

اثر کربن بر تحولات ریز ساختاری و رفتار تغییر فرم گرم فولادهای تیتانیوم دار

عباس نجفی زاده* - مسعود قربانی**

چکیده

در این مقاله اثر کربن و رفتار تغییر فرم گرم بر روی مکانیزمهای نرم شدن استاتیکی و دینامیکی فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار در دو ناحیه فریت و اوستنیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. پژوهش به عمل آمده نشان می‌دهد که افزایش مقدار کربن در محدوده (۰/۰۳۵ تا ۰/۱۱۰ درصد) می‌تواند تبلور مجدد اوستنیت را به تأخیر اندازد؛ که این امر ناشی از کربن آزاد و رسوبات Ti(CN) و TiC است. در فاز فریت نیز امکان فعال شدن تبلور مجدد دینامیکی وجود دارد و مانع اصلی آن وجود عناصر بین نشین N و C و تشکیل رسوبات حاصل از تغییر فرم است. نتایج آزمایشهای فشار دو مرحله‌ای نشان می‌دهد که با افزایش دما، نرخ بازیابی و تبلور مجدد استاتیکی در هر دو ناحیه فریت و اوستنیت افزایش می‌یابد و افزایش کربن موجب کاهش نرخ تبلور مجدد استاتیکی در هر دو ناحیه می‌شود.

* دانشیار دانشکده مهندسی مواد - دانشگاه صنعتی اصفهان

** فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد - دانشگاه صنعتی اصفهان

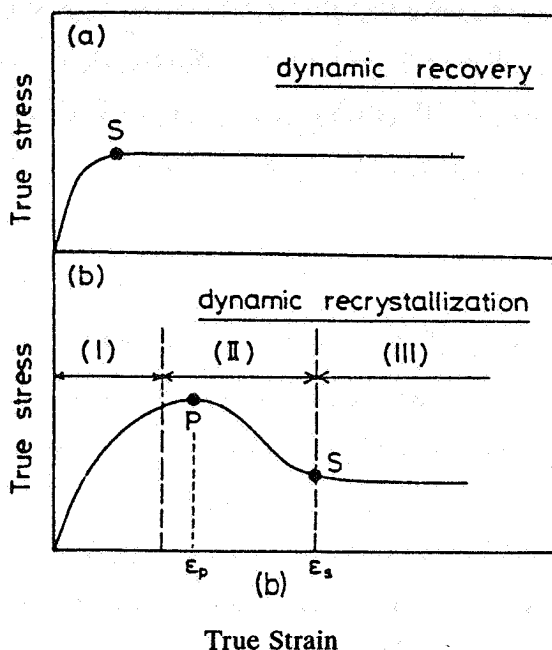
مقدمه

معمولاً تغییر فرم فولادها در دماهای بالا با تغییرات ساختاری و تحولات فازی توأم است. این مسأله باعث می‌شود که تحت شرایط مختلف تولید از نظر سرعت، میزان تغییر فرم، دمای تغییر فرم و ... ساختار میکروسکوپی و خصوصیات مکانیکی محصولات تولید شده نهایی متفاوت باشند.

برای دستیابی به مشخصات مکانیکی بالاتر در محصولات کار گرم شده، لازم است که پارامترهای مؤثر بر تغییر فرم و همچنین تحولات ریز ساختاری در دماهای بالا شناخته شوند. از تحولات ریز ساختاری که معمولاً در فرایندهای تغییر فرم گرم رخ می‌دهند، از پدیده‌های بازیابی و تبلور مجدد استاتیکی و دینامیکی با عنوان مکانیزمهای نرم شدن نام برده می‌شود [۴-۱]. اگر این پدیده‌ها در حین عمل تغییر فرم در دماهای بالا رخ دهند، بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی^۱ نامیده می‌شوند و اگر پس از پایان عمل تغییر فرم و در حین سرد شدن از دماهای بالا و یا بین دو مرحله متوالی از عملیات تغییر فرم گرم صورت گیرند، به بازیابی و تبلور مجدد استاتیکی^۲ موسوم خواهند بود.

بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی

معمولاً در حین تغییر فرم گرم با سرعت کرنش ثابت دانسیته نابجاییها در فلز افزایش یافته موجب کار سختی در فلز می‌شود. این فرایند توسط پدیده‌های بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی خنثی می‌شود. بازیابی دینامیکی با امحاء نابجاییها و نظم مجدد آنها در مرز دانه‌های اصلی و تولید دانه‌های فرعی، ضمن حفظ ساختار دانه‌های فلز و اندازه دانه‌های اصلی، تحقق می‌یابد [۳]، در حالی که تبلور مجدد دینامیکی با مکانیزم جوانه زنی و رشد دانه‌های جدید در مرز دانه‌ها و یا مرزهای دو قلوبی انجام گرفته و موجب تغییر کامل ریز ساختار فلزی می‌شود. برای بررسی این‌گونه تحولات از منحنیهای سیلان گرم استفاده می‌شود که در شکل ۱ دو نوع آن نشان داده شده است.



شکل ۱ - دو نوع منحنی سیلان در عملیات تغییر فرم گرم [۵]

در صورتی که مکانیزم نرم شدن در حین کار گرم از نوع بازیابی دینامیکی باشد، تنش سیلان ابتدا تا حد ماکزیمم افزایش یافته و سپس ثابت باقی می ماند (شکل a - ۱). در مواردی که نرخ نرم شدن ناشی از بازیابی دینامیکی کم باشد، به تدریج دانسیته نابه جایها با ادامه تغییر فرم افزایش می یابد و در شرایطی که به حد بحرانی برسد تبلور مجدد دینامیکی رخ خواهد داد. در چنین شرایطی منحنی سیلان فلز با یک اوج در مقدار تنش σ_p نمایان می شود و تنش واقعی با تبلور مجدد دینامیکی کاهش می یابد و به یک حد تعادلی و پایدار (σ_s) می رسد که در آن کار سختی ناشی از ادامه تغییر فرم و نرم شدن به تعادل رسیده اند (شکل b - ۱).

تبلور مجدد دینامیکی معمولاً به ازای یک کرنش بحرانی (ϵ_c) آغاز می شود و این حد به ترکیب شیمیایی فلز، اندازه دانه های اولیه و سرعت کرنش بستگی دارد [۴]. اکثر تحقیقات انجام گرفته روی فولادها [۳ و ۶] نشان می دهند که در حین کار گرم در فاز اوستنیت تبلور مجدد دینامیکی می تواند

رخ دهد. لیکن در مورد فاز فریت تحقیقات کمتری انجام گرفته و تصور عمومی آن است که مکانیزم نرم شدن در این فاز اصولاً بازایی دینامیکی است. اخیراً نجفی زاده و جوناس [۷ و ۸] نشان دادند که مکانیزم نرم شدن در حین کار گرم در فاز فریت در فولادهای IF^۱ تبلور مجدد دینامیکی است و می توان با فعال کردن این مکانیزم خواص مکانیکی محصولات کار گرم شده را بهبود داد.

بازایی و تبلور مجدد استاتیکی

پدیده بازایی و تبلور مجدد استاتیکی در اثر افزایش انرژی کرنش ذخیره شده در فلزی که در حالت سرد تغییر فرم یافته و سپس در دمای ثابت نگهداری شده و یا در یک فلز پس از تغییر فرم گرم رخ می دهد. این پدیده معمولاً از بازایی استاتیکی شروع شده و تا مرحله تبلور مجدد استاتیکی و سپس رشد دانه ها با گذشت زمان ادامه می یابد. معمولاً برای انجام تبلور مجدد استاتیکی یک مقدار بحرانی کرنش لازم است؛ به طوری که در کرنشهای کمتر از این مقدار مکانیزم اصلی نرم شدن فقط ناشی از بازایی استاتیکی و در مقادیر بیشتر در اثر تبلور مجدد استاتیکی خواهد بود [۹]. برای بیان سرعت نرم شدن ناشی از این پدیده معمولاً از نسبت نرم شدن^۲ استفاده می شود. این نسبت از طریق آزمایشهای تغییر فرم گرم دو مرحله ای به دست می آید و به صورت:

$$X = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (1)$$

نوشته می شود که در آن σ_1 و σ_0 به ترتیب تنش ماکزیمم و تنش تسلیم در مرحله اول و σ_2 تنش تسلیم در مرحله دوم است.

