



تأثیر افزودن عنصر کروم روی استحاله‌ی فازی، ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد پیشرفته استحکام بالا

محمد ذبیحی گرگری¹، حمیدرضا شاهوردی^{2*}، محمد امامی³، محسن عسکری پیکانی⁴

1- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مواد شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه بناب، بناب

4- فارغ‌التحصیل دکترا، مهندسی مواد شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 1 فروردین 1399

داوری اولیه 6 اردیبهشت 1399

پذیرش: 1 خرداد 1399

کلیدواژگان:

عنصر کروم

فولاد پیشرفته استحکام بالا

فرایند آستنیتیزه کردن و سرمایش

سریع

سرمایش در هوا، آنیل بین دماهای

بحرانی

در تحقیق حاضر اثر افزودن 2/5 درصد وزنی عنصر کروم روی استحاله‌ی فازی، ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد منگنز متوسط پیشرفته استحکام بالا با 4/5 درصد وزنی منگنز بررسی شده است. افزودن عنصر کروم، باعث افزایش سختی‌پذیری گردید و همین امر باعث شد تا بعد از فرایند نورد داغ و سرمایش ورق نورد شده در هوا، بدون انجام فرایند آستنیتیزه کردن و سرمایش سریع که جزئی از فرایند تولید ورق‌های فولادهای منگنز متوسط است ساختار تماماً مارتنزیتی تشکیل شده و این مرحله از فرایند تولید فولاد منگنز متوسط پیشرفته استحکام بالا حذف شود. همچنین وجود عنصر کروم با تغییر ماهیت فازهای کاربیدی و تشکیل فازهای کاربیدی با دمای پایداری بالاتر، انتخاب دمای بالاتر آنیل را امکان‌پذیر ساخت. بررسی‌های ریزساختاری، فازی و سختی سنجی، تشکیل فاز مارتنزیت با سختی 461 ویکرز بعد از فرایند نورد داغ را تأیید کردند. انجام فرایند آنیل بین دماهای بحرانی در دمای 700 درجه سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه باعث برگشت فاز آستنیت به ساختار شد و خواص مکانیکی مطلوب نظیر استحکام کششی نهایی 940 مگا پاسکال و ازدیاد طول نهایی 17 درصد حاصل گردید. وجود فاز آستنیت باقی‌مانده و کاهش قابل‌ملاحظه‌ی سختی و افزایش ازدیاد طول بعد از آنیل، انجام فرایند آنیل بین دماهای بحرانی را تأیید کرد.

The effects of Cr addition on the phase transformation, microstructure, and mechanical properties of advanced high-strength steel

Mohammad Zabihi Gargari¹, Hamid Reza Shahverdi^{2*}, Mohammad Emami², Mohsen Askari Peykani¹

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

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

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

Article Information

Original Research Paper
Received: 20 March 2020
First Decision: 25 April 2020
Accepted: 21 May 2020

Keywords:

Chromium
Advanced High-strength Steel
Austenitization and quenching process
Air Cooling, Intercritical annealing

Abstract

In the present study, the effects of adding 2.5 wt.% of chromium on the phase transformation, microstructure, and mechanical properties of a medium Mn advanced high-strength steel containing 4.5 wt.% of manganese were investigated. The addition of chromium increased the hardenability and a fully martensitic structure formed after the hot-rolling process and air-cooling of the rolled sheet. Consequently, austenitization and rapid cooling which are part of the production route of medium-manganese steel sheets were eliminated. Also, because of the formation of carbides stable at higher temperatures, the addition of chromium made it possible to choose higher annealing temperatures. The investigation of the microstructure, phases, and hardness confirmed the formation of martensite with a hardness of 461 HV after hot rolling process. Performing intercritical annealing at 700°C for 10 min caused the austenite reversion and produced satisfactory mechanical properties, including an ultimate tensile strength of 940 MPa and an elongation of 17%. The reverse austenite phase, the considerable reduction in the hardness, and the enhancement of elongation after annealing verified the intercritical annealing process.

1- مقدمه

فولادهای با استحکام بالا و شکل‌پذیری مناسب، بیش‌تر از پیش احساس می‌شود و با توسعه‌ی فولادهای پیشرفته استحکام بالا که دارای استحکام کششی بالای 750 مگا پاسکال هستند به

با افزایش استانداردهای ایمنی خودروها، نیاز به کاهش مصرف سوخت و کاهش آلایندگی‌های زیست‌محیطی، نیاز به توسعه‌ی

Please cite this article using:

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 advanced high-strength steel, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 8, pp. 45- 53, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مراحل تولید فولادهای منگنز متوسط، باعث کاهش تعداد مراحل و کاهش انرژی مصرفی در طول فرایند تولید شده‌اند که این امر با حذف فرایند آستنیت‌زدن و سرمایش سریع از فرایند تولید فولادهای منگنز متوسط انجام گرفته است.

برای ایجاد خواص مکانیکی مطلوب برای فولادهای منگنز متوسط، عملیات حرارتی در محدوده‌ی دوفازی آستنیت و فریت انجام می‌شود که با عنوان آنیل بین دماهای بحرانی¹ شناخته می‌شود. در دمای عملیات حرارتی بهینه، فاز آستنیت دارای بیشترین درصد کربن است و انتخاب دمای عملیات حرارتی در این محدوده باعث پایداری فاز آستنیت می‌شود که منجر به بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای منگنز متوسط می‌گردد [14-19]. برای فولاد منگنز متوسط با ترکیب معمول Fe-5Mn-1C (درصد وزنی) محدوده‌ی دمای عملیات حرارتی بهینه در محدوده‌ی دمایی 600-650 درجه‌ی سانتی‌گراد است. در این دما فازهای کاربیدی که منبع ذخیره‌ی کربن هستند، انحلال یافته و باعث ایجاد فاز آستنیت با بالاترین درصد کربن می‌شوند [20]. با توجه به ماهیت نفوذی انحلال رسوبات و نفوذ کربن به ساختار فاز آستنیت، زمان‌های بالا ($> 30\text{min}$) برای نفوذ عنصر کربن و پایداری فاز آستنیت نیاز است که بالا بودن زمان عملیات حرارتی باعث کاهش چگالی نابجایی‌ها، کاهش میزان عناصر محلول در فاز مارتنزیت اولیه و افزایش اندازه‌ی دانه‌ی فازهای فریت و آستنیت می‌شود و همین امر باعث کاهش استحکام آلیاژهای منگنز متوسط بعد از فرایند آنیل بین دماهای بحرانی می‌گردد [21، 22]. در تحقیقی که توسط Hu و همکاران [12] انجام گرفته است، فرایند آنیل بین دماهای بحرانی در مدت‌زمان 10 دقیقه انجام شده و با ایجاد ساختار لایه‌ای آستنیت-مارتنزیت، ترکیب مناسبی از استحکام و ازدیاد طول حاصل گردیده است.

