



## تأثیر دما و زمان آنیل بین بحرانی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد پیشرفته استحکام بالای منگنز متوسط

حمید رضا شاهوردی<sup>1\*</sup>، امیرسالار دهقانی<sup>2</sup>، محمد ذبیحی گرگری<sup>3</sup>، محمد امامی<sup>4</sup>

1- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

2- دانشجوی دکتری مهندسی مواد، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

3- کارشناس ارشد، مهندسی مواد شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

4- استاد یار، مهندسی مواد، دانشگاه بناب، بناب، ایران

\* تهران، صندوق پستی 143-14115، shahverdi@modares.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 آبان 1400

داوری اولیه: 19 آذر 1400

پذیرش: 19 دی 1400

### کلیدواژگان:

فولاد پیشرفته استحکام بالا

آنیل بین بحرانی

خواص مکانیکی

مارتنزیت

آستنیت

در تحقیق حاضر تأثیر دما و زمان عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد پیشرفته استحکام بالای منگنز متوسط با 5 درصد وزنی منگنز و 0/1 درصد وزنی بور مورد بررسی قرار گرفت. سه دمای 680، 700 و 710 درجه سانتیگراد بر اساس پایداری فاز آستنیت (دماهای پایداری 50، 70 و 90 درصد) به عنوان دماهای آنیل انتخاب شدند. مشخصه یابی مکانیکی توسط آزمون کشش تک محوره و بررسی های فازی و ریزساختاری نیز توسط پراش پرتوی ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام گردید. شمش های آلیاژی، نورد داغ و سپس نورد سرد شدند. نمونه های نورد سرد شده قبل از فرآیند آنیل دارای ساختار مارتنزیت بوده و فرآیند آنیل در هر سه دما منجر به بازپخت ساختار مارتنزیتی اولیه شد. با افزایش دمای آنیل از 680 به 710 درجه سانتیگراد، با افزایش درصد فاز آستنیت باقی مانده، استحکام کششی و ازدیاد طول نهایی افزایش و به علت بازپخت بیشتر فاز زمینه مارتنزیتی، تنش تسلیم کاهش یافت. بهترین خواص حاصله برای نمونه های آنیل شده در 710 درجه سانتیگراد به مدت 20 دقیقه بود که منجر به حصول استحکام کششی 960 MPa و ازدیاد طول 22 درصد شد. در دمای آنیل 710 درجه سانتیگراد، با افزایش زمان آنیل از 10 به 20 دقیقه، درصد آستنیت باقی مانده و ازدیاد طول افزایش یافت ولی با افزایش بیشتر زمان به 30 دقیقه، به علت انحلال بیشتر فازهای رسوبی، پایداری فاز آستنیت کاهش یافته و فاز آستنیت حین سرمایش به فاز مارتنزیت تبدیل گردید و همین امر منجر به افت خواص مکانیکی نمونه شد.

## Effect of intercritical annealing temperature and time on the microstructure and mechanical properties of medium Mn advanced high strength steel

Hamid Reza Shahverdi<sup>1\*</sup>, Amirsalar Dehghani<sup>2</sup>, Mohammad Zabihi Gargari<sup>1</sup>, Mohammad Emami<sup>3</sup>

1- Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Department of Materials Engineering, Bonab University, Bonab, Iran

\* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, shahverdi@modares.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 21 November 2021

First Decision: 10 December 2021

Accepted: 9 January 2022

### Keywords:

Advanced high strength steel

Intercritical annealing

Mechanical properties

Martensite

Austenite

### Abstract

In the present study, the effect of heat treatment temperature and time on the microstructural and mechanical properties of medium manganese advanced high strength steel with 5 wt% Mn and 0.1 wt% B were investigated. Three temperatures of 680, 700 and 710 °C were selected as annealing temperatures based on the stability of the austenite phase (stability temperatures of 50, 70 and 90% of the austenite phase). Mechanical characterization was performed using a uniaxial tensile test and phase and microstructural studies were performed by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). Alloy ingots were hot rolled, followed by cold rolling. The cold rolled sample had a martensite structure before the annealing process and the annealing process at all three temperatures resulted in the annealing of the initial martensitic structure. With raising annealing temperature from 680 °C to 710 °C, and consequently increase in residual austenite, tensile strength and ultimate elongation increased. Due to the additional annealing of martensitic matrix, yield stress decreased. The superior properties were resulted from the sample annealed at 710 °C for 20 min which led to tensile strength and ultimate elongation of 960 MPa and 22%, respectively. Increasing the time from 10 min to 20 min at annealing temperature of 710 °C, led to the rising of ultimate elongation and residual austenite. However, further annealing time (30 min at 710 °C) brought about reduction in austenite stability due to the dissolution of Precipitate phases Accordingly, the austenite phase turned into martensite during cooling and the mechanical properties of the sample significantly worsened.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. R. Shahverdi, A. Dehghani, M. Zabihi Gargari, M. Emami, Effect of intercritical annealing temperature and time on the microstructure and mechanical properties of medium Mn advanced high strength steel, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 11, pp. 16- 34, 2022 (in Persian)

## 1- مقدمه

اهمیت فولاد در زندگی روزمره و صنعت غیرقابل انکار است. فولادها دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی هستند که منجر شده است در صنایع مختلف به‌عنوان ماده‌ی اصلی مورد استفاده قرار گیرند [1] یکی از مصرف‌کنندگان عمده فولاد، صنایع خودروسازی است. بدنه خودروها عموماً از جنس فولاد است و خواص فولاد مورد استفاده در خودرو می‌تواند تعیین‌کننده کیفیت و قیمت تمام‌شده محصول باشد [2-4].

بر اساس استانداردهای زیست‌محیطی، کاهش مصرف سوخت توسط خودروها از الزامات شرکت‌های خودروسازی بزرگ دنیا شده است [5]؛ برای این منظور فولادهای استحکام بالا<sup>1</sup> توسعه یافته و در مقاطع مختلف بدنه‌ی خودروها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

از میان نسل‌های مختلف فولادهای استحکام بالا، گروه فولادهای پیشرفته استحکام بالا<sup>2</sup> بیشتر مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته است [6]. فولادهای پیشرفته استحکام بالا در سه نسل مختلف توسعه یافته‌اند که شامل فولادهای پیشرفته استحکام بالای نسل اول، دوم و سوم می‌باشند [7-9].

نسل اول و دوم فولادهای پیشرفته استحکام بالا، به ترتیب دارای محدودیت شکل‌پذیری و قیمت بالای محصول بودند و نسل سوم فولادهای پیشرفته استحکام بالا، برای حل این دو مشکل توسعه یافتند و بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفتند [10]. مقدار منگنز مورد استفاده در این فولادها حدود 3-10 درصد وزنی است و خواص مکانیکی این فولادها در محدوده‌ی بین نسل اول و دوم قرار می‌گیرد. دامنه استحکام این فولادها 800-1400 مگا پاسکال و میزان ازدیاد طول نیز 40-20 درصد می‌باشد [11، 12]. لو و همکاران [13] خواص مکانیکی فولاد Fe-0.1C-5Mn را مورد بررسی قرار دادند. فرآیند آنیل بین بحرانی<sup>3</sup> به مدت 10 دقیقه منجر به حصول خواص مکانیکی مطلوب نظیر استحکام کششی نهایی 1000 مگا پاسکال و ازدیاد طول 20 درصد برای این فولاد گردید.

فولادهای منگنز متوسط بعد از ریخته‌گری و نورد، تحت فرآیند آنیل بین بحرانی قرار می‌گیرند و در منطقه‌ی دوفازی آستنیت-فریت آنیل می‌شوند. فرآیند آنیل منجر به نفوذ منگنز و کربن به ساختار فولاد شده و باعث پایداری فاز آستنیت در ساختار می‌شود و مقدار قابل‌ملاحظه‌ای از فاز آستنیت، بعد از سرمایش تا دمای محیط در ساختار باقی می‌ماند که حین اعمال

تنش خارجی، به فاز مارتنزیت استحاله می‌کند و همین امر منجر به افزایش استحکام و بهبود شکل‌پذیری این فولادها با اعمال تنش می‌شود [14، 15].

