

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

ارزیابی رفتار ترمومکانیکی فولاد زنگ نزن 17-4 PH

رساله دکتری مهندسی مواد
حامد میرزاده سلطان پور

استاد راهنما
دکتر عباس نجفی زاده



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

رساله دکتری مهندسی مواد آقای حامد میرزاده سلطان پور

تحت عنوان

ارزیابی رفتار ترمومکانیکی فولاد زنگ نزن PH 4-17

در تاریخ ۱۳۹۰/۷/۹ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|-------------------------|-------------------------------|
| دکتر عباس نجفی زاده | ۱- استاد راهنمای رساله |
| دکتر احمد کرمانپور | ۲- استاد مشاور رساله |
| دکتر عباس اکبرزاده | ۳- استاد داور |
| دکتر عباس زارعی هنترکی | ۴- استاد داور |
| دکتر محمد رضا طرقی نژاد | ۵- استاد داور |
| دکتر مسعود پنجه پور | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |

تشکر و قدردانی

اکنون که بیاری خداوند یکتا به پایان مراحل تحصیلی خود رسیده ام، بر خود لازم می دانم که پس از سپاسگذاری از خدای بزرگ، از کلیه اساتید محترم دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان که در طول مدت تحصیلات دانشگاهی، از مقطع لیسانس تا دکتری، همیشه مرا مورد لطف خود قرار داده اند، صمیمانه تشکر کنم. در این بین باید از جناب آقای دکتر نجفی زاده که استاد راهنمای این رساله هستند و همواره از اینجانب حمایت کرده اند و نیز جناب آقای دکتر کرمانپور که استاد مشاور این رساله هستند و اینجانب همواره از راهنمایی های ایشان بهره مند شده ام، تشکر و قدردانی ویژه نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر کبر از دانشگاه پلی تکنیک کاتالونیا که زمینه گسترش تحقیقات مربوط به این رساله را فراهم کردند، صمیمانه سپاسگذاری می کنم. در پایان، از خانواده خوبم به خصوص پدر و مادر عزیزم، که همیشه مرا صمیمانه یاری نموده و مورد حمایت های بی دریغ خود قرار داده اند، بسیار سپاسگذارم.

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

تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده
۲	فصل اول: مقدمه
۴	فصل دوم: مروری بر منابع
۴	۱-۲- فولاد های زنگ نزن رسوب سختی
۸	۲-۲- عملیات حرارتی فولاد PH 17-4
۸	۱-۲-۲- همگن کردن و آنیل انحلالی
۱۰	۲-۲-۲- عملیات رسوب سختی
۱۳	۳-۲- شکل دهی فولاد PH 17-4
۱۴	۴-۲- تغییر شکل در دمای بالا
۱۵	۵-۲- ویژگی های تبلور مجدد دینامیکی
۱۵	۱-۵-۲- منحنی های سیلان و ریزساختارهای حاصل
۱۸	۲-۵-۲- جوانه زنی و رشد در تبلور مجدد دینامیکی
۲۱	۳-۵-۲- شرایط بحرانی برای آغاز تبلور مجدد دینامیکی
۲۴	۴-۵-۲- اندازه دانه متبلور شده دینامیکی
۲۵	۵-۵-۲- تنش ها و کرنش های منحنی های سیلان
۲۸	۶-۵-۲- سینتیک تبلور مجدد دینامیکی
۲۹	۶-۲- آنیل پس از تغییر شکل داغ
۳۰	۷-۲- مدل کردن تنش سیلان
۳۰	۱-۷-۲- رابطه سینوس هایپربولیک با در نظر گرفتن کرنش
۳۱	۲-۷-۲- معادلات بازیابی دینامیکی و رابطه اورامی برای تبلور مجدد دینامیکی
۳۲	۳-۷-۲- شبکه های عصبی مصنوعی
۳۸	۸-۲- جمع بندی
۳۸	۱-۸-۲- ارزیابی رفتار ترمومکانیکی فولاد زنگ نزن PH 17-4
۳۹	۲-۸-۲- محاسبه ثوابت ماده در تغییر شکل داغ
۳۹	۳-۸-۲- رابطه فیزیکی برای تغییر شکل داغ
۴۰	۴-۸-۲- بررسی سینتیک تبلور مجدد دینامیکی
۴۰	۵-۸-۲- مدل کردن و پیش بینی تنش سیلان
۴۱	فصل سوم: مواد و روش تحقیق
۴۱	۱-۳- فولادهای مورد استفاده
۴۲	۲-۳- نمونه سازی و دستگاه های مورد استفاده برای آزمایش فشار داغ

۴۴	۳-۳- آزمایش های فشار داغ
۴۴	۳-۴- متالوگرافی نمونه ها
۴۵	۳-۵- آماده سازی منحنی های سیلان
۴۵	۳-۵-۱- حذف اثر اصطکاک از منحنی های سیلان
۴۶	۳-۵-۲- هموار کردن منحنی های سیلان
۴۷	۳-۶- مدل سازی توسط شبکه های عصبی مصنوعی
۵۰	فصل چهارم: یافته ها و بحث
۵۰	۴-۱- تغییر شکل داغ فولاد PH 17-4
۵۰	۴-۱-۱- منحنی های سیلان
۵۴	۴-۱-۲- بررسی های مربوط به منحنی های نرخ کارسختی
۵۷	۴-۱-۳- رفتارهای سیلانی در تبلور مجدد دینامیکی
۶۱	۴-۱-۴- ریزساختارهای حاصل از تغییر شکل
۶۳	۴-۱-۵- ثوابت و انرژی اکتیواسیون ظاهری تغییر شکل داغ
۶۸	۴-۱-۶- مشخصه یابی منحنی های سیلان بر حسب Z
۷۰	۴-۱-۷- مشخصه یابی اندازه دانه بر حسب Z
۷۲	۴-۲- مدل سازی منحنی های سیلان
۷۳	۴-۲-۱- رابطه سینوس هایپر بولیک با در نظر گرفتن کرنش
۷۶	۴-۲-۲- به دست آوردن یک رابطه جدید برای تنش سیلان داغ
۸۰	۴-۲-۳- شبکه های عصبی مصنوعی
۸۲	۴-۲-۴- رابطه اورامی برای تبلور مجدد دینامیکی
۸۵	۴-۲-۵- به دست آوردن کرنش بحرانی توسط روابط تنش سیلان
۸۷	۴-۳- رابطه فیزیکی برای تغییر شکل داغ
۹۲	۴-۴- بررسی سینتیک تبلور مجدد دینامیکی
۹۲	۴-۴-۱- محاسبه کسر متبلور شده دینامیکی با استفاده از منحنی های سیلان
۹۵	۴-۴-۲- بررسی سینتیک تبلور مجدد دینامیکی فولاد PH 17-4
۹۸	۴-۵- جمع بندی
۱۰۱	فصل پنجم- نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۰۱	۵-۱- نتیجه گیری
۱۰۳	۵-۲- پیشنهادها
۱۰۴	پیوست ۱
۱۰۶	پیوست ۲
۱۱۶	مراجع

