

Investigating the effect of temperature and time of intercritical heat treatment on the microstructure and tensile properties of Al-rich steel

Alireza Kheradmand¹, *Alireza kolahi², Yahya Palizdar³

1- Master's student in materials engineering, Materials and Energy Research center, Karaj, Iran.

2- Assistant Professor, Nanotechnology and Advanced Materials Department, Materials and Energy Research center, Karaj, Iran.

3- Associate Professor, Nanotechnology and Advanced Materials Department, Materials and Energy Research center, Karaj, Iran.

Citation: Kheradmand A, kolahi A, Palizdar Y. Investigating the effect of temperature and time of intercritical heat treatment on the microstructure and tensile properties of Al-rich steel, Metallurgical Engineering, 2025: 27(4): 224-235 <https://doi.org/10.22076/me.2024.2015131.1394>

doi : <https://doi.org/10.22076/me.2024.2015131.1394>

ABSTRACT

The present study involved the casting and hot-rolling of steel with a chemical composition of Fe-0.25C-0.33Si-1.05Mn-4.56Al. Subsequently, heat treatment was applied at various temperatures and durations to achieve the necessary material characteristics. Initially, all of the specimens underwent austenitization at a temperature of 820 °C, which is the annealing temperature corresponding to the midpoint of the critical range. This process lasted for a duration of 600 seconds. Subsequently, the specimens were subjected to quenching in oil at a temperature of 150 °C, and this temperature was maintained for a period of 20 seconds. Finally, the specimens were immersed in a salt bath. The mixture, composed of equal parts NaNO₃ and KNO₃, was subjected to transfer and partitioning processes at temperatures of 330 and 450 °C, and for durations of 1000 and 1800 seconds. Subsequently, the mixture was rapidly cooled by immersion in water. The microstructural composition of steel after to heat treatment encompasses the presence of δ -ferrite, α -ferrite, retained austenite, and a minor quantity of martensite. The volume fraction of the surviving austenite is shown to grow as the temperature and partitioning time are elevated. This can be attributed to the heightened driving force and increased likelihood of carbon diffusion. The sample that underwent partitioning at a temperature of 450 °C for a duration of 1800 seconds yielded the optimal combination of strength and elongation, resulting in a product value of 41600MPa%. The provided specimen exhibits a tensile strength of 1300 MPa and experiences a 32% elongation.

Keywords: Al-rich steel, heat treatment, δ -ferrite, retained austenite, quenching and partitioning.

Received: November 7, 2023

Accepted: June 9, 2024

■ ■
***Corresponding Author:**

Alireza kolahi, PhD

Address: Nanotechnology and Advanced Materials Department, Materials and Energy Research center, Karaj, Iran

Tel: +98 (26) 36280040

E-mail: arkolahi@merc.ac.ir

بررسی اثر دما و زمان عملیات حرارتی بین بحرانی بر ریزساختار و خواص کششی فولاد آلومینیوم بالا

علیرضا خردمند^۱، *علیرضا کلاهی^۲، یحیی پالیزدار^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

۲- استادیار، پژوهشگاه فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

۳- دانشیار، پژوهشگاه فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

چکیده

هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر دما و زمان پارتیشن‌بندی بر ریزساختار و خواص مکانیکی یک فولاد دارای فاز فریت دلتا می‌باشد. در این پژوهش فولادی با ترکیب شیمیایی Fe-0.25C-0.33Si-1.05Mn-4.56Al ریخته‌گری و نورد داغ گردید و به منظور ایجاد خواص مورد نظر تحت عملیات حرارتی در دماها و زمان‌های مختلف قرار گرفت. ابتدا هریک از نمونه‌ها در دمای آنیل میان بحرانی ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰۰ ثانیه آستنیته شده و سپس نمونه‌ها در روغن با دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کوئنچ شده و به مدت ۲۰ ثانیه در این محیط نگه داشته شدند و سپس به حمام نمک حاوی ۵۰ درصد سدیم نیترات و ۵۰ درصد پتاسیم نیترات منتقل شده و در دماهای ۳۳۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به صورت هم‌دما و در زمان‌های ۱۰۰۰ و ۱۸۰۰ ثانیه پارتیشن‌بندی و سپس در آب کوئنچ شدند. ریزساختار فولاد پس از عملیات حرارتی شامل فازهای فریت دلتا، فریت آلفا، آستنیت باقیمانده و مقدار کمی مارتنزیت می‌باشد. با افزایش دما و زمان پارتیشن‌بندی مقدار کسر حجمی آستنیت باقیمانده به علت افزایش نیروی محرکه‌ی و فرصت بیشتر برای نفوذ کربن افزایش می‌یابد. بهترین ترکیب از استحکام و انعطاف‌پذیری که حاصل ضرب آن ۴۱۶۰۰ مگاپاسکال درصد می‌باشد در نمونه‌ای که در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۸۰۰ ثانیه پارتیشن‌بندی شده بود، بدست آمد. این نمونه دارای استحکام کششی ۱۳۰۰ مگاپاسکال و ازدیاد طول ۳۲ درصد می‌باشد.

کلمات کلیدی: فولاد آلومینیوم بالا، عملیات حرارتی، فریت دلتا، آستنیت باقیمانده، کوئنچ و پارتیشن‌بندی.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر تلاش‌های بسیار زیادی برای تولید فولادهای با استحکام بالا و در عین حال دارای چقرمگی قابل ملاحظه برای صنایع مختلف از جمله صنعت خودروسازی صورت گرفته است. از مهم‌ترین دسته از این فولادها می‌توان به فولادهای دوفازی^۱ (DP) و فولادهای با پلاستیسیته‌ی ناشی از استحاله^۲ (TRIP) و دوقلویی^۳ (TWIP) اشاره کرد. فولادهای دو فازی با استحکام بالا تاکنون در گستره وسیعی از صنایع خودروسازی با هدف افزایش ایمنی، کاهش وزن، ملاحظات اقتصادی و حفظ محیط زیست به کار گرفته شده‌اند. با وجود پیشینه‌ی به‌کارگیری وسیع این نوع فولادهای با استحکام بالا، این آلیاژها معمولاً فاقد انعطاف‌پذیری مناسب هستند [۱-۴].

در مطالعه‌ی فولادها، سه نسل مختلف تأثیرگذار هستند. نسل اول دارای یکی از ویژگی‌های استحکام و یا شکل‌پذیری بالا هستند که داشتن هریک از این خواص به تنهایی نمی‌تواند پاسخگوی نیازهای صنعت امروز باشد. نسل دوم که دارای استحکام و شکل‌پذیری بسیار بالا به‌طور هم‌زمان هستند نیز به علت قیمت بالای نوع عملیات حرارتی و تجهیزات مورد نیاز و همچنین عناصر آلیاژی مورد استفاده در آنها، نمی‌توانند در خیلی از صنایع مورد استفاده قرار بگیرند. نسل سوم فولادهایی هستند که استحکام و شکل‌پذیری آنها مطلوب می‌باشد (البته نه به‌اندازه‌ی نسل دوم) و آنچه که این فولادها را از نظر صنعتی با ارزش‌تر میکند، صرفه اقتصادی آنها می‌باشد [۵،۶].

- 1 Dual Phase Steels
- 2 Transformation Induced Plasticity Steels
- 3 Twinning Induced Plasticity Steels

* نویسنده مسئول:

دکتر علیرضا کلاهی

نشانی: گروه تکنولوژی سطح و لایه‌های نازک، پژوهشگاه فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

تلفن: ۳۶۲۸۰۰۴۰ (۲۶) ۹۸+

پست الکترونیکی: arkolahi@merc.ac.ir

قابل توجهی آستنیت باقی مانده و بررسی خواص کششی آن در یک زمینه مارتنزیتی است که اساس آن نفوذ کربن از مارتنزیت فوق اشباع به آستنیت تبدیل نشده مجاور می باشد که در نهایت آستنیت را در دمای اتاق پایدار می کند [۱۴].

