

اثر آلومینیوم بر فرآیند بازیابی دینامیکی فولادهای حاوی مس و منگنز

دکتر حسن فرهنگ

استادیار گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

دکتر عباس نجفی زاده

دانشیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندس سیامک اخلاقی

کارشناسی ارشد، فارغ التحصیل رشته شناسایی و انتخاب مواد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

چکیده

اثر آلومینیوم از ۰/۱۴ تا ۰/۳۱ درصد وزنی بر رفتار گرم فولادهای کم کربن حاوی ۱٪Cu-۱/۲٪Mn با استفاده از آزمایشهای فشار گرم در محدوده حرارتی ۷۵۰-۸۰۰°C، در فاز فریت و محدوده نرخ کرنش 10^{-3} - $1s^{-1}$ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، فرآیند نرم شدن حاکم در حین تغییر شکل گرم برای این آلیاژها فرآیند بازیابی دینامیکی است. در این شرایط نشان داده شد که افزایش درجه حرارت و یا کاهش نرخ کرنش باعث کاهش کرنش شروع حالت پایدار و تنش سیلان حالت پایدار می‌گردد. بعلاوه افزایش درصد آلومینیوم بازیابی دینامیکی را به تأخیر انداخته و کرنش شروع حالت پایدار و تنش سیلان حالت پایدار را افزایش می‌دهد. این اثر آلومینیوم در کنار عناصر آلیاژی Cu و Mn با گزارشهای قبلی در مورد اثر انفرادی آلومینیوم در به جلو انداختن فرآیند بازیابی دینامیکی متفاوت است. مطالعه و مقایسه ساختار میکروسکوپی اولیه و ساختار میکروسکوپی نهایی به کمک میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) نشان می‌دهد که کشیده شدن دانه‌های اولیه، تشکیل دانه‌های فرعی تقریباً هم محور، و راسب شدن دینامیکی ذرات فاز دوم غنی از Cu بر روی مرزهای اصلی و فرعی، از تحولات اصلی ساختار میکروسکوپی در حین تغییر شکل گرم می‌باشند.

۱- مقدمه

قرار می‌گیرد.

ساختار میکروسکوپی و خواص نهایی فولادهای کارگرم

تقابل مکانیزمهای سخت شدن، که موجب بالا رفتن پیوسته منحنیهای سیلان می‌گردند با مکانیزمهای نرم شدن که عموماً بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی می‌باشند، سبب می‌گردد که شکل منحنی سیلان فلزات در حین تغییر شکل

شده با فرآیندهای متالورژیکی که در حین تغییر شکل گرم فعال می‌شوند، مانند فرآیندهای نرم شدن شامل بازیابی و تبلور مجدد دینامیکی و فرآیندهای سخت شدن شامل کار سختی و راسب شدن دینامیکی ذرات فاز دوم، تحت تأثیر

کرنش $1s^{-1}$ - 10^{-3} مورد بررسی قرار گرفته است. جهت شناسایی و تجزیه و تحلیل تغییرات ریز ساختاری ناشی از کارگرم، مشاهدات میکروسکوپ نوری و الکترونی پویشی به همراه میکروآنالیزهای نقطه‌ای انجام پذیرفته است.

۲- روش آزمایش

سه نوع فولاد که به ترتیب حاوی ۰/۱۴، ۰/۲۳، ۰/۳۱ درصد آلومینیم می‌باشند از طریق ذوب در کوره القایی تحت گاز خنثی، که مانع از جذب نیتروژن توسط مذاب می‌شد، تهیه گردیده و در قالبهای ماسه‌ای به ابعاد $30 \times 100 \times 250$ mm ریخته شدند. ترکیب شیمیایی فولادهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول شماره (۱) نشان داده شده است.