فهرست شکل‌ها

عنوان

صفحه

۸	شکل ۱-۲. منحنی دگرگونی در حین سرد کردن پیوسته برای فولاد PH 17-4
۹	شکل ۲-۲. دیاگرام فازی آهن-مس
۹	شکل ۳-۲. تصاویر میکروسکوپی فولاد PH 17-4 در حالت آئیل انحلالی شده
۱۱	شکل ۴-۲. تصاویر میکروسکوپی فولاد PH 17-4 در حالت H900
۱۲	شکل ۵-۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از فولاد PH 17-4 در حالت H1150
۱۳	شکل ۶-۲. منحنی های رسوب سختی فولاد PH 17-4
۱۵	شکل ۷-۲. شماتیک منحنی های تنش- کرنش مربوط به رفتارهای دینامیکی در دمای بالا
۱۶	شکل ۸-۲. رفتارهای تک اوجی (شکل سمت راست) و سیکلی (شکل سمت چپ) همراه با نمودارهای تبلور مجدد
۱۷	شکل ۹-۲. تحولات ریزساختاری در تبلور مجدد دینامیکی برای نمونه های پیچش داغ فولاد زنگ نزن ۳۰۴
۲۰	شکل ۱۰-۲. ریزساختارهای TEM یک فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در دمای ۸۰۰ °C و تغییر شکل یافته توسط فشار داغ
۲۱	شکل ۱۱-۲. مدلی برای جوانه زنی تبلور مجدد دینامیکی توسط مکانیزم تحدیبی و شیوه جداشدن دانه جدید از زمینه
۲۲	شکل ۱۲-۲. منحنی های $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ بر حسب σ در شرایط مختلف برای فولاد ۳۰۴ در آزمایش پیچش داغ
۲۳	شکل ۱۳-۲. منحنی های نرخ کارسختی و منفی مشتق نرخ کارسختی بر حسب تنش سیلان برای فولاد ۳۰۴ در پیچش داغ
۲۳	شکل ۱۴-۲. منحنی های سیلان و نرخ کارسختی در دو حالت مختلف برای فولاد ۳۲۱ در آزمایش فشار داغ
۲۴	شکل ۱۵-۲. متوسط اندازه دانه های تبلور مجدد دینامیکی در حالت پایا (D_s)
۲۶	شکل ۱۶-۲. ارتباط پارامتر زنی-هلمن و تنش اوج
۲۸	شکل ۱۷-۲. سینتیک تبلور مجدد دینامیکی
۳۱	شکل ۱۸-۲. پیش بینی تنش سیلان توسط رابطه سینوس هایپربولیک با در نظر گرفتن کرنش برای یک فولاد زنگ نزن آستیتی
۳۲	شکل ۱۹-۲. پیش بینی تنش سیلان توسط معادلات بازیابی دینامیکی و رابطه اورامی برای یک فولاد زنگ نزن ۳۰۴
۳۴	شکل ۲۰-۲. ساختار یک نورون مغز انسان به صورت شماتیک
۳۴	شکل ۲۱-۲. شمای یک لایه شبکه عصبی با S نورون و چگونگی عملکرد آن
۳۴	شکل ۲۲-۲. توابع تحریک غیرخطی پر کاربرد
۳۵	شکل ۲۳-۲. یک شبکه عصبی روبه جلوی چند لایه
۳۶	شکل ۲۴-۲. اثر تغییر پارامترهای شبکه بر پاسخ شبکه
۳۸	شکل ۲۵-۲. پیش بینی تنش سیلان توسط شبکه عصبی مصنوعی برای یک فولاد کربنی
۴۲	شکل ۱-۳. تصویر شماتیک دستگاه Baehr DIL 805 و نمونه فشار در درون کوئل مسی آبگرد
۴۳	شکل ۲-۳. طرح و ابعاد نمونه های فشار داغ بر اساس طرح مخزن رسته گیو
۴۳	شکل ۳-۳. تصویر دستگاه Instron 4507 و نمونه فشار در درون محفظه
۴۴	شکل ۴-۳. شماتیک سیکل ترمومکانیکی انجام شده
۴۷	شکل ۵-۳. شماتیک شبکه عصبی مصنوعی به کار گرفته شده برای مدل کردن تنش سیلان
۴۸	شکل ۶-۳. اثر نرخ کرنش و لگاریتم نرخ کرنش بر شبکه عصبی مربوط به فولاد PH 17-4
۴۹	شکل ۷-۳. شرایط توقف آموزش شبکه

