

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

اثر دمای آنیل میان بحرانی بر ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی فولاد دوفازی ریختگی

مقاله پژوهشی

آمنه وحیدیان^۱، مجید عباسی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران.

abbasim@nit.ac.ir*

چکیده

در این مقاله اثر دمای آنیل میان بحرانی بر ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی یک فولاد دوفازی ریختگی جدید با ترکیب اسمی $0.3\text{ C}-2.5\text{ Si}-1.8\text{ Mn}-0.5\text{ Cr}$ (درصد وزنی) بررسی شده است. عملیات آنیل میان بحرانی در سه دمای مختلف 825 ، 850 و 875°C در مدت زمان ۲۶ دقیقه انجام شد. به منظور ارزیابی ویژگی‌های ریزساختاری این نمونه‌ها تصاویر آنالیز میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی تهیه شدند و ویژگی‌های مکانیکی با آزمون سختی و ریزسختی‌سنجی و آزمون کشش مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش دمای آنیل میان بحرانی، کسر حجمی مارتنزیت، میزان سختی و همچنین استحکام تسلیم نمونه‌ها افزایش یافت؛ اما استحکام کششی ابتدا افزایش و سپس کاهش نشان داد. با این وجود نمونه آنیل میان بحرانی شده در 850°C بیشترین استحکام کششی (1532 MPa) و نمونه آنیل میان بحرانی شده در 825°C بیشترین درصد ازدیاد طول ($18/52\%$) و قابلیت جذب انرژی ($\text{UTS}\times\text{EL}$) را نشان دادند. این فولاد دوفازی دو مرحله کارسختی نشان داد که با افزایش مارتنزیت شیب مرحله دوم آن کاهش یافت و کرنش شروع مرحله دوم کارسختی به کرنش‌های کمتر انتقال پیدا کرد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۳

کلید واژگان:

آنیل میان بحرانی
فولاد دوفازی ریختگی
ویژگی‌های مکانیکی
آستنیت باقیمانده

The Effect of Intercritical Annealing Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Dual-Phase Cast Steel

Amene Vahidian¹, Majid Abbasi^{2*}

۱- Ph.D. student, Department of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

۲- Associate Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

* abbasim@nit.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Dor:

۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۴۲۳۳۲۶.۱۴۰۲.۱۷.۱.۱.۵

Abstract

In this research, the effect of intercritical annealing temperature on the microstructure and mechanical properties of new dual-phase cast steel with the nominal composition of 0.3 C , 2.5 Si , 1.8 Mn , and 0.5 Cr (wt. percent). Intercritical annealing (IA) heat

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Amene Vahidian, Majid Abbasi, The Effect of Intercritical Annealing Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Dual-Phase Cast Steel, New Process in Material Engineering, ۲۰۲۳, ۱۷(۲), ۱۵-۲۴.

Keywords:

Intercritical Annealing
Dual-Phase Cast Steel
Mechanical Properties
Retained Austenite

۱- مقدمه

در جهان صنعتی مدرن، توسعه و حصول موادی با عملکرد مطلوب از نظر ویژگی‌های مکانیکی بسیار مهم است. آلیاژهایی با استحکام و انعطاف‌پذیری زیاد دغدغه‌های کاهش وزن و بهبود راندمان انرژی را تأمین می‌کنند [۱]، به گونه‌ای که افزایش استحکام بدون کاهش کرنش شکست آن حاصل شود. فولادهای دوفازی فریتی-مارتنزیتی به علت ویژگی‌های مکانیکی عالی و هزینه مناسب تمام شده، مثل استحکام کششی نهایی در محدوده ۴۴۰ تا ۱۴۷۰ MPa، تسلیم پیوسته، نرخ کارسختی زیاد و ترکیب عالی استحکام و ازدیاد طول به طور وسیعی در قطعات خودرو به کار می‌روند [۲-۵]. ویژگی‌های مکانیکی عالی آن‌ها را می‌توان به فاز سخت مارتنزیت (M) و ازدیاد طول خوب را به فاز فریت (α) نسبت داد. در فولادهای دوفازی، انعطاف‌پذیری زیاد از رفتار کرنش سختی بهتر فاز نرم به علت تحرک نابجایی‌ها، تشکیل دوقلوبی، جزءبندی^۱ کرنش یا کرنش ناشی از تبدیل فاز ایجاد می‌شود. به هر حال فاز نرم تسلیم و انعطاف‌پذیری کلی فولادهای دوفازی را کنترل می‌کند، اگرچه تحت تأثیر توزیع، اندازه و کسر حجمی مارتنزیت موجود در زمینه است. فاز سخت نیز می‌تواند یک افزایش جزئی استحکام را از طریق سخت‌شوندگی فصل مشترک با مقاومت لغزشی نابجایی در فاز نرم مهیا کند [۶-۹]. تغییر شکل فولادهای دوفازی تحت تأثیر تغییر شکل فریت و مارتنزیت و سازگاری بین دو فاز است. بنابر گزارش‌های قبلی [۱۰-۱۴] کسر، موفولوژی، اندازه و استحکام ترکیبات ریزساختاری بر رفتار کرنش سختی فولادهای دوفازی تأثیرگذار هستند. اصلاح و بهبود اجزای ریزساختاری منجر به کاهش تقسیم کرنش بین مارتنزیت و فریت می‌شود، در نتیجه سختی‌پذیری بهبود می‌یابد [۱۵].