به منظور تغییر ساختار میکروسکوپی ریختگی، عملیات همگن‌سازی به مدت ۲ ساعت در دمای $1100^{\circ}C$ ، عملیات آهنگری به میزان ۲۵ درصد کاهش ضخامت در محدوده دمایی $1000^{\circ}C$ - $900^{\circ}C$ و عملیات آیل کردن به مدت ۳۰ دقیقه در دمای $1000^{\circ}C$ بر روی فولادهای ریخته شده انجام گرفت. توسط آزمایشهای فشار گرم، اثر آلومینیم بر فرآیند بازیابی دینامیکی در آلیاژهای تهیه شده مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۸ و طول ۱۲ mm از مرکز تختالها تهیه گردید [۸] و با استفاده از یک دستگاه کشش یونیورسال (MTS)، در محدوده درجه حرارت $800^{\circ}C$ - $750^{\circ}C$ و محدوده نرخ کرنش $1s^{-1}$ - 10^{-3} تحت آزمایشهای فشار گرم تا کرنش ۰/۷ قرار گرفتند. نرخ کرنش بر اساس طول متوسط محاسبه شده و در هر درجه حرارت و نرخ کرنش انتخاب شده یک نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. برای انجام آزمایشهای فشار گرم، ابتدا کوره المانی دستگاه کشش یونیورسال که مجهز به سه ترموکوپل در موقعیتهای

گرم به یکی از دو حالت شکل (۱) باشد [۴-۱]. در حین بازیابی دینامیکی نرخ کار سختی دائماً با افزایش کرنش کاهش یافته و در یک کرنش بحرانی به صفر می‌رسد بطوریکه بعد از آن منحنی سیلان دارای حالت پایدار و افقی می‌شود. ولی تبلور مجدد دینامیکی در حداکثر کرنش معادل ϵ_p ، آغاز شده و با افزایش کرنش پیش می‌رود و سپس در منطقه حالت پایدار کامل می‌شود [۲ و ۴ و ۵]. عموماً فرآیندهای نرم شدن دینامیکی از رابطه زینر- هولمن و به شکل زیر تبعیت می‌کنند.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$$

که Z، پارامتر زینر- هولمن؛ $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش؛ T درجه حرارت؛ Q انرژی اکتیواسیون تغییر شکل و R ثابت گازها است.

معمولاً فرآیند نرم شدن حاکم در محدوده فاز فریت بازیابی است ولی در بعضی موارد در فولادهای عاری از اتمهای بین‌نشینی (IF) و آهن خالص b.c.c، تبلور مجدد دینامیکی بعنوان مکانیزم حاکم شناسایی شده است [۶ و ۷]. اخیراً اثر عنصر آلیاژی آلومینیم در غیاب عناصر آلیاژی بر مکانیزمهای نرم شدن در فولادهای ساده کربنی مورد توجه قرار گرفته است. مشرقی و نجفی‌زاده [۸] نشان داده‌اند که اضافه نمودن آلومینیم در فولادهای کم کربن تا میزان ۵ درصد باعث گسترش محدوده فازی فریت شده و افزایش درصد آلومینیم فرآیند بازیابی را در فاز فریت به جلو می‌اندازد.

در پژوهش حاضر اثر آلومینیم در کنار عناصر آلیاژی Cu و Mn بر رفتار گرم فولادهای کم کربن که در مجموع از نظر ترکیب شیمیائی مشابه فولادهای مقاوم در هوا می‌باشند، در درجه حرارتهای $750^{\circ}C$ و $800^{\circ}C$ در فاز فریت، و در نرخهای

مختلف بوده دمای مورد نظر رسانده شده و سپس نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه قبل از شروع آزمایش در داخل کوره پیشگرم می‌شدند [۹]. برای کاهش اصطکاک بین فک دستگاه و سطح نمونه، از روانکار پودر شیشه استفاده شد. استفاده از این روانکار مانع از بشکتهایی شدن نمونه‌های تست فشار گرم می‌گردید. کلیه نمونه‌های آزمایش فشار گرم به منظور حفظ ساختار نهایی پس از اتمام آزمایش در آب کوئنچ شدند. با توجه به محدودیت دستگاه MTS فاصله بین اتمام آزمایش فشار گرم و کوئنچ حداکثر ۲ ثانیه بود. پس از انجام مراحل مختلف متالوگرافی و حکاکی به وسیله محلول نیتال ۲٪، ریز ساختار مقاطع طولی نمونه‌های آزمایش فشار گرم به کمک میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی پویشی مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین اندازه متوسط دانه‌ها نیز از روش تقاطع خط (ASTM E110) استفاده شد [۱۰].

