

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد – شکل دادن فلزات

عنوان :

بررسی اثر آستنیت باقی مانده بر رفتار خستگی و عمر خستگی فولادهای TRIP

توسط :

مهدی ابارشی

استاد راهنما :

دکتر اسماعیل عمادالدین

اسفند ۸۹

## فهرست عناوین

### فصل اول : مقدمه و اهداف

### فصل دوم : مروری بر منابع

- ۱-۲- فرایند تولید فولاد TRIP ..... ۴
- ۱-۱-۲- نورد سرد و عملیات حرارتی دو مرحله ای ..... ۴
- ۲-۱-۲- فرایند ترمومکانیکال ..... ۵
- ۳-۱-۲- آنیل بین بحرانی ..... ۶
- ۴-۱-۲- آستمپرینگ ..... ۶
- ۲-۲- ریز ساختار ..... ۸
- ۳-۲- عناصر آلیاژی ..... ۹
- ۴-۲- استحاله آستنیت باقیمانده به مارتنزیت در اثر تغییر شکل ..... ۱۲
- ۱-۴-۲- مکانیزم استحاله توسط تنش ..... ۱۴
- ۲-۴-۲- مکانیزم استحاله توسط کرنش ..... ۱۴
- ۵-۲- تاثیر عوامل مختلف بر ویژگیهای آستنیت باقیمانده ..... ۱۶
- ۱-۵-۲- تاثیر زمان آنیل بین بحرانی ..... ۱۶
- ۲-۵-۲- تاثیر دمای آنیل بین بحرانی ..... ۱۷
- ۳-۵-۲- تاثیر سرعت سرمایش ..... ۱۸
- ۴-۵-۲- تاثیر زمان آستمپرینگ ..... ۱۹

- ۲۱ ..... ۲-۵-۵ - تاثیر دمای آستمپرینگ
- ۲۱ ..... ۲-۶-۶ - عوامل موثر بر رفتار تغییر شکل فولادهای TRIP
- ۲۲ ..... ۲-۶-۱ - پایداری آستنیت باقیمانده
- ۲۴ ..... ۲-۶-۲ - دمای تغییر شکل
- ۲۶ ..... ۲-۶-۳ - ویژگیهای آستنیت باقیمانده و فازهای مجاور
- ۲۸ ..... ۲-۷-۷ - تاثیر حالت تنش بر استحاله آستنیت باقیمانده به مارتنزیت
- ۳۰ ..... ۲-۸-۸ - خواص مکانیکی فولادهای TRIP
- ۳۰ ..... ۲-۸-۱ - پدیده تسلیم در فولادهای TRIP
- ۳۳ ..... ۲-۸-۲ - کارسختی فولادهای TRIP
- ۳۵ ..... ۲-۸-۳ - استحکام و انعطاف پذیری فولادهای TRIP
- ۳۹ ..... ۲-۹-۹ - خستگی
- ۴۰ ..... ۲-۹-۱ - عوامل موثر بر رفتار خستگی فولادهای TRIP
- ۴۵ ..... ۲-۹-۲ - بررسی رفتار خستگی فولادهای TRIP تحت کنترل کرنش
- ۵۰ ..... ۲-۹-۳ - بررسی رفتار خستگی فولادهای TRIP تحت کنترل تنش
- ۵۲ ..... ۲-۹-۴ - شکست نگاری

### فصل سوم : روش انجام تحقیق

- ۵۸ ..... ۳-۱-۱ - ماده اولیه
- ۵۹ ..... ۳-۲-۲ - دیلاتومتر

۵۹	عملیات حرارتی.....	۳-۳
۶۱	مطالعات تفرق اشعه X.....	۳-۴
۶۲	بررسی ریزساختار.....	۳-۵
۶۴	مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).....	۳-۶
۶۴	تست کشش.....	۳-۷
۶۵	تست میکروسختی.....	۳-۸
۶۵	تست خستگی.....	۳-۹

#### فصل چهارم : نتایج و بحث

۶۷	ریزساختار.....	۴-۱
۷۳	مطالعات تفرق اشعه X.....	۴-۲
۷۸	مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی.....	۴-۳
۸۱	کسر حجمی و غلظت کربن آستنیت باقیمانده.....	۴-۴
۸۱	غلظت کربن آستنیت باقیمانده.....	۴-۴-۱
۸۴	کسر حجمی آستنیت باقیمانده.....	۴-۴-۲
۸۸	خواص مکانیکی.....	۴-۵
۹۳	پدیده تسلیم و شکل گیری باندهای لودر.....	۴-۶
۹۷	رفتار خستگی فولاد TRIP.....	۴-۷
۹۷	منحنی S-N.....	۴-۷-۱

