

## ارزیابی تحولات ریزساختاری فولاد AISI 201L در فرایند ترمومکانیکی پیشرفته

احد رضایی<sup>۱\*</sup>، عباس نجفی‌زاده<sup>۲</sup>، احمد کرمانپور<sup>۳</sup> و محمد معلمی<sup>۱</sup>

### چکیده

در این پژوهش، تحولات ریزساختاری فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 201L تحت عملیات نورد سرد و آنیل مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا، بمنظور اصلاح ساختار ریختگی فولاد 201L، نمونه‌هایی از جنس فولاد مزبور به مدت ۱۵ ساعت در دمای  $1200^{\circ}\text{C}$  همگن‌سازی، سپس تحت عملیات فورج داغ و آنیل انحلالی قرار گرفتند. در مرحله‌ی بعد، عملیات نورد سرد به میزان ۹۵-۱۰ درصد کاهش ضخامت انجام شد. نمونه‌های نورد شده در محدوده‌ی دمایی  $750-900^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۸۰۰-۱۵ ثانیه آنیل شدند. بررسی‌های ریزساختاری نیز به وسیله‌ی میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، دستگاه فریتوسکوپ و الگوی پراش پرتو ایکس انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش کار سرد میزان مارتنزیت ناشی از کرنش افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در کاهش ضخامت ۴۰ درصد به حد اشباع خود، یعنی ۱۰۰ درصد رسیده و با افزایش بیش‌تر کاهش ضخامت ساختار مارتنزیتی بدست آمده، دچار تغییر شکل می‌شود. از سوی دیگر، آنیل نمونه‌های ۹۵ درصد نورد سرد در دماهای  $850^{\circ}\text{C}$  و  $900^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳۰ ثانیه نیز منجر به تشکیل دانه‌های زیر ۱۰۰ نانومتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فولاد زنگ نزن 201L، مارتنزیت، نورد سرد، آنیل.

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان.  
 ۲- استاد گروه مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان.  
 ۳- دانشیار گروه مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان.  
 \*نویسنده‌ی مسئول مقاله: a.rezaee@ma.iut.ac.ir

## پیشگفتار

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، به دلیل مقاومت به خوردگی خوب و انعطاف‌پذیری مناسب از جمله مواد مهندسی هستند که مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند، اما خواص مکانیکی پایین، کاربرد آن‌ها را در صنعت محدود کرده است [۱]. از جمله ویژگی‌های این گروه از فولادهای زنگ‌نزن، تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت در حین عملیات تغییر شکل در زیر دمای  $M_d$  می‌باشد. در ادامه فرایند تغییرشکل، مارتنزیت تشکیل شده در ریزساختار خرد می‌شود و مکان‌های مناسب جوانه‌زنی را برای بازگشت مارتنزیت به آستنیت در حین عملیات آنیل بعدی فراهم می‌کند و در نهایت، منجر به ریزدانه شدن آستنیت و بهبود خواص مکانیکی آن می‌شود. در این فرایند، کسر حجمی مارتنزیت با افزایش میزان تغییر شکل افزایش یافته و در یک میزان کرنش مشخص (کرنش اشباع) به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد [۲-۵]. ترتیب این تبدیل به این صورت است که ابتدا فاز آستنیت در اثر تغییر شکل به مارتنزیت اپسیلین ( $\epsilon$ ) با ساختار هگزاگونال تبدیل می‌شود و سپس با افزایش میزان کرنش این فاز به همراه آستنیت باقیمانده به مارتنزیت آلفا پرایم ( $\alpha'$ ) با ساختار تتراگونال تبدیل می‌شود. البته، مارتنزیت  $\alpha'$  می‌تواند به گونه‌ی مستقیم از آستنیت نیز شکل بگیرد. در مقادیر بالاتر از ۱۵ درصد کرنش مقدار فاز مارتنزیت  $\epsilon$  ناچیز خواهد بود. نرخ رشد ورقه‌های مارتنزیت در حدود  $1100 \text{ m/s}$  تخمین زده شده است و این امر سبب پیچیده شدن مطالعات در مورد تبدیل مارتنزیتی شده و تئوری‌های موجود را مبهم نگاه داشته است. مارتنزیت  $\alpha'$  روی نابجایی‌ها و مارتنزیت  $\epsilon$  روی نقص چیدن جوانه می‌زنند به گونه‌ای که نابجایی‌های پیچی نقشی مهم در جوانه‌زنی فاز  $\alpha'$  بازی می‌کنند. جوانه‌های اولیه  $\alpha'$  با زمینه‌ی آستنیتی به صورت هم‌دوست تشکیل می‌شوند و زمانی که تیغه‌های مارتنزیت  $\alpha'$  رشد می‌کنند، به صورت نیمه همبسته و ناهمبسته با زمینه در می‌آیند [۶-۷].

