بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

ارزیابی متغیرهای فرایند مارتنزیت بر ریز ساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۲۰۱ فوق ریزدانه/نانو ساختار

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد- شناسایی و انتخاب مواد فلزی

محمد معلمی

اساتید راهنما

دکتر عباس نجفی‌زاده **دکتر احمد کرمانپور**

۱۳۸۹

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

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مواد- شناسایی و انتخاب مواد فلزی

آقای محمد معلمی تحت عنوان

ارزیابی متغیرهای فرایند مارتنزیت بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۲۰۱ فوق ریزدانه/نانو ساختار

در تاریخ ۱۴/ ۸۹/۱۲ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر عباس نجفی‌زاده
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر احمد کرمانپور
۳- استاد داور	دکتر محمدرضا طرقی‌نژاد
۴- استاد داور	دکتر فتح‌اله کریم‌زاده
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسعود پنجه‌پور

تقدیم به:

پدر عزیز

و مادر مهربانم

به مصداق "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق" بر خود واجب می‌دانم از تمامی کسانی که مرا در این پروژه یاری رساندند تشکر و قدردانی کنم. بر خود لازم می‌دانم از زحمات مستمر و تلاش‌های دلسوزانه اساتید گرامی جناب آقای دکتر عباس نجفی‌زاده و دکتر احمد کرمانپور که همواره راهنمای بنده در طول انجام پروژه بوده‌اند، سپاس‌گزاری نمایم. همچنین از زحمات وصف‌ناپذیر مدیر عامل شرکت گداز صنعت جناب آقای مهندس فریدنی که بدون همکاری ایشان انجام این پروژه میسر نبود صمیمانه سپاس‌گزاری می‌نمایم. در پایان از دوستان عزیزم آقایان مهندس احد رضایی و مهندس حجت سماعی که اینجانب را در انجام پروژه یاری رساندند و از زحمات دوست عزیز جناب آقای مهندس مصطفی علیشاهی در راستای تدوین و نگارش پایان‌نامه کمال تشکر را دارم.

محمد معلمی-زمستان ۸۹

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
فهرست اشکال ..... یازده
فهرست جداول ..... پانزده
چکیده ۱
فصل اول: مقدمه
فصل دوم: مطالعات مروری
۲-۱- مقدمه ۵
۲-۲- دسته بندی فولادهای زنگ‌نزن ۶
۲-۳- دیاگرام‌های تعادلی و غیر تعادلی ۶
۲-۳-۱- دیاگرام های تعادلی ۶
۲-۳-۲- دیاگرام‌های غیر تعادلی ۸
۲-۴- فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۹
۲-۴-۱- انجماد فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۹
۲-۴-۲- فریت دلتای ناشی از انجماد ۱۱
۲-۴-۳- ریزساختار ۱۱
۲-۴-۴- رسوبات فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۱۳
۲-۴-۵- خواص مکانیکی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۱۵
۲-۵- ریزدانه کردن و تولید مواد فوق ریزدانه ۱۶
۲-۶- فرایند ترمومکانیکی مارتنزیت جهت تولید فولادهای فوق ریزدانه آستنیتی ۱۸
۲-۷- مارتنزیت در فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۱۸
۲-۷-۱- مارتنزیت حرارتی ۱۹
۲-۷-۲- مارتنزیت ایجاد شده توسط تغییرشکل و عوامل مؤثر بر تشکیل آن ۲۰
۲-۷-۳- مدل های سینتیکی تشکیل مارتنزیت ناشی از کرنش ۲۳
۲-۷-۴- مکانیزم‌های تشکیل مارتنزیت ۲۴
۲-۷-۵- روش‌های اندازه‌گیری مقدار مارتنزیت در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۲۹
۲-۸- بازگشت مارتنزیت ۳۱
۲-۸-۱- مکانیزم‌های بازگشت مارتنزیت ۳۱
۲-۸-۲- افزایش غیر قابل انتظار مارتنزیت در مرحله آنیل ۳۵

۲-۹- خواص مکانیکی مواد نانو ساختار ۳۷
۲-۹-۱- استحکام و سختی ۳۷
۲-۹-۲- انعطاف‌پذیری ۳۸
۲-۹-۳- مکانیزم‌های تغییر شکل در مواد نانوساختار ۴۱
۲-۱۰- تحقیقات صورت گرفته در گذشته ۴۳
۲-۱۱- جمع‌بندی ۴۶

