

تأثیر تغییر شکل گرم استنیت بر تغییر حالت بینیتی در فولادهای کم آلیاژ

محمد حسین شاه‌حسینی - عباس زارعی هنزکی

استادیاران گروه مهندسی متالورژی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

علی دهقان منشادی - حسین بلادی

کارشناس ارشد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۷/۴/۲۰، تاریخ تصویب ۷۷/۱۱/۱۰)

چکیده

اعمال تغییر شکل بر فاز استنیت قبل یا در حین وقوع تغییر حالت باعث ایجاد تغییرات وسیعی در مشخصه‌ها و ویژگی‌های آن تغییر حالت خواهد شد. محدوده حرارتی اعمال تغییر شکل بر فاز استنیت (مثل منطقه‌ای که استنیت قادر به تبلور مجدد است، منطقه‌ای که تبلور مجدد استنیت متوقف شده یا به تعویق می‌افتد و یا منطقه دو فازی استنیت + فریت و...) میزان و نحوه وقوع این تغییرات را تعیین می‌کند. در تحقیق حاضر جهت کمک به درک بهتر مکانیزم این تغییرات در تغییر حالت استنیت به بینیت از دو فولاد کم آلیاژی با $0.15\%C$ و $0.3\%C$ استفاده شده است. در این راستا اولاً مورفولوژیهای مختلف بینیت قابل حصول در این فولادها تحت مقایسه فرار گرفته و ثانیاً با اعمال تغییر شکل بر فاز استنیت در دو منطقه تبلور مجدد و توقف تبلور مجدد تأثیر میزان و دمای تغییر شکل بر مورفولوژی و خواص مکانیکی بینیت مورد مطالعه واقع شده است. نتایج مبین این نکته می‌باشند که در منطقه تبلور مجدد استنیت فقط کرنشهای بالا می‌توانند باعث ایجاد تغییرات محسوسی در استحاله بینیتی شوند، اما در منطقه توقف تبلور مجدد استنیت حتی اعمال کرنشهای پایین نیز می‌توانند مورفولوژیهای بینیت و در نتیجه خواص مکانیکی نهایی فولاد را بشدت تحت تأثیر قرار دهند.

کلید واژه‌ها: تغییر شکل گرم، استنیت، تغییر حالت بینیتی، فولادهای کم آلیاژ، مورفولوژی بینیت، تبلور مجدد،

توقف تبلور مجدد، عملیات ترمومکانیکی، مهاجرت مرزها

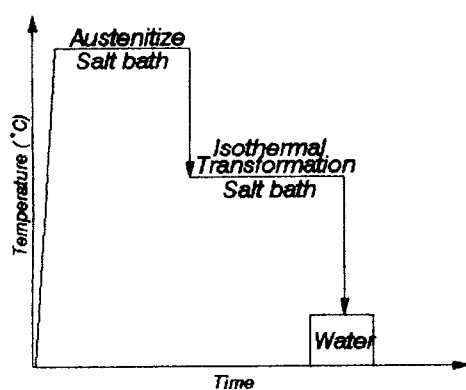
مقدمه

در این حالت مستقیماً ناشی از تغییر در مورفولوژی مارتنزیت باشد [۵-۱].

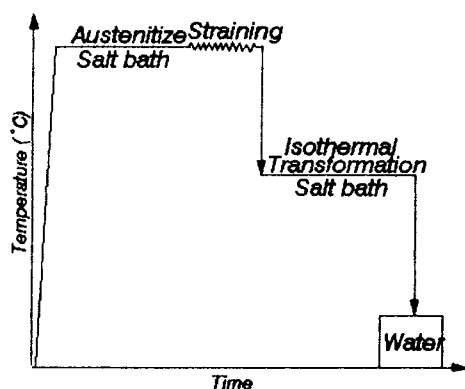
با توجه به مشابهت‌های نسبی مارتنزیت و بینیت از لحاظ خواص کریستالی و تغییر حالتی [۱]، انتظار می‌رود که تغییر شکل استنیت قبل از تغییر حالت به بینیت نیز باعث تغییر در مورفولوژی و خواص مکانیکی بینیت حاصله گردد. تحقیقات وسیعی که تا کنون صورت پذیرفته است صحت ادعای فوق را ثابت نموده و نشان داده‌اند که اعمال کرنش به استنیت درست قبل از تغییر حالت علاوه بر تغییر مورفولوژی و سینتیک تشکیل بینیت، باعث افزایش خواص مکانیکی آن نیز می‌شود [۶-۱]. بطور کلی تأثیر تغییر شکل استنیت در تغییر

نیاز روزافزون به سازه‌های فولادی با استحکام و چقرمگی بالا از یک طرف و کاهش مراحل سیکل‌های فرآوری با توجه به مسائل اقتصادی از طرف دیگر، مطالعات را به سمت تلفیق فرآیندهای عملیات حرارتی و مکانیکی (عملیات ترمومکانیکی، TMT) هدایت نموده است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که استحکام کششی بسیاری از فولادها را می‌توان بدون کاهش چقرمگی آنها با تغییر شکل استنیت قبل از تغییر حالت به مارتنزیت، به مقدار زیادی بهبود بخشید. از آنجاییکه خواص مکانیکی قطعات فولادی همواره متأثر از ریزساختار آنها است، لذا انتظار می‌رود که بهبود استحکام کششی و دیگر خواص مکانیکی ساختارهای حاصل از استنیت تغییر شکل یافته

Mo می‌باشند. نحوه انجام عملیات حرارتی و عملیات ترمومکانیکی بطور نمادین در شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب) نشان داده شده‌اند. در ابتدا جهت ایجاد مورفولوژیهای مختلف بینیت در فولادهای A و B، از این فولادها نمونه‌هایی به ابعاد $5 \times 10 \times 10$ mm تهیه شده و در دمای 870°C به مدت ۲۰ دقیقه استنیت شدند. نمونه‌های استنیت شده جهت انجام استحاله بینیتی به سرعت تا دماهای مختلف در منطقه استحاله بینیتی سرد شده و سپس به مدت معین بطور تکدما در آن دما نگهداری شدند. در نهایت تمام نمونه‌ها در آب سرد آبدهی گردیدند.



