طول	انرژی ضربه در دمای -٥١°C (J)
Min. 690	795-930	Min. 16	Min. 27*

*بر اساس استاندارد ASTM، دمای تست ضربه و میزان چقرمگی ورق فولادی ASTM A517 با توجه به شرایط کاربرد آن، توسط مشتری مشخص می‌گردد.

در حال حاضر ورق فولادی A517 کاربرد بسیار زیادی در ساخت بدنه‌های سخت زیردریایی و ساخت مخازن تحت فشار دارد که علت آن دارا بودن هم‌زمان استحکام و قابلیت انعطاف بالاست. البته استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی این فولاد به هم نزدیک بوده و کار کردن با این فولاد سخت می‌باشد، چون ناحیه تغییر شکل پلاستیک این فولاد کوتاه شده و به راحتی در اثر جوشکاری در صورت رعایت نکردن دقیق پیش‌گرم و پس‌گرم، ترک می‌خورد. با این وجود، این فولاد به دلیل برخی خواص مطلوبی که دارد کاربرد وسیعی در صنایع نظامی دریایی یافته است و به همین دلیل بررسی سایر خواص این فولاد، مانند خاصیت مقاومت به خوردگی، خاصیت مغناطیسی، خاصیت جوش‌پذیری، هدایت الکتریکی و حرارتی، خواص ضربه‌ای (قابلیت جذب انرژی در دماهای پایین) و ... نیز اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است[۲].

به دلیل عدم قابلیت تولید این نوع ورق‌ها در داخل کشور در گذشته و هزینه‌های بالایی که صرف خرید آن از خارج کشور به‌خصوص از شرکت روزنکوئیست آلمان می‌گردید، تلاش‌های زیادی در جهت تولید این ورق‌ها در داخل کشور صورت گرفته و با همکاری چند شرکت فولادسازی و نوردی در داخل کشور این ورق‌های فولادی تولید گردیده‌اند. این خانواده از فولادها خواص مطلوب خود را توسط عملیات آبدهی و برگشت به دست می‌آورند. بدین ترتیب با تغییر پارامترهای عملیات حرارتی (درجه حرارت و زمان آستنیته کردن، نرخ سرد کردن، درجه حرارت و زمان برگشت‌دهی و ...) می‌توان انواع تغییرات را در ساختار و خواص مکانیکی فولاد ایجاد کرد [۳]. از جمله مهم‌ترین این پارامترها، درجه حرارت و زمان برگشت‌دهی می‌باشد. چرا که در صورت انتخاب ناصحیح دما و زمان برگشت‌دهی ، نتایج تست ضربه به‌شدت دچار نوسان شده و ورق غیرقابل استفاده در کاربردهای خاص، به‌ویژه شرایط محیطی دما پایین می‌شود. در این تحقیق تعیین دما و زمان بهینه برگشت-دهی جهت حصول خواص مکانیکی مطلوب در ورق فولادی ASTM A517 Gr. B مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به وسیله تست‌های مکانیکی و بررسی‌های ریزساختاری مورد مطالعه قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، به‌منظور تعیین دما و زمان بهینه برگشت-دهی جهت حصول خواص مکانیکی مطلوب در ورق فولادی A517، تعداد نه ورق نورد شده از یک ذوب انتخاب

گردید.شرایط و برنامه نوردی انجام شده بر روی هر یک از ورق ها به‌صورت یکسان در نظر گرفته شده بود. ترکیب شیمیایی فولادهای مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی فولاد مورداستفاده در پژوهش

Elements	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Nb
Wt%	۰/۱۶۸	۰/۸۴۲	۰/۱۶٤	۰/۰۰٦	۰/۰۰٤	۰/۰۲۷	۰/۰۱٦	۰/۰۰۲
Elements	Cr	Mo	B	Cu	V	Ni		
Wt%	۰/٤۸٦	۰/۲۰٦	۰/۰۰۱	۰/۰۳٤	۰/۰٤٦	۰/۰۲۰		