فصل سوم: مواد و روش‌ها

۳-۱- ترکیب مورد استفاده ۴۷
۳-۲- همگن سازی، فورج و آنیل انحلالی ۴۷
۳-۳- فرایند نورد سرد و آنیل بازگشت ۴۸
۳-۴- آنالیز فازی ۴۹
۳-۴-۱- آنالیزفازی توسط فریتوسکوپ ۵۰
۳-۴-۲- آنالیزفازی توسط پراش پرتو ایکس (XRD) ۵۱
۳-۵- مشاهدات ریزساختاری ۵۳
۳-۶- بررسی سینتیک تشکیل مارتنزیت ۵۴
۳-۷- ارزیابی خواص مکانیکی ۵۴

فصل چهارم: یافته‌ها و بحث

۴-۱- ترکیب شیمیایی و عوامل تأثیر گذار ۵۵
۴-۲- ریزساختار ریختگی و همگن سازی ۵۶
۴-۳- ریزساختار فورج و آنیل انحلالی ۵۷
۴-۴- نورد سرد و عوامل مؤثر بر تشکیل مارتنزیت ۶۱
۴-۴-۱- تأثیر درصد کرنش و ترکیب شیمیایی ۶۱
۴-۴-۲- سینتیک تشکیل مارتنزیت ۶۴
۴-۴-۳- تأثیر دما ۶۵
۴-۴-۴- اندازه دانه ۶۶
۴-۴-۵- ریزساختار نورد شده ۶۷
۴-۵- آنیل بازگشت ۶۸
۴-۵-۱- دیلاتومتری ۶۸
۴-۵-۲- تأثیر دما و زمان آنیل بر تغییرات کسر مارتنزیت و آستنیت ۶۹
۴-۵-۳- ریزساختارهای بازگشت شده و بررسی مکانیزم بازگشت ۷۷

۴-۶- خواص مکانیکی ۸۶
۴-۶-۱- نتایج آزمون سختی ۸۶
۴-۶-۲- تطابق رابطه هال-پچ ۸۷
۴-۶-۳- نتایج آزمون کشش ۸۹
۴-۷- نورد دو مرحله‌ای ۹۳
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۵-۱- نتیجه گیری ۹۹
۵-۲- پیشنهادات ۱۰۱
منابع ۱۰۲

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ الف) مقطع دوتایی دیاگرام فاز Fe-Cr-C ب) مقطع دوتایی دیاگرام فاز Fe-Cr-Ni در ۷۰٪Fe ۷

شکل ۲-۲ دیاگرام شفلر برای فولادهای زنگ نزن. ۸

شکل ۲-۳ شماتیکی از ایجاد رسوبات کروم در مرزدانه‌ها و حساس شدن مرزها. ۱۴

شکل ۲-۴ انرژی‌های آزاد شیمیایی فازهای مارتنزیت و آستنیت به عنوان تابعی از دما. ۱۹

شکل ۲-۵ دگرگونی مارتنزیت ایجاد شده توسط تغییر فرم در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی شبه پایدار. ۲۱

شکل ۲-۶ تأثیر میزان کرنش و دما بر کسر حجمی مارتنزیت در فولاد ۳۰۴. ..... ۲۲

شکل ۲-۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از فولاد AISI 304 تغییر شکل یافته در ۱۹۶ °C- نشان دهنده جوانه‌های مارتنزیت α در محل تقاطع باندهای مارتنزیت ε. ۲۴

شکل ۲-۸ مورفولوژی مارتنزیت لایه‌ای در نمونه کرنش یافته تک‌محوری در سرعت کرنش بالا. الف) تصویر الکترون عبوری زمینه روشن و الگوی SAD متناظر آن. ب) تصویر الکترون عبوری زمینه تیره (الف) با استفاده از انعکاس دوقلوئی. ۲۵

شکل ۲-۹ تصاویر الکترون عبوری از نمونه‌های تغییر شکل یافته تحت کشش دومحوری با نرخ کرنش 10^{-3} بر ثانیه در سطوح کرنشی مختلف، الف) ۱۶/۵٪ ب) ۲۶٪ ج) ۴۶٪. الگوی تفرق در شکل (ج) انعکاس‌های α را به علاوه آستنیت و مقداری مارتنزیت نشان می‌دهند. ۲۵

شکل ۲-۱۰ تصاویر الکترون عبوری نمونه‌های تغییر شکل یافته در کشش تک محوری با نرخ کرنش 10^{-3} بر ثانیه در سطوح کرنشی مختلف الف) ۳۲٪ ب) ۴۰٪ ج) ۴۵٪ د) ۵۰٪. ۲۶

شکل ۲-۱۱ شماتیکی از جوانه‌زنی نطفه‌های α در یک محل برخورد باند برشی و یک مدل برای رشد بوسیله به هم پیوستن برای سه مورفولوژی α ۲۷