۲-۷-۴ - نسبت استحکام خستگی به استحکام شکست ..... ۱۰۳

۳-۷-۴ - شکست نگاری ..... ۱۰۳

۸-۴ - نتایج تست میکروسختی ..... ۱۰۹

۱۱۳

نتیجه گیری

۱۱۶

پیشنهادات

۱۱۷

منابع و مراجع

## فهرست اشکال

### فصل دوم

- شکل ۱-۲ : دیاگرام شماتیک مراحل تولید نمونه نورد سرد شده فولاد TRIP [۷]..... ۴
- شکل ۲-۲ : دیاگرام شماتیک مراحل تولید فولاد TRIP به روش ترمومکانیکال [ ۸ ]..... ۵
- شکل ۳-۲ : تاثیر سرعت سرمايش پايين از دماي آنيل بحراني بر ريز ساختار فولادهای TRIP [۶]..... ۷
- شکل ۴-۲ : ريزساختار فولاد TRIP [۱۴]..... ۸
- شکل ۵-۲ : تاثیر عناصر آلياژي بر خطوط تعادلي در فولادهای TRIP [ ۳ ]..... ۹
- شکل ۶-۲ : استحاله مارتنزيتي ناشي از تغيير شکل در فولادهای TRIP [۱۶]..... ۱۳
- شکل ۷-۲ : استحاله ي مارتنزيتي فعال شده با تنش توسط نيروي محرکه ترموديناميكي [۱۷]..... ۱۴
- شکل ۸-۲ : تأثير زمان آنيل بين بحراني بر كسر حجمي آستنيت باقيمانده [۶]..... ۱۷
- شکل ۹-۲ : تأثير دماي آنيل بين بحراني بر كسر حجمي آستنيت باقيمانده [ ۶ ]..... ۱۸
- شکل ۱۰-۲ : تأثير زمان آستمپرینگ بر كسر حجمي فازهای فولاد TRIP [ ۲۶ ]..... ۲۰
- شکل ۱۱-۲ : تأثير دماي آستمپرینگ بر كسر حجمي آستنيت باقيمانده [ ۱۰۶ ]..... ۲۱
- شکل ۱۲-۲ : تغيير كسر حجمي آستنيت باقيمانده با ميزان کرنش اعمالی و تأثير آستنيت باقيمانده بر تركيب استحکام-انعطاف پذيري [۱۴]..... ۲۲
- شکل ۱۳-۲ : تأثير اندازه ذرات آستنيت باقيمانده بر پایداری آن [۲۲]..... ۲۴
- شکل ۱۴-۲ : وابستگي استحکام و انعطاف پذيري به دماي تغيير شکل [۱۰۷]..... ۲۵
- شکل ۱۵-۲ : ارتباط بين دماي تغيير شکل و استحکام و کارسختي فولادهای TRIP [ ۶۱ ]..... ۲۶
- شکل ۱۶-۲ : رابطه كسر حجمي آستنيت باقيمانده و خواص مكانيكي فولاد TRIP ، H : كسر حجمي بالا ، L : كسر حجمي پايين [۲۲]..... ۲۷
- شکل ۱۷-۲ : تأثير مسيرهای کرنش بر استحاله مارتنزيتي [۴۶]..... ۲۹
- شکل ۱۸-۲ : ظهور پديده تسليم در فولادهای TRIP و نقش فاز آستنيت باقي مانده بر آن [۴۱]..... ۳۱
- شکل ۱۹-۲ : وجود باند لودر در فولاد TRIP با كسر حجمي آستنيت باقيمانده کمتر، (TRIP590:7.4%)، (TRIP780:9.4%) [۸۲]..... ۳۳
- شکل ۲۰-۲ : کارسختي فولادهای TRIP و مقايسه آن با ديگر فولادها [۳۶]..... ۳۴
- شکل ۲۱-۲ : مقايسه استحکام و انعطاف پذيري انواع فولادهای متداول و توسعه يافته [ ۱۱۰ ]..... ۳۶

