

اثر درجه حرارت آنیل میان بحرانی بر ریز ساختار و خواص کششی فولاد دو فازی

منیر عسگریپور خضرآباد دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران

شهرام خیراندیش استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

فولادهای دو فازی فولادهای نوینی هستند که کاربردهای سازهای دارند. این فولادها استحکام بالاتر و شکل پذیری بهتری از فولادهای نرم دارند. لذا در این تحقیق اثر دمای آنیل میان بحرانی در محدوده ۷۴۰ تا ۸۱۰°C بر خواص کششی و ریز ساختار فولادهای دو فازی که از ساختار اولیه فریتی-پرلیتی تهیه شده‌اند بررسی شد. به این ترتیب که فولاد فریتی-پرلیتی اولیه در چهار دمای آنیل میان بحرانی دو فازی شده و سپس آزمایش‌های کشش، سختی سنجی و متالوگرافی نوری و SEM بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج نشان دادند که بسته به دمای آنیل میان بحرانی انتخاب شده درصد فازهای نهایی و مورفولوژی آنها متفاوت خواهد بود که این تفاوت‌ها مستقیماً بر روی خواص نهایی فولاد تاثیرگذار است. به طوریکه با افزایش دمای آنیل میان بحرانی درصد مارتنزیت حاصل، افزایش می‌یابد و در نتیجه استحکام فولاد افزایش یافته و تغییر طول آن کاهش می‌یابد. با انتخاب یک دمای آنیل میان بحرانی مناسب می‌توان ترکیب قابل قبولی از استحکام و افزایش طول در فولاد ایجاد نمود.

کلمات کلیدی: فولاد دو فازی، آنیل میان بحرانی، خواص کششی، ریز ساختار

Effect of intercritical annealing temperature on microstructure and tensile properties of dual phase steel

M. Asgharpour Khezrabad M.Sc., Student, Mechanical Department, Iran University of Science and Technology

Sh. kheirandish professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology

Abstract:

Dual phase steels are modern steels with structural uses. They have better strength and formability than those of mild steels. In this research the effect of intercritical annealing temperature between 740 and 810 °C on microstructure and tensile properties of dual phase steel, prepared of primary ferritic pearlitic microstructure, was studied. Primary steel was annealed at four temperatures, and was subjected to tensile test, hardness test and SEM metallography test. The results showed that morphology and percentages of final phases were dependent on the annealing temperature, and had effects on the final properties of steel. The martensite vol.% was increased with increasing annealing temperature, hence the tensile strength was increased and the elongation was decreased. The good combination of strength and elongation in the steel can be achieved using the selection of suitable intercritical annealing temperature.