بر اساس مطالب فوق، کاهش تعداد مراحل تولید فولاد و مدت‌زمان آنیل منجر به صرفه‌جویی در مصرف سوخت شده و خواص مطلوب‌تری حاصل می‌شود. با توجه به تأثیر افزودن عنصر کروم روی رفتار سرمایشی فولادها و تغییر ترمودینامیک رسوبات کاربیدی، از این‌رو در تحقیق حاضر مقدار 2/5 درصد وزنی عنصر کروم به ترکیب معمول فولادهای منگنز متوسط افزوده شد تا با افزایش سختی‌پذیری و ایجاد رسوبات کاربیدی با پایداری دمایی بالاتر، فرایند آستنیت‌زدن و سرمایش سریع از فرایند تولید فولادهای منگنز متوسط حذف شده و امکان انجام فرایند آنیل در دماهای بالاتر با توجه به پایداری بیشتر رسوبات کاربیدی

نیاز صنایع خودروسازی پاسخ داده شده است [1، 2]. صنایع خودروسازی به دنبال کاهش هزینه‌های مواد مصرفی و کاهش وزن خودرو می‌باشند. استفاده از فولادهای پیشرفته‌ی استحکام بالا با کاهش ضخامت قطعات مورد استفاده در بدنه‌ی خودرو، باعث کاهش وزن کل سازه‌ی خودرو می‌شوند و مصرف سوخت کاهش می‌یابد و با افزایش استحکام مواد مصرفی، ایمنی سرنشین افزایش می‌یابد [1]. اخیراً فولادهای منگنز متوسط به‌عنوان نسل جدیدی از فولادهای استحکام بالای پیشرفته مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند [3]. درصد منگنز این فولادها در محدوده‌ی 3-10 درصد وزنی است. فرایند معمول برای تولید فولادهای منگنز متوسط، شامل فرایند همگن‌سازی و نورد داغ و (یا) نورد سرد است و چون فرایند آنیل بین دماهای بحرانی (عملیات حرارتی هم‌دما در مناطق پایداری فازهای آستنیت و فریت) به‌عنوان عملیات حرارتی بهینه برای این فولادها مورد استفاده قرار می‌گیرد، ایجاد ساختار مارتنزیتی قبل از فرایند آنیل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [4] از این‌رو برای ایجاد ساختار کاملاً مارتنزیتی، فرایند آستنیت‌زدن و سرمایش سریع قبل از فرایند آنیل انجام می‌گیرد [2]. فاز آستنیت بعد از فرایند آنیل بین دماهای بحرانی در ساختار باقی می‌ماند و با اعمال تنش، فاز آستنیت به فاز مارتنزیت تبدیل می‌شود و منجر به بهبود خواص مکانیکی فولادهای منگنز متوسط می‌گردد [5].

مطالعاتی در رابطه با تولید صنعتی فولادهای منگنز متوسط و کاهش تعداد فرایندهای تولید این فولادها در چند سال اخیر انجام گرفته است [4، 6، 7]. Lou و همکاران [4]، اثر فرایند آنیل بین دماهای بحرانی به مدت‌زمان 10 دقیقه را روی فولاد منگنز متوسط با ترکیب (x= 0/2، 0/1) Fe-5Mn-xC مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که وجود ساختار مارتنزیتی قبل از فرایند آنیل بین دماهای بحرانی حتی در مدت‌زمان آنیل 10 دقیقه نیز منجر به ایجاد خواص مکانیکی مطلوب نظیر استحکام کششی 1000 MPa و ازدیاد طول 20 درصد می‌شود.

با توجه به این نکته که هدف اصلی توسعه‌ی فولادهای استحکام بالا برای مصارف صنایع خودروسازی، کاهش وزن خودرو و به تبع آن کاهش مصرف انرژی و انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای است [8-11] از این‌رو کاهش مصرف انرژی در طول فرایند تولید این فولادها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است ولی تحقیقات کمی در رابطه با کاهش مصرف انرژی در فرایند تولید فولادهای پیشرفته‌ی استحکام بالا انجام گرفته است. در این راستا می‌توان به کارهای تحقیقاتی Hu و همکاران [12] و همچنین Liu و همکاران [13] اشاره کرد که با کاهش تعداد

¹- Inter-critical Annealing (IA)

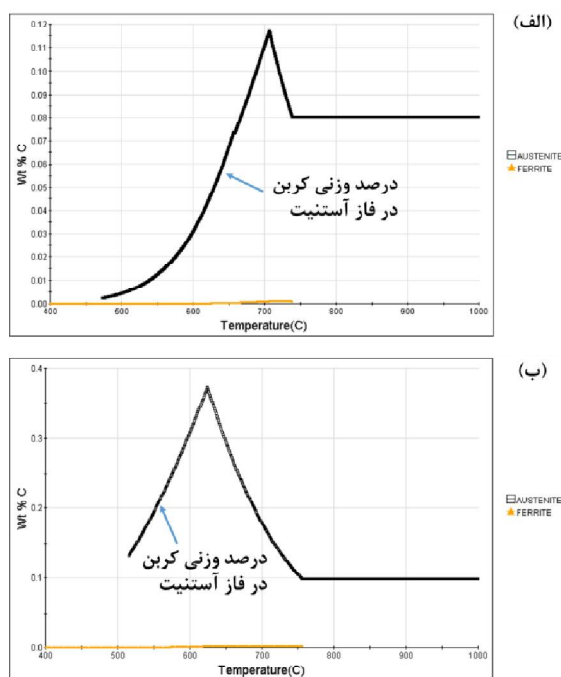


Fig. 2 Carbon equilibrium percentage (wt. %) versus annealing temperature for a) the proposed alloy, and b) Ref [1] alloy.

شکل 2 درصد تعادلی عنصر کربن (درصد وزنی) برحسب دمای آنیل برای، (الف) آلیاژ طراحی شده و (ب) آلیاژ مرجع [1].