- شکل ۱-۴. فایل های asc و mul حاصل از آزمایش های فشار داغ
- شکل ۲-۴. مقایسه برخی از منحنی سیلان اصلاح شده با در نظر گرفتن اثر اصطکاک با منحنی های اصلاح نشده
- شکل ۳-۴. هموار کردن منحنی های سیلان فولاد 17-4 PH
- شکل ۴-۴. منحنی های سیلان حاصل از آزمایش فشار داغ فولاد زنگ نزن 17-4 PH
- شکل ۵-۴. روش به دست آوردن تنش ها و کرنش های مهم منحنی های سیلان
- شکل ۶-۴. بررسی انجام شدن یا نشدن تبلور مجدد دینامیکی در برخی از نمونه های فولاد 17-4 PH
- شکل ۷-۴. بررسی منحنی های سیلان فولاد 17-4 PH در حالت های مختلف
- شکل ۸-۴. شماتیک رفتارهای سیلان تک اوجی، سیکلی و پایای گذرای چندگانه در تبلور مجدد دینامیکی
- شکل ۹-۴. برخی از ریزساختارهای حاصل از تغییر شکل فولاد 17-4 PH
- شکل ۱۰-۴. برخی از ریزساختارهای حاصل از فشار داغ فولاد 17-4 PH
- شکل ۱۱-۴. ریزساختارهای حاصل از تغییر شکل در دمای 1150°C و نرخ های کرنش مختلف
- شکل ۱۲-۴. ریزساختارهای حاصل از تغییر شکل در نرخ کرنش 1 s^{-1} و دماهای مختلف
- شکل ۱۳-۴. به دست آوردن ثوابت تغییر شکل داغ و انرژی اکتیواسیون تغییر شکل برای فولاد 17-4 PH
- شکل ۱۴-۴. منحنی های مربوط به معادلات تنشی
- شکل ۱۵-۴. ارتباط تنش ها (بر حسب MPa) و کرنش های مهم منحنی های سیلان فولاد 17-4 PH با پارامتر زرن-هلمن
- شکل ۱۶-۴. ارتباط اندازه دانه متبلور شده دینامیکی در حالت پایا با پارامتر زرن-هلمن
- شکل ۱۷-۴. ارتباط تنش اوج با اندازه دانه متبلور شده دینامیکی در حالت پایا
- شکل ۱۸-۴. نقشه تبلور مجدد دینامیکی برای فولاد 17-4 PH با اندازه دانه اولیه $105\ \mu\text{m}$
- شکل ۱۹-۴. منحنی های سیلان فولادهای 17-4 PH، میکروآلیاژی و زنگ نزن ۳۰۴
- شکل ۲۰-۴. تغییرات ثوابت رابطه سینوس هایپربولیک بر حسب کرنش
- شکل ۲۱-۴. مدل کردن منحنی های سیلان توسط رابطه سینوس هایپربولیک با در نظر گرفتن کرنش
- شکل ۲۲-۴. پیش بینی منحنی های سیلان توسط رابطه سینوس هایپربولیک با در نظر گرفتن کرنش
- شکل ۲۳-۴. نمونه ای از منحنی های لازم برای به دست آوردن ثوابت رابطه ۲۴-۴
- شکل ۲۴-۴. مدل کردن منحنی های سیلان توسط رابطه جدید ارایه شده در تحقیق حاضر
- شکل ۲۵-۴. پیش بینی منحنی های سیلان توسط رابطه جدید ارایه شده در تحقیق حاضر
- شکل ۲۶-۴. مقایسه ای مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر واقعی
- شکل ۲۷-۴. مدل کردن منحنی های سیلان توسط شبکه های عصبی مصنوعی
- شکل ۲۸-۴. پیش بینی منحنی های سیلان توسط شبکه های عصبی مصنوعی
- شکل ۲۹-۴. نمونه هایی از مقایسه روش های مختلف برای پیش بینی منحنی های سیلان
- شکل ۳۰-۴. نمونه ای از منحنی های مربوط به محاسبه ثوابت رابطه اورامی
- شکل ۳۱-۴. مقادیر محاسبه شده ثوابت رابطه اورامی بر حسب پارامتر زرن-هلمن
- شکل ۳۲-۴. نمونه هایی از برونیابی تنش سیلان پس از نقطه اوج توسط رابطه اورامی
- شکل ۳۳-۴. محاسبه ثابت و نمونه هایی از مدل کردن تنش سیلان پیش از نقطه اوج توسط رابطه ۳۶-۴
- شکل ۳۴-۴. منحنی های سیلان کامل با استفاده از رابطه ۳۶-۴ و رابطه اورامی

- ۸۹ شکل ۴-۳۵. به دست آوردن ثوابت n' و β' برای فولاد PH 17-4
- ۹۰ شکل ۴-۳۶. انطباق دادن داده های تجربی با رابطه ۲-۹
- ۹۱ شکل ۴-۳۷. انطباق دادن داده های تجربی با رابطه ۴-۵۳
- ۹۱ شکل ۴-۳۸. انطباق دادن داده های تجربی با روابط ۲-۹ و ۴-۵۳ برای تنش بحرانی برای آغاز شدن تبلور مجدد دینامیکی
- ۹۳ شکل ۴-۳۹. نمونه ای از منحنی های لازم برای به دست آوردن مقدار σ_S^* و ثوابت مربوط به رابطه σ_{drv}
- ۹۳ شکل ۴-۴۰. نمونه ای از منحنی های σ_{drv} به همراه منحنی سیلان مربوطه
- ۹۵ شکل ۴-۴۱. مقایسه مقادیر محاسبه شده ثابت رابطه اورامی (n) از روش های مبتنی بر منحنی سیلان
- ۹۶ شکل ۴-۴۲. اثر دما و نرخ کرنش بر سینتیک تبلور مجدد دینامیکی فولاد PH 17-4
- ۹۷ شکل ۴-۴۳. مقایسه منحنی های کسر تبلور مجدد دینامیکی برای دو شرایط تغییر شکل مختلف
- ۹۷ شکل ۴-۴۴. سرعت تبلور مجدد دینامیکی بر حسب دما و نرخ کرنش
- ۹۸ شکل ۴-۴۵. سرعت تبلور مجدد دینامیکی بر حسب پارامتر نرخ تبلور مجدد دینامیکی