درجه حرارت‌های بحرانی فولادهای مختلف مورد استفاده در این پژوهش به کمک آزمایش‌های دیلاتومتری تعیین گردید. نمونه‌های استوانه‌ای شکل مورد استفاده در این آزمایش‌ها از مرکز قطعات ریخته شده و به قطر ۲ و طول ۱۲mm تهیه گردیدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر درجه حرارت و نرخ کرنش بر فرآیند بازیابی دینامیکی

رفتار سیلان فولاد Al ۲۳٪ در دو درجه حرارت ۷۵۰ و ۸۰۰°C و در نرخ کرنش ثابت $10^{-2} s^{-1}$ در شکل (۲) نشان داده شده است. جدول (۲) نشان می‌دهد که این درجه حرارت‌ها مربوط به محدوده فازی فریت می‌باشد. نمودارها نشانگر حاکم بودن فرآیند بازیابی دینامیکی در درجه حرارت‌های آزمایش در فاز فریت می‌باشند. با افزایش درجه حرارت، شیب اولیه منحنی سیلان، کرنش آغاز حالت پایدار (E_p) و

تنش سیلان حالت پایدار (σ_p) کاهش یافته و فرآیند بازیابی دینامیکی به جلو می‌افتد. افزایش تحرک نابجائیه‌ها، تسهیل در فرآیند لغزش متقاطع و بالا رفتن سرعت حذف نابجائیه‌ها با افزایش درجه حرارت عوامل اصلی تغییرات منحنی سیلان و تسریع در فرآیند بازیابی دینامیکی می‌باشند [۴-۱]. بعلاوه در این شکل مشاهده می‌شود که افزایش ۵۰°C موجب کاهش تنش سیلان به میزان بیش از ۵۰ درصد می‌گردد. این امر ناشی از ماهیت موانع مختلف در مسیر لغزش نابجائیه‌ها در ساختمان کریستالی b.c.c. در فاز فریت می‌باشد [۱].

اثر نرخ کرنش در محدوده $10^{-3} - 10^{-1} s^{-1}$ بر روی رفتار سیلان نمونه Al ۲۳٪ در درجه حرارت ثابت ۸۰۰°C در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطوریکه در این شکل دیده می‌شود با افزایش نرخ کرنش، تنش سیلان افزایش می‌یابد و همچنین شیب اولیه منحنی سیلان، کرنش آغاز و تنش سیلان حالت پایدار افزایش یافته و در نتیجه فرآیند بازیابی دینامیکی به تعویق می‌افتد.

ارتباط بین کرنش بحرانی شروع حالت پایدار (E_p) و تنش سیلان حالت پایدار (σ_p)، برای آلیاژ Al ۲۳٪ و در شرایط نرخ کرنش و درجه حرارت متفاوت در شکل (۴) نمایش داده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود با تقریب قابل قبول می‌توان یک رابطه خطی میان σ_p و E_p را برقرار دانست بطوریکه با افزایش E_p، σ_p نیز افزایش پیدا می‌کند. بطور کلی میتوان گفت که با افزایش نرخ کرنش و یا کاهش درجه حرارت، دانسیته تعادلی نابجائی‌ها و E_p در شروع حالت پایدار افزایش یافته و در نتیجه موجب افزایش σ_p می‌شود.

۳-۲- اثر آلومینیوم بر فرآیند بازیابی دینامیکی

اثر آلومینیوم بر رفتار تغییر شکل گرم فولادهای مورد بررسی در محدوده ۱۴٪ تا ۳۱٪ درصد وزنی آلومینیوم در

در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر در شکل (۶) نشان داده شده است. اندازه دانه فولادها بر حسب ترکیب شیمیائی نیز در جدول (۴) ارائه گردیده است. مشاهدات میکروسکوپی نشان می‌دهند که دانه‌های فریت هم محور، و برخی ذرات فاز دوم و آخالهای پراکنده، مشخصه‌های اصلی ساختار میکروسکوپی اولیه را تشکیل می‌دهند. بعلاوه در اندازه متوسط دانه‌ها تغییر چندانی دیده نمی‌شود.

