

مطالعه تأثیر نرخ کرنش بر استحاله دینامیکی تحت کرنش القاء شده آستنیت به فریت در فولاد کم کربن میکرو آلیاژی

بیتاله اقبالی

استادیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

چکیده

در این پژوهش، تأثیر سرعت اعمال تغییر شکل بر فرآیند ریز شدن دانه‌های فریت در جریان استحاله دینامیکی تحت کرنش القاء شده آستنیت به فریت در فولاد کم کربن میکروآلیاژی دارای Nb-Ti مورد مطالعه قرار گرفت. عملیات ترمومکانیکی با استفاده از آزمایش فشار گرم تک مرحله‌ای اجرا شد. تغییر شکل در منطقه آستنیت ناپایدار (محدوده دمایی A_{e3} - A_{F3}) اعمال گردید. با استفاده از منحنی‌های سیلان گرم آستنیت/ فریت بدست آمده از آزمایش‌های مکانیکی، مشاهدات ریزساختاری حاصل از میکروسکوپ نوری نتایج یافته‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. دیده می‌شود نرخ کرنش نقش مهمی در مورد امکان وقوع یا عدم وقوع استحاله دینامیکی تحت کرنش القاء شده آستنیت به فریت در حین تغییر شکل دارد. بطوری‌که با افزایش نرخ کرنش کنتیک فرآیند نرم شدن دینامیکی ناشی از استحاله تحت کرنش آستنیت به فریت کندتر می‌شود. در تغییر شکل با نرخ کرنش بالاتر، نسبت سرعت جوانه زنی دانه‌های فریت به سرعت رشد آنها افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نرخ کرنش اندازه دانه‌های فریت ریز و هم محور ظریفتر و کسر حجمی آنها بیشتر شده و در مقابل از کسر حجمی دانه‌های فریت کار سخت شده کاسته می‌شود.
کلمات کلیدی: استحاله تحت کرنش، فولاد میکروآلیاژی، آستنیت، فریت، اندازه دانه.

Study on the Effect of Strain Rate on the Dynamic Strain-Induced Transformation in a Low Carbon Microalloyed Steel

B. Eghbali

Department of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz

Abstract

In the present research, the microstructural evolution and ferrite grain refinement at the deformation temperature of 845 °C (i.e. between A_{e3} - A_{F3}) with different strain rates were investigated using single pass isothermal hot compression experiments for a low carbon Nb-Ti microalloyed steel. The physical processes that occurred during deformation were discussed by observing the optical microstructure and analyzing the true stress-true strain responses. At strain rates of 0.001 and 0.01s⁻¹, there is no evidence of work hardening behavior during hot deformation and strain-induced dynamic transformation (SIDT) leads to dynamic flow softening in flow curves. Optical microscopy observation shows that ultrafine and equiaxed ferrite with grain sizes of 2 μm can be obtained by applying deformation with strain rate of 0.1s⁻¹ due to SIDT just after deformation. Furthermore, increasing the strain rate from 0.001 to 0.1s⁻¹ reduces both the grain size of the equiaxed ferrite and the amount of deformed ferrite. As high strain rates reduce the extent of dynamic softening events, DRC/DRX, occurring during deformation and in turn increases the driving force for SIDT just at the end of deformation. It was realized that high strain rates is considered to be favorable conditions to produce ultrafine ferrite.

Key words: Hot compression, Strain-induced transformation, Microalloyed steel, Austenite, Ferrite.

۱- مقدمه

محدوده دمایی 1250°C پیش گرم شده و سپس طی شش پاس متوالی نورد گرم شد و به صورت تسمه به ضخامت 25 mm تبدیل گردید. با استفاده از (DSC) (Differential Scanning Calorimetry) دماهای بحرانی استحاله $A_{T1}=751^{\circ}\text{C}$, $A_{T3}=837^{\circ}\text{C}$ تعیین شد. نمونه‌های استوانه‌ای شکل به ارتفاع 18 mm و قطر 12mm در جهت نورد تسمه‌ها با ماشینکاری در آورده شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در تحقیق

عنصر	درصد وزنی
C	0.032
Si	0.15
Mn	0.74
S	0.007
P	0.009
Nb	0.014
Ti	0.013
Al	0.028
N	0.0031

۲-۲- آزمایش فشارگرم

برنامه‌های ترمومکانیکی با استفاده از دستگاه فشار گرم نوع Servo-hydraulic 600KN (MTS, Model 8500) که مجهز به سیستم کنترل کامپیوتری بود انجام گرفت. گرمایش نمونه‌ها، توسط یک کوره مقاومتی با المنت‌های سلیکون کربیدی صورت می‌گرفت. دمای نمونه‌ها با تترانس حدود $\pm 5^{\circ}\text{C}$ توسط ترموکوپل نوع Chromel-Alumel (Type K) کنترل می‌شد. دستگاه در شرایط سرعت فک ثابت (Constant Crosshead Speed) کار می‌کرد که از روی آن، نرخ کرنش معادل محاسبه می‌شد. برای تقلیل اثر اصطکاک موجود در بین سطوح تماس دو انتهای نمونه با سطوح فک‌های دستگاه و ایجاد تغییر شکل همگن از ورق میکا همراه با پودر گرافیت استفاده گردید. در شکل (۱) برنامه‌های ترمومکانیکی اجرا شده نشان داده شده است. نمونه‌ها بعد از پیش گرم در دمای 1150°C به مدت 5 min، با سرعت 5°C/s تا دمای 845°C (درست بالای A_{T3}) سرد شدند. سپس در این دما، قبل از اعمال کرنش به مدت 20sec نگهداری شدند. تغییر شکل تا کرنش 0.8 و با نرخ کرنش‌های مختلف $0.001, 0.01, 0.1 \text{ s}^{-1}$ اعمال شد.