فهرست جدول‌ها

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۵	جدول ۱-۲. ترکیب شیمیایی تعدادی از معروفترین فولادهای زنگ نزن رسوب سختی
۱۰	جدول ۲-۲. هشت عملیات رسوب سختی استاندارد برای فولاد PH 17-4
۱۳	جدول ۲-۳. خواص مکانیکی قابل قبول برای فولاد PH 17-4 در شرایط مختلف
۴۱	جدول ۱-۳. ترکیب شیمیایی فولاد PH 17-4 مورد استفاده در این تحقیق
۴۱	جدول ۲-۳. ترکیب شیمیایی فولادهای PH 17-4 و PH 15-5 (مقادیر ذکر شده حداکثر میزان مجاز درصد وزنی می باشند)
۴۵	جدول ۳-۳. روش های اچ مناسب برای آشکار سازی مرزهای دانه پیشین آستنیت در فولاد PH 17-4
۵۲	جدول ۱-۴. محاسبات مربوط به ثابت اصطکاک (ابعاد به میلیمتر هستند)
۵۶	جدول ۲-۴. مقادیر تنش ها (بر حسب MPa) و کرنش های مهم برخی از منحنی های سیلان
۶۴	جدول ۳-۴. مقادیر محاسبه شده ثوابت تغییر شکل داغ برای فولاد PH 17-4
۶۶	جدول ۴-۴. برخی از ثوابت تغییر شکل داغ تعدادی از فولادهای زنگ نزن آستنیتی در حالت $\alpha = 0.012$
۷۳	جدول ۵-۴. خطای مجذور میانگین (MPa) برای رابطه سینوس هایپربولیک با در نظر گرفتن کرنش
۷۹	جدول ۶-۴. خطای مجذور میانگین (MPa) برای رابطه جدید ارائه شده در تحقیق حاضر
۷۹	جدول ۷-۴. خطای مجذور میانگین (MPa) برای نتایج حاصل از رابطه ۴-۲۹
۸۰	جدول ۸-۴. خطای مجذور میانگین (MPa) برای مدل شبکه های عصبی مصنوعی
۸۸	جدول ۹-۴. ثوابت مربوط به آلیاژهای آهنی
۹۰	جدول ۱۰-۴. مقادیر ثوابت تغییر شکل داغ برای فولاد PH 17-4 مطابق رابطه ۲-۹
۹۰	جدول ۱۱-۴. مقادیر ثوابت تغییر شکل داغ برای فولاد PH 17-4 مطابق رابطه ۴-۵۳
۹۲	جدول ۱۲-۴. مقادیر ثوابت تغییر شکل داغ فولاد PH 17-4 برای تنش بحرانی برای آغاز شدن تبلور مجدد دینامیکی
۹۴	جدول ۱۳-۴. مقادیر ثابت رابطه اورامی (n) از روش های مختلف
۹۴	جدول ۱۴-۴. مقادیر ثابت رابطه اورامی ($\ln k$) از روش های مختلف

چکیده

در مورد رفتار ترمومکانیکی فولاد زنگ نزن PH 17-4 در حین تغییر شکل داغ گزارش های کمی وجود دارد. همچنین کاستی هایی در زمینه تغییر شکل داغ فولادها و مدل کردن منحنی های سیلان دیده می شود. در تحقیق حاضر، رفتار ترمومکانیکی این آلیاژ در حین فشار داغ ارزیابی شد و نتایج حاصل بر روی فولادهای دیگر نیز مورد آزمایش قرار گرفت. بیشتر شرایط تغییر شکل در محدوده دمایی ۹۰۰ تا ۱۱۵۰ °C و نرخ های کرنش بین ۰/۰۰۰۱ و $10^{-1} s^{-1}$ منجر به انجام تبلور مجدد دینامیکی (DRX) در این فولاد شدند. در بیشتر موارد، رفتار متداول تک اوجی و در ریزساختار این نمونه ها مکانیزم گردنبندی مشاهده شد ولی در منحنی سیلان برخی از نمونه های مربوط به پارامترهای زنر-هلمن (Z) پایین، رفتار جدیدی مشاهده شد که "حالت پایای گذرای چندگانه" (MTSS) نامیده شد. بررسی ها نشان داد که برای محاسبه انرژی اکتیواسیون ظاهری تغییر شکل داغ (Q_{app}) بایستی هر سه رابطه سینوس هایپربولیک، توانی و نمایی بررسی شوند. رابطه جدیدی برای پیش بینی تنش سیلان ارایه شد تا بر مشکلات روش های موجود که کارایی مناسبی نداشته و یا از پیچیدگی زیادی برخوردارند، غلبه کند. این رابطه شامل تنش اوج (σ_p) و کرنش اوج (ϵ_p) و چهار ثابت می باشد که به راحتی تعیین شده و مستقل از دما و نرخ کرنش هستند. مدل سازی شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و رابطه جدید ارایه شده در تحقیق حاضر در پیش بینی و مدل کردن منحنی های سیلان فولاد PH 17-4 و فولادهای دیگر کارآمد بودند. اولی برای مدل کردن دقیقتر و دومی برای پیش بینی بهتر منحنی های سیلان، مناسب شناخته شدند. این در حالی است که رابطه سینوس هایپربولیک با در نظر گرفتن اثر کرنش چندان موفق نبود که به مشکلات بنیادی آن روش ربط داده شد. از رابطه اورامی نیز برای برونیابی تنش سیلان استفاده شد. روش مناسبی برای محاسبه ثوابت رابطه سینوس هایپربولیک اصلاح شده که با در نظر گرفتن وابستگی ضریب نفوذ در خود و مدول الاستیک به دما، دارای مفهوم فیزیکی و متالورژیکی است، ارایه گردید. تاثیر DRX بر این رابطه مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد که زمانی که تغییر شکل توسط لغزش و صعود نابجایی ها انجام شود، می توان از ضریب نفوذ در خود و توان ۵ استفاده کرد. به علت ساختار مارتنزیتی، امکان بررسی کسر تبلور مجدد دینامیکی به شکل مطلوب در فولاد PH 17-4 وجود نداشت. لذا این بررسی ها بر روی نمونه های تغییر شکل یافته فولاد زنگ نزن ۳۰۴ توسط پراش الکترونی از الکترونهای برگشتی (EBSD) و آلیاژهای دیگر انجام شد و مشخص شد که بررسی سینتیک اورامی تبلور مجدد از نقطه اوج روشی کارآمد می باشد و برای فولاد PH 17-4 به کار گرفته شد. پارامتر زنر-هلمن برای بررسی سینتیک تبلور مجدد دینامیکی مناسب تشخیص داده نشد و پارامتر جدیدی به نام پارامتر نرخ تبلور مجدد دینامیکی تعریف شد که کارایی خوبی نشان داد.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ نزن PH 17-4، تغییر شکل داغ، تبلور مجدد دینامیکی، روابط تنش سیلان.