Key Words: Dual Phase Steel, Intercritical Annealing, Tensile Properties

۱- مقدمه

هدف بسیاری از عملیات حرارتی که بر روی فولادها صورت می‌گیرد بهبود خواص آن‌ها از جمله افزایش استحکام، بهبود شکل پذیری، بالابردن قابلیت افزایش طول، بهبود خواص ضربه پذیری و غیره است [۱]. به منظور تأمین این اهداف و ایجاد ویژگی‌های خاص در یک فولاد برای مورد کاربری مشخص، می‌توان از چرخه‌های مختلف عملیات حرارتی استفاده نمود که از جمله آنها تغییر اندازه دانه‌ها، تغییر فازهای موجود و یا تغییر مورفولوژی آنها و غیره است [۲]. مطالعات انجام گرفته در این راستا نشان داده است که با آنیل نمودن فولاد نرم در منطقه دو فازی آستنیت و فریت و سپس سرد نمودن آن با سرعت کنترل شده به طوریکه آستنیت تشکیل شده در این منطقه به مارتنزیت استحاله نماید، موجب بهبود خواص نهایی فولاد از جمله قابلیت تغییر شکل سرد، افزایش طول کلی و یکنواختی آن می‌شود [۳]. این دسته از فولادها که از مناطق مارتنزیت پراکنده در زمینه فریت تشکیل می‌شوند، فولادهای دوفازی نامیده می‌شوند [۴]. عوامل زیادی از جمله مورفولوژی مارتنزیت، اندازه دانه فریت و کسر حجمی مارتنزیت می‌تواند بر خواص مکانیکی این فولادها موثر باشد [۵ و ۶]. یکی از مهمترین پارامترهای موثر در خواص فولادهای دو فازی دمای آنیل میان بحرانی است. این دما اثرهای متعددی دارد اول باعث افزایش میزان آستنیت و در نتیجه مارتنزیت تشکیل شده می‌گردد [۵]. دوم مارتنزیت تولید شده را کم کربن‌تر می‌کند [۷]. سوم اندازه دانه‌های فریت و آستنیت را تغییر می‌دهد [۸]. چهارم اثرات پیچیده‌ای بر روی جدایش عناصری چون کربن، سیلیسیم و منگنز بین فریت و آستنیت دارد [۹ و ۱۰]. این اثرها هر کدام نقش جداگانه‌ای بر روی خواص مکانیکی فولاد دو فازی دارند به گونه‌ای که گاهی بر عکس هم عمل می‌نمایند. مثلاً مورد اول باعث افزایش استحکام و کاهش چقرمگی و مورد دوم بر عکس باعث کاهش استحکام و افزایش چقرمگی فولاد می‌شود [۱۱]. همچنین در مورد اثر اندازه دانه فریت نظرات متفاوتی موجود است، بعضی از محققین معتقدند که کاهش اندازه دانه فریت و آستنیت مانند سایر فلزات افزایش استحکام فولاد را به دنبال دارد [۱۲] و بعضی دیگر معتقدند که برعکس، استحکام فولاد به دنبال کاهش اندازه دانه‌های فریت و آستنیت کاهش می‌یابد [۱۳ و ۱۴]. هرچند تحقیقاتی در این خصوص در دنیا و ایران انجام شده است اما هدف این مقاله برای مشخص شدن بیشتر این موضوع، بر تحقیق در اثر دمای آنیل میان بحرانی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی فولاد دو فازی در دو اندازه دانه اولیه فریت قرار گرفت.

۲- روش آزمایش

در این پژوهش از میلگرد فولاد st52 به قطر ۲ mm که یک نوع فولاد نرم است با ساختار فریتی پرلیتی با قطر دانه اولیه ۸/۵ میکرومتر برای تهیه نمونه‌های دوفازی استفاده گردید. ترکیب شیمیایی این فولاد به شرح جدول ۱ است. به کمک آنیل نمونه اولیه، قطر دانه فریت آن به ۴۴ μm رسانیده شد.

جدول ۱- درصد وزنی عناصر موجود در فولاد کم کربن استفاده شده برای تهیه فولاد دوفازی (بدست آمده به وسیله اسپکتروفتومتری)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
بقیه	۰/۱۹	۰/۳۳	۱/۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۱

سپس نمونه اولیه که به شکل ورق با قطر ۲ mm بود به صورت نمونه‌هایی با طول ۱۵cm بریده شد. این نمونه‌ها در چهار دمای ۷۴۰، ۷۶۳، ۷۸۶ و نهایتاً ۸۱۰°C آنیل میان بحرانی شدند. برای انتخاب دماهای مذکور ابتدا با کمک فرمولهای ۱ و ۲ دمای تقریبی AC1 و AC3 برای فولاد اولیه با کمک روابط زیر محاسبه شد [۱۵].

$$AC_1 = 723 - 10/7Mn - 16/9Ni + 29/1Si + 16/9Cr + 29As + 6/38W$$

$$AC_3 = 910 - 20.3\sqrt{C} - 15/2Ni + 44/7Si + 31/5Mo + 13/1W$$

به کمک این فرمول‌ها و با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده، دماهای مزبور برای این فولاد به ترتیب زیر بدست آمد: $Ac_1 = 720^\circ C$ و $Ac_3 = 830^\circ C$