آزمایشها

در این پژوهش جهت بررسی نقش پارامترهای تغییر فرم گرم و اثر کرنش بر روی مکانیزمهای

نرم شدن فولادهای مورد تحقیق از آزمایشهای فشار گرم استفاده شد. چهار نوع فولاد میکرو آلیاژی تیتانیوم دار برای تأمین این منظور با ترکیب پایه $0.02\% \text{Si}$ ، $0.02\% \text{Mn}$ ، $0.08\% \text{Al}$ و با مقادیر مختلف کربن (جدول ۱) تهیه شدند.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولادها میکرو آلیاژی تهیه شده

نوع فولاد	%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Ti	%Al	%N ₂
A	۰/۰۰۳۵	۰/۰۲۲	۰/۱۵	۰/۰۱۲	-	۰/۰۶۵	-	۰/۰۰۳
B	۰/۰۳	۰/۰۳۸۵	۰/۱۹۳	۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۸۷	۰/۰۶۸	۰/۰۷۸	۰/۰۰۷
C	۰/۰۷۵	۰/۰۳۸۷	۰/۱۶۹۳	۰/۰۱۰۵	۰/۰۱۰۴	۰/۰۷۱	۰/۰۸	۰/۰۰۷
D	۰/۱۱۵	۰/۰۳۲۴	۰/۱۸۵۱	۰/۰۰۹۶	۰/۰۰۹۷	۰/۰۶۷	۰/۰۷۴	۰/۰۰۷

فولادهای فوق از طریق ذوب در کوره القایی تحت خلأ تهیه و سپس به صورت تختالهایی با ابعاد $25 \text{cm} \times 1/9 \times 6/7$ ریخته گری شدند. تختالهای ریخته شده پس از تراشکاری سطحی جهت تغییر ساختار ریختگی به ساختار کار گرم شده فورج شده (میزان 35% کاهش ارتفاع تختالها) و متعاقباً جهت یکنواخت کردن و حذف ناهمگنیهای ساختاری ناشی از کار گرم به مدت نیم ساعت در دمای 1200°C قرار گرفته و سپس در هوا سرد شدند. جهت تهیه نمونه‌های فشار گرم، تختالهای فوق در جهت طولی برش داده شدند و سپس به توسط عملیات ماشین کاری نمونه‌هایی با قطر ۸ و طول ۱۲ میلی متر از آنها تهیه شد.

به منظور بررسی تأثیر شرایط تغییر فرم گرم بر رفتار تبلور مجدد دینامیکی فولادهای مورد آزمایش، یک سری آزمایشهای فشار گرم پیوسته در دماهای ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد جهت بررسی در فاز فریت و دماهای ۹۰۰ تا ۹۸۰ درجه سانتیگراد جهت مطالعه در فاز اوستنیت و در سرعتهای کرنش مختلف 1S^{-1} - 10^{-2} انجام گرفت. به علاوه به منظور مطالعه اثر عوامل مختلف بر تبلور مجدد استاتیکی از آزمایشهای فشار گرم دو مرحله ای استفاده شد. این آزمایشها در دماهای ۶۵۰ و ۷۰۰ درجه سانتیگراد (در فاز فریت) و ۹۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتیگراد (در فاز اوستنیت) به ازای زمانهای نگهداری مختلف و با سرعت کرنش ثابت (10^{-1}S^{-1}) ولی با پیش کرنشهای متفاوت در دو

ناحیه فریت ($\varepsilon = 0/3$) و اوستنیت ($\varepsilon = 0/18$) انجام شدند. کلیه آزمایشهای فشار گرم به کمک یک دستگاه MTS انجام گرفت. به دلیل ثابت بودن سرعت حرکت فک دستگاه در حین انجام آزمایش، سرعت کرنش بطور متوسط از طریق رابطه زیر محاسبه گردید.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2(L_0 - L)}{t(L_0 + L)} [S^{-1}] \quad (2)$$

در اینجا t زمان انجام آزمایش، L_0 و L به ترتیب طول نمونه در قبل و بعد از آزمایش هستند. جهت بررسی تغییرات ریز ساختاری و اندازه دانه‌ها در حین تغییر فرم گرم، برخی از نمونه‌ها پس از اعمال کرنشهای معین بلافاصله از دمای تغییر فرم در آب کوئنچ شدند. این نمونه‌ها سپس در جهت موازی با محور فشار از مقطع وسط برش خورده و پس از پلیش توسط محلولهای نیتال و مارشال اچ شدند.

نتایج و بحث

الف - رفتار منحنیهای تنش - کرنش در آزمایشهای دینامیکی

منحنیهای سیلان فولادهای مورد تحقیق که در ناحیه فریت و در سرعت کرنش $10^{-2} S^{-1}$ به دست آمده‌اند، در شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب برای فولادهای A و C نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، منحنیهای تنش - کرنش فولاد A هم از نوع بازیابی و هم از نوع تبلور مجدد دینامیکی است، به طوری که در دمای $650^\circ C$ رفتار آن کاملاً از نوع بازیابی است. لیکن با افزایش دمای اوج تنش در منحنیهای آن نمایان می‌شود که بیانگر رخ دادن تبلور مجدد دینامیکی در این شرایط است. همچنین منحنیهای تنش - کرنش فولاد C (شکل ۳) نشان می‌دهند که تحت شرایط فوق در این فولاد بازیابی دینامیکی رخ داده است و تنها در دمای $700^\circ C$ اوج ضعیفی ناشی از تبلور مجدد دینامیکی در منحنی آن ظاهر گردیده است.

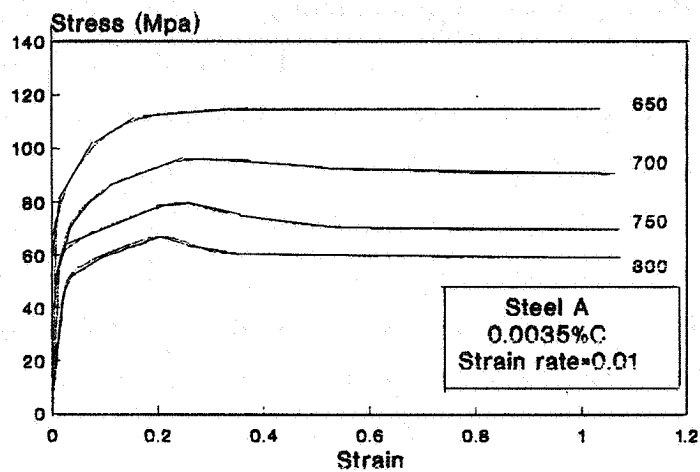
منحنیهای سیلان فولادهای C و D نیز در ناحیه اوستنیت و در سرعت‌های کرنش مختلف در

شکل‌های ۴ و ۵ نشانگر وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه مذکور است که با پژوهش‌های سایر محققان سازگار است [۵، ۱۱ و ۱۳].