ساختار میکروسکوپی نهایی فولادهای حاوی ۰/۱۴ الی ۰/۳۱ درصد وزنی آلومینیوم پس از تغییر شکل گرم در درجه حرارت ۸۰۰°C و نرخ کرنش $10^{-3} s^{-1}$ در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر در شکل (۷) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکلها مشاهده می‌شود، دانه‌ها کشیده شده و دانه‌های فرعی تقریباً هم محور در داخل دانه‌ها تشکیل گردیده‌اند. همچنین رسوبات فاز دوم بصورت نیمه پیوسته در مرز دانه‌های اصلی و فرعی راسب شده‌اند. ماهیت رسوبات فوق به کمک میکروسکوپ الکترونی و میکروپروب، آزمایشهای انحلال و نمودارهای فازی [۱۵] مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، رسوبات فوق از جنس ترکیبات بین فلزی غنی از Cu می‌باشند که در درجه حرارت‌های حدود ۹۰۰°C در زمینه حل می‌شوند.

از مقایسه تصاویر ساختار میکروسکوپی اولیه و نهایی مشاهده می‌شود که کشیده شدن دانه‌های اولیه، تشکیل دانه‌های فرعی هم محور، راسب شدن دینامیکی ذرات فاز دوم بر روی مرزهای دانه اصلی و فرعی از تحولات اصلی ساختار میکروسکوپی در حین تغییر شکل گرم می‌باشند. رسوبات فاز دوم که بر روی مرزهای دانه‌های فرعی و اصلی تشکیل می‌گردد از حرکت و یا چرخش آنها ممانعت نموده و سبب پایداری ریز ساختار تشکیل شده می‌گردد. از نتایج

درجه حرارت ۷۵۰°C و نرخ کرنش $10^{-3} s^{-1}$ در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطوریکه در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش درصد آلومینیوم، شیب اولیه منحنی سیلان، کرنش آغاز و تنش سیلان حالت پایدار افزایش یافته و فرآیند بازیابی دینامیکی به تأخیر می‌افتد. نشان داده شده که می‌توان تنش سیلان حالت پایدار و پارامترهای درجه حرارت و نرخ کرنش را توسط رابطه زیر - هولمن به یکدیگر مرتبط نمود [۲ و ۴].

$$Z = A \sigma_s^n = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$$

بطوریکه A و n مقادیر ثابت می‌باشند. مقادیر Q و n فولادهای مختلف که به کمک آزمایشهای فشار گرم در منطقه فازی فریت تعیین شده‌اند، در جدول (۳) نشان داده شده است. بررسی مقادیر بدست آمده نشان می‌دهد که با ازدیاد درصد وزنی آلومینیوم، انرژی اکتیواسیون لازم برای فعال شدن بازیابی دینامیکی افزایش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که آلومینیوم بعنوان یک عنصر بازدارنده فرآیند بازیابی دینامیکی عمل می‌کند. نشان داده شده که اثر بازدارنده عناصر آلیاژی بر فرآیند بازیابی دینامیکی ناشی از عواملی نظیر: ازدیاد اصطکاک شبکه، نیروی بازدارنده انحلالی و راسب شدن دینامیکی ذرات فاز دوم بر روی مرز دانه‌های اصلی و فرعی در حین تغییر شکل می‌باشد [۱۴-۱۱]. عوامل مذکور در حرکت نابجائیهها مانع ایجاد کرده و از تشکیل مرزهای فرعی و ساختار سلولی ممانعت می‌نمایند. از بین سه عامل فوق راسب شدن دینامیکی ذرات فاز دوم تأثیر بیشتری بر تأخیر بازیابی دینامیکی دارد.

۳-۳- بررسی ساختار میکروسکوپی قبل و پس از تغییر شکل گرم

ساختار میکروسکوپی اولیه فولاد حاوی ۰/۲۳ درصد وزنی آلومینیوم در حالت آنیل شده و پیش از تغییر شکل گرم

تشکیل می‌شود و ذرات فاز دوم غنی از Cu بصورت نیمه پیوسته بر روی مرز دانه‌های اصلی و فرعی راسب می‌گردد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله دو تن از نویسندگان (ح. ف. و. س. ا.) قدردانی خود را از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران ابراز نموده و کلیه نویسندگان از دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان و گروه مهندسی متالورژی و مواد دانشکده فنی دانشگاه تهران که امکانات آزمایشگاهی لازم برای اجرای این پژوهش را فراهم نمودند سپاسگزاری می‌نمایند.

