

Effect of Martensite Morphology on Tensile Behavior of Dual Phase Steel with Ferrite-Martensite Microstructure

*Hamid Ashrafi¹

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

Citation: Ashrafi H. Effect of Martensite Morphology on Tensile Behavior of Dual Phase Steel with Ferrite-Martensite Microstructure, Metallurgical Engineering, 2024; 27(3): 202-208 <https://doi.org/10.22076/me.2024.2026799.1399>

 <https://doi.org/10.22076/me.2024.2026799.1399>

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the effect of martensite morphology on tensile behavior of dual phase (DP) steel. For this propose, a cold-rolled low carbon steel (0.18wt.%C and 1.25wt.% Mn) was subjected to three different heat treatment cycles with the names of intercritical annealing (IA), step quenching (SQ) and intermediate quenching (IQ). IA cycle included an isothermal annealing in the intercritical region followed by water quenching, SQ included an austenitization step followed by intercritical annealing and water quenching, and IQ included an austenitization and water quenching to obtain a fully martensitic microstructure and subsequent intercritical annealing of this martensitic microstructure to obtain a DP microstructure. According to the results, the DP steel obtained by IQ which contained fine and fibrous martensite in the ferrite matrix had the highest ultimate tensile strength, uniform and total elongation and work hardening magnitude, while the step-quenched sample which contained large and blocky martensite in the ferrite matrix had the lowest value for the mentioned properties. All the samples showed a two-stage work hardening behavior based on the Hollomon analysis. The dominant fracture mechanism for all samples was ductile fracture mode.

Keywords: Dual phase steel; Microstructure; Tensile properties.

Received: April 18, 2024

Accepted: July 1, 2024

■ ■
*Corresponding Author:

Hamid Ashrafi, PhD

Address: Faculty of Chemical and Materials Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Tel: +98 (23) 32300257

E-mail: hashrafi@shahroodut.ac.ir

اثر مورفولوژی مارتنزیت بر رفتار کششی فولاد دوفازی با ساختار فریت-مارتنزیت

*حمید اشرفی^۱

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

چکیده

هدف پژوهش حاضر بررسی تاثیر مورفولوژی مارتنزیت بر خواص کششی فولاد دوفازی بود. بدین منظور، یک فولاد کم کربن (۰/۱۸) درصد کربن و ۱/۲۵ درصد منگنز) نورد سرد شده تحت سه سیکل عملیات حرارتی مختلف با نام‌های آنیل بین بحرانی که شامل آنیل هم‌دمای فولاد اولیه در ناحیه بین بحرانی و کونچ در آب بود، کونچ پله‌ای که شامل عملیات آستنیت‌زدن و آنیل بین بحرانی بعد از آن و کونچ در آب بود، و کونچ میانی که شامل آستنیت‌زدن و کونچ در آب به منظور بدست آوردن ساختار مارتنزیتی و در ادامه آنیل بین بحرانی آن و کونچ در آب به منظور حصول ساختار دوفازی بود، قرار گرفت. طبق نتایج بدست آمده، فولاد دوفازی تولید شده با استفاده از عملیات کونچ میانی که شامل مارتنزیت ریز و فیبری در زمینه فریت بود، دارای بالاترین استحکام کششی نهایی، ازدیاد طول یکنواخت و کل و بیشترین میزان کارسختی بود در حالیکه نمونه تولید شده توسط فرایند کونچ پله‌ای که دارای فاز مارتنزیت بلوکی و درشت در زمینه فریت بود، دارای کمترین مقدار خصوصیات ذکر شده بود. همه فولادهای دوفازی تولید شده رفتار کارسختی دمرحله‌ای بر مبنای آنالیز هولمن نشان دادند. مکانیزم غالب شکست در همه نمونه‌ها به صورت شکست نرم بود.