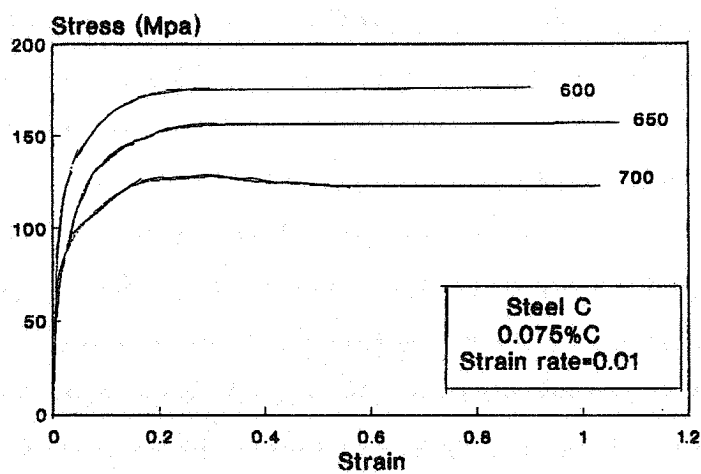
عوامل مؤثر بر مکانیزم نرم شدن دینامیکی در ناحیه اوستنیت - اساساً شروع تبلور مجدد دینامیکی در فولادها به ترکیب شیمیایی، دما و سرعت کرنش بستگی دارد [۱۱ و ۱۲]. این وابستگی معمولاً از انتقال کرنش اوج به سمت کرنش‌های بیشتر و یا کمتر در روی منحنی سیلان مشخص می‌شود. اثر دما بر تبلور مجدد دینامیکی - از بررسی رفتار تبلور مجدد دینامیکی فولادهای C و D در ناحیه دمایی اوستنیت (شکل‌های ۴ و ۵) ملاحظه می‌شود که در یک سرعت کرنش ثابت با افزایش دما اولاً استحکام گرم اوستنیت کاهش یافته و ثانیاً کرنش اوج (ϵ_p) در مقادیر کمتری ظاهر می‌شود. از آنجا که کرنش اوج در منحنی‌های سیلان گرم فلزات بیانگر شروع تبلور مجدد دینامیکی است، لذا به خوبی دیده می‌شود که با افزایش دما شروع تبلور مجدد دینامیکی جلومی‌افتد. از طرف دیگر علاوه بر کرنش اوج، با افزایش دما شیب منحنی سیلان در فاصله بین نقطه ماکزیمم و ناحیه پایدار منحنی افزایش یافته است. چون شیب منحنی سیلان در این ناحیه بیانگر نرخ تبلور مجدد دینامیکی است، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دما نه تنها تبلور مجدد را به جلو انداخته بلکه موجب تسریع در انجام آن نیز شده است. در حقیقت علت اصلی کاهش کرنش اوج و افزایش نرخ تبلور مجدد با دما را می‌توان به کاهش کرنش بحرانی لازم برای شروع تبلور مجدد دینامیکی و افزایش نیروی محرکه لازم برای ادامه تبلور مجدد نسبت داد [۱۴].

اثر سرعت کرنش بر تبلور مجدد دینامیکی - تأثیر سرعت کرنش بر شروع تبلور مجدد دینامیکی در یک دمای ثابت بطور نمونه برای فولاد C در شکل ۶ نشان داده شده است.

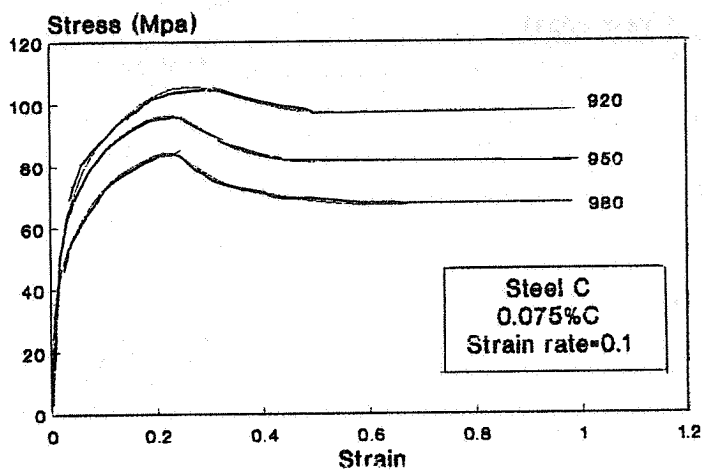
همان‌طور که در شکل فوق دیده می‌شود، با افزایش سرعت کرنش، به تدریج کرنش اوج به سمت کرنش‌های بیشتر میل می‌کند و در واقع شروع تبلور مجدد دینامیکی به تعویق می‌افتد و نرخ تبلور مجدد دینامیکی در سرعت‌های کرنش بالا، کمتر است. در واقع علت چنین رفتاری در فولادهای فوق را می‌توان به سینتیک تشکیل رسوبات دینامیکی با افزایش سرعت کرنش نسبت داد، به طوری که با افزایش سرعت کرنش سینتیک تشکیل رسوبات نیز افزایش می‌یابد [۱۱، ۱۵ و ۱۶]. از آنجا که رسوبات کربونیت‌ریدهای عناصر میکروآلیاژی نقش مؤثری در جلوگیری و ممانعت از بازیابی و تبلور مجدد دارند [۱۵]، به خوبی می‌توان استنتاج کرد که هر چه سرعت کرنش افزایش می‌یابد



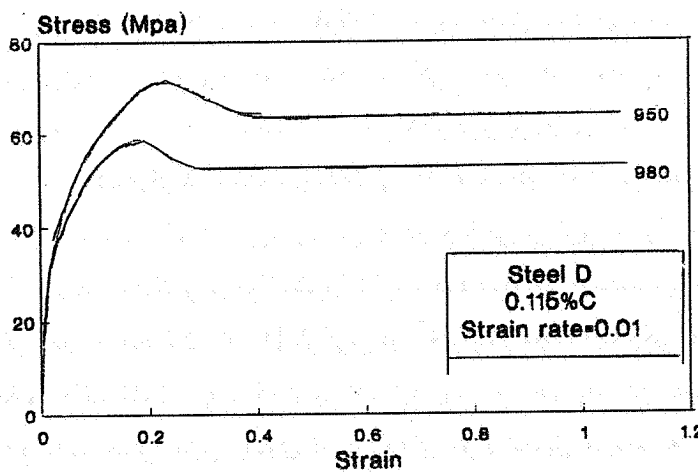
شکل ۲ - منحنیهای تنش-کرنش فولاد A در سرعت کرنش $1 \times 10^{-2} s^{-1}$ و در دماهای مختلف



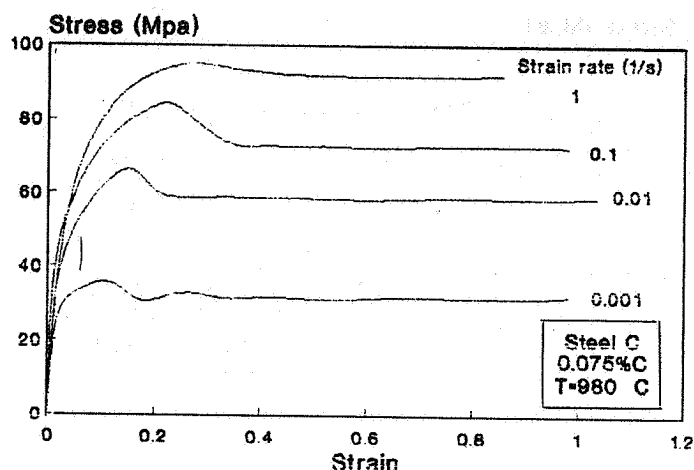
شکل ۳ - منحنیهای تنش-کرنش فولاد C در سرعت کرنش $1 \times 10^{-2} s^{-1}$ و در دماهای مختلف



شکل ۴ - منحنیهای تنش-کرنش فولاد C در سرعت کرنش $1 \times 10^{-1} s^{-1}$ و در دماهای مختلف

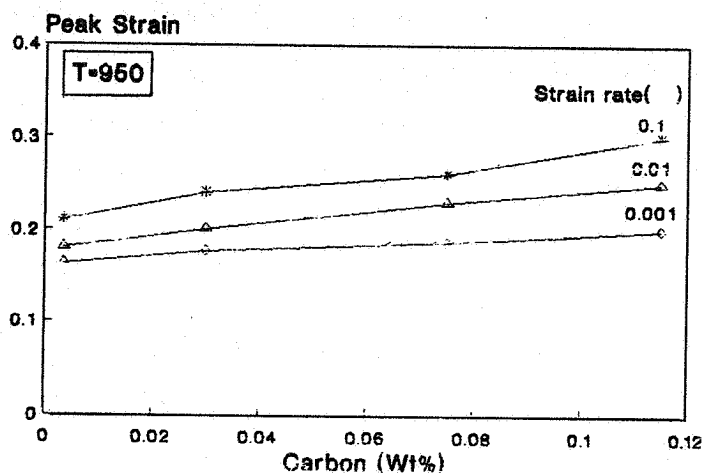


شکل ۵ - منحنیهای تنش-کرنش فولاد D در سرعت کرنش $1 \times 10^{-2} s^{-1}$ و در دماهای مختلف



