

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بررسی ریزساختار، خواص کششی و بافت فولاد دوفازی استحکام بالای تولید شده توسط عملیات نورد سرد و آنیل

بین بحرانی

حمید اشرفی^{۱*}، ایمان حاجیانیا^۲

مقاله پژوهشی

۱- استادیار، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۲- دکترای مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

* hashrafi@shahroodut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش ریزساختار، خواص کششی و بافت یک فولاد دوفازی استحکام بالا مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا شمش یک فولاد کم کربن دارای منگنز و سیلیسیم توسط ذوب القایی در خلأ تولید و سپس تحت عملیات نورد گرم قرار گرفت. در ادامه، عملیات نورد سرد انجام شد و ورق نورد سرد شده در دمای ۷۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۶۰ ثانیه تحت عملیات آنیل بین بحرانی قرار گرفت و در آب کوئنچ شد. ریزساختار و بافت فولاد تولید شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و تفرق الکترون برگشتی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی خواص کششی فولاد تولید شده از آزمون کشش تک محوره استفاده شد. نتایج نشان داد که ریزساختار فولاد تولید شده شامل جزایر به هم پیوسته مارتنزیتی با کسر حجمی ۶۲٪ در یک زمینه فریتی با متوسط اندازه دانه ۱/۷ میکرون است. این ریزساختار منجر به حصول استحکام کششی فوق‌العاده بالای ۱۲۶۵ مگاپاسکال و حاصلضرب استحکام کششی در ازدیاد طول یک‌نواخت ۱۳۶۲۲ مگاپاسکال درصد شد. بررسی رفتار کارسختی فولاد دوفازی تولید شده بر مبنای آنالیز کرو سارد - جول اصلاح شده نشان‌دهنده یک رفتار کارسختی سه مرحله‌ای بود. بررسی‌های تفرق الکترون برگشتی نشان داد که نورد سرد منجر به تشکیل بافتی شامل رشته α قوی و رشته γ متوسط شده است. پس از آنیل بین بحرانی، رشته α به شدت ضعیف شد درحالی که شدت رشته γ اندکی افزایش یافت. مؤلفه اصلی بافت در فولاد نورد سرد شده [۱۱۰] (۰۰۱) بود، درحالی که بافتی نزدیک به [۱۱۲] (۱۱۱) در مورد فولاد دوفازی مشاهده شد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

کلید واژگان:

فولاد دوفازی

ریزساختار

خواص کششی

بافت.

Study of Microstructure, Tensile Properties and Texture of a High Strength Dual Phase Steel Produced by Cold Rolling and Subsequent Intercritical Annealing

Hamid Ashrafi^{1*}, Iman Hajiannia²

1- Assistant Professor, Faculty of Chemical and Materials Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- PhD in Materials Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

* hashrafi@shahroodut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi: 10.71753/ma.2025.1189875

Abstract

In this study, the microstructure, tensile properties, and texture of a high-strength dual-phase (DP) steel were investigated. Initially, a low-carbon steel containing manganese and silicon was

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Hamid Ashrafi, Iman Hajiannia, Study of Microstructure, Tensile Properties and Texture of a High Strength Dual Phase Steel Produced by Cold Rolling and Subsequent Intercritical Annealing, New Process in Material Engineering, 2025, 19(2), 25-33.

Keywords:

Dual Phase Steel
Microstructure
Tensile Properties
Texture.

produced by vacuum induction melting and then subjected to hot rolling. Subsequently, cold rolling was performed and the cold rolled sheet was intercritically annealed at a temperature of 780 °C for 360 seconds and quenched in water. The microstructure and texture of the produced steel were examined using scanning electron microscopy and electron backscatter diffraction (EBSD). Tensile properties of the produced steel were evaluated using uniaxial tensile testing. The results showed that the microstructure of the produced steel consisted of interconnected martensite islands with a volume fraction of 62% in a ferritic matrix with an average grain size of 7.1 microns. This microstructure resulted in an exceptionally high tensile strength of 1265 MPa and a tensile strength-uniform elongation balance of 13622 MPa%. Investigation of the work hardening behavior of the produced DP steel based on modified Crussard-Jaoul analysis indicated a three-stage hardness behavior. EBSD studies showed that cold rolling led to the formation of a texture consisting of strong α and moderate γ fibers. After intercritical annealing, the α fiber significantly weakened while the intensity of the γ fiber slightly increased. The main texture component in the cold rolled steel was (001)[110], while a texture close to (111)[112] was observed in the DP steel.