همواره یکی از اهداف مهم تولید کنندگان محصولات فولادی این است که بتوانند استحکام فولاد را افزایش دهند بدون اینکه انعطاف‌پذیری (Ductility) و قابلیت جوشکاری آنها تضعیف شود. در این خصوص، یکی از روش‌های معمول افزودن عناصر آلیاژی به فولاد است. اگرچه با این روش می‌توان تا حد زیادی خواص مکانیکی فولاد را بهبود بخشید، اما این یک روش پرهزینه بوده و امکان بازیافت این قبیل از فولادها بعداً مشکل می‌شود. از دیگر روش‌های متداول، می‌توان به انجام عملیات حرارتی بعد از نورد (Post-rolling heat treatment) نظیر نرماله کردن یا کوئنچ و تمپر اشاره کرد. در این روش‌ها نیز هزینه تولید بالا بوده و قیمت تمام شده محصول افزایش می‌یابد. امروزه از بین روش‌های مختلف استحکام بخشی به فولادها، ریز کردن دانه‌های فریت به عنوان مؤثرترین روش و دارای هزینه پایین برای تقویت همزمان استحکام و چقرمگی پذیرفته شده است [۱، ۳].

چندین روش مختلف عملیات ترمومکانیکی متداول برای ریز کردن دانه‌های فریت وجود دارد [۴، ۵]. یکی از روش‌ها توسط وقوع استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت (SIDT) (Strain-induced dynamic transformation) است.

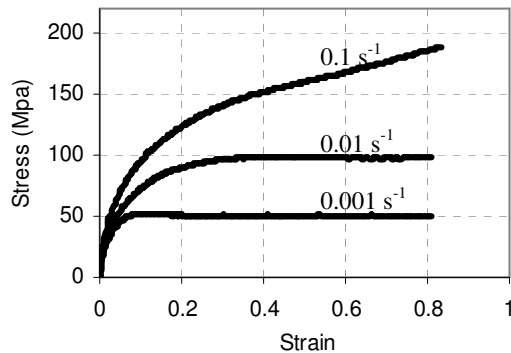
اگرچه تا به حال در مورد تأثیر پارامترهایی از قبیل میزان تغییر شکل، دمای تغییر شکل و ترکیب شیمیایی بر وقوع استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت در فولادهای ساده کربنی مطالعات خوبی صورت گرفته است [۶، ۷]، اما در مورد تأثیر نرخ اعمال تغییر شکل بر کنتیک وقوع SIDT و اندازه دانه‌های فریت حاصل از آن اطلاعات خیلی کمی در دسترس است. لذا در این تحقیق، با استفاده از آزمایش فشار گرم تک مرحله‌ای تأثیر نرخ کرنش بر SIDT و بر اندازه دانه‌ای حاصل از آن در یک فولاد کم کربن میکروآلیاژی دارای نیوبیم-تیتانیوم مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

فولاد مورد استفاده در این تحقیق از نوع کم کربن میکروآلیاژی دارای Nb-Ti بود. ترکیب شیمیایی آن در جدول (۱) نشان داده شده است. ابتدا این فولاد در مقیاس آزمایشگاهی در یک کوره القایی تحت اتمسفر گاز آرگون تولید شد و تحت فرآیند ذوب مجدد (ESR) قرار گرفت. سپس شمش حاصل در

عمدتاً ناشی از وقوع SIDT دانست. توضیحات بیشتر در این مورد، در قسمت بحث ارائه خواهد شد.

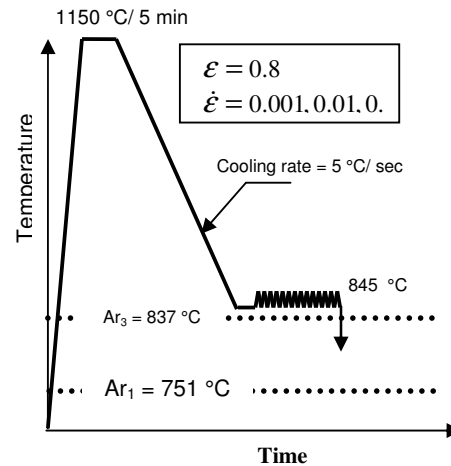


شکل ۲- منحنی‌های تنش حقیقی - کرنش حقیقی در جریان تغییر شکل در دمای 845 °C تا کرنش 0.8 با نرخ کرنش‌های مختلف

در تغییر شکل با نرخ کرنش بالاتر، 0.01 /s، نیز دیده می‌شود که منحنی سیلان در کرنش حدود 0.32 به ماکزیمم رسیده و بعد از آن بدون بروز کارسختی تا پایان کرنش؛ در سطح تنش ثابت مانده است. همانگونه که در فوق اشاره شد، این نوع نرم شدن دینامیکی عمدتاً ناشی از استحاله دینامیکی SIDT آستنیت به فریت است. البته مورد توجه است که در تغییر شکل با نرخ کرنش 0.01 /s سطح کلی تنش سیلان بالاتر از موقعی است که تغییر شکل با نرخ کرنش 0.001 /s صورت گرفته است. در تغییر شکل با نرخ کرنش 0.1 /s منحنی سیلان تماماً رفتار کارسختی از خود نشان داده است. این مبین آن است که هیچگونه نرم شدن دینامیکی، بالاخص از نوع SIDT، در حین تغییر شکل با نرخ کرنش بالاتر اتفاق نیافتاده است.

۳-۲- تأثیر نرخ کرنش بر ریز ساختار حاصل از SIDT

شکل (۳) نتایج مربوط به ریز ساختارهای بدست آمده در جریان تغییر شکل در دمای 845 °C تا کرنش 0.8 را در سرعت‌های مختلف کرنش 0.001، 0.01، 0.1 /s نشان می‌دهد. دیده می‌شود فاز غالب در ریز ساختار عمدتاً از نوع دانه‌های فریت هم محور است. مقداری فریت تغییر شکل یافته نیز در ساختار مشهود است. این فریت در حین تغییر شکل تشکیل شده و با ادامه کرنش به صورت کشیده در آمده است. تشکیل و گسترش دانه‌های فریت هم محور در ابتدا از مرز دانه‌های آستنیت بوده است.