الف - عملیات حرارتی بهینه کردن



ب - عملیات ترمومکانیکی

شکل ۱: روند نمادین عملیات‌های انجام گرفته بر روی فولادها.

حالت بینیتی را می‌توان به افزایش دانسیته نایجاییه و عیوب کریستالی دیگر، کاهش اندازه لایه‌های فریت بینیتی و همچنین کاهش اندازه ذرات کاربیدی نسبت داد. باید خاطر نشان شود که در تحقیقات گذشته [۶-۱] اثر تغییر شکل در محدوده حرارتی که استنیت به صورت ناپایدار وجود داشته است (یعنی در منطقه حرارتی پایینتر از B_s) مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به دمای نسبتاً پایین و فرصت اندک برای اعمال کرنش قبل از شروع تغییر حالت بینیتی، استفاده از نتایج این تحقیقات در فرآیندهای صنعتی بسیار مشکل می‌باشد. با توجه به این مسئله و اثر مفید اعمال تغییر شکل بر ویژگیهای بینیت و خواص نهایی فولاد، در تحقیق حاضر تأثیر تغییر شکل در منطقه تکفازی استنیت (در دو محدوده توقف تبلور مجدد و تبلور مجدد استنیت) بر استحاله بینیتی مورد مطالعه قرار گرفته است. در منطقه توقف تبلور مجدد (یعنی محدوده حرارتی بین T_{nr} و A_{r3}) فرآیند تبلور مجدد استنیت به تعویق افتاده و بر اثر تغییر شکل استنیت در این محدوده حرارتی، از یک طرف دانه‌ها بصورت کشیده و مضرس در می‌آیند و از طرف دیگر دارای زیرساختار و باندهای تغییر شکلی خاص خود می‌گردند و بدین ترتیب محل‌های بسیار مناسبی برای تشکیل جوانه‌های فریت بینیتی ایجاد می‌گردد [۸ و ۷]. در نتیجه انتظار می‌رود که این پدیده باعث تغییر مورفولوژی و سینتیک استحاله بینیتی شود. در منطقه تبلور مجدد استنیت (درجه حرارت‌های بالاتر از T_{nr}) فرآیندهای ترمیم^۴ (تبلور مجدد و بازبایی) به سرعت انجام گرفته و باعث ریز شدن دانه‌های استنیت می‌شود و بنابراین از اثر کرنش باقیمانده و زیرساختارهای مربوطه بر استحاله‌های بعدی استنیت کاسته می‌شود.

روش انجام آزمایشها

جهت انجام این تحقیق از دو فولاد با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول (۱) استفاده شده است. فولادهای مذکور از گروه فولادهای مافوق مستحکم^۵ (UHS) بوده که محتوی عناصر آلیاژی Cr و

۱ - دمای تعادلی شروع تغییر حالت بینیتی
۲ - مرز حرارتی بین منطقه آی که تبلور مجدد استنیت به راحتی صورت پذیرد و منطقه آی که تبلور مجدد موفق شده یا به تعویق می‌افتد.
۳ - دمای شروع استحاله بینیتی به فریت در حین سرد شدن

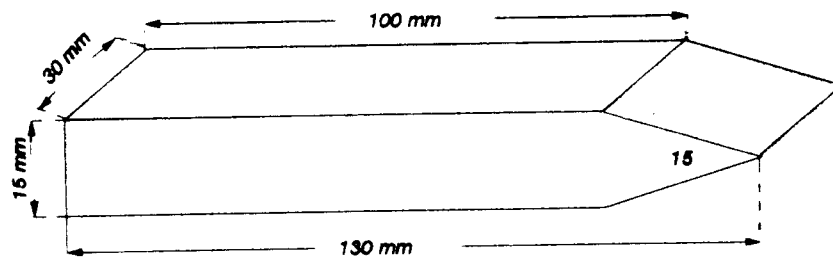
همین دما مقادیری تغییر شکل (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) بر روی نمونه‌ها اعمال گردید. سپس عملیات بینیته کردن بر روی آنها انجام گرفت.

مطابق با استاندارد ASTM-E8، حداقل ۳ نمونه آزمایش کشش در جهت نورد تهیه گردید و خواص مکانیکی در شرایط مختلف عملیات ترمومکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی ریزساختار فولادها، نمونه‌برداری در مقطع عمود بر جهت نورد صورت پذیرفت و پس از پولیش سطح و حکاکی در محلول نایتال ۲٪، ریزساختار توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت.

آزمایشهای ترمومکانیکی در دو مرحله صورت پذیرفت. در مرحله اول نمونه‌هایی از هر دو فولاد A و B تهیه شده (شکل ۲ طرح و مشخصات ابعادی نمونه تهیه شده برای نورد گرم را نشان می‌دهد) و پس از استنیته کردن به مدت ۲۰ دقیقه در دمای 870°C (در منطقه توقف تبلور مجدد) توسط دستگاه نورد آزمایشگاهی مقادیر مختلفی تغییر شکل (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) بر روی آنها اعمال گردید. در ادامه، مطابق نمونه‌های قبل، عملیات بینیته کردن انجام گرفت. در مرحله دوم از فولاد B نمونه‌هایی تهیه شده و در دمای 1000°C (منطقه تبلور مجدد) به مدت ۲۰ دقیقه استنیته شدند. سپس در

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولادها.

فولاد	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo
A	۰/۱۵	۰/۴۹	۰/۱۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۸	۰/۲۱	۰/۹۷	۰/۲۱
B	۰/۳	۰/۴۷	۰/۴۴	۰/۰۱	۰/۰۸۱	۰/۰۳	۰/۹۴	۰/۲



شکل ۲: طرح و مشخصات ابعادی نمونه‌های تهیه شده برای تغییر شکل گرم.

