اثر دمای کوره پیشگرم بر تحول ریزساختاری و خواص مکانیکی محصولات نورد گرم

امین غلامعلی تبار* [۱]، مصطفی حکمت پور [۲]

۱ -کارشناس کنترل کیفیت شرکت ذوب آهن آرمان آسیا agholamalitabar@gmail.com

۲ - مدیر کنترل کیفیت شرکت ذوب آهن آرمان آسیا M.h.p.metallurgy@gmail.com

خلاصه

دمای کوره پیشگرم یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیند نورد گرم فولادهای ساختمانی است که از طریق کنترل سینتیک تبلور مجدد دینامیک و استاتیکی، نقش تعیین‌کننده‌ای در ریزساختار و خواص مکانیکی محصول نهایی ایفا می‌کند. در این پژوهش، اثر دمای پیشگرم بر رفتار تغییرشکل، تحول ریزساختار فریت پرلیت و خواص مکانیکی میلگرد نورد گرم تولیدشده از فولاد ساختمانی بررسی شد. شمش فولاد ساختمانی پس از پیشگرم در کوره پوشری در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۵۰ و ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت فرآیند نورد گرم قرار گرفت و میلگرد آجدار تولید شد. پس از نورد، آزمون‌های کشش و خمش به‌منظور ارزیابی خواص مکانیکی انجام گرفت و مطالعات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و بررسی سطح شکست به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که افزایش دمای پیش‌گرم موجب تسهیل وقوع تبلور مجدد دینامیک و بهبود همگنی ریزساختار می‌شود، اما افزایش بیش از حد دما منجر به رشد دانه، کاهش اثر تقویت مرزدانه‌ای و تشکیل آخال‌های اکسیدی ترد می‌گردد. در دمای پیش‌گرم ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، ریزساختار یکنواخت فریت پرلیت با اندازه دانه ریز حاصل شد که بهترین ترکیب از استحکام و شکل‌پذیری را فراهم کرد.

کلمات کلیدی: نورد گرم ، میلگرد ، دمای پیشگرم

۱. مقدمه

نورد گرم فولادهای ساختمانی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی فلزات در صنعت فولاد محسوب می‌شود که به‌طور گسترده برای تولید محصولاتی ÷نظیر میلگرد مورد استفاده قرار می‌گیرد. خواص مکانیکی و ریزساختار محصول نهایی به‌شدت تحت تأثیر پارامترهای ترمومکانیکی از جمله دمای کوره پیش‌گرم، میزان تغییرشکل، نرخ کرنش، زمان ماند و شرایط خنک‌کاری قرار دارد. در این میان، دمای پیش‌گرم نقش بنیادینی در تعیین رفتار تغییرشکل گرم، سینتیک تبلور مجدد و تحول ریزساختار ایفا می‌کند.[1–3]

در حین نورد گرم، فولاد در محدوده دمایی آستنیتی تغییرشکل می‌یابد و نابجایی‌ها به‌صورت پیوسته در ساختار تجمع می‌یابند. انرژی ذخیره‌شده ناشی از این تجمع می‌تواند از طریق مکانیزم‌های بازیابی دینامیک، تبلور مجدد دینامیک و تبلور مجدد استاتیکی آزاد شود. وقوع و میزان پیشرفت هر یک از این پدیده‌ها تابعی از دما، کرنش و زمان است [4،5]. دمای پیش‌گرم با کنترل اندازه دانه آستنیت اولیه و تحرک مرزهای دانه، شرایط ترمودینامیکی و سینتیکی لازم برای آغاز و تکمیل تبلور مجدد را فراهم می‌سازد.[6]

در دماهای پیش‌گرم پایین، تحرک نابجایی‌ها و مرزهای دانه محدود بوده و کرنش بحرانی آغاز تبلور مجدد دینامیک افزایش می‌یابد. در نتیجه، تبلور مجدد به‌صورت ناقص رخ داده و ساختار تغییرشکل‌یافته تا مراحل پایانی نورد حفظ می‌شود. این

