

تأثیر دمای آنیل فوق سریع بر ریزساختار فولاد کم کربن به شدت تغییر شکل یافته

محمد علی مصطفایی^۱ و محسن کاظمی نژاد^{۲*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۱۶، ش ص: ۱۲-۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۲۶)

چکیده

آنیل فوق سریع یکی از روش‌های موثر در کنترل ریزساختار برای ریزدانه کردن فولادهاست. در این پژوهش فولاد کم کربن ابتدا تحت تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD) قرار گرفته و سپس با نرخ حرارت‌دهی 200°C/s تا چندین دمای مختلف در دو محدوده‌ی زیر دمای بحرانی (Ac_1) و بین دمای بحرانی آنیل فوق سریع شدند. نتایج نشان می‌دهد که به علت افزایش دمای شروع تبلور مجدد حین آنیل فوق سریع، ریزساختار کاملاً تبلور مجدد یافته در محدوده‌ی زیر دمای بحرانی اتفاق نمی‌افتد. آنیل فوق سریع فولاد کم کربن SPD شده تا دمای 730°C باعث می‌شود که تقابل بین تبلور مجدد و دگرگونی فاز اتفاق بیافتد و باعث ریزدانه شدن ساختار شود. در این حالت ریزساختار فولاد حین آنیل فوق سریع شامل دانه‌های ریز فریت تبلور مجدد یافته است که فازهای آستنیت به طور ظریف و انبوه اطراف فریت قرار گرفته و حین سرد شدن به پرلیت تبدیل می‌شود. آستنیت‌های شکل گرفته در این حالت به نوعی باعث قفل شدن ریزساختار شده و پایداری حرارتی را حین آنیل فوق سریع تا دماهای بالاتر برای این فولاد به ارمغان می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: آنیل فوق سریع، تقابل، تبلور مجدد، دگرگونی فاز، دمای بحرانی.

^۱ - استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی-دانشگاه شهید بهشتی - تهران-ایران

^۲ - استاد دانشکده مهندسی و علم مواد-دانشگاه صنعتی شریف- تهران-ایران

*- نویسنده مسئول مقاله: mkazemi@sharif.edu

پیشگفتار

کنترل ریزساختار از جمله پالایش دانه و اصلاح توزیع فازها، یکی از موارد مهم در بهبود خواص مکانیکی فولادها بدون افزودن عناصر آلیاژی گران قیمت می‌باشد [۱]. در دهه‌ی اخیر، روش‌ها و تکنیک‌های نوینی برای پالایش ریزساختار فولادها توسعه یافته است که عمده‌ی این روش‌ها مبتنی بر روش تغییر شکل پلاستیک شدید است [۲]. از سوی دیگر، آنیل فوق سریع فولادها به عنوان فرآیندی که باعث ایجاد تبلور مجدد بسیار سریع [۳] یا دگرگونی فازی بسیار سریع [۴] می‌شود، اخیراً به عنوان روشی برای کنترل ریزساختار فولادها پیشنهاد شده است [۲، ۴].

آنیل فولاد کم کربن با نرخ حرارت‌دهی بالا، هم روی مکانیزها و هم روی سینتیک پدیده‌های حین آنیل مؤثر است. دگرگونی فریت به آستنیت به طور ذاتی تحت تأثیر نرخ حرارت‌دهی و میزان انرژی کرنشی ذخیره شده است. هنگامی که نرخ حرارت‌دهی افزایش یابد، سینتیک جوانه‌زنی و رشد آستنیت زیاد می‌شود [۵، ۶].

وجود فریت‌های تغییر شکل یافته روی سینتیک تشکیل آستنیت مؤثر است. افزایش نرخ حرارت‌دهی از انجام تبلور مجدد در دمای زیر دمای بحرانی ممانعت می‌کند. بنابراین عیوب موجود در فریت‌های تغییر شکل یافته تا محدوده‌ی دمایی بین بحرانی حفظ می‌شوند که همین عامل، خود باعث افزایش محل‌های جوانه زنی آستنیت می‌شود [۶، ۷]. مقدار کرنش ناشی از تغییر شکل و کسر دانه‌های فریت تبلور مجدد نیافته اندکی قبل از شروع دگرگونی فاز، مشخص می‌کند که چه مقدار سینتیک دگرگونی فریت به آستنیت افزایش یابد.

انرژی ذخیره شده در اثر تغییر شکل، نیروی محرکه‌ی دگرگونی فریت به آستنیت را فراهم می‌کند و باعث افزایش نرخ جوانه‌زنی و رشد آستنیت در نرخ حرارت‌دهی بالا می‌شود، چرا که مسیرهای نفوذ در دانه‌های تغییر شکل یافته فریت بیشتر در دسترس است [۵، ۶، ۸، ۹].

تأثیر نرخ حرارت‌دهی بر تبلور مجدد در دو محدوده‌ی دمایی زیر دمای بحرانی و بین دمای بحرانی (یا محدوده‌ی تقابل) نیز باید به تفکیک بحث شود. به نظر می‌رسد که تبلور مجدد تنها تا قبل از شروع دگرگونی فاز به طور ذاتی تحت تأثیر نرخ حرارت‌دهی است. این موضوع مکرر در کارهای پژوهشی اثبات شده است که نرخ حرارت‌دهی بالا،

دمای شروع تبلور مجدد حین آنیل را افزایش می‌دهد [۲، ۵، ۶، ۱۰-۲۰] که دلیل آن را عدم فرصت کافی برای نفوذ و مهاجرت مرزدانه‌ها به سمت دماهای بالاتر ذکر کرده‌اند [۱۱، ۱۹]. از سوی دیگر، نرخ حرارت‌دهی بالا باعث باقی‌ماندن انرژی کرنشی ذخیره شده‌ی بیشتر در دمای بالاتر است. بنابراین وجود انرژی کرنشی لازم و دمای بالا، می‌تواند سبب جبران زمان کم ناشی از نرخ بالای حرارت‌دهی و وقوع تبلور مجدد در دمای بالاتر شود.

حال هنگامی که دمای فولاد تغییر شکل یافته حین آنیل فوق سریع به محدوده‌ی بین بحرانی می‌رسد، تبلور مجدد به یک‌باره شتاب می‌گیرد؛ اما نه با مکانیزیم‌هایی که در محدوده‌ی دمایی زیر بحرانی اتفاق می‌افتد. تبلور مجدد پر شتاب، به معنای این است که سینتیک جوانه زنی و رشد بالاست. این شتاب در تبلور مجدد به علت وجود «تقابل» حاصل می‌شود. نرخ حرارت‌دهی کافی و وجود دانه‌های فریت تبلور مجدد نشده، شرایط لازم برای تقابل بین تبلور مجدد و دگرگونی فاز را فراهم می‌کند. تقابل، خودش روی سینتیک دگرگونی تأثیر می‌گذارد، علاوه بر تأثیری که نرخ حرارت‌دهی و میزان تغییر شکل دانه‌های فریت دارند. تقابل علاوه بر تأثیر بر سینتیک دگرگونی فاز، روی توزیع فضایی و مورفولوژی آستنیت نیز تأثیر می‌گذارد [۵، ۶] که همین موضوع می‌تواند باعث بهبود برخی از خواص در فولادهای آنیل شده با نرخ حرارت‌دهی بالا شود.