با توجه به دماهای بدست آمده، دمای ۷۴۰°C به عنوان پایین‌ترین دما و ۸۱۰°C به عنوان بالاترین دمای آنیل میان بحرانی انتخاب شده و بازه بدست آمده به سه قسمت مساوی تقسیم شد. کلیه نمونه‌ها بر اساس تجربیات قبلی به مدت ۲۰ دقیقه در دماهای انتخاب شده گرم شده و سپس در آب نمک ۱۰٪ کوئنچ شدند. برای عملیات حرارتی از کوره‌های مقاومت الکتریکی با حجم داخلی ۱۰ لیتر و با دقت دمایی $\pm 5^\circ C$ استفاده شد. نمونه‌های دوفازی شده سپس ماشینکاری شده و طبق استاندارد ASTM 370-77 نمونه‌های کشش از آنها تهیه شد. طول کلی نمونه‌ها ۱۱۵mm و طول سنج ۴۰mm بود. از هرکدام از نمونه‌ها به طول ۱cm بریده شد و از آن برای

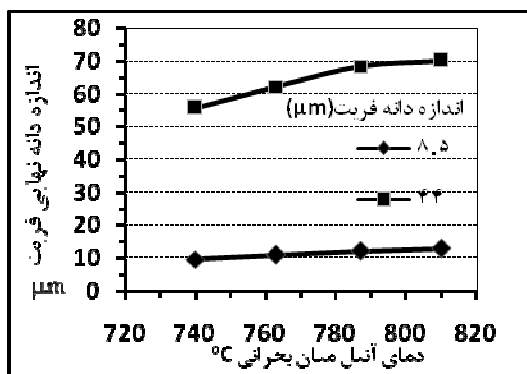
بیشتری در آستنیت حل شده و فاز مارتنزیت بعد از کوئنچ نمودن نمونه‌ها از سختی لازم و مورد نظر برخوردار باشد. زمانی که این نمونه‌ها در منطقه دوفازی آستنیت و فریت حرارت دهی می‌شوند، مناطق پرلیتی به آستنیت استحاله نموده و در طول نگهداری در این منطقه این دانه‌ها کمی درشت تر می‌شوند. شکل ۱ نشان می‌دهد که هرچه دمای منطقه دو فازی بالاتر باشد، دانه‌های فریت نهایی حاصل شده از دو اندازه دانه فریت اولیه، و به دلیل رشد دانه‌ها درشت تر می‌شوند. در شکل ۲ مشاهده می‌شود که با کوئنچ نمودن متعاقب نمونه‌ها، آستنیت به مارتنزیت استحاله نموده و به صورت مناطقی در

تهیه نمونه‌های متالوگرافی و انجام آزمایش سختی سنجی استفاده گردید. برای اندازه‌گیری سختی نیز از سختی سنجی ویکرز، با بار ۱۰ کیلوگرم استفاده شد. نمونه‌های کشتش آماده شده توسط دستگاه کشتش که حداکثر نیروی وارده توسط آن ۱۰۰ kN و دقت آن ۱۰۰N بود، با سرعت کرنش 1 mms^{-1} کشیده شدند و نمودار تنش-کرنش برای هر نمونه توسط کامپیوتر دستگاه ترسیم شد. اطلاعات مورد نظر در رابطه با خواص مکانیکی از جمله استحکام تسلیم، استحکام کشش نهایی و افزایش طول کلی از منحنی‌های ترسیم شده بدست آمد. هر عدد در خواص کششی میانگین چهار آزمایش بود. جهت انجام آزمایش متالوگرافی کمی و تهیه تصویر توسط میکروسکوپ نوری و SEM، ابتدا نمونه‌ها با استفاده از سمباده‌های با مش ۶۰ تا ۱۲۰۰ سمباده زنی شده و سپس با استفاده از پودر آلومینا با دانه بندی $1/5\ \mu\text{m}$ عمل پولیش نمونه‌ها انجام گرفت و نهایتاً با محلول نایتال ۲ درصد اچ شدند. متالوگرافی کمی با استفاده از روش شمارش نقطه طبق استاندارد STM E562 انجام گرفت.