2-2- تهیه‌ی شمش آلیاژ و فرایند نورد

برای تهیه‌ی شمش آلیاژ از عناصر فلزی با خلوص 99/99 درصد و کوره‌ی القایی استفاده شد. عملیات ذوب تحت خلأ انجام گردید. خلأ محفظه در ابتدا توسط دو پمپ روتاری و نفوذی به 10^{-4} میلی بار کاهش یافت و گاز آرگون با خلوص 99/999 به محفظه اعمال گردید. پس از آلیاژ شدن مخلوط، به منظور سرباره شدن آخال و ناخالصی‌های احتمالی و همچنین عدم محبوس شدن گاز آرگون، توان القایی حذف و محفظه تحت خلأ قرار گرفت. بعد از حذف آلودگی‌های سطحی از سطح شمش آلیاژ، نمونه‌ی تهیه‌شده ذوب‌شده و ریخته‌گری نهایی در داخل قالب مسی آبگرد به ابعاد $15 \times 30 \times 50$ میلی‌متر مکعب انجام گردید.

2-3- فرایند نورد و آنیل بین دماهای بحرانی

پس از ریخته‌گری نمونه، برای همگن شدن ساختار و از بین رفتن جدایش احتمالی عناصر آلیاژی در حین انجماد، عملیات حرارتی همگن‌سازی در دمای 1050 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت انجام شد و نمونه‌ها در کوره سرد شدند و برای انجام فرایند نورد، سطح شمش‌ها از اکسید و ناخالصی‌های سطحی پاک‌سازی گردید. فرایند نورد داغ در دمای 1050 درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد و در 8 مرحله نورد، ضخامت

امکان‌پذیر گردد تا منجر به حذف یک مرحله از فرایند تولیدشده و با کاهش زمان آنیل، خواص مکانیکی مطلوبی حاصل گردد.

2- مواد و روش تحقیق

2-1- طراحی آلیاژ

ترکیب شیمیایی آلیاژ طراحی شده در جدول 1 گزارش شده است. درصد منگنز این آلیاژ در حدود 4/5 درصد انتخاب شده است (در محدوده‌ی ترکیبی فولادهای منگنز متوسط). عناصر کربن و سیلیسیم نیز به ترتیب در حدود 0/08 و 1 درصد افزوده شدند. برای ایجاد خواص موردنظر در آلیاژ طراحی شده (افزایش سختی‌پذیری و ایجاد رسوبات کاربیدی با دمای پایداری بالا)، مقدار 2/5 درصد وزنی عنصر کروم نیز به ترکیب آلیاژ اضافه گردید.

شکل 1 نمودارهای فازی آلیاژ طراحی شده در تحقیق حاضر و آلیاژ مرجع (بر اساس مرجع [1]) را نشان می‌دهد. نمودارهای فازی توسط نرم‌افزار JMatPro رسم شده است. همچنین در شکل 2 دماهای انحلال رسوبات کاربیدی و میزان درصد کربن فاز آستنیت نیز برای این دو آلیاژ رسم شده است.

Table 1 Chemical composition of investigated alloy in this study.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد مطالعه در تحقیق حاضر.

Ellement	C	Mn	Si	Cr	Fe
Wt%	0/08	4/5	1	2/5	Bal.

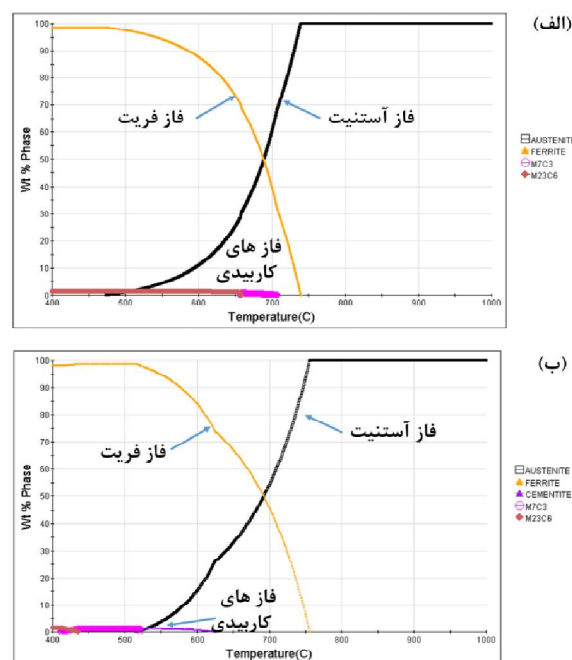


Fig. 1 The equilibrium diagram and phase percentage, a) the proposed alloy, and b) the alloy proposed in [1].

شکل 1 نمودار تعادلی و درصد فازی، (الف) برای آلیاژ طراحی شده در این تحقیق و (ب) آلیاژ مرجع [1].

روی دیاگرام Schaeffler¹ نشان می‌دهد، همان‌طور که از شکل 3 مشخص می‌شود، ساختار نهایی آلیاژ مرجع (آلیاژ بدون کروم)، ساختار دوفازی فریت-مارتنزیت است درحالی‌که برای آلیاژ تحقیق حاضر (آلیاژ دارای 2/5 درصد کروم) ساختار نهایی، ساختار تک فاز مارتنزیت است.

همچنین در شکل 4، نمودارهای سرمایش پیوسته برای هر دو آلیاژ نشان داده شده است. میزان سرعت سرمایش در هوا به صورت خط-نقطه در شکل‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل 4 مشخص می‌شود، برای آلیاژ مرجع [1] (شکل 4- الف) حین فرایند سرمایش، فاز فریت تشکیل می‌شود که بر اساس دیاگرام شافلر نیز این فرایند پیش‌بینی شده بود (شکل 3) و برای این آلیاژ ساختار نهایی شامل فازهای فریت و مارتنزیت خواهد بود. برای آلیاژ تحقیق حاضر، با توجه به افزودن عنصر کروم و اثر کروم روی سختی‌پذیری [23، 24]، حین فرایند سرمایش، ساختار تماماً مارتنزیتی ایجاد می‌شود که برای این آلیاژ نیز بر اساس دیاگرام شافلر این ساختار پیش‌بینی شده بود (شکل 3).

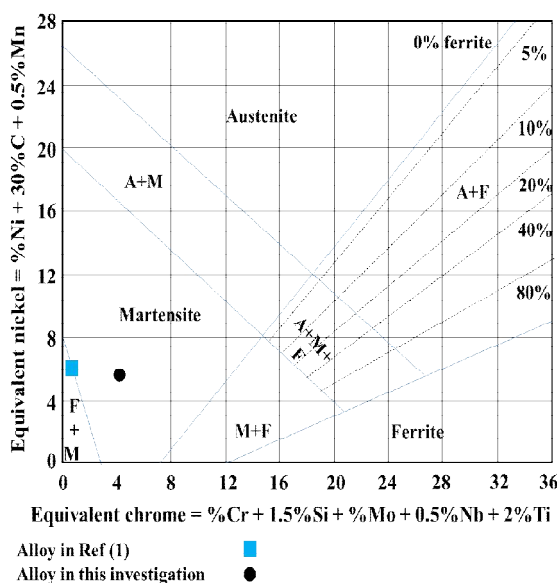


Fig. 3 The positions of the proposed alloy and reference alloy [1] in the shuffler diagram versus chromium and nickel contents.

