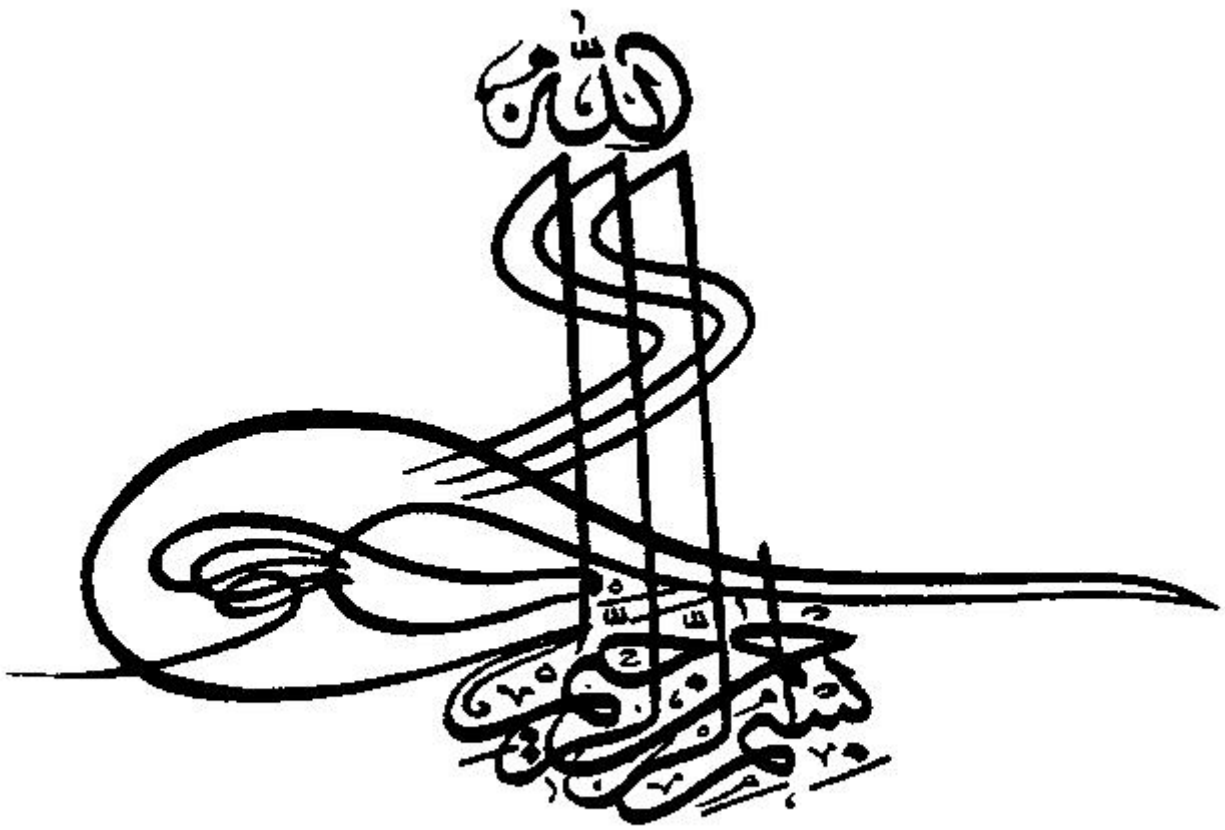

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

بررسی سینتیک نرم شدن و تحولات ریزساختاری فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۰٤ در حین و پس از تغییر شکل داغ

پایان‌نامه دکتری مهندسی مواد- شکل دادن فلزات

جواد راستی

اساتید راهنما

دکتر محمود مرآتیان - دکتر عباس نجفی‌زاده

۱۳۸۹

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان‌نامه دکتری مهندسی مواد- شکل دادن فلزات آقای جواد راستی

تحت عنوان:

بررسی سینتیک نرم شدن و تحولات ریزساختاری فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۰٤ در حین و پس از تغییر شکل داغ

در تاریخ ۸۹/۱۱/۱۰ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر عباس نجفی‌زاده
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمود مرآتیان
۳- استاد داور	دکتر جنابعلی جهرمی
۴- استاد داور	دکتر عباس اکبر زاده
۵- استاد داور	دکتر محمدرضا طرقی‌نژاد
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسعود پنجه‌پور

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از توجه، راهنمایی و تشویق اساتید گرامی، آقایان دکتر نجفی‌زاده و دکتر مرآتیان که همواره در طول مدت انجام پروژه راهنمای بنده بودند، سپاسگزاری نمایم. همچنین از دوست خوبم آقای مهندس خطایی تشکر می‌نمایم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به همسر مهربان، فداکار و صبورم

که صمیمانه مرا در اتمام این کار یاری نمود

و تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

و خانواده گرامی همسرم

که دست یاری و دعای خیرشان همواره مددکارم بوده است

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فهرست مطالب ..... هشت
فهرست جداول ..... یازده
فهرست اشکال ..... سیزده
چکیده ۱
فصل اول: مقدمه
فصل دوم: مروری بر منابع
۲-۱- معرفی فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۰۴ ..... ۶
۲-۲- روشهای تولید و فرآیندهای تغییر شکل داغ فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۸
۲-۳- روشهای آزمایش مواد در تغییر شکل داغ ۱۰
۲-۴- فرایندهای سخت‌شدن و نرم‌شدن در حین تغییر شکل داغ ۱۳
۲-۵- سیر تحول ساختار نابجایی در فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ ..... ۱۹
۲-۶- بررسی منحنی تنش کرنش در تغییر شکل داغ ۲۴
۲-۶-۱- منطقه کارسختی و بازیابی دینامیکی ۲۴
۲-۶-۲- منطقه تبلور مجدد دینامیکی ۳۲
۲-۷- مکانیزمهای تبلور مجدد دینامیکی ۳۷
۲-۷-۱- تبلور مجدد دینامیکی ناپیوسته یا متداول ۳۷
۲-۷-۲- تبلور مجدد دینامیکی پیوسته ۳۹
۲-۷-۳- تبلور مجدد دینامیکی هندسی ۴۰
۲-۸- نقش مکانیزمهای مختلف در گسترش تبلور مجدد دینامیکی در فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۴۱
۲-۹- روابط سینتیکی تبلور مجدد دینامیکی ۴۵
۲-۱۰- شبیه سازی فرآیند تبلور مجدد دینامیکی ۴۷
۲-۱۰-۱- جوانه‌زنی دانه‌های تبلور مجدد دینامیکی ۴۸
۲-۱۰-۲-رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته دینامیکی ۵۰
۲-۱۱- نرمکاری پس از تغییر شکل و یا در بین عبورها ۵۰
۲-۱۲- روشهای اندازه‌گیری کسر نرم شدن ۵۲
۲-۱۳- روش کاهش تعداد آزمایشات ۵۴
۲-۱۴- سینتیک نرم شدن بین پاسی ۵۷
۲-۱۵- اندازه دانه تبلور مجدد دینامیکی، استاتیکی و متادینامیکی ۶۰
۲-۱۶- اثر پیش‌کرنش بر زمان نرم شدن بین پاسی ۶۳
۲-۱۷- روابط سینتیکی تبلور مجدد استاتیکی و متادینامیکی ۶۴