اگرچه آنیل فوق سریع فولادهای کم کربن در چندین مقاله به چشم می‌خورد [۲، ۹، ۱۱، ۱۷]، ولی این شرایط برای وقتی که کرنش‌های بسیار شدید به فولاد اعمال شده باشد، هنوز بررسی نشده است. در این پژوهش، فولاد ابتدا تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار می‌گیرد، سپس آنیل فوق سریع روی آن انجام می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده به نظر می‌رسد وجود انرژی کرنشی بسیار زیاد ناشی از تغییر شکل پلاستیک شدید و نیز مکانیزیم‌های حین آنیل فوق سریع بتواند ریزساختار فولاد کم کربن را به شدت تحت تأثیر قرار دهد.

مواد و روش‌ها

ماده‌ی مورد استفاده در این پروژه، فولاد کم کربن St-12 به شکل ورق با ضخامت ۳ میلی‌متر است و دارای ترکیب شیمیایی به صورت جدول ۱ است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق فولاد کم کربن مورد استفاده (کلیه اعداد به صورت درصد وزنی است)

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Fe |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 0.050 | 0.007 | 0.203 | 0.011 | 0.004 | 0.008 | Bal. |

برای آنیل فوق سریع، ابتدا نمونه‌ها تا ضخامت ۱/۸ میلی‌متر سنگ زده شده و سپس در ابعاد ۱۴ در ۸۰ میلی-متر برش می‌خورد. حرارت‌دهی با نرخ 200°C/s و در دو محدوده‌ی زیر دمای بحرانی و بین دمای بحرانی انجام گرفت. بلافاصله بعد از آنیل فوق سریع، نمونه‌ها توسط پاشش باد و آب با نرخ خنک‌کاری در حدود 700°C/s خنک می‌شوند. سپس نمونه‌ها در ابعاد کوچکتر برش خورده و برای بررسی‌های متالوگرافی آماده می‌شوند.

نتایج و بحث

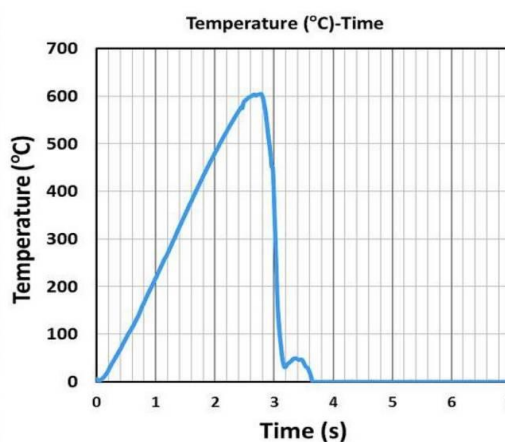
ریزساختار فولاد قبل و بعد از تغییر شکل پلاستیک شدید

شکل ۲ ریزساختار فولاد خریداری شده را نشان می‌دهد. ریزساختار ورق شامل دانه‌هایی نسبتاً کشیده شده در جهت نورد است. همچنین کاربیدهای پراکنده در داخل دانه‌ها به خوبی مشاهده می‌شود و فاز پرلیت نیز در ریزساختار وجود ندارد.

بعد از دو پاس تغییر شکل پلاستیک، ریزساختار این فولاد به صورت شکل ۳ است.

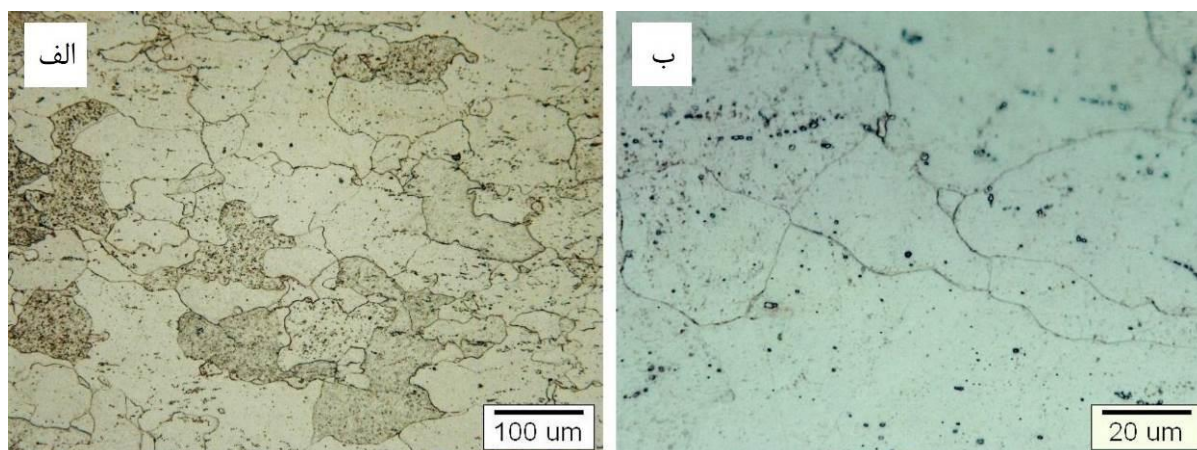
ورق‌های فولادی به ضخامت ۳ میلی‌متر، ابتدا در ابعاد ۸۰ در ۵۰ میلی‌متر برش می‌خورد. اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید توسط روش فشار در قالب شیاردار محدود شده^۱ و به میزان ۲ پاس می‌باشد. هر پاس این فرآیند که خود شامل ۲ مرحله کنگره‌دار کردن و ۲ مرحله صاف کردن است، کرنشی معادل ۱/۱۶ اعمال می‌کند. جزئیات بیشتر این روش و مراحل مختلف آن در مراجع [۲۱، ۲۲] آمده است. به منظور روانکاری و حداقل اصطکاک بین قالب و نمونه، یک لایه تفلون دور ورق پیچیده می‌شود.

دستگاه آنیل فوق سریع بر مبنای حرارت‌دهی مقاومتی و با استفاده از یک ترانس جریان بالا عمل می‌کند که توسط واحد کنترل دیجیتال هدایت می‌شود. اندازه‌گیری دما توسط سیم ترموکوپل که قطعه متصل شده است انجام می‌شود. خواندن دما توسط دستگاه داده‌بردار با سرعت داده‌برداری بسیار بالا انجام گرفته و همزمان به رایانه منتقل می‌شود. نمودار دما-زمان همزمان با انجام فرآیند رسم و ذخیره می‌شود. شکل ۱ شمایی از این دستگاه و یکی از نمودارهای خروجی دستگاه را نشان می‌دهد.