شکل ۲-۱۲ تغییرات کسر حجمی مارتنزیت با نورد سرد در آلیاژ Fe–۱۸٪Cr–۸/۵٪Ni ۲۸

شکل ۲-۱۳ تصویر TEM و الگوی پراش که نشان دهنده تأثیر نورد سرد بر مورفولوژی مارتنزیت در آلیاژ Fe–۱۸٪Cr–۸/۵٪Ni است. الف) ۵۰٪ کاهش ضخامت ب) ۹۰٪ کاهش ضخامت. ۲۸

شکل ۲-۱۴ الف) تصویر TEM از فولاد AISI 301 نورد شده در دمای محیط نشان دهنده دو نوع مارتنزیت لایه‌ای و سلول-نابجایی ب) الگوی تفرق از مارتنزیت لایه‌ای (دایره سیاه) ج) الگوی تفرق از مارتنزیت سلول-نابجایی (دایره سفید). ۲۹

شکل ۲-۱۵ شمایی از دو مکانیزم بازگشت و فرایندهای ریز شدن دانه در آستنیت. ۳۳

شکل ۲-۱۶ اختلاف در رفتار بازگشت مارتنزیت ناشی از کار سرد به آستنیت در دو فولاد ۱۶Cr–۱۰Ni و ۱۸Cr–۹Ni ۳۴

شکل ۲-۱۷ تغییرات در اندازه دانه‌های آستنیت بازگشت یافته حین آنیل در دمای ۹۲۳K در فولادهای ۱۶Cr–۱۰Ni و ۹Ni–۱۸Cr با نورد سرد ۹۰٪ ۳۵
شکل ۲-۱۸ الگوی تفرق اشعه ایکس برای نمونه کار سرد شده و نمونه‌های آنیل شده به مدت ۳۰ دقیقه در دماهای مختلف. ۳۶
شکل ۲-۱۹ رابطه هال–پچ در فولادهای کم کربن فوق ریزدانه. ۳۷
شکل ۲-۲۰ مقادیر سختی بر حسب اندازه دانه در فولاد زنگ نزن ۳۰۴ ..... ۳۸
شکل ۲-۲۱ وابستگی اندازه دانه و انعطاف‌پذیری برای فولادهای کم کربن. ۴۰
شکل ۲-۲۲ مدل لغزش مرزدانه الف) موقعیت اولیه دانه‌ها، ب) موقعیت دانه‌ها بعد از لغزش لایه اول به سمت راست. ۴۲
شکل ۲-۲۳ مدل زایش و مرگ نابجایی در مرز دانه. ۴۲
شکل ۲-۲۴ شماتیک فرایند ترمومکانیکی برای تولید فولاد فوق ریزدانه 15. 5%Cr − 10%Ni ۴۳
شکل ۲-۲۵ فولاد فوق ریزدانه 15. 5%Cr − 10%Ni تولید شده توسط ۹۰٪ نورد سرد و آنیل در k ۸۷۳ با اندازه دانه میانگین ۵۰۰ نانومتر ۴۳
شکل ۲-۲۶ شمایی از عملیات ترمومکانیکی بکار رفته برای تولید فولاد زنگ‌نزن آستنیتی الف) فرایند سیکل ثانوی (SCP) ب) فرایند تبلور مجدد (RP). ۴۴
شکل ۲-۲۷ریزساختار فولاد نانوساختار شده ۳۰۱ توسط عملیات فرایند نورد سرد و آنیل در دو مرحله. ۴۵
شکل ۲-۲۸ ریزساختار فولاد فوق ریزدانه ۳۰۴L تولید شده توسط عملیات ترمومکانیکی ۴۶
شکل ۳-۱ نمونه آماده‌سازی شده قبل از نورد سرد. ۴۸
شکل ۳-۲ شماتیک فرایند ترمومکانیکی انجام شده برای تولید فولاد فوق ریزدانه الف) فرایند یک مرحله‌ای ب) فرایند دومرحله‌ای. ۴۹
شکل ۳-۳ دستگاه فریتوسکوپ مدل FMP30 ..... ۵۰
شکل ۳-۴ نمونه آزمون کشش. ۵۴
شکل ۴-۱ ریزساختار حاصل از ریخته‌گری فولاد ۲۰۱. ..... ۵۶
شکل ۴-۲ الگوی XRD ساختار پس از ریخته‌گری. ۵۶
شکل ۴-۳ ریزساختار فولاد ۲۰۱ پس از عملیات همگن سازی. ۵۷
شکل ۴-۴ ریزساختار پس از عملیات فورج نشان دهنده وقوع تبلور مجدد دینامیکی و کاهش اندازه دانه‌ها. ۵۸
شکل ۴-۵ الگوی XRD نمونه فورج شده ۵۸
شکل ۴-۶ ریزساختار نمونه‌های آنیل شده در ۱۱۵۰ در زمان‌های الف) ۱ ساعت ب) ۲ ساعت ج) ۳ ساعت. ۵۹