۲-۱۸- اثر پیر شدن کرنشی استاتیکی و دینامیکی بر سینتیک نرم شدن بین پاسی ۶۹
۲-۱۹- معیارهای ارائه شده برای کرنش انتقالی ۷۱
۲-۲۰- طراحی آزمایش به روش تاگوچی ۷۴
۲-۲۰-۱- تعیین الگوی انجام آزمایش‌ها با انتخاب آرایه مناسب ۷۵
۲-۲۰-۲- درجه آزادی ۷۸
۲-۲۰-۳- اثرات متقابل پارامترها بر هم ۷۸
۲-۲۰-۴- تحلیل نتایج در روش تاگوچی ۸۰
۲-۲۰-۵- تعیین مقدار بهینه ۸۴
فصل سوم: مواد و روش تحقیق
۳-۱- فولاد مورد مطالعه ۸۶
۳-۲- بررسی سینتیک نرم شدن در حین تغییر شکل داغ (سینتیک تبلور مجدد دینامیکی) ۸۶
۳-۳- بررسی سینتیک نرم شدن پس از تغییرشکل (سینتیک تبلور مجدد استاتیکی و متادینامیکی) ۹۰
۳-۴- بررسی کرنش انتقالی ۱۰۰
۳-۴-۱- آزمایش سختی سنجی ویکرز ۱۰۰
۳-۴-۲- آزمایش تفرق اشعه X (XRD) ۱۰۰
۳-۴-۳- آزمایش میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) ۱۰۱
۳-۵- روش متالوگرافی نمونه‌ها ۱۰۱
۳-۶- بررسی اثر اصطکاک بر منحنی‌های جریان ۱۰۱
۳-۷- شبیه‌سازی ریزساختاری ماده ۱۰۶
۳-۷-۱- شبیه سازی رشد دانه توسط روش مونت کارلو ۱۰۶
۳-۷-۲- شبیه‌سازی ساختار تبلورمجدد دینامیکی با روش سلولار اتوماتا ۱۰۸
فصل چهارم: نتایج و بحث
۴-۱- نرم‌شدن در حین تغییر شکل داغ ۱۰۹
۴-۱-۱- تصحیح نمودار تنش کرنش ۱۱۰
۴-۱-۲- تعیین انرژی فعالسازی تغییر شکل ۱۱۲
۴-۱-۳- تعیین کرنشهای مهم ۱۱۴
۴-۱-۴- بررسی ریزساختار در کرنش یک ۱۱۷
۴-۱-۵- سینتیک تبلورمجدد دینامیکی ۱۲۰
۴-۲- نرمکاری پس از تغییر شکل داغ ۱۳۰
۴-۲-۱- سینتیک نرم شدن بین پاسی ۱۳۰
۴-۲-۲- تعیین کرنش انتقالی ۱۳۶
۴-۲-۳- بررسی ریزساختاری ۱۴۰
۴-۳- بررسی کرنش انتقالی ۱۵۳
۴-۳-۱- آزمایش سختی سنجی ویکرز ۱۵۳

۴-۳-۲- آزمایش تفرق اشعه X ۱۵۵
۴-۳-۳- شبیه‌سازی ریزساختاری سلولار اتوماتو ۱۵۷
۴-۳-۴- آزمایش میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) ۱۶۵
۴-۴- بررسی اثر اصطکاک بر نمودارهای تنش کرنش ۱۶۸
۴-۴-۱- تغییر شکل ناهمگن در آزمایش فشار داغ ۱۶۸
۴-۴-۲- اعتباربخشی به روش ارائه شده ۱۷۴
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۷۷
۵-۲- پیشنهادات ۱۷۹
پیوست
پ-۱- رشد دانه در مرحله پیشگرم ۱۸۰
پ-۱-۱- فولادهای مورد مطالعه ۱۸۰
پ-۱-۲- شکل دانه ۱۸۰
پ-۱-۳- روش تعیین اندازه دانه متوسط و توزیع اندازه دانه در مواد پلی‌کریستال ۱۸۲
پ-۱-۴- آزمایشهای سینتیک رشد دانه ۱۸۶
پ-۱-۵- برآورد تجربی توزیع حجمی دانه‌ها ۱۸۹
پ-۱-۶- تلورانس خطا در اندازه دانه ۱۹۸
پ-۱-۷- رشد دانه در فولاد حساس شده ۱۹۹
پ-۲- کدهای برنامه‌های نوشته شده در نرم افزار مطلب ۲۰۳
پ-۲-۱- برنامه مونت کارلو سه بعدی ۲۰۳
پ-۲-۲- برنامه سلولار اتوماتو دو بعدی ۲۰۷
مراجع ۲۱۶

فهرست جداول

عنوان | صفحه

جدول ۲-۱- ترکیب شیمیایی فولاد ۳۰۴ AISI ۶
جدول ۲-۲- خواص مکانیکی فولاد ۳۰۴ AISI طبق استاندارد A240/A240M برای محصولات نوردی ۷
جدول ۲-۳- خصوصیات فرایندهای فلزکاری و مقادیر متداول نرخ کرنش و دما ۸
جدول ۲-۴- پارامترهای معادله ۲-۶ برای تنش اوج و تنش حالت پایدار [۴۵] ۱۸
جدول ۲-۵- پارامترهای رابطه ۲-۳۱ برای ترمهای کارسختی و بازیابی [۴۵] ۲۷
جدول ۲-۶- مکانیزمهای مختلف جوانه‌زنی و رشد در پدیده تبلور مجدد دینامیکی با توجه مقادیر k ، m و q در سه بعد [۱۰۳] ۳۶
جدول ۲-۷- وابستگی مکانیزمهای نرم‌شدن به پارامترهای تغییر شکل داغ [۱۶۶] ۶۰
جدول ۲-۸- روابط سینتیکی تبلور مجدد استاتیکی و متادینامیکی برای فولادهای مختلف ۶۵
جدول ۲-۹- مقایسه دو روش طراحی فاکتوریل (روش کلاسیک) و تاگوچی [۱۸۹] ۷۵
جدول ۲-۱۰- انتخاب ماتریس ارتوگونال بر حسب تعداد پارامترها و سطوح آنها [۱۹۰] ۷۶
جدول ۲-۱۱- ماتریس‌های ارتوگونال متداول در طراحی آزمایش‌ها [۱۹۰] ۷۷
جدول ۲-۱۲- ماتریس ارتوگونال ($L\text{-}4(2^3)$ [۱۸۹] ۷۷
جدول ۲-۱۳- ماتریس ارتوگونال ($L\text{-}8(2^7)$ [۱۸۹] ۷۷
جدول ۲-۱۴- جدول قطری اثرات متقابل پارامترهای دو سطحی [۱۸۹] ۷۹
جدول ۳-۱- ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ AISI به کار برده شده در این تحقیق ۸۶
جدول ۳-۲- ماتریس L_{27} استفاده شده برای مطالعه سینتیک نرم شدن بین پاسی ۹۳
جدول ۳-۳- مقادیر واقعی پارامترها مرتبط با سطوح ۱ تا ۳ در جدول ۳-۲ ..... ۹۴
جدول ۳-۴- شرایط آزمایشهای دو پاسه جهت بررسی سینتیک تبلور مجدد استاتیکی ۹۶
جدول ۳-۵- شرایط آزمایشهای دو پاسه جهت بررسی سینتیک تبلور مجدد استاتیکی و متادینامیکی ۹۷
جدول ۳-۶- شرایط آزمایشهای دو پاسه جهت بررسی سینتیک تبلور مجدد متادینامیکی و استاتیکی ۹۸
جدول ۳-۷- شرایط آزمایشهای دو پاسه جهت بررسی سینتیک تبلور مجدد متادینامیکی ۹۹
جدول ۳-۸- ماتریس ارتوگونال ($L_{16}(4^5)$ ۱۰۵
جدول ۳-۹- مقادیر واقعی سطوح پارامترها در جدول ۳-۸ ..... ۱۰۵
جدول ۳-۱۰- پارامترهای مربوط به فولاد ۳۰۴ مورد نیاز در شبیه‌سازی سلولار اتوماتو ۱۰۸
جدول ۴-۱- انرژی فعالسازی تغییر شکل و پارامترهای رابطه ۴-۲ برای دو فولاد ۱۱۳
جدول ۴-۲- کرنشهای مهم در تغییر شکل داغ فولاد ۳۰۴ AISI با اندازه دانه اولیه ۴۰ µm ۱۱۶
جدول ۴-۳- شرایط ایجاد ساختار گردنبندی در ریزساختار فولاد ۳۰۴ AISI با دو اندازه دانه اولیه در کرنش یک ۱۱۸
جدول ۴-۴- کسر نرم شدن برای همه آزمایشها، ویرگول برای جدا کردن شرایط مختلف آزمایش بکار رفته است ۱۳۲
جدول ۴-۵- آنالیز واریانس (ANOVA) جهت یافتن میزان اثر پارامترها بر کسر نرم شدن بین پاسی ۱۳۳
جدول ۴-۶- نتایج تحلیل میانگین برای یافتن توان اورامی و زمان ۵۰٪ نرم شدن برای ۴ گروه کرنش مورد نظر ۱۳۳