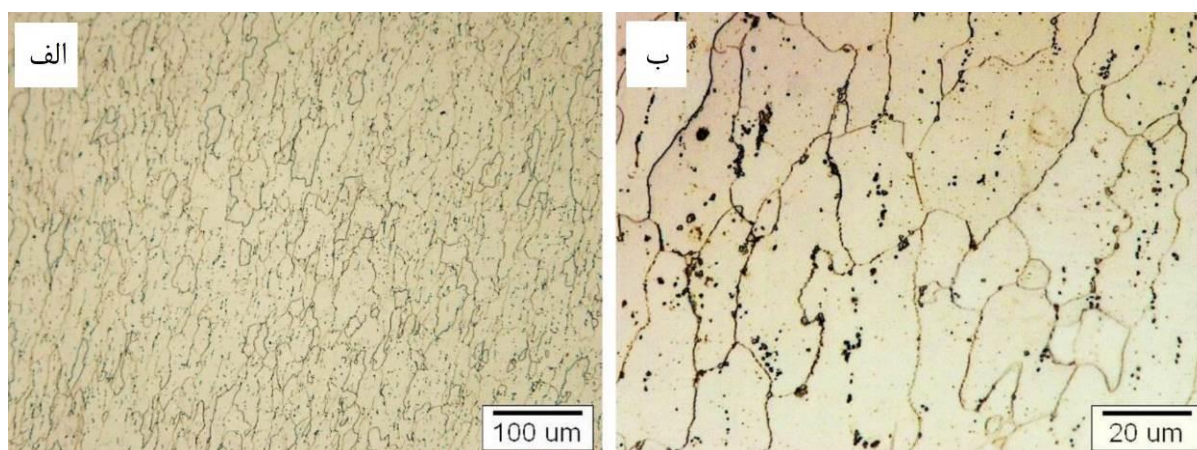


شکل ۱- دستگاه آنیل فوق سریع و یکی از نمودارهای خروجی دستگاه

^۱ -Constrained Groove Pressing (CGP)



شکل ۲- ریزساختار ورق فولاد کم کربن خریداری شده در دو بزرگنمایی مختلف برای نشان دادن اندازه و جهت گیری دانه-ها (الف) و برای نشان دادن کاربیدهای موجود در ریزساختار (ب). جهت نورد به صورت افقی است



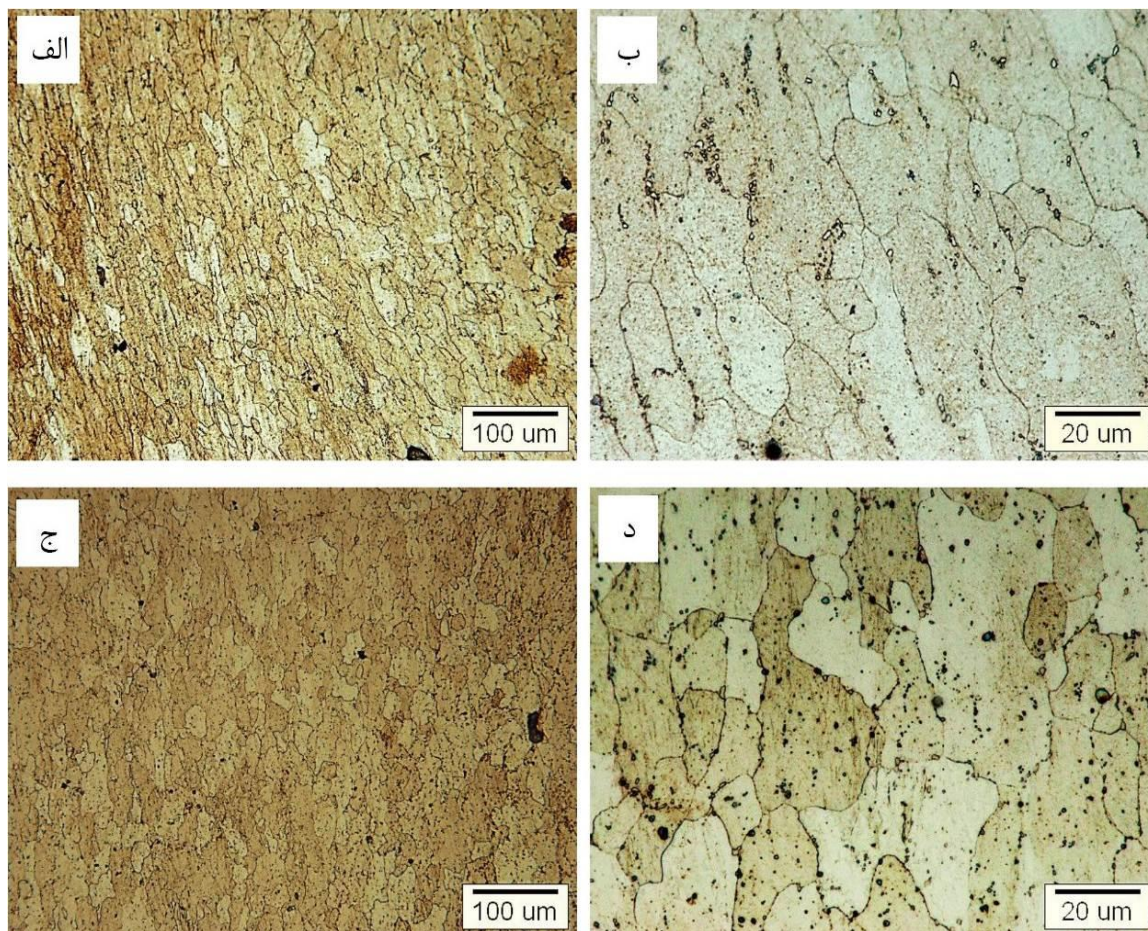
شکل ۳- ریزساختار ورق فولاد کم کربن بعد از دو پاس تغییر شکل پلاستیک شدید در دو بزرگنمایی مختلف

یافته الزاماً ریزدانه محسوب نمی‌شود [۵، ۲۳]. در یکی از پژوهش‌های منتشر شده، آنیل معمول فولاد کم کربن با ترکیب مشابه فولاد مورد مطالعه بعد از دو پاس تغییر شکل پلاستیک شدید باعث می‌گردد تبلور مجدد در دمای 550°C درجه سانتی‌گراد شروع و تکمیل شود. اما آنیل در دمای بالاتر از دمای مذکور، سبب رشد غیرعادی دانه شده و باعث غیر همگن شدن ریزساختار می‌شود [۲۴]. شکل ۴ ریزساختار فولاد تغییر شکل پلاستیک شدید یافته را بعد از آنیل معمول در کوره (با نرخ حرارت‌دهی $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ $0/3$ و بدون زمان نگهداری) در دو دمای مختلف 500°C و 650°C نشان می‌دهد که به خوبی عدم تبلور مجدد در دمای 500°C و وقوع کامل تبلور مجدد در 650°C مشاهده می‌شود.

در ریزساختار فولاد دو پاس تغییر شکل پلاستیک شدید یافته در مقایسه با نمونه‌ی خریداری شده، ساختار ریزدانه‌تر شده و کاربیدها پراکنده‌تر شده‌اند. همچنین کاربیدها در مرز دانه‌ها نیز علاوه بر داخل دانه‌ها حضور دارند.