۲. مواد و روش تحقیق

شمش فولادی با ابعاد $240\text{mm} \times 70\text{mm} \times 60\text{mm}$ با استفاده از یک کوره القایی با جداره آلومینایی و حجم ۱۵ کیلوگرم با فرکانس ۲۵۰۰ هرتز تحت گاز آرگون ریخته شد. ریخته گری شمش در مدت زمان ۹۰۰ ثانیه تمام شد و در مراحل پایانی برای دستیابی به اهداف این پژوهش، شمش آلومینیوم به درون مذاب افزوده شد. حضور عنصر آلومینیوم به مقدار مناسب برای تضمین حضور فاز فریت دلتا بسیار حائز اهمیت است. فرآیند تصفیه سرباره برای کاهش مقدار عناصر فسفر و گوگرد بر روی شمش انجام گرفت. در ادامه شمش فولادی تا دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شد و توسط غلتک هایی با قطر ۴۵ سانتی متر طی کاهش ۸۰ درصدی تا ضخامت ۱۰ میلی متر نورد داغ شده و سپس در هوا تا دمای محیط خنک شد.

ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده از روش طیف سنجی نشر نوری (کوانتومتری) ^۱ و طیف سنجی توسط پلاسما جفت شدهی القایی ^۲ به دست آمد. کوانتومتری نشری توسط دستگاه آکسفورد ^{۱۱} مدل مستر پرو ^{۱۲} بر طبق استاندارد ASTM E415-14 انجام گردید. درصد وزنی آلومینیوم با استفاده از روش طیف سنجی پلاسما جفت شدهی القایی به دست آورده شد. طیف سنجی پلاسما جفت شدهی القایی با روش ICP-OES توسط دستگاه پراکین المر ^{۱۳} مدل اوپتیم ^{۱۴} ۸۰۰۰ در پلاسما تولید شده توسط گاز آرگون انجام گردید. در این پژوهش فولادی با ترکیب شیمیایی Fe-0.25C-0.33Si-1.05Mn-4.56Al بعد از ریخته گری و نورد به منظور ایجاد خواص مورد نظر تحت عملیات حرارتی در دماها و زمان های مختلف قرار گرفت که در جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد قابل مشاهده است.

ورق فولادی نورد شده با ضخامت ۱۰ میلی متر برای تحقق اهداف از پیش تعیین شده در این پژوهش تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. قبل از عملیات حرارتی نمونه هایی برای انجام آزمون های مختلف از ورقه فولادی بریده شده و سپس عملیات حرارتی بر روی نمونه ها صورت گرفت. سیکل عملیات حرارتی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است در شکل ۱ به صورت شماتیک آورده شده است. براساس شکل ۱ ابتدا نمونه های فولادی در کوره با دمای ۸۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰۰ ثانیه قرار داده شدند تا فولاد در دمای آنیل بین بحرانی آستنیت شده. سپس نمونه های فولادی از کوره

آلومینیوم در فولادسازی پایدارکننده نیتروژن، اصلاح کننده اندازه دانه و اکسیژن زدایی قوی است. همچنین آلومینیوم باعث پایداری فاز فریت در ریزساختار می شود [۷، ۸]. به طوری که با افزودن ۱ درصد از آن، فاز فریت به طور کامل پایدار خواهد شد. قابلیت انحلال آلومینیوم در فریت تقریباً ۳۵ درصد وزنی است که در درصدهای بالا، تمایل به تشکیل محلول جامد با درجهی نظم بالا (Fe₃Al)، زیاد می شود. آلومینیوم تأثیر عالی بر مقاومت در برابر پیرکرنشی داشته و به علت تشکیل ذرات سخت نیتريد آلومینیوم، به عنوان عنصر آلیاژی در فولادهای نیترووره شونده به کار می رود [۹، ۱۰].

از جمله ی فولادهای نسل سوم می توان به فولادهای فریتی-مارتنزیتی ^۴، فولادهای بینیتی ^۵، فولادهای فریتی-بینیتی ^۶ و فولادهای TRIP اشاره کرد. ویژگی تمام این فولادها داشتن استحکام بالا همراه با شکل پذیری خوب، استحکام تسلیم و نرخ کارسختی بالا می باشد [۱۱، ۱۲].

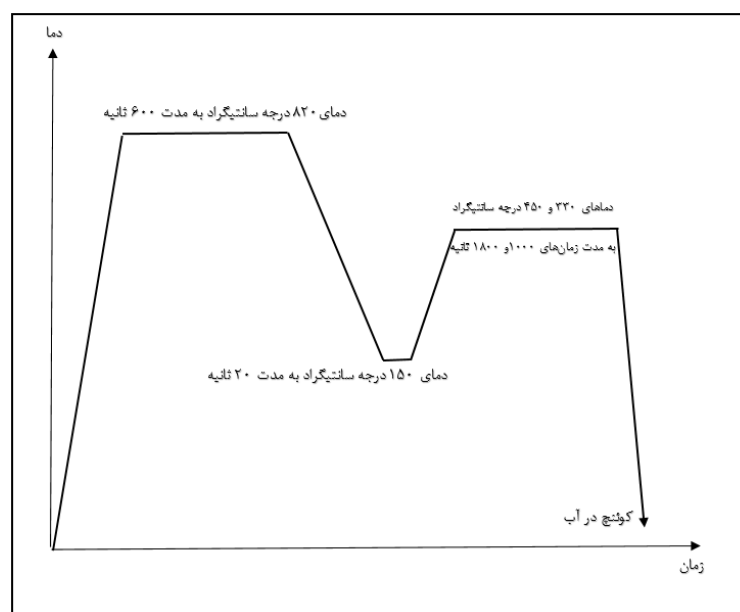
در فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا ^۷، استحکام به شدت تابع فرآیندهای ترمومکانیکی و عناصر آلیاژی است؛ اما این استحکام عامل محدودکننده شکل پذیری مورد نظر در طراحی قطعات با اشکال پیچیده است؛ بنابراین توجه صنعت به سمت فولادهای دو فازی معطوف شده است. این فولادها دارای کسر حجمی مشخصی از فاز با استحکام بالا، مانند بینیت یا مارتنزیت می باشند که در زمینه فاز نرم تر قرار گرفته اند. در نتیجه فولاد با خواص بهبود یافته ای از قبیل استحکام و شکل پذیری مناسب حاصل می شود. اخیراً پیشنهاد شده است که به جای استفاده از مقادیر زیادی از عناصر آلیاژی گران قیمت یا انجام کار مکانیکی شدید، ریزساختاری شامل فریت بینیتی و آستنیت باقی مانده غنی از کربن ایجاد شود تا ترکیبی از استحکام و چقرمگی شکست بالا حاصل شود [۱۱]. بادشیا ^۸ و همکاران [۱۳] در تحقیقات خود در این زمینه توانستند با آستمر کردن طولانی مدت فولادهای پرکربن غنی از سیلیسیم در دماهای کمی بالاتر از دمای شروع استحاله مارتنزیتی نسل جدیدی از فولادهای بینیتی یعنی فولادهای نانو ساختار بینیتی را معرفی کنند. این نوع فولادها شامل صفحات فریت بینیتی با ضخامت نانومتری هستند که در زمینه آستنیت باقی مانده غنی از کربن پخش شده اند و استحکامی در حدود ۱۶۰۰ تا ۲۵۰۰ مگا پاسکال و چقرمگی حدود $30\text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ دارند. در این نوع فولادها به منظور جلوگیری از تشکیل کاربید از عنصر آلیاژی سیلیسیم استفاده می شود، ولی حضور این عنصر عیوبی همچون کاهش سرعت استحاله را ایجاد می کند.