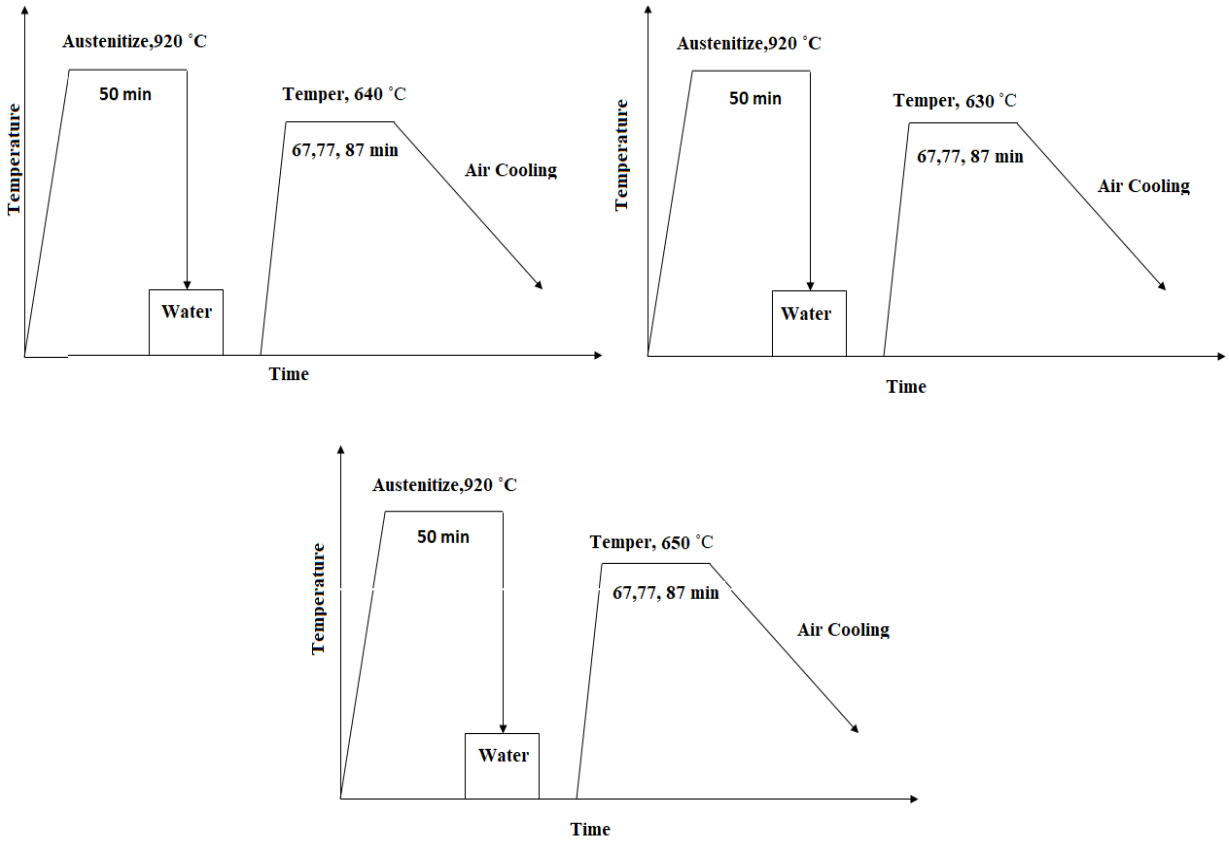
ابعاد ورق‌های فولادی مورد بررسی ۸۰۰۰×۲۰۰۰ ×۱۸ میلی متر بود. پس از فرآیند نورد، ورق‌ها جهت انجام عملیات آبدهی و برگشت دادن به واحد عملیات حرارتی فرستاده شدند. ابتدا ورق‌ها در دمای ۹۲۰ و به مدت ۵۰ دقیقه آستنیته شدند. سپس با قرار گرفتن در زیر دستگاه آبدهی در شرایط یکسان به سرعت به‌وسیله پاشش آب، تحت عملیات آبدهی قرار گرفتند. تجهیز مورد استفاده جهت عملیات آبدهی ورق‌ها از دو قسمت فشار بالا و فشار پایین تشکیل‌شده است. در ناحیه پرفشار، آب با فشار bar ۷ و دبی ۳۰۰۰ مترمکعب بر ساعت و در ناحیه کم‌فشار، با فشار bar ۳ و دبی ٦۰۰۰ مترمکعب بر ساعت بر روی ورق‌ها پاشیده می شود. لازم به ذکر است در ناحیه کم‌فشار جهت خنک‌سازی یکنواخت، ورق‌ها در زیر دستگاه آبدهی دارای حرکت رفت و برگشتی می‌باشند. پس از فرآیند آبدهی جهت تعیین دما و زمان بهینه برگشت دادن، ورق‌ها در سه دمای ٦۳۰، ٦٤۰ و ٦۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ٦۷، ۷۷ و ۸۷ دقیقه تحت عملیات برگشت دهی، قرار گرفتند و نتایج به‌وسیله آزمون‌های مکانیکی و بررسی‌های ریزساختاری مورد مطالعه قرار گرفت. سیکل عملیات آبدهی و برگشت دادن انجام‌شده بر روی ورق‌ها، به‌صورت ترسیمی در شکل۱ نشان داده شده است.