دماهای B_s و M_s فولادهای A و B محاسبه و در جدول (۲) آورده شده‌اند. بنابراین انتظار می‌رود که انجام استحاله تکدما در محدوده دمایی ارائه شده در جدول (۲) منجر به تشکیل مورفولوژیهای مختلف بینیت در فولادهای A و B شود.

جهت اندازه‌گیری لایه‌های فریت بینیتی در هر یک از شرایط عملیات ترمومکانیکی حداقل ۲۰ لایه فریت بینیتی (در مناطق مختلف ریزساختار) اندازه‌گیری شد و میانگین آنها بعنوان طول لایه فریت بینیتی گزارش گردید.

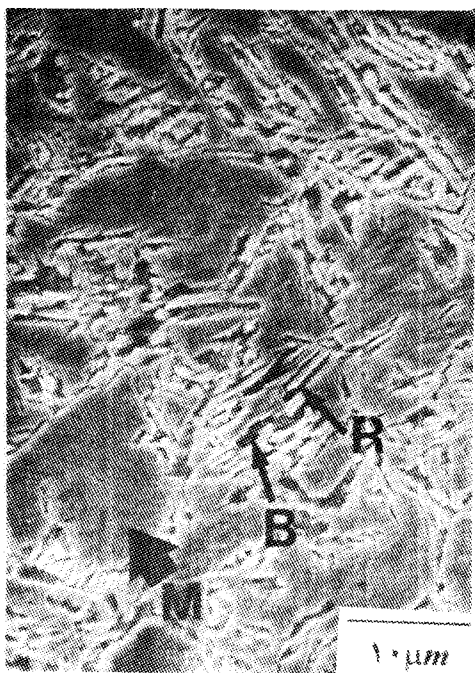
جدول ۲: درجه حرارت‌های بحرانی فولادها با استفاده از روابط تجربی.

فولاد	B_s ($^{\circ}\text{C}$)	M_s ($^{\circ}\text{C}$)	T_{nr} ($^{\circ}\text{C}$)
A	۶۴۰	۴۴۰	۹۱۰
B	۶۱۸	۳۷۶	۸۸۰

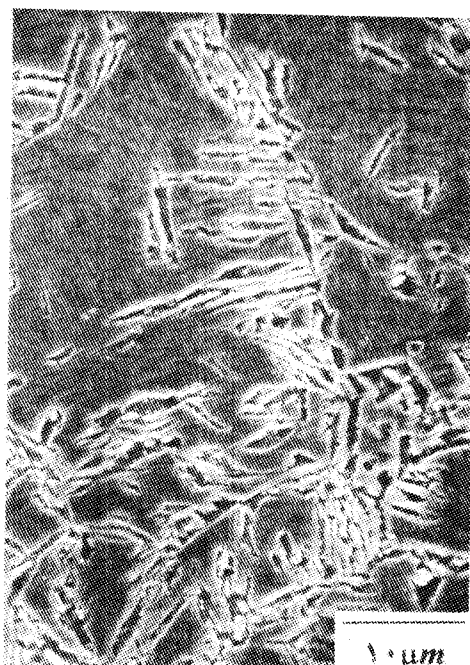
نتایج آزمایش و بحث

استحاله بینیتی بدون اعمال تغییر شکل

با انجام عملیات حرارتی در دامنه حرارتی بین دمای شروع استحاله بینیتی (B_s) و دمای شروع استحاله مارتنزیتی (M_s) مورفولوژیهای مختلف بینیت تشکیل می‌شوند. با استفاده از معادله‌های تجربی [۹] ۲۱



(الف)



(ب)

$$B_s(^{\circ}C) = 830 - 270(\%C) - 90(\%Mn) \quad (1)$$

$$- 37(\%Ni) - 70(\%Cr) - 83(\%Mo)$$

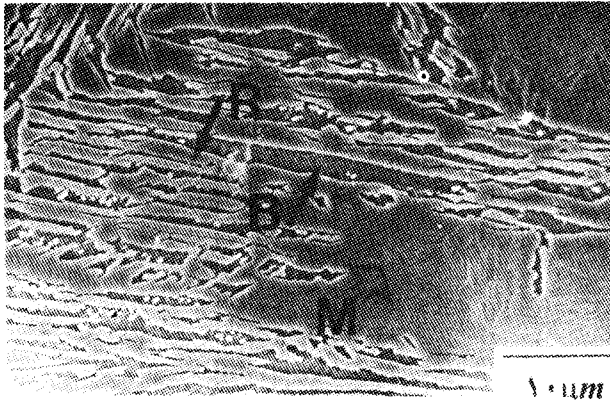
$$M_s(^{\circ}C) = 539 - 422(\%C) - 30/4(\%Mn)$$

$$- 17/7(\%Ni) - 12/1(\%Cr) - 7/5(\%Mo)$$

(۲)

تصاویر (۳) و (۴) مورفولوژیهای بینیت تشکیل شده در دماهای مختلف استحاله تکدما را برای فولادهای A و B نشان می‌دهند. بطوریکه در شکل‌های (۳- الف و ب) و (۴- الف) ملاحظه می‌شود در درجه‌حرارت‌های بالا، استحاله بینیتی با تشکیل لایه‌های کاملاً درشت فریت بینیتی بر روی مرز دانه‌های استنیت اولیه شروع می‌گردد. در فولادهای کم کربن لایه‌های فریت بینیتی با یک استحاله برشی تشکیل می‌شوند که این عمل را می‌توان بصورت اعوجاج سطحی^۱ بر روی یک سطح پولیش شده مشاهده نمود [۱۰]. طی این واکنش غالباً یک استحاله گروهی^۲ صورت می‌پذیرد که این استحاله به علت جوانه‌زنی وجه به وجه^۳ لایه‌های فریت بینیتی انجام می‌گیرد [۱۰]. با رشد لایه‌های فریت بینیتی، کربن از جلوی این لایه‌ها پس زده شده و استنیت اطراف از کربن غنی می‌شود. بنابراین دمای شروع استحاله مارتنزیتی (M_s) بطور موضعی کاهش یافته و این استنیت در دمای آزمایش بصورت استحاله نیافته باقی می‌ماند. در خاتمه عملیات با سرد کردن نمونه‌ها تا دمای محیط استنیت نیمه‌پایدار می‌تواند به مارتنزیت تبدیل شده و یا اگر پایداری آن بالا باشد بصورت استنیت ناپایدار (استحاله نیافته) در زمینه باقی بماند. شکل‌های (۳- الف) و (۴- الف) نواحی استنیت استحاله نیافته در استحاله تکدما، بویژه در بین دو لایه فریت بینیتی که به موازات یکدیگر رشد نموده‌اند را نشان می‌دهند.