فصل اول

مقدمه

فولاد زنگ نزن PH 17-4 (AISI 630) معروفترین فولاد زنگ نزن رسوب سختی^۱ بوده و دارای زمینه مارتنزیتی می باشد. قابلیت سخت شدن توسط عملیات حرارتی ساده (برای تشکیل رسوبات مس) بدون کاهش چشمگیر انعطاف پذیری و همچنین مقاومت به خوردگی بالاتر از دیگر فولادهای پر استحکام، از ویژگی های مهم این فولاد است که منجر به استفاده آن در کاربردهای هوا-فضا و دیگر فناوری های پیشرفته شده است [۱-۳]. با اینکه تحقیقات زیادی بر روی جنبه های مختلف مربوط به فولاد PH 17-4 انجام شده است، اما در مورد تغییر شکل این فولاد گزارش های کمی دیده می شود [۴ و ۵] تا جاییکه در مورد رفتار این آلیاژ در حین تغییر شکل داغ گزارشی یافت نشد. همچنین در مورد بررسی ریزساختار این فولاد نیز این مساله وجود دارد. به عنوان مثال، روش مناسبی برای اچ کردن مرز دانه های پیشین آستنیت^۲ برای نمونه های تغییر شکل یافته این فولاد ارایه نشده است. با اینکه تحقیقات بسیار زیادی بر روی تبلور مجدد دینامیکی^۳ و تغییر شکل داغ^۴ فولادها و مواد دیگر انجام شده است، اما نکات مبهم زیادی هنوز وجود دارند. به عنوان مثال، در به کارگیری روابط اساسی^۵ اشکالات رایجی وجود دارد. این در حالی است که هرگونه اشکال در محاسبات مربوطه، می تواند با خطای زیادی همراه باشد. همچنین معمولاً برای ایجاد ارتباط میان متغیرهای فرآیند در کار داغ، ثوابت ظاهری^۶ ماده محاسبه می شوند و به ارتباط این

¹ Precipitation hardening stainless steel

² Prior austenite grain boundaries (PAGB)

³ Dynamic recrystallization (DRX)

⁴ Hot deformation

⁵ Constitutive equations

⁶ Apparent

ثوابت با مکانیزم های میکروسکوپی توجه نمی شود. مورد دیگر در رابطه با تبلور مجدد دینامیکی، سینتیک این پدیده است که می تواند مورد بررسی قرار گیرد. یکی دیگر از موارد مهم در تغییر شکل داغ، مدل کردن منحنی های سیلان و مهمتر از آن، پیش بینی تنش سیلان می باشد که می تواند موضوع چندین تحقیق قرار گیرد.

در تحقیق حاضر، به منظور پرکردن خلاء موجود در موارد ذکر شده، این بررسی ها انجام گرفت:

(۱) بررسی رفتار ترمومکانیکی^۱ فولاد PH 17-4 در حین تغییر شکل داغ

(۲) بحث در مورد شیوه به کارگیری روابط اساسی

(۳) ارزیابی روابط اساسی با در نظر گرفتن پارامترهای فیزیکی

(۴) مدل کردن و پیش بینی تنش سیلان فولاد PH 17-4 و تعمیم نتایج و دستاوردهای به دست آمده از آن برای فولادهای دیگر

(۵) بررسی سینتیک تبلور مجدد دینامیکی فولاد PH 17-4 و آلیاژهای دیگر

در فصل دوم، متالورژی فولاد PH 17-4 و دیگر فولاد های زنگ نزن رسوب سختی به همراه فرآیندهای مرتبط با کار داغ و مسایل مرتبط با آن مانند روش های مدل کردن و پیش بینی تنش سیلان مرور شده اند. با توجه به این مرور مطالعاتی، برخی از مواردی که در مورد آنها کمبود و کاستی دیده می شد و در تحقیق حاضر مورد توجه قرار گرفته بودند، در انتهای این فصل بررسی شده اند.

در فصل سوم، مواد مورد استفاده، روش انجام آزمایش ها و آنالیزهای انجام شده بیان شده اند و در فصل چهارم، نتایج به دست آمده در بخش های مجزا مورد بحث و بررسی قرار گرفته اند. فصل پنجم نیز به بیان موردی نتایج و دست آوردهای کلی حاصل از بررسی های انجام شده در این تحقیق می پردازد و پیشنهادهایی برای ادامه این پژوهش در پایان این فصل ارائه شده است.

¹ Thermomechanical behavior

فصل دوم

مروری بر منابع

۲-۱- فولادهای زنگ نزن رسوب سختی

اولین فولاد زنگ نزن رسوب سختی در دهه ۱۹۴۰ تولید شد و تا به امروز، تعداد زیادی از این فولادها برای کاربردهای مختلف توسعه یافته‌اند. قابلیت سخت شدن توسط یک سری عملیات حرارتی ساده بدون کاهش چشمگیر انعطاف پذیری و همچنین مقاومت به خوردگی بالاتر از دیگر فولادهای پر استحکام، از ویژگی‌های اصلی این فولادها است. [۱-۳]. ترکیب شیمیایی تعدادی از معروفترین فولادهای زنگ نزن رسوب سختی در جدول ۲-۱ آورده شده است [۳]. در این فولادها، آخرین مرحله افزایش سختی و استحکام، پدیده رسوب سختی می باشد [۴-۱۲]. این دسته از فولادهای زنگ نزن بسیار شبیه به فولادهای آلیاژی کروم-نیکل هستند. با این تفاوت که یک یا چند عنصر مانند مس، مولیبدن، آلومینیم، نیویم، تیتانیم و غیره برای ایجاد قابلیت رسوب سختی به آنها اضافه شده است. فولادهای زنگ نزن آستنیتی و فریتی مقاومت خوردگی بالایی دارند، اما استحکام کمی داشته و برای بسیاری از کاربردها نامناسب هستند. همچنین روش های افزایش استحکام برای آنها محدود به چند روش نه چندان مناسب می باشد. به عنوان مثال برای افزایش استحکام آنها از کار سرد استفاده می شود ولی باید توجه داشت که نمی توان کار سرد را بر روی هر قطعه ای انجام داد. بنابراین افزایش استحکام در آنها بسیار مشکل است. از طرف دیگر، فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی با اینکه استحکام بالایی دارند، با مشکل انعطاف پذیری پایین روبرو هستند. برای رفع این مشکلات، فولادهای زنگ نزن رسوب سختی که یک حالت بهینه بین فولادهای آستنیتی و مارتنزیتی هستند، گسترش یافته اند. یک سری عملیات حرارتی ساده که قابل اجرا پس از ساخت قطعه هستند برای افزایش استحکام آنها به کار می رود.