- شکل ۲-۲۲ : تصویر شماتیک از استحاله مارتنزیتی در لحظه ی گردنی شدن [۸]..... ۳۷
- شکل ۲-۲۳ : تاثیر کسر حجمی آستنیت باقیمانده بر استحکام و عمر خستگی چدن‌ها [۸۰] L: Low retained  
 H : high retained austenite-austenite ..... ۴۱
- شکل ۲-۲۴ : تعداد سیکل شکست بر حسب کرنش الاستیک اعمالی [۸۳]..... ۴۲
- شکل ۲-۲۵ : رابطه بین استحکام کششی و عمر خستگی برخی انواع فولاد TRIP [۱۰۸] ..... ۴۳
- شکل ۲-۲۶ : نقش پیش کرنش بر تعداد سیکل شکست در فولادهای TRIP [۹۹] ..... ۴۴
- شکل ۲-۲۷ : کارنرمی فولادهای TRIP در شرایط خستگی تحت کنترل تنش [۸۳] ..... ۴۷
- شکل ۲-۲۸ : تصاویر TEM از پدیده کارنرمی فولادهای TRIP در خستگی تحت کنترل کرنش، الف: شکلگیری و مرتب شدن نابجایی، ب: تشکیل میکرو باندها، ج: تشکیل مرز دانه های فرعی [۸۳] ..... ۴۸
- شکل ۲-۲۹: تصویر ترک خستگی توسط تکنیک (EBSD) [۸۳] ..... ۴۹
- شکل ۲-۳۰ : تعداد سیکل شکست بر حسب کرنش کل اعمالی برای دو فولاد TRIP و DP [۸۳] ..... ۵۰
- ۳۱-۲ : سطح شکست خستگی [۶۶]..... ۵۳
- شکل ۲-۳۲ : خطوط استریشن و جهت رشد ترک [۸۵]..... ۵۴
- شکل ۲-۳۳ : جوانه زنی ترک خستگی از سطح نمونه [۸۲]..... ۵۵
- شکل ۲-۳۴ : شکست ترد درون دانه ای ناشی از خستگی ، الف : TRIP590 ، ب : TRIP780 [۸۲] ..... ۵۶
- شکل ۲-۳۵ : شکست ترد مرز دانه ای ناشی از خستگی [۸۲] ..... ۵۶

## فصل سوم

- شکل ۳-۱ : مراحل عملیات حرارتی بکارگرفته شده برای تولید فولاد TRIP با خصوصیات ساختاری متفاوت ..... ۶۰
- شکل ۳-۲ : ابعاد نمونه تست کشش ( میلی متر) ..... ۶۴
- شکل ۳-۳ : نمونه آماده سازی شده تست خستگی ..... ۶۶
- شکل ۳-۴ : دستگاه تست خستگی (چرخشی-خمشی) ..... ۶۶
- شکل ۳-۵ : ابعاد نمونه تست خستگی (میلیمتر) ..... ۶۶

## فصل چهارم

- شکل ۴-۱ : ریز ساختار فولاد اچ شده با محلول متابی سولفیت ۱۰٪، الف : A ، ب : B2 ..... ۶۸
- شکل ۴-۲ : ریزساختار فولاد TRIP اچ شده با محلول لپرا و استفاده از محلول پیکرال ۴٪ به عنوان اچ اولیه ..... ۷۰