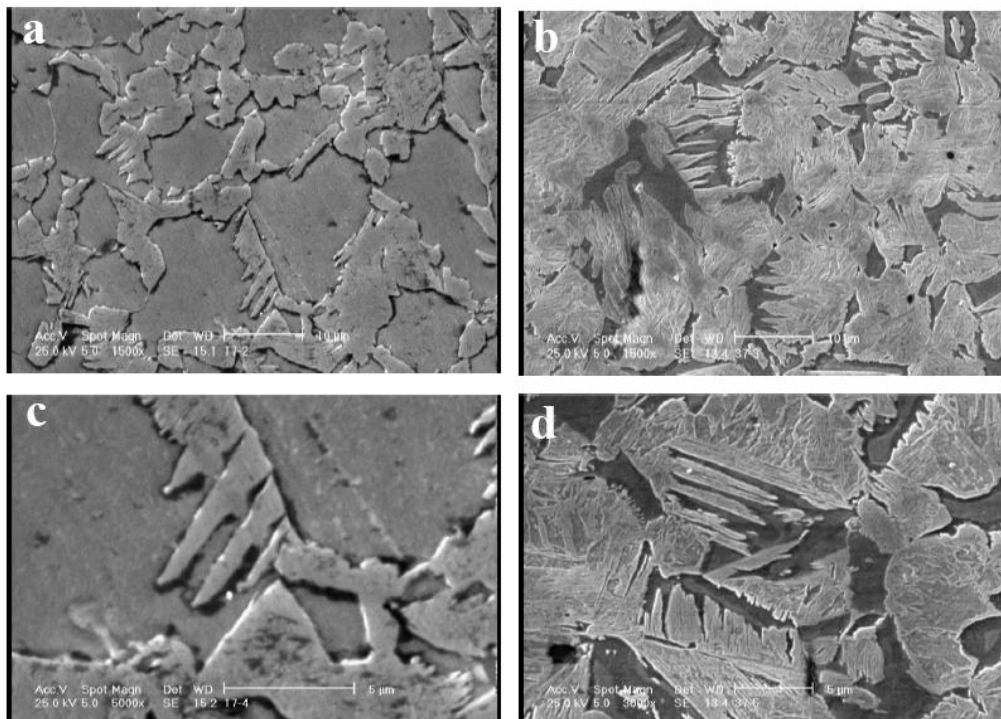
۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر دمای آنیل میان بحرانی بر ریز ساختار نهایی

در طول عملیات دوفازی نمودن، نمونه‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در دمای آنیل میان بحرانی شدند تا کاربردهای



شکل ۱- تغییر اندازه دانه‌های فریت نهایی فولاد دوفازی با دمای آنیل میان بحرانی با دو اندازه دانه فریت اولیه.



شکل ۲- تصاویر SEM تهیه شده از نمونه دوفازی شده در (a و c) $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ و (b و d) $810\text{ }^{\circ}\text{C}$.

مارتنزیت نهایی نیز بیشتر خواهد بود. در حقیقت در دماهای آنیل میان بحرانی بالاتر، اندازه مناطق آستنیتی بیشتر است، اما کربن آنها کمتر است پس سختی پذیری کمتری دارند. از طرفی اندازه دانه‌های آستنیت بر روی سختی پذیری اثر می‌گذارند. به طوریکه کاهش اندازه دانه‌های آستنیت به طور قابل ملاحظه‌ای سختی پذیری را کاهش می‌دهد [۲]. زیرا کاهش اندازه دانه‌ها باعث افزایش محلهای جوانه زنی پرلیت می‌شود. مسأله دیگری که می‌تواند بر درصد مارتنزیت تشکیل شده تأثیرگذار باشد، یکنواخت یا غیریکنواخت بودن میکروساختار است به طوری که غیریکنواخت بودن آستنیت از نظر شیمیایی باعث کاهش سختی پذیری فولاد می‌شود [۲]. به این ترتیب مجموعه عوامل فوق مقدار مارتنزیت بیشتری را در نمونه‌هایی که از دماهای بالاتر، آنیل میان بحرانی شده‌اند ایجاد می‌کنند.