نمونه‌هایی جهت آزمون‌های کشش، ضربه، سختی و متالوگرافی، به‌صورت عرضی از ورق‌ها تهیه گردید. جهت بررسی خواص مکانیکی، آزمون‌های کشش و ضربه بر روی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM A370 صورت گرفت. سختی نمونه‌ها نیز توسط دستگاه سختی سنج بر اساس سختی ویکرز اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی ریزساختار نهایی به‌وسیله میکروسکوپ نوری، برخی از نمونه‌ها تحت سمباده زنی و پولیش قرارگرفته، توسط محلول نایتال ۲٪ حکاکی گردیدند.

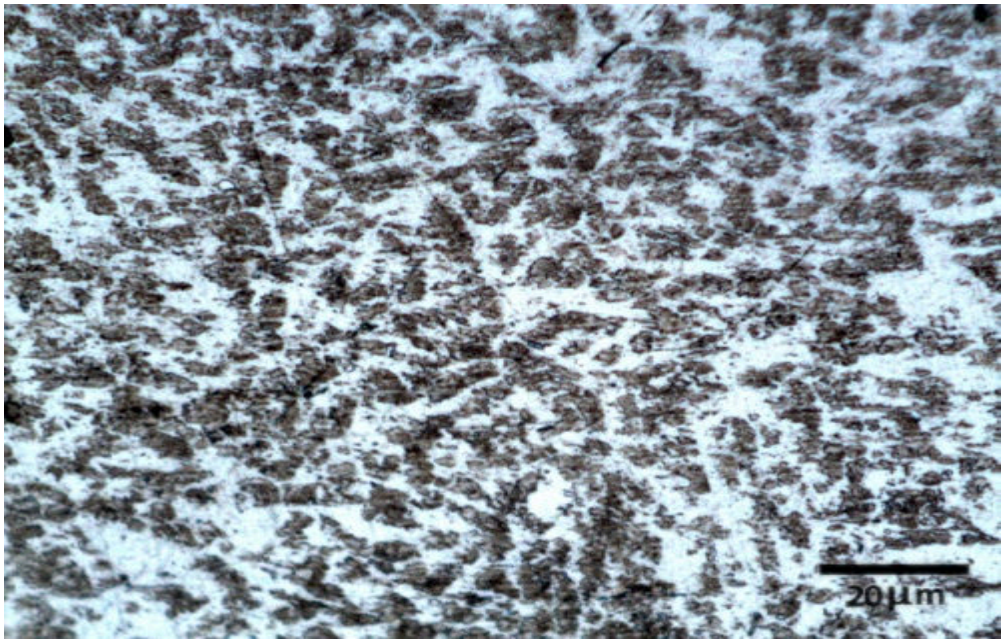
۳. نتایج و بحث

در شکل شماره ۲ تصویر ریزساختار ورق فولادی A517 پس از فرآیند نورد آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است ساختار فولاد مذکور پس از فرآیند نورد شامل فریت و پرلیت می‌باشد. در شکل شماره ۳ تصاویر ریزساختاری برخی از ورق‌های مورد پژوهش پس از عملیات آبدهی و برگشت دهی و در دماها و زمان‌های متفاوت برگشت دهی آورده شده است. به علت تنش‌های داخلی ایجاد شده در ضمن سرد کردن سریع به‌وسیله آب، تمامی قطعات سخت شده نسبتاً ترد و شکننده می‌باشند و کاربرد صنعتی ندارند. لذا برای پایدارسازی ساختار و کاهش سختی و تردی بیش از حد فاز مارتنزیت لازم است ورق‌ها با توجه به ضخامت، ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی هدف در دمایی زیرخط A_{c1}برای مدت‌زمانی مشخص بازگشت داده شوند تا بخشی از اتم‌های کربن حل‌شده با تشکیل ذرات کاربید که سختی پایین‌تری دارند از محلول جدا شوند و درنتیجه ساختار مارتنزیت برگشت داده شده (تیغه‌های سمانتیت در زمینه فریت) را ایجاد نمایند [٤،۵]. براساس تصاویر مشخص است که ساختار کلیه ورق‌ها شامل مارتنزیت برگشت داده شده می‌باشد. همچنین مشخص است با افزایش دما و زمان