محققان برای بهینه کردن خواص فولادهای منگنز متوسط، پارامترهای زمان و دمای عملیات حرارتی را مورد بررسی قرار می‌دهند و مقادیر بهینه‌ی پارامترهای آنیل حاصل می‌شود [16]. تحقیقات متعددی در رابطه با تأثیر دما [17، 18] و زمان [19، 20]. آنیل بین بحرانی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای منگنز متوسط انجام گردیده است. اخیراً ساهو [20] و همکاران تأثیر دمای آنیل بین بحرانی را برای فولاد منگنز متوسط با ترکیب Fe-8Mn-4Al-3.5Ni-0.8Si-0.25C (wt%) در دو حالت نورد گرم و نورد سرد مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که در هر دو حالت نورد، با افزایش دمای آنیل از 760 تا 840 درجه‌ی سانتی‌گراد، درصد آستنیت باقی‌مانده افزایش ولی استحکام کششی و تنش تسلیم کاهش یافته است. بهینه‌ترین خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی 800 مگا پاسکال و ازدیاد طول 57 درصد برای دمای آنیل 800 درجه‌ی سانتی‌گراد بود و دلیل این امر استحاله‌ی 50 درصد فاز آستنیت باقی‌مانده به فاز مارتنزیت حین آزمون کشش برای نمونه مذکور بوده است این در حالی است که برای بقیه‌ی دماهای آنیل، درصد استحاله کمتر از 30 درصد گزارش شده است.

در تحقیقی که توسط ژائو و همکاران [22] انجام گرفته است، گزارش شده است که با افزایش دمای آنیل، درصد آستنیت باقی‌مانده به یک مقدار بیشینه می‌رسد و با افزایش بیشتر دما، تمام فازهای کاربیدی در ساختار انحلال یافته و آستنیت تشکیل شده ناپایدار می‌گردد و حین سرمایش، ساختار مارتنزیتی ایجاد می‌گردد. تأثیر زمان آنیل توسط وانگ و همکاران [20] مورد مطالعه قرار گرفت و مشخص شد که با افزایش زیاد زمان آنیل، پایداری فاز آستنیت کمتر شده و حین سرمایش، فاز آستنیت به فاز مارتنزیت تبدیل می‌گردد و منجر به افت خواص مکانیکی می‌شود. گزارش شده است که با افزایش زمان آنیل، درصد تعادلی کربن فاز آستنیت با گذشت زمان کاهش می‌یابد و منجر به ناپایداری آستنیت می‌شود؛ ولی در زمان‌های کوتاه آنیل، درصد کربن فاز آستنیت بالا بوده و فاز آستنیت پایدارتر است. همچنین، با افزایش زمان آنیل و حل شدن کاربیدها در ساختار، خواص مکانیکی فولاد کاهش می‌یابد.

دی مور و همکاران [23]، مدلی برای پیش‌بینی مقدار آستنیت باقی‌مانده در فولادهای منگنز متوسط توسعه دادند. در این پژوهش، عامل اصلی پایداری فاز آستنیت، دمای استحاله‌ی

<sup>1</sup> High Strength Steels<sup>2</sup> Advanced High Strength Steels (AHSS)<sup>3</sup> Intercritical Annealing (IA)

فولاد منگنز متوسط، در این تحقیق، تأثیر دما و زمان عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد Fe-0.1C-5Mn-1Si-2.5Cr-0.1B مورد بررسی قرار گرفت و بر اساس مشاهدات ریزساختاری، فازی و خواص مکانیکی، دلایل تغییر خواص مکانیکی در دما و زمان‌های مختلف آنیل مورد بحث قرار گرفت. با توجه به وجود عناصر کروم و بور در ترکیب شیمیایی فولاد طراحی شده، ماهیت و دمای پایداری فازهای رسوبی تغییر کرده و امکان اعمال فرآیند آنیل در دماهای بالاتری نسبت به فولاد عاری از کروم و بور وجود دارد. افزودن عنصر کروم با تشکیل فازهای کاربیدی از نوع  $M_7C_3$ ، و افزودن عنصر بور با تشکیل  $M_{23}(C,B)_6$ ، عنصر کربن را تا دمای بالاتری در ترکیب رسوبات نگه می‌دارند و همین امر کمک می‌کند تا فرآیند آنیل در دمای بالا انجام گیرد و با توجه به ماهیت نفوذی انتقال کربن به فاز آستنیت، در مدت‌زمان‌های کوتاه‌تری، امکان تکمیل فرآیند آنیل وجود دارد. تأثیر عنصر کروم و بور به تفصیل در پژوهش‌های قبلی [25، 26] مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2- مواد و روش تحقیق

جدول 1 ترکیب شیمیایی (ترکیب اسمی) فولاد طراحی شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. این فولاد حاوی عناصر بین نشین کربن و بور و عناصر جانشین، منگنز، کروم و سیلیسیم است. آلیاژها به صورت شمش‌هایی در ابعاد  $50 \times 30 \times 15 \text{ mm}^3$  توسط کوره‌ی القایی، ذوب و ریخته‌گری شدند. عملیات همگن‌سازی در کوره تیوبی تحت خلأ در دمای  $1200 \pm 5$  درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت انجام گرفت و سپس شمش آلیاژ، توسط کوره مقاوم‌تی ساخت شرکت آذر کوره (مدل PX-7) همگن‌شده و در محیط کوره، سرد گردید. در ادامه، شمش تهیه‌شده توسط دستگاه نورد آزمایشگاهی تا ضخامت 4 میلی‌متر در 4 مرحله تحت نورد داغ قرار گرفت (70 درصد کاهش سطح مقطع) و در هوا سرد شد. دمای شروع و اتمام نورد داغ به ترتیب 1100 و 900 درجه‌ی سانتی‌گراد بود.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ بررسی‌شده در تحقیق حاضر

Table 1 Chemical composition of the alloy investigated in the present study

عنصر	کربن	بور	منگنز	سیلیسیم
درصد وزنی	0/1	0/1	5	1
عنصر	کروم	گوگرد	فسفر	آهن
درصد وزنی	2/5	0/001	0/001	مابقی

سپس، ورق تهیه‌شده تا ضخامت 1 میلی‌متر در 3 مرحله

آستنیت به مارتنزیت معرفی شد و مقادیر عناصر کربن و منگنز فاز آستنیت بعد از فرآیند آنیل، تعیین‌کننده‌ی این دما می‌باشند. بر اساس مطالعات این محققان، برای درصد آستنیت باقی‌مانده یک مقدار بیشینه وجود دارد و بعد از نقطه‌ی بیشینه‌ی درصد آستنیت، با افزایش دمای آنیل، مقدار آستنیت باقی‌مانده کاهش می‌یابد و این نشان‌دهنده‌ی عدم پایداری آستنیت تشکیل‌شده در دماهای آنیل بالا است.

لوا و همکاران [23]، تشکیل سمنتیت در فولادهای منگنز متوسط را حین آنیل بین بحرانی بررسی کردند. بر اساس مشاهدات این محققان، مشخص شد که فازهای کاربیدی طی گرمایش تشکیل می‌شوند و چون در منطقه‌ی دوفازی فریت و آستنیت ناپایدار هستند، بعد از مدتی حل‌شده و باعث پایداری فاز آستنیت می‌شوند. در پایداری‌سازی فاز آستنیت، کاربیدها دو نقش مهم را ایفا می‌کنند. اول اینکه کاربیدها محل جوانه‌زنی فاز آستنیت هستند و دیگر اینکه به علت دارا بودن غلظت بالای عناصر کربن و منگنز (عناصر پایداری‌کننده‌ی آستنیت)، حین حل شدن باعث افزایش غلظت این عناصر در محل انحلال شده و منجر به پایداری آستنیت می‌شوند. با افزایش زمان آنیل، میزان پایداری و مقدار آستنیت تشکیل‌شده کاهش می‌یابد و علت آن توزیع همگن عناصر کربن و منگنز در ساختار است. این محققان ادعا کردند که اگر بتوان درصد، شکل و ترکیب رسوبات را قبل از فرآیند آنیل تعیین کرد امکان حصول آستنیت باقی‌مانده با درصد و پایداری بالا وجود دارد. بر اساس نتایج این تحقیق، کاربیدها در منطقه‌ی دوفازی به سرعت انحلال می‌یابند و اگر سرعت گرمایش بالا باشد، با نفوذ کربن از ساختار مارتنزیت به کاربیدها، کاربیدها رشد می‌کنند و در منطقه‌ی آنیل، رسوبات کاربیدی حل می‌شوند و منجر به پایداری فاز آستنیت تشکیل‌شده می‌شوند. ولی اگر زمان آنیل افزایش یابد، با توزیع بیشتر عناصر پایداری‌کننده‌ی آستنیت، پایداری آستنیت تشکیل‌شده کاهش می‌یابد.