هدف از این پژوهش بررسی تحولات ریزساختاری فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 201L در حین عملیات ترمومکانیکی به عنوان عاملی تعیین‌کننده در بهبود ویژگی‌های مکانیکی آن می‌باشد.

## روش پژوهش

شمش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 201L پس از تهیه‌ی مذاب در کوره‌ی القایی تحت اتمسفر محیط، در یک قالب فلزی ریخته‌گری شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول ۱ آورده شده است. بمنظور حذف جدایش‌ها، از بین بردن ساختار ریختگی و کاهش میزان فریت دلتای موجود در ریزساختار شمش تهیه شده در دمای  $1200^\circ\text{C}$  به مدت ۱۵ ساعت همگن‌سازی شد. سپس عملیات فورج داغ بمنظور کاهش اندازه‌ی دانه‌های فولاد در محدوده‌ی دمایی  $1200-1000^\circ\text{C}$  و به صورت قالب باز انجام شد. جهت انجام آزمایش‌ها نمونه‌هایی با ابعاد  $8 \times 20 \times 60 \text{ mm}^3$  از جنس فولاد یاد شده تهیه و به مدت ۱۵۰ دقیقه در دمای  $1100^\circ\text{C}$  آنیل انحلالی شدند. نمونه‌های آماده شده تا ۹۵ درصد کاهش در سطح مقطع، نورد شده سپس در محدوده‌ی دمایی  $900-750^\circ\text{C}$  به مدت ۱۸۰۰-۱۵ ثانیه آنیل شدند. بمنظور اچ کردن نمونه‌ها از روش الکترواچ با محلول اسید نیتریک ۶۵ درصد و ولتاژ  $0.9 \text{ V}$  استفاده شد. ریزساختار نمونه‌ها نیز به وسیله‌ی میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. افزون بر این، از آزمون سختی ویکرز با بار  $10 \text{ kg}$  جهت سختی سنجی نمونه‌های نورد و آنیل شده استفاده شد و ارزیابی تغییرات فازی در حین انجام مراحل بالا نیز به وسیله‌ی دستگاه فریتوسکوپ و پراش پرتو ایکس صورت گرفت.

## نتایج و بحث

شکل ۱ ریزساختار نمونه‌ی آنیل انحلالی شده را در دمای  $1100^\circ\text{C}$  به مدت ۱۵۰ دقیقه نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، ریزساختار این نمونه شامل دانه‌های آستنیت (با اندازه‌ی دانه متوسط ۲۷ میکرومتر) و مقدار اندکی فریت دلتا در مرز دانه‌ها می‌باشد. شکل ۲ ساختار میکروسکوپ نوری فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 201L را پس از ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد نورد سرد نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل ۲-a مشاهده می‌شود، با اعمال ۱۰ درصد نورد سرد نزدیک به ۳۵ درصد مارتنزیت در ریزساختار تشکیل شده است. با افزایش میزان کار سرد مقدار فاز آستنیت کاهش و مقدار مارتنزیت در ریزساختار