وضعیت منجر به تشکیل ریزساختاری ناهمگن، تمرکز تنش و افت شکل‌پذیری محصول نهایی می‌گردد. در مقابل، افزایش دمای پیش‌گرم موجب کاهش کرنش بحرانی ، افزایش نرخ جوانه‌زنی دانه‌های جدید و تسهیل حذف نابجایی‌ها می‌شود. با این حال، در صورت افزایش بیش از حد دما، رشد دانه آستنیتی پیش از نورد و کاهش تعداد سایت‌های جوانه‌زنی می‌تواند اثرات نامطلوبی بر خواص مکانیکی داشته باشد.[7–9]

ریزساختار نهایی فولادهای ساختمانی نورد گرم معمولاً شامل فریت و پرلیت است. اندازه دانه فریت، درصد فازها و یکنواختی توزیع آن‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، ازدیاد طول و رفتار شکست دارند. بر اساس رابطه هال پچ* ، کاهش اندازه دانه موجب افزایش استحکام تسلیم می‌شود، در حالی که همگنی ریزساختار نقش مهمی در بهبود شکل‌پذیری و عملکرد در آزمون‌های خمش ایفا می‌کند [10–12].

۲. مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، شمش فولاد ساختمانی با ترکیب شیمیایی ارائه‌شده در جدول ۱ به‌عنوان ماده اولیه مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها در کوره پوشری با کنترل دقیق دما و جریان هوای یکنواخت پیش‌گرم شدند. دماهای پیش‌گرم انتخاب‌شده شامل ۱۰۵۰، ۱۱۵۰ و ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بودند و زمان ماند در هر دما ۱۹۰ دقیقه در نظر گرفته شد تا توزیع یکنواخت دما در سطح و مرکز نمونه‌ها حاصل شود. پس از پیش‌گرم، فرآیند نورد به‌گونه‌ای انجام شد که محصول نهایی به شکل میلگرد آج‌دار سایز ۱۰ با آج ۳۴۰ تولید گردد.

پس از نورد، آزمون کشش برای تعیین استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول انجام شد. همچنین آزمون خمش به‌منظور ارزیابی قابلیت تغییرشکل پلاستیک و رفتار شکست نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برای مطالعات ریزساختاری نهایی، نمونه‌ها پس از سرد شدن در هوا مجدداً آماده‌سازی شدند و ریزساختار فریت–پرلیت با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفت. بررسی سطح شکست نمونه‌های آزمون خمش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد.

جدول (۱) شرایط نورد نمونه های مورد آزمایش

نمونه	دمای پیشگرم (°C)	دمای استند فینیش (°C)	سرعت نورد (m/min)	ترکیب شیمیایی پایه–C Mn–Si %)
S1	1050	890	8.5	0.29–0.65–0.18
S2	1150	960	8.5	0.30–0.62–0.21
S3	1250	1010	8.5	0.28–0.58–0.19

۳. نتایج و بحث

۳-۱ اثر دمای کوره پیش‌گرم بر رفتار تنش–کرنش و سینتیک نرم‌شوندگی

طبق دیاگرام تنش کرنش در شکل (۱)، مطلوب ترین استحکام تسلیم و کششی از لحاظ استاندارد ملی ایران برای میلگرد سایز ۱۰ با آج ۳۴۰ به شماره ۳۱۳۲، در نمونه پیش‌گرم‌شده ۱۱۵۰ °C حاصل شد که به دلیل ریزدانه‌ای یکنواخت و