انتخاب عناصر آلیاژی و افزودن آن به فولاد به چندین عامل بستگی دارد: (۱) قیمت مواد اولیه، (۲) تأثیر آن بر قابلیت ریخته‌گری و فرآیند بعدی آن و (۳) اثر آن بر خواص مکانیکی نهایی. در ترکیب آلیاژی فولاد دوفازی تجاری عناصری شامل کربن، سیلیسیم، آلومینیوم، کروم، منگنز و

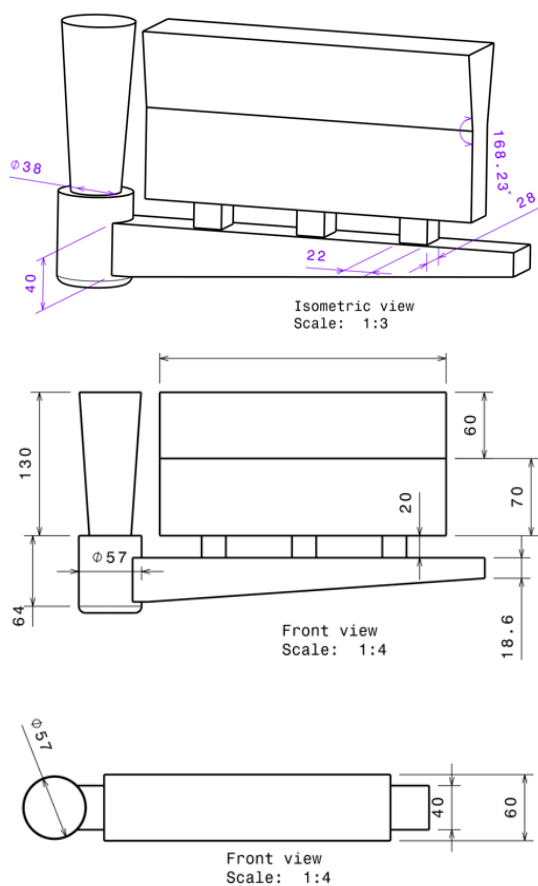
اغلب عناصر تشکیل‌دهنده رسوب هستند. افزودن بازدارنده‌های کاربیدی^۲ مثل سیلیسیم و آلومینیوم تشکیل پرلیت را محدود می‌کند، البته سیلیسیم منجر به استحکام‌بخشی محلول جامد نیز می‌شود. منگنز به‌عنوان عامل استحکام‌بخش محلول جامد در فریت (α) عمل می‌کند و فاز آستنیت (γ) را پایدار می‌کند که سبب افزایش تشکیل مارتنزیت می‌گردد. عناصر آلیاژی جاننشینی همراه با دیگر عناصر تشکیل‌دهنده رسوبات فولاد AHSS^۳ را قادر به دستیابی ویژگی‌های مکانیکی موردنیاز می‌کند [۱۶-۱۷].

استفاده از فولادهای دوفازی مقرون به صرفه‌تر به علت عناصر آلیاژی کم آن در حال توسعه است [۱۸]. آسان‌ترین روش عملیات حرارتی برای دوفازی شدن فولادها، روش آنیل میان بحرانی است. با وجود اینکه تبدیل آستنیتی برای فولادهایی با کربن متوسط یا زیاد معمول است، اما روش آنیل میان بحرانی این تبدیل را برای فولاد کم کربن نیز ممکن می‌کند [۱۹-۲۰].

در سال ۲۰۰۸ محقق چترجی و همکاران^۴ [۲۱] سعی بر این داشتند که فولادهای دوفازی را به‌طور مستقیم طی انجماد و سرد کردن نمونه ریختگی حاصل کنند. به همین جهت، آنها ضمن بررسی اثر عناصر آلیاژی مثل آلومینیوم و مولیبدن، ریزساختار دوفازی را به دست آوردند اما ویژگی‌های مکانیکی آلیاژ رضایت‌بخش نبود. بعد از آن، اکثر محققان برای حصول ویژگی‌های مکانیکی مطلوب در فولادهای دوفازی به انجام عملیات ترمومکانیکی روی آوردند. ایجاد ریزساختاری حاوی مارتنزیت در این فولادها به سرعت سرد کردن نسبتاً زیادی نیاز دارد. در این تحقیق با انتخاب یک ترکیب شیمیایی جدید برای فولادهای دوفازی سعی بر این است که با افزودن ۲/۵ wt% Si و افزایش گستره دمایی منطقه دوفازی علاوه بر ریخته‌گری آسان، امکان دوفازی شدن ریزساختار در عمق یک نمونه فولادی بالک به جهت کاربردهای سایشی فراهم شود و با افزودن ۰/۱ wt% Nb نیز فاز مارتنزیتی ریز در کنار فریت تشکیل گردد.

هدف اصلی این تحقیق، معرفی و تولید یک آلیاژ ریختگی مقاوم به سایش جدید آلیاژ شده با حدود ۰/۱ درصد وزنی

دوباره تا 550°C گرم شد و بعد از ۲۰ دقیقه تا دمای موردنظر (825°C ، 850°C و 875°C) گرم و به مدت ۲۶ دقیقه در این دما آنیل میان بحرانی و در نهایت در آب‌نمک کوئنچ شد. ذکر این نکته ضروری است که عملیات آنیل میان بحرانی جهت تولید فولاد دوفازی انجام گرفت. در نهایت، برای کاهش تنش‌های داخلی موجود در قطعه، در دمای 350°C به مدت ۳۰ دقیقه تمپر گردید.



شکل (۲): ابعاد بلوک ریخته‌گری شده (با استفاده از نرم‌افزار کتیا).

برای ارزیابی سختی، ریزسختی و متالوگرافی نمونه‌هایی با ابعاد سطحی 1 cm^2 تهیه شدند. بعد از سنباده‌زنی سطح تا سنباده ۶۰۰، سختی تحت اعمال نیروی ۱۰ کیلوگرم انجام شد. بعد از سنباده‌زنی و پولیش، ریزسختی تحت نیروی ۲۵ گرم انجام گرفت. هر دو سختی و ریزسختی‌سنجی به روش ویکرز به مدت ۱۰ ثانیه با ۱۰ بار تکرار انجام شدند. برای متالوگرافی، بعد از سنباده‌زنی و پولیش، سطح نمونه‌ها با محلول نایتال ۳٪ حکاکی و تصویر ساختار میکروسکوپی

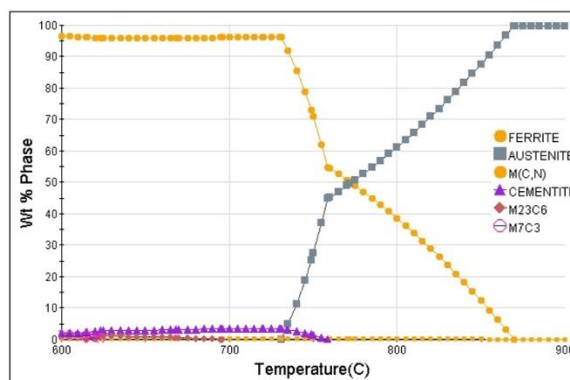
نیوبوم، ۰/۵ درصد وزنی کروم و ۲/۵ درصد وزنی سیلیسیم از طریق عملیات حرارتی دوفازی است. به این منظور اثر دمای آنیل میان بحرانی بر ریزساختار و ویژگی‌های مکانیکی این فولاد بررسی شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