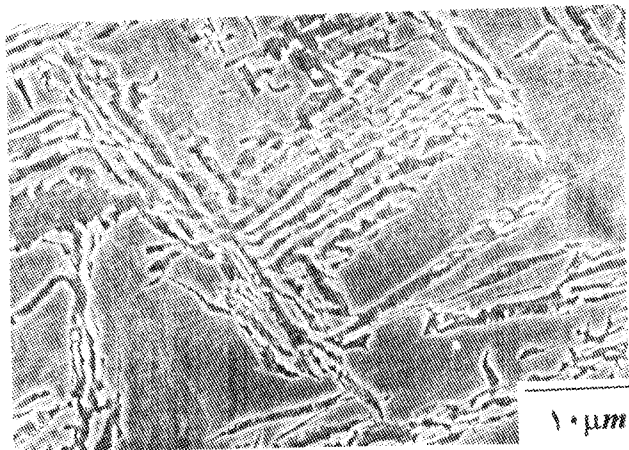
با کاهش دمای استحاله تکدما دلیل کم شدن قدرت نفوذ کربن، رشد جانبی لایه‌های فریت بینیتی محدود شده و این لایه‌ها نازکتر می‌گردند (شکل‌های ۳- ج و ۴- ب). در درجه‌حرارت‌های پایینتر (محدوده دمایی تشکیل بینیت پایینی) دلیل افزایش مکانهای مرجح جوانه‌زنی فریت بینیتی و نیز محدودتر شدن رشد این لایه‌ها، اندازه لایه‌های فریت بینیتی به شدت کاهش می‌یابد (شکل‌های ۳- د و ۴- ج).



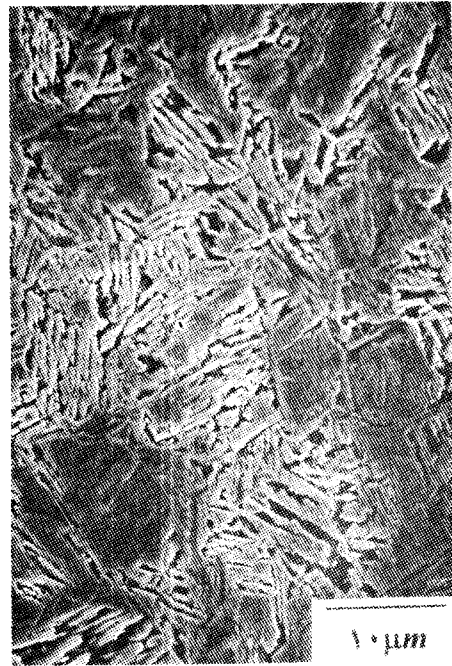
(الف)



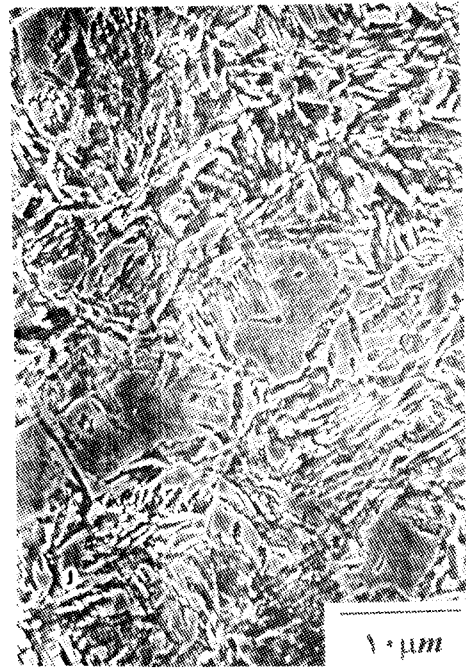
(ب)



(ج)



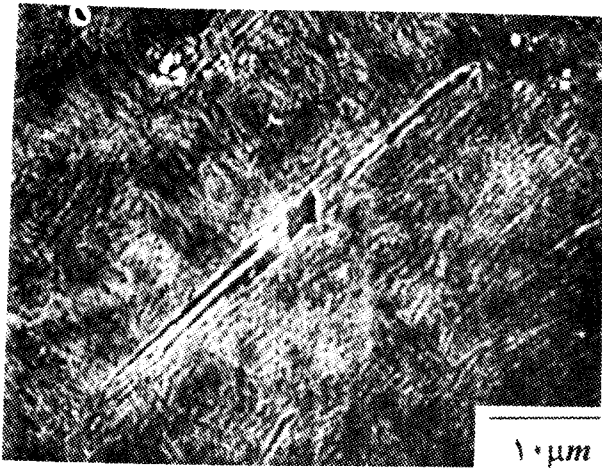
(د)



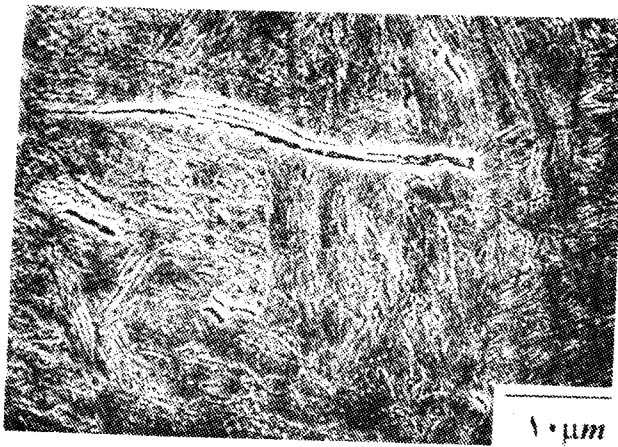
(ه)

شکل ۴: مورفولوژی بینیت در فولاد B در دماهای مختلف استحاله تکدما بینیتی
 الف: 500°C ب: 450°C ج: 400°C
 (پیکانه‌های M، B و R به ترتیب معرف فازهای مارتنزیت، بینیت و استنیت استحاله نیافته می‌باشد).