فهرست منابع

- 1- P. Polukhin, S. Gorelik and V. Vorontsov, "Physical Principles of Plastic Deformation", Mir Publishers, Moscow, 1983, p. 170-295.
- 2- I. Tamura, H. Sekine, T. Tanaka and C. Ouchi, "Thermomechanical Processing of High-Strength Low - Alloy Steels", Butterworths, 1988, p. 1-40.
- 3- W. Roberts, "Deformation, Processing and Structure", 1982 ASM Materials Science Seminar, G. Krauss ed., ASM Metals Park, 1984, p.109-185.
- 4- H. J. McQueen and J. J. Jonas: "Treatise on Materials Science and Technology", Plastic Deformation Materials, R. J. Arsenault ed., Vol. 6, Academic Press, New York, 1975, P. 393-493.
- 5- A. Laasraoui and J. J. Jonas, Met. Trans. A, Vol.
- 6- G. Glover and C. M. Sellars, "Recovery and Recrystallization During High Temperature

میکروپروب نیز به نظر می‌رسد که اثر بازدارنده آلومینیوم بر فرآیند بازیابی دینامیکی ناشی از افزایش اصطکاک شبکه و نیروی بازدارنده انحلالی می‌باشد.

بنابراین افزایش درصد آلومینیوم در محدوده ۰/۱۴ تا ۰/۳۱ درصد وزنی و در کنار عناصر آلیاژی Cu و Mn موجب می‌شود که تنش سیلان و کرنش آغاز حالت پایدار افزایش پیدا کرده و منحنی سیلان به مقادیر بالاتر سوق پیدا کند. عبارت دیگر فرآیند بازیابی دینامیکی به تعویق افتد. بررسی اثر آلومینیوم در غیاب عناصر آلیاژی Cu و Mn بر روی فرآیند بازیابی دینامیکی در فاز فریت توسط مشرقی و نجفی‌زاده [۸] نشان می‌دهد که افزایش درصد آلومینیوم تا مقدار ۵ درصد وزنی در فولادهای کم کربن باعث می‌شود که تنش سیلان حالت پایدار افزایش پیدا کرده لیکن کرنش شروع حالت پایدار کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که با ازدیاد درصد آلومینیوم، فرآیند بازیابی دینامیکی در فاز فریت به جلو می‌افتد.

نتیجه‌گیری

- ۱- در فولادهای بررسی شده، فرآیند نرم شدن حاکم در حین تغییر شکل گرم بازیابی دینامیکی است.
- ۲- در این فولادها، افزایش نرخ کرنش و یا کاهش درجه حرارت موجب افزایش تنش سیلان و کرنش آغاز حالت پایدار می‌گردد.
- ۳- با افزایش درصد وزنی آلومینیوم در این فولادها، تنش سیلان و کرنش آغاز حالت پایدار در درجه حرارت و نرخ کرنش ثابت، افزایش یافته و بازیابی دینامیکی به تأخیر می‌افتد.
- ۴- در حین تغییر شکل گرم، دانه‌های اولیه کشیده شده، دانه‌های فرعی تقریباً هم محور در داخل دانه‌های کشیده شده

- Deformation of α -Iron" , Met. Trans. A, Vol. 4, Mar. 1973, p.765-775.
- 7- A. Najafi- Zadeh, J. J. Jonas and S. Yue, "Grain Refinement by Dynamic Recrystallization during the Simulated Warm Rolling of Interstitial Free Steels" , Met. Trans. A, Vol. 23 A, Sep. 1992, p. 2607-2617.
- ۸- ع. مشرفی، ع. نجفی‌زاده، مجموعه مقالات دومین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، ۱۲ الی ۱۵ اردیبهشت ۱۳۷۳، صفحه ۲۸۵-۲۷۵.
- 9- C. Ouchi and T. Okita, Trans. ISIJ, Vol. 23, 1983 , p. 128 - 136.
- 10- "Standard Methods for Estimating the Average Grain Size of Metals" E110, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 01. 03, ASTM, Philadelphia, 1984, p. 120.
- 11- K. Titto, G. Filzsimens and A.J. De Ardo; Acta Metall. Vol. 3, No. 8, 1983, p. 1159-1168.
- 12- M. J. Luton , R. Dorvel and R. A. Petkovic, Met. Trans. A, Vol. 11A, Mar. 1980, p. 411-420.
- 13- O. Kwon and A. J. De Ardo, Acta Metall. Mater. Vol. 39, No. 4, 1991, p. 529-536.
- 14- I. Weiss and J. J. Jonas, Met Trans. A, Vol. 10A, July 1979, p. 831-840.
- 15- Metals Handbook, 10th Ed, Vol. 3, ASM.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی ذوبهای مختلف.