- شکل ۳-۴ : ریزساختار فولاد مورد اچ شده با محلول لپرا و استفاده از محلول نیتال ۲٪ به عنوان اچ اولیه ، الف : نمونه C ، ب : نمونه B2.....
- شکل ۴-۴ : آگوی تفرق اشعه X برای شرایط مختلف عملیات حرارتی (آستمپرینگ) ..... ۷۷
- شکل ۴-۵ : تصویر SEM فولاد TRIP، آستمپر شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۷ دقیقه ..... ۷۸
- شکل ۴-۶ : تصویر SEM فولاد TRIP (B2)، تمپر شده در دمای ۲۰۰°C به روش جیرالت ..... ۷۹
- شکل ۴-۷ : تاثیر دمای آستمپرینگ بر غلظت کربن آستنیت باقیمانده ..... ۸۲
- شکل ۴-۸ : تاثیر زمان آستمپرینگ بر غلظت کربن آستنیت باقیمانده ..... ۸۲
- شکل ۴-۹ : رسوب کاربید در ریزساختار در طی فرایند آستمپرینگ ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۰ : تاثیر دمای آستمپرینگ بر کسر حجمی آستنیت باقیمانده ..... ۸۴
- شکل ۴-۱۱ : تاثیر زمان آستمپرینگ بر کسر حجمی آستنیت باقیمانده ..... ۸۵
- شکل ۴-۱۲ : احتمالات متفاوت از ویژگیهای آستنیت باقیمانده در فرایند آستمپرینگ [۹۴] ..... ۸۷
- شکل ۴-۱۳ : تاثیر شرایط عملیات حرارتی بر استحکام تسلیم ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۴ : رابطه کسر حجمی آستنیت باقیمانده با استحکام کششی و تغییر طول نهایی ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۵ : تاثیر پایداری آستنیت باقیمانده بر تغییر طول نهایی ..... ۹۱
- شکل ۴-۱۶ : رابطه کسر حجمی و پایداری آستنیت باقیمانده بر شاخص استحکام- فرم پذیری ..... ۹۲
- شکل ۴-۱۷ : تاثیر  $f\gamma \times C\gamma$  بر شاخص استحکام- فرم پذیری ..... ۹۳
- شکل ۴-۱۸ : نمودار تنش- کرنش فولاد TRIP در شرایط مختلف عملیات حرارتی و ظهور باندهای لودر ..... ۹۵
- شکل ۴-۱۹ : تاثیر کسر حجمی آستنیت باقیمانده بر مقدار کرنش لودر ..... ۹۶
- شکل ۴-۲۰ : مقایسه منحنی S-N نمونه های فولادی TRIP در شرایط متفاوت عملیات حرارتی به همراه نمونه آنیل شده ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۱ : تاثیر کسر حجمی آستنیت باقیمانده بر استحکام خستگی فولادهای TRIP ..... ۹۸
- شکل ۴-۲۲ : منحرف شدن راس ترک در نمونه آستمپر شده در دمای ۳۵۰°C (A) ..... ۹۹
- شکل ۴-۲۳ : مکانیزم زیگزاگی شدن ترک خستگی [۸۱] ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۴ : مکانیزم زیگزاگی شدن شکل ترک خستگی ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۲۵ : تصاویر ماکروسکوپی از سطح شکست خستگی ، الف: A، ب: B1، ج: B2، د: C ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۲۶ : شکست درون دانه ای ترد ، الف: B1 ، ب: B2 ، ج: B3 ، د: C ..... ۱۰۵

- شکل ۴-۲۷: شکست ترد مرزدانه ای در نزدیکی مرکز سطح شکست ، الف: B2 ، ب: C..... ۱۰۶
- شکل ۴-۲۸: شکست نرم در قسمت شکست نهایی ، الف: A ، ب: B3 ، ج: C..... ۱۰۷
- شکل ۴-۲۹: خطوط استریشن در منطقه رشد ترک ، الف: نمونه A ، ب: نمونه C..... ۱۰۸
- شکل ۴-۳۰: تشکیل خطوط استریشن بر روی فاز فریت ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۳۱: نتایج تست سختی در شرایط آنیل شده و بعد از انجام تست خستگی ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۳۲: تاثیر کسر حجمی استنیت باقیمانده بر سختی فولاد TRIP بعد از انجام تغییر شکل ..... ۱۱۱
- شکل ۴-۳۳: افزایش سختی از مرکز سطح شکست به سمت لبه ..... ۱۱۲

## فهرست جداول

### فصل دوم

جدول ۱-۲: مقایسه خواص مکانیکی فولادهای مختلف ۳۸

### فصل سوم

جدول ۱-۳: ترکیب شیمیایی فولاد مورد مطالعه ۵۸

جدول ۲-۳: دماهای بحرانی فولاد مورد مطالعه ۵۹

جدول ۳-۳: شرایط مختلف عملیات حرارتی آستمپرینگ ۶۰

جدول ۴-۳: محلول‌های مورد استفاده برای تهیه محلول اچ لپرا ۶۴

### فصل چهارم

جدول ۱-۴: روش‌های اچ کردن فولادهای TRIP ۶۹

جدول ۲-۴: مقدار R محاسبه شده توسط دمیر برای صفحات مختلف فاز فریت ۷۵

جدول ۳-۴: مقدار R محاسبه شده توسط دمیر برای صفحات مختلف فاز آستنیت باقی‌مانده ۷۵

جدول ۴-۴: شرایط عملیات حرارتی به همراه ویژگی‌های آستنیت باقی‌مانده ۸۱

جدول ۵-۴: خواص مکانیکی فولاد TRIP مورد مطالعه در شرایط مختلف عملیات حرارتی به همراه ویژگی‌های