در تحقیقی [25]، تأثیر افزودن عنصر کروم بر پایداری فازی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که وجود عنصر کروم در ترکیب فولاد منگنز متوسط با 4/5 درصد منگنز، باعث ایجاد فازهای کاربیدی با دمای انحلال بالا می‌شود و همین امر امکان افزایش دمای آنیل را موجب می‌شود و اعمال دمای بالای آنیل، این امکان را می‌دهد که در زمان آنیل 10 دقیقه، فرآیند آنیل منجر به بهبود خواص مکانیکی فولاد شود.

با توجه به اهمیت دما و زمان عملیات حرارتی بر پایداری فاز آستنیت و تأثیر مستقیم پارامترهای آنیل بر ریزساختار نهایی

برای بررسی‌های فازی و محاسبه‌ی درصد آستنیت باقی‌مانده، پراش پرتوی ایکس توسط دستگاه Philips مدل PW3040/60 با استفاده از پرتوی  $\text{Cu-K}\alpha$  با طول موج  $\lambda=1.5406$  انجام گردید. پراش هر نمونه در گستره‌ی  $2\theta$  از 40 تا 100 درجه با اندازه‌ی گام 0/02 درجه و زمان توقف در هر گام 0/5 ثانیه ثبت شد. همچنین تحلیل الگوهای پراش و شناسایی فازها به کمک نرم‌افزار High Score Plus صورت پذیرفت. داده‌های به‌دست‌آمده از پراش سنجی پرتوی ایکس توسط روش ریتولد [28] و با استفاده از نرم‌افزار MAUD آنالیز شدند.

### 3- نتایج و بحث

نمودار فازی، درصد وزنی کربن فاز آستنیت و دماهای آنیل برای آلیاژ طراحی‌شده در شکل 2 نشان داده شده است. در شکل 2- الف، خطوط عمودی مشخص‌کننده‌ی دماهای آنیل در منطقه‌ی دوفازی آستنیت-فریت هستند. دمای 680 درجه‌ی سانتی‌گراد، دمای تعادلی پایداری 50% وزنی آستنیت است و با افزایش دمای آنیل به 700 و 710 درجه‌ی سانتی‌گراد، میزان آستنیت تعادلی به 70 و 90 درصد وزنی افزایش می‌یابد.

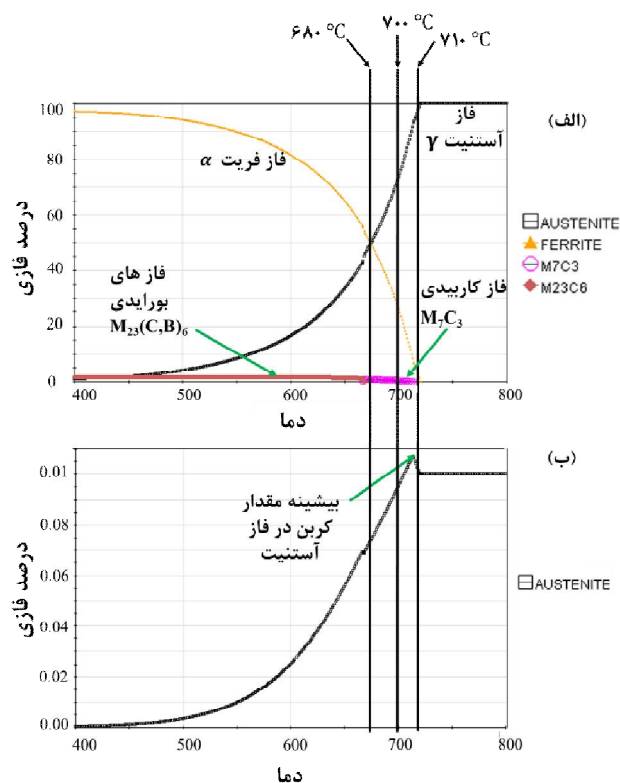


Fig. 2 (a) Phase diagram plotted by JMatPro and annealing temperatures (black lines) and (b) The amount of austenite phase carbon in terms of temperature for the designed alloy

شکل 2 (الف) نمودار فازی رسم شده توسط نرم‌افزار JMatPro و دماهای آنیل (خطوط مشکی) و (ب) مقدار کربن فاز آستنیت برحسب دما برای آلیاژ طراحی‌شده

(75 درصد کاهش سطح مقطع) تحت نورد سرد قرار گرفت [25]. نمونه‌های نورد سرد شده به مدت 10 دقیقه در دماهای 680، 700 و 710 درجه‌ی سانتی‌گراد تحت فرآیند آنیل بین بحرانی در منطقه‌ی دوفازی  $\alpha + \gamma$  قرار گرفتند؛ که این نمونه‌ها با عنوان‌های 680-10، 700-10 و 710-10 مشخص شده‌اند. همچنین برای بررسی تأثیر زمان عملیات حرارتی، در دمای 710 درجه سانتی‌گراد، عملیات آنیل در زمان‌های 20 و 30 دقیقه نیز انجام گرفت که این نمونه‌ها نیز به ترتیب با کدهای 710-20 و 710-30 مشخص شده‌اند. نمودار فازی آلیاژ طراحی‌شده، توسط نرم‌افزار JmatPro به دست آمد و مشخصات ترمودینامیکی برای آلیاژ نظیر مشخص کردن دمای آنیل از داده‌های نمودار فازی استخراج گردید.

شکل 1 مراحل آماده‌سازی نمونه‌های آنیل شده در دماها و زمان‌های مختلف و سیکل آنیل را نشان می‌دهد. نمونه‌های آزمون کشش بر اساس مرجع [27] به صورت تخت به عرض 3 و طول سنجه‌ی 11/6 میلی‌متر در جهت نورد توسط برش باسیم آماده‌سازی شدند. آزمون کشش در دمای اتاق و توسط دستگاه INSTRON-5500R با سرعت کشش ثابت 0.6 mm/min صورت پذیرفت.

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل MIRA3TESCAN-XMU برای مشخصه‌یابی ریزساختاری مورد استفاده قرار گرفته است. برای مشاهدات میکروسکوپی نمونه‌ها، بعد از پولیش مکانیکی، محلول نایتال 3 درصد برای حکاکی مورد استفاده قرار گرفت. بررسی‌های مربوط به ریزساختار نظیر بررسی اندازه و درصد فازهای رسوبی، توسط نرم‌افزار آنالیز تصویر Image J انجام گرفته است.

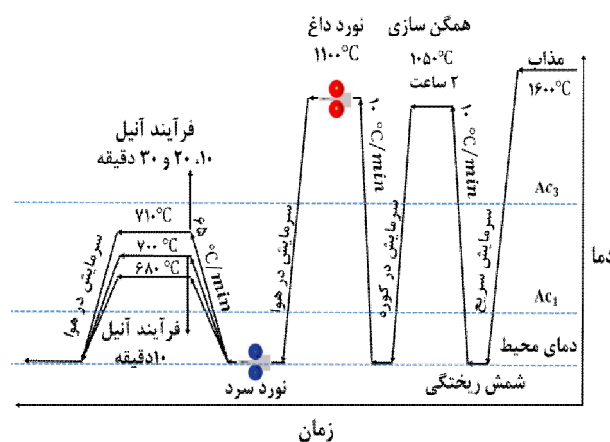


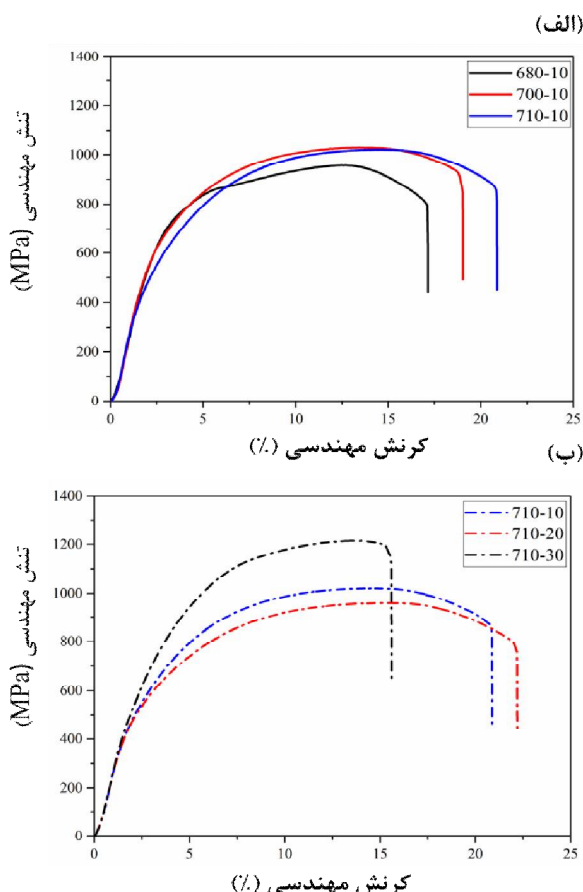
Fig. 1 Schematic of preparation of casted ingot, hot and cold rolling and annealing process

شکل 1 طرح‌واره‌ی تهیه‌ی شمش ریخته‌گری شده، نورد داغ و سرد و فرآیند آنیل

با افزایش زمان آنیل، زمان بهینه‌ی آنیل موردبررسی قرار گرفته است؛ لازم به ذکر است بر اساس ملاحظات تولید صنعتی، از انجام فرآیند آنیل در مدت‌زمان‌های بالا صرف‌نظر شده است [26]. رویکرد مشابهی توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته است [13، 26].