جدول ۴-۷- اندازه دانه میانگین برای همه آزمایشها، ویرگول برای جدا کردن شرایط مختلف آزمایش بکار رفته است ۱۴۹
جدول ۴-۸- استخراج مقادیر لازم برای محاسبه پارامتر شبکه از نمونه اولیه فولاد ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه ۴۰ μm ۱۵۶
جدول ۴-۹- محاسبه پارامتر شبکه برای الگوی تفرق شکل ۴-۵۶ (الف) در قسمت زمینه ماده ۱۶۷
جدول ۴-۱۰- ورودیها و خروجیهای نرم‌افزار Abaqus در شبیه سازی فرایند فشردن داغ ۱۷۰
جدول پ ۱-۱- ترکیب شیمیایی سه فولاد زنگ نزن آستنیتی به کار برده شده در ارزیابی رشد دانه ۱۸۰
جدول پ ۱-۲- ضرایب معادله پ ۱-۱ برای اشکال مختلف دانه [۲۵] ۱۸۱
جدول پ ۱-۳- روابط آماری توزیع اندازه دانه برای $f_N(v)$ ۱۸۳
جدول پ ۱-۴- ارتباط بین $\langle V_v \rangle$ و CV_v با $\langle V_N \rangle$، CV_N و پارامترهای توابع توزیع در توابع مختلف ۱۸۵
جدول پ ۱-۵- دما و زمان آنیل برای فولادهای مورد تحقیق ۱۸۶
جدول پ ۱-۶- سینتیک رشد دانه در فولادها ۱۸۸
جدول پ ۱-۷- محاسبه حجم متوسط دانه‌ها $\langle V_v \rangle$ و ضریب انحراف حجمی CV_v از روش جنسن- گاندرسن و یافتن معادل آنها، $\langle V_N \rangle$ و CV_N، با انتخاب تابع توزیع مناسب از جدول پ ۱-۳ و به کمک روابط جدول پ ۱-۴ و محاسبه پارامترهای مجهول توابع توزیع ۱۹۱
جدول پ ۱-۸- داده‌های مورد نیاز در مدلسازی روش ابراز – لوک برای رشد دانه ۱۹۸

فهرست اشکال

عنوان | صفحه

شکل ۲-۱- تصویر نمادین از فرایند نورد صفحه و ورق [۱۷] ۱۰
شکل ۲-۲- قفسه نورد سیاره‌ای فولادهای زنگ نزن آستنیتی [۱۸] ۱۰
شکل ۲-۳- آزمایش فشار با کرنش صفحه‌ای [۲۰] ۱۱
شکل ۲-۴- (الف) تشکیل سه منطقه تغییر شکل در حین فشردن داغ نمونه استوانه‌ای (ب) الگوی تغییر شکل نمونه در آزمایش فشار داغ: (۱) بشکه‌ای شدن اولیه، (۲) تا خوردن سطوح مجاور روی فکها (Side folding over)، (۳) کشیدگی سطوح مجاور نمونه [۲۰] ۱۲
شکل ۲-۵- مکانیزمهای نرم‌شدن در حین و پس از تغییر شکل داغ [۱۷] ۱۳
شکل ۲-۶- منحنی‌های تنش کرنش در دماهای (الف) ۹۰۰°C (ب) ۱۰۰۰°C (ج) ۱۱۰۰°C و (د) ۱۲۰۰°C در نرخ کرنشهای s^{-1} ۱۰۰-۰/۱ در حین تغییر شکل داغ فولاد زنگ نزن آستنیتی۳۰۴ [۴۱] ۱۴
شکل ۲-۷- (الف) رابطه تنش و کرنش اوج و (ب) رابطه میان نرخ کرنش و تنش اوج در فولاد ۳۰۴ ..... ۱۵
شکل ۲-۸- تنش بحرانی شروع DRX (σ_C)، تنش اوج (σ_p)، تنش اشباع در حالت بازیابی دینامیکی (σ_S) و تنش حالت پایدار (σ_{SS}) که با دما و نرخ کرنش ارتباط داده می‌شوند. ۱۵
شکل ۲-۹- ساختار سلول نابجایی در فولاد زنگ نزن آستنیتی Fe-Ni در دمای ۹۰۰ °C و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۱ [۶۱،۶۰] ۱۹
شکل ۲-۱۰- (الف) تشکیل باندهای برشی در فولاد زنگ نزن آستنیتی 22Cr-19Ni-3Mo در دمای ۹۰۰ °C و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۷ در کرنش ۰/۵ [۶۲] و (ب) تشکیل سلهای نابجایی و دانه‌های فرعی در فولاد ۳۰۴ در دمای ۷۰۰ °C و نرخ کرنش s^{-1} $۳/۵\times۱۰^{-۴}$ [۶۳] ۱۹
شکل ۲-۱۱- ریزساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در حین تغییر شکل در دمای ۱۰۰۰ °C و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۱ در کرنشهای صفر (ساختار آنیل)، ۰/۲ و ۰/۵ [۶۶] ۲۲
شکل ۲-۱۲- کسر مرزهای دوقلویی در ریزساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در حین تغییر شکل در دمای °C ۱۰۰۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۱ در کرنشهای صفر (ساختار آنیل)، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۵ و مقایسه با جهت‌گیری تصادفی [۶۶] ۲۲
شکل ۲-۱۳- زیرساختار درون دانه‌ای در ریزساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در حین تغییر شکل در دمای °C ۱۰۰۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۱/ و ۰سه نوع الگوی توزیع زاویه عدم تطابق [۷۰] ۲۳
شکل ۲-۱۴- دانه‌های فرعی و سه نوع نابجایی فرض شده در مدل [۸۲] ۲۸
شکل ۲-۱۵- منحنی‌های تنش کرنش تجربی و محاسبه شده توسط مدل فوق در یک آلیاژ آلومینیوم AA3004 در دمای ۴۰۰ °C و نرخ کرنشهای s^{-1} ۱۰-۰/۱ [۸۴] ۳۱
شکل ۲-۱۶- اندازه دانه DRX و اندازه دانه فرعی در فولاد IF [۹۹] ۳۴
شکل ۲-۱۷- کرنش بحرانی شروع DRX، ε_c ، و کرنش پیک، ε_p ، بر حسب Z در فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه ۸ و ۳۵ μm [۵۰] ۳۵