مربوط به نمونه‌ی آنیل انحلالی شده (الگوی A) نشان دهنده‌ی وجود فاز آستنیت و مقدار اندکی مارتنزیت  $\alpha$  با پیک‌های (۱۱۰)، (۲۰۰) و (۲۱۱) می‌باشد. این امر نشان دهنده‌ی این است که دمای شروع استحاله‌ی مارتنزیتی ( $M_s$ ) برای نمونه‌ی آنیل انحلالی بالاتر از دمای محیط است [۹]. همان‌گونه که در الگوی B مشخص است، پس از ۹۵ درصد نورد سرد، تمام ریزساختار به مارتنزیت  $\alpha$  تبدیل می‌شود و پس از آنیل کردن نمونه‌ها، مارتنزیت به آستنیت تبدیل می‌شود. زمانی که دمای آنیل از  $750^\circ\text{C}$  به  $900^\circ\text{C}$  افزایش می‌یابد، شدت پیک‌های آستنیت افزایش و در مقابل شدت پیک‌های مارتنزیت کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، در این شکل مشاهده می‌شود که مارتنزیت در نمونه‌ی نورد شده جهت‌گیری ترجیحی در راستای صفحات {۱۱۰} دارد در حالی که مارتنزیت موجود در نمونه‌های آنیل شده دارای جهت‌گیری ترجیحی در راستای صفحات {۲۱۱} می‌باشد. نمونه‌ی آنیل شده در دمای  $900^\circ\text{C}$  تقریباً یک ساختار کاملاً آستنیتی را نشان می‌دهد.

شکل ۵-a تغییرات کسر حجمی مارتنزیت را در نمونه‌ی ۹۵ درصد نورد سرد به عنوان تابعی از زمان و دمای آنیل نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود، نرخ بازگشت مارتنزیت به آستنیت با افزایش دمای آنیل افزایش می‌یابد. با توجه به شکل نرخ بازگشت در زمان‌های اولیه‌ی آنیل به مراتب بالاتر است که این امر به دلیل دانسیته‌ی بسیار بالای عیوب که به عنوان مکان‌های مناسب جوانه‌زنی آستنیت در حین آنیل بشمار می‌روند، در زمان‌های ابتدایی آنیل می‌باشد. در دمای  $750^\circ\text{C}$  نرخ بازگشت مارتنزیت پایین بوده و حتی پس از گذشت ۱۸۰۰ ثانیه حدوداً ۲۰ درصد مارتنزیت در ریزساختار باقی مانده است. در حالی که در دماهای  $800^\circ\text{C}$ ،  $850^\circ\text{C}$  و  $900^\circ\text{C}$  تقریباً تمام مارتنزیت به ترتیب پس از ۱۸۰، ۸۰ و ۶۰ ثانیه به آستنیت تبدیل می‌شود. شکل ۵-b تغییرات سختی نمونه‌های آنیل شده را به عنوان تابعی از دما و زمان آنیل نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، با افزایش دما و زمان آنیل سختی کاهش می‌یابد. این کاهش سختی مربوط به کاهش دانسیته‌ی نابه‌جایی‌ها، کاهش میزان مارتنزیت و

افزایش می‌یابد (شکل ۲-b و ۲-c). جوانه‌های مارتنزیت  $\alpha$  ناشی از کرنش در محل‌هایی مانند باندهای برشی، میکرو باندها، دوقلوبی‌ها، نقص در چیده شدن صفحات کریستالی و مارتنزیت  $\epsilon$  که به وسیله‌ی تغییر شکل پلاستیکی شدید ایجاد شده‌اند، قرار می‌گیرند. مطالعات صورت گرفته در این زمینه نشان می‌دهند که این جوانه‌ها بیش‌تر در محل برخورد باندهای برشی تشکیل می‌شوند [۸]. با افزایش کار سرد، میزان عیوب موجود در ریزساختار افزایش و از این‌رو مکان‌های مناسب برای جوانه‌زنی مارتنزیت  $\alpha$  نیز بیش‌تر می‌شوند. لذا، جوانه‌های مارتنزیت  $\alpha$  شروع به رشد می‌کنند تا به حالت اشباع برسند. با ادامه‌ی فرایند تغییر شکل، مارتنزیت تشکیل شده در ریزساختار خرد شده و عیوب درون ریزساختار به شدت افزایش می‌یابند.