Al%	Cu%	Mn%	P%	S%	Si%	C%	ترکیب شیمیایی نمونه
۰/۱۳۹	۰/۹۷۲	۱/۱۴۰	۰/۰۱۲	۰/۰۲۲	۰/۰۲۱	۰/۰۶۹	۰/۱۴%Al
۰/۲۲۶	۱/۰۰۰	۱/۱۳۰	۰/۰۰۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۴	۰/۰۵۴	۰/۲۳%Al
۰/۳۱۴	۰/۹۱۰	۱/۲۱۰	۰/۰۰۹	۰/۰۱۸	۰/۰۳۵	۰/۰۴۸	۰/۳۱%Al

جدول ۲: درجه حرارت‌های بحرانی ترکیب شیمیایی مورد بررسی

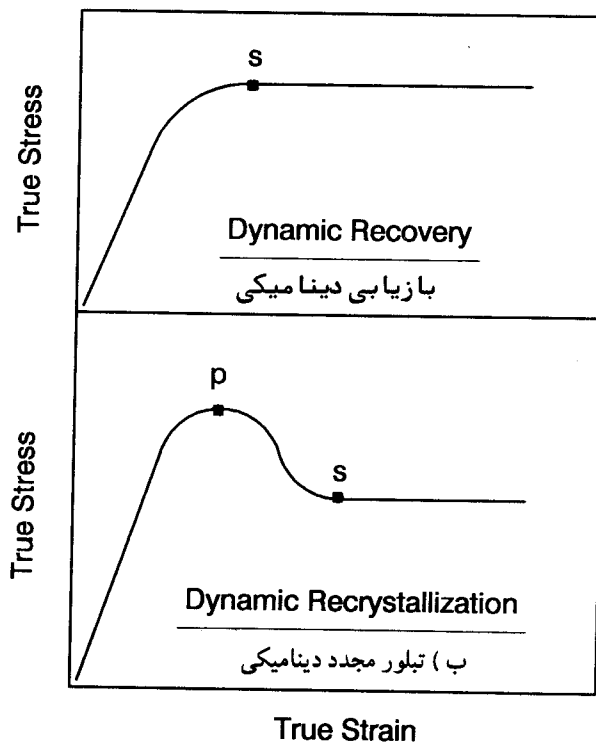
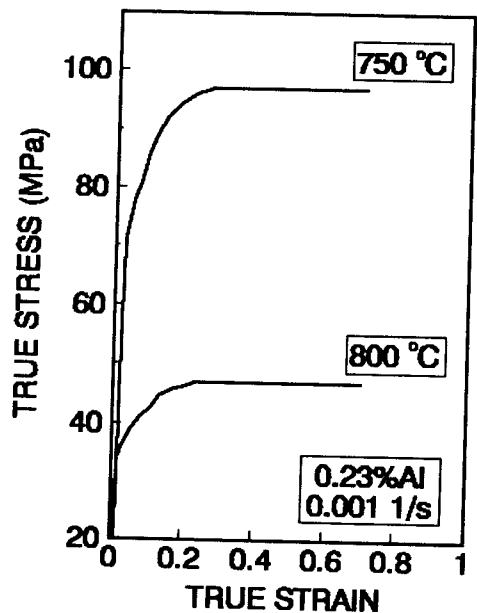
$Ar_3(^{\circ}C)$	$Ar_1(^{\circ}C)$	ترکیب شیمیایی نمونه
۸۸۸	۸۴۸	۰/۱۴%Al
۹۰۳	۸۴۶	۰/۲۳%Al
۹۰۶	۸۶۱	۰/۳۱%Al

جدول ۳: تغییرات انرژی اکتیواسیون Q و ثابت n با ترکیب شیمیایی.

n	Q(KCal/mol)	ترکیب شیمیایی نمونه
۵/۰۸	۷۱/۸	۰/۱۴%Al
۴/۹۵	۷۲/۱	۰/۲۳%Al
۴/۸۵	۷۴/۴	۰/۳۱%Al

جدول ۴: تغییرات اندازه دانه در ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها در پیش از تغییر فرم.