نمودار تنش- کرنش مهندسی آلیاژ طراحی شده، در شکل 3 نشان داده شده است. شکل 3- الف مشخص کننده خواص مکانیکی نمونه‌ها در دماهای مختلف آنیل بین بحرانی است و شکل 3- ب نیز نشان‌دهنده‌ی تأثیر زمان نگهداری در دمای آنیل 710 درجه سانتی‌گراد بر خواص مکانیکی آلیاژ است.

با توجه به شکل 3- الف مشخص می‌شود که با افزایش دما در مدت‌زمان‌های یکسان آنیل (10 دقیقه)، با افزایش دمای آنیل بین بحرانی از 680 درجه سانتی‌گراد تا 710 درجه سانتی‌گراد، استحکام کششی و ازدیاد طول افزایش می‌یابد ولی تنش تسلیم نمونه‌ها کاهش می‌یابد.



**Fig. 3** Engineering stress-strain diagram for designed alloy (a) at annealing temperatures of 680, 700, and 710°C for 10 minutes and (b) annealing temperature of 710°C and times of 10, 20, and 30 minutes

شکل 3 نمودار تنش-کرنش مهندسی برای آلیاژ طراحی شده. (الف) در دماهای آنیل 680، 700 و 710 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه و (ب) دمای آنیل 710 درجه سانتی‌گراد و زمان‌های 10، 20 و 30 دقیقه

با توجه به وجود عنصر بور در ترکیب شیمیایی این آلیاژ، فازهای رسوبی به صورت فاز کاربو-بورایدی  $M_{23}(C,B)_6$  در ترکیب آلیاژ به وجود آمده است [26]. این فاز در سیستم آلیاژی Fe-C-B-Cr نیز توسط لنتز<sup>1</sup> و همکاران شناسایی شده است [29]. فلسفه‌ی انتخاب دماهای آنیل به این صورت است که در دماهای 680 و 700 درجه سانتی‌گراد، فازهای رسوبی در ساختار فولاد حضور دارند ولی با افزایش دما تا 710 درجه سانتی‌گراد، فازهای رسوبی بایستی در ساختار انحلال یابند، از این رو با بررسی دماهای آنیل، تأثیر کاهش درصد فازهای رسوبی که منبع اصلی ذخیره‌ی عنصر کربن هستند، بر میزان پایداری فاز آستنیت و خواص مکانیکی فولاد بررسی می‌شود. همچنین در انتخاب دماهای آنیل معیار درصد تعادلی فاز آستنیت نیز در نظر گرفته شده است [25].

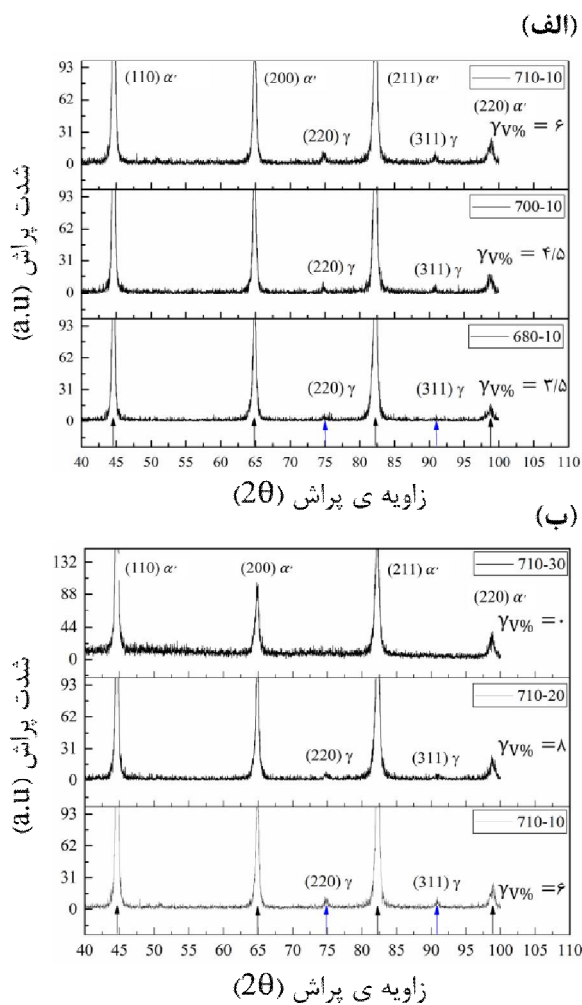
بر اساس شکل 2- الف، مشخص می‌شود که فازهای رسوبی تا محدوده دمایی 700 درجه سانتی‌گراد پایدار هستند و با افزایش دما از 700 درجه سانتی‌گراد، این فازها انحلال یافته و عناصر تشکیل‌دهنده این فازها به آستنیت نفوذ می‌کند. همچنین با توجه به شکل 2- ب، می‌توان مشاهده کرد که در یک محدوده دمایی خاص (تقریباً 710 درجه سانتی‌گراد)، مقدار کربن انحلال یافته در فاز آستنیت بیشینه است و این امر به علت انحلال فازهای کاربیدی می‌باشد؛ چراکه گزارش شده است فازهای کاربیدی به عنوان فازهای غنی از کربن، حین انحلال منجر به افزایش مقدار کربن فاز آستنیت در دمای انحلال می‌شوند و همین امر منجر به ایجاد یک مقدار بیشینه از درصد وزنی کربن در فاز آستنیت می‌شود [22] از این رو انتظار می‌رود تا دمای آنیل 710 درجه سانتی‌گراد، دمای بهینه‌ی آنیل باشد.

یکی از مکانیسم‌های بهبود خواص مکانیکی فولادهای منگنز متوسط، استحاله‌ی فاز آستنیت باقی‌مانده تحت کرنش به فاز مارتنزیت است که با عنوان فرآیند  $TRIP^2$  شناخته شده است [30]. از این رو بایستی فرآیند آنیل به گونه‌ای انجام شود که منجر به ایجاد فاز آستنیت باقی‌مانده بعد از آنیل گردد و فاز آستنیت باقی‌مانده حین تغییر شکل به فاز مارتنزیت تبدیل گردد و منجر به بهبود خواص مکانیکی فولاد شود. دو پارامتر زمان و دمای آنیل، بر پایداری فاز آستنیت تأثیرگذار است که در تحقیق حاضر هر دو پارامتر موردبررسی قرار گرفته است. ابتدا با انجام فرآیند آنیل در دماهای مختلف در مدت‌زمان 10 دقیقه، دمای بهینه‌ی آنیل مشخص شده و سپس در دمای بهینه‌ی آنیل،

<sup>1</sup> Lentz

<sup>2</sup> Transformation-Induced Plasticity (TRIP)

شکل 4 الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه‌ها را نشان می‌دهد. درصد فاز آستنیت محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار MAUD در سمت راست الگوهای پراش گزارش شده است. شکل 4-الف تأثیر دمای آنیل و شکل 4-ب نیز تأثیر زمان آنیل بر فازهای نهایی تشکیل شده در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. پیک‌های مربوط به فاز BCC (فريت) با فلش‌های مشکی و پیک‌های فاز FCC (آستنیت) نیز با فلش‌های آبی‌رنگ در شکل 4 نشان داده شده است.