شکل ۶ - منحنیهای تنش - کرنش فولاد C در دمای 980°C و در سرعتهای کرنش مختلف

سیتتیک تشکیل رسوبات TiC ، Ti(CN) در فولادهای مورد تحقیق بیشتر می شود و در نتیجه تأثیر بیشتری در جلوگیری از شروع و نرخ تبلور مجدد دینامیکی از خود باقی خواهد گذاشت. اثر کربن بر تبلور مجدد دینامیکی اوستنیت - شکل ۷ اثر کربن بر روی کرنش اوج (ϵ_p) در دمای 950°C و به ازای سرعتهای کرنش مختلف را نشان می دهد. همان طور که در این شکل دیده می شود کرنش اوج در تمام سرعتهای کرنش مورد آزمایش به تدریج با افزایش کربن در فولاد بیشتر می شود. به عبارت دیگر با زیاد شدن کربن در فولاد شروع تبلور مجدد دینامیکی اوستنیت به تأخیر می افتد، هر چند به نظریه‌ی بعضی از محققان [۹ و ۱۷] اثر کربن در تأخیر تبلور مجدد دینامیکی اوستنیت ناچیز است، اما تحقیق حاضر نشان می دهد که کربن تأثیر زیادی در به تأخیر انداختن تبلور مجدد داشته است. در واقع علت اصلی چنین رفتاری در فولادهای مورد تحقیق مربوط به نقش رسوبات کربونیتريد های تیتانیم در این فولادهاست. از آنجا که سیتتیک تشکیل این رسوبات و در نتیجه کسر حجمی رسوبات فوق با تغییر سرعت کرنش و ترکیب شیمیایی فولاد تغییر می کند، لذا سیتتیک و کسر حجمی این رسوبات در فولادهایی با درصد کربن بالاتر به مراتب بیشتر از فولادهایی با درصد



شکل ۷ - تغییرات کرنش اوج (ϵ_p) با افزایش کربن در دمای 950°C و در سرعت‌های کرنش مختلف

کربن کمتر است. بنابراین علت اصلی به تأخیر افتادن تبلور مجدد دینامیکی اوستنیت در فولادهای مورد آزمایش علاوه بر کربن محلول، از رسوبات کربونیت‌ریدهای تیتانیوم ناشی می‌شود. همان طور که قبلاً ذکر شد این‌گونه رسوبات در مرز دانه‌های اصلی و فرعی تشکیل شده و از شروع و پیشرفت تبلور مجدد جلوگیری می‌کنند.

تأثیر شرایط تغییر فرم بر روی تنش اوج - به طور کلی اکثر فلزاتی که در حین تغییر فرم گرم رفتار تبلور مجدد دینامیکی از خود نشان می‌دهند، از رابطه زهر - هولمن^۱

$$Z = \epsilon^m \exp(Q/RT) = A \sigma_p^n \quad (3)$$

تبعیت می‌کنند. در این رابطه، n ، توان تنش، Q ، انرژی اکتیواسیون برای تغییر فرم، T ، دما، R ، ثابت

1- Zener Holloman

گازها، ε° ، سرعت کرنش و Z ، پارامتر زتر - هولمن است. از آنجا که σ_p و σ_s به Z بستگی دارند، ε_p و ε_s نیز با آن تغییر می‌کنند [۲]. در شکل‌های ۸a تا ۸c رابطه بین Z با تنش اوج در ناحیه اوستنیت به ترتیب برای فولادهای B، C و D نشان داده شده است. روشن است که تنش اوج در اوستنیت با افزایش Z (افزایش سرعت کرنش و با کاهش دما) بیشتر می‌شود.

ب - بررسی تحولات ریز ساختاری در ناحیه فریت

نتایج به دست آمده بر روی فولادهای مورد تحقیق در ناحیه فریت نشان می‌دهد که مکانیزم نرم شدن در فاز فریت در حین تغییر فرم گرم هم از نوع بازیابی و هم از نوع تبلور مجدد دینامیکی است. از بررسی رفتار نرم شدن فریت در فولاد A (شکل ۲) به خوبی دیده می‌شود که در یک سرعت کرنش ثابت با افزایش دما، در منحنی سیلان نقطه اوج نمایان می‌شود که دلیلی بر وقوع تبلور مجدد دینامیکی در این فولاد است. این نتایج و با نتایج نجفی زاده و جوناس [۷ و ۸] سازگار است. شکل‌های ۹a و ۹b تغییرات ریز ساختاری فولاد A را که در دمای 750°C و سرعت کرنش 10^{-2}s^{-1} تغییر فرم یافته، در حالت‌های قبل و بعد از تغییر فرم نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۹a پیداست قبل از تغییر فرم دانه‌های این فولاد نسبتاً درشت ($d = 141\mu\text{m}$) هستند. لیکن در اثر تغییر فرم ($\varepsilon = 1/1$) و تبلور مجدد دینامیکی دانه‌ها ریزتر ($d = 52\mu\text{m}$) می‌شوند (شکل ۹b).

بررسی ریز ساختارهای فولاد B و C در همین شرایط و مقایسه آن با نمودارهای تنش و کرنش به دست آمده نشان می‌دهد که مکانیزم نرم شدن در این دو فولاد از نوع بازیابی دینامیکی است. شکل ۱۰ تغییرات ریز ساختار فولاد C را نشان می‌دهد همان طور که در تصویر میکروسکوپی این فولاد قبل از تغییر فرم پیداست (شکل ۱۰a) ساختار دانه‌ای کاملاً محوری و غیر یکنواخت بوده و مرز دانه‌ها کاملاً صاف هستند. در اثر تغییر فرم و در ازای کرنش $0/2$ دانه‌ها مقداری تغییر فرم یافته و کشیده می‌شوند و جوانه‌های بسیار کوچکی در بعضی نقاط و در مرز بین چند دانه مشاهده می‌شود (شکل ۱۰b). با ادامه تغییر فرم، در کرنش $0/6$ که در شکل ۱۰c دیده می‌شود، دانه‌ها کاملاً تغییر فرم یافته و کشیدگی دانه‌ها به خوبی پیداست. در این شکل مرز دانه‌ها داندانه-داندانه شده است

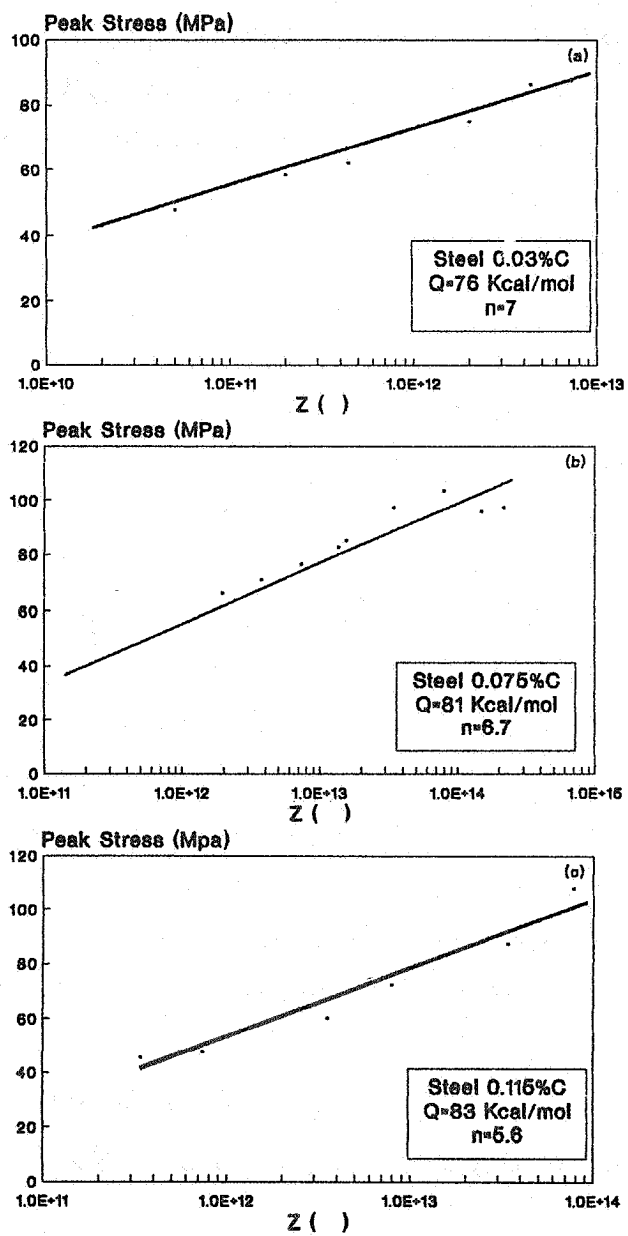
که نشانه شروع تبلور مجدد دینامیکی است [۲ و ۱۶]. همچنین، در مرز دانه‌های اولیه جوانه‌های کوچکی دیده می‌شوند که ناشی از تبلور مجدد دینامیکی بوده و به صورت شبه دینامیکی^۱ در طی عمل کوئنچ رشد کرده‌اند و بالاخره در شکل ۱۰d که ساختار میکروسکوپی این فولاد را در کرنش ۱/۲ نشان می‌دهد، دانه‌ها کاملاً کشیده و مرزها به صورت دندان-اره‌ای درآمده‌اند. همچنین در مرز دانه‌های اولیه نیز انبوهی از جوانه‌های بسیار کوچک که ناشی از تبلور مجدد دینامیکی و شبه دینامیکی هستند دیده می‌شوند.