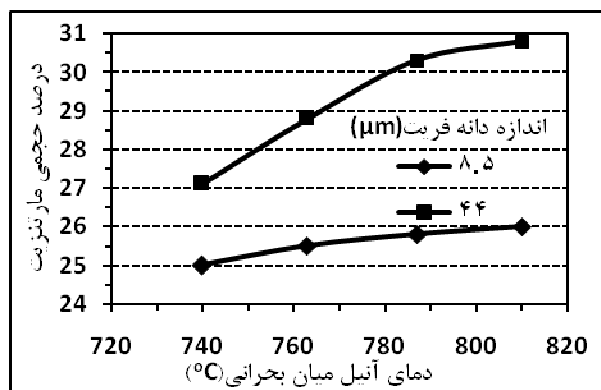
۳-۳- خواص مکانیکی نمونه

شکل ۴ تغییرات سختی نمونه‌های دوفازی را با تغییر دمای آنیل میان بحرانی نشان می‌دهد. این شکل به خوبی نشان می‌دهد که در تمام اندازه دانه‌ها، سختی فولادهای دوفازی با بالاتر رفتن دمای آنیل افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر اندازه دانه و تولید کسر حجمی بیشتر مارتنزیت با افزایش دمای آنیل میان بحرانی موجب افزایش سختی با افزایش دمای آنیل میان بحرانی می‌گردد. به این ترتیب که افزایش اندازه دانه‌ها در دماهای بالاتر موجب می‌شود که مساحت مرز دانه‌ها در نمونه‌های آنیل شده در دماهای بالاتر کاهش یابد، در نتیجه نابجایی‌های متحرک ایجاد شده در مرز فریت و مارتنزیت که در فولادهای دوفازی و در پی تغییر حجم بوجود آمده در استحاله مارتنزیتی ایجاد می‌شوند کمتر است [۱۶]. این نابجایی‌ها که از نوع متحرک هستند موجب نرمی نمونه می‌شوند [۱۸] از این رو حضور مقادیر کمتر این نوع نابجایی‌ها در نمونه‌های آنیل شده در دماهای بالاتر موجب افزایش سختی در این نمونه‌ها می‌شود. از طرفی مقدار مارتنزیت تولید شده در نمونه‌های آنیل شده در دماهای بالاتر بیشتر است. تمام کربنی که در دمای آنیل میان بحرانی در آستنیت وجود دارد در مارتنزیت باقی می‌ماند بنابراین کاهش درصد کربن مارتنزیت در اثر افزایش دمای آنیل میان بحرانی سختی مارتنزیت را کمتر می‌کند [۱۵]. این عوامل مجموعاً بر روی سختی تأثیرگذار بوده و موجب افزایش سختی می‌گردند [۱۸].

زمینه فریت ظاهر می‌گردد [۱۶]. با بالا رفتن دمای آنیل میان بحرانی علاوه بر اندازه دانه‌های فریت، اندازه مناطق مارتنزیتی نیز بزرگ تر می‌شود. در حقیقت افزایش دمای آنیل در محدوده دوفازی منجر به افزایش میزان آستنیت در تعادل با فریت می‌گردد [۱۷]. از آنجا که آستنیت تشکیل شده در اثر کوئنچ به مارتنزیت استحاله می‌کند، تغییرات کسر حجمی مارتنزیت ایجاد شده تقریباً مشابه تغییرات درصد آستنیت است. بررسی ساختارهای حاصل شده در دماهای مختلف آنیل میان بحرانی در شکل ۲ مشخص نمود که ساختار مارتنزیت در تمامی فولادهای دوفازی ثابت نیست. در نمونه‌هایی که از دماهای بالاتر کوئنچ شده‌اند و مارتنزیت تشکیل یافته در آنها بر اساس فاز دیاگرام آهن کربن حاوی درصد کربن پایین تر است، مارتنزیت عمدتاً لایه‌ای می‌باشد. از سوی دیگر نمونه‌هایی که از دماهای پایین تر کوئنچ شده‌اند و مارتنزیت آنها دارای درصد کربن بالاتری است، غالباً حاوی مخلوطی از مارتنزیت بشقابی و لایه‌ای شکل هستند.