دماهای بحرانی فرایند یعنی دماهای شروع و پایان آستنیت‌زایی از مهم‌ترین پارامترهای عملیات حرارتی هستند. با توجه به ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول (۱)، دیاگرام تعادلی با استفاده از نرم‌افزار JMatPro تحت شرایط تعادل ترمودینامیکی، شکل (۱)، به دست آمد؛ بنابراین دمای شروع و پایان تبدیل به ترتیب A_{c3} دمای 880°C و دمای A_{c1} هم 730°C مشخص شده است. بنابر محدوده دمایی مشخص شده برای منطقه دوفازی ($\alpha+\gamma$) این فولاد، دمای 825°C ، 850°C و 875°C برای عملیات آنیل میان بحرانی انتخاب شدند.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد دوفازی ریختگی (wt%).

C	Si	Mo	Mn	Cr	Ni	Nb
۰/۲۲	۲/۴۶	۰/۲۸	۱/۶۸	۰/۴۲	۰/۱۴	۰/۱۰



شکل (۱): نمودار حاصل از سرد کردن فولاد با نرم‌افزار JMatPro و تعیین دماهای بحرانی A_{c1} و A_{c3} .

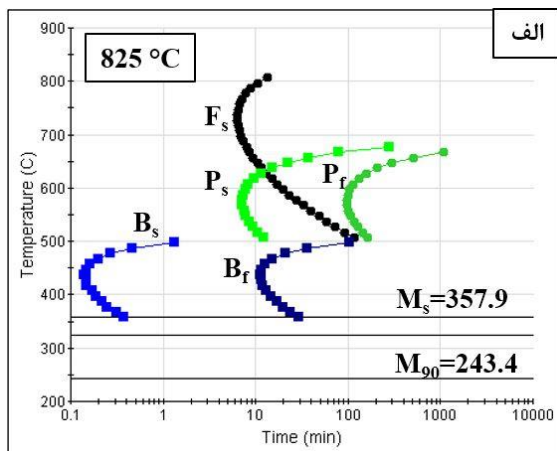
جهت تهیه نمونه، ابتدا بلوکی (شکل (۲)) با ترکیب شیمیایی مذکور در ابعاد $40 \times 70 \times 260\text{ mm}$ ریخته‌گری گردید. سپس این بلوک به قطعات کوچک‌تر با ابعاد $15 \times 35 \times 60\text{ mm}^3$ برش داده شد. برای همگن‌سازی نمونه فولادی ابتدا تا دمای 970°C گرم و یک ساعت در همان دما نگهداری و سپس در هوا سرد شد.

محللول آب‌نمک، آستنیت موجود به مارتنزیت تبدیل می‌گردد. مطابق جدول (۲) با پیش‌بینی‌های JMatPro، با افزایش دمای آنیل میان بحرانی، میزان آستنیت موجود در ساختار افزایش می‌یابد که حین فرآیند کوئنچ به مارتنزیت تبدیل می‌شود. افزایش میزان آستنیت با کاهش درصد کربن آستنیت همراه است. در نهایت، با افزایش دمای آنیل میان بحرانی ریزساختار حاوی مارتنزیت بیشتر اما درصد کربن کمتری خواهد بود که این نکته در شکل (۵) با توجه به قانون اهرم در منطقه دوفازی ($\alpha+\gamma$) دیاگرام آهن-کربن نیز مورد تأیید است.

همچنین در جدول (۲) با افزایش دمای آنیل میان بحرانی درصد کربن آستنیت کاهش می‌یابد و همین کاهش کربن منجر به افزایش دمای M_s می‌گردد. شروع تبدیل مارتنزیتی در دماهای بالاتر تشکیل مارتنزیت را تسهیل می‌کند و در نتیجه امکان ایجاد ساختار حاوی مارتنزیت در عمق را افزایش می‌دهد و همین امر کاربردهای سایشی این قطعات را بهبود می‌بخشد.

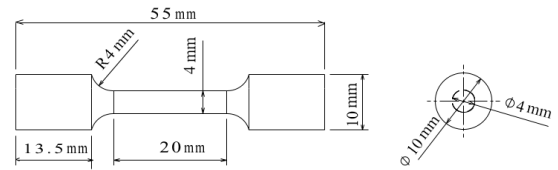
۳-۲- مشخصه‌یابی ریزساختاری

شکل (۶) تأثیر افزایش دمای آنیل میان بحرانی از ۸۲۵ تا 875°C را بر ریزساختار فولاد دوفازی نشان می‌دهد. در تصاویر میکروسکوپ نوری این نمونه‌ها، فریت با مورفولوژی‌های چندوجهی و سوزنی مشاهده می‌شود که با



حاصل از آن‌ها تهیه گردید. لازم به ذکر است که میزان کسر حجمی فازها نیز با نرم‌افزار MIP4 محاسبه شد.

برای انجام آزمون کشش بنابر استاندارد ASTM EAM، نمونه‌های کشش دمبلی شکل کوچک شده با طول سنجه ۲۰ mm ماشینکاری شدند (شکل (۳)). آزمون کشش در دمای اتاق با نرخ کرنشی ۱ mm/min با استفاده از دستگاه SANTAM انجام شد. برای هر آزمون سه نمونه تهیه گردید.