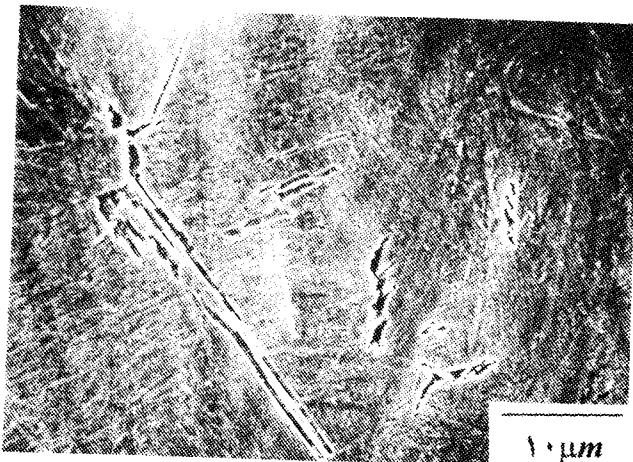
شکل ۳: مورفولوژی بینیت در فولاد A در دماهای مختلف استحاله تکدما بینیتی
 الف: 600°C ب: 550°C ج: 500°C د: 450°C
 (پیکانه‌های M، B و R به ترتیب معرف فازهای مارتنزیت، بینیت و استنیت استحاله نیافته می‌باشد).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵: مورفولوژیهای بینیت در دمای 400°C پس از اعمال تغییر شکل بر فولاد B در دمای 1000°C
الف: ۱۰ درصد ب: ۲۰ درصد ج: ۳۰ درصد.

تأثیر تغییر شکل گرم استنیت بر استحاله بینیتی

اصولا با توجه به سینتیک انجام فرآیندهای ترمیم (بازیابی و تبلور مجدد) در منطقه تکفاز استنیت، این منطقه را به دو ناحیه تبلور مجدد و عدم تبلور مجدد استنیت تقسیم‌بندی کرده و مرز بین این دو ناحیه را دمای توقف تبلور مجدد (T_{nr}) می‌نامند. دمای توقف تبلور مجدد فولاد را می‌توان با رابطه تجربی ۳ تخمین زد [۱۱]:

$$T_{nr}(^{\circ}\text{C}) = 887 + 464(\%C) + [6445(\%Nb) - 644\sqrt{(\%Nb)}] + [732(\%V)23.0\sqrt{(\%V)}] \\ 89.0(\%Ti) + 363(\%Al) - 357(\%Si)$$

(۳)

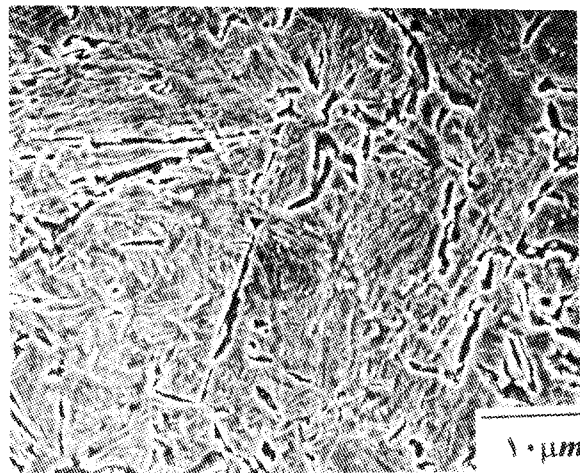
دمای توقف تبلور مجدد برای فولادهای A و B در جدول (۲) گزارش شده است.

اعمال تغییر شکل گرم در منطقه تبلور مجدد

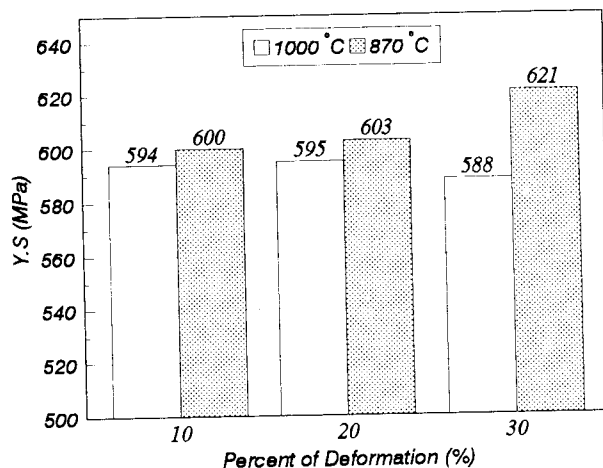
با اعمال تغییر شکل گرم در دمای 1000°C فرآیند تبلور مجدد با یکی از مکانیزمهای تاول زدن^۱ و مهاجرت مرزها در اثر القای کرنش اعمال شده^۲ امکان پذیر است [۸]. این فرآیند موجب ظریفتر شدن دانه‌های استنیت اولیه می‌گردد. دانه‌های جدید استنیت دارای حداقل دانسیته نابجایی می‌باشند. ظریف شدن دانه‌های استنیت موجب افزایش مکانهای مرجح جوانه‌زنی شده و انتظار می‌رود که سینتیک استحاله بینیتی را سرعت بخشد، زمان نهفتگی^۳ استحاله بینیتی را کاهش دهد (منحنی TTT فولاد را به سمت چپ می‌کشد)

شکل (۵) مورفولوژی بینیت پایینی را در فولاد B بسته به میزان تغییر شکل در دمای 1000°C نشان می‌دهد.