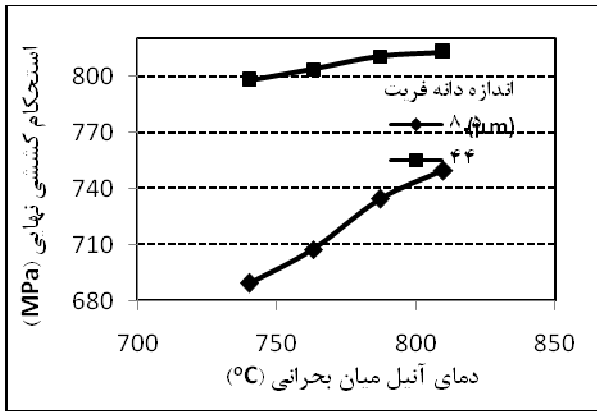
۳-۲- کسر حجمی مارتنزیت

شکل ۳ چگونگی تغییر درصد مارتنزیت را با تغییر دمای آنیل میان بحرانی نشان می‌دهد. مقادیر کسر حجمی مارتنزیت در فولادهای دوفازی بدست آمده در دمای آنیل میان بحرانی بالاتر، بیشتر از مقدار مارتنزیت در نمونه‌های تهیه شده در دمای پایین تر است.



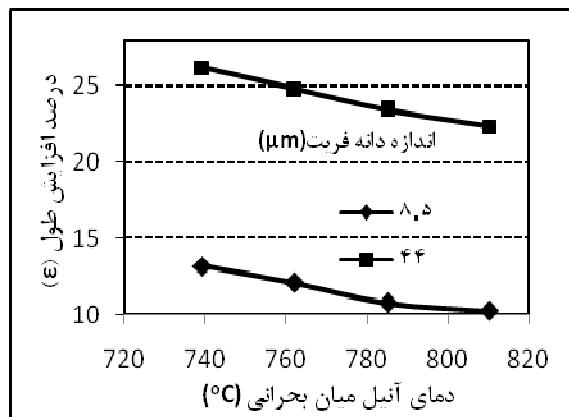
شکل ۳- منحنی تغییرات درصد مارتنزیت با تغییر دمای آنیل میان بحرانی برای نمونه‌های مختلف با دو اندازه دانه فریت اولیه.

این مساله مستقیماً به مقدار آستنیت تشکیل شده در دماهای مزبور وابسته است، به طوری که هرچه دمای دوفازی کردن بالاتر باشد مقدار آستنیت تشکیل شده و متعاقباً مقدار



شکل ۶- تغییرات تنش نهایی با دمای آنیل میان بحرانی در دو اندازه دانه اولیه مختلف.

در تمام منحنی‌های شکل‌های ۴ تا ۷ نمونه‌های دارای قطر اولیه فریت بیشتر، از سختی بالاتر، استحکام بیشتر و کرنش کمتری برخوردارند. این پدیده چنانچه قبلاً بیان گردید به دلیل کاهش حجم نابجاییهای متحرک است [۲۰].

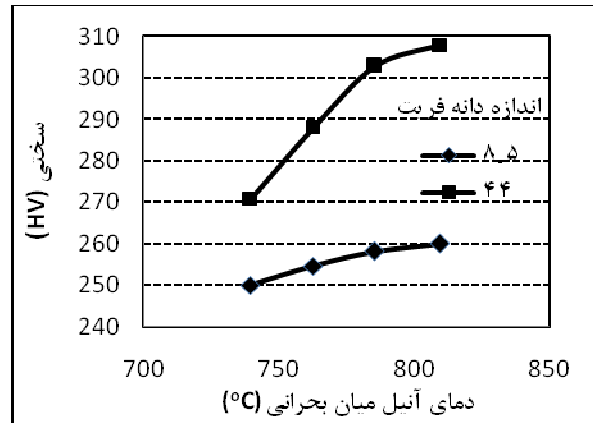


شکل ۷- تغییرات درصد افزایش طول کلی با دمای آنیل میان بحرانی در دو اندازه دانه مختلف اولیه.