در این پژوهش به منظور حصول استحکام بالاتر، یک عملیات حرارتی جدید به نام عملیات کوئچ و پارتیشن بندی پیشنهاد شده است. هدف این فرآیند تولید فولادهایی با مقدار

- 4 Ferritic-Martensitic Steels(FM)
- 5 Bainitic Steels
- 6 Ferritic-Bainitic Steels
- 7 high strength low alloy steels
- 8 Bhadeshia
- 9 Optical Emission Spectrometry
- 10 Inductively Coupled Plasma
- 11 OXFORD
- 12 Foundry Master Pro
- 13 PERKIN ELMER
- 14 Optima

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد استفاده شده

کربن	منگنز	آلومینیم	سیلیسیم	فسفر	گوگرد
۰/۲۵	۱/۰۵	۴/۵۶	۰/۳۳	۰/۰۲۵	۰/۰۰۷



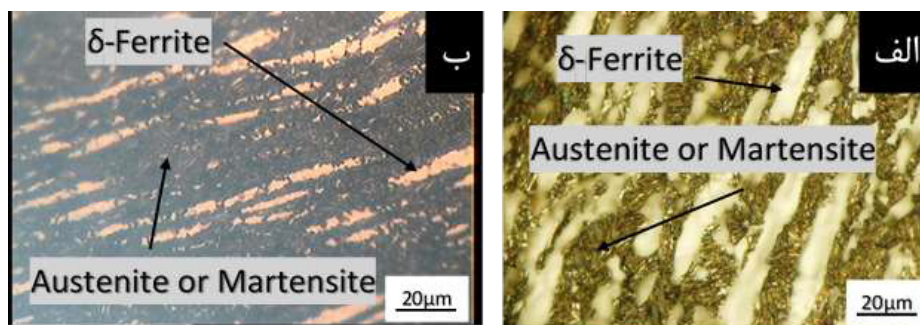
شکل ۱: سیکل عملیات حرارتی انجام شده.

آنالیز فازی و محاسبه کسر حجمی آستنیت باقی مانده در دمای محیط و مقدار کربن موجود در آستنیت باقی مانده از آزمون پراش اشعه ایکس استفاده شد. آزمون‌های سختی در این پژوهش در مقیاس ویکرز و توسط دستگاه کوپامدل ۱UV انجام شد. سختی برای هر نمونه سه بار اندازه‌گیری شد و عدد سختی پس از میانگین‌گیری گزارش شد. برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها، آزمون کشش روی آنها اعمال گردید. نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM E8 توسط دستگاه واتر جت و وایرکات به صورت دقیق برای انجام آزمون کشش در جهت نورد از شمش فولادی جدا شدند. آزمون کشش توسط دستگاه سننم مجهز به نرم‌افزار SAF-Controllor با داشتن حداکثر نیروی ۵۰۰۰ نیوتن انجام شد. نمونه‌ها بعد از آماده‌سازی و عملیات حرارتی توسط دستگاه با سرعت استاندارد (۰/۳ میلی‌متر بر دقیقه) تا شکسته شدن نمونه‌ها کشیده شدند. در انتها طول سنجه نمونه‌ها بعد از شکسته شدن آنها اندازه‌گیری شد تا به کمک طول سنجه بتوان کرنش را محاسبه نمود.

خارج شده و به سرعت در روغن با دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کوئنچ شده و به مدت ۲۰ ثانیه در این دما نگه داشته شدند. سپس نمونه‌ها از روغن خارج شده و به سرعت در حمام نمک (حاوی ۵۰ درصد پتاسیم نیترات و ۵۰ درصد سدیم نیترات) با دماهای ۳۳۰ و ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های ۱۰۰۰ و ۱۸۰۰ قرار داده شد تا پارتیشن‌بندی در آنها صورت گیرد. پس از پارتیشن‌بندی نمونه‌ها از حمام نمک خارج و سپس با سرعت در آب کوئنچ شدند تا به دمای اتاق برسند. به‌طور کلی حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در جدول ۲ به منظور مقایسه راحت تر نمونه‌های مختلف نام‌گذاری شدند. برای بررسی ریزساختاری نمونه‌هایی با ابعاد ۱cm × ۱cm × ۱cm با دستگاه برش از شمش جدا گردید. نمونه‌ها بر اساس سیکل‌های عملیات حرارتی طراحی شده مطابق با جدول ۲ تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۱۵} (SEM) مدل TESCAN-MIRA3-XMU تصاویری از سطح نمونه‌ها گرفته شد تا ریزساختار آنها مورد بررسی قرار گیرد. برای بررسی و

جدول ۲: نام گذاری نمونه ها بعد از عملیات حرارتی

نام نمونه	دمای آستنیت (°C)	دمای پارتیشن بندی (°C)	زمان پارتیشن بندی (s)
A1	۸۲۰	۴۵۰	۱۰۰۰
A2	۸۲۰	۴۵۰	۱۸۰۰
A3	۸۲۰	۳۳۰	۱۰۰۰
A4	۸۲۰	۳۳۰	۱۸۰۰

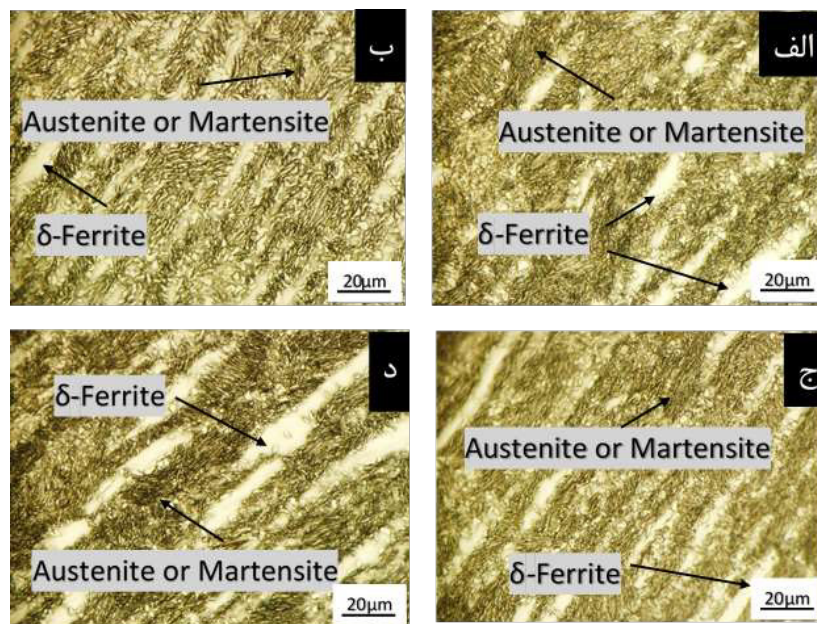


شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه های (الف) نورد شده (ب) نمونه آنیل شده در دمای ۸۲۰ °C.