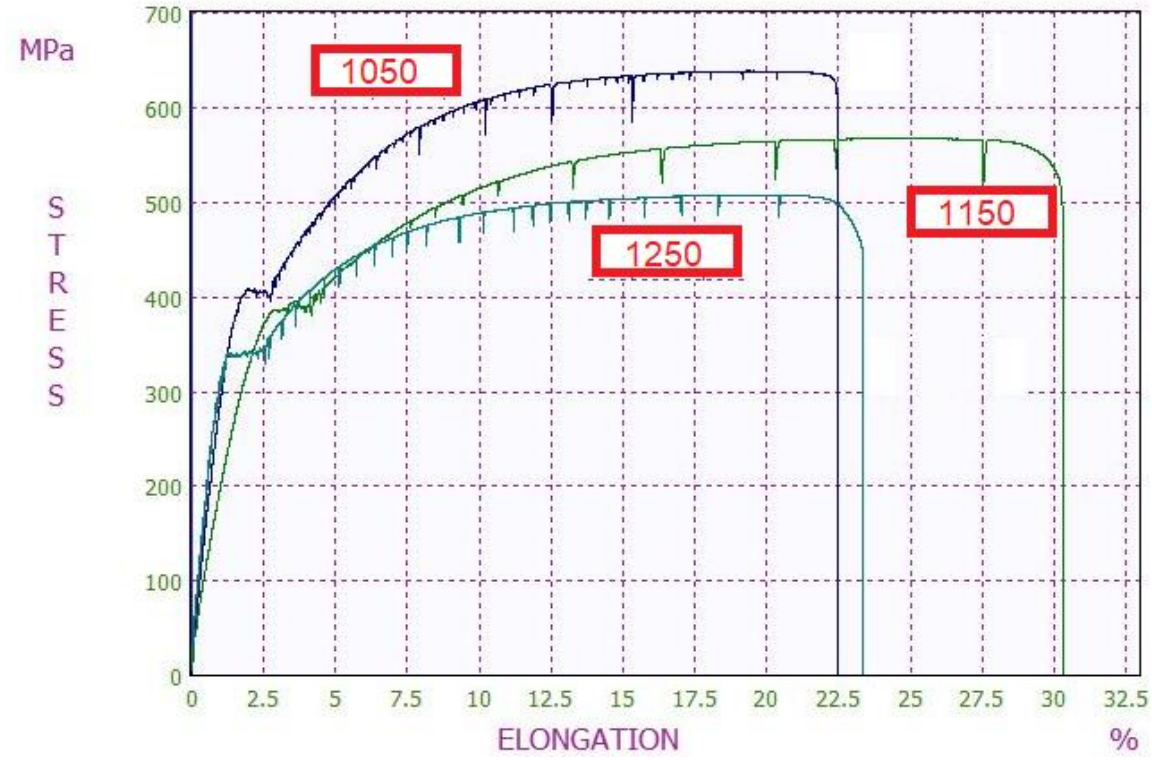
* . Hall–Petch

افزایش مرزهای دانه بود. در ۱۰۵۰°C ، استحکام نسبی بالا اما ازدیاد طول کاهش یافته به دلیل ناهمگنی ریزساختار مشاهده شد. در ۱۲۵۰°C ، رشد دانه موجب کاهش استحکام و کاهش درصد تغییر طول شد.

در نمونه‌های پیش‌گرم‌شده در دمای ۱۰۵۰ °C ، افزایش سریع تنش با کرنش مشاهده شد و رسیدن به تنش اوج در کرنش‌های نسبتاً پایین رخ داد. این رفتار بیانگر غلبه مکانیزم کارسختی ناشی از تجمع نابجایی‌ها و ناکافی بودن انرژی حرارتی برای فعال‌سازی کامل DRX * است. در این شرایط، نرخ تولید نابجایی‌ها از نرخ حذف آن‌ها از طریق بازیابی و جوانه‌زنی دانه‌های جدید پیشی می‌گیرد و در نتیجه ساختار تغییرشکل‌یافته تا مراحل پایانی نورد حفظ می‌شود.