شکل ۲-۱۸- شماتیک فرآیند جوانه‌زنی تبلور مجدد دینامیکی روی مرزدانه‌ها: (الف) تضرس مرزدانه و ظهور مرزهای فرعی (ب) برش جزئی مرزدانه و توسعه کرنشهای موضعی ناهمگن و (ج) ایجاد جوانه DRX توسط مرزدانه مضرس به همراه مرزهای فرعی ناشی از چرخش مرزهای کم‌زاویه ویا ایجاد دوقلویی [۶۵] ۳۸
شکل ۲-۱۹- (الف) ترکیب شدن مرزهای مضرس و ایجاد دانه‌های جدید (تبلور مجدد هندسی) [۱۱۵] (ب) رابطه میان کرنش فشاری و ضخامت اندازه دانه آستنیت و انجام تبلور مجدد هندسی در آلیاژ Ni-30Fe [۱۲۰] ۴۱
شکل ۲-۲۰- توزیع زوایای عدم تطابق در حدود ۱۰۰۰ دانه فرعی در فولاد 800H [۱۱۱] ۴۲
شکل ۲-۲۱- (الف) تغییر فرکانس تجمعی زوایای عدم تطابق دانه‌های فرعی با پیشرفت کرنش و (ب) تصویر TEM یک دوقلویی ریز در کرنش ۰/۰۹ در $1100\ ^\circ C$ و $0/001\ s^{-1}$ در فولاد 800H [۱۱۱] ۴۲
شکل ۲-۲۲- پیشرفت DRX در دمای $900\ ^\circ C$ و نرخ کرنش $0/01\ s^{-1}$ در فولاد ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه $35\ \mu m$، دوقلویی‌ها با خطوط درشت و مرزهای بزرگ زاویه با خطوط ریز نشان داده شده است: B= مکانیزم تضرس، T= مکانیزم دوقلویی، SR= مکانیزم چرخش دوقلویی و SB= تضرس ثانویه [۱۱۲]. ۴۴
شکل ۲-۲۳- روند MDRX در آلیاژ Ni-30Fe با زمان بین پاسی (الف) صفر، (ب) یک، (ج) ۱۰ و (د) ۴۰ ثانیه، حذف زیرساختار درونی دانه‌ها [۱۵۴] ۵۲
شکل ۲-۲۴- (الف) روش تنش تسلیم قراردادی و روش پس رو (ب) روش تنش متوسط سیلان ۵۳
شکل ۲-۲۵- روش افت فشار و منحنی تغییرات فشار با زمان [۱۵۹] ۵۴
شکل ۲-۲۶- سیکل آزمایش تغییر شکل داغ: (الف) فقط همگن کردن [۵۳]، (ب) همگن کردن و یکسان سازی ریزساختاری تک پاسه [۵۲] و (ج) همگن کردن و یکسان سازی ریزساختاری دو پاسه [۱۶۰]. ۵۵
شکل ۲-۲۷- ریزساختار فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ در دمای $900\ ^\circ C$ و $0/01\ s^{-1}$ در پیش کرنشهای ۰/۴، ۰/۶، ۱ و ۲ در زمانهای بین پاسی مختلف مرتبط با ۲۰٪، ۵۰٪ و ۹۰٪ نرم شدن [۱۶۲] ۵۷
شکل ۲-۲۸- وابستگی مکانیزمهای نرم شدن بین پاسی به کرنش اعمالی قبل از باربرداری [۱۶۴] ۵۹
شکل ۲-۲۹- (الف) تغییر اندازه دانه متوسط با افزایش کرنش در حین انجام DRX [۵۰] (ب) تغییر اندازه دانه d_{DRX} با Z [۱۲۲] ... ۶۱
شکل ۲-۳۰- تغییر اندازه دانه متوسط در طی زمان نگهداری به ازای پیش‌کرنشهای مختلف [۵۲] ۶۱
شکل ۲-۳۱- تغییر اندازه دانه DRX طی فرایند MDRX برای دو اندازه دانه اولیه ۸ و $35\ \mu m$ در فولاد ۳۰۴ [۵۰] ۶۲
شکل ۲-۳۲- اثر پیش کرنش بر کسر نرم شدن در فولاد آستنیتی ۳۰۴H در نرخ کرنش $0/01\ s^{-1}$ و در دمای (a) $^\circ C$ ۱۰۰۰ و (b) $1050\ ^\circ C$ [۷] ۶۳
شکل ۲-۳۳- وابستگی زمانهای ۲۰٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ نرم شدن به پیش‌کرنش $w=\varepsilon/\varepsilon_p$ در فولاد ۳۰۴H [۷] ۶۳
شکل ۲-۳۴- نتایج تجربی $\varepsilon^*/\varepsilon_p$ در فولاد میکروآلیاژی Nb دار مورد مصرف در خطوط لوله [۱۶۰] ۶۸
شکل ۲-۳۵- کرنش اوج و کرنش انتقالی در فولادهای (الف) C-Mn، (ب) HSLA و (ج) IF [۱۷۸] ۶۸
شکل ۲-۳۶- شکل دندانه‌ای شدن نمودار تنش کرنش در دماهای مختلف در فولاد ۳۰۴ در نرخ کرنش $3/5\times10^{-3}\ s^{-1}$ [۱۸۶] ۶۹
شکل ۲-۳۷- (الف) محدوده دندانه‌ای شدن نمودار تنش کرنش در فولاد ۳۰۴ در آزمایش کشش، (ب) ضریب حساسیت به نرخ کرنش در دماهای مختلف در فولاد ۳۰۴ [۱۸۵] ۷۰
شکل ۲-۳۸- ضریب نفوذ عناصر بین نشین و جانشین در دماهای مختلف در فولاد ۳۰۴ [۱۸۸] ۷۰
شکل ۲-۳۹- (الف) اثر پیرشدن کرنشی در کاهش کسر نرم شدن در زمانهای ابتدایی پس از تغییر شکل داغ، (ب) ضریب حساسیت به نرخ کرنش در دماهای بالا در فولاد ۳۰۴ [۴۹]. ۷۱