شکل ۱- برنامه ترمومکانیکی اجرا شده برای بررسی اثر نرخ کرنش بر استحاله SIDT

بمحض خاتمه تغییر شکل بلافاصله نمونه‌ها در آب خنک کوئنچ شدند. سپس نمونه‌ها در راستای موازی با جهت اعمال نیروی فشار و عمود بر صفحه اعمال فشار از وسط به دو نیمه مساوی بریده شدند. بعد از مانت، سمباده، پولیش در محلول نیتال 2% اچ شدند. ریزساختار نمونه‌ها از قسمت میانی آنها مورد مطالعه میکروسکوپی قرار گرفت. اندازه دانه‌های فریت با روش خطی (Linear Intercept Method) مطابق استاندارد ASTM E112 تعیین گردید.

۳- نتایج

۳-۱- تأثیر نرخ کرنش بر منحنی‌های سیلان در تغییر

شکل در دمای بالای Ar₃

در شکل (۲) منحنی‌های تنش حقیقی-کرنش حقیقی مربوط به تغییر شکل در دمای 845°C (درست بالای Ar₃) تا کرنش 0.8 با سه نرخ کرنش مختلف 0.001، 0.01، 0.1 /s نشان داده شده است. دیده می‌شود در تغییر شکل با نرخ کرنش 0.001 /s شکل منحنی سیلان شبیه به منحنی سیلان در بازایی دینامیکی است. این نشان دهنده آن است که در این دمای تغییر شکل، نوعی نرم شدن دینامیکی اتفاق افتاده است. تنش سیلان بعد از رسیدن به یک ماکزیمم، تا پایان تغییر شکل در سطح ثابت باقی مانده است. نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر نشان داده است که این نوع نرم شدن دینامیکی نمی‌تواند تماماً ناشی از بازایی دینامیکی در آستنیت باشد. بلکه این رفتار را می‌توان

با افزایش نرخ کرنش به 0.1 /s، دانه‌های فریت EFG حاصل از SIDT بیشتر ریز شده و اندازه آنها به حدود 1.8 میکرون تقلیل یافته است. توضیحات بیشتر در این مورد در ادامه ارائه خواهد شد.

۴- بحث

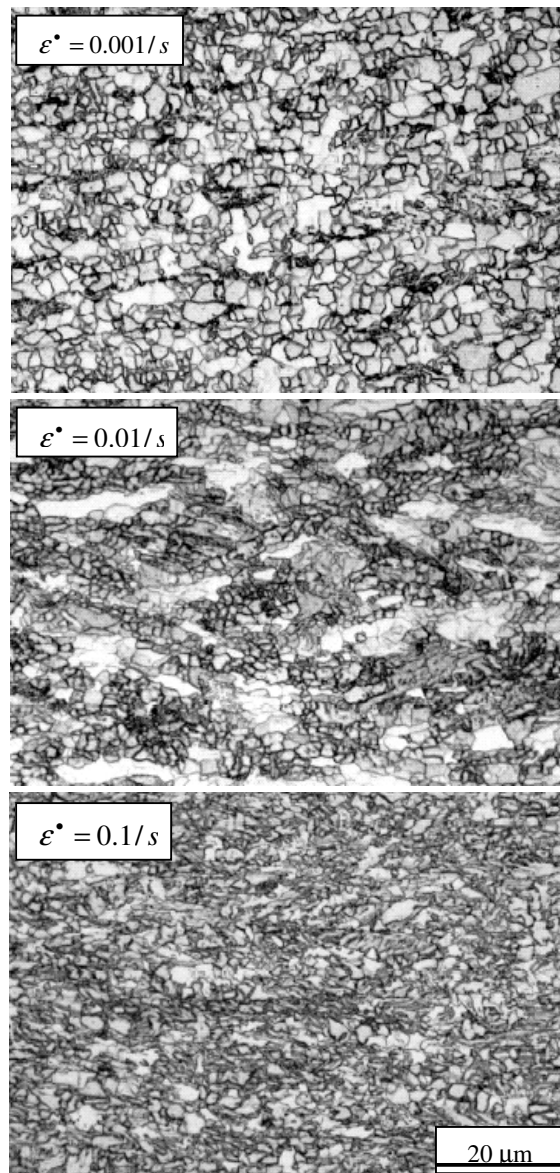
۴-۱- منحنی‌های سیلان گرم و فرآیندهای نرم شدن

دینامیکی در نرخ کرنش‌های مختلف

از شکل (۲) دیده می‌شود در تغییر شکل با نرخ کرنش 0.001 /s، ابتدا با افزایش کرنش، فلز کارسخت شده و تنش سیلان سریع افزایش یافته است. سپس در ادامه تغییر شکل، رفتار فلز از کارسختی محض به کارسختی همراه با نرم شدن دینامیکی تغییر کرده است. این مبین آن است که در این مرحله بخشی از انرژی تغییر شکل در نتیجه فرآیند وقوع نرم شدن دینامیکی آزاد شده است. ممکن است تصور شود این رفتار احتمالاً ناشی از وقوع بازیابی دینامیکی در آستنیت باشد. حال آنکه در یک پژوهش دیگر، توسط نویسنده حاضر دیده شد که در تغییر شکل در دمایی بالاتر از 845 °C (یعنی در دمای 950 °C) این فولاد تماماً رفتار کارسختی از خود نشان داد [۹]. بنابر این، وقوع بازیابی دینامیکی در آستنیت در دمای پایین‌تر (845 °C) مسلماً غیر محتمل است.