۱- مقدمه

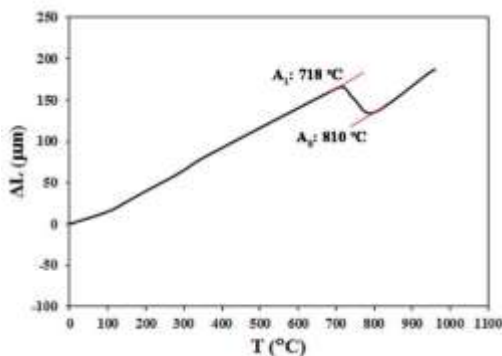
فولادهای دوفازی، به عنوان پرکاربردترین گروه از خانواده فولادهای پیشرفته استحکام بالا، در دهه ۱۹۷۰ توسعه یافتند. ریزساختار این فولادها شامل جزایر سخت مارتنزیتی در یک زمینه نرم فریتی است. این ریزساختار منحصربه‌فرد سبب ایجاد خواص مکانیکی مطلوب نظیر رفتار تسلیم پیوسته، نرخ کارسختی بالا در مراحل ابتدایی تغییر شکل پلاستیک و ازدیاد طول و استحکام کششی بالا در این فولادها می‌شود. این خواص مکانیکی مطلوب سبب جذابیت استفاده از فولادهای دوفازی در اجزای بدنه خودرو شده است [۱-۴].

در کنار ترکیب شیمیایی و ریزساختار، بافت کریستالی نیز از فاکتورهای کلیدی در کنترل خواص فولادهای ساختمانی محسوب می‌شود [۵]. این پارامتر در حین فرایندهای حرارتی - مکانیکی دچار تغییر می‌شود [۶-۸]. این فرایندها مهم‌ترین مراحل برنامه تولید، خصوصاً برای فولادهای مورد استفاده در صنعت خودرو را تشکیل می‌دهند [۹]. با وجود خواص مکانیکی مطلوب و قیمت مناسب، کاربرد گسترده فولادهای دوفازی هنوز به دلیل خاصیت کشش عمیق نه چندان مطلوب که در فرایند شکل‌دهی پرسی فاکتور حیاتی محسوب می‌شود، محدود شده است. بافت کریستالی فریت عاملی تأثیرگذار بر خاصیت کشش عمیق ورق‌های فولاد دوفازی محسوب می‌شود [۱۰-۱۱]. با این وجود، هنوز مطالعات کافی در این زمینه، به‌خصوص در مورد فولادهای دوفازی با استحکام فوق‌العاده بالا (بالای ۱۰۰۰ مگاپاسکال) انجام نشده است. موندال و ری^۱

[۱۲] تغییرات بافت فولادهای دوفازی کربن - منگنز -

وانادیم‌دار را در حین عملیات نورد سرد و آنیل مورد بررسی قرار دادند. این محققین بافت رشته‌ای قوی (۱۱۱) با شدت‌های مختلف را برای بافت تغییر شکل و تبلور مجدد مشاهده کردند. رائوماندی و همکاران^۲ [۱۳] بافت فولاد دوفازی فوق‌ریزدانه میکروآلیاژ شده با نیوبیم که با نورد سرد و آنیل بین بحرانی تولید شده بود را مورد مطالعه قرار دادند. آنان بافتی با رشته‌های قوی α و γ را در حالت پس از نورد سرد مشاهده کردند. پس از آنیل بین بحرانی، مؤلفه [۱۱۰] (۱۱۲) ناپدید و مؤلفه [۱۱۲] (۱۱۱) در رشته γ توسعه یافت. قاطعی کلاشمی و همکاران [۱۴] اثر مقدار نیوبیم را بر تغییرات بافت یک فولاد دوفازی فوق‌ریزدانه مورد بررسی قرار دادند. این محققین با نورد سرد و آنیل بین بحرانی یک ساختار اولیه فریت - مارتنزیت، فولاد دوفازی فوق‌ریزدانه تولید کردند. نتایج آنان نشان داد که شدت مؤلفه‌های رشته (۱۱۱) که در بهبود شکل‌پذیری ورق‌های فولادی نقش دارند، با افزایش میزان نیوبیم افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که تمرکز مطالعات فوق عمدتاً بر خواص مکانیکی فولادهای دوفازی بوده و تنها بخش محدودی به اندازه‌گیری بافت اختصاص یافته است.

با وجود اهمیت بافت کریستالی بر شکل‌پذیری و خواص مکانیکی فولادهای دوفازی، تاکنون مطالعات در این زمینه محدود بوده است؛ بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی تغییرات بافت در حین نورد سرد و آنیل بین بحرانی یک فولاد دوفازی با استحکام بالا انجام شد. در این راستا، ابتدا شمش یک



شکل (۱): منحنی گرمایش دیلاتومتری فولاد مورد بررسی تحت نرخ گرمایش ۵۵/۰ درجه سانتی گراد بر ثانیه.