شکل (۳): تصویر نمونه کوچک شده آزمون کشش بنابر استاندارد

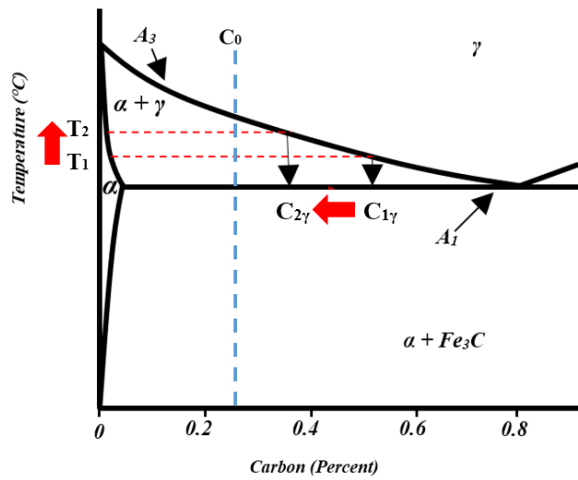
ASTM EAM

۳- نتایج و بحث

۳-۱- دیاگرام‌های تعادلی ترمودینامیکی

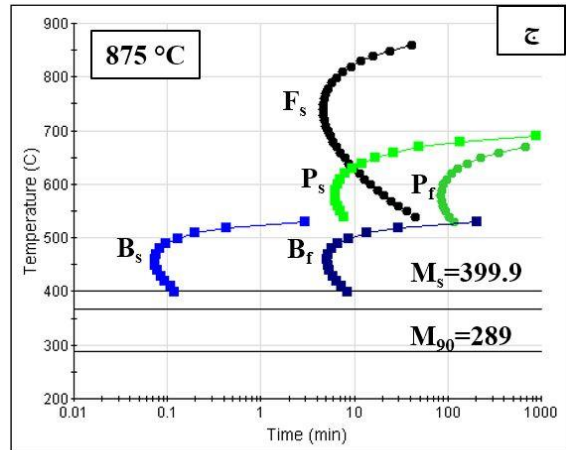
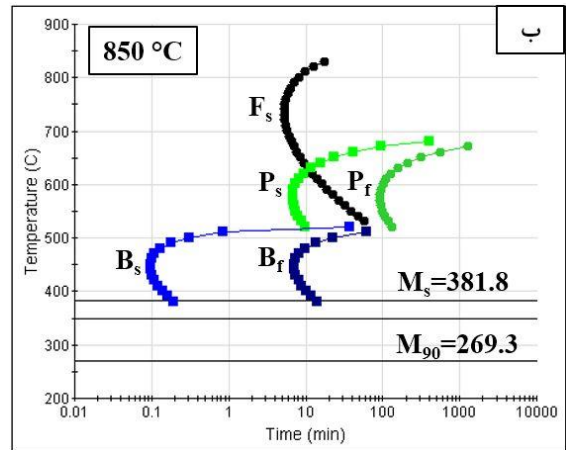
در شکل (۱) با استفاده از نرم‌افزار JMatPro و ترکیب شیمیایی فولاد مورد نظر دیاگرام فازی آن پیش‌بینی می‌شود که شرح آن بدین صورت است. کاهش دما در محدوده مشخص شده (880°C - 730°C) منجر به تشکیل فریت و کاهش مقدار آستنیت می‌گردد. همچنین MnS نیز به مقدار کمی در ساختار تشکیل می‌شود. سپس، در دمای 780°C با حصول مقدار ۵۰ درصد آستنیت و ۵۰ درصد فریت در ساختار، رسوب‌گذاری کاربیدهای M_2C ، $M(C,N)$ و Fe_3C و ذرات MnS نیز ظاهر شدند.

شکل (۴) دیاگرام زمان-دما-تبدیل (TTT) محاسبه شده با نرم‌افزار JMatPro را برای سه فولاد دوفازی در سه دمای آنیل میان بحرانی نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً گفته شد در دمای آنیل میان بحرانی، در منطقه دوفازی، ساختار شامل فازهای فریت و آستنیت هستند که این دیاگرام برای آستنیت موجود در آن ترسیم شده است. با کوئنچ این نمونه‌ها در



شکل (۵): اثر دمای آنیل میان بحرانی بر تغییرات کربن در فازهای فریت و آستنیت.

افزایش دمای آنیل میان بحرانی، مورفولوژی فریت موجود در ریزساختار سوزنی‌تر می‌گردد. در شکل (۷) ضخامت فریت سوزنی کمتر از $3\mu\text{m}$ قابل مشاهده است. کسرهای فازی در سطح ریزساختار این نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار MIP4 محاسبه گردید که نتایج آن در شکل (۸) آورده شده است. با افزایش دمای آنیل میان بحرانی میزان کسر مارتنزیت از ۷۹ به ۹۴ درصد افزایش یافت. این افزایش کسر مارتنزیت افزایش سختی را در پی خواهد داشت که در شکل (۹) (الف) نشان داده شده است. بنابر تحقیق پنفورنیس و همکاران^[۲۲]، ماکروسختی هر نمونه به سختی فریت و مارتنزیت و کسر حجمی مارتنزیت آن بستگی دارد. سختی فریت نیز به دلیل نزدیکی به مارتنزیت اثر می‌پذیرد و افزایش پیدا می‌کند. در شکل (۹) (ب) ریزسختی مارتنزیت روندی متفاوت از سختی را نشان می‌دهد. ریزسختی مارتنزیت در دمای آنیل میان بحرانی 825°C با بیشترین انحراف معیار مشاهده می‌شود. با توجه به میزان کربن در جدول (۲) امکان وجود آستنیت باقیمانده در دمای 825°C بیشتر است و انحراف معیار می‌تواند نشان‌دهنده اختلاف ریزسختی در مارتنزیت تمپر شده و مارتنزیت حاصل از تبدیل آستنیت باقیمانده طی کرنش باشد.