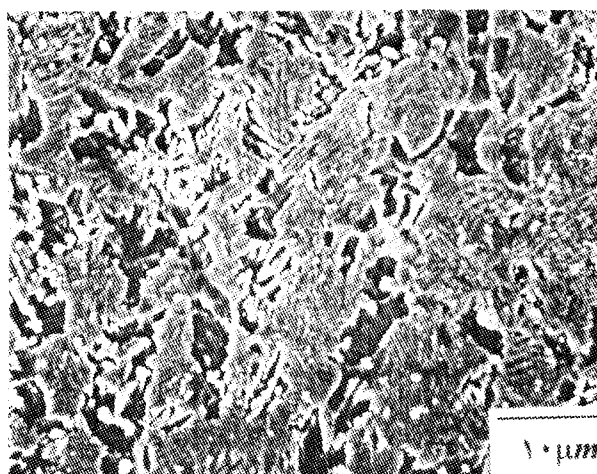
بطوریکه ملاحظه می‌گردد با افزایش میزان تغییر شکل، تعداد مکانهای مرجح جوانه‌زنی و نیز ظرافت لایه‌های فریت بینیتی بطور محسوسی تغییر نیافته است. در حقیقت می‌توان ادعا نمود که میزان تغییر شکل و تبلور مجدد انجام شده متعاقب آن باعث کاهش فوق‌العاده‌ای در اندازه دانه‌های استنیت نشده است.



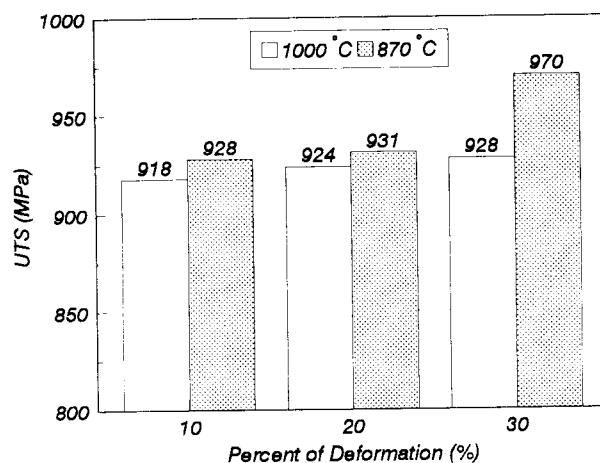
(الف)



(الف) : استحکام تسلیم

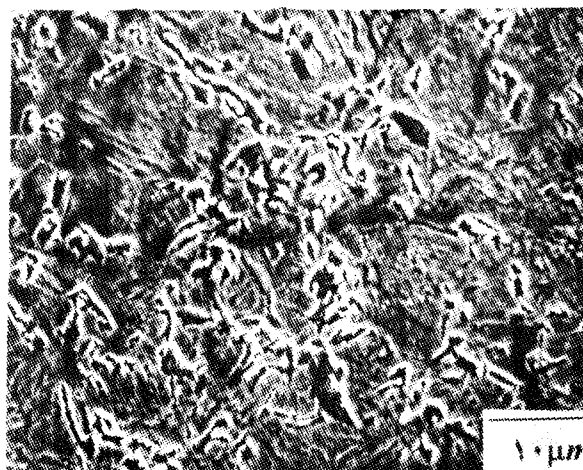


(ب)



(ب) : استحکام کششی نهایی

شکل ۶: خواص مکانیکی فولاد B بر حسب دما و میزان اعمال تغییر شکل گرم پس از استحاله بینیتی در دمای ۴۰۰°C.



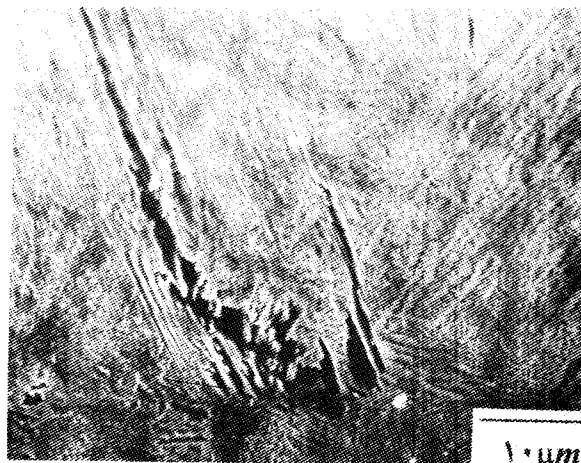
(ج)

شکل ۷: مورفولوژیهای بینیت در دمای ۴۵۰°C پس از اعمال تغییر شکل بر فولاد A در دمای ۸۷۰°C
الف: ۱۰ درصد ب: ۲۰ درصد ج: ۳۰ درصد.

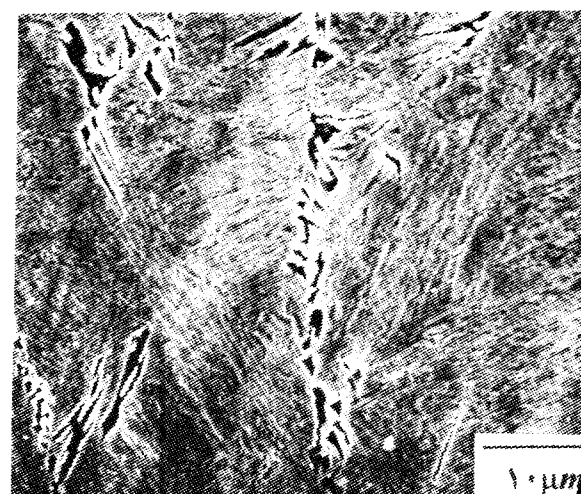
بطوریکه در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد با اعمال تغییر شکل گرم (تا میزان ۳۰ درصد) در دمای ۱۰۰۰°C خواص مکانیکی فولاد تغییر چندانی از خود نشان نمی‌دهد. در حقیقت همانطور که در بالا ذکر شد این میزان تغییر شکل در دمای ۱۰۰۰°C، اندازه دانه‌های استنیت مادر را بطور فوق‌العاده‌ای تحت تأثیر قرار نمی‌دهد و به همین دلیل نیز خواص مکانیکی فولاد تغییر چندانی نکرده است.