در حالت کلی برای آزاد شدن انرژی تغییر شکل آستنیت، سه مکانیزم وجود دارد: ۱- تبلور مجدد دینامیکی در آستنیت، ۲- بازیابی دینامیکی در آستنیت و ۳- استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت. با غیر محتمل شدن دو مکانیزم اول، رفتار نرم شدن اتفاق افتاده در این شرایط تغییر شکل، تنها می‌تواند ناشی از وقوع استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت باشد. این رفتار در مورد فولاد ساده کربنی نیز توسط محققین دیگر دیده شده است.

با افزایش نرخ کرنش از 0.001 به 0.01 /s، دیده می‌شود که سطح کلی تنش سیلان نیز افزایش یافته است. در این مورد دیده می‌شود که بعد از کرنش حدود 0.3 سطح تنش سیلان به حالت ثابت رسیده و سپس تا آخر تغییر شکل بدون تغییر مانده است. مکانیزم نرم شدن دینامیکی اتفاق افتاده در این مورد نیز همانند قبلی، عمدتاً ناشی از وقوع استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت است. اما، در تغییر شکل با نرخ کرنش خیلی بالاتر (0.1 /s)، هیچ علامتی از وقوع نرم شدن دینامیکی در حین

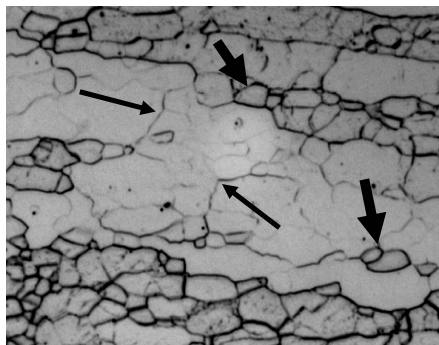


شکل ۳- ریز ساختار نوری بدست آمده در تغییر شکل در دمای 845 °C تا کرنش 0.8 و با نرخ کرنش‌های مختلف

حضور مقداری فریت کشیده در ریزساختار مبین آن است که استحاله فاز در حین تغییر شکل اتفاق افتاده است [۸] با افزایش نرخ کرنش از 0.001 /s به 0.01 /s، هم اندازه دانه های فریت ریز و هم محور EFG (Equiaxed Fine Grain) از 5.6 به 2.6 میکرون کاهش یافته و هم از مقدار فریت تغییر شکل یافته در ریزساختار کاسته شده است. به بیان دیگر با کاهش نرخ کرنش، دانه‌های فریت تغییر شکل یافته زیادی در ریز ساختار پدیدار شده است.

دینامیکی نیز در آنها اتفاق افتاده باشد، عمدتاً به شکل پنکیک شده در ریزساختار نهایی مشاهده می‌شوند که جهت پنکیک شده آنها عمود بر جهت محور اعمال نیروی تغییر شکل فشاری است، حال آنکه در ساختار حاصل از استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت، دانه‌های فریت از نوع پلی‌گونال و هم محور می‌باشند [۱۰، ۱۱]. این موضوع در شکل (۴) بوضوح نشان داده شده است. دیده می‌شود دانه‌های کار سخت شده که بازبایی دینامیکی در آنها شروع شده است (نشان داده شده با فلش‌های نازک) دارای مورفولوژی کشیده و دانه‌های فریت حاصل از استحاله دینامیکی بصورت پلی‌گونال و هم محور هستند (نشان داده شده با فلش‌های ضخیم). وقوع بازبایی دینامیکی در داخل دانه‌های فریت کارسخت شده موجب ایجاد تعدادی دانه فرعی در داخل یک دانه اصلی می‌شود. اگر کرنش اعمالی افزایش داده شود، این دانه‌های فرعی نیز در طی مکانیزمی به دانه‌های اصلی و ریز فریت (EFG) تبدیل می‌شوند. بدین ترتیب کسر حجمی کل دانه‌های ریز فریت در ریزساختار افزایش می‌یابد. در مورد مکانیزم ریز شدن دانه‌های فریت کار سخت شده در جای دیگر توسط این نویسنده بحث شده است [۱۲].

شکل (۳) نشان می‌دهد با افزایش نرخ کرنش به $0.1/s$ ، دانه‌های فریت ریز و هم محور بیشتری از استحاله دینامیکی آستنیت به فریت حاصل شده است. در جدول (۲) نیز این موضوع نشان داده شده است. دیده می‌شود دانه‌های ریز و هم محور فریت ایجاد شده با نرخ کرنش‌های بالا، از نظر اندازه دانه در محدوده UFF هستند.



شکل ۴- ریزساختار نوری حاصل از تغییر شکل در دمای $10+A_{T1}$ تا کرنش 0.4 و با نرخ کرنش $0.001/s$ فلش‌های نازک نشان دهنده مرزهای فرعی ایجاد شده در داخل دانه‌های کار سخت شده فریت، فلش‌های ضخیم نشان دهنده دانه‌های پلی‌گونال فریت حاصل از استحاله SIDT