شکل ۳-a تغییرات میزان مارتنزیت ناشی از کرنش بر حسب درصد کاهش ضخامت را در فولاد AISI 201L نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در مراحل اولیه‌ی کار سرد و تا حدود ۲۵ درصد، کسر حجمی مارتنزیت ناشی از کرنش با نرخ بالا و تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در ادامه‌ی کار سرد (تا حدود ۴۰ درصد) میزان مارتنزیت ناشی از کرنش با سرعت کم‌تری افزایش یافته و با ادامه‌ی فرایند تغییر شکل تا ۹۵ درصد، مقدار مارتنزیت تغییر چندانی نداشته و فقط دچار تغییر شکل می‌شود. نمودار سختی بر حسب درصد کاهش ضخامت نیز در شکل ۳-b نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تا حدود ۳۰ درصد کار سرد سختی با سرعت قابل توجهی افزایش می‌یابد (از ۲۳۰ ویکرز در نمونه‌ی خام به حدود ۴۰۰ ویکرز در نمونه‌ی ۳۰ درصد نورد شده می‌رسد). این افزایش مقدار سختی مربوط به افزایش دانسیته‌ی عیوب شبکه‌ی کریستالی و هم‌چنین، بر اساس شکل ۲، مربوط به افزایش میزان فاز مارتنزیت ناشی از کرنش در حین افزایش کاهش ضخامت نیز می‌باشد. در ادامه‌ی کار سرد سختی با شیب ملایمی افزایش یافته تا جایی که در ۹۵ درصد کار سرد سختی به بیش‌ترین مقدار خود، یعنی ۵۴۷ ویکرز می‌رسد.

شکل ۴ الگوی XRD را برای نمونه‌های گوناگون نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، الگوی XRD

## منابع

- 1- W. F. Smith., "Structure and Properties of Engineering Materials", 2nd ed., 1987, McGraw-Hill.
- 2- K. Tomimura., S. Takaki., S. Tanimoto., and Y. Tokunaga., "Optimal chemical composition in Fe-Cr-Ni alloys for ultra grain refining by reversion from deformation induced martensite", ISIJ Int, 1991, A31, pp. 721-727.
- 3- Y. Ma., J.E. Jin., and Y.K. Lee., "A repetitive thermo-mechanical process to produce nanocrystalline in a metastable austenitic steel", Scripta Mater, 2005, A52, pp. 1311-1315.
- 4- D.L. Johannsen., A. Kyrolainen., and P. J. Ferreira., "Influence of annealing treatment on the formation of nano/submicron grain size AISI 301 austenitic stainless steels", Metall. Mater. Trans. A, 2006, A37, pp. 2325-2328.
- 5- R. Song., D. Ponge., and D. Raabe., "Overview of Processing, Microstructure and Mechanical Properties of Ultrafine Grained bcc Steels", Mater. Sci. Eng. A, 2006, A441, pp. 1-17.
- 6- K. Spencer., J.D. Embury., K.T. Conlon., M. Veron., and Y. Brechet., "Strengthening via the formation of strain-induced martensite in stainless steels", Mater. Sci. Eng. A, 2004, A387-389, pp. 873-881.
- 7- J. Speer., D. Matlock., and D. C. Murdock., "Deformation Induced phase transformation and strain hardening in type 304 austenitic stainless steel", Metall. Mater. Trans. A, 2006, A37, pp. 1875-1886.
- 8- P. Hedstron., "Deformation and martensitic phase transformation in stainless steels", Lulea University of Technology, Doctoral Thesis, 2007.
- 9- A. F. Padilha., R. L. Plaut., and P. R. Rios., "Annealing of cold-worked austenitic stainless steels", ISIJ Int, 2003, A43, 135-143.