شکل ۲-۴۰- (الف) وابستگی زمان ۵۰٪ نرم شدن به دما قبل و بعد از کرنش انتقالی، (ب) وابستگی زمان ۵۰٪ نرم شدن به نرخ کرنش قبل و بعد از کرنش انتقالی [۱۷۸] ۷۲
شکل ۲-۴۱- ارتباط زمان ۵۰٪ نرم شدن با نرخ کار سختی [۱۷۶] ۷۲
شکل ۲-۴۲- ارتباط کرنش انتقالی با نسبت اندازه دانه تبلور مجدد یافته دینامیکی به اندازه دانه اولیه [۱۷۸] ۷۳
شکل ۳-۱- دستگاه آزمایش فشار داغ مورد استفاده در این پژوهش ۸۷
شکل ۳-۲- منحنی تنش کرنش فک دستگاه در دمای ۱۱۰۰ °C ۸۸
شکل ۳-۳- برش نمونه‌ها در امتداد طولی ۸۸
شکل ۳-۴- کرنشهایی که در آنها تغییر شکل داغ متوقف شده و نمونه در آب کوئنچ شده است (جهت بررسی سینتیک تبلور مجدد دینامیکی ۸۹
شکل ۳-۵- روش تنش تسلیم قراردادی برای یافتن کسر نرم شدن بین پاسی ۹۰
شکل ۳-۶- منحنی سیلان موادی با مشخصه تبلور مجدد دینامیکی ۱۰۲
شکل ۳-۷- منحنی تنش کرنش آزمایش فشار داغ موادی با مشخصه تبلور مجدد دینامیکی ۱۰۳
شکل ۳-۸- پارامترهای مورد نظر برای ارتباط‌دهی شکل نمونه در کرنش یک به بقیه پارامترها ۱۰۴
شکل ۳-۹- انتخاب شبکه و همسایه‌ها به صورت (الف) مربعی و (ب) مثلثی ۱۰۶
شکل ۴-۱- ریزساختار فولاد AISI ۳۰۴ در دو اندازه دانه اولیه (الف) ۱۵ و (ب) ۴۰ µm که از آنیل در دمای ۱۱۰۰ °C به مدت به ترتیب ۵ و ۳۰ دقیقه حاصل شده‌اند ۱۰۹
شکل ۴-۲- نمودار اولیه و تصحیح شده برای نمونه با اندازه دانه اولیه ۱۵ µm که در دمای ۹۵۰ °C و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۰۵ تغییر شکل داده شده است ۱۱۱
شکل ۴-۳- منحنی‌های تنش کرنش فولاد AISI ۳۰۴ برای دو اندازه دانه اولیه (الف) ۱۵ µm و (ب) ۴۰ µm ۱۱۱
شکل ۴-۴- انرژی فعالسازی تغییر شکل و پارامترهای رابطه ۴-۱۰ برای فولاد AISI ۳۰۴ با دو اندازه دانه اولیه ۱۵ و ۴۰ µm ۱۱۳
شکل ۴-۵- منحنی کارسختی در مقابل تنش برای فولاد AISI ۳۰۴ با دو اندازه دانه اولیه (الف) ۱۵ µm و (ب) ۴۰ µm ۱۱۴
شکل ۴-۶- کرنشهای مهم بدست آمده از نمودارها بر حسب پارامتر زنر- هولمن: (الف) کرنش‌ها بر حسب Z مربوطه، در ماده با اندازه دانه ۱۵ µm برابر $Z = \dot{\varepsilon}\, exp(\ 384100\ /\ RT\ )$ و در ماده با اندازه دانه ۴۰ µm برابر $Z = \dot{\varepsilon}\, exp(\ 415700\ /\ RT\ )$. (ب) مقایسه کرنش‌های اوج دو ماده با Z متوسط ۱۱۵
شکل ۴-۷- تنش حالت پایدار برای فولاد AISI ۳۰۴ با دو اندازه دانه اولیه ۱۱۷
شکل ۴-۸- ریزساختارهای فولاد AISI ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه ۱۵ µm که تا کرنش یک در دماها و نرخ کرنشهای مختلف تحت تغییر شکل داغ قرار گرفته است ۱۱۸
شکل ۴-۹- ریزساختارهای فولاد AISI ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه ۴۰ µm که تا کرنش یک در دماها و نرخ کرنشهای مختلف تحت تغییر شکل داغ قرار گرفته است ۱۱۹
شکل ۴-۱۰- اندازه دانه DRX بر حسب Z در AISI ۳۰۴ با دو اندازه دانه اولیه ۱۲۰
شکل ۴-۱۱- ریزساختار فولاد ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه ۱۵ µm در دمای ۹۵۰ °C و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۰۵ در کرنشهای مختلف ۱۲۱
شکل ۴-۱۲- ریزساختار فولاد ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه ۱۵ µm در دمای ۹۵۰ °C و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۵ در کرنشهای مختلف ۱۲۲
شکل ۴-۱۳- ریزساختار فولاد ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه ۴۰ µm در دمای ۱۰۰۰ °C و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۵ در کرنشهای مختلف ۱۲۲
شکل ۴-۱۴- ریزساختار فولاد ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه ۴۰ µm در دمای ۱۱۰۰ °C و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۵ در کرنشهای مختلف ۱۲۳

شکل ۴-۱۵- ریزساختار فولاد ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه ۴۰ μm در دمای ۱۰۵۰ °C و نرخ کرنش $0/005\ s^{-1}$ در کرنشهای مختلف... ۱۲۳
شکل ۴-۱۶- ریزساختار فولاد ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه ۴۰ μm در دمای ۱۰۰۰ °C و نرخ کرنش $0/5\ s^{-1}$ در کرنشهای مختلف..... ۱۲۴
شکل ۴-۱۷- کسر حجمی دانه‌های تبلور مجدد یافته دینامیکی بر حسب کرنش از داده‌های تجربی ۱۲۴
شکل ۴-۱۸- منحنی $\ln(-\ln(1-X))$ بر حسب $\ln(\varepsilon-\varepsilon_C)$ برای یافتن توان اورامی از داده‌های تجربی..... ۱۲۵
شکل ۴-۱۹- مقایسه مقادیر تجربی و مدلسازی کرنش $\varepsilon_{0.5}$ و مقایسه با کرنش نقطه عطف (ε_i)..... ۱۲۶
شکل ۴-۲۰- تنش بحرانی شروع DRX (σ_C)، تنش اوج (σ_p)، تنش اشباع در حالت بازیابی دینامیکی (σ_S) و تنش حالت پایدار (σ_{SS}) که با دما و نرخ کرنش ارتباط داده می‌شوند..... ۱۲۶
شکل ۴-۲۱- منحنی تنش کرنش فولاد ۳۰۴ AISI که در دمای ۱۰۰۰ °C و نرخ کرنش $0/05\ s^{-1}$ تغییر شکل داده شده است به همراه یافتن پارامترهای لازم برای رسم منحنی بازیابی دینامیکی..... ۱۲۷
شکل ۴-۲۲- منحنی تنش کرنش فولاد ۳۰۴ AISI که در دمای ۱۰۰۰ °C و نرخ کرنش $0/5\ s^{-1}$ تغییر شکل داده شده است به همراه یافتن پارامترهای لازم برای رسم منحنی بازیابی دینامیکی..... ۱۲۸
شکل ۴-۲۳- کسر حجمی دانه‌های تبلور مجدد یافته دینامیکی بر حسب کرنش از منحنی تنش کرنش..... ۱۲۸
شکل ۴-۲۴- منحنی $\ln(-\ln(1-X))$ بر حسب $\ln(\varepsilon-\varepsilon_C)$ برای یافتن توان اورامی از منحنی تنش کرنش..... ۱۲۹
شکل ۴-۲۵- مقایسه کرنش $\varepsilon_{0.5}$ حاصل از منحنی تنش کرنش با $\varepsilon_{0.5}$ تجربی و مقایسه با کرنش نقطه عطف (ε_i)..... ۱۲۹
شکل ۴-۲۶- منحنیهای تنش کرنش دو مرحله‌ای در دمای ۱۰۰۰ °C و نرخ کرنش $0/005\ s^{-1}$ با پیش‌کرنشهای مختلف و زمانهای بین پاسی متفاوت مطابق با جداول ۳-۴ تا ۳-۷..... ۱۳۱
شکل ۴-۲۷- مقدار P′ آنالیز واریانس که میزان اثرگذاری عوامل بر $\ln(-\ln(1-X))$ را تعیین می‌کند بر حسب کرنش نرمالیزه..... ۱۳۴
شکل ۴-۲۸- مقایسه $t_{0.5}^{p}$ محاسبه شده از رابطه ۴-۱۴ با رابطه ۴-۱۵، کادرها دما و نرخ کرنش تغییر شکل را نشان می‌دهند..... ۱۳۶
شکل ۴-۲۹- زمان ۵۰٪ نرم شدن بین پاسی نرمالیزه ($t_{0.5}/t_{0.5}^{p}$) در مقابل کرنش نرمالیزه ($\varepsilon/\varepsilon_p$) برای ۴ گروه کرنش ۱۳۷
شکل ۴-۳۰- رابطه کرنش انتقالی و کرنش انتقالی نرمالیزه با پارامتر زنر- هولمن..... ۱۳۷
شکل ۴-۳۱- مقایسه روابط کرنش انتقالی نرمالیزه بدست آمده در کار حاضر با کار دهقان- منشادی..... ۱۳۸
شکل ۴-۳۲- (الف) مقایسه کرنش انتقالی (رابطه ۴-۱۷) با کرنشی که در آن ۵۰٪ تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد (رابطه ۴-۹) برای اندازه دانه اولیه ۴۰ μm (ب) مقایسه این کرنشها بر حسب Z..... ۱۳۹
شکل ۴-۳۳- وابستگی اندازه دانه متوسط به پیش کرنش و زمان نگهداری در فولاد ۳۰۴ در دمای ۹۰۰ °C و نرخ کرنش $0/01\ s^{-1}$ [۱۶۲،۵۲]..... ۱۴۰
شکل ۴-۳۴- ریزساختارها در شرایط جدول ۳-۴ (بررسی سینتیک SRX) همراه اندازه دانه و کسر نرم شدن آزمایش ۱۴۳
شکل ۴-۳۵- ریزساختارها در شرایط جدول ۳-۷ (بررسی سینتیک MDRX) همراه اندازه دانه و کسر نرم شدن آزمایش ۱۴۵
شکل ۴-۳۶- دوقلویی‌ها در ریزساختارهای شماره ۴، ۹ و ۱۰ شکل ۴-۳۴..... ۱۴۷
شکل ۴-۳۷- رسم روابط ۴-۲۳ تا ۴-۲۷ با پارامترهای تخمین زده شده به همراه اندازه دانه‌های تجربی در دمای °C ۱۰۰۰ و نرخ کرنش $0/005\ s^{-1}$، اندازه دانه تجربی با خطوط خاکستری به منحنی مربوطه وصل شده است و اعداد روی نمودارها نیز کرنش نرمالیزه ($\varepsilon/\varepsilon_p$) را نشان می‌دهند ۱۵۰
شکل ۴-۳۸- ریزساختار فولاد ۳۰۴ با دو اندازه دانه اولیه ۱۵ و ۴۰ μm بعد از تغییر شکل تا کرنش یک با نرخ کرنش $0/5\ s^{-1}$ در دماهای مختلف و نگهداری به مدت ۱۰ s..... ۱۵۱