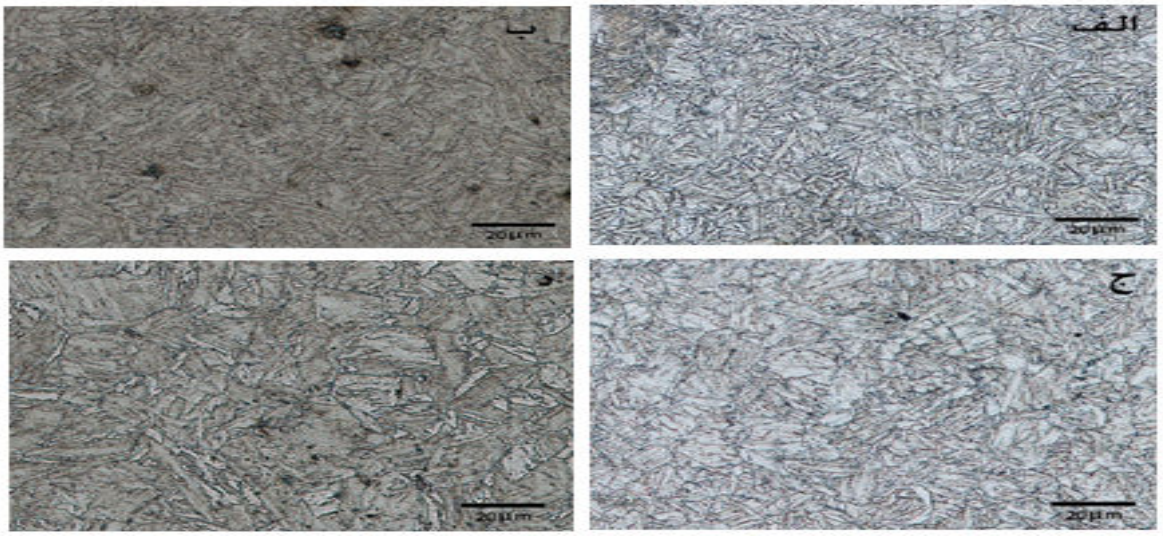
برگشت‌دهی، ریخت مارتنزیت برگشت داده شده خشن‌تر شده و ساختار به حالت تعادلی نزدیک‌تر می‌شود. این عامل حساسیت بیشتری نسبت به پارامتر دما را نشان داد. به طورکلی چون محدوده دمای انتخاب شده جهت عملیات برگشت‌دهی در این پژوهش بالا در نظر گرفته شده است، لذا سرعت کار سختی به مراتب پایین‌تر خواهد بود و در نتیجه تفاوت بین استحکام تسلیم و کششی ورق‌ها کمتر می باشد.