رشد دانه‌های مارتنزیت بازگشت یافته در حین آنیل می‌باشد.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ریزساختار نمونه‌های آنیل شده در دماهای  $850^{\circ}\text{C}$  و  $900^{\circ}\text{C}$  پس از گذشت ۳۰ ثانیه در شکل ۶ آورده شده است. همان گونه که در شکل مشخص است، شاهد یک ساختار بسیار ریزدانه با دانه‌های هم محور می‌باشیم. میانگین اندازه‌ی دانه‌های بدست آمده در این شرایط برای هر دو نمونه زیر ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. علت ایجاد چنین ساختاری با اندازه‌ی دانه‌های نانو، دانسیته‌ی بسیار بالای عیوب در ریزساختار پس از نورد سرد و اعمال کرنش‌های سنگین است. زمانی که این ساختار را در دماهای نسبتاً پایین و زمان‌های بسیار کوتاه آنیل می‌کنیم، به دلیل وجود مکان‌های بی‌شمار برای جوانه‌زنی آستنیت، دانه‌های بسیار ریز تشکیل می‌شوند. با افزایش زمان آنیل، دانه‌ها رشد کرده و میانگین اندازه‌ی آن‌ها افزایش می‌یابد.

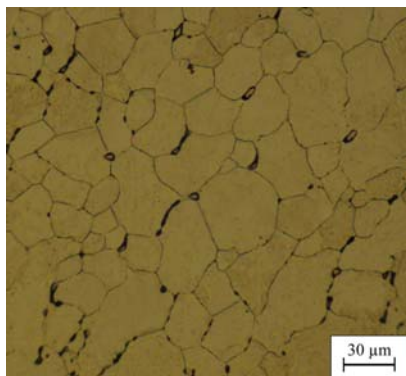
## نتیجه‌گیری

- ۱- فولاد زنگ‌نزن آستنیتی 201L پایداری پایین و نرخ کارسختی بسیار بالایی را در مقابل مارتنزیت ناشی از کرنش نشان می‌دهد، به گونه‌ای که با اعمال ۴۰ درصد نورد سرد، تمام آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود.
- ۲- با افزایش دمای آنیل نرخ بازگشت مارتنزیت به آستنیت به شدت افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در نمونه‌های آنیل شده در دمای  $850^{\circ}\text{C}$  و  $900^{\circ}\text{C}$ ، تمام مارتنزیت به ترتیب پس از گذشت ۸۰ و ۶۰ ثانیه به آستنیت تبدیل می‌شود.
- ۳- آنیل نمونه‌های ۹۵ درصد نورد سرد در دماهای نسبتاً پایین و زمان‌های بسیار کوتاه منجر به تشکیل دانه‌هایی در ابعاد کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر می‌شود. لذا، با کنترل شرایط دما و زمان آنیل می‌توان فولادی با دانه‌های بسیار ریز و خواص مکانیکی مناسب تولید کرد.