تغییر شکل مشاهده نمی‌شود. این نشان دهنده آن است که نرخ کرنش نقش مهمی در مورد وقوع یا عدم وقوع استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت در حین تغییر شکل بازی می‌کند. زیرا میزان نرخ کرنش، کنترل کننده مدت زمان در اختیار برای وقوع استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت و همچنین انرژی اکتیواسیون لازم برای آن است. افزایش نرخ کرنش، موجب افزایش مقاومت فلز در برابر تغییر شکل می‌شود. این بدان علت است که در نرخ کرنش بالا کنتیک وقوع فرآیندهای نرم شدن دینامیکی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش نرخ کرنش؛ زمان برای وقوع نرم شدن دینامیکی محدود شده و سرعت جوانه زنی کاهش می‌یابد. بنابراین، از وقوع فرآیندهای نرم شدن دینامیکی ممانعت می‌شود. افزایش سطح تنش سیلان (ناشی از افزایش نرخ کرنش) مبین افزایش دانسیته نابجائی‌ها در داخل فلز بوده که به موجب آن میزان انرژی کرنشی ذخیره شده در فلز افزایش می‌یابد و در نتیجه نیروی محرکه برای استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت زیاد می‌گردد [۸]. این نتایج بیانگر آن است که وقتی نمونه در شرایط نرخ کرنش بالا ($0.1/s$) در دمای نزدیک به A_{T3} تغییر شکل داده می‌شود، نرم شدن دینامیکی در آستنیت در حین تغییر شکل نمی‌تواند اتفاق افتد و لذا تمام انرژی تغییر شکل ذخیره شده در آستنیت، موجب وقوع استحاله استاتیکی تقویت شده ناشی از اعمال کرنش آستنیت به فریت، در پایان تغییر شکل می‌شود.

۲-۴- اثر نرخ کرنش بر مشخصه‌های ریزساختاری فریت حاصل از استحاله SIDT

از شکل (۳) دیده می‌شود با افزایش نرخ کرنش هم اندازه دانه‌های فریت کاهش یافته و هم از مقدار فریت کار سخت شده کاسته شده است. به بیان دیگر با کاهش نرخ کرنش، دانه‌های فریت تغییر شکل یافته زیادی در ریز ساختار پدیدار شده است. این نتایج نشان می‌دهد که استحاله آستنیت به فریت در نرخ کرنش‌های $0.001/s$ و $0.01/s$ تحت شرایط دینامیکی اتفاق افتاده و دانه‌های ریز فریت هم محور در حین اعمال تغییر شکل تولید شده‌اند.

به عبارت دیگر در ایجاد دانه‌های فریت هم محور و ریز در این ریزساختارها هیچکدام از فرآیندهای نرم شدن تبلور مجدد دینامیکی یا بازبایی دینامیکی آستنیت دخالت نداشته‌اند. از نظر مورفولوژی نیز، دانه‌های فریت کار سخت شده حتی اگر بازبایی

جدول ۲- تأثیر نرخ کرنش بر اندازه دانه‌های فریت EFG حاصل از استحاله دینامیکی SIDT در جریان تغییر شکل در دمای (Ar3+10 °C) تا کرنش 0.8

اندازه دانه‌های فریت EFG حاصل از استحاله SIDT (میکرون)	نرخ کرنش (s^{-1})
5.6	0.001
2.6	0.01
1.8	0.1

ایجاد این دانه‌های خیلی ریز فریت EFG را می‌توان به دو عامل نسبت داد: ۱- سرعت جوانه زنی بالای دانه‌های فریت و ۲- توزیع تصادفی جهات کریستالی دانه‌های فریت [۱۱]. با افزایش نرخ کرنش به $0.1/s$ ، بعلت نرخ کرنش بالا، استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت نتوانسته است درست در حین تغییر شکل اتفاق بیفتد. از روی منحنی سیلان مربوطه (شکل ۲)) نیز می‌توان دید که هیچ علامتی از وقوع نرم شدن دینامیکی در حین تغییر شکل مشهود نیست. از طرفی چون دیده می‌شود اندازه دانه‌های فریت ایجاد شده در این شرایط خیلی ریز است، لذا استنباط می‌شود که استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت درست بلافاصله بعد از پایان تغییر شکل اتفاق افتاده است. همانگونه که قبلاً نیز گفته شد به این نوع استحاله، استحاله استاتیکی تقویت شده ناشی از اعمال کرنش (Strain-enhanced transformation) گفته می‌شود. به بیان دیگر ایجاد شدن دانه‌های خیلی ریز فریت و همچنین عدم وجود دانه پنیک شده فریتی در ریزساختار نهایی مبین آن است که استحاله مذکور در مرحله پایانی تغییر شکل و یا بلافاصله در بعد از پایان تغییر شکل و در حین سرد کردن صورت گرفته است. اعمال نرخ کرنش بالاتر، موجب ممانعت از وقوع فرآیندهای دینامیکی نرم شدن از قبیل تبلور مجدد دینامیکی و یا بازبایی دینامیکی آستنیت و وقوع استحاله دینامیکی تحت کرنش آستنیت به فریت درست در حین تغییر شکل شده و در نتیجه نیروی محرکه افزایش یافته و استحاله دینامیکی درست بلافاصله در پایان تغییر شکل بوقوع پیوسته است. به بیان دیگر می‌توان تصور کرد که استحاله آستنیت تغییر شکل یافته به فریت در بلافاصله بعد از تغییر شکل صورت گرفته است. بنابراین، در تغییر شکل با نرخ کرنش بالاتر، نسبت سرعت جوانه زنی دانه‌های