واژه‌های کلیدی: فولاد دوفازی، ریزساختار، خواص کششی.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰ | پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱

۱. مقدمه

فولادهای دوفازی رایج‌ترین نوع فولادهای پیشرفته استحکام بالا هستند که شامل ۱۰ تا ۵۰ درصد حجمی از جزایر مارتنزیتی پراکنده شده در یک زمینه نرم فریتی می‌باشند [۱]. مطالعات اخیر نشان داده است که در آینده فولادهای دوفازی می‌توانند تا ۸۰ درصد از وزن کل اتومبیل‌ها را تشکیل دهند [۲]. این به خواص مکانیکی مطلوب این فولادها از قبیل رفتار تسلیم پیوسته، نرخ کارسختی بالا در شروع تغییر شکل، نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی پایین و انعطاف‌پذیری مناسب این فولادها مربوط می‌شود [۳]. خواص مکانیکی فولادهای دوفازی توسط فاکتورهای زیادی مانند اندازه دانه، بافت و کسر حجمی مارتنزیت تعیین می‌شود [۴]. به دلیل این خواص فوق العاده، استفاده از فولادهای دوفازی یکی

از روش‌های اصلی در کاهش وزن وسایل نقلیه و کاهش مصرف سوخت شده است، در حالیکه مقاومت آن در برابر تصادفات را نیز بهبود می‌بخشد [۵]. فولادهای دوفازی را می‌توان با استفاده از سه روش تولید کرد: آنیل بین بحرانی (Intercritical Annealing)، کونچ پله‌ای (Step Quenching) و کونچ میانی (Intermediate Quenching). در روش آنیل بین بحرانی، یک فولاد با ساختار فریتی-پرلیتی و ترکیب شیمیایی مناسب به صورت هم‌دما در دمایی بین دماهای بحرانی A_1 و A_3 از دیاگرام فازی آهن-کربن آنیل شده و سپس کونچ می‌شود. کونچ پله‌ای شامل آستنیت‌زدن یک فولاد کم کربن در دمایی بالاتر از دمای بحرانی A_3 و در ادامه آنیل در ناحیه بین بحرانی و کونچ در آب است. در کونچ میانی، فولاد ابتدا آستنیت و کونچ

* نویسنده مسئول:

دکتر حمید اشرفی

نشانی: تهران، شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی شیمی و مواد

تلفن: ۰۲۵۷ ۳۲۳۰ (۲۳) ۹۸+

پست الکترونیکی: hashrafi@shahroodut.ac.ir

- کوئنچ پله‌ای (SQ): آستنیت به کردن در دمای ۹۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه، سرد کردن تا دمای بین بحرانی ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد در مدت ۲ دقیقه و نگهداری به مدت ۱ ساعت، کوئنچ در آب

- کوئنچ میانی (IQ): آستنیت به کردن در دمای ۹۶۰ درجه سانتی‌گراد و کوئنچ در آب، گرم کردن تا دمای بین بحرانی ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد و نگهداری به مدت ۱ ساعت، کوئنچ در آب

ریزساختار فولادهای تولید شده توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، نمونه‌های متالوگرافی فولادهای دوفازی تولید شده به روش‌های مختلف توسط سنباده‌زنی و پولیش آماده شده و با ۵ ثانیه قرارگیری در محلول نایتال ۲ درصد و ۱۰ ثانیه قرارگیری در محلول آبی پتاسیم متابیوسولفات ۲۰ درصد حکاکی شدند. کسر حجمی مارتنزیت در نمونه‌های دوفازی با استفاده از نرم‌افزار Image J و مطابق با استاندارد 83-562 ASTM E تعیین شد. تعیین اندازه دانه با استفاده از روش خطوط متقاطع و با استفاده از استاندارد 96-112 ASTM E انجام شد. نمونه‌های تست کشش با طول گیج ۱۲/۶ میلی‌متر، پهنای ۵ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر از ورق‌های فولادی عملیات حرارتی شده بریده شدند و تحت آزمون کشش تک محوره با سرعت ثابت حرکت فک ۱ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. سطوح شکست نمونه‌های کشش نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند.