شکل ۴-۷ الگوی XRD برای نمونه ۳ ساعت آنیل در ۱۱۵۰°C. ۶۰
شکل ۴-۸ منحنی کسر مارتنزیت تشکیل شده بر حسب میزان کاهش در سطح مقطع. ۶۲
شکل ۴-۱۰ الگوی XRD نمونه‌های نورد سرد شده در دمای محیط الف) ۱۰٪کار سرد ب) ۳۰٪ کار سرد ج) ۷۰٪ کار سرد. ۶۳
شکل ۴-۱۱ مقایسه دو روش محاسبه مقدار مارتنزیت. ۶۴
شکل ۴-۱۲ مقایسه داده های تجربی و منحنی تئوری برای تشکیل مارتنزیت. ۶۵
شکل ۴-۱۳ منحنی نرخ تشکیل مارتنزیت بر حسب کرنش پلاستیک. ۶۵
شکل ۴-۱۴ تغییرات کسر مارتزیت بر حسب کاهش سطح مقطع در دماهای مختلف. ۶۶
شکل ۴-۱۵ تغییرات کسر مارتنزیت با افزایش درصد تغییر شکل در اندازه دانه‌های مختلف. ۶۶
شکل ۴-۱۶ ریزساختار فولاد نوردشده پس ازالف) ۵٪ ب) ۷٪ ج) ۲۰٪ د) ۳۰٪ نورد سرد دردمای محیط. ۶۷
شکل ۴-۱۷ نمودار دیلاتومتری نمونه کار سرد شده. ۶۹
شکل ۴-۱۸ الگوی XRD برای الف) نمونه ۹۰٪ کارسرد در دمای محیط و آنیل شده در دمای ۷۵۰°C در زمان‌های ب) ۱۵ثانیه ج) ۱۸۰ ثانیه د) ۱۲۰۰ ثانیه ه) ۱۸۰۰ ثانیه. ۷۰
شکل ۴-۱۹ الگوی XRD برای نمونه ۹۰٪ نورد سرد و آنیل شده در دمای ۸۰۰°C در زمان‌های الف) ۶۰ ثانیه ب) ۱۸۰ ثانیه ج) ۶۰۰ ثانیه د) ۱۲۰۰ ثانیه. ۷۱
شکل ۴-۲۰ الگوی XRD برای نمونه ۹۰٪ نورد سرد و آنیل شده در دمای ۸۵۰°C در زمان‌های الف) ۱۵ ثانیه ب) ۳۰ ثانیه ج) ۱۲۰۰ ثانیه د) ۱۸۰۰ ثانیه. ۷۱
شکل ۴-۲۱ خوردگی مرزدانه‌ای به دلیل حساس شدن مرزها در نمونه آنیل شده در دمای ۹۰۰°C به مدت ۱۸۰ ثانیه. ۷۳
شکل ۴-۲۲ تصویر نمونه آنیل شده در دمای ۸۵۰°C به مدت ۱۲۰۰ ثانیه که نشان دهنده تشکیل مارتنزیت از مناطق اطراف مرزدانه‌هاست. ۷۴
شکل ۴-۲۳ نتایج آنالیز EDS از نمونه آنیل شده به مدت ۱۲۰۰ ثانیه در دمای ۸۵۰°C الف) درون دانه‌ها ب) مرزدانه‌ها. ۷۴
شکل ۴-۲۵ تصویر ریزساختار میکروسکوپی از نمونه ۹۰٪ نورد سرد و آنیل شده در دمای ۷۵۰°C در زمان‌های الف) ۳۰۰ ب) ۶۰۰ ج) ۱۲۰۰ ثانیه. ۷۷
شکل ۴-۲۶ ریزساختار نمونه ۹۰٪ کار سرد شده و آنیل شده در دمای۸۰۰°C در زمان‌های الف) ۱۵ ثانیه ب) ۳۰ ثانیه ج) ۶۰ ثانیه د) ۶۰۰ ثانیه. ۷۸
شکل ۴-۲۷ ریزساختار نمونه ۹۰٪ کار سرد شده و آنیل شده در دمای۸۰۰°C در زمان‌های الف) ۱۵ ثانیه ب) ۳۰ ثانیه ج) ۶۰ ثانیه د) ۱۸۰ ثانیه. ۸۰