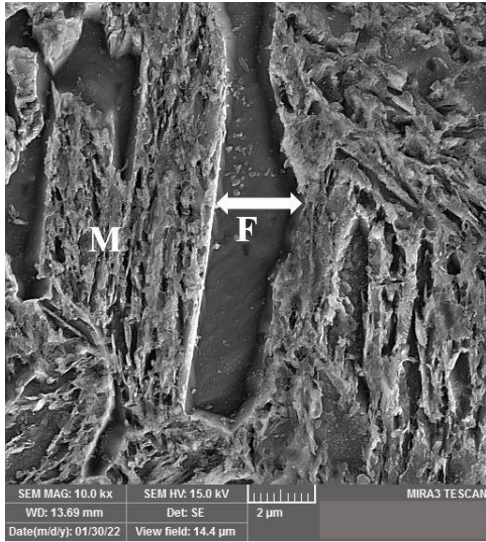


Grain size : 30 microns

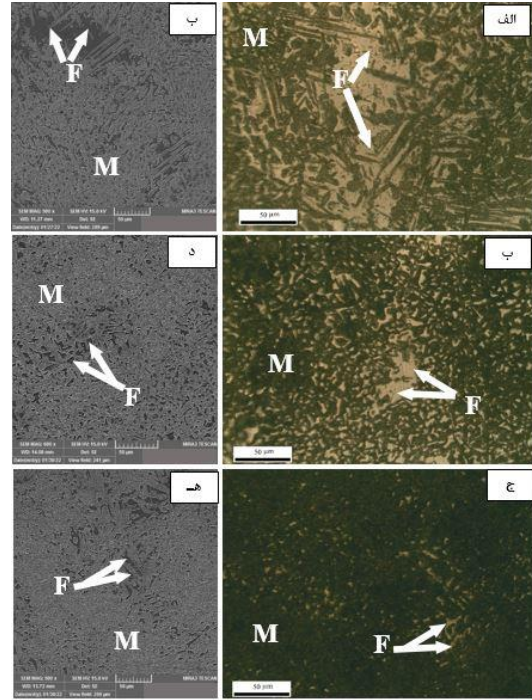
شکل (۴): دیاگرام زمان-دما-تبدیل سه فولاد دوفازی با نرم‌افزار JMatPro، آستنیت‌شده در دماهای: الف) 825°C (ب) 850°C (ج) 875°C

جدول (۲): داده‌های حاصل از نرم‌افزار JMatPro در دماهای آنیل میان بحرانی 825°C و 850°C و 875°C

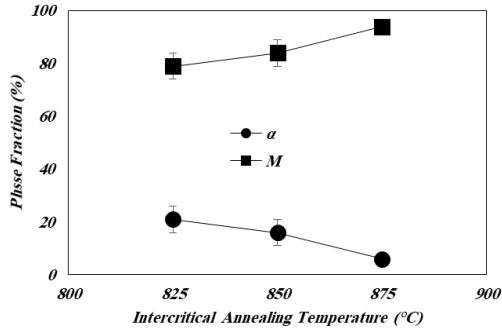
معیار	دمای آنیل میان بحرانی ($^\circ\text{C}$)		
	۸۷۵	۸۵۰	۸۲۵
درصد حجمی فریت	۳۳/۱۰	۵۳/۶۷	۶۹/۰۳
درصد حجمی آستنیت	۶۶/۶۹	۴۶/۱۱	۳۰/۷۴
درصد وزنی کربن در آستنیت	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۳۴
M_s	۳۹۹/۹	۳۸۱/۸	۳۵۷/۹
M_{10}	۲۸۹	۲۶۹/۳	۲۴۳/۴



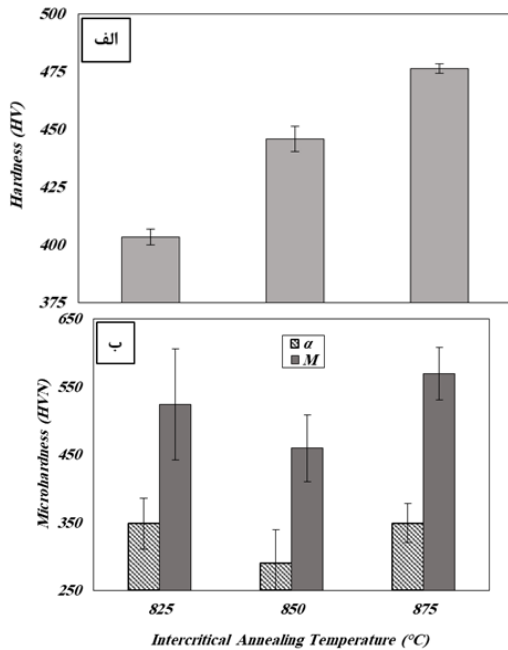
شکل (۷): تصویر میکروسکوپ الکترونی روشی از ضخامت فریت در نمونه آنیل میان بحرانی شده در 875°C



شکل (۶): تصاویر میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی فولاد دوفازی ریختگی در دماهای آنیل میان بحرانی: (الف) و (ب) 825°C ، (ج) و (د) 850°C و (ه) و (و) 875°C فریت (F) و مارتنزیت (M).



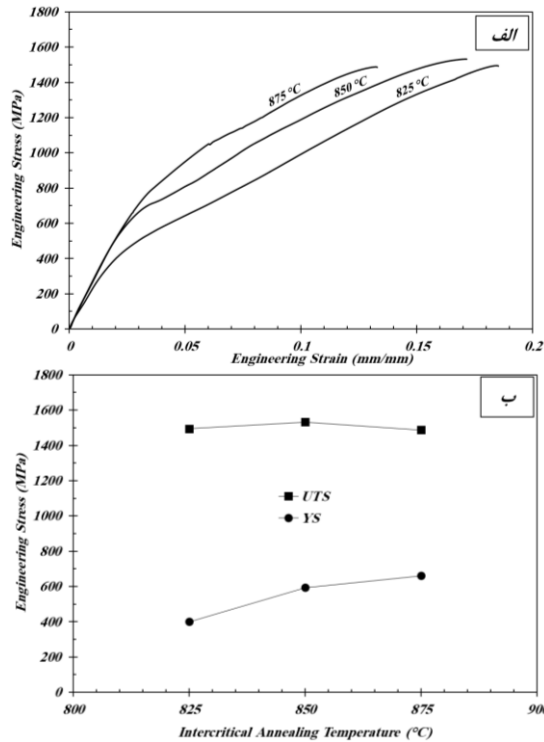
شکل (۸): اثر دمای آنیل میان بحرانی بر تغییرات کسرفازی در فولاد دوفازی جدید.



شکل (۹): نمودار اثر دمای آنیل میان بحرانی بر (الف) سختی و (ب) ریزسختی فولاد دوفازی ریختگی (α : فریت و M: مارتنزیت).

۳-۳- مشخصه یابی مکانیکی

نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه‌های فولاد دوفازی حاصل با نرخ کرنش 1 mm/min در شکل (۱۰) (الف) مشاهده می‌شود که اصلی‌ترین مشخصه فولاد دوفازی یعنی تسلیم پیوسته برای تمام این نمونه‌ها آشکار است. در شکل (۱۰) (ب) بیش‌ترین میزان استحکام کششی یعنی 1532 MPa در دمای 850°C و بیش‌ترین استحکام تسلیم 770 MPa در دمای 875°C حاصل شدند؛ یعنی با افزایش دمای آنیل میان بحرانی، استحکام کششی نهایی ابتدا افزایش و سپس کاهش و استحکام تسلیم به‌طور کلی افزایش نشان داد. لیست ویژگی‌های مکانیکی حاصل در جدول (۳) آورده شده است. در تحقیقات موحد و همکاران [۲۳] و دولوچانو و همکاران^۶ [۲۴]، به اثرات متقابل ناشی از افزایش مقدار مارتنزیت و کاهش کربن موجود در آن اشاره شده است.