آنیل فوق سریع در محدوده‌ی زیر دمای بحرانی

برای روشن‌تر شدن تاثیر آنیل فوق سریع بر دمای شروع تبلور مجدد، بهتر است در ابتدای کار به تبلور مجدد این نوع فولاد حین آنیل معمول پرداخته شود. در فرآیندهای آنیل معمول فولاد کم کربن نورد سرد شده که نرخ حرارت‌دهی پایینی دارند، تبلور مجدد در زیر دمای بحرانی شروع و کامل می‌شود، هر چند ساختار تبلور مجدد



شکل ۴- ریزساختار فولاد کم کربن تغییر شکل پلاستیک شدید یافته بعد از آنیل معمول در کوره با نرخ حرارت دهی 0.3°C/s تا دو دمای مختلف بدون زمان نگهداری در کوره و در دو بزرگنمایی مختلف. (الف و ب) 500°C و (ج و د) 650°C

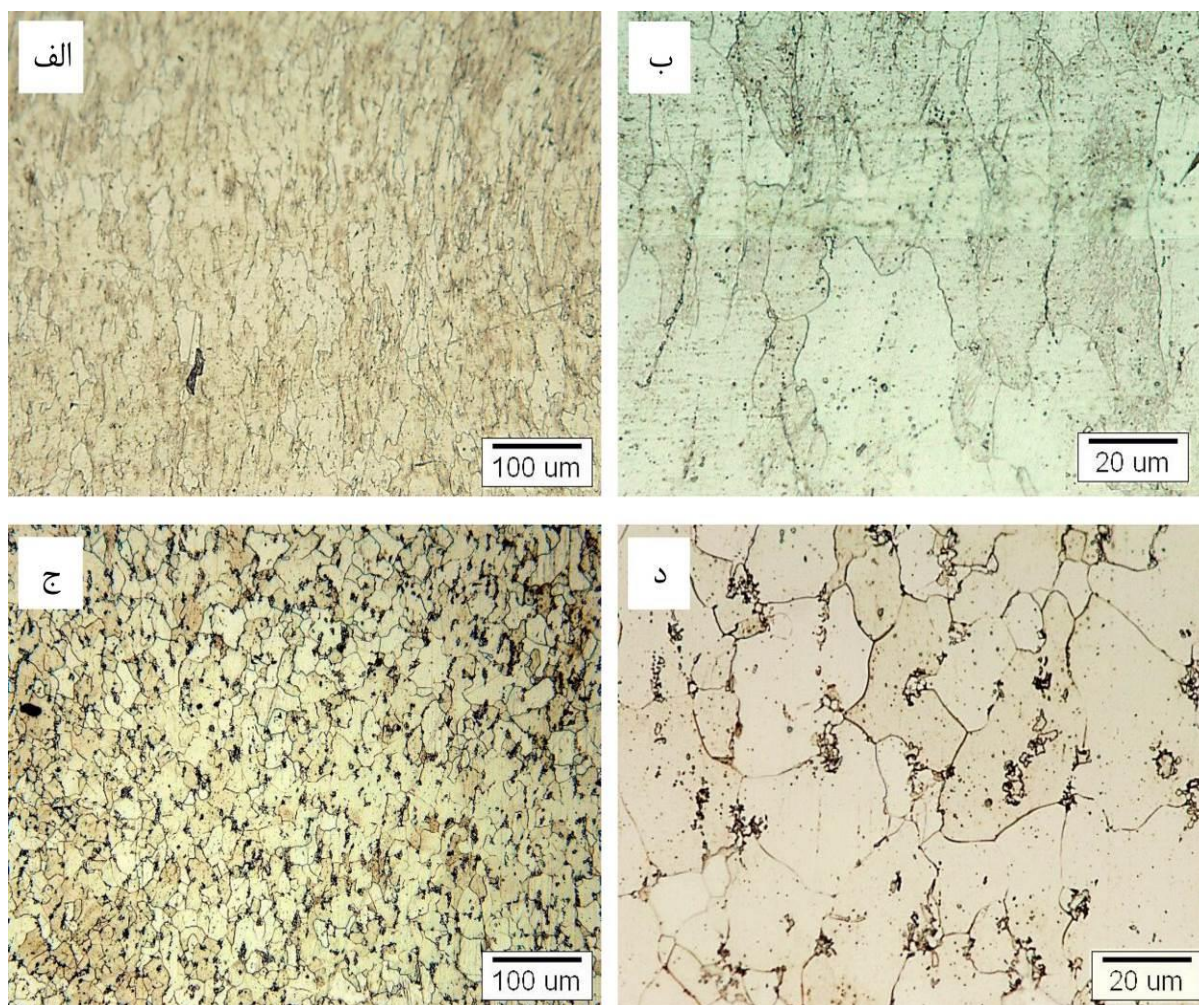
آنیل فوق سریع در نزدیکی دمای بین دمای بحرانی

برای بررسی دقیق تر مکانیزم‌های حین آنیل فوق سریع به خصوص در محدوده‌ی بین دمای بحرانی، وضعیت ریزساختار فولاد در دمای اندکی زیر دمای بحرانی بررسی شده است. ریزساختار فولاد کم کربن تغییر شکل پلاستیک شدید یافته بعد از آنیل فوق سریع با نرخ حرارت دهی 200°C/s تا دمای 715°C (اندکی زیر دمای بحرانی) در شکل ۶ آمده است.

همان گونه که مشاهده می‌شود، آنیل فوق سریع تا دمای 715°C باعث می‌شود تبلور مجدد به صورت جزئی اتفاق بیافتد. همچنین، هیچ اثری از فاز پرلیت (و یا مارتنزیت) که نشان دهنده‌ی شروع دگرگونی فاز باشد، در این ریزساختار مشاهده نمی‌شود. پیشرفت تبلور مجدد با افزایش دمای آنیل فوق سریع نیز با مقایسه این تصویر و ریزساختار نشان داده شده در شکل ۵ به خوبی مشخص است.

همان گونه که ذکر شد، نرخ حرارت دهی بالا باعث جابجا شدن دمای شروع تبلور مجدد به سمت دماهای بالاتر (نزدیک دمای Ac_1 و بعد از آن) می‌شود. بنابر این به نظر می‌رسد آنیل زیر دمای بحرانی فولاد با نرخ حرارت دهی بالا نتواند باعث شروع تبلور مجدد گردد و یا چنانچه شروع شود، به صورت جزئی خواهد بود. بررسی ریزساختار این فولاد در دو دمای ذکر شده بعد از آنیل فوق سریع با نرخ حرارت دهی 200°C/s در شکل ۵ آمده است.