شکل 3 موقعیت‌های آلیاژ تحقیق حاضر و آلیاژ مرجع [1] در دیاگرام شافلر بر اساس میزان کروم و نیکل معادل.

همان‌طور که مشخص شده است، وجود ساختار مارتنزیتی برای انجام فرایند آنیل الزامی است [4]، ازاین‌رو برای انجام فرایند آنیل بین دماهای بحرانی فولادهای منگنز متوسط، یک

نمونه‌ها از 15 به 1 میلی‌متر کاهش یافت. فرایند آنیل بین دماهای بحرانی در دمای 700 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه توسط کوره‌ی مقاوم‌تی انجام شد.

2-4- بررسی‌های خواص مکانیکی

مشخصه یابی خواص مکانیکی نمونه‌ها نظیر تنش تسلیم، استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول، توسط آزمون کشش تک‌محوره به‌وسیله‌ی دستگاه INSTRON-5500R و با نرخ کرنش 5×10^{-3} در دمای محیط انجام شد. سختی سنجی به روش ویکرز توسط دستگاه سختی سنجی INSTRON WOLPERT با اعمال نیروی 30 کیلوگرم و مدت‌زمان 30 ثانیه انجام گردید.

2-5- بررسی‌های ریزساختاری

برای بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی QUANTA مدل FEI در حالت الکترون برگشتی استفاده شد. همچنین برای آنالیز شیمیایی رسوبات نیز از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوی ایکس (EDS) استفاده گردید. نمونه‌ها بعد از پولیش سطحی توسط محلول نایتال 3 درصد حکاکی شده و سپس توسط الکل و آب مقطر شست‌وشو گردیدند.

مشخصه یابی فازی برای تعیین ماهیت فازهای تشکیل‌دهنده‌ی نمونه‌ها توسط پراش پرتوی ایکس انجام گردید. الگو توسط دستگاه Philips مدل PW3040/60 با استفاده از پرتوی Cu-K α با طول‌موج $\lambda=1.5406$ nm به دست آمد. پراش هر نمونه در گستره‌ی 2 θ 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.

3- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا تأثیر افزودن عنصر کروم روی رفتار سرمایشی و فازی فولاد طراحی‌شده توسط نتایج نرم‌افزار JmatPro بررسی می‌شود و با بررسی‌های ریزساختاری و فازی، نتایج نرم‌افزار اعتبار سنجی می‌گردد همچنین با بررسی‌های مکانیکی نظیر سختی و استحکام کششی نهایی، تأثیر فرایند آنیل روی خواص فولاد مطالعه می‌شود.

3-1- طراحی آلیاژ

شکل 3 موقعیت مکانی آلیاژ طراحی‌شده و آلیاژ مرجع [1] را

¹ - از دیاگرام Schaeffler برای پیش‌بینی ساختار ایجادشده از جوش فولادهای حاوی Ni-Cr استفاده می‌شود.

منگنز متوسط علاوه برافزایش دما و کاهش زمان آنیل، باعث حذف فرایند آستنیت‌زدایی و سرمایش سریع شده و این مرحله را از فرایند تولید فولادهای منگنز متوسط حذف کرده است و باعث کاهش تعداد مراحل عملیات حرارتی این فولاد و صرفه‌جویی در مصرف انرژی در فرایند تولید شده است.

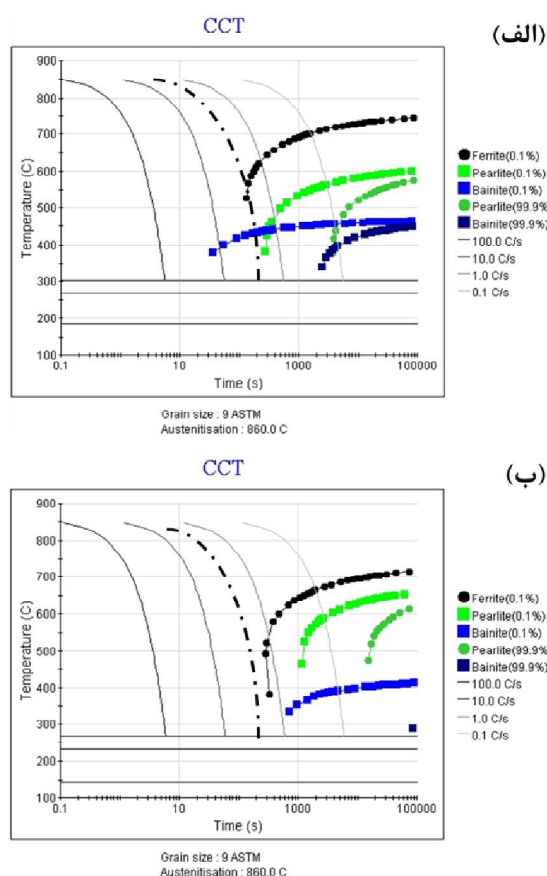


Fig. 4 Continuous cooling diagrams for a) reference alloy, and b) the proposed alloy.

شکل 4 نمودارهای سرمایش پیوسته برای الف) آلیاژ مرجع و ب) آلیاژ طراحی‌شده در تحقیق حاضر.

3-2- بررسی‌های ریزساختاری

شکل 5 ریزساختار آلیاژ طراحی‌شده را بعد از فرایند نورد داغ و آنیل در دمای 700 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه نشان می‌دهد. شکل‌های 5-الف و 5-ب ریزساختار آلیاژ در حالت نورد داغ و شکل‌های 5-ج و 5-د نیز ساختار آلیاژ بعد از فرایند آنیل را نشان می‌دهد. برای نمونه‌ی نورد داغ شده (شکل‌های 5-الف و 5-ب) فاز مارتنزیت به‌عنوان فاز زمینه قابل‌مشاهده است با دقت در ریزساختار نمونه‌ها، می‌توان مناطق مربوط به فاز مارتنزیت با جهت‌گیری‌های مختلف را مشاهده کرد و ساختار تیغه‌ای در نمونه‌ها قابل‌مشاهده است که می‌توان موارد ذکرشده را به‌عنوان دلایل مورد قبول برای ایجاد ساختار مارتنزیتی در