شکل ۴-۳۹- تصاویر تفرق الکترون برگشتی (EBSD) از ریزساختار کوئنچ شده فولاد در دمای $^{\circ}C$ ۹۵۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۵ قبل از آنیل برای اندازه دانه اولیه (الف) μm ۴۰ و (ب) μm ۱۵ ..... ۱۵۱
شکل ۴-۴۰- اندازه دانه تبلور مجدد دینامیکی (d_{DRX}) و متادینامیکی (d_{MDRX}) برای ریزساختارهای شکل ۴-۳۸ بر حسب پارامتر زنر- هولمن (Z) ۱۵۳
شکل ۴-۴۱- نتایج آزمایش سختی سنجی ویکرز با بار kg ۳۰ بر نمونه‌های کوئنچ شده شکلهای ۴-۱۳ تا ۴-۱۶ ..... ۱۵۴
شکل ۴-۴۲- الگوی پراش اشعه X برای نمونه اولیه فولاد ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه μm ۴۰ ..... ۱۵۵
شکل ۴-۴۳- برازش پارامتر شبکه بر حسب $cos^{2}\theta\,(1/sin\,\theta+1/\theta)$ برای به دست آوردن پارامتر شبکه تصحیح شده ۱۵۶
شکل ۴-۴۴- پارامترهای شبکه برای نمونه‌های کوئنچ شده شکلهای ۴-۱۳ تا ۴-۱۶ بر حسب کرنش به همراه مقادیر سختی ۱۵۷
شکل ۴-۴۵- تبدیل ریزساختار اولیه فولاد ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه μm ۴۰ به تصویری مربعی و قابل ویرایش توسط نرم افزار مطلب (هرپیکسل برابر μm ۱ می‌باشد) ۱۵۷
شکل ۴-۴۶- رسم $\sigma\theta$ بر حسب σ و گذراندن یک چند جمله‌ای درجه ۲ بر داده‌ها برای یافتن ثوابت معادله ۴-۳۱ ..... ۱۵۸
شکل ۴-۴۷- جوانه‌زنی دانه‌های DRX بر حسب کسر تبلور مجدد یافته دینامیکی (رابطه ۴-۳۳) ۱۵۹
شکل ۴-۴۸- نمودار تنش کرنش تجربی و شبیه سازی شده برای شرایط تغییر شکل دمای $^{\circ}C$ ۱۰۰۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۵ به همراه نمودار کارسختی حاصل از معادلات ۴-۲۸ و ۴-۳۲ ..... ۱۶۰
شکل ۴-۴۹- ریزساختارها در کرنشهای مختلف برای شرایط تغییر شکل دمای $^{\circ}C$ ۱۰۰۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۵ ..... ۱۶۱
شکل ۴-۵۰- ریزساختارهای تجربی و شبیه‌سازی برای شرایط تغییر شکل دمای $^{\circ}C$ ۱۰۰۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۵ در کرنش یک ... ۱۶۱
شکل ۴-۵۱- منحنی کسر نرم شدن بر حسب کرنش، توان اورامی ۱/۳۶ به دست آمده که به مقدار تجربی بسیار نزدیک است ۱۶۲
شکل ۴-۵۲- نمودار تنش کرنش تجربی و شبیه سازی شده برای شرایط تغییر شکل دمای $^{\circ}C$ ۱۰۵۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۰۵ ..... ۱۶۲
شکل ۴-۵۳- ریزساختارها در کرنشهای مختلف برای شرایط تغییر شکل دمای $^{\circ}C$ ۱۰۵۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۰۵ ..... ۱۶۳
شکل ۴-۵۴- تنش معادل دانه‌های DRX که از چگالی متوسط نابجایی درون آنها به دست آمده در مقایسه با منحنی تنش کرنش در شرایط تغییر شکل (الف) $^{\circ}C$ ۱۰۰۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۵ و (ب) $^{\circ}C$ ۱۰۵۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۰۵ ..... ۱۶۴
شکل ۴-۵۵- منحنی σ_{DRX} برای فولاد ۳۰۴ با اندازه دانه اولیه μm ۱۵ در دمای $^{\circ}C$ ۹۵۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۵ ..... ۱۶۵
شکل ۴-۵۶- الگوی تفرق میکروسکوپ الکترونی عبوری در دو منطقه دانه‌های زمینه (Matrix) و دانه‌های تبلور مجدد یافته دینامیکی (DRX) برای ریزساختارهای تغییر شکل داده شده در دمای $^{\circ}C$ ۱۰۰۰ و نرخ کرنش s^{-1} ۰/۰۵ در کرنشهای مختلف ۱۶۵
شکل ۴-۵۷- مقایسه پارامترهای شبکه برای الگوهای تفرق شکل ۴-۵۶ برای دو ناحیه زمینه و دانه‌های DRX ۱۶۷
شکل ۴-۵۸- تغییر شکل همگن نمونه در حالت بدون اصطکاک؛ کرنشهای وارد بر هر المانی در ماده کاملاً برابر کرنشهای وارد بر کل نمونه می‌باشد لذا منحنی تنش کرنش آزمایش منطبق بر منحنی جریان ماده است ۱۶۸
شکل ۴-۵۹- (الف) مناطق سه‌گانه تغییر شکل در نمونه آزمایش فشار داغ شده [۲۰]، (ب) شواهد تجربی وجود این مناطق در نمونه (نمونه‌ها در اسید نیتریک اشباع بصورت الکتریکی ماکرواچ شده‌اند) ۱۶۸
شکل ۴-۶۰- مقایسه الگوی تغییر شکل نمونه پیش‌بینی شده توسط روش (a) ابراهیمی با پارامتر بشکه‌ای شدن b=۱ و (b) شبیه‌سازی توسط آنالیز المان محدود، در کرنشهای مختلف در تغییر شکل داغ ۱۷۰
شکل ۴-۶۱ (الف) منحنی جریان ماده و منحنی تنش کرنش آزمایش در آزمایشهای شماره ۲، ۵، ۱۲ و ۱۵ (ب) شکل نهایی نمونه در کرنش یک ۱۷۱