شکل (۱۰): اثر دمای آنیل میان بحرانی بر (الف) منحنی تنش-کرنش مهندسی و (ب) تغییرات استحکام تسلیم و کششی نمونه‌های فولاد دوفازی.

جدول (۳): ویژگی‌های مکانیکی و ریزساختاری فولادها.

UTS×EI (J/cm ³)	ازدیاد طول (%)	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	کسر مارتنزیت (%)	دمای آنیل میان بحرانی (°C)
۲۷۷/۰۲	۱۸/۵۳	۱۴۹۵	۴۰۰	۷۹	۸۲۵
۲۶۳/۶۶	۱۷/۲۱	۱۵۳۲	۵۹۴	۸۴	۸۵۰
۱۹۷/۹۰	۱۳/۳۰	۱۴۸۸	۶۶۱	۹۴	۸۷۵

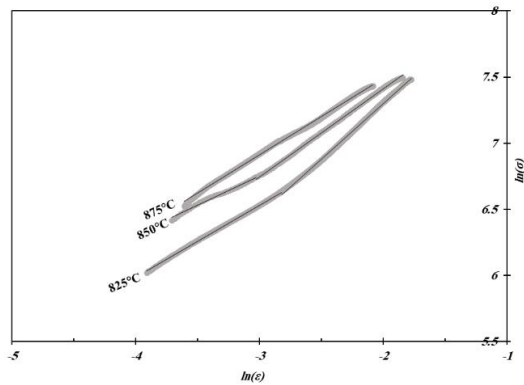
بیشترین میزان قابلیت جذب انرژی برای نمونه آنیل میان بحرانی شده در دمای ۸۲۵°C حاصل شد. با افزایش دمای آنیل میان بحرانی کسر حجمی مارتنزیت در ریزساختار نمونه‌ها افزایش یافت و همین امر باعث کاهش میزان ازدیاد طول در شکل (۱۱) گردید که در توافق با نتایج قبلی [۲۷-۲۹] است؛ بنابراین، میزان قابلیت جذب انرژی در این نمونه‌ها با افزایش کسر حجمی مارتنزیت کاهش یافت.

افزایش مارتنزیت، افزایش استحکام فولاد و کاهش کرنش مارتنزیت، کاهش استحکام مارتنزیت را در پی دارد. در واقع این دو اثر همان اثر استحکام فولاد و استحکام مارتنزیت اطلاق می‌گردد. موحد و همکاران [۲۳] با توجه به قانون ترکیبی، استحکام کششی یک فولاد دوفازی را به صورت معادله (۱) نوشت:

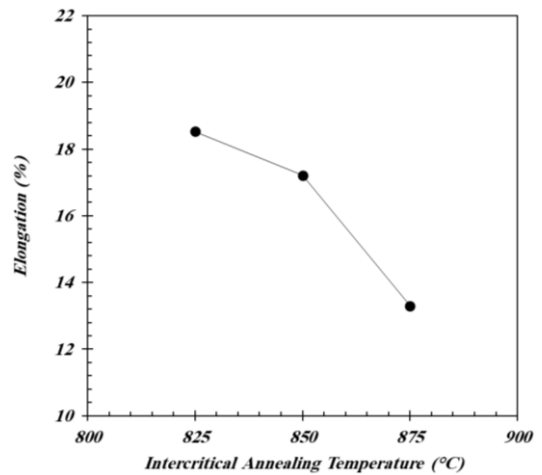
$$\sigma_u = \sigma_m V_m + \sigma_F V_F \quad (1)$$

به طوری که σ_u ، σ_m ، σ_F ، V_m و V_F به ترتیب استحکام کششی کلی فولاد، استحکام کششی مارتنزیت، استحکام کششی فریت، کسرهای حجمی مارتنزیت و فریت هستند. با توجه به محدوده کسر حجمی مارتنزیت در این تحقیق (از ۷۹ تا ۹۴ درصد)، می‌توان گفت که در ابتدا افزایش مقدار مارتنزیت اثر غالب را دارد و استحکام فولاد را افزایش می‌دهد اما در ادامه کاهش کرنش مارتنزیت و در نتیجه کاهش استحکام مارتنزیت غالب می‌شود و منجر به کاهش استحکام فولاد می‌گردد. همچنین افزایش استحکام تسلیم فولادهای دوفازی را می‌توان به افزایش چگالی‌های نابجایی ایجاد شده در اثر تبدیل آستنیت به مارتنزیت و همچنین افزایش استحکام فریت موجود در ریزساختار نسبت داد [۲۵]. علاوه بر این استحکام تسلیم به اصطکاک شبکه با حرکت نابجایی، استحکام بخشی محلول جامد (تقابل نابجایی‌ها با اتم‌های بین نشین C و N و اتم‌های جانشین Mn و Si) و سخت گردانی رسوبی بستگی دارد که از تقابل نابجایی‌ها با کاربیدها و استحکام بخشی مرزانه حاصل می‌شود [۲۶].

بنابر تحقیقات مظاهری و همکاران [۱۵] حاصلضرب استحکام کششی در ازدیاد طول، معیاری از قابلیت جذب انرژی را نشان می‌دهد. تغییرات این مقادیر (UTS×EI) برای این نمونه‌های فولاد دوفازی در جدول (۳) آورده شده است.



شکل (۱۲): اثر دمای آنیل میان بحرانی بر نمودار $\ln \sigma$ به $\ln \epsilon$



شکل (۱۱): اثر دمای آنیل میان بحرانی بر انعطاف پذیری فولاد دوفازی.

همانطور که گفته شد مرحله دوم کارسختی همراه با تغییر شکل پلاستیکی هر دو فاز است و حالت تغییر شکل پلاستیکی فاز سخت به اختلاف استحکام بین دو فاز بستگی دارد. مقدار کربن مارتنزیت با افزایش مارتنزیت کاهش می‌یابد که اختلاف استحکام فازهای فریت و مارتنزیت را کاهش می‌دهد. این می‌تواند در کاهش کرنشی شرکت کند که تغییر شکل پلاستیکی کامل مارتنزیت اتفاق می‌افتد [۳۴]. کاهش این کرنش با افزایش دمای آنیل میان بحرانی در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول (۴): اثر دمای آنیل میان بحرانی بر نرخ کارسختی نمونه‌های فولاد دوفازی.