فرایند آستنیت‌زدایی و سرمایش سریع قبل از آنیل انجام می‌گردد تا ساختار تماماً مارتنزیتی ایجاد شود تا بعد از فرایند آنیل توسط قسمت‌بندی عناصر منگنز و کربن از ساختار مارتنزیت زمینه، فاز آستنیت در ساختار نهایی به‌صورت نیمه پایدار باقی بماند [25]. در تحقیق حاضر افزودن عنصر کروم به علت افزایش سختی‌پذیری، منجر شده تا ساختار تماماً مارتنزیتی به‌صورت مستقیم بعد از فرایند نورد داغ و توسط سرمایش در هوا ایجاد گردد که باعث گردیده فرایند آستنیت‌زدایی و سرمایش سریع از فرایند تولید فولادهای منگنز متوسط حذف گردد. فرایند مشابهی توسط Cai و همکاران [26] نیز برای فولاد Fe-1/7C-6/5Mn-1Al مورد‌استفاده قرارگرفته است به این‌گونه که سرمایش بعد از فرایند نورد داغ در روغن انجام گردیده ولی در تحقیق حاضر با تغییر ترکیب، صرفاً با سرمایش خود به‌خودی (سرمایش در هوا) ساختار مارتنزیتی بدون هیچ محلول سرمایش ایجادشده است.

برای انتخاب دمای آنیل، اکثر تحقیقات، دمایی که فاز آستنیت بالاترین درصد کربن را دارد به‌عنوان بهینه‌ترین دمای عملیات حرارتی انتخاب می‌کنند و علت این امر ایجاد پایداری بالاتر برای فاز آستنیت در این دما است [17]. دمای معمول عملیات حرارتی برای فولاد با ترکیب تقریبی Fe-5Mn-1C در محدوده‌ی 600-650 درجه‌ی سانتی‌گراد است [2]. با توجه به شکل 1 مشخص می‌شود که افزودن عنصر کروم منجر شده است تا برای آلیاژ تحقیق حاضر، دمای انحلال فازهای کاربیدی به محدوده‌ی دمایی 700 درجه سانتی‌گراد افزایش یابد که این دما برای آلیاژ مرجع در حدود 650 درجه‌ی سانتی‌گراد است. درواقع این فازهای کاربیدی و ماهیت این رسوبات است که مشخص می‌کند در چه دمایی درصد کربن فاز آستنیت بالاترین مقدار را داشته باشد. افزودن کروم باعث افزایش دمای انحلال رسوبات شده است و همین امر، این امکان را می‌دهد تا برای انجام فرایند آنیل، دماهای بالاتری برای آلیاژ مورد‌استفاده قرار گیرد و با افزایش دمای آنیل با توجه به ماهیت متفاوت پایداری فاز آستنیت، در مدت‌زمان‌های کوتاه‌تری فرایند آنیل انجام گردد به‌گونه‌ای که برای آلیاژ مرجع [1] زمان‌های نیم ساعت تا 30 ساعت برای انجام فرایند آنیل در نظر گرفته‌شده درحالی‌که در تحقیق حاضر فرایند آنیل به مدت 10 دقیقه انجام گردیده است. بر اساس شکل 4 مشخص شد که برای آلیاژ طراحی‌شده ساختار تماماً مارتنزیتی با سرمایش در هوا نیز ایجاد می‌شود و بدون نیاز به فرایند آستنیت‌زدایی و سرمایش سریع، فرایند آنیل قابل انجام است. افزودن عنصر کروم به ترکیب فولادهای

همان‌طور که از شکل 6 مشخص است، رسوبات از نوع رسوبات کاربیدی بوده و حین فرایند آنیل به‌طور کامل انحلال پیدا نکرده‌اند.

شکل 7 الگوی پراش پرتوی ایکس آنیل‌ز طراحی‌شده را در حالت نود داغ و آنیل‌شده نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل 7 مشخص است، برای حالت نود داغ فقط الگوی آهن BCC قابل تشخیص است (شکل 7-الف) و هیچ الگوی فاز FCC آهن مشاهده نمی‌شود. برای نمونه‌ی آنیل‌شده (شکل 7-ب)، هر دو الگوی فازهای BCC و FCC آهن مشاهده می‌شود. فرایند آنیل بین دماهای بحرانی در دمای 700 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه باعث پایداری فاز آستنیت در ساختار آنیل‌شده است. بررسی‌های ریزساختاری و فازی بر اساس شکل‌های 5 تا 7 مشخص کرد که بعد از فرایند نود داغ که سرمایش در هوا صورت گرفته بوده، ساختار کاملاً مارتنزیتی ایجادشده است و بررسی‌های طراحی آنیل بر اساس شکل‌های 3 و 4 در عمل انجام گرفته است.

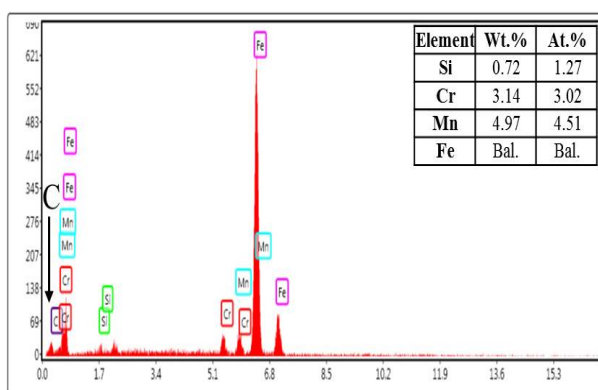


Fig. 6 EDS results for carbide depositions shown in Fig. 5d.

شکل 6 نتایج EDS برای رسوبات کاربیدی مشخص‌شده در شکل 5-د.

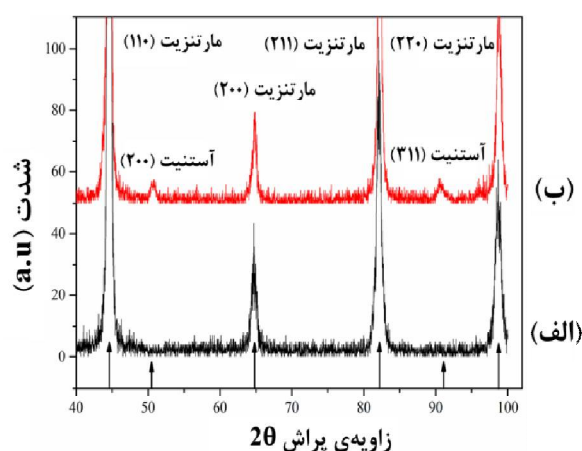


Fig. 7 XRD patterns for a) hot rolling, and b) annealing.