ریزساختار مقطع فولاد دوفازی تولید شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی فیلپس^۳ مدل XL30 مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها جهت بررسی ریزساختار مانت شده تا سنباده ۴۰۰۰ سنباده‌زنی شده و توسط سوسپانسیون آلومینای ۰/۳ میکرونی پولیش شدند. نمونه‌های آماده شده در پایان توسط محلول نایتال ۲٪ حکاکی شده و مورد بررسی قرار گرفتند. اندازه دانه و کسر حجمی فازها در فولاد تولید شده توسط نرم‌افزار پردازش تصویر Image J اندازه‌گیری شدند. جهت بررسی بافت نمونه‌ها توسط آنالیز تفرق الکترون برگشتی^۴، نمونه‌های آماده شده جهت بررسی ریزساختاری توسط خمیر الماسه ۱ میکرونی پولیش شده و در مرحله پایانی توسط دوغاب سیلیس کلونیدی (۰/۰۴ میکرون) پولیش شدند. در ادامه بافت نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۵ (JSM7001A) مجهز به آشکارساز تفرق الکترون برگشتی (EDAX Hikari Pro) که در ولتاژ ۲۰ کیلوولت کار می‌کرد، مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی‌ها توسط تفرق الکترون‌های برگشتی، اندازه گام ۰/۲ میکرونی مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات خام به‌دست آمده توسط نرم‌افزار ATEX [۱۵] پردازش شدند.

نمونه‌های کشش (طول سنج ۶/۴ میلی‌متر، پهنای ۲/۵ میلی‌متر، ضخامت ۱ میلی‌متر) توسط وایرکات از فولاد دوفازی تولید شده تهیه شد. این نمونه‌ها با سرعت حرکت فک ۱ میلی‌متر بر

فولاد کم کربن دارای منگنز تولید شده و سپس تحت عملیات نورد گرم و نورد سرد قرار گرفت. در ادامه، ورق فولادی تحت عملیات آنیل بین بحرانی قرار گرفت و در آب کوئنچ شد تا فولاد دوفازی با استحکام فوق‌العاده بالا تولید شود. در ادامه ریزساختار، خواص کششی و بافت فولاد تولید شده مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

یک شمش از فولاد کم کربن دارای منگنز و سیلیسیم با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول (۱) توسط روش ذوب القایی در خلأ ریخته‌گری شد. این شمش به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد همگن‌سازی و در کوره تا دمای محیط سرد شد. شمش همگن‌سازی شده سپس از ضخامت ۳۰ میلی‌متر به ضخامت ۳ میلی‌متر نورد گرم و در هوا سرد شد. ورق نورد گرم شده در ادامه تا ضخامت ۱ میلی‌متر نورد سرد و در دمای ۷۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳۶۰ ثانیه تحت عملیات آنیل بین بحرانی قرار گرفت و در آب کوئنچ شد تا فولاد دوفازی نهایی تولید شود. دماهای بحرانی A_1 و A_3 توسط آزمون دیلاتومتری، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، تعیین شدند.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این پژوهش (درصد وزنی).

عنصر	درصد وزنی
کربن	۰/۱۸
منگنز	۲/۴۵
سیلیسیم	۱/۱
گوگرد	۰/۰۳۶
فسفر	۰/۰۴۸
کروم	۰/۰۵۸
وانادیوم	۰/۰۲
نیکل	۰/۰۴
مس	۰/۰۸
آلومینیوم	۰/۰۱
آهن	بقیه

دقیقه توسط دستگاه هانسفیلد^۶ مدل H50KS تحت آزمون کشش قرار گرفتند. جهت به دست آوردن میانگین خواص مکانیکی، آزمون کشش سه مرتبه تکرار شد.

۳- نتایج و بحث

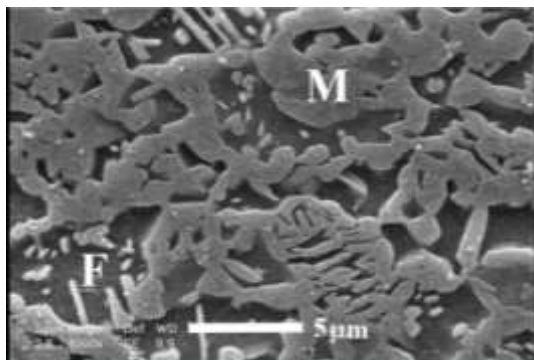
۳-۱- ریزساختار

تصویر میکروسکوپی الکترونی رویشی از ریزساختار فولاد دوفازی تولید شده در شکل (۲) ارائه شده است. این تصویر جزایر مارتنزیتی به هم پیوسته را در یک زمینه فریتی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مطابق شکل (۲)، فاز فریت به دلیل مقاومت کمتر در برابر خوردگی عمیق‌تر از فاز مارتنزیت خورده شده است. کسر حجمی مارتنزیت در این ساختار برابر ۶۲٪ و متوسط اندازه دانه فریت برابر ۱/۷ میکرون اندازه‌گیری شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هم دانه‌های فوق‌ریز و هم دانه‌های درشت فریت در ریزساختار حضور دارند. علاوه بر این، با وجود کسر حجمی بالا، جزایر مارتنزیتی به‌صورت بلوک‌های درشتی که معمولاً در فولادهای دوفازی با کسر حجمی بالای مارتنزیت مشاهده می‌شوند، درنیامده‌اند. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود درصد نسبتاً بالای سیلیم در فولاد باشد. مشخص شده است که سیلیم با جلوگیری از تشکیل کاربید اکتیوخته کربن در آستنیت را بالا برده و بنابراین نیرو محرکه استحاله آستنیت به فریت را افزایش می‌دهد. در نتیجه، آستنیت به‌شدت توسط فریت پرویوتکتوئید تکه تکه شده که منجر به تشکیل مارتنزیت ریز و پراکنده پس از کوئنچ می‌شود [۱۶].

یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر خواص مکانیکی فولادهای دوفازی میزان کربن مارتنزیت است. در اینجا غلظت کربن فاز مارتنزیت (C_M) را می‌توان با در نظر گرفتن موازنه بین کربن کلی فولاد (C) و کربن فازهای تشکیل‌دهنده محاسبه نمود [۱۷]:

$$C_M = \frac{C - C_F(1 - V_M)}{V_M} \quad (1)$$

در اینجا C_F غلظت کربن در فاز فریت و V_M کسر حجمی مارتنزیت است. با در نظر گرفتن مقدار ۰/۱۵ درصد وزنی برای C_F ، C_M برابر ۰/۲۷ درصد وزنی محاسبه شد. مطابق با دیگرام آهن - کربن و قانون اهرم، دمای آنیل بین بحرانی بالا منجر به کسر حجمی بالای آستنیت با میزان کربن پایین می‌شود که در ادامه پس از کوئنچ در آب این آستنیت تبدیل به مارتنزیت کم کربن می‌شود. سختی مارتنزیت رابطه مستقیمی با مقدار کربن آن دارد [۱۸]؛ بنابراین، انتظار نمی‌رود که مارتنزیت نسبتاً کم کربن تشکیل شده در فولاد دوفازی حاضر دارای سختی بالایی باشد که این می‌تواند برای خواص مکانیکی کلی فولاد مفید باشد، زیرا سختی کمتر مارتنزیت میزان تفکیک کرنش بین فازهای فریت و مارتنزیت را کاهش می‌دهد [۱۹].



شکل (۲): تصویر میکروسکوپی الکترونی رویشی از ریزساختار فولاد دوفازی تولید شده.

۳-۲- رفتار کششی

شکل (۳- الف) منحنی تنش - کرنش مهندسی فولاد دوفازی تولید شده را نشان می‌دهد. در این منحنی رفتار تسلیم پیوسته متداول فولادهای دوفازی مشاهده می‌شود. تنش تسلیم فولاد دوفازی تولید شده برابر ۹۰۳ مگاپاسکال، استحکام کششی نهایی آن ۱۲۶۵ مگاپاسکال و ازدیاد طول یکنواخت آن برابر ۱۰/۸ درصد اندازه‌گیری شد. با توجه به کسر نسبتاً بالای مارتنزیت و ریزدانه بودن زمینه فریتی، استحکام فوق‌العاده

شکل (۳): الف) منحنی تنش - کرنش مهندسی و ب) منحنی آنالیز MC-J برای فولاد دوفازی تولید شده.

رفتار کارسختی فولاد دوفازی تولید شده طبق روش کروسارد - جول اصلاح شده^۷ (MC-J) مورد بررسی قرار گرفت [۲۳]:

$$Ln\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right) = (1 - m)Ln\sigma - Ln(km) \quad (۲)$$

که بر مبنای رابطه سویفت^۸ برای منحنی تنش و کرنش حقیقی است [۲۴]:

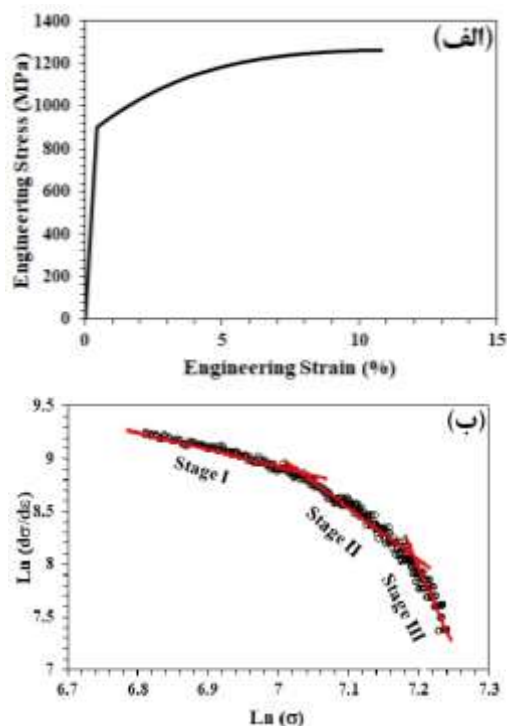
$$\varepsilon = \varepsilon_0 + k\sigma^m \quad (۳)$$