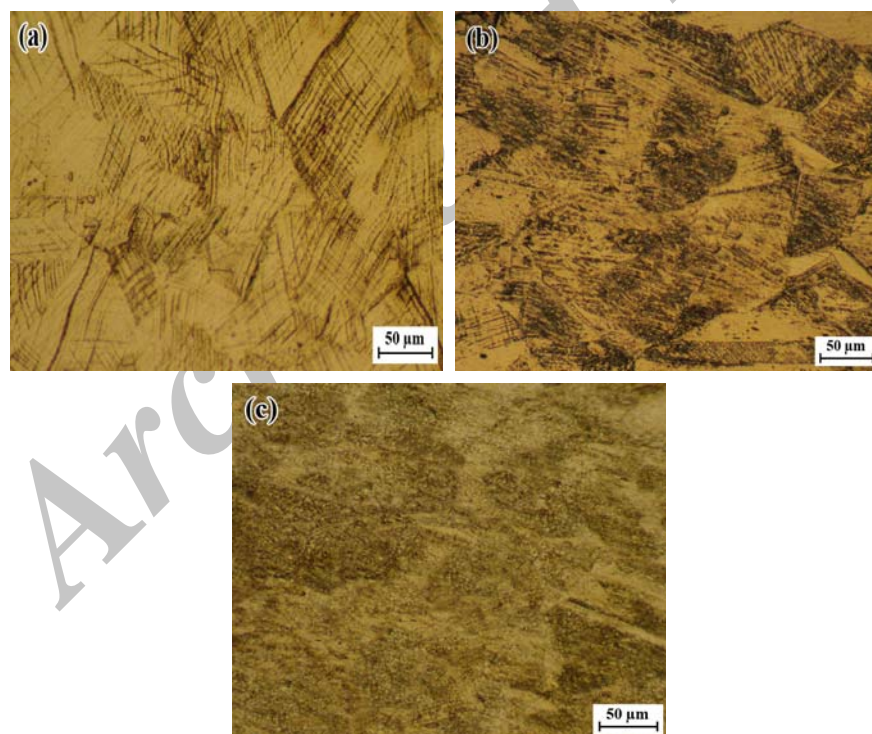
## پیوست‌ها

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن آستنیتی 201L.

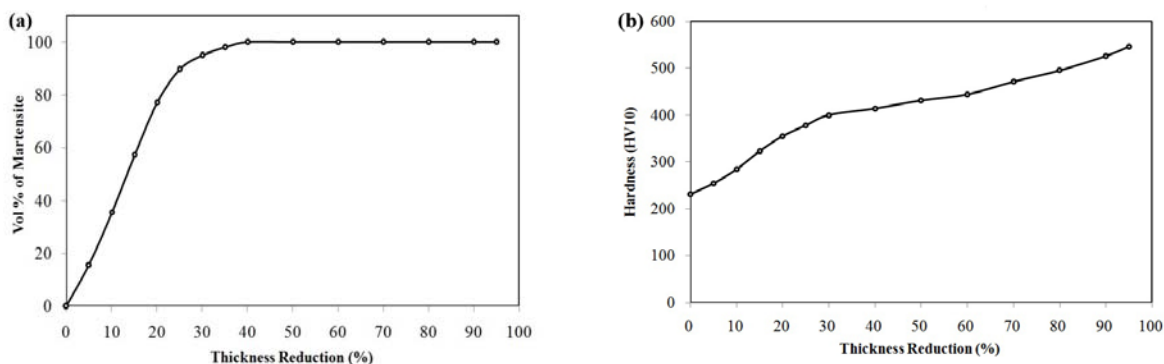
عنصر	C	Cr	Mn	Ni	Si	Mo	P	S	N	Fe
درصد وزنی	۰/۰۲۷	۱۶/۲	۵/۹۱	۳/۸۸	۰/۵۱	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۴	Bal.



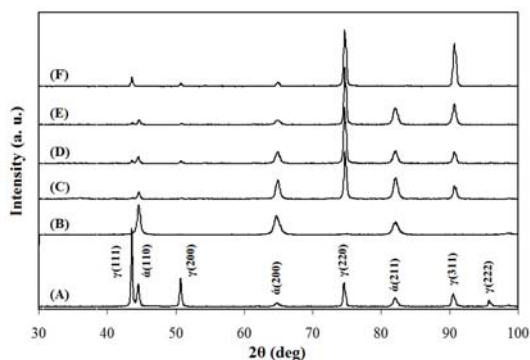
شکل ۱- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه‌ی آئیل انحلالی شده در دمای ۱۱۰۰ °C به مدت ۱۵۰ دقیقه.