شکل 7 الگوی پراش پرتوی ایکس برای نمونه‌های (الف) نود داغ شده و (ب) آنیل شده.

نظر گرفت و وجود ساختار مارتنزیتی تطابق مناسبی بین نتایج حاصل از طراحی آنیل‌ز دارد (شکل 1 و 4). برای نمونه‌ی آنیل‌شده ساختار زمینه، فاز مارتنزیت بازپخت شده است (شکل 5-ج) و رسوبات نیز در ساختار قابل‌مشاهده است. همان‌طور که از شکل‌های 5-ج و 5-د مشاهده می‌شود، فرایند آنیل در دمای 700 درجه‌ی سانتی‌گراد منجر به تغییر ساختار تیغه‌ای مارتنزیت شده است و با توجه به انجام فرایند بازپخت می‌توان ادعا کرد فرایند آنیل توانسته باعث نفوذ اتمی شود و منجر به بازپخت ساختار اولیه‌ی مارتنزیتی گردد. انجام فرایند بازپخت دلیلی بر انجام موفقیت‌آمیز آنیل است و بر اساس مشاهدات Sun و همکاران [6]، فاز آستنیت نیز حین فرایند بازپخت در ساختار ایجاد می‌شود و حین سرمایش بعدی در ساختار نهایی نمونه باقی می‌ماند. همچنین در شکل 5-د رسوبات در ساختار قابل‌مشاهده هستند و همان‌طور که بررسی شد (بر اساس شکل 1 و دمای پایداری رسوبات) افزودن عنصر کروم دمای پایداری رسوبات را افزایش می‌دهد و مشاهده‌ی رسوبات در ریزساختار نمونه‌ی آنیل‌شده می‌تواند دلیلی بر درستی پیش‌بینی‌های نمودار فازی باشد. نتایج آنالیز EDS برای رسوبات مشخص‌شده در شکل 5-د در شکل 6 گزارش شده است.

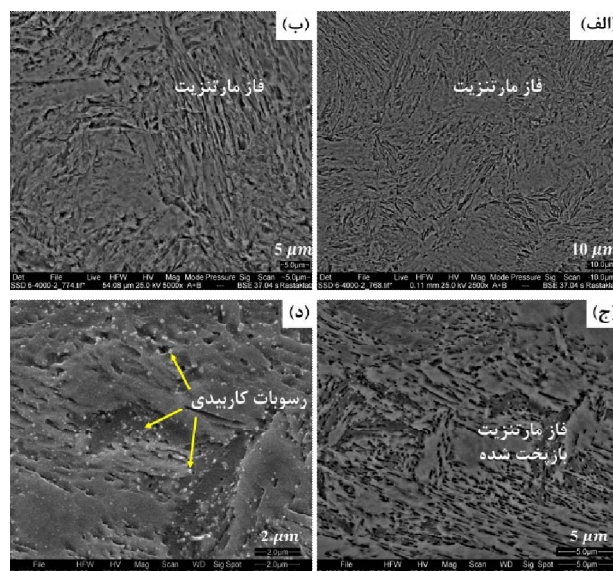


Fig. 5 The proposed alloy's microstructure after a) hot rolling with 2500X magnification, b) hot rolling with 5000X magnification, c) annealing between critical temperatures at 700°C with 10000X magnification, and d) annealing with 20000X magnification

شکل 5 ریزساختار آنیل‌ز طراحی‌شده در تحقیق حاضر. (الف) حالت نود داغ، بزرگنمایی 2500، (ب) حالت نود داغ، بزرگنمایی 5000، (ج) بعد از فرایند آنیل بین دماهای بحرانی در دمای 700 درجه‌ی سانتی‌گراد، بزرگنمایی 10000 و (د) بعد از فرایند آنیل، بزرگنمایی 20000.

وجود مقادیر سختی بالا (461 ویکرز) برای نمونه‌ی نورد داغ شده، ساختار مارتنزیتی را تأیید می‌کند و کاهش سختی بعد از فرایند آنیل مشخص‌کننده‌ی بازپخت ساختار اولیه‌ی مارتنزیتی است. برای نمونه‌ی نورد داغ شده، تفاوت اندکی (11 ویکرز) بین سختی مقطع گیره و سنجه وجود دارد ولی برای نمونه‌ی آنیل شده، این تفاوت قابل‌ملاحظه است به‌گونه‌ای که برای نمونه‌ی آنیل شده، سختی مقطع گیره در حدود 342 ویکرز و سختی مقطع سنجه در حدود 410 ویکرز است و افزایش 68 ویکرز در سختی بعد از فرایند کشش می‌تواند نشان‌دهنده‌ی استحاله‌ی آستنیت به مارتنزیت باشد که توسط استحاله ناشی از کرنش³ انجام شده است [27].

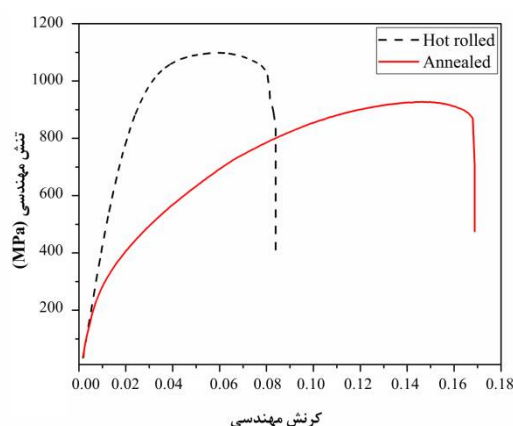


Fig. 8 Engineering stress-strain curve for samples that were hot rolled (dashed line) and annealed (solid line) at 700°C for 10 min.

شکل 8 نمودار تنش کرنش مهندسی برای نمونه‌های نورد داغ شده (نمودار خط‌چین) و نمونه‌ی آنیل شده (نمودار خط پر) در دمای 700 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه.

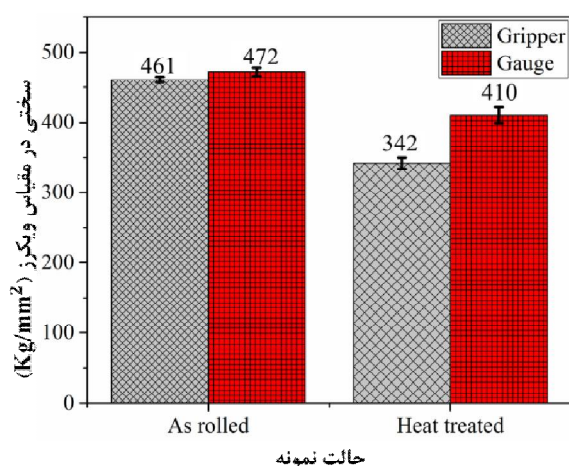


Fig. 9 Hardness results for the measurement sections of hot rolled and annealed samples.