در مقابل، در دمای پیش‌گرم ۱۱۵۰ °C ، منحنی تنش–کرنش رفتاری متفاوت از خود نشان داد. پس از رسیدن به تنش اوج، کاهش تدریجی تنش جریان مشاهده شد که مشخصه نرم‌شوندگی ناشی از تبلور مجدد دینامیک پیوسته و سپس تبلور مجدد استاتیکی در فواصل بین پاس‌های نورد است. افزایش دمای پیش‌گرم موجب کاهش تنش بحرانی آغاز DRX و تسهیل حرکت مرزهای دانه آستنیتی می‌شود، به‌طوری‌که جگالی نابجایی‌ها به‌سرعت از طریق تشکیل مرزهای زاویه‌بالا کاهش می‌یابد. این رفتار منجر به پایداری جریان پلاستیک، کاهش تمرکز تنش و بهبود قابلیت تغییر شکل فولاد در حین نورد می‌شود.

در دمای پیش‌گرم ۱۲۵۰ °C ، اگرچه تنش جریان نسبت به دو دمای دیگر کمتر بود، اما نرخ نرم‌شوندگی کاهش یافت و منحنی تنش–کرنش تمایل به تخت‌شدن نشان داد. این پدیده به رشد قابل‌توجه دانه‌های آستنیتی پیش از نورد نسبت داده می‌شود. در این دما، انرژی حرارتی بالا موجب افزایش تحرک مرزهای دانه و هم‌زمان کاهش چگالی سایت‌های جوانه‌زنی DRX می‌گردد، به‌طوری‌که علی‌رغم وقوع تبلور مجدد، اندازه دانه نهایی بزرگ‌تر شده و اثر تقویت مرزدانه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل ۱- نمودار تنش و کرنش مهندسی نمونه های نورد شده

* Dynamic Recrystallization

ازدیدگاه سینتیکی، آغاز تبلور مجدد دینامیک زمانی رخ می‌دهد که چگالی نابجایی‌ها به مقدار بحرانی برسد و انرژی ذخیره‌شده ناشی از تغییرشکل برای تشکیل مرزهای جدید کافی باشد. افزایش دمای پیش‌گرم موجب کاهش کرنش بحرانی شروع DRX از طریق افزایش تحرک نابجایی‌ها و تسهیل صعود و لغزش آن‌ها می‌شود. در دمای ۱۱۵۰ °C ، توازن مطلوبی بین نرخ تولید و حذف نابجایی‌ها برقرار می‌شود، به‌طوری‌که DRX به‌صورت پیوسته و پایدار رخ می‌دهد و ساختار نهایی فاقد مرزهای تغییرشکل‌یافته است.

در دمای ۱۲۵۰ °C ، اگرچه DRX از نظر ترمودینامیکی کاملاً امکان‌پذیر است، اما سینتیک رشد دانه بر سینتیک جوانه‌زنی غالب می‌شود. در این شرایط، مرزهای دانه با تحرک بالا به‌سرعت رشد کرده و موجب درشت‌شدن ریزساختار می‌شوند. از سوی دیگر، SRX* در فواصل زمانی کوتاه بین پاس‌ها نقش پررنگ‌تری ایفا می‌کند و منجر به حذف تدریجی ساختار ریزدانه حاصل از DRX می‌شود. این رقابت بین DRX و SRX یکی از دلایل اصلی افت استحکام تسلیم در بالاترین دمای پیش‌گرم است.

در این مطالعه برای هر دمای پیش‌گرم ۱۰ نمونه میلگرد آج‌دار تحت آزمون خمش انتخاب شد تا اثر دما بر رفتار خمشی و احتمال شکست بررسی گردد. نتایج نشان داد که در دمای پیش‌گرم ۱۰۵۰°C از ۱۰ نمونه، ۶ نمونه دچار شکست شدند، در حالی که در دمای بهینه ۱۱۵۰°C هیچ نمونه‌ای شکست نشان نداد و تمام نمونه‌ها رفتار پلاستیک یکنواخت از خود ارائه دادند. در دمای بالاتر ۱۲۵۰ °C ، ۳ نمونه شکست داشتند.