**Fig. 4** X-ray diffraction pattern for annealed samples (a) Annealing at different temperatures and (b) Annealing at different times  
شکل 4 الگوی پراش پرتوی ایکس برای نمونه‌های آنیل شده. (الف) آنیل در دماهای مختلف و (ب) آنیل در زمان‌های مختلف

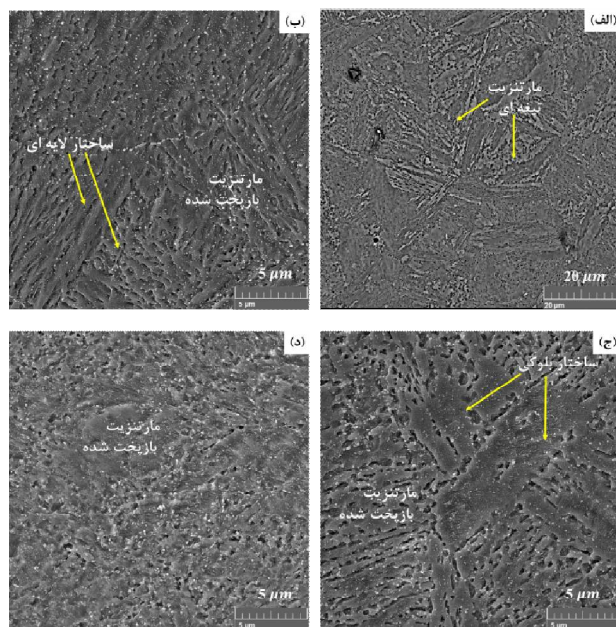
بر اساس شکل 4-الف که نشان‌دهنده الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه‌های آنیل شده به مدت 10 دقیقه در دماهای 680، 700 و 710 درجه سانتی‌گراد است، در هر سه نمونه، فازهای آهن BCC و FCC قابل‌شناسایی است و درصد فاز آستنیت با

استحکام کششی برای نمونه‌های 680-10، 700-10 و 710-10 به ترتیب 955، 1029 و 1020 مگا پاسکال و ازدیاد طول این نمونه‌ها نیز به ترتیب 17، 19 و 20/5 درصد به دست آمد. همچنین، مقادیر تنش تسلیم برای سه نمونه فوق‌الذکر به ترتیب برابر 681، 590 و 480 مگا پاسکال تعیین گردید، رفتار مشابهی برای استحکام و تنش تسلیم بعد از فرآیند آنیل برای فولاد Fe-5Mn-0.15C توسط لو و همکاران گزارش شده است [13].

با توجه به شکل 3-ب، برای نمونه‌های آنیل شده در دمای 710 درجه سانتی‌گراد، با افزایش زمان آنیل از 10 دقیقه به 20 دقیقه، استحکام کششی نهایی کاهش یافته است؛ به‌گونه‌ای که استحکام کششی نمونه‌ی 710-10 (1020 مگا پاسکال) با افزایش زمان آنیل به 20 دقیقه، در آلیاژ 710-20 با کاهش جزئی به 960 مگا پاسکال رسید. برای نمونه‌ی 710-30 که به مدت 30 دقیقه آنیل شده است، افزایش زمان آنیل منجر به افزایش استحکام کششی نسبت به هر دو نمونه‌ی 710-10 و 710-20 شده است؛ به‌گونه‌ای که برای نمونه‌ی 710-30، استحکام کششی در حدود 1210 مگا پاسکال می‌باشد. تأثیر زمان آنیل بر ازدیاد طول، معکوس استحکام کششی بوده است و افزایش زمان آنیل از 10 دقیقه به 20 دقیقه باعث افزایش ازدیاد طول شده و افزایش بیشتر زمان آنیل از 20 دقیقه به 30 دقیقه باعث کاهش ازدیاد طول شده است. ازدیاد طول نهایی برای نمونه‌های 710-10، 710-20 و 710-30 به ترتیب برابر 20/8، 22 و 15/5 درصد می‌باشد. (شایان‌ذکر است که بر اساس نتایج آزمون کشش، ازدیاد طول نمونه‌ها متناسب با تغییرات استحکام نمونه‌ها تغییر نموده است و نمونه با بالاترین استحکام، کمترین ازدیاد طول را دارد.) تأثیر زمان آنیل روی تنش تسلیم نیز همانند استحکام کششی نهایی است و با افزایش زمان آنیل، تنش تسلیم ابتدا به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد و با افزایش زمان آنیل از 20 به 30 دقیقه، تنش تسلیم افزایش می‌یابد. مقادیر تنش تسلیم برای نمونه‌های 710-10، 710-20 و 710-30 به ترتیب 480، 450 و 615 مگا پاسکال تعیین شد. برای فولادهای منگنز متوسط عاری از کروم و بور [31، 32]، ارتباط مستقیم بین درصد ازدیاد طول با زمان آنیل وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که زمان‌های آنیل چندین ساعت (عموماً یک ساعت و بعضاً تا 6 ساعت) منجر به حصول خواص مکانیکی مطلوب می‌گردد. وجود عناصر کروم و بور، با توجه به تغییر ماهیت فازهای کاربیدی، باعث تغییر این ارتباط شده و دلیل تفاوت مذکور در مکانیسم تشکیل فاز آستنیت است که به مطالعات بیشتری احتیاج دارد.

قابل ملاحظه‌ای داشته باشد [16]. برای نمونه‌های 10-680، 700-10، 710-10 و 20-710 با توجه به شناسایی فاز آستنیت در ساختار نهایی، می‌توان متوجه شد که فاز آستنیت ایجاد شده، توانسته است حین سرمایش بعد از فرآیند آنیل در ساختار باقی بماند و همین امر باعث شده تا این نمونه‌ها ازدیاد طول بهتری نسبت به نمونه‌ی 30-710 داشته باشند. نمونه‌ی 30-710 به علت عدم پایداری فاز آستنیت بعد از فرآیند آنیل، دارای ازدیاد طول کمتری نسبت به بقیه‌ی نمونه‌ها است و احتمالاً فاز غالب برای این نمونه، فاز مارتنزیت است.

برای بررسی‌های بیشتر، ریزساختار نمونه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. شکل 5 تصاویر SEM از ریزساختار نمونه‌ی نورد سرد شده و نمونه‌های آنیل شده در دماهای 680، 700 و 710 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه را نشان می‌دهد. ساختار نمونه‌ی نورد شده (شکل 5-الف)، ساختار مارتنزیت تیغه‌ای است و برای هر سه نمونه‌ی آنیل شده ساختار زمینه مشخص کننده‌ی فاز مارتنزیت بازپخت شده است و فازهای کاربیدی در ساختار مشاهده می‌شوند. انجام فرآیند آنیل به مدت زمان 10 دقیقه، منجر به انحلال کامل فازهای رسوبی نگردیده است ولی ساختار مارتنزیت اولیه، بعد از فرآیند آنیل بازپخت شده است.



**Fig. 5** Microstructure of (a) cooled rolling samples (b) annealed for 10 minutes at temperatures, (b) 680°C, (c) 700°C and (d) 710°C

شکل 5 ریزساختار نمونه‌های، (الف) نورد سرد شده و آنیل شده به مدت 10 دقیقه در دماهای، (ب) 680 درجه‌ی سانتی‌گراد، (ج) 700 درجه‌ی سانتی‌گراد و (د) 710 درجه‌ی سانتی‌گراد

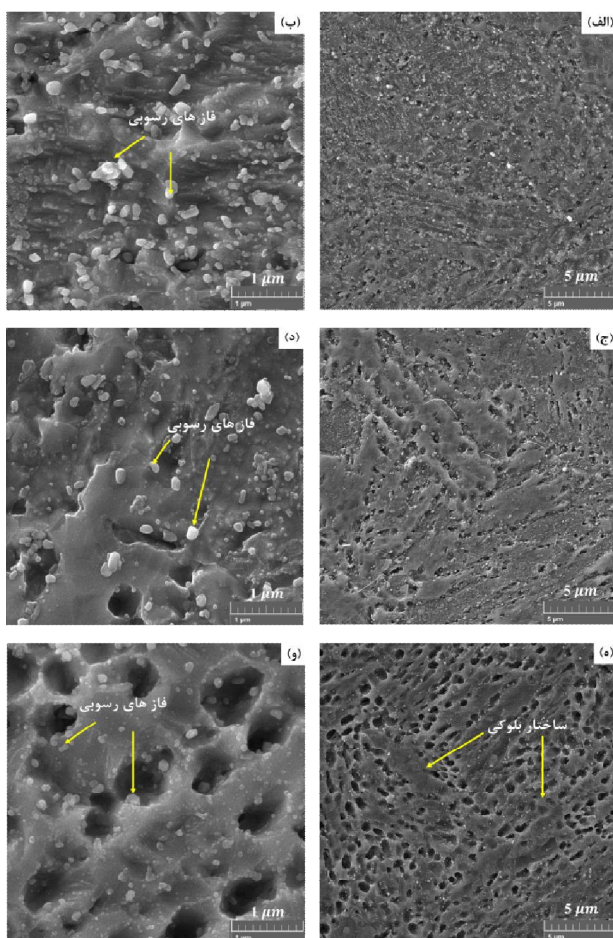
میزان بازپخت مارتنزیت برای نمونه‌های آنیل شده متفاوت