شکل 9 نتایج سختی برای مقاطع سنجه و گیره نمونه‌ی نورد داغ و نمونه‌ی آنیل شده.

بر اساس شکل‌های 5-ج و 5-د مشخص شد که ساختار بعد از فرایند آنیل شامل فاز مارتنزیت بازپخت شده و رسوبات کاربیدی است و مشاهده شدن قله‌های مربوط به فاز FCC آهن که مربوط به وجود فاز آستنیت است انجام فرایند آنیل را تأیید می‌کند. با توجه به مشاهدات فوق و بررسی‌های انجام‌شده می‌توان ادعا کرد که افزودن عنصر کروم در عمل روی استحاله‌ی فازی و افزایش دمای پایداری رسوبات تأثیرگذار بوده است و می‌تواند به‌عنوان عنصر افزودنی مفید به ترکیب آلیاژهای منگنز متوسط اضافه گردد.

3-3- بررسی‌های خواص مکانیکی

نمودار تنش-کرنش مهندسی برای آلیاژ طراحی‌شده در حالت‌های نورد داغ و بعد از فرایند آنیل در شکل 8 نشان داده شده است. برای نمونه‌ی نورد داغ (شکل 8- نمودار خط‌چین) استحکام کششی 1010 مگا پاسکال و ازدیاد طول 8 درصد حاصل شده است. برای نمونه‌ی آنیل شده (شکل 8- نمودار خط پر)، فرایند آنیل بین دماهای بحرانی در دمای 700 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه، منجر به بهبود ازدیاد طول شده به‌گونه‌ای که برای نمونه‌ی آنیل شده در مقایسه با نمونه‌ی نوردی، فرایند آنیل باعث افزایش 2 برابری ازدیاد طول (17 درصد) گردیده است. استحکام کششی نهایی برای نمونه‌ی آنیل شده حدود 940 مگا پاسکال حاصل شده است که با استحکام نهایی نمونه‌ی نورد داغ شده اختلاف اندکی دارد.

فرایند آنیل بین دماهای بحرانی در دمای 700 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت 10 دقیقه، باعث بهبود ازدیاد طول شده است ولی چون مدت‌زمان آنیل پایین بوده است، استحکام کاهش قابل‌ملاحظه‌ای نداشته است. در اکثر تحقیقات انجام فرایند آنیل در مدت‌زمان‌های بالا (بالاتر از 1 ساعت) منجر به کاهش چگالی نابجایی‌ها، افزایش اندازه دانه‌های فازهای فریت و آستنیت و بازیابی ساختار مارتنزیت اولیه می‌شود و همین امر منجر به کاهش استحکام می‌شود ولی در تحقیق حاضر مدت‌زمان پایین‌تر آنیل باعث شده تا ساختار اولیه‌ی مارتنزیتی به‌صورت جزئی بازپخت شود و با بازپخت ساختار مارتنزیتی و ایجاد آستنیت باقی‌مانده در ساختار، با حفظ استحکام، ازدیاد طول نیز بهبود یابد.

شکل 9 مقادیر سختی نمونه‌های نورد داغ شده و نمونه‌ی آنیل شده را در هر دو مقطع گیره¹ و سنجه² نشان می‌دهد.

¹ Gripper
² Gauge

³ Transformation-Induced Plasticity (TRIP)

5- مراجع

- [1] A. Arlazarov, *Evolution of microstructure and mechanical properties of medium Mn steels and their relationship*, PhD Thesis, University of de Lorraine, Metz, 2015.
- [2] M. Y. Demeri, *Advanced high-strength steels: science, technology, and applications*, First Edition, pp 65-85, Ohio: ASM international, 2013.
- [3] 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*, Vol. 33, No. 12, pp. 1457–1464, 2017.
- [4] H. Luo, H. Dong, New ultrahigh-strength Mn-alloyed TRIP steels with improved formability manufactured by intercritical annealing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 626, pp. 207–212, 2015.
- [5] K. Sugimoto, T. Iida, J. Sakaguchi, T. Kashima, Retained austenite characteristics and tensile properties in a TRIP type bainitic sheet steel, *ISIJ International*, Vol. 40, No. 9, pp. 902–908, 2000.
- [6] C. Sun, S. L. Liu, R. D. K. Misra, Q. Li, D. H. Li, Influence of intercritical tempering temperature on impact toughness of a quenched and tempered medium-Mn steel: Intercritical tempering versus traditional tempering, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 711, pp. 484–491, 2018.
- [7] G. Su, X. Gao, T. Yan, D. Zhang, C. Cui, L. Du, et al, Intercritical tempering enables nanoscale austenite/ ϵ -martensite formation in low-C medium-Mn steel: A pathway to control mechanical properties, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 736, pp. 417–430, 2018.
- [8] S. S. Xu, Y. Zhao, D. Chen, W. L. Sun, L. Chen, X. Tong, et al, Nanoscale precipitation and its influence on strengthening mechanisms in an ultra-high strength low-carbon steel, *International Journal of Plasticity*, Vol. 113, pp. 99-113, 2018.
- [9] G. Frommeyer, U. Brück, P. Neumann, Supra-Ductile and High-Strength Manganese-TRIP/TWIP Steels for High Energy Absorption Purposes, *ISIJ International*, Vol. 43, pp. 438-446, 2003.
- [10] D. K. Matlock, J. G. Speer, E. De Moor, P. J. Gibbs, Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 15, pp. 1–12, 2012.
- [11] M. Askari-Paykani, H. R. Shahverdi, R. Miresmaeili, Microstructural evolution and mechanical properties of a novel FeCrNiBSi advanced high-strength steel: Slow, accelerated and fast casting cooling rates, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 668, pp. 188-200 2016.
- [12] J. Hu, L. X. Du, H. Liu, G. S. Sun, H. Xie, H. L. Yi, et al, 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*, Vol. 647, 144–151, 2015.
- [13] H. Liu, L. X. Du, J. Hu, H. Y. Wu, X. H. Gao, R. D.