تحلیل مکانیزم شکست در دماهای نامطلوب نشان می‌دهد که در ۱۰۵۰°C شکست‌ها عمدتاً به دلیل تجمع نابجایی‌ها و عدم تکمیل DRX در برخی نواحی رخ می‌دهند. دانه‌های فریت کشیده و پرلیت نوار شده به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و موجب شروع ترک‌های میکروسکوپی می‌شوند که با گسترش پلاستیک محدود، شکست ترد یا نیمه‌ترد را ایجاد می‌کنند. در مقابل، در ۱۲۵۰ °C شکست‌ها ناشی از رشد دانه‌های فریت و تجمع آخال‌های ترد در نواحی خاص است.

۳-۲ تحول ریزساختار فریت–پرلیت و همگنی میکروسکوپی

ریزساختار نهایی میلگردهای نورد گرم‌شده نشان داد که دمای پیش‌گرم اثر مستقیم و غیرخطی بر اندازه دانه فریت، توزیع پرلیت و میزان همگنی ریزساختار دارد. در نمونه‌های پیش‌گرم‌شده در ۱۰۵۰ °C ، ریزساختار متشکل از دانه‌های فریت نسبتاً کشیده با توزیع ناهمگن پرلیت مشاهده شد. این ناهمگنی ناشی از باقی‌ماندن اثرات تغییرشکل گرم و عدم تکمیل تبلور مجدد دینامیک در آستنیت است که در مرحله تبدیل فازی منتقل شده است. حضور مرزهای دانه زاویه‌پایین و باندهای تغییرشکل در این نمونه‌ها تأییدکننده وقوع DRX ناقص است.

در دمای ۱۱۵۰ °C ، ریزساختار کاملاً همگن با دانه‌های ریز و هم‌اندازه فریت و توزیع یکنواخت پرلیت به‌دست آمد. این ریزساختار نتیجه تبلور مجدد دینامیک کامل آستنیت در حین نورد و تبلور مجدد استاتیکی در فواصل زمانی کوتاه بین پاس‌ها است. افزایش تعداد مرزهای دانه زاویه‌بالا، نشان می‌دهد که مکانیزم غالب، جوانه‌زنی و رشد دانه‌های جدید بدون حافظه تغییرشکل قبلی بوده است. این شرایط ایده‌آل‌ترین حالت از نظر تعادل بین استحکام و شکل‌پذیری محسوب می‌شود.

در دمای ۱۲۵۰ °C ، علی‌رغم یکنواختی نسبی ریزساختار، افزایش محسوس اندازه دانه فریت مشاهده شد. این رشد دانه‌ای ناشی از درشت‌شدن دانه‌های آستنیت پیش از نورد و کاهش نرخ جوانه‌زنی در حین DRX است. علاوه بر این، حضور آخال‌های اکسیدی در برخی نواحی ریزساختار مشاهده شد که به افزایش پتانسیل اکسیداسیون در دماهای بسیار بالا نسبت

* -static recrystallization

داده می‌شود. این آخال‌ها نقش مراکز تمرکز تنش را ایفا کرده و در ادامه بر رفتار مکانیکی محصول تأثیرگذار بوده‌اند.شکل ۲- تصاویر متالوگرافی نمونه میلگرد تولید از شمش فولادی در سه دمای پیشگرم متفاوت را نشان می دهد.