افزایش دمای آنیل از 680 درجه‌ی سانتی‌گراد به 710 درجه‌ی سانتی‌گراد، افزایش یافته است که برای نمونه‌های 10-680، 700-10 و 710-10 به ترتیب،  $3/5$ ،  $4/5$  و 6 درصد حجمی محاسبه گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دمای آنیل مقدار فاز آستنیت باقی‌مانده در ساختار نهایی آلیاژ افزایش می‌یابد و دلیل این امر بالا بودن درصد تعادلی فاز آستنیت در دماهای آنیل بالاتر است و با افزایش دما، درصد بیشتری از فاز آستنیت در ساختار نمونه‌ها ایجاد می‌شود و حین سرمایش مقدار بیشتری از فاز آستنیت در ساختار نهایی باقی می‌ماند. لازم به ذکر است با افزایش دمای آنیل از 680 به 710 درجه سانتی‌گراد، درصد تعادلی فاز آستنیت بر اساس شکل 2، از 50 درصد به 90 درصد افزایش می‌یابد و نتایج XRD با شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار JmatPro هم‌خوانی دارد. بیشترین مقدار آستنیت باقی‌مانده برای نمونه 10-710 است که در حدود 6 درصد می‌باشد. در دمای 710 با توجه به انحلال فازهای رسوبی، انتظار می‌رود که با انحلال فازهای رسوبی، کربن به فاز آستنیت نفوذ کرده و منجر به پایداری بیشتر آستنیت گردد و نتایج XRD این فرضیه را اثبات می‌کند.

تأثیر مدت‌زمان آنیل روی پایداری فازها، در شکل 4-ب نشان داده شده است. بر اساس شکل 4-ب، مشخص می‌شود که با افزایش زمان آنیل از 10 دقیقه در دمای 710 درجه سانتی‌گراد به 20 دقیقه، درصد فاز آستنیت از 6 درصد، به 8 درصد افزایش یافته و در آخر برای مدت‌زمان 30 دقیقه، فاز آستنیتی در ساختار شناسایی نشده است و نمونه‌ی 30-710 فاقد فاز آستنیت است.

محققان پی برده‌اند [16، 22] که با افزایش دمای آنیل، درصد فاز آستنیت باقی‌مانده افزایش می‌یابد ولی پس از یک دمای بحرانی که در آن فازهای کاربیدی شروع به انحلال می‌کنند، افزایش بیشتر دما و زمان آنیل، تأثیر معکوس داشته و با افزایش بیشتر دما و زمان آنیل، ساختار نهایی حاصل شده برای نمونه‌های آنیل شده، از ساختار دوفازی آستنیت و فریت به ساختار سه فازی آستنیت-فریت-مارتنزیت تبدیل می‌شود و منجر به کاهش خواص مکانیکی نمونه‌ها می‌گردد. دلیل این امر ایجاد درصد بالاتر فاز آستنیت بعد از انحلال کامل رسوب‌ها در ساختار است و از آنجاکه آستنیت تشکیل شده با توجه به کسر حجمی بالا، دارای مقادیر کربن کمتری است، ناپایدار بوده و حین سرمایش نمونه بعد از فرآیند آنیل، به فاز مارتنزیت استحاله می‌کند و منجر می‌شود تا ساختار نهایی عموماً فاقد فاز آستنیت باشد یا درصد آستنیت باقی‌مانده، کاهش

افزایش زمان آنیل، درصد آستنیت باقی‌مانده و ازدیاد طول افزایش‌یافته است. ساختار نهایی در هر دو زمان آنیل، شامل فاز مارتنزیت بازپخت شده، آستنیت باقی‌مانده و رسوبات کاربیدی انحلال نیافته بود و افزایش زمان آنیل منجر به افزایش درصد آستنیت باقی‌مانده شده و تیغه‌های مارتنزیت با افزایش زمان آنیل، ضخیم‌تر شده‌اند که مشخص‌کننده‌ی میزان بیشتر بازپخت فاز مارتنزیت با افزایش زمان آنیل است. برای این فولاد، فرآیند آنیل باعث حصول استحکام کششی نهایی 875 مگا پاسکال و ازدیاد طول نهایی 25 درصد گردید.



**Fig. 6** Microstructure of annealed samples at 710°C for, (a, b) 10 minutes, (c, d) 20 minutes, and (e, f) 30 minutes at magnifications of  $\times 10K$  (images on the right) and  $\times 50K$  (images on the left)

شکل 6 ریزساختار نمونه‌های آنیل شده در دمای 710 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت، (الف، ب) 10 دقیقه، (ج، د) 20 دقیقه و (ه، و) 30 دقیقه در بزرگنمایی‌های (تصاویر سمت راست) 10 و (تصاویر سمت چپ) 50 هزار برابر

بر اساس شکل 7، که مشخص‌کننده‌ی درصد فازهای رسوبی (شکل 7- الف) و متوسط اندازه‌ی فازهای رسوبی (شکل 7- ب) است، مشاهده می‌شود که افزایش مدت‌زمان آنیل در دمای 710

است، به‌گونه‌ای که برای نمونه‌ی 10-680، ساختار لایه‌ای، برای نمونه‌ی 10-700 ساختار بلوکی مشاهده می‌شود و برای نمونه‌ی 10-710 نیز کلاً ساختار اولیه تغییر کرده و ساختار یکپارچه‌ای ایجاد شده است و هیچ‌گونه ساختار لایه‌ای و بلوکی برای نمونه‌ی 10-710 مشاهده نمی‌گردد. افزایش دمای آنیل در مدت‌زمان یکسان آنیل (10 دقیقه) باعث افزایش میزان بازپخت فاز مارتنزیت شده است.

تصاویر SEM از ریزساختار نمونه‌های 20-710 و 30-710 به همراه ریزساختار نمونه‌ی 10-710 در شکل 6 نشان داده شده است. با توجه به شکل 2، مشخص شد که دمای 710 درجه سانتی‌گراد، دمای تعادلی انحلال رسوبات است و از لحاظ ترمودینامیکی، بایستی در این دما فازهای رسوبی انحلال یابند ولی چون زمان‌های آنیل بین بحرانی کمتر از نیم ساعت در نظر گرفته شده است، از این رو احتمال انحلال کامل رسوبات در دمای 710 درجه‌ی سانتی‌گراد پایین است. با توجه به شکل 6، در ریزساختار هر سه نمونه‌ی 10-710 (شکل‌های 6- الف و ب)، 20-710 (شکل‌های 6- ج و د) و 30-710 (شکل‌های 6- ه و و) فازهای رسوبی مشاهده می‌شود و ساختار هر سه نمونه در حین آنیل دچار بازپخت شده است ولی با افزایش زمان آنیل، میزان بازپخت ساختار افزایش داشته و برای نمونه‌ی 30-710 ساختار مارتنزیت اولیه به‌طور کامل تغییر یافته است. بر اساس شکل 6- ه در ساختار نمونه‌ی 30-710 قسمت‌هایی از ریزساختار به‌صورت ساختار بلوکی و عاری از فاز رسوبی مشاهده می‌شوند که در ساختار نمونه‌های 10-710 و 20-710 که به ترتیب در شکل‌های 6- الف و ج نشان داده شده‌اند، مشاهده نمی‌شود. با توجه به نتایج XRD که در شکل 4 گزارش شده است، مشخص شد که برای نمونه‌ی 30-710 فاز آستنیت شناسایی نگردید، در واقع برای این نمونه به نظر می‌رسد که فاز آستنیت در دمای آنیل ایجاد شده ولی حین سرمایش به فاز مارتنزیت تبدیل شده است و فاز مارتنزیت تشکیل شده، حین سرمایش به‌صورت ساختار بلوکی در شکل 6- ه قابل مشاهده است. برای نمونه‌ی 30-710، ساختار نهایی شامل فاز مارتنزیت بازپخت شده به همراه فاز مارتنزیت تازه تشکیل شده<sup>1</sup> و فازهای رسوبی انحلال نیافته است.

هو و همکاران [33] نیز ساختار مشابهی برای فولاد منگنز متوسط کم‌کربن با ترکیب Fe-0.1C-5Mn-0.4Mo مشاهده کردند. این محققان فرآیند آنیل بین بحرانی را در دمای 650 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 10 و 30 دقیقه انجام دادند و با

<sup>1</sup> Fresh martensite



ولی از نتایج XRD (شکل 4) مشخص شد که با افزایش دمای آنیل، درصد آستنیت باقی‌مانده افزایش می‌یابد و همین امر با توجه به اثر TRIP منجر به افزایش ازدیاد طول و استحکام کششی نهایی نمونه‌ها گردیده است. در بین نمونه‌های آنیل شده به مدت زمان 10 دقیقه، نمونه‌ی 710-20 که بیشترین دمای آنیل و بیشترین درصد آستنیت باقی‌مانده را داشته، دارای بهینه‌ترین خواص مکانیکی است.