اعمال تغییر شکل در منطقه توقف تبلور مجدد

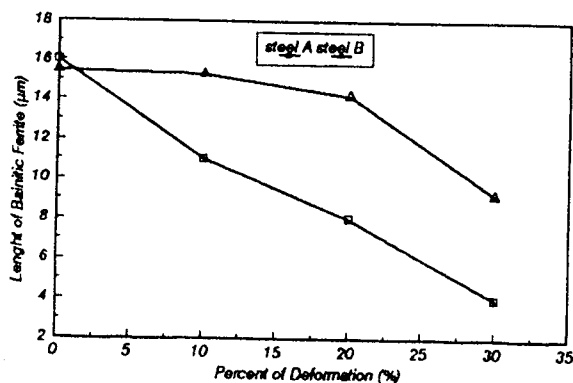
شکلهای (۷) و (۸) تغییرات مورفولوژی بینیت پایینی پس از اعمال درصدهای مختلف تغییر شکل گرم در دمای ۸۷۰°C (منطقه توقف تبلور مجدد) به ترتیب برای فولادهای A و B را نشان می‌دهند. بطوریکه ملاحظه می‌گردد در هر دو فولاد با افزایش میزان تغییر شکل در دمای ۸۷۰°C ، لایه‌های فریت بینیتی ظریفتر شده‌اند. علت اصلی ظریف شدن لایه‌های فریت بینیتی با افزایش میزان تغییر شکل استنتیت، افزایش محلهای مناسب جوانه‌زنی می‌باشد. در این محدوده دمایی امکان انجام فرآیندهای ترمیم (تبلور مجدد و بازیابی) بسیار ضعیف است و اعمال تغییر شکل موجب کشیده شدن مرزدانه‌های استنتیت و مضرس شدن آنها و تشکیل باندهای تغییر شکل می‌گردد. بنابراین مکانهای مناسب جوانه‌زنی بشدت افزایش یافته و تعداد زیادی جوانه اولیه فریت بینیتی بطور همزمان بر روی مرزدانه‌های استنتیت و داخل آنها (بر روی باندهای تغییر شکل) تشکیل می‌شود. این امر باعث محدود شدن رشد این لایه‌ها و در نهایت ظریف شدن آنها می‌گردد.



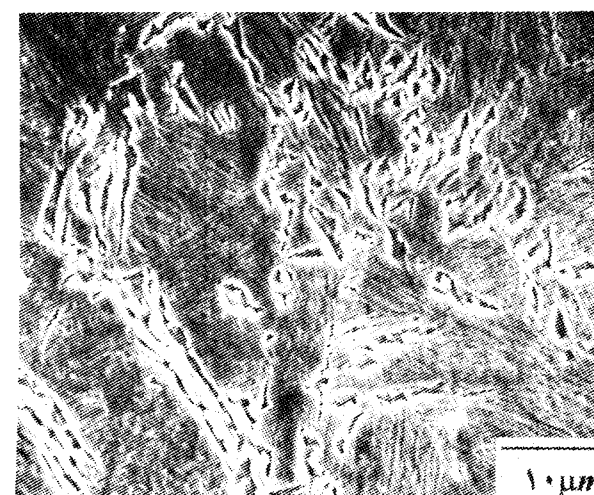
(الف)



(ب)



شکل ۹: تغییر طول لایه‌های فریت بینیتی بر حسب میزان تغییر شکل در دمای ۸۷۰°C برای فولادهای A و B.



(ج)

شکل (۹) تغییرات طول لایه‌های فریت بینیتی بر حسب میزان تغییر شکل استنتیت در منطقه توقف تبلور

شکل ۸: مورفولوژیهای بینیت در دمای ۴۰۰°C پس از اعمال تغییر شکل بر فولاد B در دمای ۸۷۰°C الف: ۱۰ درصد ب: ۲۰ درصد ج: ۳۰ درصد.

خود نشان می‌دهد. دلایل اصلی بهبود خواص مکانیکی در اثر اعمال تغییر شکل عبارتند از:
الف: افزایش دانسیته نابجاییها در استنیت تغییر شکل یافته و بجای ماندن این نابجاییها (با ریزساختار حاصل از تغییر شکل) در فازهای بوجود آمده (بینیت، مارتنزیت و استنیت استحاله‌نیافته). رابطه زیر اثر دانسیته نابجاییها بر استحکام فولاد را نشان می‌دهد [۱۲]:

$$\sigma_d = \alpha \cdot \mu \cdot b \cdot (\delta)^{1/2} \quad (۴)$$

که در آن: σ_d - استحکام ناشی از نابجاییها، α - مقداری ثابت، μ - مدول الاستیک، b - بردار برگرز و δ - دانسیته نابجاییها می‌باشند.

ب: ظریفتر شدن لایه‌های فریت بینیتی و مارتنزیت بعلت افزایش مکانهای مرجع جوانه‌زنی.

نتیجه‌گیری

- ۱- انجام استحاله تکدما در محدوده حرارتی B_s و M_s باعث تشکیل مورفولوژیهای مختلف بینیت با مشخصه‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی کاملاً متنوع خواهد شد.
- ۲- اعمال تغییر شکل‌های کم بر فاز استنیت در منطقه تبلور مجدد باعث ایجاد تغییرات محسوسی در مورفولوژی بینیت و خواص مکانیکی فولاد نشده و تنها تغییر شکل‌های زیاد (بیشتر از ۳۰ درصد) تغییرات محسوسی در مشخصه‌های فوق ایجاد می‌کنند
- ۳- در منطقه توقف تبلور مجدد اعمال مقادیر کمی تغییر شکل بر فاز استنیت هم باعث ایجاد تغییرات وسیعی در مورفولوژی بینیت و خواص مکانیکی فولاد می‌شود.