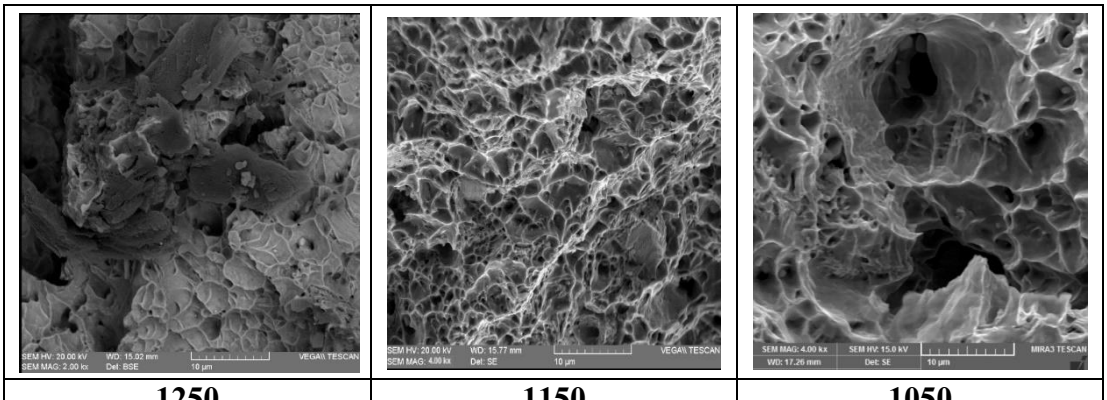


1250	1150	1050

شکل ۲- تصاویر متالو گرافی از نمونه میلگرد های سایز ۱۰

۳-۳ تحلیل شکست نگاری سطوح شکست

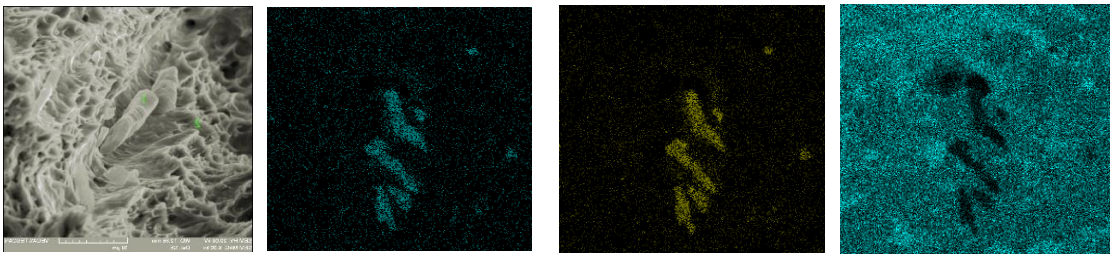
بررسی سطح شکست نمونه‌های آزمون خمش با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که نمونه پیش‌گرم‌شده در ۱۱۵۰°C دارای سطح شکستی کاملاً داکتیل با حفرات یکنواخت و عمیق است که بیانگر توزیع یکنواخت کرنش و جذب انرژی بالا پیش از شکست می‌باشد. در مقابل، نمونه‌های پیش‌گرم‌شده در ۱۲۵۰°C حضور آخال‌های اکسیدی ترد را در محل شروع ترک نشان دادند که به‌عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و شکست زودرس موضعی را تسریع کرده‌اند.



1250	1150	1050

شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM از سطح شکست نمونه میلگرد

در بررسی شکست‌نگاری نمونه‌های پیش‌گرم‌شده در ۱۲۵۰ °C ، تصاویر SEM سطح شکست نشان داد که شکست غالباً از نواحی حاوی ترکیبات ترد آغاز شده است. نتایج آزمون Map Scanning SEM که خلاصه آن در جدول () ارائه شده، حضور عناصر Mn و Si را در این نواحی تأیید می‌کند که بیانگر تشکیل آخال‌های ترد از نوع سیلیکات منگنز (Mn–Si) است. این آخال‌ها به‌عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و نقش مؤثری در شروع ترک‌های موضعی و کاهش مقاومت خمشی نمونه‌های پیش‌گرم‌شده در دمای بالا ایفا کرده‌اند.



base MN Si Fe

شکل ۴- تصاویر Map Scanning SEM از سطح شکست نمونه میلگرد نورد شده در دمای ۱۲۵۰ °C

٤. نتیجه‌گیری

در دمای پیش‌گرم ۱۰۵۰ °C ، به دلیل ناکافی بودن انرژی حرارتی برای فعال‌سازی کامل مکانیزم‌های نرم‌شوندگی، تبلور مجدد دینامیک به‌صورت ناقص رخ داد. این موضوع منجر به باقی‌ماندن آثار تغییرشکل گرم در ساختار آستنیتی و انتقال آن به ریزساختار نهایی فریت پرلیت شد. پیامد این وضعیت، تشکیل دانه‌های فریت کشیده، توزیع ناهمگن پرلیت، کاهش ازدیاد طول و افت عملکرد در آزمون خمش بود.