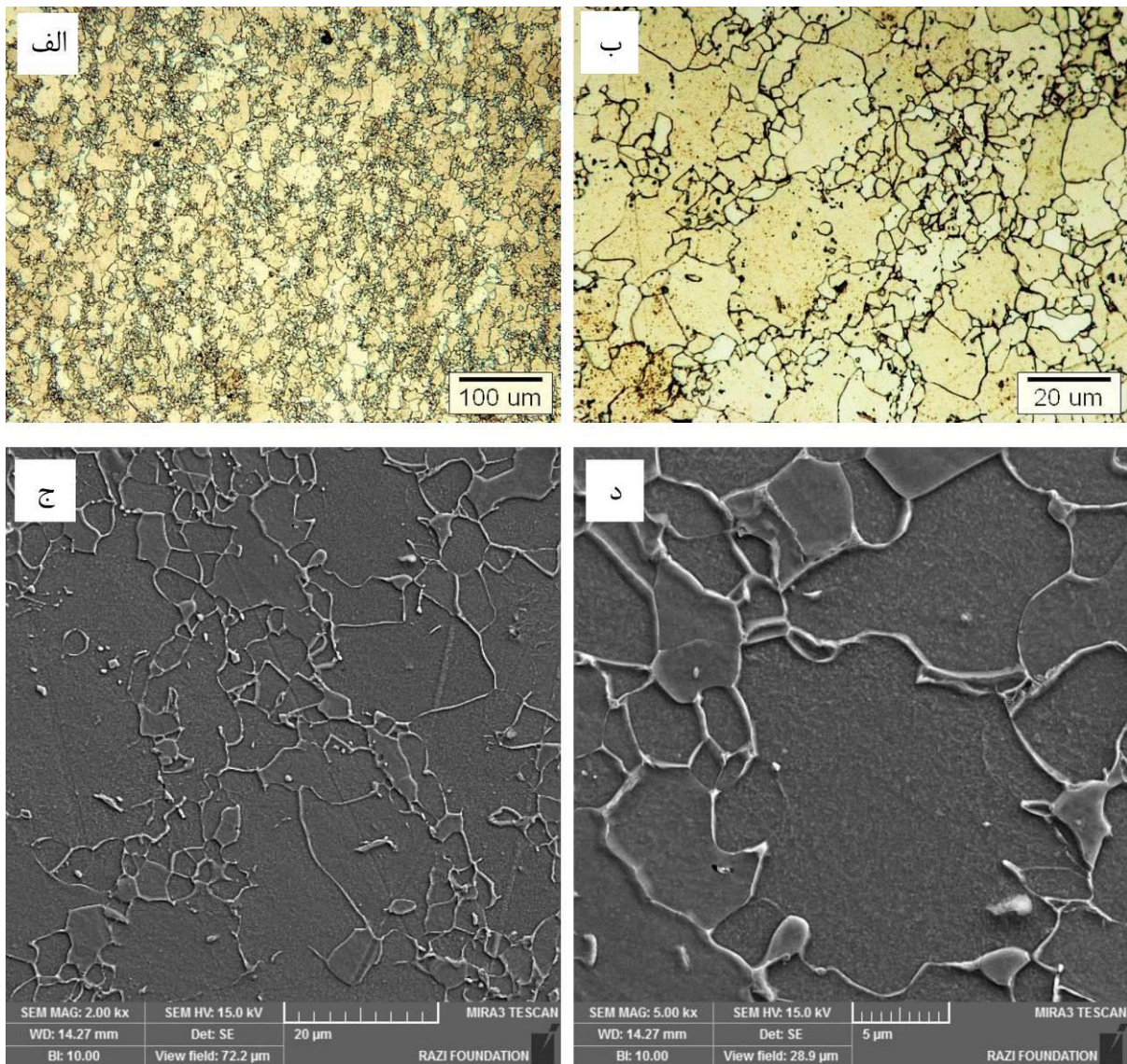
در نمونه آنیل فوق سریع شده تا دمای 500°C ، تبلور مجدد مشاهده نمی‌شود. ولی با بالا رفتن آنیل فوق سریع تا دمای 650°C ، دانه‌های بسیار ریز مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد تبلور مجدد شروع شده است ولی در صد پیشرفت بسیار کمی دارد. در حالی که نمونه‌ی آنیل شده در کوره در همین دما به تبلور مجدد به طور کامل انجام شده بود.



شکل ۵- ریزساختار فولاد کم کربن تغییر شکل پلاستیک شدید یافته بعد از آنیل فوق سریع با با نرخ حرارت‌دهی $200\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ تا دو دمای مختلف و در دو بزرگنمایی مختلف. (الف و ب) $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ و (ج و د) $650\text{ }^{\circ}\text{C}$

در این ریزساختار مشخص است که دانه‌های فریت به طور کامل تبلور مجدد شده‌اند و اندازه‌ی دانه متوسط در شده‌اند. وجود پرلیت‌ها در ریزساختار نشان از وقوع پدیده-ی دگرگونی فاز دارد و نیز ریزساختار تمام تبلور مجدد یافته نشان‌دهنده‌ی پیشرفت سریع تبلور مجدد در این بازه‌ی دمایی دارد. در نتیجه با بررسی ریزساختار، وقوع تقابل بین تبلور مجدد و دگرگونی فاز کاملاً تأیید می‌شود. اطمینان از وقوع تقابل با استناد به شواهد ذکر شده، در یکی دیگر از پژوهش‌ها [۹] نیز بر آن تأکید شده است.

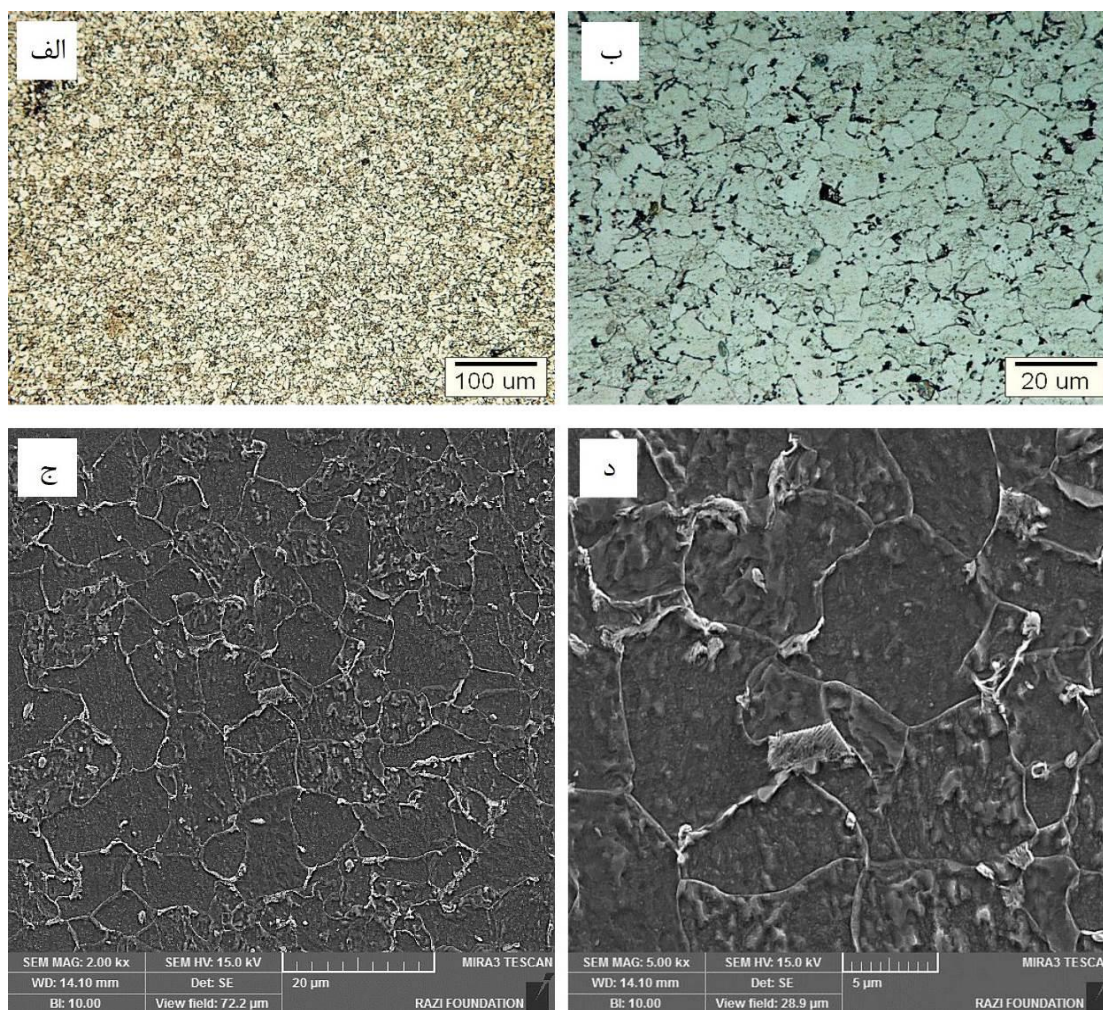
هنگامی دمای آنیل فوق سریع به $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ یعنی اندکی بالاتر از دمای بحرانی می‌رسد، تقابل بین تبلور مجدد و دگرگونی اتفاق می‌افتد. چرا که از یک سو، تبلور مجدد هنوز در حال پیشرفت است و به علت عدم تکمیل تبلور مجدد، تعداد قابل توجهی دانه‌های فریت تبلور مجدد نیافته در ریزساختار وجود دارد، از سوی دیگر دمای آنیل به بالاتر از دمای بحرانی رسیده و دگرگونی فریت به آستنیت آغاز شده است. شدت این تقابل به مقدار حضور فریت‌های تغییر شکل یافته (تبلور مجدد نشده) و نیز به مقدار کرنش موجود در آن‌ها بستگی دارد. ریزساختار فولاد کم کربن تغییر شکل پلاستیک شدید یافته بعد از آنیل فوق سریع با نرخ حرارت‌دهی $200\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ تا دمای $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶- ریزساختار فولاد کم کربن تغییر شکل پلاستیک شدید یافته بعد از آنیل فوق سریع با نرخ حرارت دهی 200°C/s تا دمای 715°C (اندکی زیر دمای بحرانی) (الف) و (ب) تصویر میکروسکوپ نوری در دو بزرگنمایی مختلف، (ج) و (د) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