در اینجا σ و ε به ترتیب تنش حقیقی و کرنش حقیقی، m معکوس نمای کارسختی و k و ε_0 ثابت‌های ماده هستند. مطابق با آنالیز MC-J، شیب منحنی $Ln(d\sigma/d\varepsilon)$ برحسب $Ln(\sigma)$ برابر $(1-m)$ است. شکل (۳-ب) منحنی آنالیز MC-J را برای فولاد دوفازی تولید شده نشان می‌دهد. این منحنی نشان‌دهنده یک رفتار کارسختی سه مرحله‌ای است که در مطالعات قبلی نیز در مورد فولادهای دوفازی مشاهده شده است [۲۵]. در مرحله اول با کمترین شیب که نشان‌دهنده ظرفیت کارسختی بالاست، فاز فریت دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود درحالی‌که فاز مارتنزیت در ناحیه الاستیک قرار دارد. در مرحله دوم که شیب بیشتری دارد، از تغییر شکل پلاستیک فریت توسط فاز مارتنزیت ممانعت می‌شود. مرحله سوم با بیشترین شیب که نشان‌دهنده کمترین ظرفیت کارسختی است، به تغییر شکل پلاستیک هم‌زمان فریت و مارتنزیت مربوط می‌شود.

۳-۳- بافت

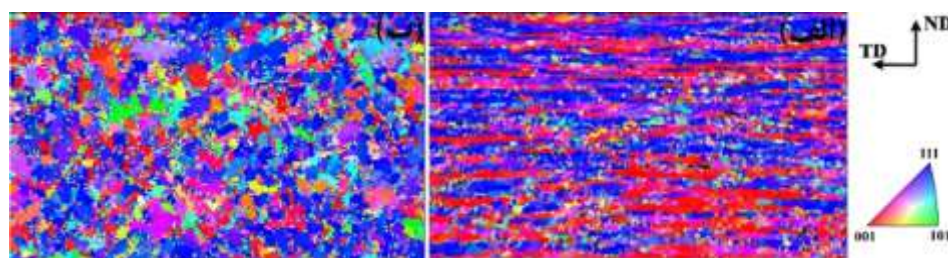
شکل (۴) تصویر قطبی معکوس^۹ از فولاد نورد سرد شده و فولاد دوفازی تولید شده را نشان می‌دهد. این تصویر قطبی جهات کریستالی را به موازات جهت عمود بر نورد (ND) نشان می‌دهد. ارتباط بین جهات کریستالی و رنگ‌های مختلف

بالایی در فولاد تولید شده حاصل شده است. با وجود استحکام بسیار بالا، فولاد تولید شده از ازدیاد طول قابل قبولی نیز برخوردار است، به گونه‌ای که حاصلضرب استحکام کششی در ازدیاد طول یکنواخت آن به حدود ۱۳۶۲۲ مگاپاسکال درصد می‌رسد که در مقایسه با فولادهای دوفازی با استحکام یکسان بالاتر است. به طور مثال، در پژوهش مظاهری و همکاران [۲۰]، حاصلضرب استحکام کششی در ازدیاد طول یکنواخت برای فولاد دوفازی با استحکام کششی ۱۳۰۰ مگاپاسکال برابر ۱۱۷۶۵ مگاپاسکال درصد گزارش شده است. قاطعی کلاشمی و همکاران [۲۱] نیز مقدار ۱۱۵۰۰ مگاپاسکال درصد را به عنوان حاصلضرب استحکام کششی در ازدیاد طول یکنواخت فولاد دوفازی با استحکام کششی حدود ۱۲۰۰ مگاپاسکال گزارش کرده‌اند. لازم به ذکر است که حاصلضرب استحکام کششی در ازدیاد طول معیاری از جذب انرژی وسیله نقلیه در حین تصادف است و پارامتر مهمی در انتخاب ماده برای اجزاء بدنه خودرو محسوب می‌شود [۲۲].



(شکل ۴-ب)، کسر دانه‌های آبی رنگ نسبت به دانه‌های دارای رنگ‌های دیگر بیشتر است که نشان می‌دهد جهت [۱۱۱] بیشتر دانه‌ها به موازات جهت عمود بر نور قرار دارد.

توسط مثلث استریوگرافی در سمت راست تصویر مشخص شده است. در فولاد نورد سرد شده (شکل ۴-الف)، بیشتر دانه‌ها به رنگ‌های آبی، قرمز و بنفش دیده می‌شوند درحالی‌که به‌ندرت دانه سبزرنگ در ساختار مشاهده می‌شود. برای فولاد دوفازی



شکل (۴): تصویر قطبی معکوس از: (الف) فولاد نورد سرد شده و (ب) فولاد دوفازی تولید شده.

حداکثر شدت ۷/۵ برابر توزیع تصادفی وجود دارد. از طرف دیگر، شدت بافت در امتداد رشته γ برای این نمونه متوسط بود. این نوع بافت به‌طور متداول در فولادهای bcc نورد سرد شده مشاهده می‌شود [۲۷-۲۸].