شکل ۴-۲۸ تغییرات اندازه دانه برحسب زمان در دماهای مختلف آنیل. ۸۳
شکل ۴-۲۹ ریزساختار ۹۰٪ کار سرد و آنیل شده در دمای ۹۰۰°C در زمان‌های الف) ۳۰ ثانیه ب) ۶۰ ثانیه. ۸۳
شکل ۴-۳۰ تغییرات سختی بر حسب زمان آنیل در دمای مختلف. ۸۶
شکل ۴-۳۱ تغییرات سختی با اندازه دانه و تطابق رابطه هال-پچ. ۸۸
شکل ۴-۳۲ منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های الف) آنیل انحلالی شده ب) نمونه نورد سرد شده به میزان ۹۰٪ نورد سرد شده به میزان ۹۰٪ و بازگشت شده در دمای۸۵۰°C در زمان ج) ۱۵ ثانیه د) ۳۰ ثانیه و) ۶۰ ثانیه. ۹۰
شکل ۴-۳۳ تصویر میکروسکوپ SEM از سطح مقطع شکست نمونه‌های کشش الف) ۹۰٪ نورد سرد شده. ۹۰٪در صد نورد سرد شده و آنیل در دمای ۸۵۰°C به مدت الف) ۳۰ ثانیه ب) ۶۰ ثانیه. ۹۰
شکل ۴-۳۴ الف)ریزساختار ۷۰٪ نورد سرد شده و آنیل شده در دمای ۸۵۰°C به مدت زمان ۱۲۰ ثانیه. ریزساختار ۶۰٪ نورد سرد شده پس از مرحله الف و آنیل شده در دمای ۸۵۰°C به مدت ب) ۳۰ ثانیه ج) ۶۰ ثانیه. ۹۴
شکل ۴-۳۵ منحنی تنش کرنش نمونه آنیل شده به مدت ۶۰ ثانیه در دمای ۸۵۰°C پس از نورد سرد ثانوی به میزان ۶۰٪. ۹۶

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱ انواع انجماد، واکنش‌ها و ریز ساختارهای حاصل شده در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۱۰

جدول ۲-۲ رسوبات فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۱۳

جدول ۲-۳ ساختار عمومی، روشهای استحکام دهی و خواص برخی فولادهای زنگ‌نزن ۱۵

جدول ۲-۴ خواص کششی پس از مراحل مختلف عملیات ترمومکانیکی ۴۵

جدول ۳-۱ ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن ۲۰۱ استفاده شده در این تحقیق (در صد وزنی) ۴۷

جدول ۴-۱ دماهای M_s و M_d محاسبه شده برای فولاد زنگ نزن آستنیتی ۵۵

جدول ۴-۲ مقادیرفریت دلتا و اندازه دانه میانگین آستنیت در زمان‌های مختلف آنیل در دمای ۱۱۵۰°C ۶۰

جدول ۴-۳ ریزساختار و اندازه دانه‌های آستنیت برای شرایط مختلف آنیل ۸۵

جدول ۴-۴ خواص مکانیکی فولاد، قبل و بعد از عملیات ترمومکانیکی نورد دو مرحله‌ای ۹۶

جدول ۴-۵ نتایج فرایندهای ترمومکانیکی صورت گرفته جهت تولید فولاد فوق ریزدانه آستنیتی ۹۷

چکیده

تولید فولادهای فوق ریزدانه/نانوساختار به منظور دستیابی همزمان به استحکام و چقرمگی بالا در دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. فرایند مارتنزیت یکی از فرایندهای ترمومکانیکی پیشرفته جهت تولید فولادهای فوق ریزدانه زنگ نزن آستنیتی است. این فرایند شامل نورد سرد جهت تشکیل مارتنزیت ایجاد شده به‌وسیله کرنش و بازگشت آن به آستنیت فوق ریزدانه است. هدف از این پژوهش ارزیابی متغیرهای فرایند مارتنزیت جهت تولید فولاد فوق ریزدانه زنگ‌نزن آستنیتی ۲۰۱ بود. بدین منظورشمش‌های فولاد مزبور پس از ریخته‌گری در قالب فلزی به مدت ۱۵ ساعت در دمای ۱۲۰۰°C همگن شدند. سپس در محدود دمایی ۱۲۰۰°C–۱۱۵۰ عملیات فورج داغ صورت گرفت. نمونه‌های فورج شده جهت حذف فازهای ثانویه در دمای ۱۱۵۰°C در زمان‌های مختلف آنیل شدند. جهت ایجاد ساختار فوق ریزدانه از دو فرایند یک مرحله ای و دو مرحله‌ای نورد سرد و آنیل استفاده شد. بدین منظور نمونه‌های آنیل شده در دماهای ۱۰-، صفر و ۲۵ درجه سانتیگرادتحت عملیات نورد سرد قرار گرفتند و عملیات بازگشت در زمان‌های ۱۸۰۰-۱۵ ثانیه در محدوده دمایی ۹۰۰°C–۷۵۰ صورت گرفت. ارزیابی تغییرات ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و تغییرات فازی توسط فریتوسکوپ و پراش پرتو ایکس (XRD) در خلال مراحل فوق صورت گرفت و همچنین از یک مدل ریاضی برای بررسی سینتیکی تبدیل آستنیت به مارتنزیت حین نورد سرد استفاده شد. خواص مکانیکی محصول تولید شده توسط آزمون سختی و کشش تعیین شد.