شده بالا و تقابل، سینتیک دگرگونی آستنیت بالاست، در نتیجه شتاب تبلور مجدد نیز به علت وجود مناطق مستعد جوانه زنی، افزایش می‌یابد که باعث ایجاد ساختاری کاملاً ریزدانه و همگن می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که تبلور مجدد در محدوده‌ی دمایی بین بحرانی ذاتاً تحت تأثیر نرخ حرارت دهی نیست (بر خلاف دگرگونی فاز فریت به آستنیت) و این تقابل است که تبلور مجدد را کنترل می‌کند.

حدود ۸ میکرون است. همچنین، پرلیت‌ها در مرزدانه‌های فریت تبلور مجدد یافته به صورت ظریف ولی انبوه پخش آنیل فوق سریع فولادها تا محدوده‌ی دمایی که تقابل در آنها اتفاق می‌افتد، باعث می‌شود که فازهای آستنیت حین تقابل با سینتیک جوانه زنی بالایی تشکیل شوند و خود به عنوان مناطق مطلوب برای جوانه زنی دانه‌های تبلور مجدد عمل کنند. حال از آنجایی که در آنیل فوق سریع به علت وجود نرخ حرارت دهی بالا، انرژی کرنشی ذخیره



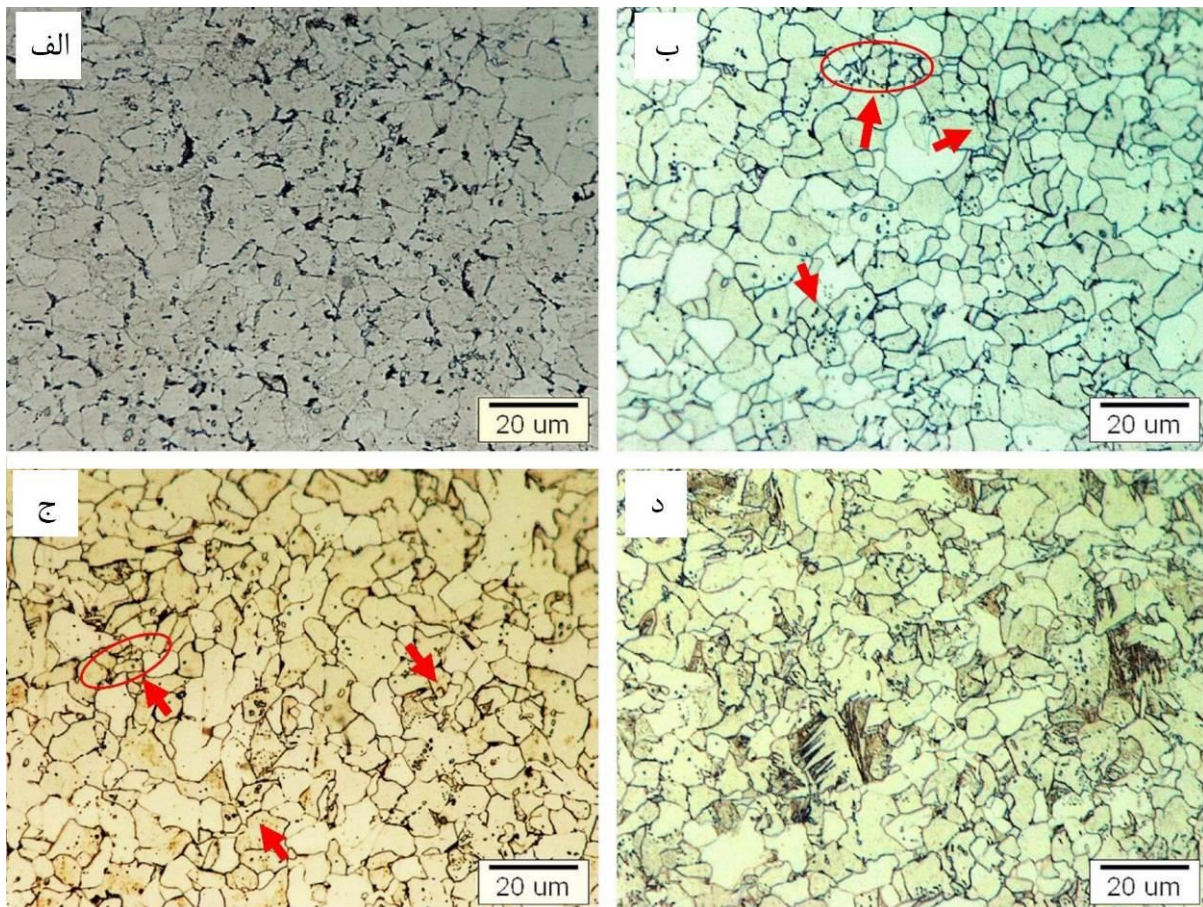
شکل ۷- ریزساختار فولاد کم کربن تغییر شکل پلاستیک شدید یافته بعد از آنیل فوق سریع با نرخ حرارت دهی $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ۲۰۰ تا دمای $^{\circ}\text{C}$ ۷۳۰ (اندکی بالاتر از دمای بحرانی) (الف) و (ب) تصویر میکروسکوپ نوری در دو بزرگنمایی مختلف، (ج) و (د) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

بین دمای بحرانی تحت آنیل فوق سریع با نرخ حرارت دهی $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ۲۰۰ قرار گرفت که ریزساختار آن در شکل ۸ نشان داده شده است.