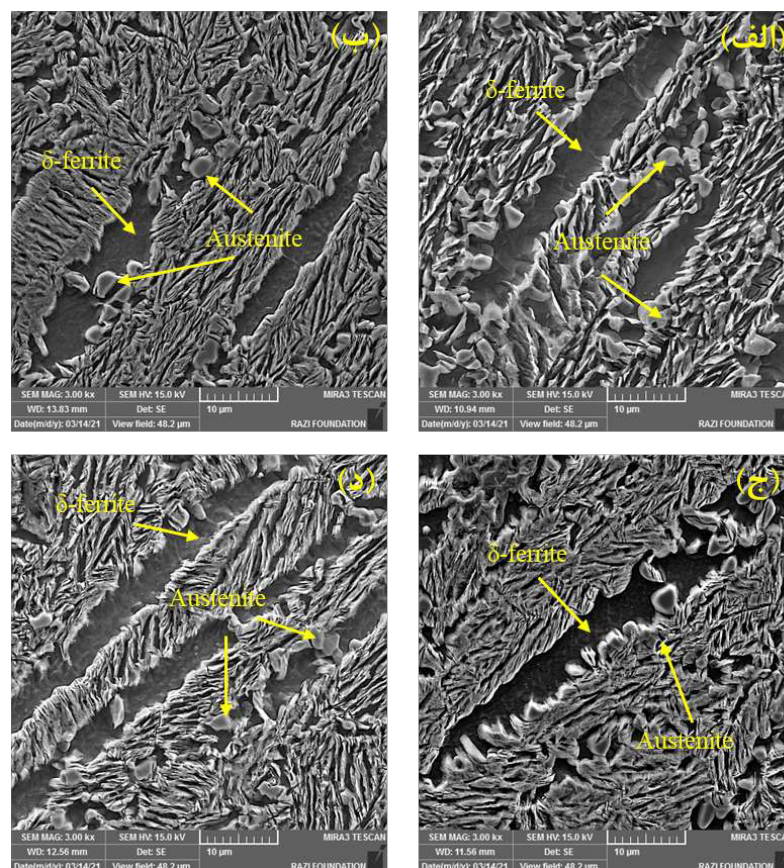
۳. نتایج و بحث

شکل ۲ نشان دهنده نمونه ی نورد شده و نمونه آنیل شده در دمای ۸۲۰ درجه سانتی گراد می باشد که نمونه با قرار گرفتن در این دما به صورت همدما باعث به وجود آمدن فاز فریت آلفا و آستنیت می گردد [۱۵]. در واقع تصویر این نمونه تاثیر دمای آنیل میان بحرانی بر ریزساختار را نشان می دهد. این نمونه پس از آنیل بلافاصله در آب کوئنچ شده اند. در این شکل در نمونه نورد شده حضور فاز فریت دلتا کاملاً مشخص بوده و این فاز همانطور که قبلاً گفته شد در تمامی دماها پایدار خواهد بود [۱۶]. شکل ۲(ب) نشان می دهد که در دمای ۸۲۰ درجه سانتی گراد، حضور فاز فریت آلفا و آستنیت مشهود است. شکل ۳ تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری را برای نمونه های مختلف نشان می دهد. ریزساختار نمونه ی A1 شامل فازهای فریت دلتا، فریت آلفا، آستنیت باقی مانده و مقداری از فاز مارتنزیت می باشد. علت وجود و عدم وجود فاز آستنیت باقی مانده در این نمونه ها به دمای پارتیشن بندی بازمی گردد. در واقع در نمونه ی A1 علت حضور فاز آستنیت باقی مانده دمای بالای پارتیشن بندی است که فرآیند انتقال کربن از فاز مارتنزیت به آستنیت استحاله نشده را آسان تر می کند. نمونه ی A2 نیز شامل فازهای فریت دلتا، فریت آلفا، آستنیت باقی مانده و مقداری از فاز مارتنزیت می باشد. اگرچه در تصاویر میکروسکوپ نوری نمی توان فاز مارتنزیت را به خوبی تشخیص داد، اما با توجه به اینکه ممکن است در نمونه ی A2 مناطقی از آستنیت به اندازه ی کافی غنی از کربن نباشند و در مرحله پایانی سرد کردن تا دمای محیط به مارتنزیت تبدیل شوند، احتمال حضور فاز مارتنزیت در ریزساختار وجود دارد. شکل ۳ (ج) و (د) تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه های A3 و A4 را نشان می دهد. این نمونه ها در دمای ۸۲۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۶۰۰ ثانیه آستنیت و سپس

در روغن با دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۰ ثانیه کوئنچ و در دمای ۳۳۰ درجه سانتی گراد پارتیشن بندی شده اند. نمونه ی A3 به مدت ۱۰۰۰ و نمونه ی A4 به مدت ۱۸۰۰ ثانیه پارتیشن بندی شده اند. در واقع در این حالت تفاوت بین زمان پارتیشن بندی در دمای ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. ریزساختار هردو نمونه شامل فازهای فریت آلفا، فریت دلتا، آستنیت باقی مانده و احتمالاً مارتنزیت می باشد. علت این امر دما و زمان مناسب برای پارتیشن بندی است که با توجه به بالاتر بودن زمان پارتیشن بندی در نمونه ی A4 انتظار می رود میزان آستنیت در آن بیشتر از نمونه ی A3 باشد. شکل ۴ تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه های فولادی که در دماهای ۳۳۰ و ۴۵۰ درجه سانتی گراد و در دو زمان مختلف ۱۰۰۰ و ۱۸۰۰ ثانیه عملیات حرارتی شده اند را نشان می دهد. در تصاویر دانه های بزرگ، کشیده و به رنگ سیاه نشان دهنده ی دانه های فاز فریت دلتا است و منطقه ی خاکستری رنگ دانه های فاز آستنیت باقی مانده را نشان می دهد. طبق منابع فاز فریت نسبت به فاز آستنیت در مرحله اچ کردن زودتر خورده می شوند و همین امر باعث می شود که رنگ فازها در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی متفاوت دیده شوند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی این امکان را فراهم می سازد که در بزرگنمایی های بیشتر از میکروسکوپ نوری و با قدرت تفکیک بالاتری، ریزساختار نمونه مورد بررسی قرار گیرد. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی دانه های فاز آستنیت باقی مانده با دو مورفولوژی آستنیت لایه ای و آستنیت توده ای دیده می شوند. البته کسر زیادی از این فاز در ریزساختار از آستنیت لایه ای تشکیل شده است. آستنیت باقی مانده در فولادها با مورفولوژی لایه ای و ورق های از پایداری مکانیکی بالاتری نسبت به مورفولوژی توده ای برخوردار است [۱۱].



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه‌های پارتیشن‌بندی (الف) A1، (ب) A2، (ج) A3 و (د) A4.



شکل ۴: تصویر SEM نمونه‌های پارتیشن‌بندی شده (الف) A1، (ب) A2، (ج) A3 و (د) A4.

شده بود، فاز فریت دلتا به عنوان زمینه در ریزساختار فولاد مشاهده می شود.