نتایج نشان داد که عملیات همگن سازی در دمای ۱۲۰۰°C سبب افزایش بسیار زیاد اندازه دانه‌ها و کاهش چشمگیر میزان فریت دلتای ناشی از انجماد شد. عملیات فورج داغ علی‌رغم کاهش شدید اندازه دانه‌ها سبب افزایش کسر حجمی فریت دلتا گردید که این افزایش به گرمای آدیاباتیک ایجاد شده در حین انجام فورج و ایجاد مناطق ذوب موضعی در فولاد نسبت داده شد. نتایج حاصله در نمونه‌های نوردی نشان داد که با کاهش دمای نورد سرد و همچنین افزایش اندازه دانه‌های اولیه آستنیت، کرنش اشباع تشکیل مارتنزیت کاهش می‌یابد. مدل بکار رفته برای تعیین میزان مارتنزیت ایجاد شده توسط کرنش تطابق خوبی را با داده‌های تجربی نشان داد. نتایج بدست آمده از عملیات بازگشت حاکی از کاهش کسر مارتنزیت در مراحل ابتدایی و سپس افزایش آن با گذشت زمان بود که افزایش مارتنزیت به دلیل تشکیل کاربیدها و بالا رفتن موضعی دمای M_s و نهایتاً ایجاد مارتنزیت حرارتی حین مرحله کوئنچ بود. در فرایند نورد یک مرحله‌ای بیشترین کسر بازگشت مارتنزیت به همراه کوچکترین اندازه دانه در دمای ۸۵۰°C بدست آمد. کوچکترین اندازه دانه در این حالت در حدود ۹۰ نانومتر بود که علاوه بر داشتن استحکام کششی نهائی ۱۵۲۰ MPa دارای در صد ازدیاد طول حدود ۲۷٪ بود. در فرایند نورد دو مرحله‌ای اندازه دانه‌های بدست آمده پس از انجام بازگشت ثانویه به مدت ۶۰ ثانیه در دمای ۸۵۰°C در حدود ۲۶۰ نانومتر بود. در این شرایط استحکام کششی نهائی بدست آمده ۱۲۸۵ MPa بوده و ازدیاد طول درحدود ۳۲٪ بدست آمد.

کلمات کلیدی: فرایند ترمومکانیکی پیشرفته، فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، نورد سرد، آنیل بازگشت، مارتنزیت.

فصل اول

مقدمه

مقدمه

در طی سال‌های اخیر تولید فولادهای استحکام بالا از فولادهای تجارتی معمولی به منظور افزایش نسبت استحکام به وزن سازه‌ها، بسیار توسعه یافته است. در این میان تولید فولادهای زنگ نزن آستنیتی با استحکام بالا به دلیل کاربرد گسترده این دسته از فولادها در صنعت و ضعف استحکام آن‌ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بنا بر تحقیقات انجام شده تکنیک‌های گوناگونی جهت افزایش استحکام فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی وجود دارد که از آن‌ها می‌توان به ریزدانه کردن، استحکام بخشی توسط محلول جامد، استحکام بخشی استحاله‌ای، کارسختی، پیرکرنشی و استحکام بخشی رسوبی اشاره کرد. در میان تمامی مکانیزم‌های استحکام بخشی، ریزدانه کردن تنها روشی است که سبب افزایش همزمان چقرمگی و استحکام می‌شود. ریزدانه کردن این فولادها تا اندازه‌های زیر میکرون و نانو می‌تواند علاوه بر افزایش چشمگیر استحکام، چقرمگی را نیز بهبود بخشد.

فرایندهای ترمومکانیکی متداول به عنوان روش‌های ابتدایی جهت اصلاح اندازه دانه‌های فلزات وآلیاژها به‌ویژه آلیاژهای آهنی شناخته می‌شوند. لیکن حداقل اندازه دانه‌های بدست آمده در این روش‌ها برای فلزات مختلف در محدوده‌ی چند میکرون بوده است. از شروع قرن ۲۱ تلاش های فراوانی جهت ایجاد ساختارهایی با اندازه دانه‌های زیر میکرون و نانو در فولادها به منظور افزایش خواص و کاربرد آن‌ها صورت گرفته است. در سال‌های اخیر

روش‌هایی که جهت ایجاد ساختارهای فوق ریزدانه بکار گرفته شده عمدتاً به دو صورت کلی نمود پیدا کرده است. یکی فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید[۱] و دیگری فرایندهای ترمومکانیکی پیشرفته[۲].

فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید فرایندهایی هستند که توسط اعمال کرنش بزرگ در دمای اتاق یا دماهای بالاتر یعنی در محدوده دمایی کار گرم صورت می گیرند. این فرایندها می توانند جهت تولید فولادهای فوق ریزدانه با اندازه دانه های کمتر از ۱ میکرون بکار گرفته شوند. از میان فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید می‌توان به پرس زاویه‌ای با کانال‌های مساوی[۳]، نورد اتصالی تجمعی[۴]، پیچش در فشار بالا[۵] وتغییر شکل کرنش بالای دو جهته[۶] اشاره کرد که برای فلزات و آلیاژهای مختلف کاربرد داشته اند. گرچه روش‌های تغییر شکل پلاستیک در تولید فلزات و آلیاژهای فوق ریزدانه موفق بوده‌اند ولی برخی از مشکلات این فرایندها مانند هزینه‌های تولید بالا، محدودیت ابعاد نمونه‌های مورد استفاده وآلودگی‌های ایجاد شده در محصول تولیدی سبب محدودیت استفاده آن‌ها درمقیاس صنعتی شده است. در مقایسه با روش‌های تغییر فرم پلاستیکی شدید، فرایندهای ترمومکانیکی پیشرفته نیاز به کرنش کمتری دارند و برای نمونه‌های با ابعاد بزرگ مناسب‌تر می‌باشند.

یکی از فرایندهای ترمومکانیکی پیشرفته که امروزه برای تولید فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی فوق ریزدانه توجه زیادی را به خود جلب کرده است فرایند ماتنزیت می‌باشد که شامل نورد سرد سنگین برای تبدیل آستنیت (γ) نیمه‌پایدار به مارتنزیت ($\acute{\alpha}$) در حین کرنش و در ادامه بازگشت مارتنزیت به آستنیت در مرحله آنیل در زمان‌ها و دماهای نسبتاً پایین می‌باشد. این فرایند به دلیل سهولت و استفاده جهت تولید قطعات بزرگ نظیر ورق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این روش، آستنیت در زیر دمای M_{d30} در اثر تغییرشکل سرد به مارتنزیت تبدیل می‌شود. در ادامه فرایند تغییرشکل، مارتنزیت موجود در ریزساختار خرد شده و مکان‌های مناسب جوانه‌زنی را برای بازگشت مارتنزیت به آستنیت در حین عملیات آنیل بعدی فراهم می کند و منجر به ریزدانگی فولاد و بهبود خواص مکانیکی آن می گردد. در این فرایند انتخاب صحیح پارامترهای مؤثر بر آنیل بازگشت، جهت حصول ساختاری با اندازه دانه‌های نانو و زیر میکرون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در پژوهش حاضر، ازفرایند ترمومکانیکی پیشرفته مارتنزیت جهت تولید ورق‌های فولاد زنگ نزن آستنیتی ۲۰۱ با دانه‌های بسیار ریز استفاده شد و تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی فولاد مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برخی پارامترهای مؤثر در انجام نورد سرد جهت شکیل مارتنزیت و همچنین پارامترهای بازگشت مورد ارزیابی قرار

---

[1] Sever Plastic Deformation (SPD)
[2] Advanced Thermomechanical Processes
[3] Equal-channel angular pressing (ECAP)
[4] Accumulative Roll Bonding (ARB)
[5] High Pressure Torsion (HPT)
[6] Bi-directional large strain deformation

گرفت. فصل دوم پایان نامه، به معرفی فولادهای زنگ آستنیتی و ویژگی‌های آن‌ها، روش‌های مختلف ریز کردن دانه‌ها از طریق کار مکانیکی همراه با معرفی عوامل مؤثر بر تشکیل و بازگشت مارتنزیت در حین مراحل نورد سرد و آنیل می‌پردازد. همچنین ارزیابی خواص مکانیکی و بررسی اجمالی از مکانیزم‌های تغییر شکل فلزات فوق ریزدانه/نانوساختار، از مباحث دیگر این فصل است. در فصل سوم، نحوه انجام فرایند، مواد مورد استفاده و آزمایش‌های انجام شده بر روی فولاد توضیح داده می‌شود. فصل چهارم به بیان نتایج بدست آمده و تحلیل و بحث بر روی آنها اختصاص یافته است و نهایتاً در فصل پنجم نتیجه‌گیری کلی از این پژوهش انجام شده ارائه می‌گردد.