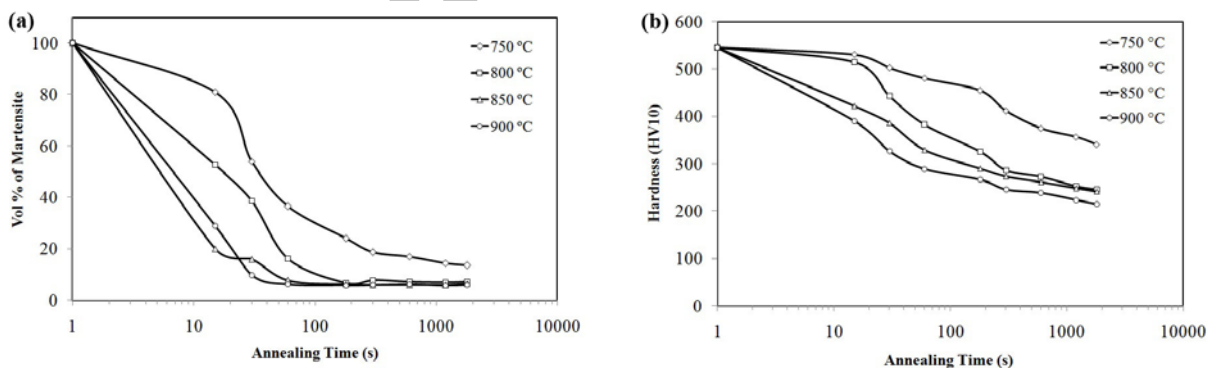
شکل ۲- ساختار میکروسکوپ نوری فولاد 201L پس از: (a) ۱۰٪ نورد سرد، (b) ۳۰٪ نورد سرد و (c) ۵۰٪ نورد سرد.



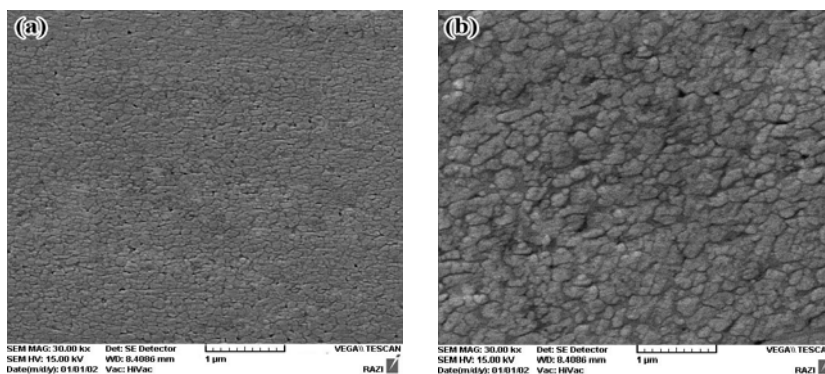
شکل ۳- نمودار (a) درصد تشکیل مارتنزیت ناشی از کرنش بر حسب درصد کاهش ضخامت (b) سختی بر حسب درصد کاهش ضخامت.



شکل ۴- الگوی XRD برای نمونه‌های: (A) آنیل انحرالی، (B) ۹۵ درصد نورد سرد و آنیل در دمای (C) °C ۷۵۰، (D) °C ۸۰۰، (E) °C ۸۵۰ و (F) °C ۹۰۰ به مدت ۳۰ ثانیه.



شکل ۵- نمودار: (a) درصد مارتنزیت موجود در ریزساختار و (b) سختی بر حسب دما و زمان آنیل.



شکل ۶- تصاویر SEM از ریزساختار نمونه‌های آئیل شده در دمای: (a)  $850^{\circ}\text{C}$  و (b)  $900^{\circ}\text{C}$  پس از ۳۰ ثانیه.

Archive of SID