تغییرات ریز ساختاری فولاد B در دمای ۷۰°C و در سرعت کرنش $1 \times 10^{-3} s^{-1}$ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شکل ۱۱a ساختار میکروسکوپی این فولاد را قبل از شروع تغییر فرم نشان می‌دهد. همان طور که در تصویر فوق دیده می‌شود ساختار میکروسکوپی آن شامل دانه‌های محوری نسبتاً درشت با مرزهای کاملاً صاف است. در اثر اعمال تغییر فرم در کرنش ۰/۴ (شکل ۱۱b) دانه‌ها کشیده شده و مرز دانه‌ها نیز دندان-دندانه گردیده‌اند. به علاوه در بعضی قسمت‌ها نشانه‌هایی از برآمدگی^۲ در مرزها که دلیل بر شروع تبلور مجدد دینامیکی است دیده می‌شود. شکل ۱۱c ساختار میکروسکوپی این فولاد را در ازای کرنش یک ($\epsilon = 1$) نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود کشیدگی دانه‌ها بیشتر شده و دانه‌های جدید حاصل از تبلور مجدد دینامیکی در مرز دانه‌های اولیه متمرکز شده‌اند.

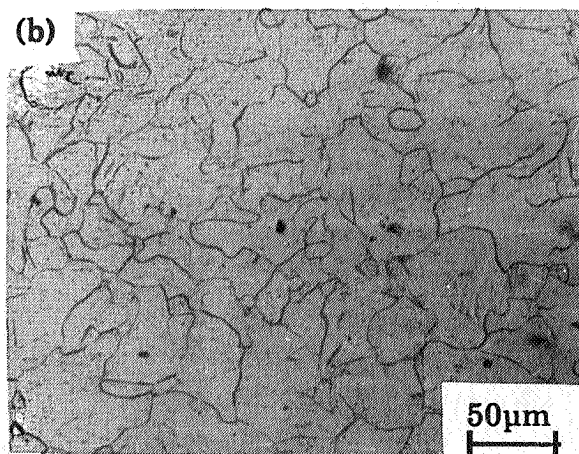
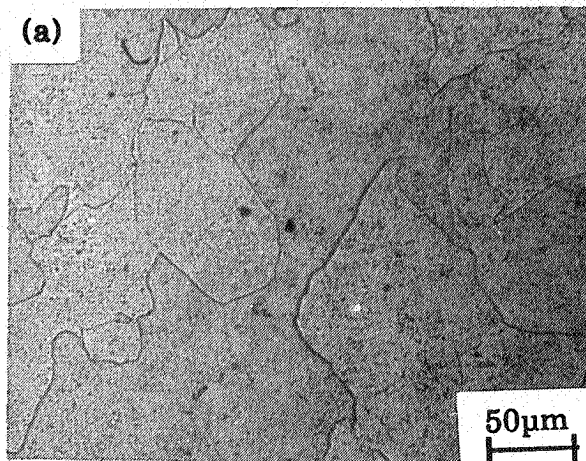
به طور کلی بررسی تغییرات ساختاری فریت در دو فولاد B و C نشان می‌دهد که تبلور مجدد دینامیکی در فریت در سرعت‌های کرنش کم شروع شده است ولی نرخ آن نسبت به فولاد A بسیار کمتر است. در واقع علت آهسته بودن نرخ تبلور مجدد دینامیکی در فریت در فولادهای B و C ناشی از رسوبات تیتانیم دار است که از شروع و ادامه تبلور مجدد جلوگیری می‌کند.

ج - بررسی رفتار فولادها در آزمایشهای استاتیکی

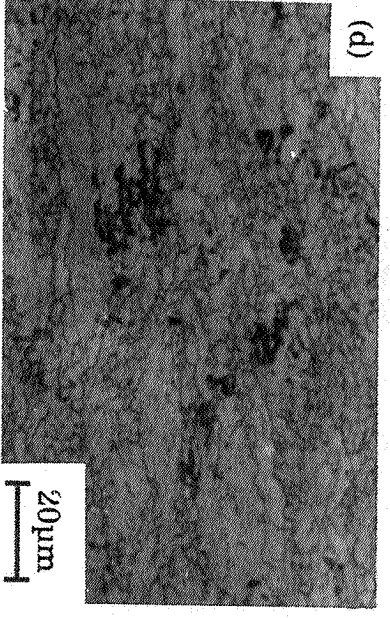
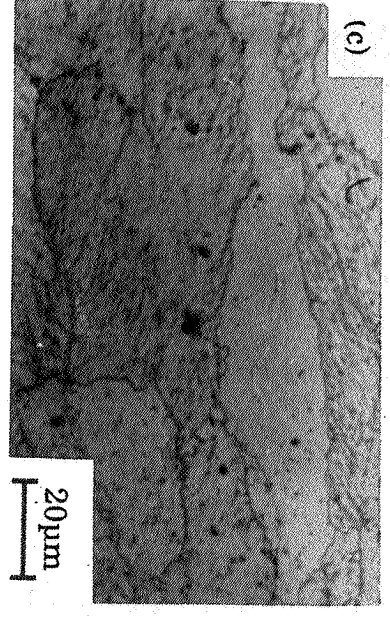
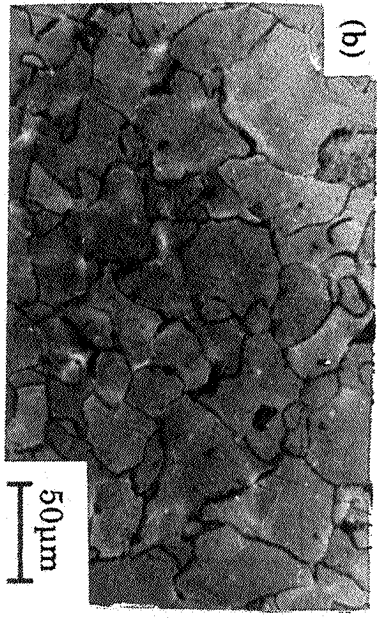
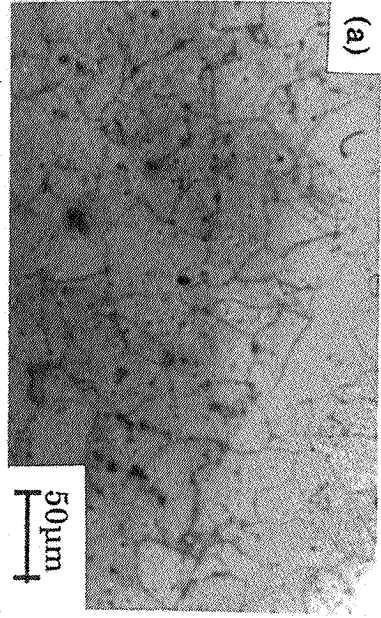
منحنیهای تنش - کرنش فولادهای مورد تحقیق از طریق آزمایشهای فشار گرم دو مرحله‌ای