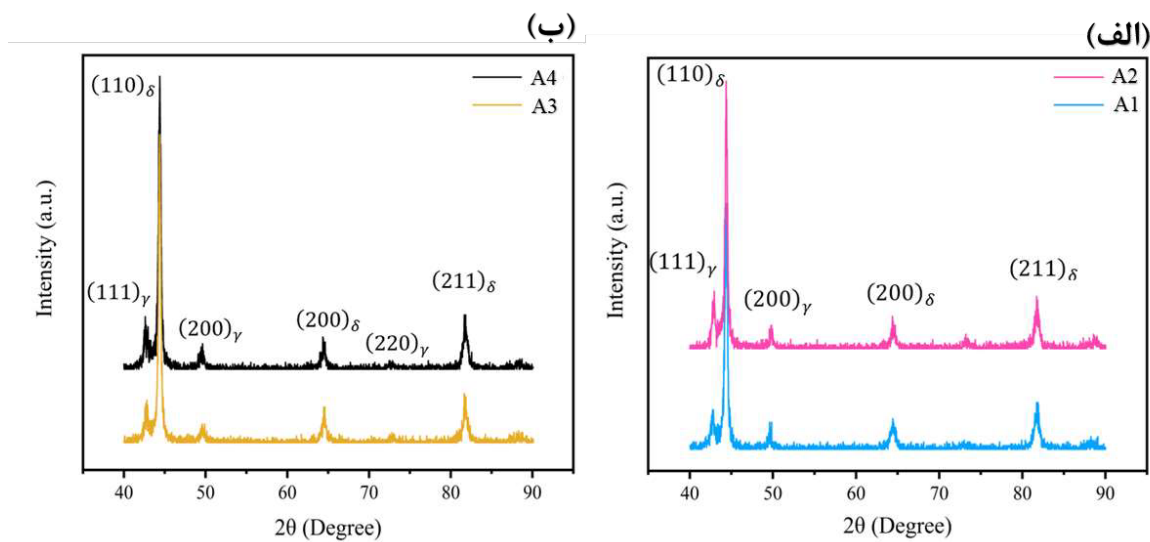
به منظور تعیین دقیق فازها، کسر حجمی آستنیت باقی مانده و کربن موجود در آستنیت باقی مانده آزمون پراش اشعه ایکس انجام شده است. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه ها که در دماها و زمان های مختلف تحت فرآیند عملیات حرارتی قرار گرفته اند در شکل ۵ آمده است. با استفاده از نرم افزار X'Pert تحلیل شدند و حضور فازهای فریت دلتا و آستنیت باقی مانده در تمامی نمونه ها در دمای محیط تأیید شد. با استفاده از این نرم افزار، صفحاتی که شدت پراش آن ها نسبت به صفحات دیگر بیشتر است و به عنوان صفحات پراش یافته تعریف می شوند، بر روی الگو پراش مشخص و نام گذاری شدند.

آن چیزی که در شکل های ۵ (الف) و (ب) مشاهده می شود در واقع تفاوت بین زمان نگهداری این نمونه ها یعنی ۱۰۰۰ و ۱۸۰۰ ثانیه در دمای پارتیشن بندی ثابت است. در این شکل با افزایش زمان پارتیشن بندی شدت پیک های مربوط به آستنیت باقی مانده بیشتر شده که این مسئله بیانگر این حقیقت می باشد که با افزایش زمان پارتیشن بندی می توان پایداری آستنیت در دمای اتاق را افزایش داد. در یک زمان ثابت با افزایش دمای پارتیشن بندی شدت پیک های مربوط به فاز آستنیت بیشتر می شوند. با افزایش دما تا ۴۵۰ درجه سانتی گراد مقدار فاز آستنیت باقی مانده افزایش یافته که این مسئله در اثر نفوذ راحت تر و بیشتر کربن از مارتنزیت فوق اشباع به آستنیت استحاله نشده است.

شکل ۴ (الف) و (ب) تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه های A1 و A2 را نشان می دهد که در آن، دما و زمان آنیل بین بحرانی یکسان و به ترتیب ۸۲۰ درجه سانتی گراد و ۶۰۰ ثانیه می باشد. همچنین دمای پارتیشن بندی برای هر دو نمونه ۴۵۰ درجه سانتی گراد است. آنچه که موجب تفاوت در ریزساختار این دو نمونه می شود، زمان پارتیشن بندی می باشد. همان طور که از شکل زیر مشاهده می شود با افزایش دما و زمان مقدار آستنیت باقی مانده افزایش یافته که این امر در نهایت موجب بهبود خواص مکانیکی می شود. در شکل ۴ ملاحظه می شود که با افزایش زمان پارتیشن بندی در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد میزان پایداری آستنیت به دلیل سهولت نفوذ کربن در این فاز بیشتر شده است. لازم به ذکر است که در تمامی تصاویر فاز فریت دلتا بدون تغییر دیده می شود که علت آن پایداری این فاز در تمامی دماها و عدم وابستگی آن به نوع عملیات حرارتی به دلیل حضور درصد بالایی از آلومینیوم، می باشد.

شکل ۴ (ج) و (د) نیز تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از دو نمونه A3 و A4 می باشد. در این نمونه ها دما و زمان آستنیت کردن ۸۲۰ درجه سانتی گراد و ۶۰۰ ثانیه می باشد و دمای پارتیشن بندی ۳۳۰ درجه سانتی گراد و زمان آن نیز ۱۰۰۰ و ۱۸۰۰ ثانیه است.

مقدار درصد وزنی آلومینیوم در ترکیب شیمیایی فولاد مورد پژوهش ۴/۵۶ درصد وزنی می باشد. با توجه به تصاویر ریزساختاری که توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده است و همان گونه که از قبل پیش بینی



شکل ۵: الگوی XRD نمونه های الف) A1 و A2 و ب) A3 و A4.

دهد، اما مقدار بسیار زیاد آن نیز می‌تواند باعث کاهش استحکام فولادها شود؛ بنابراین تعیین مقدار مناسب آستنیت باقی‌مانده در فولادها در دمای محیط اهمیت ویژه‌ای دارد [۱۹،۲۰].

آنچه که در مورد آستنیت باقی‌مانده بسیار حائز اهمیت است، پایداری این فاز در دمای اتاق می‌باشد و این امر با کاهش دمای شروع مارتنزیت امکان‌پذیر می‌باشد. برای کاهش دمای شروع مارتنزیت می‌بایست که مقاومت آستنیت در برابر استحاله بالا رود و این مسئله زمانی اتفاق خواهد افتاد که کربن در فاز آستنیت به میزانی باشد که بتواند این فاز را غنی کرده و استحکام آن را بالا ببرد تا به نیروی محرکه‌ی بیشتری برای استحاله آستنیت به مارتنزیت نیاز باشد. از آنجایی که نیروی محرکه در تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت، کاهش دما است، پس با افزایش درصد کربن در این فاز و غنی شدن آن، استحکام آن بالا رفته و برای استحاله این فاز به مارتنزیت به کاهش دمای بیشتری نیاز است که این امر همان کاهش دمای شروع مارتنزیت (M_s) می‌باشد. این اتفاق اگر به گونه‌ای رخ بدهد که دمای شروع مارتنزیت آن قدر پایین آمده و به زیر دمای اتاق برسد، آن موقع آستنیت می‌تواند در دمای اتاق پایدار باقی بماند [۹].

جدول ۳ نشان‌دهنده‌ی وابستگی کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده به دما و زمان پارتیشن‌بندی است. همان‌طور که از این جدول مشخص است با افزایش دمای پارتیشن‌بندی در زمان‌های یکسان مقدار کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده و کربن موجود در این فاز در فولاد افزایش می‌یابد. شکل ۶ تأثیر دمای پارتیشن‌بندی و تأثیر زمان پارتیشن‌بندی بر کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده را برای همه نمونه‌ها نشان می‌دهد به‌عنوان مثال همان‌طور که در شکل ۶(ب) مشاهده می‌شود در زمان پارتیشن‌بندی ۱۰۰۰ ثانیه، با افزایش دمای پارتیشن‌بندی از ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد به دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد مقدار کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده از ۱۹/۶ به ۲۵/۰۲ درصد افزایش می‌یابد..

در ریزساختار این فولادها از بین فازهای موجود، فاز آستنیت باقی‌مانده به دلیل اینکه خواص مکانیکی فولاد شدیداً به این فاز بستگی دارد، نسبت به باقی فازها اهمیت بالاتری دارد؛ بنابراین کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده جز مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر خواص مکانیکی فولاد است. هرچه مقدار این فاز بیشتر باشد، آستنیت باقی‌مانده پایداری بیشتری و ترکیب بهتری از استحکام و شکل‌پذیری را در فولاد مشاهده خواهیم نمود [۱۷]. مقدار کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده بعد از عملیات حرارتی در دمای محیط را می‌توان براساس رابطه (۱) و با استفاده از شدت پراش اشعه ایکس در صفحات پراش به دست آورد [۱۸]:

$$V_\gamma = \frac{1.4I_\gamma}{I_\alpha + 1.4I_\gamma} \quad (1)$$

شدت‌های I_α و I_γ به ترتیب شدت پیک‌های آستنیت باقی‌مانده و فریت را نشان می‌دهد.