فریت به سرعت رشد آنها افزایش می‌یابد و به تبع آن ساختار با دانه‌های ظریف فریت حاصل می‌شود. در نرخ کرنش پایین، فریت حاصل از استحاله دینامیکی فقط در مرزهای آستنیت بیشتر تشکیل می‌شوند، اما در نرخ کرنش بالا؛ علاوه بر مرزها، در داخل دانه‌های آستنیت در حال تغییر شکل نیز تشکیل می‌شوند. زیرا در نرخ کرنش بالا ($1/s$)، اختلاف بین تنش سیلان آستنیت و فریت حاصل از استحاله دینامیکی کمتر می‌شود. لذا تغییر شکل می‌تواند تا مرکز دانه‌های آستنیت اثر گذارد و موجب تشکیل تعداد قابل توجهی فریت حاصل از استحاله دینامیکی در داخل دانه‌های آستنیت شود. این نه تنها تعداد فریت استحاله دینامیکی را در واحد سطح در مراحل اولیه استحاله (در مرحله جوانه زنی) افزایش می‌دهد، بلکه موجب محدود شدن رشد دانه‌های فریت حاصل از استحاله دینامیکی از طریق تصادم آنها در مراحل اولیه استحاله نیز می‌گردد [۱۳]. می‌توان نتیجه گرفت که نرخ کرنش نقش مهمی در استحاله دینامیکی آستنیت به فریت ایفا می‌کند. اعمال تغییر شکل در دمای پایین و با نرخ کرنش بالا، باعث شده انرژی تغییر شکل بیشتری برای وقوع استحاله دینامیکی آستنیت به فریت در آستنیت ذخیره شود (در مقایسه با دیگر روش‌های متداول TMP) (Thermomechanical Processing) هرچه میزان انرژی کرنشی ذخیره شده در دمای تغییر شکل نزدیک به Ar_3 در آستنیت بیشتر باشد، نیروی محرکه وقوع استحاله دینامیکی آستنیت به فریت بیشتر شده و به تبع آن دانه‌های فریت خیلی ریز و با کسر حجمی زیاد در ساختار نهایی ایجاد می‌گردد. همانگونه که قبلاً اشاره شد استحاله دینامیکی آستنیت به فریت از نظر ماهیت یک استحاله دیفیوژنی است. بنابراین، هم افزایش خیلی زیاد و هم کاهش خیلی زیاد نرخ کرنش می‌تواند بر کسر حجمی دانه‌های فریت در مقیاس UFF (Ultrafine Ferrite) اثر منفی داشته باشد. چون با کاهش نرخ کرنش در واقع مدت زمان در اختیار برای انجام استحاله دینامیکی آستنیت به فریت زیاد می‌شود و زمان کافی برای وقوع استحاله دینامیکی آستنیت به فریت در حین تغییر شکل وجود خواهد داشت. در نتیجه کسر حجمی زیادی از فریت تولید می‌گردد. حال اگر نرخ کرنش خیلی پایین آورده شود، بخش زیادی از دانه‌های ریز فریت ایجاد شده فرصت کافی خواهند داشت تا رشد نمایند. لذا از این رو گفته می‌شود که نرخ کرنش خیلی پایین موجب عدم دست یابی به دانه‌های فریت UFF از طریق استحاله دینامیکی می‌شود.

موجب افزایش میزان انرژی تغییر شکل ذخیره شده در فلز می‌شود. این نیز به نوبه خود موجب افزایش در کل نیروی محرکه (ΔG^{act}) می‌گردد. در نتیجه کنتیک جوانه زنی و رشد فریت تشدید می‌گردد. بخوبی دیده شده است که افزایش کل انرژی آزاد سیستم و مهیا بودن محل‌های جوانه زنی (بوسیله ایجاد شدن زیرساختارهایی در داخل آستنیت تغییر داده شده) موجب تشدید استحاله فازی دیفوزیونی می‌گردد [۱۸، ۱۹]. در نتیجه استحاله دینامیکی تقویت شده [۲۰، ۲۱] و هم دانسیته جوانه زنی فریت و هم کسر حجمی دانه‌های فریت استحاله دینامیکی افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر، گرچه میزان تحت تبرید در مورد تغییر شکل با هر سه سرعت کرن یکسان بود؛ اما، مدت زمان طی شده از شروع تغییر شکل تا کوئنچ نمونه، در مورد نمونه تغییر شکل داده شده تا کرنش 0.8 و با نرخ کرنش 0.1/s، حدود 8sec و در مورد نمونه‌های تغییر شکل داده شده با نرخ کرنش‌های 0.01/s و 0.001/s بترتیب برابر با 80 و 800 sec بوده است. بنابراین، در نمونه تغییر شکل داده شده با پایین‌ترین نرخ کرنش (0.001/s)، دانه‌های فریت استحاله دینامیکی که در مراحل اولیه تغییر شکل جوانه زده‌اند؛ قادر بوده‌اند بطور قابل ملاحظه‌ای رشد نمایند؛ در حالیکه هنوز تغییر شکل ادامه داشته است. همانگونه که اشاره شد، این ناشی از وجود مدت زمان زیاد از آغاز کرنش تا پایان آن است. دانه‌های فریت استحاله دینامیکی که در مراحل اولیه تغییر شکل تشکیل شدند، در ادامه تغییر شکل (تا رسیدن به کرنش 0.8) تحت تغییر شکل قرار گرفته و به صورت فریت پنکیک در ریزساختار نهایی ظاهر گشته‌اند. در شرایط تغییر شکل با پایین‌ترین نرخ کرنش، بعلاطفولانی بودن مدت زمان تغییر شکل که به تبع آن دانه‌های فریت رشد کرده نیز به مقدار زیاد تشکیل شده؛ موجب شده مقدار دانه‌های فریت تغییر شکل یافته (فریت پنکیک) در ریز ساختار نهایی بیشتر گردد.

در تغییر شکل با نرخ کرنش بالا، از یک طرف دانسیته جوانه زنی فریت افزایش می‌یابد و از طرف دیگر؛ فرصت برای درشت شدن جوانه‌های ایجاد شده کم است. بنابراین، بعد از تصادم دانه‌ها؛ مقدار فریت درشت شده کم می‌باشد. در نتیجه مقدار فریت کشیده در ریزساختار نهایی، با افزایش نرخ کرنش کم می‌شود. در جدول (۳)، تأثیر نرخ کرنش بر درصد دانه‌های فریت EFG و فریت کارسخت شده حاصل از تغییر شکل در دمای $(A_{13}+10)$ (°C) تا کرنش 0.8 نشان داده شده است. Priestner و همکارانش