کرنش انتقالی (ϵ_i)	نرخ کرنش سختی		دمای آنیل میان بحرانی ($^{\circ}\text{C}$)
	مرحله دوم	مرحله اول	
۰/۰۵۹	۰/۸۵	۰/۵۵	۸۲۵
۰/۰۴۹	۰/۶۷	۰/۴۵	۸۵۰
-	۰/۵۸	-	۸۷۵

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فولادی با ترکیب جدید موردنظر ریخته‌گری گردید و سپس، در سه دمای ۸۲۵، ۸۵۰ و 875°C به مدت ۲۶ دقیقه با عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی دوفازی شد. سپس، در آب نمک کوئنچ و در نهایت به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 350°C تمپر شدند. نتایج آنالیزهای صورت گرفته شامل موارد زیر هستند:

۱- با افزایش دمای آنیل میان بحرانی از 825°C تا 875°C میزان کسر حجمی مارتنزیت از ۷۹ تا ۹۴ درصد در

یک روش رایج برای شرح کرنش سختی در فولادهای دوفازی طی آزمون کشش استفاده از معادله هولمن است [۳۰-۳۱]. منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمده تعیین توان کرنش سختی (n) را ممکن می‌سازند که اطلاعاتی درباره قابلیت ماده به جلوگیری از موضعی شدن تغییر شکل را مهیا می‌کند و ماده طی تغییر شکل استحکام می‌یابد. در شکل (۱۲) برای دو نمونه‌ی فولاد دوفازی آنیل شده در ۸۲۵ و 850°C دو مرحله کارسختی مشاهده شد که با نتایج قبلی [۳۲] سازگار است. وجود مراحل کارسختی متمایز مرتبط با مکانیزم‌های تغییر شکل متفاوت فعال در محدوده کرنشی متناظر با هر حالت است. به طوری که در نمودار کارسختی مرحله اول نشان‌دهنده کارسختی فریت و مرحله دوم نشان‌دهنده تغییر شکل پلاستیکی فریت به همراه مارتنزیت است [۳۳]. لازم به ذکر است که شیب مرحله دوم بیش از مرحله اول است (جدول ۴). شیب مرحله اول و دوم کارسختی با افزایش کسر مارتنزیت و کاهش فریت کاهش یافته است. در نمونه فولاد دوفازی آنیل شده در 875°C یک مرحله کارسختی حاصل شده است. در واقع علت را می‌توان در مقدار خیلی کم فریت در این نمونه دانست که منجر به حذف مرحله اول کارسختی شده است.

dual-phase steel", *Acta Materialia*, vol. ۵۹, pp. ۲۵۷۵-۲۵۸۸, ۲۰۱۱.

[۸] A. Das & et al, "Influence of microstructure and strain rate on the strain partitioning behaviour of dual phase steels", *Materials Science and Engineering: A*, vol. ۷۵۴, pp. ۳۴۸-۳۶۰, ۲۰۱۹.

[۹] Y. Mazaheri & et al, "Effects of initial microstructure and thermomechanical processing parameters on microstructures and mechanical properties of ultrafine-grained dual phase steels", *Materials Science and Engineering: A*, vol. ۶۱۲, pp. ۵۴-۶۲, ۲۰۱۴.

[۱۰] K. Park & et al, "Effect of the martensite distribution on the strain hardening and ductile fracture behaviors in dual-phase steel", *Materials Science and Engineering: A*, vol. ۶۰۴, pp. ۱۳۵-۱۴۱, ۲۰۱۴.

[۱۱] J. Zhang & et al, "Effect of martensite morphology and volume fraction on strain hardening and fracture behavior of martensite-ferrite dual phase steel", *Materials Science and Engineering: A*, vol. ۶۲۷, pp. ۲۳۰-۲۴۰, ۲۰۱۵.

[۱۲] Z. T. Zhao & et al, "Effect of bainite morphology on deformation compatibility of mesostructure in ferrite/bainite dual-phase steel: Mesostructure-based finite element analysis", *Materials & Design*, vol. ۱۸۰, pp. ۱۰۷۸۷۰, ۲۰۱۹.

[۱۳] M. Soliman & H. Palkowski, "Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction", *Materials Science and Engineering: A*, vol. ۷۷۷, pp. ۱۳۹۰۴۴, ۲۰۲۰.

[۱۴] M. Calcagnotto & et al, "Orientation gradients and geometrically necessary dislocations in ultrafine-grained dual-phase steels studied by ۲D and ۳D EBSD", *Materials Science and Engineering: A*, vol. ۵۲۷, pp. ۲۷۳۸-۲۷۴۶, ۲۰۱۰.

[۱۵] Y. Mazaheri & et al, "High strength-elongation balance in ultrafine-grained ferrite-martensite dual phase steels developed by thermomechanical processing", *Materials Science and Engineering: A*, vol. ۷۶۱, pp. ۱۳۸۰۲۱, ۲۰۱۹.

ساختار فولاد دوفازی افزایش و در نتیجه، سختی نیز از ۴۰۳ تا ۴۷۶ و یکرز افزایش یافت.

۲- ازدیاد طول و پارامتر $UTS \times EL$ معیاری از میزان قابلیت جذب انرژی هستند که با افزایش میزان مارتنزیت به ترتیب از ۱۸/۵۲ به ۱۳/۲۹ درصد و از ۲۷۶/۸۷ به J/cm^3 کاهش یافتند.

۳- نمونه آنیل میان بحرانی شده در $۸۵۰^\circ C$ بیشترین میزان استحکام کششی ($۱۵۳۲ MPa$) و نمونه آنیل میان بحرانی شده در $۸۲۵^\circ C$ بیشترین ازدیاد طول و قابلیت جذب انرژی را نشان دادند.

۵- مراجع

[۱] Z. Li & et al, "Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off", *Nature*, vol. ۵۳۴, pp. ۲۲۷-۲۳۰, ۲۰۱۶.