شکل ۱- ترسیم فرآیند عملیات آبدهی و برگشت‌دهی انجام شده بر روی ورق‌ها



شکل ۲- ریزساختار ورق فولادی A517 پس از فرآیند نورد

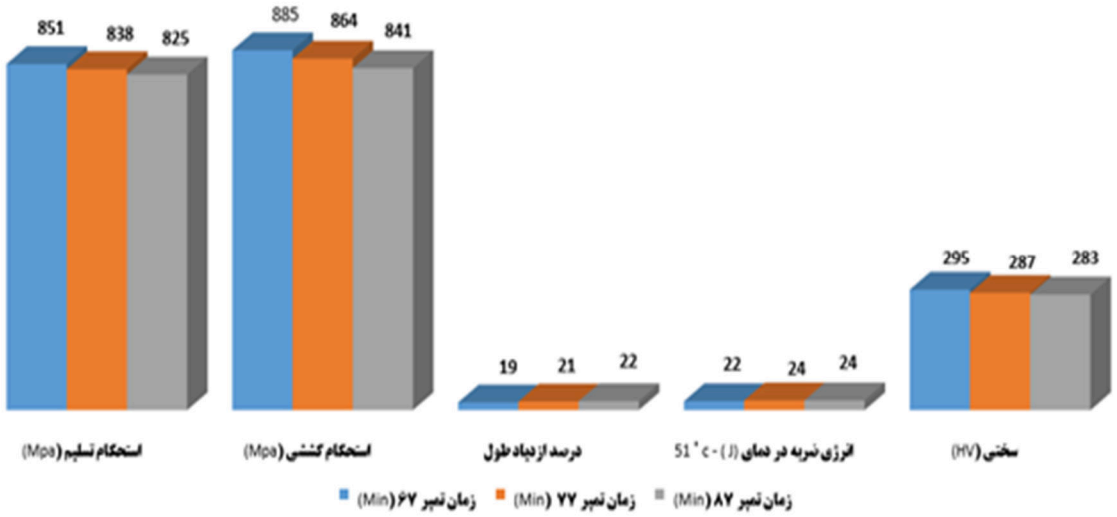


شکل ۳- تصاویر ریزساختاری برخی از ورق‌های موردپژوهش در دما و زمان‌های مختلف برگشت دهی الف)℃ ٦٤٠ و زمان ۷۷ دقیقه ب) ٦٤٠ºC و زمان ۸۷ دقیقه ج) ٦٥٠ºC و زمان ۷۷ دقیقه د) ٦٥٠ºC و زمان ۸۷ دقیقه

در جداول شماره ۳ الی ۵ و نمودارهای شماره ۱ الی ۳، خواص مکانیکی ورق‌های فولادی A517 در دماها و زمان‌های متفاوت عملیات برگشت‌دهی آورده شده است. با توجه به جداول مشخص است که با افزایش دما و زمان تمپر، استحکام تسلیم و کششی ورق‌ها کاهش و درنتیجه آن درصد ازدیاد طول ورق‌ها افزایش می‌یابد. علت این مسئله درشت شدن ساختار مارتنزیت برگشت داده شده با افزایش دما و زمان برگشت‌دهی می‌باشد. به‌طورکلی با افزایش درجه حرارت و زمان برگشت‌دهی و به دلیل درشت شدن ساختار، تعداد نا به‌جایی‌ها به مراتب کمتر شده و موانع بر سر راه حرکت آن‌ها عمدتاً ذرات نسبتاً درشت کاربید می باشند[٦،٧]. درنتیجه با کاهش سرعت کار سختی همراه با افزایش دما و زمان برگشت‌دهی، استحکام تسلیم و کششی کاهش و درصد ازدیاد طول افزایش می‌یابد. با افزایش دما و زمان برگشت‌دهی انرژی ضربه از j ۲۲ در دمای ٦٣٠°C و زمان ٦٧ دقیقه به j ۵۲ در دمای ٦٥٠°C و زمان ۸۷ دقیقه می‌رسد. تغییرات انرژی ضربه به پارامتر دما حساسیت بیشتری نشان داد. علت افزایش انرژی ضربه درشت شدن تیغه‌های سمانتیت با افزایش دما و زمان برگشت دهی می باشد[۸،۹]. با توجه به جداول مشخص است که بر اساس خواص مکانیکی موردنیاز در ورق‌های فولادی A517، ورق‌های برگشت داده شده در دمای ٦٣٠°C و زمان‌های ٦٧، ۷۷ و ۸۷ دقیقه و نیز ورق برگشت داده شده در دمای ٦٤٠°C و زمان ٦٧ دقیقه ازنظر میزان انرژی ضربه مردود می‌باشند. آنالیز نتایج سختی سنجی نشان داد با افزایش دما و زمان برگشت‌دهی، سختی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

جدول ۳- خواص مکانیکی ورق برگشت داده شده در دمای ٦٣٠ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های مختلف