از طرف دیگر، اگر نرخ کرنش خیلی بالا باشد؛ آنگاه کسر حجمی دانه‌های فریت حاصل از استحاله دینامیکی پایین خواهد بود، در عین حالیکه آن مقدار فریت استحاله دینامیکی تولید شده دارای اندازه ریزتر بوده و تماماً در محدوده UFF می‌باشد. اگر نرخ کرنش خیلی افزایش داده شود، حتی ممکن است با تولید گرمای تغییر شکل، مانع پیشرفت استحاله دینامیکی آستنیت به فریت شده و موجب برگشت دینامیکی استحاله از فریت به آستنیت نیز بشود. بنابراین در تغییر شکل در منطقه دمایی وقوع استحاله دینامیکی برای دستیابی به ریز ساختار UFF با کسر حجمی بالا، باید نرخ کرنش در یک محدوده بهینه اختیار گردد. البته گزارش شده است که با کاهش دمای تغییر شکل، با نرخ کرنش بالاتر نیز می‌توان از طریق استحاله دینامیکی فریت UFF گرفت. به عبارت دیگر، وقتی دمای تغییر شکل پایین اختیار شود، آنگاه استحاله دینامیکی می‌تواند در نرخ کرنش بالاتر نیز اتفاق افتد [۱۴].

۴- اثر نرخ کرنش بر کسر حجمی فریت کار سخت شده در ریزساختار نهایی

همانگونه که قبلاً توضیح داده شد، افزایش نرخ کرنش از 0.001 به 0.01 و 0.1/s، سه اثر بر ریزساختار نهایی گذاشت: ۱- اندازه دانه‌های فریت حاصل از استحاله دینامیکی ریزتر شد، ۲- کسر حجمی دانه‌های ریز فریت استحاله دینامیکی افزایش یافت و ۳- از کسر حجمی فریت کار سخت شده کاسته شد. این نتایج را می‌توان به صورت زیر توضیح داد. قانون اول ترمودینامیک بیان می‌کند که کار مکانیکی موجب افزایش انرژی داخلی و همچنین افزایش کل انرژی آزاد سیستم می‌شود. از این دید، در مورد استحاله از آستنیت تغییر شکل یافته به فریت؛ کل نیروی محرکه (ΔG^{act}) بصورت مجموعی از نیروی محرکه شیمیایی (ΔG_{chem}) و نیروی محرکه ناشی از انرژی کرنشی (ΔG_{def}) بصورت زیر بیان می‌شود [۱۵، ۱۷]:

$$\Delta G^{act} = \Delta G_{chem} + \Delta G_{def} \quad (1)$$

از نقطه نظر متالورژی فیزیکی، انرژی ذخیره شده ناشی از تغییر شکل؛ تابعی از تغییرات دانسیته نابجائی‌های ریزساختار ($\Delta\rho$) است، که این نیز مستقیماً با پارامتر زرن-هولمن (Z) رابطه دارد [۱۴]. این حقیقت بیانگر آن است که افزایش در نرخ کرنش،

می‌شود، موجب می‌گردد مقدار دانه‌های فریت تغییر شکل یافته (فریت پنکیک) در ریز ساختار نهایی بیشتر شود. در سرعت کرنش خیلی بالا (0.1 s^{-1})، اندازه دانه‌های فریت EFG حاصل از استحاله دینامیکی کوچکتر (در مقیاس UFF) و کسر حجمی آنها بیشتر می‌شود. همچنین از کسر حجمی فریت کار سخت شده کاسته می‌شود.

منابع

- [1] Giunelli, A. K.; Militzer, M.; "Analysis of the Austenite Grain Size Distribution in Plain Carbon Steels"; ISIJ Int.; vol. 39; No. 3; 1999; pp. 271-280.
- [2] Bengochea, R.; Lopez, B.; Gutierrez I.; "Microstructural Evolution during the Austenite-to-Ferrite Transformation from Deformed Austenite"; Metall. Mater. Trans. A; 29A; 1998; pp. 417-426.
- [3] Song, R.; Ponge, D.; Raabe, D.; Kaspar, R.; "Microstructure and crystallographic texture of an ultrafine grained C-Mn steel and their evolution during warm deformation and annealing"; Acta Materialia; vol. 53; Issue 3; 2005; pp. 845-858.
- [4] Honeycombe, R. W. K.; Bhadeshia, H. K. D. H.; "Steels: Microstructures and Properties"; 2nd Edition; London; Arnold; 1995.
- [5] Teoh, L. L.; "Thermo-mechanical processing and microstructure of microalloyed steel bar and wire rod products"; Mater. Process. Technol.; vol. 48; 1995.
- [6] Kelly, G.L.; Beladi, H.; Hodgson, P.D.; "Ultrafine Grained Ferrite Formed by Interrupted Hot Torsion Deformation of Plain Carbon Steel"; ISIJ Int 2002; 42; p. 1585.
- [7] Hodgson, P.D.; Hickson, M.R.; Gibbs, P.K.; "Ultrafine ferrite in low carbon steel"; Scripta Mater; 1999; 40; p. 1179.
- [8] Majta, J.; Zurek, A. K.; "An integrated computer model with applications for austenite-to-ferrite transformation during hot deformation of Nb-Microalloyed steels"; Int. J. of Plasticity; vol. 19; 2003; pp. 707-712.
- [9] Eghbali, B.; Abdollah-zadeh, A.; "Influence of deformation temperature on the ferrite grain refinement in a low carbon Nb-Ti

[۲۲]، اظهار داشتند که بعلت درشت شدن دانه‌های فریت در حین استحاله است که نمی‌توان با آنکه سرعت جوانه زنی فریت در حین تغییر شکل بالاست، دانه‌های خیلی ریز در ساختار نهایی گرفت. پیشنهاد شده است ریزترین دانه‌های فریت را می‌توان با محدود کردن رشد دانه‌های فریت حاصل از استحاله دینامیکی از طریق اعمال سریع سرد شدن در حین استحاله بدست آورد [۲۲].