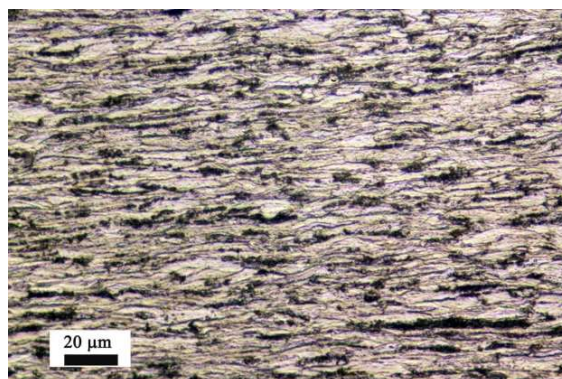
می‌شود تا ساختار مارتنزیتی بدست آید. این ساختار آستنیتی در ادامه تحت آنیل بین بحرانی قرار گرفته و کوئنچ می‌شود تا ساختار دوفازی حاصل شود [۶]. نتایج تحقیقات نشان داده است که روش‌های مختلف تولید فولادهای دوفازی منجر به ایجاد ریزساختارهای مختلف در این فولادها می‌شود.

با توجه به مطالب ذکر شده، هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر مورفولوژی مارتنزیت بر رفتار کششی فولاد دوفازی در نظر گرفته شد. در این راستا ابتدا فولادهای دوفازی با ترکیب شیمیایی مشخص با استفاده از سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی تولید شدند. در ادامه ریزساختار، خواص کششی و رفتار کارسختی فولادهای تولید شده مورد بررسی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه شدند.

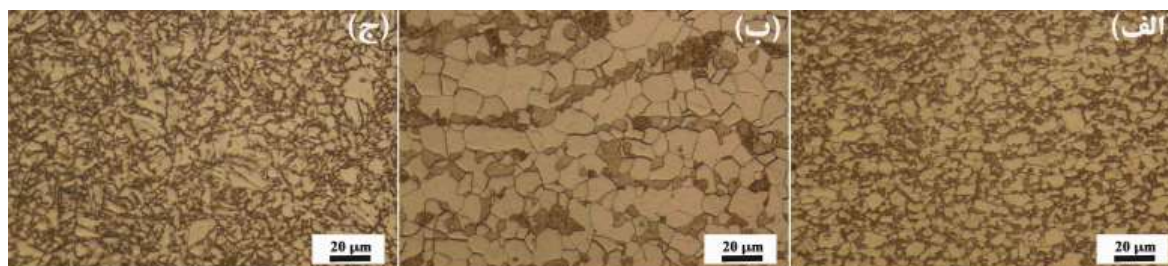
۲. مواد و روش تحقیق

ماده اولیه مورد استفاده در این پژوهش ورق نورد سرد شده فولاد ۵۲۳t (۰/۱۸ درصد کربن و ۱/۲۵ درصد منگنز) با ضخامت ۲ میلی‌متر بود. شکل ۱ ریزساختار نوری ورق فولاد اولیه را نشان می‌دهد. به منظور تولید فولادهای دوفازی، نمونه‌های ورق فولاد اولیه تحت سیکل‌های عملیات حرارتی به شرح زیر قرار گرفتند:

- آنیل بین بحرانی (IA): گرم کردن تا دمای بین بحرانی ۷۲۰ درجه سانتی‌گراد، نگهداری به مدت ۱ ساعت، کوئنچ در آب



شکل ۱: ریزساختار نوری فولاد اولیه.



شکل ۲: ریزساختارهای نوری فولادهای دوفازی تولید شده توسط سیکل‌های عملیات حرارتی مختلف، (الف) آنیل بین بحرانی، (ب) کوئنچ پله‌ای، (ج) کوئنچ میانی.