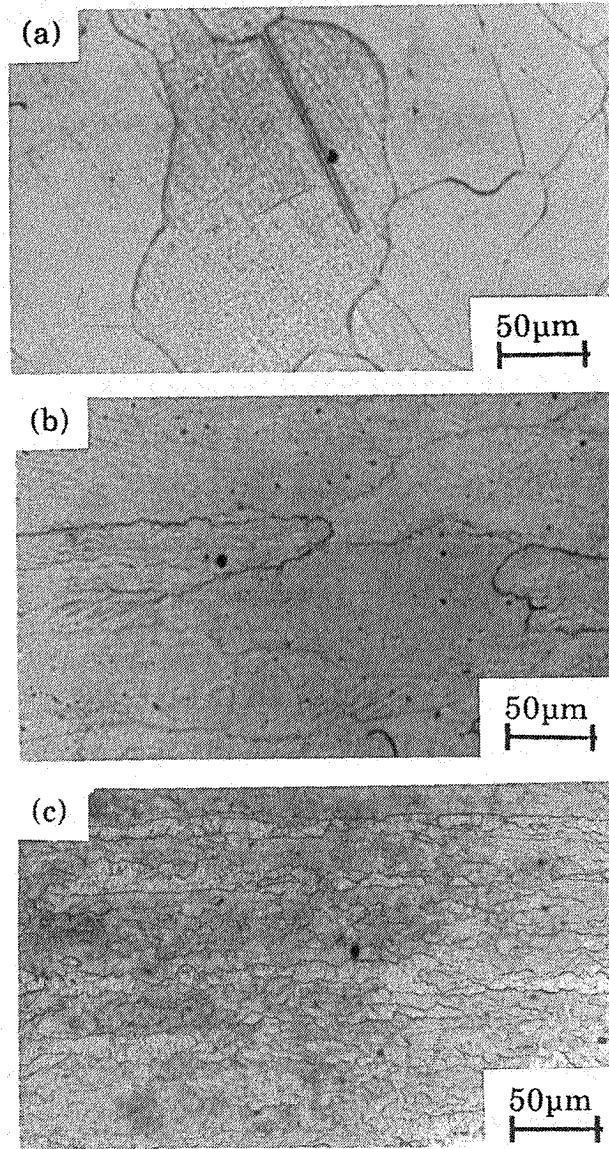
شکل ۸ - رابطه بین پارامتر زنو - هولمن با تنش پیک (a) فولاد B (b) فولاد C (c) فولاد D



شکل ۹ - ساختار میکروسکوپی فولاد A (C ۰۰۰۳۵) (a) قبل از تغییر فرم (b) بعد از تغییر فرم



شکل ۱۰ - تغییرات ریزساختار فولاد (C ۰/۰۷۵) / (Mn ۰/۰۱) که در دمای ۶۵۰°C و در سرعت کرنش $1 \times 10^{-3} s^{-1}$ تغییر فرم یافته است.
 (a) قبل از تغییر فرم (b) در کرنش ۰/۲ (c) در کرنش ۰/۴ (d) در کرنش ۱/۲

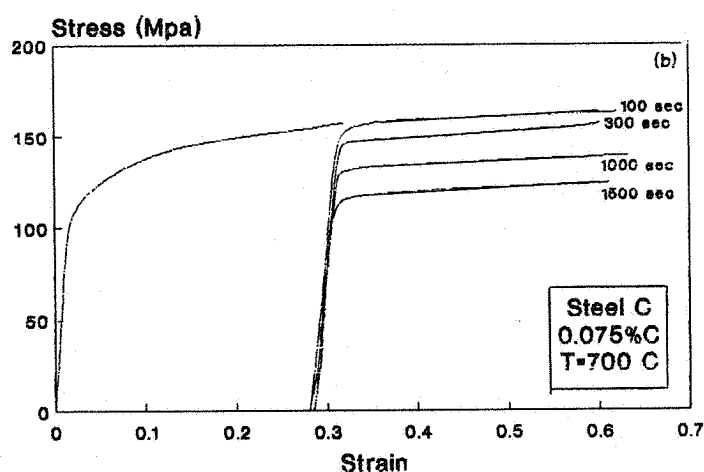
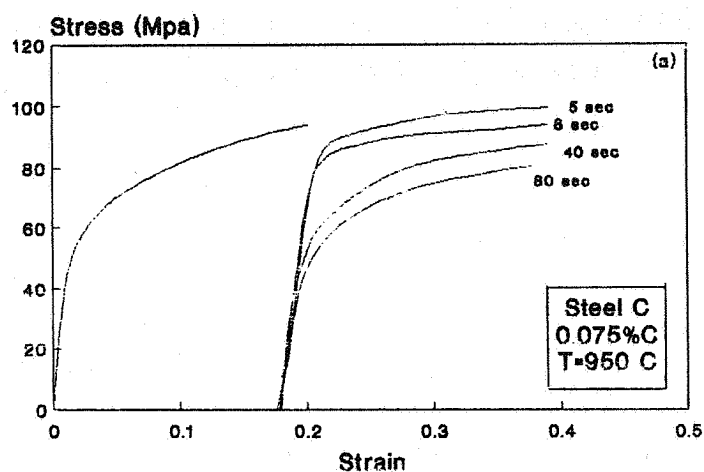


شکل ۱۱ - تغییرات ریز ساختار فولاد B (0.03 C) هنگامی که در دمای 700°C و در سرعت کرنش $1 \times 10^{-3} s^{-1}$ تغییر فرم یافته است. (a) قبل از تغییر فرم (b) در کرنش 0.4/°C در کرنش اوج

(استاتیکی) به دست آمدند. شکل ۱۲ رفتار فولاد C را در دو ناحیه دمایی اوستنیت (950°C) و فریت (700°C) و به ازای زمانهای نگهداری مختلف نشان می دهد. همان گونه که در این شکل دیده می شود، با نگهداری نمونه ها در بین دو مرحله فشار، نقطه تسلیم منحنی سیلان مرحله دوم کاهش پیدا می کند و به تدریج با افزایش زمان نگهداری تنش تسلیم در مرحله دوم با مرحله اول همطراز می شود. کاهش نقطه تسلیم در منحنی فشار مرحله دوم نشانگر رخ دادن بازیابی و تبلور مجدد در ماده است که به تدریج با گذشت زمان پیشرفت کرده و در لحظه ای که تنش تسلیم مرحله دوم با منحنی فشار مرحله اول برابر می شود، تبلور مجدد در ماده کامل می شود.

همان طور که در شکل ۱۲a دیده می شود در ناحیه اوستنیت تبلور مجدد بعد از حدود ۵۰ ثانیه در این فولاد کامل شده است، در حالیکه در ناحیه فریت (شکل ۱۲b) علی رغم اینکه مقدار کرنش اولیه (پیش کرنش) بیشتر از مقدار آن در ناحیه اوستنیت بوده، حتی با گذشت زمانهای طولانی نیز تبلور مجدد در آن کامل نشده است. به عبارت دیگر مقایسه نتایج در دماهای مختلف نشان می دهد که دما نسبت به میزان پیش کرنش نقش مهمتری در نرخ بازیابی و تبلور مجدد استاتیکی داشته است. اثر دما بر سرعت تبلور مجدد استاتیکی - شکل ۱۳ اثر دما بر پیشرفت تبلور مجدد استاتیکی اوستنیت و فریت را در فولاد D نشان می دهد. همان طور که در این شکل دیده می شود با افزایش دما در مناطق اوستنیت (900°C و 950°C درجه سانتیگراد) و فریت (650°C و 700°C درجه سانتیگراد) پیشرفت تبلور مجدد سریعتر شده است. همچنین در این شکل دیده می شود که نسبت نرم شدن (X) در محدوده دمایی فریت حتی به ازای زمانهای نگهداری طولانی نیز به یک نرسیده است؛ در حالی که این نسبت در محدوده دمایی اوستنیت در زمانهای کوتاهتر به یک رسیده است و در واقع تبلور مجدد در آن کامل شده است. به عبارت دیگر رفتار تبلور مجدد فولاد D نشان می دهد که نرخ تبلور مجدد استاتیکی در ناحیه اوستنیت بیشتر از ناحیه فریت است.