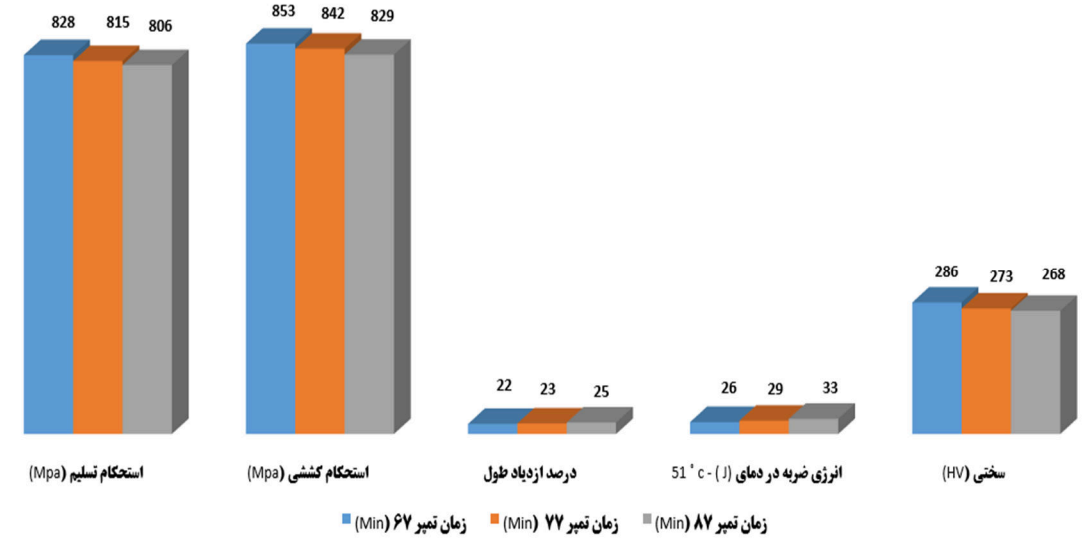
زمان برگشت دهی (Min)	استحکام تسلیم (Mpa)	استحکام کششی (Mpa)	درصد ازدیاد طول	انرژی ضربه در دمای (J) −۵۱°C	سختی (HV)
٦٧	۸۵۱	۸۸۵	۱۹	۲۲	۲۹۵
۷۷	۸۳۸	۸٦٤	۲۱	۲٤	۲۸۷
۸۷	۸۲۵	۸٤۱	۲۲	۲٤	۲۸۳



نمودار ١- مقاسیه خواص مکانیکی ورق برگشت داده شده در دمای ٦٣٠ درجه سانتی گراد و زمان‌های مختلف

جدول ٤- خواص مکانیکی ورق برگشت داده شده در دمای ٦٤٠ درجه سانتی گراد و زمان‌های مختلف

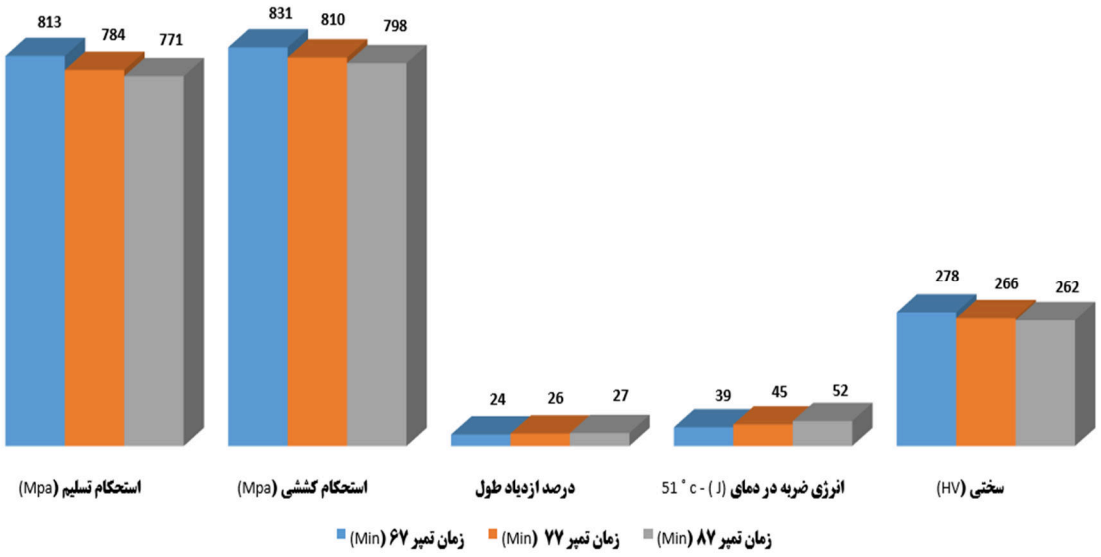
زمان برگشت‌دهی (Min)	استحکام تسلیم (Mpa)	استحکام کششی (Mpa)	درصد ازدیاد طول	انرژی ضربه در دمای ۵۱°C- (J)	سختی (HV)
٦٧	٨٢٨	٨٥٣	٢٢	٢٦	٢٨٦
٧٧	٨١٥	٨٤٢	٢٣	٢٩	٢٧٣
٨٧	٨٠٦	٨٢٩	٢٥	٣٣	٢٦٨