۴- نتیجه گیری

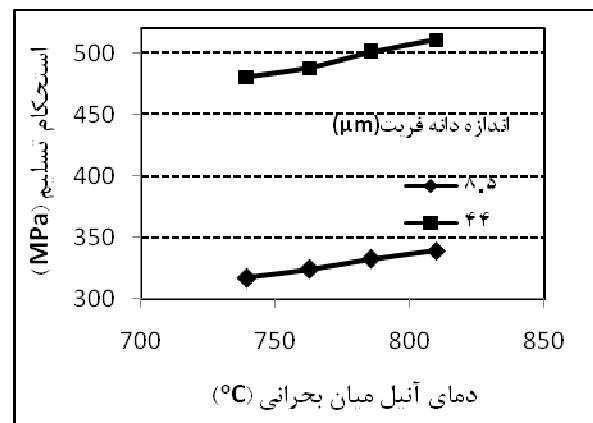
از بررسی اثر دمای آنیل میان بحرانی بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی فولاد دو فازی نتایج زیر حاصل گردیدند:

- ۱- مقدار مارتنزیت ایجاد شده با افزایش دمای آنیل میان بحرانی افزایش می‌یابد و تیغه‌های آن درشت‌تر می‌شوند.
- ۲- هم در اندازه دانه‌های درشت و هم در اندازه دانه‌های ریز فولاد اولیه، با بالاتر رفتن دمای آنیل میان بحرانی میزان سختی افزایش می‌یابد.



شکل ۴- منحنی تغییرات سختی نمونه‌های دوفازی با تغییر دمای آنیل میان بحرانی برای نمونه‌های مختلف با دو اندازه دانه اولیه مختلف.

با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان ملاحظه نمود که افزایش دمای آنیل میان بحرانی موجب افزایش استحکام تسلیم و استحکام نهایی در مقایسه با دماهای پایین‌تر می‌شود که این مسأله مستقیماً به کسر حجمی بیشتر مارتنزیت تولید شده در دماهای بالاتر و کاهش حجم نابجایی‌های متحرک مربوط است که برای تغییرات سختی بیان گردید. از طرفی با افزایش استحکام نمونه‌ها کرنش کل آنها که در شکل ۷ نشان داده شده است کاهش می‌یابد.



شکل ۵- تغییرات تنش تسلیم با دمای آنیل میان بحرانی در دو اندازه دانه مختلف اولیه.