فصل دوم

مطالعات مروری

۲-۱- مقدمه

بعد از فولادهای کربنی و فولادهای C-Mn، فولادهای زنگ نزن به علت خواص خوردگی مطلوب و جوش‌پذیری مناسب، بیشترین استفاده را در میان فولادها به خود اختصاص داده‌اند. این فولادها برای زنگ‌نزن بودن باید حاوی حداقل ۱۰/۵ درصد وزنی کروم باشند. این میزان کروم سبب تشکیل یک سطح غیر فعال اکسیدی شده و از اکسیداسیون فلز در شرایط خورنده و غیر خورنده جلوگیری می‌کند. گرچه باید در نظر داشت که بسیاری از فولادهای زنگ‌نزن با بیش از ۱۲ درصد وزنی کروم در برخی شرایط محیطی دچار زنگ زدگی می‌شوند. این موضوع ناشی از آن است که مقداری از کروم به صورت کاربید و یا ترکیبات دیگر در می‌آید و میزان کروم محلول در زمینه کاهش یافته و به کمتر از حد مورد نیاز برای تشکیل پوسته اکسیدی محافظ می‌رسد. از این رو محیط‌های خورنده که با حمله کردن به پوسته اکسیدی سبب ازبین رفتن آن می‌گردند سبب خوردگی فولادهای زنگ‌نزن می‌شوند. خوردگی می‌تواند به صورت‌های مختلفی بروز کند. نوع خوردگی متأثر از نوع محیط خورنده شرایط متالورژیکی ماده و تنش‌های موضعی موجود می‌باشد. برخی فولادهای زنگ‌نزن حتی در دماهای بالا از مقاومت خوبی در برابر اکسیداسیون برخوردارند و به همین خاطر به عنوان آلیاژهای مقاوم به حرارت شناخته شده‌اند. مقاومت به اکسیداسیون در دمای بالا نیز به‌خاطر میزان بالای کروم (۳۰-۲۵ درصد وزنی) فولاد می‌باشد که برخی از آلیاژهای پرکروم می‌توانند در دماهای بالا تر از $1000^{\circ}C$ نیز مقاومت کنند [۲-۱].

فولادهای زنگ‌نزن دارای کاربردهای گسترده‌ای از جمله استفاده در عملیات تولید انرژی، شیمیایی و کاغذسازی، صنایع پالایش نفت و گاز و ساخت بسیاری از محصولات نظیر قطعات اتومبیل و لوازم آشپزخانه هستند همچنین فولادهای زنگ‌نزن به دلیل زنگ‌نزن بودن و همچنین به خاطر خلوص و بهداشتی بودن به طور گسترده در کاربردهای استریل مانند فرایندهای داروسازی، تولید لبنیات و صنایع غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲].

۲-۲- دسته بندی فولادهای زنگ‌نزن

بر خلاف سایر مواد که دسته‌بندی آن‌ها معمولاً بر اساس ترکیب شیمیایی صورت می‌گیرد، دسته بندی فولادهای زنگ‌نزن بر اساس فاز یا فازهای متالورژیکی غالب می‌باشد. سه فاز اصلی ممکن در فولادهای زنگ‌نزن، مارتنزیت، فریت وآستنیت است. مؤسسه آهن و فولاد آمریکا (AISI) از سیستمی با سه شماره که گاهی با یک حرف نیز همراه می‌شود برای تعیین نوع فولاد زنگ‌نزن آستنیتی استفاده می‌کند. در یک تقسیم‌بندی کلی انواع فولادهای زنگ‌نزن عبارتند از [۲]:

- فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی (4XX)
- فولادهای زنگ‌نزن فریتی (4XX)
- فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی (3XX و2XX)
- فولادهای زنگ‌نزن دو فازی (آستنیتی و فریتی)
- سختی رسوبی (PH)

۲-۳- دیاگرام‌های تعادلی و غیر تعادلی

۲-۳-۱- دیاگرام های تعادلی

متالورژی فولادهای زنگ نزن به دلیل وجود تعداد عناصر آلیاژی بالا در آن‌ها مشکل است. به هر حال سه دیاگرام تعادلی Fe-Cr، Fe-Cr-C، Fe-Cr-Ni اساس تغییرات فازی فولادهای زنگ‌نزن را تشکیل می‌دهند. دیاگرام تعادلی Fe-Cr اساس فولادهای زنگ نزن فریتی است. فولاد با محتوای کروم بیش از ۱۲/۷ درصد وزنی به صورت فریتی منجمد شده و در دمای اتاق نیز فریتی باقی می‌ماند. علاوه بر آن باید به این نکته اشاره شود که در فولادهایی با مقادیر کروم بیش از ۲۰ درصد و در دماهای پایین، یک ترکیب بین فلزی به‌نام سیکما (σ) می‌تواند تشکیل شود. سیکما (σ) یک فاز سخت و ترد می‌باشد و وجود آن در ریزساختار مضر است. از آنجایی‌که سینتیک تشکیل فاز سیکما (σ) آهسته است لذا جهت جلوگیری از تشکیل فاز سیکما (σ) باید زمان نگهداری در محدوده دمایی تشکیل