اندازه دانه (μm)	ترکیب شیمیایی نمونه
۲۱	۰/۱۴%Al
۲۳	۰/۲۳%Al
۱۹	۰/۳۱%Al

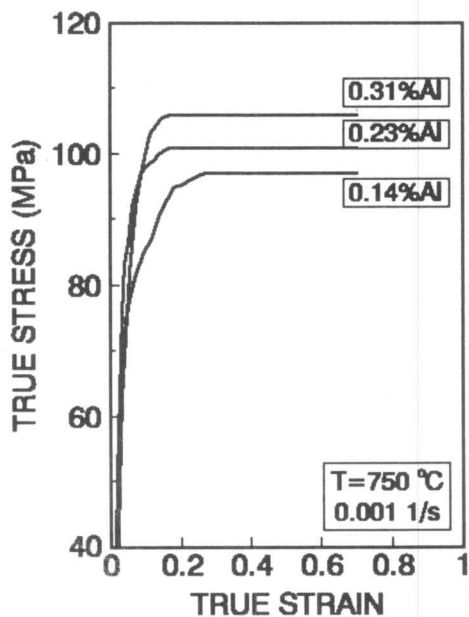


شکل ۲: اثر درجه حرارت در محدوده فازهای فریت و در نرخ کرنش ثابت

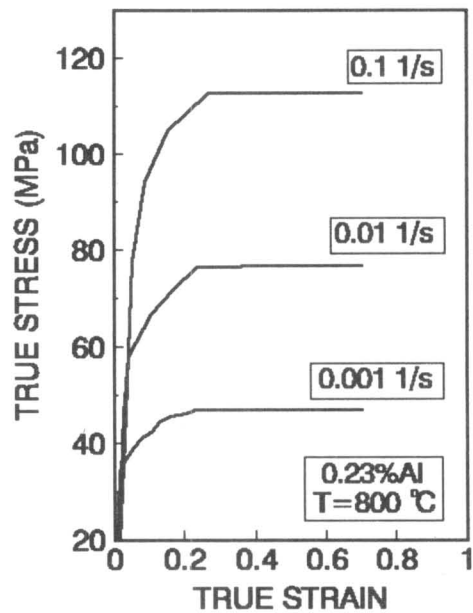
10^{-3} s^{-1} بر روی منحنی تنش-کرنش حقیقی فولاد ۰/۲۳%Al.

شکل ۱: منحنی سیلان در حین تغییر شکل گرم (الف) بازیابی دینامیکی، (ب)

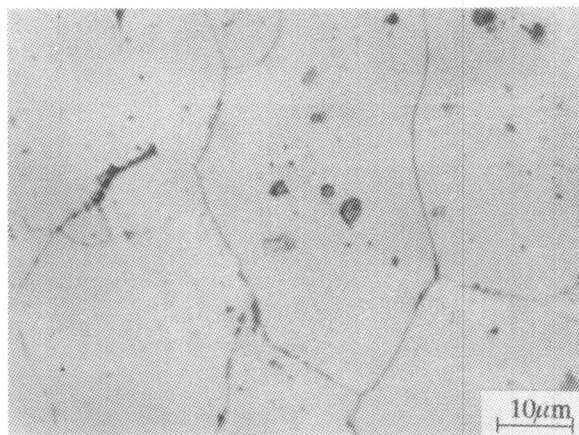
تبلور مجدد دینامیکی (مرجع - ۲).



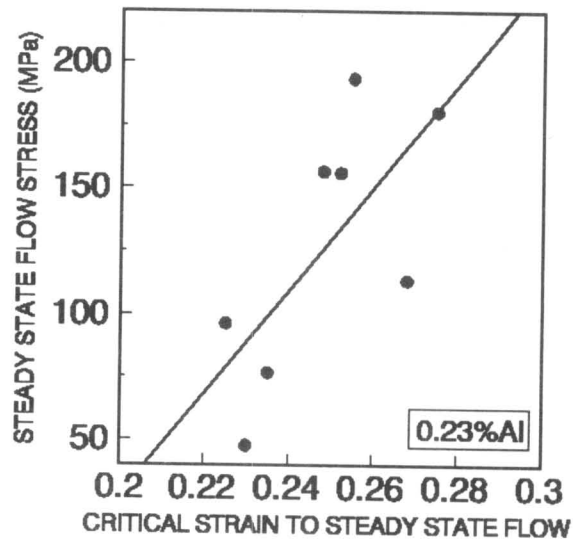
شکل ۵: اثر آلومینیوم بر روی منحنی تنش-کرنش حقیقی در درجه حرارت 750°C و نرخ کرنش 10^{-2} s^{-1} .