همچنین پارامتر شبکه آستنیت باقی‌مانده را می‌توان با استفاده از رابطه (۲) محاسبه نمود. در این رابطه n شماره صفحه آستنیت باقی‌مانده است که شدت پراش آن از صفحات دیگر بیشتر می‌باشد. همچنین $2n_i$ زاویه پراش صفحه hkl آستنیت باقی‌مانده مورد نظر که پراش یافته است و λ طول موج اشعه ایکس مورد استفاده را نشان می‌دهد [۱۷].

$$a_\gamma = \frac{1}{2} \times \frac{\lambda}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{\sin \theta_i} \quad (2)$$

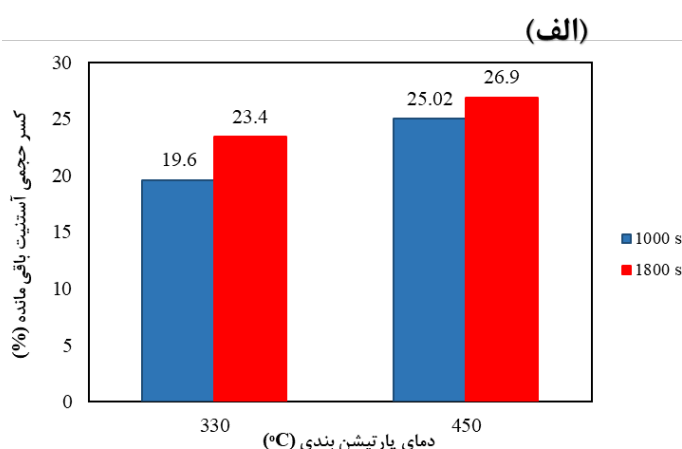
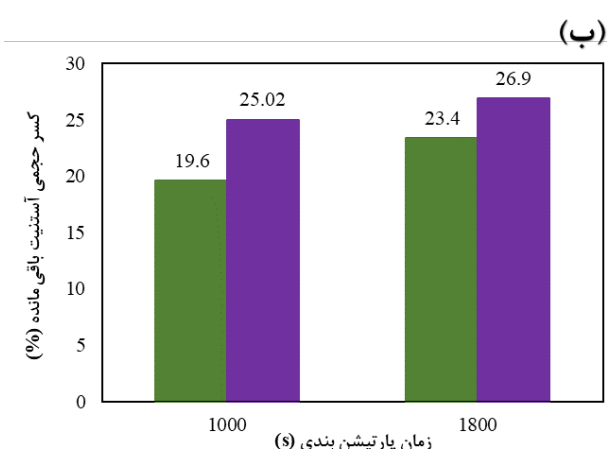
برای همه‌ی نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی و با استفاده از نتایج حاصل از آزمون پراش اشعه ایکس و همچنین با استفاده از روابط تعریف شده، کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده در دمای محیط محاسبه گردید که در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به آنچه که در مورد تأثیر میزان آستنیت باقی‌مانده بر خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد گفته شد، افزایش میزان معینی از این فاز می‌تواند ازدیاد طول و چقرمگی را افزایش

جدول ۳: کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده و مقدار کربن موجود

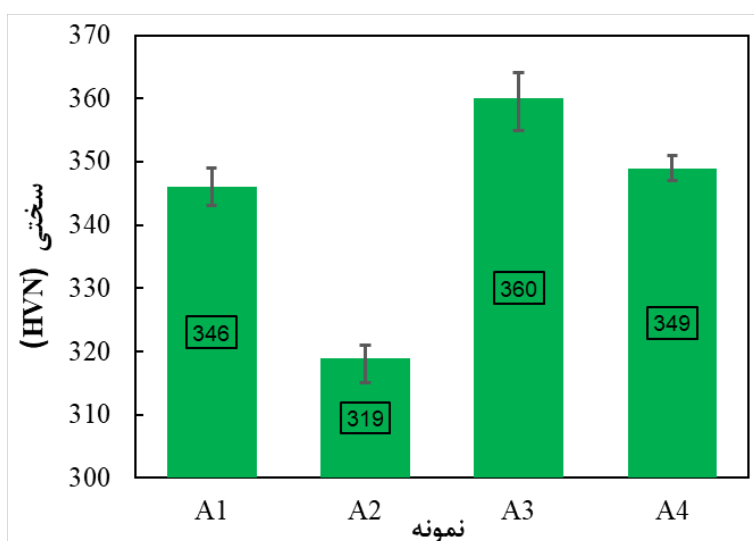
نام نمونه	سیکل عملیات حرارتی	کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده (%)	مقدار کربن موجود در فاز آستنیت باقی‌مانده (%)
A1	۱۰۰۰ ثانیه - ۴۵۰ °C و ۶۰۰ ثانیه - ۸۲۰ °C	۲۵/۰۲	۱/۸۳
A2	۱۸۰۰ ثانیه - ۴۵۰ °C و ۶۰۰ ثانیه - ۸۲۰ °C	۲۶/۹	۱/۸۸
A3	۱۰۰۰ ثانیه - ۳۳۰ °C و ۶۰۰ ثانیه - ۸۲۰ °C	۱۹/۶	۱/۶۳
A4	۱۸۰۰ ثانیه - ۳۳۰ °C و ۶۰۰ ثانیه - ۸۲۰ °C	۲۳/۴	۱/۷۹

می‌باشد. با افزایش دمای پارتیشن‌بندی کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده افزایش می‌یابد زیرا سرعت نفوذ کربن در فولادها با افزایش دما، افزایش می‌یابد [۲۱]. بنابراین نفوذ کربن از مارتنزیت به آستنیت آسان‌تر شده و غنی شدن آستنیت از کربن در دمای پارتیشن‌بندی بالاتر، بیشتر می‌شود و این فاز پس از کوئنچ نهایی پایدار خواهد ماند..
شکل ۷ مقادیر مختلف سختی بر روی نمونه‌ها با شرایط عملیات حرارتی مختلف شامل شرایط متفاوت دما و زمان برای پارتیشن‌بندی را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۶(الف) و جدول ۳، با افزایش دمای پارتیشن‌بندی، غنی شدن آستنیت از کربن اتفاق افتاده است که همین امر باعث افزایش درصد آستنیت باقی‌مانده در دمای اتاق می‌شود. در واقع با افزایش دما و نفوذ راحت‌تر کربن، کربن از فاز مارتنزیت فوق اشباع به آستنیت نفوذ کرده و آن را غنی می‌کند. به عنوان مثال مقدار کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده در نمونه‌ی A4 با دمای پارتیشن‌بندی ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۲۳/۴ درصد و در نمونه‌ی A2 با دمای پارتیشن‌بندی ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۲۶/۹ درصد



شکل ۶: (الف) تأثیر دمای پارتیشن‌بندی و (ب) تأثیر زمان پارتیشن‌بندی بر کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده.