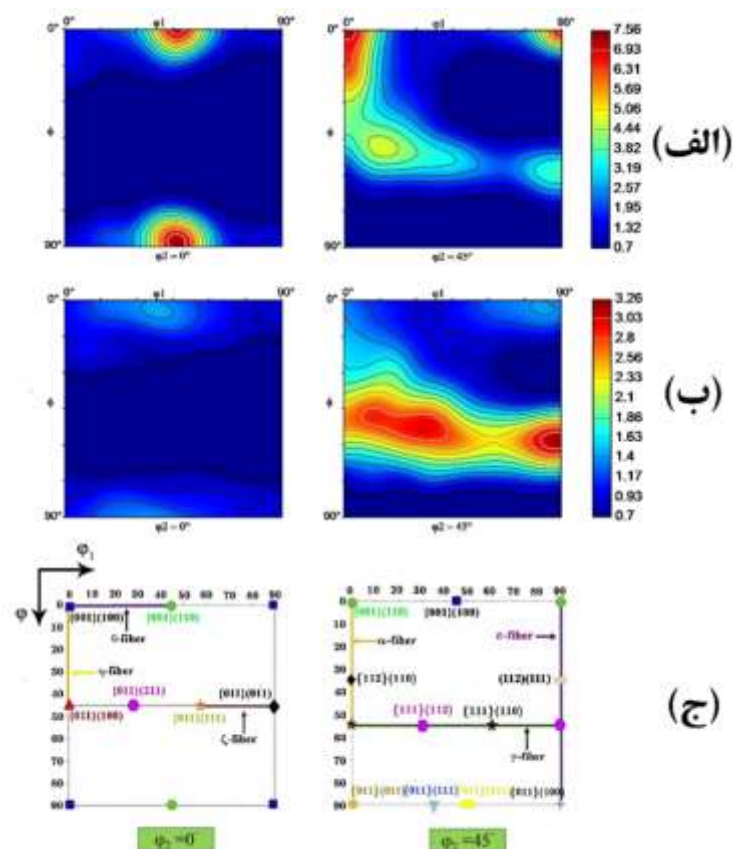
برای فولاد دوفازی (شکل ۵-ب)، شدت کلی بافت نسبت به فولاد نورد سرد شده کمتر بود. علاوه بر این، رشته α تقریباً ناپدید شده بود درحالی‌که شدت رشته γ اندکی افزایش یافته بود. مؤلفه اصلی بافت برای فولاد نورد سرد شده [۱۱۰](۰۰۱) بود، درحالی‌که بافتی نزدیک به [۱۱۲](۱۱۱) در مورد فولاد دوفازی مشاهده شد. مؤلفه ذکر شده به‌عنوان بافت تبلور مجدد در فولادهای دارای ساختار bcc شناخته می‌شود [۵]. ضعیف شدن رشته α و افزایش نسبی شدت رشته γ در حین آنیل بین بحرانی به دلیل تفاوت بین

مقاطع تابع توزیع جهت^{۱۰} از فولادهای نورد سرد شده و دوفازی، به همراه مقاطع نشان‌دهنده مؤلفه‌های بافت نوردی ایده‌آل فلزات bcc در شکل (۵) ارائه شده است. این مقاطع رشته‌های مهم در مواد دارای ساختار bcc را نشان می‌دهند که رشته‌های α و γ به‌عنوان دو رشته از این رشته‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۶]:

رشته α : محور رشته، یعنی [۱۱۰]، به موازات جهت نورد قرار می‌گیرد (شامل مؤلفه‌های بافت [۱۱۰](۰۰۱)، [۱۱۰](۱۱۲) و [۱۱۰](۱۱۱))

رشته γ : محور رشته، یعنی [۱۱۱]، با جهت عمود بر نورد موازی است (شامل مؤلفه‌های بافت [۱۱۰](۱۱۱) و [۱۱۲](۱۱۱))

همان‌طور که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود، در فولاد نورد سرد شده چگالی جهت‌گیری بالایی در امتداد رشته α با



شکل (۵). مقاطع تابع توزیع جهت: الف) فولاد نورد سرد شده، ب) فولاد دوفازی، و ج) مواد bcc که رشته‌های مهم را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک فولاد دوفازی استحکام بالا با نورد سرد و آنیل بین بحرانی یک فولاد کم کربن دارای منگنز و سیلیسیم تولید شد. در ادامه ریزساختار، خواص کششی و بافت آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده به شرح زیر هستند:

- فولاد دوفازی با ریزساختاری شامل ۶۲٪ حجمی جزایر به هم پیوسته مارتنزیتی در زمینه فریتی بود. دانه‌های فریت هم دارای اندازه فوق‌ریز و هم اندازه درشت‌تر بودند.
- فولاد دوفازی تولید شده دارای استحکام کششی قابل توجه ۱۲۶۵ مگاپاسکال و حاصلضرب استحکام کششی در ازدیاد طول ۱۳۶۲۲ مگاپاسکال درصد بود که برای کاربرد در بدنه خودرو خواص مطلوبی هستند. همچنین، بر مبنای آنالیز کرو سارد - جول اصلاح شده، فولاد دوفازی تولید شده رفتار کارسختی سه مرحله‌ای از خود نشان داد.