نمودار ٢- مقایسه خواص مکانیکی ورق برگشت داده شده در دمای ٦٤٠ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های مختلف

جدول ۵- خواص مکانیکی ورق برگشت داده شده در دمای ٦٥٠ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های مختلف

زمان برگشت دهی (Min)	استحکام تسلیم (Mpa)	استحکام کششی (Mpa)	درصد ازدیاد طول	انرژی ضربه در دمای ۵۱°C- (J)	سختی (HV)
٦٧	٨١٣	٨٣١	٢٤	٣٩	٢٧٨
٧٧	٧٨٤	٨١٠	٢٦	٤٥	٢٦٦
٨٧	٧٧١	٧٩٨	٢٧	٥٢	٢٦٢



نمودار ۳- مقایسه خواص مکانیکی ورق برگشت داده شده در دمای ٦٥٠ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های مختلف

٤. نتیجه‌گیری

۱- با افزایش دما و زمان برگشت‌دهی، ریخت مارتنزیت برگشت داده شده درشت‌تر شده و ساختار به حالت تعادلی نزدیک‌تر می‌شود. این عامل حساسیت بیشتری نسبت به پارامتر دما را نشان داد.

۲- با افزایش دما و زمان برگشت دهی، استحکام تسلیم و کششی ورق‌ها کاهش و درنتیجه آن درصد ازدیاد طول ورق‌ها افزایش می‌یابد. به‌طورکلی با افزایش درجه حرارت و زمان عملیات برگشت دهی و به دلیل درشت شدن ساختار، تعداد نابه‌جایی‌ها به‌مراتب کمتر شده و موانع بر سر راه حرکت آن‌ها عمدتاً ذرات نسبتاً درشت کاربید می‌باشند. درنتیجه با کاهش سرعت کار سختی همراه با افزایش دما و زمان عملیات برگشت‌دهی، استحکام تسلیم و کششی کاهش و درصد ازدیاد طول افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش دما و زمان عملیات برگشت‌دهی، انرژی ضربه در ورق‌ها به دلیل درشت شدن ساختار افزایش می‌یابد. تغییرات انرژی ضربه به پارامتر دما حساسیت بیشتری نشان داد. با توجه به میزان انرژی ضربه موردنیاز در ورق‌های فولادی A517 بر اساس استاندارد ASTM، لذا محدوده دمایی ٦٤٠ الی ٦٥٠ درجه سانتی‌گراد و محدوده زمانی ۷۷ الی ۸۷ دقیقه جهت عملیات برگشت‌دهی مناسب می‌باشد.

٤- نتایج آزمون سختی سنجی نشان داد با افزایش دما و زمان عملیات برگشت‌دهی، سختی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

مرجع‌ها

[1] Astm A517/A517m-10, Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, High-Strength, *Quenched and Tempered*.

[2] A. Jalili, F. Khodabakhshi, Comparison of mechanical properties and microstructure of hardened body steel plate of submarine A517 domestically manufactured and abroad, Steel Symposium 90*, Esfahan Mobarakeh Steel Company*, Iran (2012).

[3] W.Kirkpatrick and others, ASM Hand book, *Heat Treatment* vol **4**, 9th edition (1990).

[4] A. Rabiei, Studying the Effect of PWHT on Microstructural Evolution and Mechanical Properties of A517 Quenched and Tempered Steel, *Journal of Materials Engineering and Performance.* ***26*****(9)**, (2017) 4567

[5] Di Schino, A. Analysis of heat treatment effect on microstructural features evolution in a micro-alloyed martensitic steel. *Acta Metall. Slovaca* ,**22** (2016) 266.

[6] P.M. Unterweiser, H.E. Bayer, J.J. Kubbs: Heat Treaters' Guide; *Practices and Procedures for Steels.*

[7] Jena PK, Mishra Bidyapati, Ramesh Babu M, Babu A, Singh AK, Siva Kumar K, et al. Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel. *Int J Impact Eng*. **37** (2010) 242e9.

[8] J.C.F.Jorge, Microstructure characterization and its relationship with impact toughness of C–Mn and high strength low alloy steel weld metals – a review, Journal of Materials Research and Technology vol.10, 2022.

[9] P. Siva Prasad , K. S. Ghosh, Effect of Heat Treatment and NC Ni Coating on Electrochemical and Hydrogen Embrittlement Behaviour of a High Strength Low Alloy (HSLA) Steel, springer link, 2022.