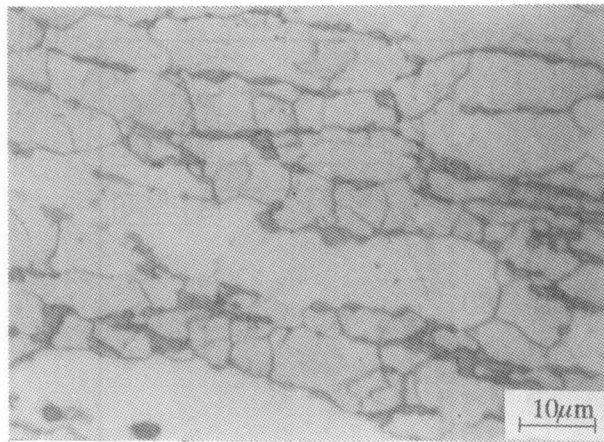
شکل ۳: اثر نرخ کرنش بر روی منحنی تنش-کرنش حقیقی فولاد ۰/۲۳%Al در درجه حرارت ثابت 800°C .



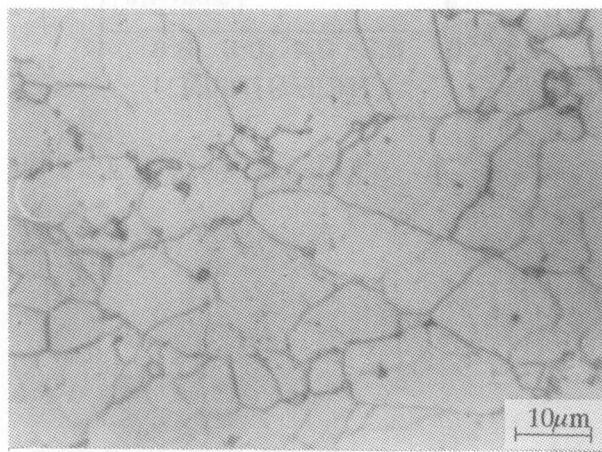
شکل ۶: ساختار میکروسکوپی نمونه $0.23\% \text{ Al}$ در پیش از تغییر شکل گرم (بزرگنمایی $1000\times$).



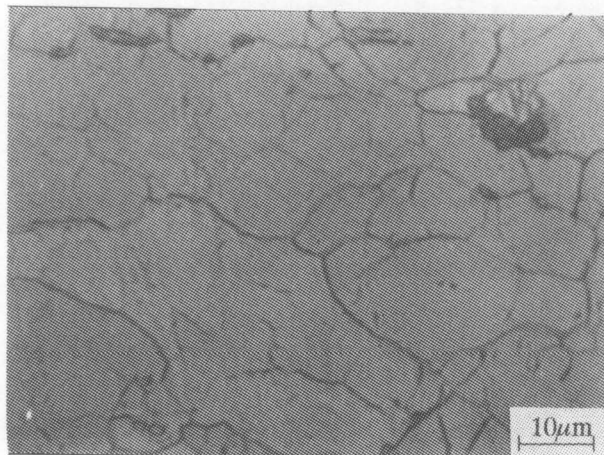
شکل ۴: ارتباط کرنش بحرانی سیلان حالت پایدار با تنش سیلان حالت پایدار در نمونه $0.23\% \text{ Al}$.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷: اثر آلومینیوم بر روی تغییرات ریز ساختاری نمونه‌های فرآیند تغییر شکل گرم در درجه حرارت 800°C و نرخ کرنش 10^{-2} s^{-1} (بزرگنمایی $1000\times$) (الف) $0.14\% \text{ Al}$ (ب) $0.23\% \text{ Al}$ (ج) $0.31\% \text{ Al}$.