[۲] C. Y. Chen & et al, "A novel technique for developing a dual-phase steel with a lower strength difference between ferrite and martensite", *Materials Today Communications*, vol. ۲۳, pp. ۱۰۰۸۹۵, ۲۰۲۰.

[۳] M. Mahmoudiniya & et al, "Evolution of the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Ferrite-Martensite DP۷۰۰ Dual Phase Steel", *Advanced Processes in Materials Engineering*, vol. ۱۴, pp. ۴۱-۵۱, ۲۰۲۰.

[۴] A. H. Roohi & S. J. Hashemi, "Hole-flanging of ۲۲۰۵ Dual-Phase Steel using Incremental Forming Process", *ADMT Journal*, vol. ۱۴, pp. ۴۳-۴۹, ۲۰۲۱.

[۵] H. Alinejad & B. Korojy, "Effect of As-Cast Microstructure on Recrystallization and Recovery Processes of ۲۳۰۴ Duplex Stainless Steel", *Founding Research Journal*, vol. ۲, pp. ۲۰۱-۲۰۹, ۲۰۱۸.

[۶] S. Xu & et al, "Mechanical properties and deformation mechanisms of a novel austenite-martensite dual phase steel", *International Journal of Plasticity*, vol. ۱۲۸, pp. ۱۰۲۶۷۷, ۲۰۲۰.

[۷] J. Kadkhodapour & et al, "Mechanisms of void formation during tensile testing in a commercial,

Materials Science and Engineering: A, vol. ۶۵۱, pp. ۲۹۱-۳۰۵, ۲۰۱۶.

[۲۶]R. & Rocha et al, "Microstructural evolution at the initial stages of continuous annealing of cold rolled dual-phase steel", Materials Science and Engineering: A, vol. ۳۹۱, pp. ۲۹۶-۳۰۴, ۲۰۰۵.

[۲۷]A. Nouri & et al, "Influence of volume fraction of martensite on the work hardening behaviour of two dual-phase steels with high and low silicon contents", International journal of materials research, vol. ۱۰۱, pp. ۱۲۸۶-۱۲۹۲, ۲۰۱۰.

[۲۸]B. Gao & et al, "Strengthening and ductilization of laminate dual-phase steels with high martensite content", Journal of Materials Science & Technology, vol. ۶۵, pp. ۲۹-۳۷, ۲۰۲۱.

[۲۹]S. Aktarer & et al, "Friction stir processing of dual phase steel: Microstructural evolution and mechanical properties", Materials Characterization, vol. ۱۵۵, pp. ۱۰۹۷۸۷, ۲۰۱۹.

[۳۰]O. Hajizad & et al, "Influence of microstructure on mechanical properties of bainitic steels in railway applications", Metals, vol. ۹, pp. ۷۷۸, ۲۰۱۹.

[۳۱]E. Liu & et al, "Effect of isothermal transformation times below Ms and tempering on strength and toughness of low-temperature bainite in ۰.۵۳ C bainitic steel", Materials, vol. ۱۳, pp. ۲۴۱۸, ۲۰۲۰.

[۳۲]M. Calcagnotto & et al, "Deformation and fracture mechanisms in fine-and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging", Acta Materialia, vol. ۵۹, pp. ۶۵۸-۶۷۰, ۲۰۱۱.

[۳۳]J. Lian & et al, "Theoretical model for the tensile work hardening behaviour of dual-phase steel", Materials Science and Engineering: A, vol. ۱۴۷, pp. ۵۵-۶۵, ۱۹۹۱.

[۳۴]M. R. Akbarpour & A. Ekrami, "Effect of ferrite volume fraction on work hardening behavior of high bainite dual phase (DP) steels", Materials Science and Engineering: A, vol. ۴۷۷, pp. ۳۰۶-۳۱۰, ۲۰۰۸.

[۱۶]B. Bandi & et al, "Effect of manganese bands on austenite formation of low carbon steels in dual phase steel manufacture", Materials Today: Proceedings, vol. ۴۱, pp. ۱۰۳۰-۱۰۳۴, ۲۰۲۱.

[۱۷]A. Molazadeh Kashkouie & et al, "Improvement the wear resistance of ۰.۳۵/C- ۶/Cr martensitic steel via Ti-microalloy addition and modified heat treatment process", Advanced Processes in Materials Engineering, vol. ۹, pp. ۲۳۷-۲۴۸, ۲۰۱۷.

[۱۸]M. Soleimani & et al, "Processing route effects on the mechanical and corrosion properties of dual phase steel", Metals and Materials International, vol. ۲۶, pp. ۸۸۲-۸۹۰, ۲۰۲۰.

[۱۹]H. Torkamani & et al, "Low-carbon cast microalloyed steel intercritically heat-treated at different temperatures: microstructure and mechanical properties", Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. ۲۱, pp. ۱-۱۶, ۲۰۲۱.

[۲۰]N. Fonstein, "۷ - Dual-phase steels, in Automotive Steels: Woodhead Publishing", pp. ۱۶۹-۲۱۶, ۲۰۱۷.

[۲۱]S. Chatterjee & et al, "Direct-cast dual-phase steel", Scripta Materialia - SCRIPTA MATER, vol. ۵۸, pp. ۱۹۱-۱۹۴, ۲۰۰۸.

[۲۲]C. Penforinis & et al, "Experimental and modeling study of the effect of martensite volume fraction on friction and wear of dual-phase steel at microscopic scale", Wear, vol. ۴۸۴, pp. ۲۰۳۷۸, ۲۰۲۱.

[۲۳]P. Movahed & et al, "The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite-martensite dual phase steel sheets", Materials Science and Engineering: A, vol. ۵۱۸, pp. ۱-۶, ۲۰۰۹.

[۲۴]C. Dulucheanu & et al, "Influence of intercritical quenching on the structure and mechanical properties of a dual-phase steel with low manganese content", Materials Today: Proceedings, vol. ۱۹, pp. ۹۴۱-۹۴۸, ۲۰۱۹.

[۲۵]Z. Xiong & et al, "Effect of deformation on microstructure and mechanical properties of dual phase steel produced via strip casting simulation",

۶- پی‌نوشت

[۴] Chatterjee et al

[۵] Penformis et al

[۶] Dulucceanu et al

[۱] Strain Partitioning

[۲] Carbide Inhibitors

[۳] Advanced High Strength Steel