همان گونه که مشاهده می شود، آنیل فوق سریع در دماهای بالاتر از دمای بحرانی، باعث رشد دانه ها نمی شود که علت آن همان اثر قفل کنندگی فاز آستنیت است که اجازه رشد را به دانه های فریت تبلور مجدد یافته نمی دهد. در نمونه های آنیل سریع شده در دمای بالاتر ولی نزدیک دمای بحرانی به دلیل ظریف بودن و کسر حجمی پایین فاز آستنیت، هنگام سرد شدن، پرلیت در محل فاز آستنیت در ریزساختار فولاد ایجاد می شود. تبدیل آستنیت ظریف به پرلیت حتی در نرخ های سرد شدن بالا توسط چندین پژوهشگر نیز بیان شده است [۱۸، ۲۵].

آنیل فوق سریع در دمای بالاتر در محدوده بین بحرانی

حین آنیل فوق سریع در محدوده بین دمای بحرانی و وقوع تقابل، فاز آستنیت در اطراف دانه های فریت (هم فریت های تبلور مجدد یافته و هم تغییر شکل یافته) جوانه زده و به طور ظریف پخش می شوند. وجود فازهای آستنیت از یک سو باعث ایجاد مناطق مستعد برای جوانه زنی دانه های تبلور مجدد فریت می شود و از سوی دیگر دانه های فریت تبلور مجدد یافته را قفل می کند. این اثر قفل کنندگی فاز آستنیت که به میزان شدت تقابل بستگی دارد، یکی از عواملی است که می تواند باعث ریزدانه گی ریزساختار و نیز پایدار ماندن آن در دماهای بالاتر شود. برای روشن تر شدن این موضوع، فولاد تغییر شکل پلاستیک شدید یافته تا چندین دمای مختلف در محدوده



شکل ۸- ریزساختار فولاد کم کربن تغییر شکل پلاستیک شدید یافته بعد از آنیل فوق سریع با نرخ حرارت دهی $200\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ در چندین دمای مختلف در محدوده دمایی بین بحرانی (الف) $735\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، (ب) $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، (ج) $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، (د) $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. فلش‌ها نشان دهنده‌ی برخی از دانه‌های فریت جدید (α_2) هستند که از فاز آستنیت تشکیل شده‌اند. به تفاوت مورفولوژی بین α_2 و فریت‌های اولیه تبلور مجدد یافته توجه شود

اندازه‌ی متفاوت است. برخی از دانه‌های فریت α_2 با علامت پیکان در شکل ۸ (ب) نشان داده شده‌اند.

با افزایش دمای آنیل فوق سریع در محدوده‌ی دمای بین بحرانی، کسر حجمی و اندازه دانه‌ی آستنیت بیشتر می‌شود. در این حالت دانه‌های آستنیت به خرج فریت‌های تبلور مجدد یافته رشد می‌کنند و در نتیجه فریت‌های α_2 در ریزساختار نهایی نسبت به دماهای پایین‌تر بزرگ‌تر خواهند بود. اندازه‌ی دانه‌های α_2 در دمای $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ در حدود ۶ میکرون و در دمای $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ در حدود ۹ میکرون است. این در حالی است که اندازه‌ی فریت‌های اولیه تبلور مجدد یافته تقریباً ثابت است. هر چند برای نمونه‌ی آنیل فوق سریع شده تا دمای $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، به علت اندازه‌ی بزرگ دانه‌های آستنیت، فریت‌های سوزنی شکل حین سرد شدن

هنگامی که دمای آنیل فوق سریع فراتر از دمای بحرانی (AC_1) می‌رود، درصد فاز آستنیت حین آنیل افزایش می‌یابد و دانه‌های فریت جدید (α_2) حاصل از فاز آستنیت حین سرد شدن در ریزساختار پدیدار می‌شوند. برای نمونه‌های آنیل شده تا دمای $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ، به دلیل اینکه حین آنیل، آستنیت به صورت ظریف در اطراف مرزدانه‌های فریت پخش شده است، فریت‌های ایجاد شده از آن‌ها حین سرد شدن نیز نسبت به دانه‌های فریت تبلور مجدد شده ظریف‌تر هستند. در این شرایط فریت‌های جدید α_2 دارای اندازه‌ای بین ۳ تا ۴ میکرون هستند در حالی که دانه‌های فریت تبلور مجدد نیافته، ابعادی بین ۸ تا ۱۰ میکرون دارند. در نتیجه ریزساختار حاصل دو نوع فریت با دو

۳- آنیل فوق سریع تا دمای اندکی بالاتر از دمای بحرانی، باعث ایجاد ریزساختاری ریزدانه و پرلیت‌های ظریف و پخش شده به صورت انبوه در اطراف دانه‌های فریت تبلور مجدد یافته می‌شود که به علت وقوع تقابل قوی بین تبلور مجدد و دگرگونی فاز است.

۴- تبلور مجدد در محدوده‌ی دمایی بین بحرانی ذاتاً تحت تأثیر نرخ حرارت‌دهی نیست (بر خلاف دگرگونی فاز فریت به آستنیت) و این تقابل است که تبلور مجدد را کنترل می‌کند.

۵- ریزدانگی فولاد حین آنیل فوق سریع شده با افزایش دمای آنیل در محدوده‌ی بین دمای بحرانی پایداری حرارتی از خود نشان می‌دهد که به علت تشکیل آستینت‌های ظریف و پخش شده حین آنیل فوق سریع و قابلیت قفل شوندگی ریزساختار توسط آن‌هاست.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف به خاطر فراهم نمودن امکانات پژوهشی لازم در این تحقیق سپاسگزاری نمایند.