شکل 10 الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه‌ی نورد داغ شده و نمونه‌ی آنیل شده را بعد از فرایند کشش نشان می‌دهد (الگوی مقطع سنجه). برای نمونه‌ی نورد داغ شده برخلاف نتایج شکل 7 که وجود فاز آستنیت برای مقطع گیره‌ی این نمونه تأیید شده بود، برای مقطع سنجه‌ی تنها فاز BCC آهن قابل تشخیص است. درواقع می‌توان ادعا کرد که برای نمونه‌ی آنیل شده بعد از فرایند کشش، فاز آستنیت باقی‌مانده تحت استحاله‌ی پلاستیک ناشی از کرنش به فاز مارتنزیت تبدیل شده است. فرایند TRIP به‌عنوان مکانیسم مؤثری برای بهبود خواص مکانیکی فولادهای منگنز متوسط عمل می‌نماید [14]. و در فولاد تحقیق حاضر نیز این فرایند مشاهده شده است.

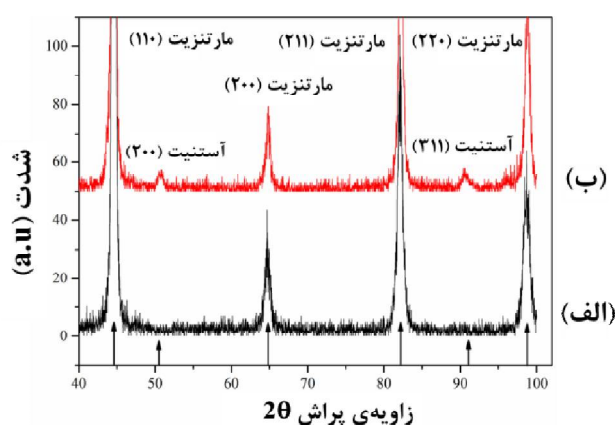


Fig. 10 XRD patterns for the gauge sections of a) hot rolled, and b) annealed samples.

شکل 10 الگوی پراش پرتوی ایکس برای سطوح مقاطع سنجه‌ی نمونه‌های (الف) نورد داغ شده و (ب) آنیل شده.

4- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، مشخص شد که عنصر کروم می‌تواند به‌عنوان یک عامل تشویق‌کننده برای ایجاد ساختار مارتنزیتی برای فولادهای منگنز متوسط مورد استفاده قرار بگیرد و با ایجاد ساختار تماماً مارتنزیت با سرمایش در هوا، مرحله‌ی آستنیت‌زدن و سرمایش سریع را از فرایند تولید فولادهای منگنز متوسط حذف کند همچنین با تغییر ماهیت رسوبات و افزایش دمای انحلال رسوبات، امکان انجام فرایند آنیل در دماهای بالاتر را میسر کرده و منجر به کاهش مدت‌زمان آنیل شود که برای تولیدات صنعتی بسیار حائز اهمیت است. بررسی‌های فازی بعد از فرایند آنیل مشخص کرد که فرایند آنیل منجر به پایداری فاز آستنیت شده و حین فرایند کشش، با استحاله‌ی فاز آستنیت به مارتنزیت، خواص مکانیکی بهبود یافته است.

- inter-critical annealing: elimination of austenizing and quenching steps. *Ironmaking & Steelmaking*, 2019.
- [21] Z. H. Cai, H. Y. Li, S. Y. Jing, Z. C. Li, H. Ding, Z. Y. Tang, et al, Influence of annealing temperature on microstructure and tensile property of cold-rolled Fe-0.2C-11Mn-6Al steel, *Materials Characterization*, Vol. 137, pp. 256–262, 2018.
- [22] D. Rahmatabadi, G. h. Faraji, R. Hashemi, Review on accumulative roll bonding of ultrafine grained and nanostructured sheets, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 37-51, 2019 (in Persian).
- [23] p. Machmeier, T. Matuszewski, R. Jones, R. Ayer, Effect of chromium additions on the mechanical and physical properties and microstructure of Fe-Co-Ni-Cr-Mo-C ultra-high strength steel: Part I, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 6, No. 3, pp. 279–288, 1997.
- [24] J. M. Tartaglia, A. N. Kuelz, V. H. Thelander, The Effects of Alloying Elements on the Continuous Cooling Transformation Behavior of $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 1, pp. 99-108, 2018.
- [25] J. Zhao, Z. Jiang, Thermomechanical processing of advanced high strength steels. *Progress in Materials Science*, Vol. 94, pp. 174–242, 2018.
- [26] M. Cai, H. Huang, J. Su, H. Ding, P. D. Hodgson, Enhanced tensile properties of a reversion annealed 6.5Mn-TRIP alloy via tailoring initial microstructure and cold rolling reduction. *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 34, No. 8, pp. 1428-1435, 2018.
- [27] M. Askari-Paykani, H. R. Shahverdi, R. Miresmaeili, Effect of Boron Addition on Microstructural Evolution and Room-Temperature Mechanical Properties of Novel Fe66- xCrNiBxSi (x= 0, 0.25, 0.50 and 0.75 Wt Pct) Advanced High-Strength Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. Vol. 47, No. 11, pp. 5423–5437, 2016.
- K. Misra, Interplay between reversed austenite and plastic deformation in a directly quenched and intercritically annealed 0.04C-5Mn low-Al steel, *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 695, pp. 2072–2082, 2017.
- [14] J. Han, S. J. Lee, J. G. Jung, Y. K. Lee, The effects of the initial martensite microstructure on the microstructure and tensile properties of intercritically annealed Fe-9Mn-0.05 C steel, *Acta Materialia*, Vol. 78, pp. 369–377, 2014.
- [15] J. Han, Y. K. Lee, The effects of the heating rate on the reverse transformation mechanism and the phase stability of reverted austenite in medium Mn steels, *Acta Materialia*, Vol. 67, pp. 354–361, 2014.
- [16] A. Zinsaz-Borujerdi, A. Zarei-Hanzaki, H. R. Abedi, M. Karam-Abian, H. Ding, D. Han, et al, Room temperature mechanical properties and microstructure of a low alloyed TRIP-assisted steel subjected to one-step and two-step quenching and partitioning process, *Materials Science and Engineering: A*. Vol. 725, pp. 341–349, 2018.
- [17] 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*. Vol. 44, No. 11, pp. 5018–5024, 2013.
- [18] X. Luo, X. Zhong, H. Luo, H. Zhou, C. Wang, J. Shi, Mn Diffusion at Early Stage of Intercritical Annealing of 5Mn Steel, *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 22, No11, PP. 1015-1019, 2015.
- [19] 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*, Vol. 528, pp. 6661–6666, 2011.
- [20] Zabihi-Gargari M, Shahverdi HR, Emami M, Askari-Paykani M. Enhancing mechanical properties of medium Mn advanced high-strength steel by