جدول ۲-۱: ترکیب شیمیایی تعدادی از معروفترین فولادهای زنگ نزن رسوب سختی [۳].

Type	Composition, %											Other Elements
	Carbon	Manganese	Phosphorus	Sulfur	Silicon	Chromium	Nickel	Aluminum	Molybdenum	Titanium	Copper	
630	0.07	1.00	0.040	0.030	1.00	15.00-17.50	3.00-5.00	...	...	...	3.00-5.00	A
631	0.09	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-18.00	6.50-7.75	0.75-1.50	...	...	...	...
632	0.09	1.00	0.040	0.030	1.00	14.00-16.00	6.50-7.75	0.75-1.50	2.00-3.00	...	...	...
634	0.10-0.15	0.50-1.25	0.040	0.030	0.50	15.00-16.00	4.00-5.00	...	2.50-3.25	...	...	B
635	0.08	1.00	0.040	0.030	1.00	16.00-17.50	6.00-7.50	0.40	...	0.40-1.20	...	...
XM-12	0.07	1.00	0.040	0.030	1.00	14.00-15.50	3.50-5.50	...	...	...	2.50-4.50	A
XM-13	0.05	0.20	0.010	0.008	0.10	12.25-13.25	7.50-8.50	0.90-1.35	2.00-2.50	...	...	C
XM-16	0.03	0.50	0.015	0.015	0.50	11.00-12.50	7.50-9.50	...	0.50	0.90-1.40	1.50-2.50	D
...	0.010	0.50	0.010	0.010	0.20	11.00-12.50	7.50-9.50	...	0.50	1.00-1.35	1.50-2.50	D
XM-25	0.05	1.00	0.030	0.030	1.00	14.00-16.00	5.00-7.00	...	0.50-1.00	...	1.25-1.75	E

Limits are in percent maximum unless shown as a range or stated otherwise.

A Columbium plus tantalum 0.15-0.45. B Nitrogen 0.07-0.13. C Nitrogen 0.01.
D Columbium plus tantalum 0.10-0.50. E Columbium 8 times carbon minimum.

با توجه به پایداری آستنیت در دمای محیط، سه گروه اصلی از فولادهای زنگ نزن رسوب سختی قابل تولید هستند: آستنیتی، نیمه آستنیتی و مارتنزیتی. هر فولاد با توجه به ساختار خود در دمای محیط در یکی از این سه گروه قرار می گیرد. ویژگیهای اصلی این گروه ها در ادامه آورده شده است [۳-۱]:

۱) فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مارتنزیتی: دارای ساختاری آستنیتی در دمای آنیل می باشند که در حین سرد کردن به مارتنزیت تبدیل می شود. سپس رسوب سختی توسط عملیات حرارتی در دمای نسبتاً پایینی انجام می شود. کاربردهای عمده فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مارتنزیتی در تولید اجزای مکانیکی مانند دنده، هزارخار و محورها، صنایع هوا-فضا و صنایع مجاور ساحل دریا می باشد. فولاد PH 17-4 در این دسته قرار دارد.

۲) فولادهای زنگ نزن رسوب سختی نیمه آستنیتی: ساختار آستنیتی خود را در دمای محیط حفظ می کنند که امکان تولید قطعه با روشهای متداول تغییر شکل را می دهد. برای تشکیل مارتنزیت، فولاد باید تا دماهای به اندازه کافی پایین سرد شود و یا توسط یک عملیات حرارتی، کربن به صورت کاربید کروم از ساختار آستنیت خارج شده و در اثر کاهش عناصر آلیاژی، پایداری آستنیت کم شده و دمای تشکیل مارتنزیت^۱ (Ms) افزایش یابد و با کوئنچ کردن، مارتنزیت ایجاد شود. پس از آن، عملیات رسوب سختی بر روی ساختار مارتنزیتی انجام می شود. اگر سختی بسیار بالا مد نظر باشد، می توان مارتنزیت را توسط تغییر شکل شدید ایجاد کرد و سپس عملیات رسوب سختی را انجام داد. کاربرد این فولادها در مخازن فشار، بدنه هواپیما و تجهیزات جراحی می باشد.

۳) فولادهای زنگ نزن رسوب سختی آستنیتی: ساختار آستنیتی خود را پس از آنیل و حتی پس از رسوب سختی حفظ می کنند. در دمای آنیل، عناصر ایجاد کننده رسوب در زمینه محلول می باشند و پس از سریع سرد کردن، باز در زمینه محلول می مانند. در بازیخت، رسوبات تشکیل می شوند. از آنجا که دمای رسوب دهی این فولادها بالا می باشد، لذا برای کاربردهای دمای بالا مناسب می باشند. از طرف دیگر به علت ساختار آستنیتی برای کاربردهای دمای پایین نیز مناسب هستند. به هر حال سختی آنها کمتر از فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مارتنزیتی و نیمه آستنیتی می باشد چون زمینه آستنیتی دارند. بدنه موتور جت و پره های توربین از نوع آستنیتی تهیه می شوند. این فولادها نسل اولیه سوپرآلیاژهای امروزی هستند.

¹ Martensite start temperature (Ms)

در بین فولادهای زنگ نزن رسوب سختی، نوع مارتنزیتی اهمیت بالایی دارد زیرا دارای مقاومت به خوردگی خوب و استحکام بالا می باشد. از دیگر خواص مهم فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مارتنزیتی این است که فقط توسط یک عملیات آنیل انحلالی و رسوب سختی در دمای پایین (۴۰۰ تا ۶۰۰ °C) سخت می شوند.

فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مارتنزیتی مانند PH 17-4 و PH 15-5 به صورت گسترده در صنایع هوا-فضا استفاده می شوند که به طور معمول دارای ۱۵ تا ۱۷ درصد کروم و ۴ تا ۵ درصد نیکل به همراه مس، مولیبدن، آلومینیم، نیوبیم، تیتانیم و غیره هستند. به هر حال، نسبت به فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی، قابلیت شکل پذیری و چقرمگی بالاتری دارند. این فولادها، در اصل برای غلبه بر محدودیت های فولادهای کاملاً آستنیتی و کاملاً مارتنزیتی گسترش پیدا کرده اند تا استحکام بالا، چقرمگی، قابلیت شکل پذیری و مقاومت به خوردگی را یکجا داشته باشند.

فولاد Stainless W اولین فولاد زنگ نزن رسوب سختی تجاری می باشد و پس از آن PH 17-4 مطرح شد. تفاوت استحکام در این فولادها و نیز دیگر خواص مکانیکی، به طور عمده به تفاوت در اجزای سخت کننده این فولادها بر می گردد. فولادهای PH 17-4 و PH 15-5 توسط مس، PH 13-8 Mo توسط آلومینیم و مولیبدن و Stainless W به وسیله تیتانیم سخت می شوند [۱۳].

سختی فولادهایی مانند PH 17-4 و Stainless W در حالت آنیل انحلالی و سریع سرد شده، کمتر از فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی می باشد زیرا درصد کربن آنها بسیار کمتر است. بنابراین این فولادها قابلیت ماشینکاری خوبی دارند. بعد از ماشینکاری و یا هر روش تولید دیگر، می توان توسط یک سری عملیات حرارتی ساده به استحکام مورد نظر رسید. عملیات رسوب سختی در دمای پایینی انجام می شود و نتیجه آن کاهش چشمگیر در اعوجاج قطعه پس از سخت کاری است [۱].

فولادهای PH 15-5، PH 13-8 Mo و Custom 455 خواص مناسبتری نسبت به دو فولاد ابتدایی دارند. به عنوان مثال، فولاد PH 15-5 با اینکه به PH 17-4 شبیه است ولی کمتر مستعد به تشکیل فریت دلتا است. از آنجا که وجود فریت دلتا در نهایت منجر به کاهش انعطاف پذیری می شود، لذا کاهش آن در این فولادها بسیار اهمیت دارد. با این حال، باید توجه کرد که فولاد PH 17-4 به دلیل داشتن کروم بالا، از مقاومت به خوردگی قابل توجهی برخوردار است.

فولادهای زنگ نزن رسوب سختی مارتنزیتی را به عنوان فولادهای زنگ نزن مارایجینگ^۱ نیز می شناسند. فولادهای مارایجینگ گروهی از فولادهای با استحکام بالا را شامل می شوند که توسط یک واکنش متالورژیکی بدون دخالت کربن سخت می شوند. این فولادها توسط رسوب فازهای بین فلزی و فلزی در دماهایی نزدیک به ۴۸۰ °C سخت می شوند. واژه مارایجینگ از پیرسختی مارتنزیت گرفته شده است که نشانگر پیرسختی یک زمینه مارتنزیت لایه ای کم کربن می باشد. این فولادها معمولاً دارای مقادیر انبوهی نیکل، کبالت و مولیبدن بوده ولی درصد کربن آنها بسیار پایین می باشد [۱۴].

¹ Maraging stainless steels

عدم دخالت کربن و در عوض، سخت شدن توسط رسوب فازهای بین فلزی (و فلزی)، خواص جالبی در فولادهای مارایجینگ ایجاد می کند. در این فولادها سختی پذیری معنا ندارد. مارتنزیت کم کربنی که پس از عملیات آنیل، تشکیل می شود خیلی سخت نیست. تغییرات ابعاد در حین عملیات پیرسختی، بسیار جزئی بوده و این امکان را فراهم می آورد که در حالت آنیل شده که ماده نرم است، توسط ماشینکاری، قطعاتی با شکل های پیچیده تولید کرد و با اطمینان از عدم اعوجاج، عملیات رسوب سختی را روی آنها انجام داد. جوش پذیری این فولادها بسیار خوب است. چقرمگی شکست به مراتب بهتر از فولادهای پر استحکام متداول است که منجر به استفاده این فولادها در کاربردهای گوناگونی شده است [۱۴].

فولاد PH 17-4 معروفترین فولاد زنگ نزن رسوب سختی می باشد و در دسته مارتنزیتی قرار می گیرد. استحکام و سختی بالا، مقاومت به خوردگی خوب و راحتی ساخت از ویژگیهای این فولاد هستند. نکته مهم این است که از نقطه نظر اقتصادی، این فولاد از بسیاری از رقیبان خود مانند سوپرآلیاژهای پایه نیکل مقرون به صرفه تر است. علت این مساله را باید در درصد کمتر عناصر آلیاژی گرانبه جستجو کرد.

فولاد PH 17-4 به صورت فریت دلتا منجمد می شود [۲ و ۳]. در حین سرد شدن، فریت تقریباً به طور کامل به آستنیت تبدیل می شود. با این وجود، اگر مقداری فریت به آستنیت تبدیل نشود، تا دمای محیط باقی می ماند بدون آنکه تغییر فازی در آن رخ دهد [۲]. آستنیت در حین سرد شدن به مارتنزیت تبدیل می شود ولی استحاله آلوتروپیک آستنیت به فریت حتی در نرخ های سرد شدن پایین هم انجام نمی شود [۶]. منحنی دگرگونی در حین سرد کردن پیوسته^۱ در شکل ۱-۲ به خوبی به این امر اشاره می کند. باید در نظر داشت که همواره مقداری جزئی آستنیت باقیمانده^۲ در زمینه باقی می ماند [۲].