جدول ۳- تأثیر نرخ کرنش بر درصد دانه‌های فریت EFG و فریت کارسخت شده (WH) حاصل از تغییر شکل در دمای $(A_{F3}+10 \text{ °C})$ تا کرنش 0.8

نوع فریت	$\dot{\epsilon}$ (s^{-1})		
	0.001	0.01	0.1
EFG	85	89	96
WH	15	11	4

۵- نتیجه‌گیری

۱- در جریان تغییر شکل گرم در دمای بالای A_{F3} ($A_{F3} + 10 \text{ °C}$)، نوعی نرم شدن دینامیکی در منحنی‌های سیلان آستنیت مشاهده شد. بروز این پدیده ناشی از وقوع استحاله دینامیکی آستنیت به فریت می‌باشد. بطوریکه تشکیل فاز نرم فریت از فاز سخت آستنیت موجب افت در سطح تنش سیلان آستنیت شد.

۲- با افزایش سرعت کرنش از 0.001 s^{-1} به 0.01 s^{-1} ، اندازه دانه‌های فریت EFG کوچکتر شد و از مقدار فریت کار سخت شده نیز کاسته می‌شود. در تغییر شکل با سرعت کرنش بالا (0.1 s^{-1})، هیچ نوع فرآیند نرم شدن دینامیکی از قبیل بازیابی دینامیکی، تبلور مجدد دینامیکی آستنیت و یا استحاله دینامیکی در حین تغییر شکل اتفاق نیافتاد. لذا تمام انرژی تغییر شکل در آستنیت ذخیره شده و موجب افزایش نیروی محرکه استحاله گردید و در نتیجه استحاله استاتیکی درست بلافاصله در پایان تغییر شکل بوقوع پیوسته و موجب بیشتر ریز شدن دانه‌های فریت می‌گردد.

۳- افزایش خیلی زیاد و یا کاهش خیلی زیاد سرعت کرنش بر کسر حجمی دانه‌های فریت EFG ایجاد شده در مقیاس UFF، اثر منفی دارد. بطوریکه در شرایط تغییر شکل با سرعت کرنش خیلی پایین (0.001 s^{-1})، بعلت طولانی بودن مدت زمان تغییر شکل که به تبع آن دانه‌های فریت رشد کرده نیز زیاد تشکیل

- Austenite on the Kinetics of Subsequent Ferrite Formation”; ISIJ Int.; vol. 41; 2001; pp. 1028-1035.
- [17] Adatchi, Y.; Tomida, T.; Hinotani, S.; “Dislocation Substructures in Hot-deformed Ni-based Alloys: Simulation for Structure Evolution of Hot-worked Austenite in Low Carbon Steels”; ISIJ Int.; Suppl., vol. 40; 2000; pp. 194-199.
- [18] Manohar, P. A.; Chandran, T.; Killmore, C. R.; “Continuous Cooling Transformation Behaviour of Microalloyed Steels Containing Ti, Nb, Mn and Mo”; ISIJ Int.; vol. 36; 1996; pp. 1486-1491.
- [19] Du, L.; Zhang, C.; Ding, H.; Liu, X.; Wang, G.; “Determination of upper limit temperature of strain-induced transformation of low carbon steels”; ISIJ Int. 42; 2002; pp. 119–1124.
- [20] Hurley, P. J.; Hodgson, P. D.; “Formation of ultra-fine ferrite in hot rolled strip: potential mechanisms for grain refinement”; Mater. Sci. Eng. A; A302; 2001; pp. 206-211.
- [21] Hurley, P. J.; Muddle, B. C.; Hodgson, P.D.; “Nucleation sites for ultrafine ferrite produced by deformation of austenite during single-pass strip rolling”; Metall. Mater. Trans. A; 32A; 2001; pp. 1507-1512.
- [22] Priestner, R.; Al-Horr, Y. M.; Ibraheem, A. K.; “Effect of strain on formation of ultrafine ferrite in surface of hot rolled microalloyed steel”; Mater. Sci. Technol.; vol. 18; 2002; pp. 973-979.
- microalloyed steel”; J. Materials Processing Technology; vol. 180; 2006; pp. 44-48.
- [10] Yang, Z; Wang, R.; “Formation of Ultra-fine Grain Structure of Plain Low Carbon Steel through Deformation Induced Ferrite Transformation”; ISIJ Int.; vol. 43; 2003; pp. 761-767.
- [11] J. -K. Chio, D. -H. Seo, J. -S. Lee, K. -K. Um and W.-Y. Choo; "Formation of Ultrafine Ferrite by Strain-induced Dynamic Transformation in Plain Low Carbon Steel", ISIJ Int., vol. 43, 2003, pp. 746-751.
- [12] B. Eghbali, A. Abdollah-zadeh, H. Beladi and P. D. Hodgson, Characterization on ferrite microstructure evolution during large strain warm torsion testing of plain low carbon steel" Materials Science and Engineering A, Vol. 435–436, 2006, pp. 499-503.
- [13] Kop, T. A.; Leeuwen, Y. V.; et al.; “Modelling the Austenite to Ferrite Phase Transformation in Low Carbon Steels in Terms of the Interface Mobility”; ISIJ Int.; vol. 40; 2000; pp. 13-19.
- [14] Linxiu, D. U.; Knu, Y. U.; et al.; “2nd Int. Conf. on Advanced Structural Steels”; edi. Y. Weng; China; 2004.
- [15] Yada, H.; Li, C. M.; Yamagata, H.; “Dynamic $\gamma \rightarrow \alpha$ Transformation during Hot Deformation in Iron–Nickel–Carbon Alloys”; ISIJ Int.; vol. 40; 2000; pp. 200-206.
- [16] Hanlon, D. N.; Sietsma, J.; van der Zwaag, S.; “The Effect of Plastic Deformation of