شکل ۴-۶۲- تحلیل میانگین بر حسب پارامترهای منحنی جریان ماده و ضریب اصطکاک برای پارامترهای (الف) SFO/CS، (ب) ε_{CS} و (ج) $\varepsilon_{p,t}$ ۱۷۲
شکل ۴-۶۳- پروفیل کرنش محوری در امتداد خط محور نمونه در شرایط آزمایش شماره یک (جدول ۴-۱۰) ۱۷۳
شکل ۴-۶۴- تحلیل میانگین پارامترهای ε_{max} و $(d\varepsilon/dx)_{\varepsilon max/2}$ بر حسب پارامترهای منحنی جریان ماده و ضریب اصطکاک ۱۷۴
شکل ۴-۶۵- منحنی‌های تنش کرنش تجربی برای نمونه‌های تغییر شکل داده شده در دماهای (الف) ۹۵۰، (ب) ۱۰۰۰، (ج) ۱۰۵۰ و (د) ۱۱۰۰ °C و نرخ کرنش $0/005\ s^{-1}$، در دو حالت روانکاری به همراه منحنی جریان ماده و ضرایب اصطکاک محاسبه شده و منحنی تنش کرنش شبیه‌سازی شده توسط نرم افزار Abaqus در هر حالت ۱۷۵
شکل ۴-۶۶- مقایسه روش حاضر برای تصحیح منحنی تنش کرنش آزمایش با روش ابراهیمی [۱۹۷] ۱۷۶
شکل پ ۱-۱- تعدادی از تتراکایدکاهدرون‌های ارائه شده برای شکل دانه ۱۸۱
شکل پ ۱-۲- ریزساختار فولاد AISI ۳۱۶L در حالت (الف) اولیه، و بعد از (ب) ۵، (ج) ۱۰ و (د) ۱۵ دقیقه آنیل در دمای ۱۲۰۰ °C ۱۸۷
شکل پ ۱-۳- ریزساختار فولاد AISI ۳۲۱ بعد از ۱۵ دقیقه آنیل در دمای (الف) ۱۲۰۰ °C و (ب) ۱۳۰۰ °C: رشد غیرعادی دانه‌ها در ۱۲۰۰ °C احتمالاً بدلیل رسوبات کاربونیتریدی تیتانیوم می‌باشد که در دمای ۱۳۰۰ °C حل شده‌اند ۱۸۷
شکل پ ۱-۴- ریزساختار فولاد AISI ۳۰۴H در حالت (الف) اولیه، و بعد از (ب) ۵، (ج) ۱۰ و (د) ۱۵ دقیقه آنیل در دمای ۱۲۰۰ °C ۱۸۸
شکل پ ۱-۵- ریزساختار فولادهای زنگ نزن آستنیتی در زمانهای آنیل مختلف (الف) AISI ۳۰۴H، دمای آنیل ۱۲۰۰ °C، (ب) AISI ۳۱۶L، دمای آنیل ۱۲۰۰ °C و (ج) AISI ۳۲۱، دمای آنیل ۱۳۰۰ °C، به همراه قطر معادل به دست آمده از حجم میانگین (D_v)، قطر معادل روش تقاطع (D_{int}) و ضریب انحراف حجمی (CV_v) ۱۹۰
شکل پ ۱-۶- مقایسه توابع توزیع برای فولاد AISI۳۱۶L بعد از ۵ دقیقه آنیل در ۱۲۰۰ °C ۱۹۱
شکل پ ۱-۷- روش مقطع زدن متوالی نمونه AISI ۳۱۶L (۱۵ دقیقه آنیل شده در ۱۲۰۰ °C)، ریزساختار (ب) توسط لایه برداری از نمونه (الف) به عمق حدود ۶ µm به دست آمده است. دانه‌های حذف شده در (الف) با علامت x و دانه‌های جدید در (ب) با رنگ خاکستری نشان داده شده است. ۱۹۲
شکل پ ۱-۸- خطوط پله‌ای به طول حدود ۱۰۰ µm روی سطح جانبی نمونه‌ها برای تعیین عمق لایه‌های متوالی ۱۹۲
شکل پ ۱-۹- توزیع حجمی دانه‌ها که از روش مقطع زدن متوالی به دست آمده است به همراه توابع توزیع ۱۹۳
شکل پ ۱-۱۰- مقایسه پارامترهای توابع توزیع به دست آمده از دو روش جنسن- گاندرسن و روش مقطع زدن متوالی ۱۹۴
شکل پ ۱-۱۱- رشد دانه در سه فولاد از روش تقاطع، نتایج روش مونت کارلو (MC) و روش ابراز- لوک (A-L) نیز برای مقایسه آورده شده است ۱۹۵
شکل پ ۱-۱۲- تغییر شعاع متوسط دانه‌ها با زمان در روش مونت کارلو ۱۹۶
شکل پ ۱-۱۳- ریزساختار شبیه‌سازی شده توسط روش مونت کارلو بعد از ۸۰۰ MCS (متوسط شعاع دانه‌ها حدود ۴۰ µm) ۱۹۶
شکل پ ۱-۱۴- تغییر ضریب انحراف حجمی وزنی CV_w با زمان آنیل در روش مونت کارلو ۱۹۷
شکل پ ۱-۱۵- توزیع حجمی دانه‌ها در (الف) ۸۰۰ MCS (تعداد ۴۲۰۰ دانه)- منطبق بر توزیع گاما و (ب) MCS ۱۴۰۰ (تعداد ۱۱۰۰ دانه) منطبق بر توزیع نرمال لگاریتمی ۱۹۷