در مقابل، پیش‌گرم در دمای ۱۱۵۰ °C شرایط بهینه‌ای را برای وقوع تبلور مجدد دینامیک کامل در حین نورد و تبلور مجدد استاتیکی فراهم کرد. در این حالت، تعادل مناسبی میان نرخ تولید و حذف نابجایی‌ها برقرار شد و ریزساختاری همگن با دانه‌های ریز فریت و توزیع یکنواخت پرلیت به‌دست آمد. این ریزساختار موجب بهبود همزمان استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و شکل‌پذیری شد و بهترین عملکرد در آزمون‌های کشش و خمش را نشان داد.

در دمای پیش‌گرم ۱۲۵۰ °C علی‌رغم تکمیل تبلور مجدد، رشد دانه آستنیتی پیش از نورد و افزایش تحرک مرزهای دانه باعث کاهش اثر تقویت هال پچ شد. علاوه بر این، افزایش تمایل به اکسیداسیون در این دما منجر به تشکیل آخال‌های اکسیدی ترد گردید که به‌عنوان مراکز تمرکز تنش عمل کرده و در آزمون خمش موجب شروع ترک‌های موضعی شدند

٥. مراجع

[1] Lin J, Chen X, Deng Y. Hot deformation behavior and dynamic recrystallization of low carbon structural steel. *Materials Science and Engineering A*; 735: 207–218, 2018.
[2] Kang Y, Lee S. Effect of reheating temperature on microstructure evolution during hot rolling of low carbon steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*; 49: 2345–2356, 2018.
[3] Zhang H, Liu Q, Zhang Z. Dynamic recrystallization kinetics of low carbon steel during hot rolling. *Journal of Materials Processing Technology*; 255: 367–376, 2018.
[4] Wang L, Li Y. Influence of reheating temperature on ferrite–pearlite microstructure in hot-rolled steels. *Materials*; 12: 2145, 2019.
[5] Azizi-Alizamini M, Jahazi M. Effect of reheating and rolling conditions on microstructure and mechanical properties of low carbon steels. *Steel Research International*; 90: 1800586, 2019.
[6] Zhu Q, Sun X. Modeling dynamic and static recrystallization in hot rolled steels.

Metallurgical and Materials Transactions A; 50: 4572–4586, 2019.
[7] Li Y, Zhang J. Effect of reheating temperature on grain growth and DRX behavior in low carbon steel. *Materials Characterization*; 158: 109981, 2019.
[8] Kermanpur A, Najafizadeh A. Dynamic recrystallization and flow behavior of structural steel under hot deformation. *Metals*; 10: 144, 2020.
[9] Luo H, Peng Y. Effect of reheating temperature on mechanical properties of hot rolled rebars. *Construction and Building Materials*; 247: 118533, 2020.
[10] Chen S, Wang Z. Microstructure homogeneity and dynamic recrystallization behavior in hot rolled low carbon steel. *Materials Science and Engineering A*; 772: 138780, 2020.
[11] Naghizadeh M, Mirzadeh H. Effect of reheating temperature on recrystallization and grain refinement in structural steels. *Materials Today Communications*; 25: 101532, 2020.
[12] Zhou Y, Lin J. Reheating temperature dependent dynamic recrystallization mechanisms in hot rolling of steels. *Journal of Materials Research and Technology*; 9: 12411–12423, 2020.
[13] Li X, Liu Z. Coupled effect of reheating temperature and deformation on ferrite–pearlite evolution in structural steel. *Materials*; 14: 3982, 2021.
[14] Sabooni A, Jahazi M. Recrystallization behavior of low carbon steel during industrial hot rolling. *Metallurgical and Materials Transactions A*; 52: 1893–1906, 2021.
[15] Chen Y, Zhang H. Effect of reheating temperature on dynamic recrystallization kinetics and mechanical properties of structural steel rebars. *Journal of Materials Processing Technology*; 312: 117844, 2023