از آنجا که مکانیزمهای نرم شدن استاتیکی در فریت و اوستنیت یکسان بوده و از طریق تشکیل مرزهای فرعی و جوانه زنی و رشد بر روی مرزهای اصلی و فرعی صورت می گیرد، لذا تفاوت اصلی در نرخ تبلور مجدد استاتیکی در این دو ناحیه میزان دماست، به طوری که با افزایش دما مرحله بازیابی استاتیکی که با حذف و نابودی نابجاییها و تشکیل مرزهای فرعی همراه است سریعتر شده و متعاقباً شروع تبلور مجدد تسریع می شود. نکته قابل توجه دیگر که در ارتباط با فولادهای

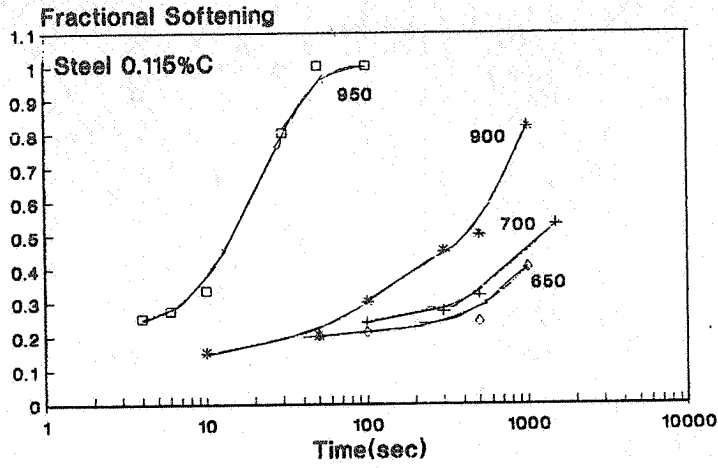


شکل ۱۲ - منحنیهای تنش - کرنش فولاد C در هر دو مرحله فشار و به ازای زمانهای نگهداری مختلف
 (a) در ناحیه اوستنیت $T = 950^{\circ}\text{C}$ (b) در ناحیه فریت $T = 700^{\circ}\text{C}$

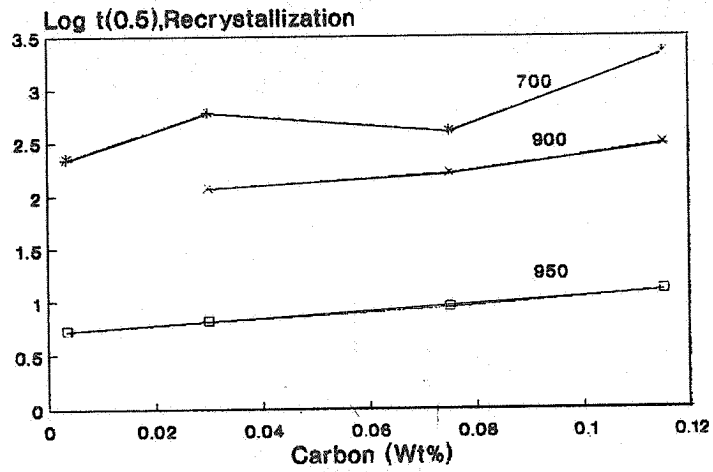
میکروآلیاژی مورد نظر وجود دارد، نقش رسوبات استاتیکی کربونیتريدهای تیتانیم در آن است. از آنجایی که کسر حجمی رسوباتی نظیر $\text{Ti}(\text{CN})$ و یا TiC که در فاز فریت تشکیل می‌شوند

به چندین برابر فاز اوستنیت می‌رسد [۱۱ و ۱۵]، تبلور مجدد استاتیکی در فریت بیشتر به تأخیر می‌افتد. اثر کربن بر سرعت تبلور مجدد استاتیکی - شکل ۱۴ اثر افزایش کربن بر زمان لازم جهت انجام ۵۰٪ تبلور مجدد در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش کربن و یا کاهش دما، زمان لازم جهت انجام ۵۰٪ تبلور مجدد (t_{0.5}) در کلیه دماها افزایش یافته است. علت افزایش t_{0.5} نسبت به درصد کربن به دلیل افزایش کربن محلول و همچنین نرخ تشکیل رسوبات استاتیکی است. افزایش این گونه رسوبات سبب کاهش نرخ تبلور مجدد استاتیکی می‌شود. همچنین افزایش t_{0.5} با کاهش دما به دلیل بیشتر بودن کسر حجمی رسوبات استاتیکی در دماهای پایین تر نسبت به دماهای بالاتر است.

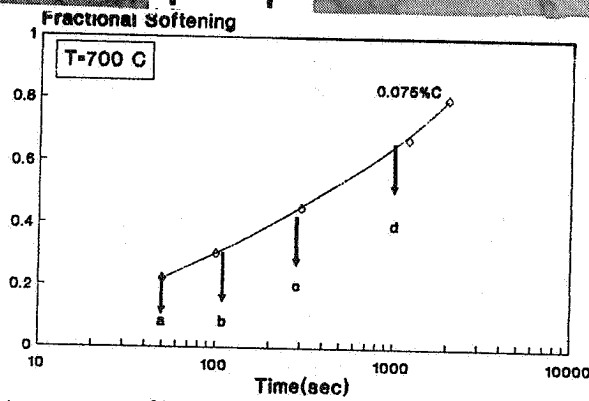
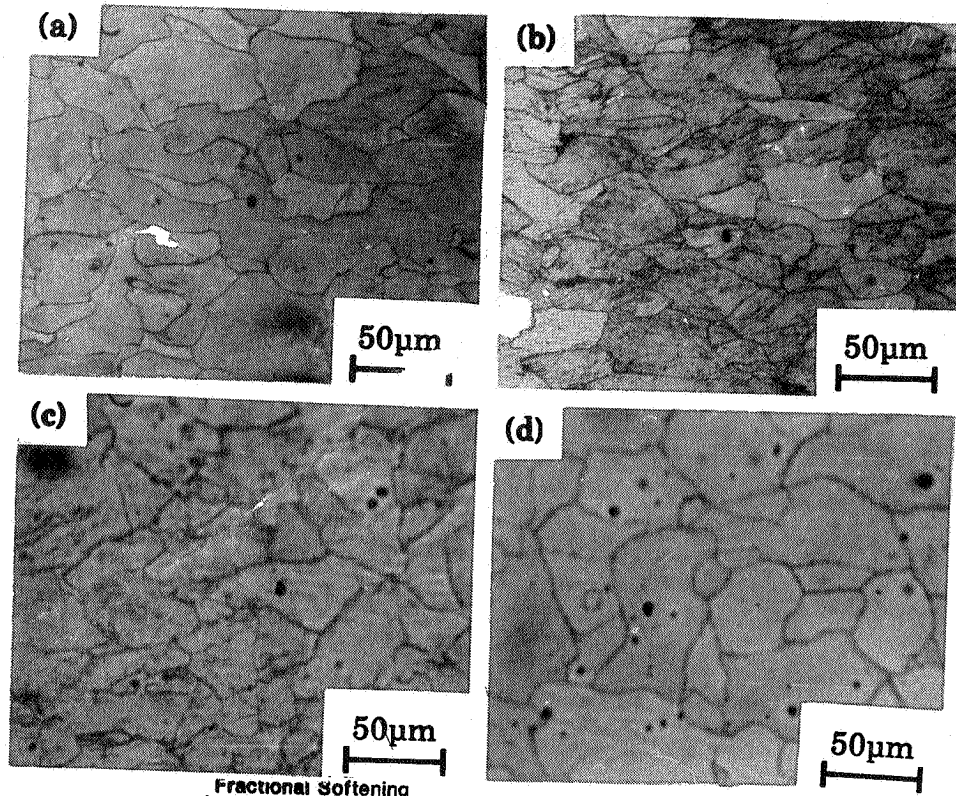
تغییرات ریز ساختاری در اثر تبلور مجدد استاتیکی - جهت بررسی میزان پیشرفت تبلور مجدد استاتیکی و رابطه بین نسبت نرم شدن و کسر حجمی دانه های مجدد تبلور شده با یکدیگر تغییرات ریز ساختاری فولاد C(۰.۰۷۵C) در دمای ۷۰۰°C به ازای زمانهای مختلف در شکل ۱۵ نشان داده شده است. این فولاد در دمای ۷۰۰°C و با سرعت کرنش ۱۰^{-۱}S^{-۱} تا میزان ۰/۳ پیش کرنش شده است و منحنی تغییرات نرم شدن آن بر حسب زمان در این شکل نشان داده شده است. شکل ۱۵a تصویر میکروسکوپی این فولاد را بعد از ۵۰ ثانیه نگهداری در دمای ۷۰۰°C نشان می‌دهد. همان طور که در این تصویر دیده می‌شود دانه ها در اثر کرنش اولیه مقداری تغییر فرم داده اند و در مرز دانه های اصلی دانه های کوچکی نیز دیده می‌شوند که به صورت استاتیکی جوانه زده اند. بعد از گذشت ۱۰۰ ثانیه تحت شرایط فوق تعداد جوانه های بیشتر شده و جوانه های اولیه نیز مقداری رشد کرده اند (شکل ۱۵b). شکل های ۱۵c و ۱۵d ساختار میکروسکوپی این فولاد را به ترتیب بعد از گذشت ۳۰۰ و ۱۰۰۰ ثانیه نگهداری تحت شرایط ایزو ترم نشان می‌دهد. همان طور که در تصاویر فوق دیده می‌شود، به تدریج با گذشت زمان جوانه های بیشتری رشد کرده اند و به ترتیب در شکل های فوق تقریباً ۳۰٪ و ۵۰٪ ساختار دانه ای دچار تبلور مجدد استاتیکی شده است. با مقایسه درصد حجمی دانه های مجدد تبلور شده در تصاویر فوق با نسبت های نرم شدن این فولاد دیده می‌شود که همواره مقادیر نرم شدن در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد نسبت به درصد حجمی دانه های مجدد تبلور شده بیشتر است. به عبارت دیگر مشاهدات فوق نشان می‌دهند که علت این اختلاف به دلیل نرم شدن ناشی از بازیابی استاتیکی بوده و مقدار نرم شدن ناشی از بازیابی استاتیکی (۱۰ - ۱۵ درصد) به خوبی با مقادیر