تشکر و قدردانی

تحقیق حاضر با همکاری گروه مواد فلزی پژوهشگاه علوم و تکنولوژی دفاعی به انجام رسیده است، بنابراین بر خود لازم می‌دانیم از زحمات مسئولین محترم این پژوهشگاه بویژه جناب آقای مهندس سبحانی مدیریت محترم گروه مواد فلزی تشکر و قدردانی نمائیم.

مجدد را برای مورفولوژی بینیت پایینی در هر دو فولاد، نشان می‌دهد. بطوریکه ملاحظه می‌گردد در فولاد A حتی با درصدهای کم تغییر شکل (۱۰ درصد) طول لایه‌های فریت بینیتی به شدت کاهش یافته است، در صورتیکه در فولاد B طول لایه‌های فریت بینیتی با اعمال ۱۰ درصد تغییر شکل تغییر محسوسی نیافته است. این پدیده را می‌توان به بالاتر بودن میزان کربن فولاد B نسبت داد. بطوریکه محققین [۷] گزارش کرده‌اند با افزایش درصد کربن فولاد، انرژی اکتیواسیون تغییر شکل (Q_{def}) کاهش یافته و تبلور مجدد دینامیکی راحت‌تر اتفاق می‌افتد، لذا میزان انباشتگی کرنش در فولاد B نسبت به فولاد A کمتر می‌گردد. از طرف دیگر تصاویر میکروسکپی (شکل‌های ۷ و ۸) نشان می‌دهند که اندازه بسته‌های بینیت نیز با افزایش میزان تغییر شکل کوچک می‌شوند. کاهش هر دو پارامتر طول و تعداد لایه‌های فریت بینیتی که دارای یک جهت کریستالوگرافی مشابه هستند، عامل اصلی کوچک شدن بسته‌های بینیتی می‌باشند [۱۰]. با اعمال تغییر شکل بر فاز استنیت، سینتیک استحاله بینیتی هم تغییر می‌کند [۳]. تصاویر میکروسکپی (۷) و (۸) نشان می‌دهند که تغییر شکل استنیت در منطقه عدم تبلور مجدد نه تنها تعداد لایه‌های فریت بینیتی را افزایش می‌دهد بلکه مقدار بینیت تشکیل شده در یک زمان مشخص (سرعت استحاله) را نیز بالا می‌برد. کاهش زمان نهفتگی استحاله بینیتی (انتقال منحنی TTT به سمت چپ) و افزایش سرعت جوانه‌زنی فاز فریت بینیتی (افزایش مراکز جوانه‌زنی بعلت تشکیل باندهای تغییر شکل و مضرس شدن مرز دانه‌ها) دلایل اصلی افزایش سینتیک استحاله بینیتی در استنیت تغییر شکل یافته می‌باشند [۷].

اعمال تغییر شکل گرم استنیت قبل از استحاله بینیتی، خواص مکانیکی فولاد را بهبود می‌بخشد [۳]. شکل (۶) تغییرات میزان خواص مکانیکی فولاد B را پس از اعمال تغییر شکل گرم در دمای 870°C نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد تا ۲۰ درصد تغییر شکل خواص مکانیکی فولاد تغییر چندانی نداشته ولی در ۳۰ درصد تغییر شکل خواص استحکامی فولاد (استحکام نهایی کششی و استحکام تسلیم) تغییر قابل ملاحظه‌ای از

مراجع

- 1 - Edwards, R. H. and Kennon, N. F. (1987). *Metall. Trans.*, Vol. 9A, 1801.
- 2 - Freivellig, R. , Kudrman, J. and Chraska, P. (1976). *Metall. Trans.*, Vol. 7A, 1091.
- 3 - Fujiwara, K., Okaguchi, S. and Ohtani, S. (1995). *ISIJ International*, Vol. 35, 1006.
- 4 - Mutiu, T. A., Kinderman, A. J. and Bernstein, I. M. (1997). *Hot Deformation of Austenite*, 410.
- 5 - Edwards, R. H. and Kennon, N. F. (1974). *Metall. Forum*, Vol. 19A, No. 1, 45.
- 6 - Biss, V. and Cryderman, R. L. (1971). *Metall. Trans.*, Vol. 2, 2267.
- 7 - Tamura, I., Sekine, H. and Ouchi, C. (1988). *Thermomechanical Processing of High Strength Low-Alloy Steels*, Butterworth & Co.
- 8 - Humphreys, F. J. and Hatherly, M. (1995). *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Elsevier Science Ltd.
- 9 - Honeycombe, R. W. K. and Pickering, F. B. (1972). *Metall. Trans.*, Vol. 3, 1099.
- 10 - Swallow, E. and Bhadeshia, H. K. D. H. (1996). *Materials Science and Technology*, Vol. 12, 121.
- 11- Jonas, J. J. and Sellars, C. M. (1992). Sir Robert Honeycombe Commemorative Symposium, eds. J. A. Charles, G.W, Greenwood and G.C. Smith, The Institute of Materials and the Royal Society, London, 147.
- 12 - Edmonds, D. V. (1990). *Iron and Steel Making*, 75.

کلید واژه ها:

1- Restoration Processes	فرایندهای ترمیم
2- Ultra High Strength Steels	فولادهای مافوق مستحکم
3- Surface Relief	اعوجاج سطحی
4 - Cooperative Transformation	استحاله گروهی
5 - Side-by-Side	وجه به وجه
6 – Buldging	تاول زدن
7 – Strain Induced Grain Boundary Migration	مهاجرت مرزها در اثر القای کرنش اعمال شده
8 – Incubation Time	زمان نهفتگی