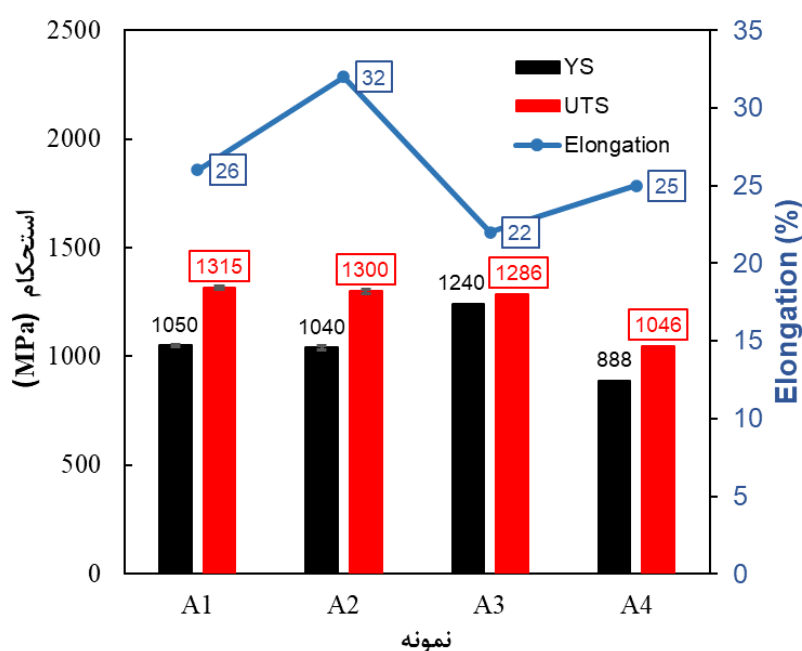


شکل ۷: تغییرات سختی نمونه‌های عملیات حرارتی شده.

با افزایش دما استحکام تسلیم در زمان ۱۰۰۰ ثانیه کاهش یافته است که این امر به دلیل غنی نشدن کافی آستنیت از کربن در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در واقع در این حالت زمانی که دمای پارتیشن‌بندی پایین (۳۳۰ درجه سانتی‌گراد) است، میزان اتم‌های کربن به اندازه‌ای است که توانایی جلوگیری از حرکت نابجایی‌ها را دارد به همین دلیل استحکام تسلیم بالاست. اگرچه با افزایش دما میزان نفوذ کربن در آستنیت افزایش پیدا میکند اما همین افزایش دما باعث بهم‌ریختگی بیشتر در ساختار می‌شود [۲۵]. همین امر باعث افزایش چگالی نابجایی‌ها در ساختار شده و حرکت آن‌ها موجب کاهش استحکام تسلیم ماده می‌گردد [۲۶]. با افزایش دما در زمان‌های ثابت ۱۰۰۰ و ۱۸۰۰ ثانیه، ازدیاد طول نمونه‌ها بیشتر می‌شود. در واقع با افزایش دما میزان کربن بیشتری از آستنیت به آستنیت نفوذ کرده که این امر باعث غنی شدن آستنیت از کربن و همچنین نرم‌تر شدن مارتنزیت می‌شود. این پدیده باعث کاهش فوق‌اشباعی مارتنزیت می‌شود [۲۲]. در مرحله کشش مقدار آستنیت باقی‌مانده به وسیله‌ی کار مکانیکی به مارتنزیت تبدیل شده که نیروی محرکه‌ی این استحاله کار مکانیکی می‌باشد [۲۷]. غنی شدن بیشتر آستنیت از کربن باعث می‌شود که آستنیت بیشتری در دمای اتاق پایدار بماند که این موضوع در بخش‌های قبلی مورد بررسی قرار گرفت. از طرفی با افزایش دما در یک زمان ثابت، استحکام کششی نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر غنی شدن آستنیت از کربن می‌باشد. در واقع زمانی که دمای پارتیشن‌بندی افزایش می‌یابد کربن بیشتری از مارتنزیت به آستنیت نفوذ کرده و این امر باعث پایداری آستنیت می‌شود. با غنی شدن آستنیت از کربن، استحکام آستنیت نیز بالا می‌رود و مقاومت آستنیت در برابر کشش نیز افزایش می‌یابد [۲۸].

افزایش دمای نگهداری هم‌دما، باعث کاهش استحکام و افزایش ازدیاد طول می‌شود. این پدیده نتیجه تمپر کردن مارتنزیت سطح بالاتر است و با مقادیر سختی به همان اندازه رابطه دارد. دمای پارتیشن‌بندی بالاتر همچنان که به پایداری کسر بالاتر آستنیت باقی‌مانده کمک می‌کند [۲۲] بر مقدار سختی نیز تاثیرگذار است بدین گونه که سختی را نیز می‌توان به‌عنوان تابعی از کسر آستنیت باقی‌مانده برای شرایط مختلف کوئنچ و پارتیشن‌بندی در نظر گرفت. آنچه که انتظار می‌رود این است که با افزایش کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده انتظار می‌رود سختی نمونه کاهش یابد [۲۳]. مطابق شکل ۷ که با افزایش دمای پارتیشن‌بندی، سختی نمونه کاهش می‌یابد و علت این امر خروج بیشتر کربن از ساختار مارتنزیت و نفوذ آن به ساختار آستنیت باقی‌مانده و پایدار کردن بیشتر آن است. در واقع علت این کاهش افزایش پایداری ساختار آستنیت باقی‌مانده و کاهش فوق‌اشباعی کربن مارتنزیت در اثر نفوذ کربن است. البته در دمای پارتیشن‌بندی بالا، احتمال وقوع استحاله بینیت نیز وجود دارد. با افزایش زمان پارتیشن‌بندی، سختی به تدریج کاهش می‌یابد، زیرا اثر پارتیشن‌بندی منجر به نفوذ بیشتر کربن از مارتنزیت به آستنیت و در نتیجه نرم شدن مارتنزیت کوئنچ شده می‌شود [۲۴].

نتایج آزمون کشش اعم از ازدیاد طول نمونه پس از کشش، استحکام کششی (UTS)، استحکام تسلیم (YS) در شکل ۸ آمده است. دما یکی از پارامترهای اصلی تاثیرگذار بر روی خواص مکانیکی فولادها می‌باشد. در فولادی که در این پژوهش نیز مورد مطالعه قرار گرفته است، تاثیر دمای پارتیشن‌بندی همواره مورد بحث قرار دارد. تاثیر دما در آزمون کشش در سه حوزه‌ی استحکام کششی، استحکام تسلیم و ازدیاد طول مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که از شکل ۸ قابل مشاهده است



شکل ۸: نمودار تغییرات استحکام و ازدیاد طول برای نمونه‌های مختلف.

درجه سانتی‌گراد این مقدار به ۳۲ درصد رسید. در نمونه با دمای پارتیشن‌بندی ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش زمان از ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ ثانیه، ازدیاد طول به میزان ۶ درصد افزایش پیدا کرد.

- بهترین ترکیب از نظر استحکام و شکل‌پذیری مربوط به نمونه A2 می‌باشد. این نمونه در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۸۰۰ ثانیه پارتیشن‌بندی شده است.