شکل ۱۳ - منحنیهای نرم شدن فولاد D (0.115% C) بر حسب زمان و در دماهای مختلف



شکل ۱۴ - اثر کربن بر روی زمان لازم جهت ۵۰٪ تبلور مجدد (t_{0.5}) در دماهای مختلف



شکل ۱۵ - تغییرات ریزساختار فولاد C (۰.۰۷۵٪C) در دمای ۷۰۰ °C و در اثر تبلور مجدد استاتیکی

(a) بعد از ۵۰ ثانیه نگهداری (b) بعد از ۱۰۰ ثانیه نگهداری

(c) بعد از ۳۰۰ ثانیه نگهداری (d) بعد از ۱۰۰۰ ثانیه نگهداری

نتیجه گیری

الف - از بررسی نتایج آزمایشهای دینامیکی بر روی فولادهای مورد تحقیق موارد زیر استنتاج می شود:

- ۱- مکانیزم نرم شدن دینامیکی در تمام فولادهای مورد تحقیق در ناحیه اوستنیت از نوع تبلور مجدد دینامیکی و در ناحیه فریت در فولاد A عمدتاً از نوع تبلور مجدد دینامیکی و در فولادهای B، C و D عمدتاً از نوع بازیابی دینامیکی است.
- ۲- عامل اصلی در جلوگیری از تبلور مجدد دینامیکی در فریت وجود عناصر بین نشینی کربن و نیتروژن است. که با تشکیل رسوبات ناشی از تغییر فرم مانعی در برابر تبلور مجدد دینامیکی به وجود می آورند.
- ۳- رفتار تبلور مجدد دینامیکی فولادهای مورد تحقیق در ناحیه دمایی اوستنیت نشان می دهد که با افزایش دما و یا کاهش سرعت کرنش، کرنش اوج (ϵ_p) به جلو، و با کاهش دما و یا افزایش سرعت کرنش، کرنش اوج به عقب می افتد. به عبارت بهتر تبلور مجدد دینامیکی اوستنیت در مقادیر بالای Z به تأخیر می افتد و یا بالعکس.
- ۴- با افزایش کربن در این فولادها در ناحیه اوستنیت شروع تبلور مجدد دینامیکی به تأخیر می افتد.

ب - بررسی نتایج آزمایشهای استاتیکی بر روی فولادهای مورد تحقیق نشان می دهد که:

- ۱- با افزایش دمانرخ بازیابی و تبلور مورد استاتیکی در هر دو ناحیه فریت و اوستنیت افزایش می یابد.
- ۲- نرخ تبلور مجدد استاتیکی در ناحیه اوستنیت بیشتر از ناحیه فریت است، که این به دلیل بیشتر بودن دما و همچنین کاهش کسر حجمی رسوبات در ناحیه اوستنیت نسبت به ناحیه فریت است.
- ۳- در هر دو ناحیه فریت و اوستنیت با افزایش کربن نرخ تبلور مجدد استاتیکی کاهش می یابد.

قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه صنعتی اصفهان و از شورای هماهنگی تحقیقات و معاونت محترم پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان برای تأمین هزینه های این پژوهش ، صمیمانه تشکر می شود.

مراجع

1. McQueen, H. J., *Applied Metalworking*, Vol. 3, p. 410, 1985.
2. Imao Tamura, *Trans. ISIJ*, Vol. 27, p. 763, 1987.
3. Sakai, T. and Jonas, J. J., *Acta Metall.*, Vol. 32, No. 2, p. 189, 1984.
4. McQueen, H. J. and Jonas, J. J., *Applied Metalworking*, Vol. 3, No. 3, p. 233, 1984.
5. Maki, T., Akasaka, K. and Tamura, I., *Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite*, ed. by DeArdo, A. J., Ratz, G.A. and Wray, p. J. , TMS-AIME, Warrendale, PA. p. 217, 1982.
6. Sakai, T., Saito, Y., Hrama, K. and Kato, K., *Trans ISIJ*, Vol. 28, p.1028, 1988.
7. Najafi - Zadeh, A., Jonas, J. J. and Yue, S., *Metall. Trans.*, Vol. 23A, No. 9, p. 2607, 1992.
8. Najafi - Zadeh, A., Jonas, J.J. and Yue, S., *Recrystallization 92*, ed. by Fuentes M. and Gil Secillano, J., san Sebastian, Spain, p.441, 1992.
9. Yamamoto, S., Ouchi, C. and Asuka, T. *Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite*, ed. by DeArdo, A.J., Ratz G.A. and Wray, p.J. TMS-AIME, Warrendale, PA., p. 613, PA
10. Steriberger, A., Kasper, R. and Pawelski, *Metall. Trans A*, Vol. 16A, No. 1, p.67, 1985
11. Akben, M. G., Bacroix, B. and Jonas, J. J. *Acta Metall*, Vol. 31, p. 161. 1983.
12. Ueki, M., Horise, S. and Nakamura, T., *Trans. ISIJ*, Vol. 27, p. 453, 1987.

13. Sakai, T., Akben, M. G. and Jonas, J. J., *Acta Metall.*, Vol. 31, No. 4, p. 631, 1983.
14. Roberts, W., *Strength of Metals and Alloys*, Montreal, Canada, p. 1859, 1985.
15. Weiss, I. and Jonas, J. J. *Metall. Trans.*, Vol. 11A, No. 3, p. 403. 1980.
16. Kwan, O. and DeArdo, A. J., *Acta Metall.*, Vol. 39, No. 4, p. 229, 1991.
17. Wary, p. J., *Metall. Trans.*, Col. 15A, No. 11, p. 2009, 1984.