۳. نتایج و بحث

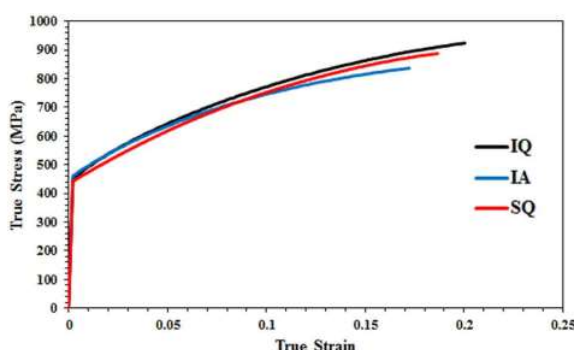
شکل ۲ ریزساختار مقطع فولادهای دوفازی تولید شده توسط سیکل‌های عملیات حرارتی مختلف را نشان می‌دهد. نمونه تولید شده توسط عملیات آنیل بین بحرانی (شکل ۲-الف) شامل جزایر ریز و هم محور مارتنزیتی پراکنده شده در مرزانه‌های فریت بود. نمونه تولید شده توسط کونچ پله‌ای (شکل ۲-ب) دارای ساختار درشت باندی شکل فریت و مارتنزیت بود. در نمونه کونچ میانی شده (شکل ۲-ج)، ذرات مارتنزیت بسیار ریز و فیبری شکل در زمینه فریتی مشاهده شد. جدول ۱ مشخصات ریزساختاری فولادهای تولید شده را به طور خلاصه نشان می‌دهد.

منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی و حقیقی فولادهای تولید شده در شکل ۳ نشان داده شده است. همه نمونه‌ها دارای رفتار تسلیم پیوسته، نسبت استحکام تسلیم به استحکام کششی پایین و نرخ کارسختی بالا در ابتدای تغییر شکل بودند که خصوصیات معمول فولادهای دوفازی هستند [۳]. جدول ۲ خلاصه خواص کششی فولادهای دوفازی تولید شده با استفاده از سیکل‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که

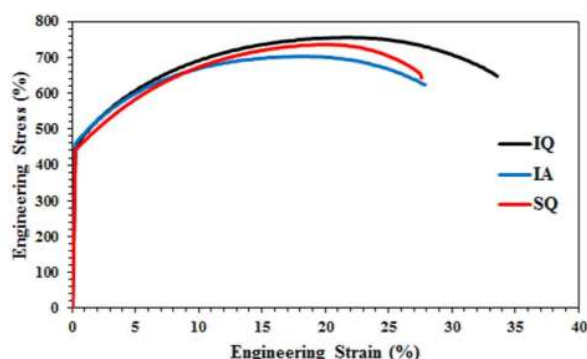
مشاهده می‌شود، نمونه تولید شده توسط فرایند کونچ میانی، که دارای بیشترین کسر حجمی مارتنزیت بود، دارای کمترین استحکام تسلیم در بین فولادهای تولید شده است. برخلاف کم بودن استحکام تسلیم، این فولاد دارای بالاترین استحکام کششی، ازدیاد طول یکنواخت و کل و بهترین ترکیب استحکام و انعطاف‌پذیری (بالاترین حاصلضرب استحکام کششی در انعطاف‌پذیری یکنواخت) بود، که نشان می‌دهد فولاد تولید شده توسط عملیات کونچ میانی دارای بالاترین میزان جذب انرژی در هنگام تصادف می‌باشد. در مقابل، فولاد تولید شده توسط فرایند کونچ پله‌ای دارای کمترین مقدار از خصوصیات ذکر شده بود. همانطور که در شکل ۲ مشاهده شد، فولاد دوفازی تولید شده توسط فرایند کونچ میانی شامل ذرات بسیار ریز مارتنزیت فیبری پراکنده در زمینه فریت است، در حالی که در نمونه تولید شده به روش کونچ پله‌ای، مارتنزیت درشت و بلوکی با توزیع غیریکنواخت دیده می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت مارتنزیت فیبری و ریز پراکنده در زمینه فریت در فولادهای دوفازی دارای ترکیب بهینه‌تری از خواص کششی است.