- [10] I. A. EL. Sesy, Z. M. Baradie, "Influence of carbon and /or iron carbide on the structure and Properties of dual- Phase steels", J. Mat. Lett, Vol. 57, 2002, pp. 580-585.
- [۱۱] محسن اسدی اسد آباد، شهرام خیر اندیش، " بررسی رفتار کرنش سختی فولاد دو فازی"، مجله بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، ویژه نامه مواد، شماره ۳، جلد ۱۷، ۱۳۸۵، ص ۶۱-۶۶.
- [12] A. Bayram, A. Uguz, M. Ula, "Effects of microstructure and notches on the mechanical properties of dual- phase steels", J. Mat. Char., Vol. 43, 1999, pp. 259-269.
- [13] A. Bag, K. K. Ray, ES. Dwarakadasa, "Influence of martensite content and morphology on tensile and impact properties of high-martensite dual-phase steels", Metal. and Mat. Trans., Vol. 30A, 1999, pp. 1193-1202.
- [14] D. K. Mondal, R. M. Dey, E. C. Satri , L. P. Roy, "Influence of initial grain size and intercritical annealing on the tensile deformation and microstructural features of a vanadium micro alloyed dual phase steel", Trans. Indian Inst. Met, Vol. 49, 1996, pp. 29-37.
- [15] S. Sun, Z. Wang and S. Ai, "Effects of morphology on the tensile and fatigue behaviour of dual phase steel", Steel Res., Vol. 60, (5), 1989, pp. 25-35.
- [16] M. Sarwar, R. Priestner, "Influence of ferrite martensite microstructural morphology on tensile properties of dual phase steel", J. Mat. Sci, Vol. 31, 1996, pp.2091-2095.
- [17] D. K. Mondal, R. M. Dey, " Effect of grain size on the microstructure and mechanical properties of a C-Mn-V dual-phase steel", J. Mat. Sci., Vol. 31, 1996, pp.2091-2095.
- [18] M. A. Asadabad, M. Goodarzi, Sh. Kheirandish, "Kinetics of austenite formation in dual phase steel" ISIJ Journal, Vol. 48, 9, 2008, pp.1251-1255.
- [19] M.M. Karimi, Sh. Kheirandish, "Comparison of work hardening behavior of ferritic bainitic and ferritic martensitic dual phase steels", Steel Res. Int. J., Vol. 80, 2, 2009, pp. 160-164
- [20] A. Nouri, Sh. Kheirandish, H. Saghafian, "Effect of silicon content on the strain hardening of dual-phase steels", IJMSE , Vol. 5, 4, 2008, pp.40-49.

- ۳- چه در نمونه‌های با اندازه دانه اولیه ریز و چه در نمونه‌های با اندازه دانه درشت، با افزایش دمای آنیل میان بحرانی، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی افزایش یافته و افزایش طول کلی کاهش می‌یابد. تأثیر دمای آنیل میان بحرانی بر تغییرات استحکام تسلیم شدیدتر از استحکام کششی نهایی است.
- ۴- با توجه به نتایج حاصل شده در این بررسی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با تغییر دمای آنیل میان بحرانی می‌توان خواص فولادهای دوفازی را در محدوده وسیعی تغییر داده و با در نظر گرفتن کاربری مورد نظر از فولاد و با انتخاب مناسب‌ترین دمای آنیل میان بحرانی بهترین خواص و ریزساختار را برای یک کاربرد خاص از فولاد ایجاد نمود.

منابع

- [1] G. R. Speich, " Fundamentals of dual phase stees". (New York: AIME), 1981.
- [۲] محمد علی گل‌عذار. «اصول و کاربرد عملیات حرارتی در فولادها» ویرایش دوم. دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۸.
- [3] J. R. Yang, L. J. chen, "Dual ferrite-martensite treatments of a high-strength low-alloy ASTM A588 steel", J. Mat. Sci, Vol. 26, pp. 889-898, 1991.
- [4] Metals Handbook, "properties and selection of steel, Vol. 1", ASM, 10th Ed.
- [5] S. Sun., M. Poug, "Mangenes partition in dual phase steel during annealing", Mat. Sci. and Eng. A, Vol. 276, pp. 167-174, 2000.
- [6] G. R. Speich, V. A. Demarest, R. L. Miller, "Formation of austenite during intercritical annealing of dual Phase steels" Metall. Trans. A, Vol. 12A, pp. 1491-28, 1981.
- [7] D. K. Mondal, R. M. Dey, E. C. Satri , L. P. Roy, "Influence of initial grain size and inter critical annealing on the tensile deformation and microstructural features of a vanadium micro alloyed dual phase steel", Trans. Indian Inst. Met, Vol. 49, 1996, pp.29-37.
- [8] M. Erdogan, "Effect of austenite dispersion on phase transformation in dual phase steel", J. Scripta. Mat., Vol. 48, 2003, pp. 501-506.
- [9] A. Nouri, H. Saghafian, Sh. Kheirandish, "Effects of silicon content and intercritical annealing on manganese partitioning in the dual-phase steels", J. of Iron and Steel Res. Int., Vol. 17(5) 2010, pp.46-51.