انرژی ذخیره شده در نواحی با جهت‌گیری‌های مختلف قبل از عملیات آنیل مربوط می‌شود. به دلیل اینکه تبلور مجدد در حجم دارای انرژی بالاتر آغاز می‌شود، انتظار می‌رود جوانه‌های بیشتری در نواحی رشته γ نسبت به نواحی رشته α تشکیل شوند. جوانه در ادامه به داخل نواحی تبلور مجدد نیافته که در ابتدا کسر رشته α بیشتر بوده است، رشد می‌کند و منجر به کاهش کسر سطحی این رشته و افزایش کسر رشته γ در بافت پس از آنیل بین بحرانی می‌شود. مشخص شده است که شکل‌پذیری ورق‌های فولادی نورد و آنیل شده با ساختار bcc با افزایش کسر حجمی رشته γ افزایش می‌یابد [۲۹]؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که بافت مطلوبی از نظر شکل‌پذیری در فولاد دوفازی استحکام بالای تولید شده ایجاد شده است.

[8] J. I. Omale, E. G. Ohaeri, A. A. Tihamiyu, M. Eskandari, K. M. Mostafijur & J. A. Szpunar, "Microstructure, texture evolution and mechanical properties of X70 pipeline steel after different thermomechanical treatments", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 703, pp. 477–485, 2017.

[9] Y. Weng, H. Dong & Y. Gan, "Advanced Steels: The Recent Scenario in Steel Science and Technology", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2011.

[10] Z. G. Wang, A. M. Zhao, Z. Z. Zhao, J. Y. Ye, J. J. Chen & J. G. He, "Precipitation behavior and textural evolution of cold-rolled high strength deep drawing dual-phase steels", *J. Iron Steel Res. Intl*, vol. 20, pp. 61-68, 2013.

[11] S. H. Han, S. H. Choi, J. K. Choi, H. G. Seong & I. B. Kim, "Effect of hot-rolling processing on texture and r-value of annealed dual-phase steels", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, pp. 1686–1694, 2010.

[12] D. K. Mondal & R. K. Ray, "Development of {111} texture during cold rolling and recrystallization of a C-Mn-V dual-phase steel", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 158, pp. 147-156, 1992.

[14] P. Rao-Mondi, R. Madhavan, V. Subramanya-Sarma, & S. Sankaran, "Study of texture in ultra fine grained dual phase steel sheets", *Mater. Sci. Forum*, vol. 702-703, pp. 806-809, 2012.

[15] A. Ghatei-Kalashami, A. Kermanpur, E. Ghassemali, A. Najafizadeh & Y. Mazaheri, "The effect of Nb on texture evolutions of the ultrafine-grained dual-phase steels fabricated by cold rolling and intercritical annealing", *J. Alloy Compd*, vol. 694, pp. 1026-1035, 2017.

[16] B. Beausir & J. J. Fundenberger, "Analysis Tools for Electron and X-ray diffraction", *ATEX—software*, www.atex-software.eu, Université de Lorraine - Metz, 2017.

[17] I. Hajiannia, M. Shamanian, M. Atapour, E. Ghassemali & N. Saeidi, "Development of ultrahigh strength TRIP steel containing high volume fraction of martensite and study of the microstructure and tensile behavior", *Trans. Indian Inst. Met*, vol. 71, pp. 1363–1370, 2018.

[18] Y. Mazaheri, A. Kermanpur, A. Najafizadeh & "A novel route for development of ultrahigh strength dual phase steels", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 619, pp. 1-11, 2014.

- نورد سرد منجر به تشکیل بافتی شامل چگالی بالای جهت‌گیری در امتداد رشته α و چگالی جهت‌گیری متوسط در امتداد رشته γ شد. پس از آنیل بین بحرانی، رشته α تقریباً ناپدید شد درحالی‌که شدت رشته γ اندکی افزایش یافت. مؤلفه اصلی بافت در فولاد نورد سرد شده [۱۱۰] [۱۱۱] بود، درحالی‌که بافتی نزدیک به [۱۱۲] [۱۱۱] در مورد فولاد دوفازی مشاهده شد.