جدول ۱: خصوصیات ریزساختاری فولادهای دوفازی تولید شده با روش‌های مختلف

نمونه	کسر حجمی مارتنزیت (%)	درصد کربن مارتنزیت	اندازه ذرات مارتنزیت (میکرون)	اندازه دانه فریت (میکرون)
آنیل بین بحرانی	۲۸	۰/۶	۳/۶	۵
کونچ پله‌ای	۲۷	۰/۶۳	۵/۶	۱۰/۲
کونچ میانی	۳۳	۰/۵۲	۲/۳	۳/۶



(ب)



(الف)

شکل ۳: نمودارهای تنش-کرنش (الف) مهندسی و (ب) حقیقی فولادهای دوفازی تولید شده توسط سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی.

بنابراین مقدار n را می‌توان با رسم مقادیر $\ln \sigma$ برحسب $\ln \epsilon$ بدست آورد. شکل ۴ منحنی‌های هولمن را برای فولادهای تولید شده نشان می‌دهد. در مورد همه فولادها تغییرات غیرخطی $\ln \sigma$ برحسب $\ln \epsilon$ و رفتار کارسختی دومرحله‌ای مشاهده شد. در مطالعات قبلی نیز رفتار کارسختی دومرحله‌ای برای فولادهای دوفازی مشاهده شده بود [۷]. مرحله اول با شیب کم به تغییر شکل پلاستیک فریت مربوط می‌شود، در حالیکه مرحله دوم با شیب زیاد به تغییر شکل پلاستیک همزمان فریت و مارتنزیت ارتباط داده شده است. جدول ۳ پارامترهای مربوط به کارسختی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود برای همه نمونه‌ها مقدار n در مرحله اول کارسختی کوچک‌تر از مقدار آن در مرحله دوم است. این به دلیل قابلیت تغییر

رفتار کارسختی نمونه‌ها با استفاده از آنالیز هولمن مورد مطالعه قرار گرفت:

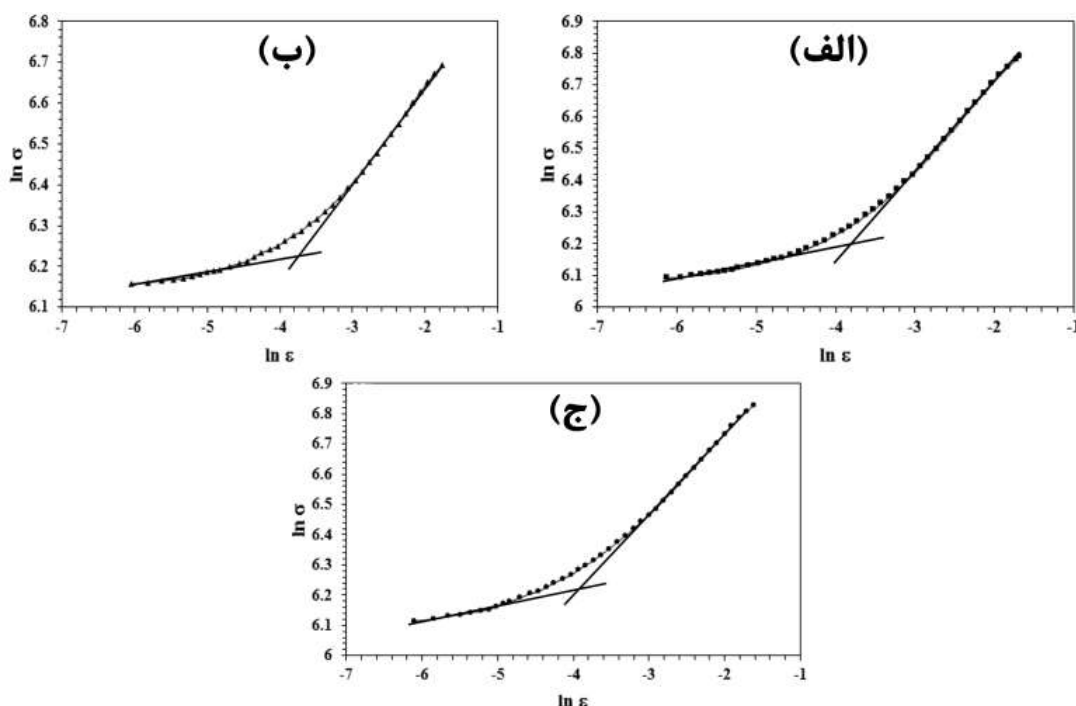
$$\sigma = k \epsilon^n \quad (1)$$

در اینجا σ تنش حقیقی، ϵ کرنش حقیقی، n نمای کارسختی و k ضریب استحکام است. با بازنویسی معادله ۱ به صورت لگاریتمی، نمای کارسختی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر بدست آورد:

$$n = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \epsilon)} \quad (2)$$

جدول ۲: متغیرهای جوشکاری با لیزر نمونه‌های بازپخت نایمونیک ۷۵

نمونه	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	استحکام کششی (مگاپاسکال)	ازدیاد طول یکنواخت (%)	ازدیاد طول کل (%)	حاصلضرب استحکام کششی در ازدیاد طول کل (مگاپاسکال %)	نسبت تسلیم
آنیل بین بحرانی	۴۴۱	۷۳۶	۲۰/۵۸	۲۷/۵۶	۱۵۱۴۷	۰/۶
کونچ پله‌ای	۴۵۹	۷۰۳	۱۹/۱	۲۸/۹۱	۱۳۴۲۷	۰/۶۵
کونچ میانی	۴۵۱	۷۵۷	۲۲/۱۶	۳۳/۵۴	۱۶۷۷۵	۰/۶



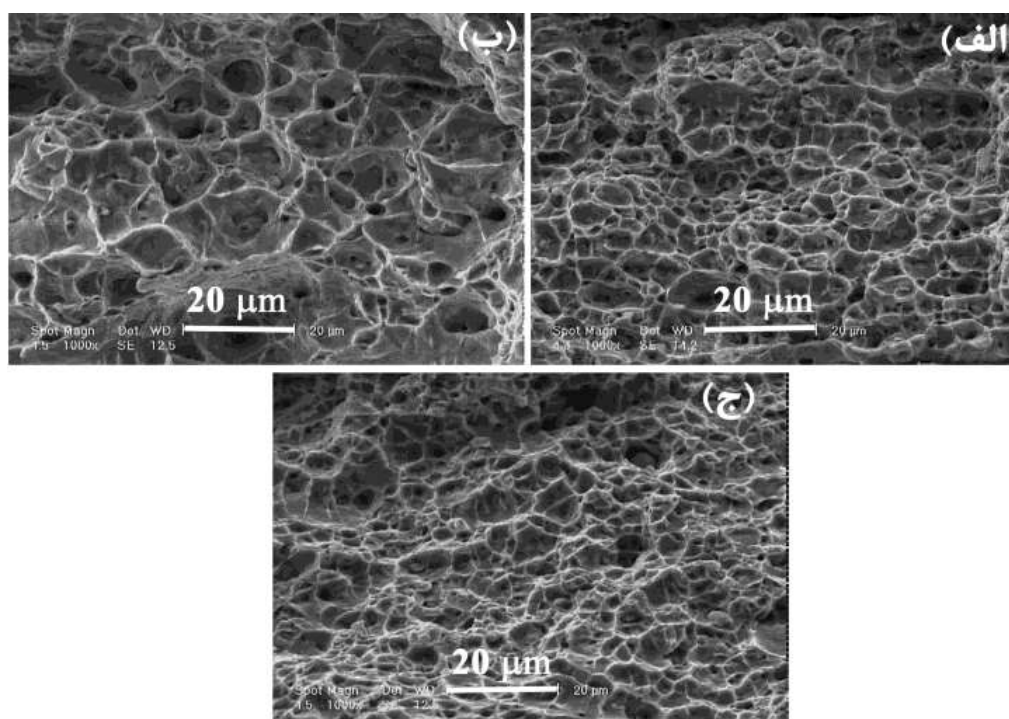
شکل ۴: نمودارهای هولمن فولادهای دوفازی تولید شده با سیکل‌های مختلف، (الف) آنیل بین بحرانی، (ب) کونچ پله‌ای و (ج) کونچ میانی.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌های کشش فولادهای دوفازی تولید شده توسط روش‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. همه سطوح شکست از دیمپل تشکیل شده است که نشان دهنده رخ دادن شکست نرم در نمونه‌هاست. اندازه و توزیع دیمپل‌ها در نمونه‌های مختلف متفاوت است. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود نمونه تولید شده توسط فرایند کونچ پله‌ای دارای بزرگترین اندازه دیمپل و نمونه کونچ میانی شده دارای ریزترین دیمپل‌ها بود. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول ۱ و ۴، می‌توان نتیجه گرفت که اندازه دیمپل‌ها در سطوح شکست با اندازه اجزاء ریزساختاری مرتبط است. نمونه کونچ میانی شده دارای ریزترین اندازه دانه فریت و مارتنزیت و ریزترین دیمپل‌ها و نمونه کونچ پله‌ای شده دارای درشت ترین اندازه دانه فریت و جزایر مارتنزیت و بزرگترین اندازه دیمپل بود.