شکل پ ۱-۱۶- توزیع حجمی دانه‌ها در روش ابراز- لوک در فولاد AISI۳۱۶L بعد از ۱۰ دقیقه آنیل در °C ۱۲۰۰ ..... ۱۹۸
شکل پ ۱-۱۷- تصویر الکترون برگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار اولیه فولاد AISI۳۰۴H بعد از اچ در محلول اسید نیتریک اشباع، رسوب کاربیدها روی مرزدانه‌ها دیده می‌شود ۱۹۹
شکل پ ۱-۱۸- آنالیز خطی EDS میکروسکوپ الکترونی روبشی عمود بر مرزدانه در (الف) ریزساختار اولیه فولاد AISI۳۰۴H و (ب) بعد از ۵ دقیقه آنیل در °C ۱۲۰۰، تقریب بکار گرفته نیز در شکل دیده می‌شود ۲۰۰
شکل پ ۱-۱۹- منحنی غلظت کروم در فولاد AISI۳۰۴H در زمانهای مختلف آنیل که از حل عددی اختلاف محدود معادله نفوذ فیک بدست امده است ۲۰۱
شکل پ ۱-۲۰- مقایسه رشد دانه در حین آنیل فولاد AISI۳۰۴H با مدل ابراز- لوک با کاربرد معادله پ ۱-۶ برای تحرک مرزدانه ۲۰۲

چکیده

فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI ۳۰۴ به شکل ورق، میله و لوله یکی از مواد سازه‌ای اصلی صنایع پتروشیمی و پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها و راکتورهایی هسته‌ای می‌باشد. فرایند تولید آن شامل ریخته‌گری پیوسته و تغییر شکلهای متوالی به شکل داغ، گرم و سرد است. تغییرات ریزساختاری این فولاد در فرایند تغییر شکل داغ شامل رشد دانه در حین پیشگرم، تبلور مجدد دینامیکی در حین تغییر شکل و تبلور مجدد استاتیکی و متادینامیکی در زمانهای عبور بین پاسی است که شناخت آنها سبب بهبود طراحی خط نورد می‌شود. لذا در این تحقیق رشد دانه در حین پیشگرم فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ و سینتیک نرم شدن آن در حین و پس از تغییر شکل داغ توسط آزمایش فشار داغ مورد بررسی قرار گرفت. رشد دانه بر حسب تغییر اندازه دانه متوسط و توزیع اندازه دانه توسط چهار روش جنسن- گاندرسن، روش مقطع زدن متوالی، شبیه‌سازی سه بعدی مونت کارلو و روش ابراز- لوک بررسی شد. مشاهده شد که توزیع اندازه دانه در حین رشد دانه می‌تواند با فرض توزیع نرمال لگاریتمی از روش جنسن- گاندرسن از مقطع دوبعدی به دست آید. سینتیک نرم شدن در حین تغییر شکل داغ در دو اندازه دانه اولیه ۱۵ و ۴۰ μm بررسی شد. نتایج نشان داد زمانی مکانیزم گردنبندی بر توسعه تبلور مجدد دینامیکی حاکم است که نسبت پارامتر زنر هولمن (Z) به ثابت A (پارامتر Z/A) بیش از ۱۰۰۰ باشد. رابطه اورامی جهت بررسی سینتیک تبلور مجدد دینامیکی به کار گرفته شد. توان اورامی و کرنشی که در آن ۵۰٪ تبلور مجدد دینامیکی رخ می‌دهد از دو روش بررسی ریزساختاری و نمودار تنش کرنش به دست آمد و مقایسه شد. جهت بررسی سینتیک نرم شدن بین پاسی از آرایه L_{27} در روش تاگوچی استفاده شد. مقادیر پیش‌کرنش اعمالی در محدوده ۰/۲۵ تا ۲ برابر کرنش اوج و در چهار گروه انتخاب شد و در هر گروه رابطه اورامی بر حسب توان اورامی و زمان ۵۰٪ نرم شدن به دست آمد و به این ترتیب سینتیک تبلور مجدد استاتیکی و متادینامیکی مشخص شد. با رسم زمان ۵۰٪ نرم شدن نرمالیزه بر حسب کرنش نرمالیزه، کرنش انتقالی و زمان ۵۰٪ نرم شدن مربوط به آن بر حسب پارامتر زنر- هولمن به دست آمد و تشریح شد. با مشخص شدن کرنش انتقالی، موقعیت آن روی منحنی تنش کرنش مورد بررسی بیشتر قرار گرفت. سه سری آزمایش شامل بررسی سختی سنجی ویکرز، آزمایش تفرق اشعه X و الگوی تفرق میکروسکوپ الکترونی عبوری بر نمونه‌های کوئنچ شده در کرنشهای مختلف بکار گرفته شد. همچنین شبیه سازی ریزساختاری سلولار اتوماتو به این منظور انجام شد. نتایج نشان داد که اختلاف چگالی متوسط نابجایی در دانه‌های تبلور مجدد یافته دینامیکی و زمینه پس از کرنش انتقالی به مقدار ثابتی می‌رسد. در نهایت، روش تصحیح نمودار تنش کرنش حاصل از آزمایش فشار داغ توسط نرم‌افزار Abaqus بررسی شد و با کاربرد آرایه L_{16} در روش تاگوچی و استفاده از تحلیل میانگین روابطی برای یافتن ضریب اصطکاک و تصحیح نمودار تنش کرنش ارائه شد. نتایج تحقیق شامل ارائه روابطی برای تصحیح نمودار تنش کرنش در حین آزمایش فشار داغ، نحوه ارزیابی رشد دانه در حین پیشگرم، ارائه روابط سینتیکی تبلور مجدد دینامیکی، استاتیکی و متادینامیکی و ارائه روشی برای یافتن کرنش انتقالی از منحنی تنش کرنش می‌باشد.

کلمات کلیدی: ۱- فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ ۲- تغییر شکل داغ ۳- سینتیک نرم شدن ۴- کرنش انتقالی

فصل اول

مقدمه

فولادهای زنگ نزن آستنیتی مواد سازه‌ای اصلی صنایع پتروشیمی، پالایشگاه‌ها[1]، نیروگاه‌ها[2] و راکتورهای هسته‌ای[3] هستند. بیش از ۵۰٪ فولادهای زنگ نزن آستنیتی مورد مصرف در صنایع نیز از نوع AISI ۳۰۴، ۳۱۶ و ترکیبهای کم کربن آنها (۳۰۴L و ۳۱۶L) می‌باشد. هر چند این فولادها با داشتن بیش از ۱۲٪ کروم جهت مقاومت به خوردگی طراحی شده‌اند اما دارای خواص مطلوب دیگری نظیر شکل‌پذیری عالی، چقرمگی در دمای اتاق و در دماهای خیلی پایین و مقاومت خوب در مقابل اکسیداسیون و خزش در دماهای بالا می‌باشند [۳-۱]. خواص مکانیکی آنها تا حد زیادی وابسته به ریزساختار است. لذا تحولات فازی، رسوبات و تبلور مجدد نقش مهمی در خواص آنها دارد. فرآیندهای ترمومکانیکی نیز که ترکیبی از عملیات حرارتی و تغییر شکل می‌باشند در کنترل ریزساختار و بنابراین بهبود خواص مکانیکی بسیار مؤثرند. فولادهای زنگ نزن آستنیتی در اثر تغییر دما دچار تحولات فازی نمی‌شوند، لذا ریزدانگی تنها از طریق تبلور مجدد در حین و پس از تغییر شکل داغ یا سرد بدست می‌آید. عملیات ترمومکانیکی طوری طراحی می‌شوند که ایجاد فازهای مضر برای مقاومت به خوردگی و چقرمگی به حداقل برسد[۵،۴]. هر چند وابستگی استحکام تسلیم به اندازه دانه در این فولادها حدود ۷۰٪ فولادهای فقط کربنی است اما نرخ کارسختی بالای فولاد دانه ریز رمز به دست آوردن استحکامی در حدود ۲۵۰ – ۵۰۰ MPa توسط تغییر شکل سرد است که در

[1] Pertochemical industries
[2] Power plants
[3] Nuclear reactors