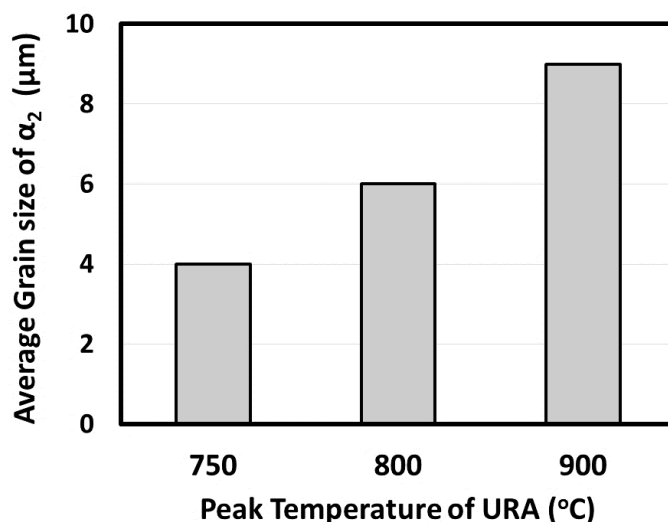
در ریزساختار ایجاد شده است. نکته قابل توجه این است که همانطور که در شکل ۸ نیز مشخص است، فریت‌های α_2 در دماهای مختلف آنیل از فریت‌های اولیه تبلور مجدد یافته قابل تشخیص هستند. فریت‌های α_2 ، در مقایسه با فریت‌های اولیه تبلور مجدد یافته، دارای شکل نسبتاً غیر منظم و گوشه‌های تیز هستند. شکل ۹ تغییرات اندازه دانه‌ی فریت‌های α_2 را با تغییر دمای آنیل در محدوده‌ی بین بحرانی نشان می‌دهد که به خوبی نشان دهنده‌ی افزایش کسر حجمی فریت‌های α_2 با افزایش دمای آنیل است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش آنیل فوق سریع فولاد کم کربن با نرخ حرارت‌دهی 200°C/s بعد از تغییر شکل پلاستیک شدید انجام گرفت. نتایج به دست آمده عبارتند از:

۱- آنیل فوق سریع این فولاد باعث افزایش دمای شروع و پایان تبلور مجدد می‌شود.

۲- حرارت‌دهی با نرخ 200°C/s باعث می‌شود که تنها درصد کمی از تبلور مجدد زیر دمای بحرانی انجام گیرد.



شکل ۹- تغییرات اندازه‌ی دانه‌های فریت α_2 در ریزساختار فولاد کم کربن تغییر شکل پلاستیک شدید یافته، بعد از آنیل فوق سریع با نرخ حرارت‌دهی 200°C/s در چندین دمای مختلف در محدوده‌ی دمایی بین بحرانی

References:

- ۱- قناعی ا, ادريس ح, مناجاتی زاده ح, حسن نیا م ح (۱۳۹۲) بررسی اثر دمای تبلور دوباره بر خواص پخت سختی فولادهای فوق کم‌کربن. مجله مواد نوین ۱۰۹:۳-۱۱۶.
- 2- Massardier V, Ngansop A, Fabregue D, Merlin J (2010) Identification of the parameters controlling the grain refinement of ultra-rapidly annealed low carbon Al-killed steels. *Mater Sci Eng A* 527:5654–5663.
- 3- Atkinson M (1993) Ultra-rapid annealing of low-carbon steel. *Mater forum* 17:181–208.
- 4- Lesch C, Álvarez P, Bleck W, Gil Sevillano J (2007) Rapid Transformation Annealing: a Novel Method for Grain Refinement of Cold-Rolled Low-Carbon Steels. *Metall Mater Trans A* 38:1882–1890.
- 5- Huang J, Poole WJ, Militzer M (2004) Austenite formation during intercritical annealing. *Metall Mater Trans A* 35:3363–3375.
- 6- Zheng C, Raabe D (2013) Interaction between recrystallization and phase transformation during intercritical annealing in a cold-rolled dual-phase steel: A cellular automaton model. *Acta Mater* 61:5504–5517.
- 7- Chbihi A, Barbier D, Germain L, et al. (2014) Interactions between ferrite recrystallization and austenite formation in high-strength steels. *J Mater Sci* 49:3608–3621.
- 8- Peranio N, Li Y, Roters F, Raabe D (2010) Microstructure and texture evolution in dual-phase steels: Competition between recovery, recrystallization, and phase transformation. *Mater Sci Eng A* 527:4161–4168.
- 9- Karmakar A, Ghosh M, Chakrabarti D (2013) Cold-rolling and inter-critical annealing of low-carbon steel: Effect of initial microstructure and heating-rate. *Mater Sci Eng A* 564:389–399.
- 10- Gorelik SS (1981) Recrystallization in Metals and Alloys. MIR Publisher, Moscow.
- 11- Muljono D, Ferry M, Dunne D. (2001) Influence of heating rate on anisothermal recrystallization in low and ultra-low carbon steels. *Mater Sci Eng A* 303:90–99.
- 12- Arlazarov A, Brollo GL, Magar C (2014) Influence of Heating Rate on the Microstructure and Mechanical Properties of Annealed Low Carbon Steels. In: *Met*. 2014. pp 1–7.
- 13- Xu D, Li J, Meng Q, et al. (2014) Effect of heating rate on microstructure and mechanical properties of TRIP-aided multiphase steel. *J Alloys Compd* 614:94–101.
- 14- Li P, Li J, Meng Q, et al. (2013) Effect of heating rate on ferrite recrystallization and austenite formation of cold-roll dual phase steel. *J Alloys Compd* 578:320–327.
- 15- Azizi-Alizamini H, Militzer M, Poole WJ (2011) Austenite Formation in Plain Low-Carbon Steels. *Metall Mater Trans A* 42:1544–1557.
- 16- Petrov R, Sidor J, Kaluba W, Kestens L (2012) Grain Refinement of a Cold Rolled TRIP Assisted Steel after Ultra Short Annealing. *Mater Sci Forum* 715-716:661–666.
- 17- Stockemer J, Brande P Vanden, Brande P (2003) Recrystallization of a cold-rolled low-carbon steel by cold-

plasma-discharge rapid annealing. *Metall Mater Trans A* 34:1341–1348.

18- Gutiérrez C. E, Salinas-Rodríguez A, Nava-Vázquez E (2007) Effect of Fast Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Non-Oriented Al-Si Low C Electrical Steels. *Mater Sci Forum* 560:29–34.

19- Attallah MM, Strangwood M, Davis CL (2010) Influence of the heating rate on the initiation of primary recrystallization in a deformed Al–Mg alloy. *Scr Mater* 63:371–374.

20-Ferry M, Muljono D, Dunne DP (2001) Recrystallization Kinetics of Low and Ultra Low Carbon Steels during High-rate Annealing. *ISIJ Int* 41:1053–1060.

21- Khodabakhshi F, Kazeminezhad M, Kokabi AH (2010) Constrained groove pressing of low carbon steel: Nano-structure and mechanical properties. *Mater*

Sci Eng A 527:4043–4049.

22- Khodabakhshi F, Kazeminezhad M (2011) The effect of constrained groove pressing on grain size, dislocation density and electrical resistivity of low carbon steel. *Mater Des* 32:3280–3286.

23-Senuma T, Kawasaki K, Takemoto Y (2006) Recrystallization Behavior and Texture Formation of Rapidly Annealed Cold-Rolled Extralow Carbon Steel Sheets. *Mater Trans* 47:1769–1775.

24-Khodabakhshi F, Kazeminezhad M (2011) The annealing phenomena and thermal stability of severely deformed steel sheet. *Mater Sci Eng A* 528:5212–5218.

25-Karmakar A, Karani A, Patra S, Chakrabarti D (2013) Development of Bimodal Ferrite-Grain Structures in Low-Carbon Steel Using Rapid Intercritical Annealing. *Metall Mater Trans A* 44:2041–2052.