شکل کمتر مارتنزیت در مرحله دوم کارسختی است که منجر به مقدار بزرگتر نمای کارسختی می‌شود. علاوه بر این، مقدار n در مرحله اول برای نمونه کونچ میانی بیشترین مقدار و برای نمونه کونچ پله‌ای کمترین مقدار را داراست. مشخص شده است که مرحله اول کارسختی در فولادهای دوفازی به حضور نابجایی‌های ضروری از نظر هندسی در فصل مشترک فریت-مارتنزیت مربوط می‌شود. چگالی این نابجایی‌ها به میزان دسترس بودن فصل مشترک فریت-مارتنزیت بستگی دارد. میزان فصل مشترک فریت-مارتنزیت با کسر حجمی مارتنزیت نسبت مستقیم و با اندازه آن نسبت معکوس دارد [۸]. بنابراین، با توجه به اندازه و کسر حجمی ذرات مارتنزیت (جدول ۱)، چگالی این نابجایی‌ها برای نمونه کونچ میانی شده بیشترین مقدار و برای نمونه کونچ پله‌ای کمترین مقدار را داراست. جدول ۳ همچنین نشان می‌دهد که مقدار n در مرحله دوم کارسختی برای نمونه کونچ پله‌ای شده کمترین مقدار را داراست.

جدول ۳: پارامترهای مربوط به کارسختی نمونه‌های مختلف

نمونه	مقدار کارسختی (مگاپاسکال)	n		کرنش انتقالی بین مراحل
		مرحله اول	مرحله دوم	
آنیل بین بحرانی	۲۹۵	۰/۰۷۸	۰/۲۷۲	۰/۰۲۵
کونچ پله‌ای	۲۴۴	۰/۰۶۱	۰/۲۲۷	۰/۰۲۸
کونچ میانی	۳۰۶	۰/۰۸۴	۰/۲۵۴	۰/۰۲۳



شکل ۵: تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌های مختلف، (الف) آنیل بین بحرانی، (ب) کونچ پله‌ای، (ج) کونچ میانی.