۵- منابع

- [1] P. Dastur, C. Slater, T. Moore & C. Davis, "Martensite size and morphology influence on strain distribution and micro-damage evolution in dual-phase steels; comparing segregation-neutralised and banded grades", *Materials & Design*, vol. 246, p. 113340, 2024.
- [2] J. Cui, K. Li, Z. Yang, Z. Wu & Y. Wu, "Investigation of effects of aluminum additions on microstructural evolution and mechanical properties of ultra-high strength and vanadium bearing dual-phase steels", *J. Mater. Res. Technol*, vol. 31, pp. 1117-1131, 2024.
- [3] H. Ashrafi, M. Shamanian, R. Emadi & M. A. Sarmadi, "Effect of welding parameters on the microstructure and tensile properties of friction stir-welded DP600 steel", *SAE Int. J. Mater. Manuf*, vol. 12, pp. 165-177, 2019.
- [4] M. S. Rashid, "Dual phase steels", *Ann. Rev. Mater. Sci*, vol. 11, pp. 245-266, 1981.
- [5] M. Holscher, D. Raabe & K. Lu'cke, "Rolling and recrystallization textures of bcc steels", *Mater. Technol*, vol. 62, pp. 567–575, 1991.
- [6] E. Ohaeri, J. Szpunar, F. Fazeli & M. Arafim, "Hydrogen induced cracking susceptibility of API 5L X70 pipeline steel in relation to microstructure and crystallographic texture developed after different thermomechanical treatments", *Mater. Charact*, vol. 145, pp. 142-156, 2018.
- [7] V. Javaheri, N. Khodaie, A. Kaijalainen, & D. Porter, "Effect of niobium and phase transformation temperature on the microstructure and texture of a novel 0.40% C thermomechanically processed steel", *Mater. Charact*, vol. 142, pp. 295–308, 2018.

- [26] Y. Najafi, Y. Mazaheri, Z. D. Ragheb & H. Daiy, "Multi-stage strain-hardening behavior of dual-phase steels: A review", J. Mater. Res. Technol, vol. 31, pp. 3860-3882, 2024.
- [27] R. Joodaki, S. R. A. Zaree, K. Gheisari & M. Eskandari, "Effect of annealing treatments on the microstructure and texture development in API 5L X60 microalloyed pipeline steel", J. Mater. Eng. Perform, vol. 26, pp. 2003–2013, 2017.
- [28] M. Eskandari, M. A. Mohtadi-Bonab & J. A. Szpunar, "Evolution of the microstructure and texture of X70 pipeline steel during cold-rolling and annealing treatments", Mater. des, vol. 90, pp. 618-627, 2016.
- [29] L. A. I. Kestens & H. Pirgazi, "Texture formation in metal alloys with cubic crystal structures", Mater. Sci. Technol, vol. 32, pp 1303-1315, 2016.
- [30] J. Y. Kang, H. C. Lee & S. H. Han, "Effect of Al and Mo on the textures and microstructures of dual phase steels", Mater. Sci. Eng. A, vol. 530, pp. 183-190, 2011.
- [19] M. Alibeyki, H. Mirzadeh, M. Najafi & A. Kalhor, "Modification of rule of mixtures for estimation of the mechanical properties of dual-phase steels", J. Mater. Eng. Perform, vol. 26, pp. 2683-2688, 2017.
- [20] Q. Han, A. Asgari, P. D. Hodgson & N. Stanford, "Strain partitioning in dual-phase steels containing tempered martensite", Mater. Sci. Eng. A, vol. 611, pp. 90-99, 2014.
- [21] Y. Mazaheri, A. Kermanpour & A. Najafizadeh, "Microstructures, mechanical properties, and strain hardening behavior of an ultrahigh strength dual phase steel developed by intercritical annealing of cold-rolled ferrite/martensite", Metal. Mater. Trans. A, vol. 46, pp. 3052-3062, 2015.
- [22] A. G. Kalashami, A. Kermanpur, A. Najafizadeh & Y. Mazaheri, "Effect of Nb on microstructures and mechanical properties of an ultrafine-grained dual phase steel", J. Mater. Eng. Perform, vol. 24, pp. 3008-3017, 2015.
- [23] H. Ashrafi, M. Shamanian, R. Emadi & N. Saeidi, "Correlation of tensile properties and strain hardening behavior with martensite volume fraction in dual-phase steels", Trans. Indian Inst .Met, vol. 70, pp. 1575–1584, 2017.
- [24] R. E. Reed-Hill, W. R. Cribb & S. N. Monteiro, "Concerning the analysis of tensile stress-strain data using $\log d\sigma/d\epsilon_p$ versus $\log \sigma$ diagrams", Metall. Trans, vol. 4, pp. 2665-2667, 1973.
- [25] H. W. Swift, "Plastic instability under plane stress", J. Mech. Phys. Solids, vol. 1, pp. 1-18, 1952.

۶- پی نوشت

- [1] Mondal & Ray
 [2] Rao-Mondi
 [3] Philips
 [4] Electron Backscatter Diffraction (EBSD)
 [5] Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)
 [6] Hounsfield -
 [7] Modified Crussard-Jaoul (MC-J)
 [8] Swift
 [9] Inverse Pole Figure (IPF) map
 [10] Orientation Distribution Function (ODF)