References

- De Cooman BC, Estrin Y, Kim SK. Twinning-induced plasticity (TWIP) steels. *Acta Mater* 2018; 142: 283–362.
- Chatterjee S, Muruganath M, Bhadeshia H. δ TRIP steel. *Mater Sci Technol* 2007; 23: 819–827.
- Tasan CC, Diehl M, Yan D, et al. An overview of dual-phase steels: advances in microstructure-oriented processing and micromechanically guided design. *Annu Rev Mater Res* 2015; 45: 391–431.
- Fonstein N. *Advanced high strength sheet steels*. Springer, 2015.
- Avishan B, Yazdani S, Nedjad SH. Toughness variations in nano-structured bainitic steels. *Mater Sci Eng A* 2012; 548: 106–111.
- Kwon O, Lee KY, Kim GS, et al. New trends in advanced high strength steel developments for automotive application. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publ, 2010, pp. 136–141.
- San Martín D, Palizdar Y, García-Mateo C, et al. Influence of aluminum alloying and heating rate on austenite formation in low carbon-manganese steels. *Metall Mater Trans A* 2011; 42: 2591–2608.
- Yi HL. Review on δ -transformation-induced plasticity (TRIP) steels with low density: the concept and current progress. *Jom* 2014; 66: 1759–1769.
- Rajan T V, Sharma CP, Sharma A. *Heat treatment: principles and techniques*. PHI Learning Pvt. Ltd., 2023.
- Nyyssönen T, Oja O, Jussila P, et al. Quenching and partitioning of multiphase aluminum-added steels. *Metals (Basel)* 2019; 9: 373.
- Pourfarokh A, Jafarian HR, Eivani AR, et al. Regulating tensile properties through bainitic transformation temperature in a hot-rolled δ -TRIP steel. *Mater Sci Technol* 2020; 36: 223–232.
- Matlock DK, Speer JG. Third generation of AHSS: microstructure design concepts. In: *Microstructure and Texture in Steels: and Other Materials*. Springer, 2009, pp. 185–205.
- Bhadeshia HKDH, Christian JW. Bainite in steels. *Metall Trans A* 1990; 21: 767–797.
- Babafafari Z, Pan A V, Pahlevani F, et al. Effect of silicon and partitioning temperature on the microstructure and mechanical properties of high-carbon steel in a quenching and partitioning heat treatment. *J Mater Sci* 2021; 56: 15423–15440.
- Zhao Y, Yan Q, Chen L, et al. Effect of isothermal temperature on microstructure and mechanical properties of high Al-low Si TRIP steel. *Acta Metall Sin (English Lett)* 2014; 27: 389–394.
- Sui G, Charles EA, Congleton J. The effect of delta-ferrite content on the stress corrosion cracking of austenitic stainless steels in a sulphate solution. *Corros Sci* 1996; 38: 687–703.
- Xiong XC, Chen B, Huang MX, et al. The effect of morphology on the stability of retained austenite in a quenched and partitioned steel. *Scr Mater* 2013; 68: 321–324.
- Shen YF, Liu YD, Sun X, et al. Improved ductility of a transformation-induced-plasticity steel by nanoscale austenite lamellae. *Mater Sci Eng A* 2013; 583: 1–10.
- Zhang M-X, Kelly PM, Bekessy LK, et al. Determination of retained austenite using an X-ray texture goniometer. *Mater Charact* 2000; 45: 39–49.
- Yang MX, Yuan FP, Xie QG, et al. Strain hardening in Fe–16Mn–10Al–0.86 C–5Ni high specific strength steel. In: *Heterostructured Materials*. Jenny Stanford Publishing, 2021, pp. 721–747.
- Wang C, Zhang Y, Cao W, et al. Austenite/martensite structure and corresponding ultrahigh strength and high ductility of steels processed by Q&P techniques. *Sci China Technol Sci* 2012; 55: 1844–1851.

اولین تأثیری که به بررسی آن در اثر افزایش زمان خواهیم پرداخت، تغییرات استحکام تسلیم نمونه‌هاست که با افزایش زمان در یک دمای ثابت پارتیشن‌بندی، استحکام تسلیم ماده به دلیل پارتیشن‌بندی بیشتر کربن از مارتنزیت فوق اشباع به آستنیت استحاله نشده، کاهش می‌یابد. افزایش زمان و نفوذ بیشتر کربن باعث می‌شود که چگالی نابجایی‌ها افزایش یافته و حرکت آن‌ها موجب کاهش استحکام تسلیم شود. استحکام کششی نمونه‌ها در دماهای ثابت با افزایش زمان کاهش می‌یابد. علت این پدیده این است که در طول مرحله پارتیشن‌بندی اتم‌های کربن از مارتنزیت فوق اشباع به طرف آستنیت تبدیل نشده حرکت کرده و باعث کاهش فوق اشباعی کربن در مارتنزیت می‌شوند. با کاهش فوق اشباعی کربن، مارتنزیت نرم شده و به این ترتیب استحکام افت می‌کند. از طرفی افزایش دما تأثیر دیگری بر روی خواص مکانیکی نمونه‌ها دارد و آن‌هم تغییرات ازدیاد طول می‌باشد. با افزایش دما و پارتیشن‌بندی کربن، میزان کربن بیشتری فرصت نفوذ از مارتنزیت به آستنیت را می‌یابد که همین امر باعث پایداری بیشتر آستنیت و نرم‌تر شدن مارتنزیت می‌شود. در واقع تخلیه کربن از مارتنزیت باعث کاهش فوق اشباعی مارتنزیت و نرم شدن آن می‌شود. در دمای ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد و با افزایش زمان از ۱۰۰۰ به ۱۸۰۰ ثانیه ازدیاد طول از ۲۲ به ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. این اتفاق در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد نیز با افزایش از ۲۶ به ۳۲ درصد رخ می‌دهد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایشات بر روی فولاد با درصد آلومینیم بالا (۴/۵۶ درصد وزنی) انجام گرفت. با تغییر پارامترهای دما و زمان نتایج زیر بدست آمد:

- با افزایش دمای پارتیشن‌بندی از ۳۳۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های ثابت کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده افزایش یافت. با افزایش زمان نگهداری در دمای پارتیشن‌بندی درصد کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده افزایش یافت. کسر حجمی آستنیت در نمونه با دمای پارتیشن‌بندی ۳۳۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش زمان از ۱۰۰۰ به ۱۸۰۰ ثانیه به علت نفوذ بیشتر کربن به آستنیت از ۶/۱۹ به ۴/۲۳ درصد رسید.

- با افزایش دمای پارتیشن‌بندی استحکام کششی نمونه افزایش و با افزایش زمان پارتیشن‌بندی در یک دما استحکام تسلیم کاهش یافت. در نمونه با دمای پارتیشن‌بندی ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش زمان از ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ ثانیه، استحکام کششی از ۱۳۱۵ مگا پاسکال به ۱۳۰۰ مگا پاسکال به علت خروج کربن از مارتنزیت فوق اشباع و نرم‌تر شدن آن کاهش یافت.

- با افزایش دمای و زمان پارتیشن‌بندی مقدار ازدیاد طول نمونه‌های فولادی عملیات حرارتی شده به علت توانایی نفوذ کربن بیشتر و افزایش کسر حجمی آستنیت افزایش پیدا کرد. ازدیاد طول نمونه پارتیشن‌بندی شده در دمای ۳۳۰ درجه برابر با ۲۵ درصد بوده که با افزایش دمای پارتیشن‌بندی تا ۴۵۰

22. Jirková H, Kučerová L, Mašek B. Effect of Quenching and Partitioning Temperatures in the QP Process on the Properties of AHSS with Various Amounts of Manganese and Silicon. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publ, 2012, pp. 2734–2739.
23. Speer JG, Edmonds D V, Rizzo FC, et al. Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation. *Curr Opin Solid State Mater Sci* 2004; 8: 219–237.
24. Li HY, Lu XW, Wu XC, et al. Bainitic transformation during the two-step quenching and partitioning process in a medium carbon steel containing silicon. *Mater Sci Eng A* 2010; 527: 6255–6259.
25. Kicking C, Suppan C, Hebesberger T, et al. Microstructure and mechanical properties of partially ferritic Q&P steels. *Mater Sci Eng A* 2021; 815: 141296.
26. Kantanen PK, Javaheri V, Somani MC, et al. Materials Characterization Effect of deformation and grain size on austenite decomposition during quenching and partitioning of (high) silicon - aluminum steels. 171. Epub ahead of print 2021. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110793.
27. Bhadeshia H. Driving force for martensitic transformation in steels. *Met Sci* 1981; 15: 175–177.
28. Nyyssönen T, Peura P, De Moor E, et al. Crystallography and mechanical properties of intercritically annealed quench and partitioned high-aluminum steel. *Mater Charact* 2019; 148: 71–80.