مقاومت به خوردگی فولاد PH 17-4 در بسیاری از محیط ها مشابه به فولادهای زنگ نزن گروه ۳۰۰ و بسیار بهتر از دیگر فولادهای مشابه با قابلیت سخت شدن از جمله فولادهای زنگ نزن گروه ۴۰۰ می باشد [۴ و ۷]. مقاومت به خوردگی این فولاد، وابسته به عملیات حرارتی نیز می باشد [۲]. در حالت آنیل انحلالی شده دارای مقاومت به خوردگی کمتری است و به علت وجود مارتنزیت بازپخت نشده دارای انعطاف پذیری پایینی است و امکان شکست ترد برای آن وجود دارد. وجود مارتنزیت بازپخت نشده آلیاژ را مستعد به خوردگی تنش^۳ می کند. این آلیاژ در حالت پیرسخت شده، مقاومت به خوردگی تنش بالاتری نسبت به حالت آنیل انحلالی شده دارد. برای این منظور، دماهای رسوب دهی در محدوده پیرشدن بیش از حد^۴ توصیه می شوند.

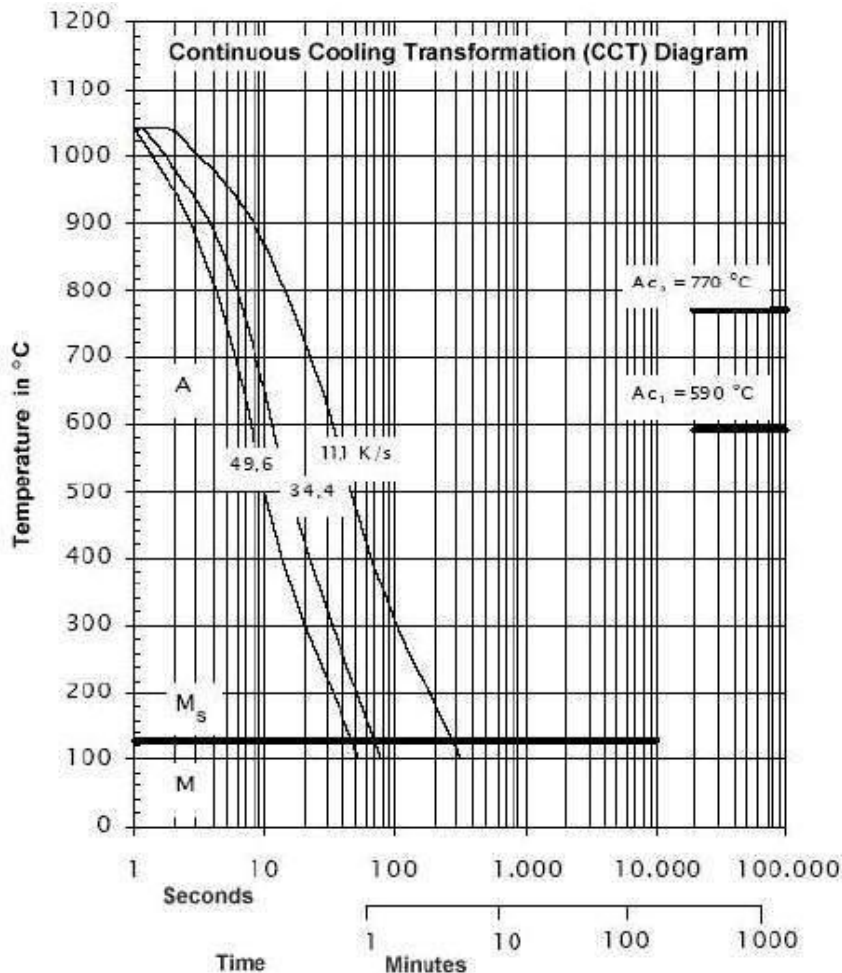
فولاد PH 17-4 دارای استحکام و سختی بالا به همراه مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی خوب تا دمای °C ۳۱۶ می باشد و بنابراین بالاترین دمای سرویس دهی برای کاربردهای مداوم برابر با همین درجه حرارت می باشد [۴ و ۱۵]. این در حالی است که فولادهای زنگ نزن رسوب سختی آستنیتی تا دماهایی حدود °C ۶۵۰ قابل استفاده می باشند [۲].

¹ Continuous cooling transformation diagram (CCT)

² Retained austenite

³ Stress corrosion cracking (SCC)

⁴ Overaging



شکل ۱-۲: منحنی دگرگونی در حین سرد کردن پیوسته برای فولاد 17-4 PH [۷].

۲-۲- عملیات حرارتی فولاد 17-4 PH

۱-۲-۲- همگن کردن و آنیل انحلالی

عملیات همگن کردن، توسط حرارت دادن این فولاد در دمای 1149°C به مدت حداقل ۹۰ دقیقه و سپس سریع سرد کردن در هوا و یا با نرخ بالاتر انجام می شود [۱۵]. همگن کردن می تواند برای حل شدن مقداری از فریت دلتای باقیمانده نیز به کار رود و ساختار آستنیتی حاصل در حین سرد کردن به فریت دلتا تبدیل نمی شود. بر اساس دیاگرام فازی آهن-مس [۱۶]، قابلیت انحلال مس در آستنیت در دمای 1040°C حدود ۷٪ می باشد (شکل ۲-۲). بنابراین عملیات آنیل انحلالی فولاد 17-4 PH با حرارت دهی در محدوده دمایی 1020°C تا 1050°C و به دنبال آن سریع سرد کردن تا دمای محیط در هوا، روغن و آب انجام می شود. انتخاب محیط سرد کردن، بستگی به اندازه قطعه دارد. قطعه باید تا دمای محیط سرد شود تا آستنیت به طور کامل به مارتنزیت تبدیل شود.

آنیل انحلالی فولاد 17-4 PH در دمای 1038°C به مدت نیم ساعت و سپس سرد کردن تا زیر دمای 32°C به عنوان عملیات آنیل استاندارد شناخته شده است و با نام Condition A نمایش داده می شود. به طور کلی، عملیات آنیل انحلالی در دماهایی بین 1024°C و 1052°C و به مدت حدود ۳ دقیقه به ازای هر $2/5$ میلیمتر ضخامت انجام می شود [۴]. ساختار میکروسکوپی فولاد 17-4 PH پس از آنیل انحلالی، شامل یک زمینه مارتنزیتی کم کربن فوق اشباع از