جدول ۴: متوسط و حداکثر اندازه دیمپل سطوح شکست فولادهای دوفازی بررسی شده در این پژوهش

نمونه	متوسط اندازه دیمپل (میکرون)	حداکثر اندازه دیمپل (میکرون)
آنیل بین بحرانی	۳/۵	۸/۸۵
کونچ پله‌ای	۶/۸۱	۱۷/۱
کونچ میانی	۳/۰۳	۷/۲

References

- [1] Park K, Nishiyama M, Nakada N, Tsuchiyama T, Takaki S, Effect of the martensite distribution on the strain hardening and ductile fracture behaviors in dual-phase steel, Mater. Sci. Eng. A, 2014; 604: 135-141.
- [2] Sirinakorn T, Wongwiset S, Uthaisangsuk V, A study of local deformation and damage of dual phase steel, Mater. Des., 2014; 64: 729-742.
- [3] Fillafer A, Kremaszky C, Werner E, On strain partitioning and micro-damage behavior of dual-phase steels, Mater. Sci. Eng. A, 2014; 614: 180-192.
- [4] Wang W, Wei X, The effect of martensite volume and distribution on shear fracture propagation of 600-1000 MPa dual phase sheet steels in the process of deep drawing, Int. J. Mech. Sci., 2013; 67: 100-107.
- [5] Winkler S, Thompson A, Salisbury C, Worswick M, Riemsdijk IV, Mayer R, Strain rate and temperature effects on the formability and damage of advanced high-strength steels, Metall. Mater. Trans. A, 2008; 39: 1350-1358.
- [6] Bag A, Ray KK, Dwaradakasa ES, Influence of martensite content and morphology on tensile and impact properties of high-martensite dual-phase steels, Metall. Mater. Trans. A, 1999; 30: 1193-1202.
- [7] Saeidi N, Ashrafizadeh F, Niroumand B, Development of a new ultrafine grained dual phase steel and examination of the effect of grain size on tensile deformation behavior, Mater. Sci. Eng. A, 2014; 599: 145-149.
- [8] Mazaheri Y, Kermanpur A, Najafizadeh A, Saeidi N, Effects of initial micro-structure and thermomechanical processing parameters on microstructures and mechanical properties of ultrafine grained dual phase steels, Mater. Sci. Eng. A, 2014; 612: 54-62.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر مورفولوژی مارتنزیت بر خواص کششی فولاد دوفازی پرداخته شد. مهمترین نتایج بدست آمده عبارتند از:

۱- ریزساختار فولادهای دوفازی با تغییر سیکل عملیات حرارتی تغییر کرد. در مورد فولاد تولید شده با استفاده از آنیل بین بحرانی ذرات مارتنزیت پراکنده شده در مرزخانه‌های فریت مشاهده شد، کونچ پله‌ای منجر به ایجاد مارتنزیت درشت و باندی شکل در زمینه فریت درشت دانه شد و ریزساختار حاصل از فرایند کونچ میانی شامل ذرات بسیار ریز و فیبری شکل مارتنزیت در زمینه فریت بود.

۲- مقایسه رفتار کششی نمونه‌های مختلف نشان داد که فولاد دوفازی تولید شده با روش کونچ میانی که شامل ذرات ریز و فیبری شکل مارتنزیت در زمینه فریت بود، دارای بالاترین استحکام کششی، ازدیاد طول یکنواخت، و کل و بالاترین مقدار کارسختی بود در حالیکه نمونه تولید شده توسط فرایند کونچ پله‌ای با مورفولوژی مارتنزیت درشت و بلوکی دارای کمترین مقدار خصوصیات ذکر شده بود.

۳- بر مبنای آنالیز هولمن، همه فولادهای تولید شده رفتار کارسختی دومرحله‌ای را از خود نشان دادند. نمای کارسختی هر مرحله و کرنش انتقالی بین مراحل با تغییر ریزساختار و مورفولوژی مارتنزیت تغییر کرد.

۴- مکانیزم شکست غالب در همه نمونه‌ها شکست نرم بود و اندازه متوسط و بزرگترین دیمپل برای نمونه کونچ میانی شده با کمترین مقدار و برای نمونه کونچ پله‌ای شده بیشترین مقدار را دارا بود.