برای تأثیر زمان آنیل نیز می‌توان متوجه شد که در زمان‌های آنیل 10 تا 20 دقیقه، افزایش زمان آنیل از 10 به 20 دقیقه صرفاً منجر به افزایش اندکی در ازدیاد طول و درصد آستنیت باقی‌مانده داشته ولی برای نمونه‌ی 710-30 ساختار کاملاً متفاوتی حاصل شده است، برای این نمونه اکثر فازهای رسوبی انحلال یافته و فاز آستنیت حین سرمایش به مارتنزیت تبدیل شده است و ایجاد فاز مارتنزیت باعث شده تا نمونه‌ی 710-30 در مقایسه با نمونه‌های 710-10 و 710-20 دارای تنش تسلیم و استحکام کششی بالاتر و ازدیاد طول کمتری باشد. با توجه به نمودار تنش-کرنش (شکل 3)، نمونه‌ی 710-20 بهینه‌ترین نمونه است و دما و زمان آنیل بهینه برای آلیاژ طراحی شده به ترتیب 710 درجه‌ی سانتی‌گراد و 20 دقیقه است.

با توجه به وجود عناصر کروم و بور در ترکیب شیمیایی فولاد مطالعه شده [25، 26]، ماهیت فازهای رسوبی در این فولاد تغییر کرده است و برخلاف فولادهای منگنز متوسط معمولی [23]، فازهای رسوبی که منبع عنصر کربن هستند، تا دماهای بالاتری پایدار هستند و همین امر منجر شده تا دما 710 درجه‌ی سانتی‌گراد که دمای پایداری 90 درصد فاز آستنیت است، فازهای رسوبی در ساختار حضور داشته باشند و امکان انتخاب دمای بالاتری برای فرآیند آنیل میسر شود [29] و انتخاب دمای بالاتر آنیل منجر شده است تا در مدت‌زمان‌های کمتر (10 و 20 دقیقه) خواص مدنظر فولادهای منگنز متوسط حاصل شود این در حالی است که بقیه‌ی فولادهای منگنز متوسط برای حصول خواص مکانیکی مطلوب، بایستی مدت‌زمان‌های بالاتری در دماهای آنیل پایین‌تر، نگهداری شوند [34] و خواص نهایی فولاد به علت رشد دانه و تشکیل فاز فریت کاهش می‌یابد.

#### 4- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تأثیر دما و زمان عملیات آنیل بین بحرانی بر خواص مکانیکی، ریزساختار و استحاله‌ی فازی فولاد منگنز

درجه‌ی سانتی‌گراد از 10 دقیقه تا 30 دقیقه، باعث کاهش درصد فازهای رسوبی و کاهش اندازه‌ی متوسط رسوبات در ساختار نمونه‌ها شده است.

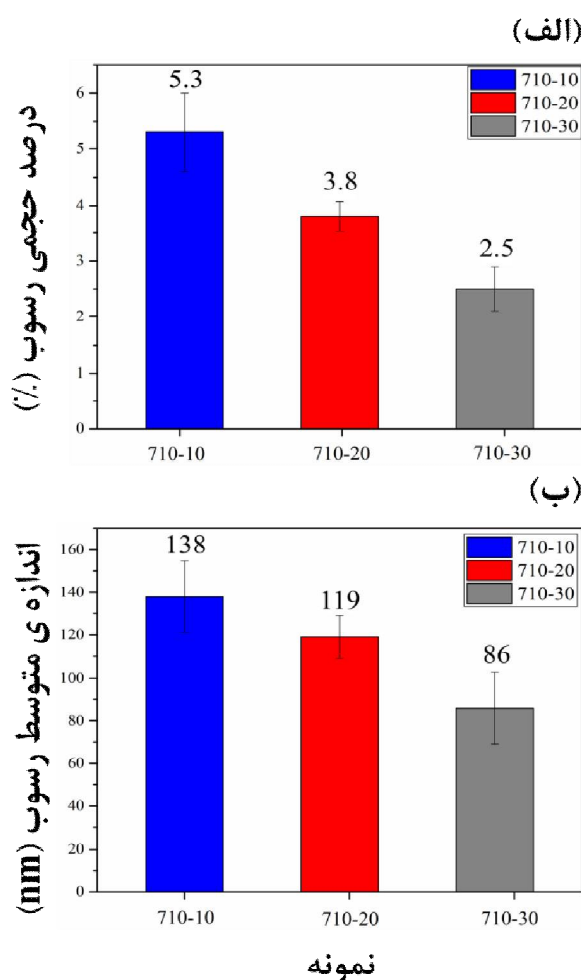


Fig. 7 Effect of annealing time at 710°C on (a) volumetric percentage of sedimentary phases and (b) the average size of sediments

شکل 7 تأثیر مدت‌زمان آنیل در دمای 710 درجه‌ی سانتی‌گراد روی (الف) درصد حجمی فازهای رسوبی و (ب) متوسط اندازه‌ی رسوب‌ها

افزایش زمان آنیل از 10 دقیقه به 30 دقیقه منجر به کاهش درصد فازهای رسوبی از 5/3 به 2/5 درصد حجمی شده است و اندازه‌ی متوسط رسوبات نیز از 138 نانومتر به 86 نانومتر تقلیل یافته است. رفتار مشابهی نیز در کاهش درصد فازهای رسوبی با افزایش دمای آنیل در مدت‌زمان آنیل 10 دقیقه مشاهده شده است [26].

با توجه به مطالب فوق مشخص گردید که با افزایش دمای آنیل از 680 به 700 و سپس به 710 درجه‌ی سانتی‌گراد، با افزایش دما، میزان بازپخت فاز مارتنزیت افزایش یافته و دلیل کاهش تنش تسلیم با افزایش دمای آنیل نیز همین امر می‌باشد که با نتایج کارهای پژوهشی دیگران همخوانی دارد [13، 26]؛

- Mn steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 798, p. 140147, 2020.
- [3] B. B. He, S. Pan, Revealing the intrinsic nanohardness of retained austenite grain in a medium Mn steel with heterogeneous structure, *Materials Characterization*, Vol. 171, p. 110745, 2021.
- [4] C. Wang, L. Yu, R. Ding, Y. Liu, H. Li, Z. Wang, C. Liu, H. Wang, Microstructure and mechanical properties of a novel medium Mn steel with Cr and Mo microalloying, *Materials Science and Engineering: A*, 825, p. 141926, 2021.
- [5] Y. H. Choi, J. H. Ryu, S. W. Lee, K. Lee, B. J. Lee, J.-K. Kim, J. S. Lee, D.-W. Suh, Influence of initial microstructures on intercritical annealing behaviour in a medium Mn steel, *Materials Science and Technology*, 35, 17, pp. 2092–2100, 2019.
- [6] Y. Yang, W. Mu, B. Sun, H. Jiang, Z. Mi, New insights to understand the strain-state-dependent austenite stability in a medium Mn steel: An experimental and theoretical investigation, *Materials Science and Engineering: A*, 809, p. 140993, 2021.
- [7] Y. Bai, Y. Momotani, M. C. Chen, A. Shibata, N. Tsuji, Effect of grain refinement on hydrogen embrittlement behaviors of high-Mn TWIP steel, *Materials Science and Engineering: A*, 651, pp. 935–944, 2016.
- [8] H. Aydin, E. Essadiqi, I. H. Jung, S. Yue, Development of 3rd generation AHSS with medium Mn content alloying compositions, *Materials Science and Engineering A*, 564, pp. 501–508, 2013.
- [9] M. Askari-Paykani, H. R. Shahverdi, R. Miresmaeili, First and third generations of advanced high-strength steels in a FeCrNiBSi system, *Journal of Materials Processing Technology*, 238, pp. 383–394, 2016.
- [10] D. K. Matlock, J. G. Speer, Third generation of AHSS: microstructure design concepts, in *Microstructure and texture in steels*, Springer, 2009, pp. 185–205.
- [11] Y. Lee, J. Han, Current opinion in medium manganese steel, 31, 7, pp. 843–856, 2015.
- [12] B. Hu, H. Luo, F. Yang, H. Dong, Recent progress in medium-Mn steels made with new designing strategies, a review, *Journal of Materials Science and Technology*, 33, 12, pp. 1457–1464, 2017.
- [13] H. Luo, H. Dong, New ultrahigh-strength Mn-alloyed TRIP steels with improved formability manufactured by intercritical annealing, *Materials Science and Engineering: A*, 626, pp. 207–212, 2015.
- [14] J. Zhao, Z. Jiang, Thermomechanical processing of advanced high strength steels, *Progress in Materials Science*, 94, pp. 174–242, 2018.
- [15] S. J. Lee, S. Lee, B. C. De Cooman, Mn partitioning during the intercritical annealing of ultrafine-grained 6% Mn transformation-induced plasticity steel, *Scripta Materialia*, 64, 7, pp. 649–652, 2011.
- [16] S. Lee, B. C. De Cooman, On the selection of the optimal intercritical annealing temperature for medium Mn TRIP steel, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials*
- متوسط Fe-0.1C-5Mn-1Si-2.5Cr-0.1B مورد بررسی قرار گرفت. دماهای 680، 700 و 710 به‌عنوان پارامتر دما و مدت‌زمان‌های 10، 20 و 30 دقیقه به‌عنوان پارامتر زمان بررسی شد و نتایج زیر حاصل گشت.
- ساختار حاصله از نورد، ساختار مارتنزیتی به همراه فازهای کاربو-بورایدی بود و هیچ فاز آستنیت در نمونه‌ی نورد شده شناسایی نگردید.
- انجام فرآیند آنیل بین بحرانی در همه‌ی شرایط، منجر به افزایش ازدیاد طول، کاهش استحکام کششی و تنش تسلیم در مقایسه با نمونه‌ی نوردی شد.
- انجام فرآیند آنیل باعث بازپخت ساختار مارتنزیتی اولیه شد و فاز آستنیت به‌جز نمونه‌ی 30-710، در همه‌ی نمونه‌ها بعد از سرمایش، در ساختار نهایی مشاهده شد.
- افزایش دمای آنیل از 680 تا 710 درجه‌ی سانتی‌گراد، باعث افزایش ازدیاد طول گردید ولی تنش تسلیم کاهش یافت. دلیل این امر بازپخت بیشتر ساختار با افزایش دما بود و با افزایش دمای آنیل، درصد بیشتری از فاز آستنیت در ساختار پایدار گردید به‌گونه‌ای که مقادیر فاز آستنیت باقی‌مانده برای نمونه‌های 10-680 و 10-710 به ترتیب 3/5 و 6 درصد محاسبه گردید. وجود فاز آستنیت توسط استحاله‌ی TRIP باعث بهبود خواص مکانیکی شده است.
- افزایش زمان آنیل در دمای 710 درجه‌ی سانتی‌گراد از 10 به 20 دقیقه منجر به تغییر محسوس در خواص مکانیکی نشد و صرفاً ازدیاد طول افزایش نسبی داشت ولی افزایش زمان آنیل از 20 دقیقه به 30 دقیقه، تأثیرات قابل‌ملاحظه‌ای داشت به‌گونه‌ای که ازدیاد طول کاهش محسوسی داشته و فاز آستنیت برای نمونه‌ی 30-710 شناسایی نگردید دلیل این امر عدم پایداری کافی فاز آستنیت تشکیل‌شده در مدت‌زمان 3 دقیقه بود.
- در بین نمونه‌های آنیل شده، نمونه‌ی 20-710 دارای بهینه‌ترین خواص مکانیکی بوده و با توجه به ترکیب مناسب ازدیاد طول (22 درصد)، استحکام کششی نهایی (960 مگا پاسکال) و درصد آستنیت 8 درصد بهینه‌ترین شرایط آنیل را دارا می‌باشد.

## 6- مراجع

- [1] M. Y. Demeri, *Advanced high-strength steels: science, technology, and applications*, First Edition, pp. 65–85, Ohio: ASM international, 2013.
- [2] T. P. Zhou, C. Y. Wang, C. Wang, W. Q. Cao, Z. J. Chen, Austenite stability and deformation-induced transformation mechanism in cold-rolled medium-

- advanced high-strength steel, *Iranian Journal of Manufacturing Engin.*
- [26] M. Zabihi-Gargari, H. R. Shahverdi, M. Emami, M. Askari-Paykani, Enhancing mechanical properties of medium Mn advanced high-strength steel by inter-critical annealing: elimination of austenizing and quenching steps, *Ironmaking & Steelmaking*, 47, 10, pp. 1–13, 2019.
- [27] K. Kumar, A. Pooleery, K. Madhusoodanan, R. N. Singh, J. K. Chakravartty, B. K. Dutta, R. K. Sinha, Use of miniature tensile specimen for measurement of mechanical properties, *Procedia Engineering*, 86, pp. 899–909, 2014.
- [28] R. A. Young, *The rietveld method*, 5. International union of crystallography, 1993
- [29] M. S. J. Lentz, A. Röttger, P. W. Theisen, Alloy Design in the System Fe-C-B, *Proceedings of the 3rd International Conference on Stone and Concrete Machining (ICSCM)*, 49, 0, pp. 337–348, 2015.
- [30] M. Mukherjee, T. Bhattacharyya, S. B. Singh, Models for Austenite to Martensite Transformation in TRIP-Aided Steels: A Comparative Study, *Materials and Manufacturing Processes*, 25, 1–3, pp. 206–210, 2010.
- [31] W. Q. Cao, C. Wang, J. Shi, M. Q. Wang, W. J. Hui, H. Dong, Microstructure and mechanical properties of Fe-0.2C-5Mn steel processed by ART-annealing, *Materials Science and Engineering A*, 528, 22–23, pp. 6661–6666, 2011.
- [32] B. Hu, H. Luo, F. Yang, H. Dong, Recent progress in medium-Mn steels made with new designing strategies, a review, *Journal of Materials Science & Technology*, 33, 12, pp. 1457–1464, 2017.
- [33] J. Hu, L. X. Du, H. Liu, G. S. Sun, H. Xie, H. L. Yi, R. D. K. Misra, Structure-mechanical property relationship in a low-C medium-Mn ultrahigh strength heavy plate steel with austenite-martensite submicro-laminate structure, *Materials Science and Engineering A*, 647, pp. 144–151, 2015.
- [34] S. Ying, H. Dong, The third generation auto sheet steel: Theory and practice, in *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*, 2013, pp. 933–947.
- Science*, 44, 11, pp. 5018–5024, 2013.
- [17] S. Sadeghpour, M. C. Somani, J. Kömi, L. P. Karjalainen, A new combinatorial processing route to achieve an ultrafine-grained, multiphase microstructure in a medium Mn steel, *Journal of Materials Research and Technology*, 2021.
- [18] Z. Xu, X. Shen, T. Allam, W. Song, W. Bleck, Austenite transformation and deformation behavior of a cold-rolled medium-Mn steel under different annealing temperatures, *Materials Science and Engineering: A*, p. 142115, 2021.
- [19] A. Arlazarov, M. Gouné, O. Bouaziz, A. Hazotte, F. Kegel, Effect of Intercritical Annealing Time on Microstructure and Mechanical Behavior of Advanced Medium Mn Steels, *Materials Science Forum*, 706–709, pp. 2693–2698, 2012.
- [20] C. Wang, H. Ding, J. Zhang, H. Wu, Effect of Intercritical Annealing Time on the Microstructures and Tensile Properties of a High Strength TRIP Steel, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27, 3, pp. 457–463, 2014.
- [21] B. K. Sahoo, V. C. Srivastava, A. K. Chandan, H. S. Chhabra, S. G. Chowdhury, Evolution of microstructure and deformation behavior in Al-Ni added medium-Mn steel processed through intercritical/cold rolling and annealing, *Materials Science and Engineering: A*, 824, p. 141852, 2021.
- [22] C. Zhao, W. Q. Cao, C. Zhang, Z. G. Yang, H. Dong, Y. Q. Weng, Effect of annealing temperature and time on microstructure evolution of 0.2C-5Mn steel during intercritical annealing process, *Materials Science and Technology*, 30, 7, pp. 791–799, 2014.
- [23] E. De Moor, D. K. Matlock, J. G. Speer, M. J. Merwin, Austenite stabilization through manganese enrichment, *Scripta Materialia*, 64, 2, pp. 185–188, 2011.
- [24] H. Luo, J. Liu, H. Dong, A novel observation on cementite formed during intercritical annealing of medium Mn steel, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47, 6, pp. 3119–3124, 2016.
- [25] Mohammad Zabihi Gargari, Hamid Reza Shahverdi, Mohammad Emami, Mohsen Askari Peykani, The effects of Cr addition on the phase transformation, microstructure, and mechanical properties of