آستنیت باقی‌مانده ۸۸

جدول ۶-۴: نسبت استحکام خستگی به استحکام شکست ۱۰۳

## چکیده

بالا بودن همزمان استحکام و انعطاف پذیری فولادهای TRIP به دلیل استحاله آستنیت باقی‌مانده به مارتنزیت در حین تغییر شکل، دلیل کاربرد فراوان آنها در صنعت خودروسازی می‌باشد. آستنیت باقی‌مانده مائثرترین فاز در ریزساختار فولادهای TRIP محسوب می‌شود. در این تحقیق به بررسی اثر پارامترهای عملیات حرارتی تولید فولاد TRIP شامل دما و زمان آستمپرینگ بر ویژگی‌های آستنیت باقی‌مانده پرداخته شد و همچنین تاثیر ویژگی‌های آستنیت باقی‌مانده بر استحکام، انعطاف‌پذیری و مقاومت به خستگی مورد بررسی قرار گرفت. با انجام عملیات حرارتی، شامل آنیل در دمای  $800^{\circ}\text{C}$  و سپس آستمپرینگ در محدوده دمایی  $^{\circ}\text{C}$  ۳۵۰ - ۴۵۰ در زمان‌های متفاوت، آستنیت باقی‌مانده با ویژگی‌های مختلف بدست آمد. ریزساختار فولاد و مرفولوژی فاز آستنیت باقی‌مانده توسط روشهای اچ رنگی و استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. توسط تفرق اشعه ایکس (XRD) کسر حجمی و غلظت کربن آستنیت باقی‌مانده‌ی نمونه‌ها تعیین شد و تاثیر آنها بر رفتار خستگی و مقاومت به شکست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش دمای آستمپرینگ کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده افزایش و درصد کربن این فاز کاهش یافت. افزایش کسر حجمی آستنیت باقی‌مانده استحکام نمونه‌ها بدلیل تشکیل فاز سخت مارتنزیت در زمینه نرم فریت و بینیت و همچنین ایجاد تنش‌های فشاری ناشی از استحاله آستنیت باقی‌مانده به مارتنزیت، افزایش یافت. با افزایش کربن محلول در آستنیت باقی‌مانده،

انعطاف پذیری بدلیل پایداری بالای آستنیت باقی مانده و یکنواخت شدن نرخ استحاله افزایش یافت. از سویی دیگر مشاهده شد که با افزایش کسر حجمی آستنیت باقی مانده استحکام و عمر خستگی افزایش می یابد زیرا تشکیل مارتنزیت در نوک ترک خستگی منجر به کاهش سرعت رشد و انتشار ترک خستگی می شود.

واژه های کلیدی : فولاد TRIP ، آستنیت باقی مانده، مقاومت به خستگی، دما و زمان آستمپرینگ انعطاف پذیری

## فصل اول : مقدمه و اهداف

زاکای<sup>۱</sup> برای اولین بار در سال ۱۹۷۶ هنگام کار با فولادهای پر آلیاژ آستینی اصطلاح TRIP (Transformation induced plasticity) (پلاستیته القا شده توسط استحاله) را بکار برد [۱]. اما فولادهای TRIP حاوی آستنیت باقی مانده اولین بار توسط ماتسومیورا<sup>۲</sup> ارائه شد. واسرمن<sup>۳</sup> در سال ۱۹۳۷ توسط استحاله مارتنزیتی در آلیاژ آهن نیکل به افزایش طولهای بالایی دست پیدا کرد که این اولین مشاهدات فرم پذیری بالا در اثر استحاله آستنیت باقی مانده به مارتنزیت بود. اما فولادهای TRIP مدرن امروزی شامل درصد پایینی از فاز آستنیت باقی مانده در زمینه فریت-بینیتی هستند و فاز آستنیت باقی مانده باعث بهبود استحکام-انعطاف پذیری همزمان در اثر استحاله به مارتنزیت می شود [۶].

---

1- V.F.Zackay  
2- H.Matsumura  
3- G.Wassermann

به فولادهایی که تغییر شکل پلاستیک تحریک کننده دگرگونی فازی در آنها است فولاد TRIP گفته می‌شود. این نامگذاری به این خاطر است که در این فولادها فاز آستنیت باقی مانده در اثر تغییر شکل پلاستیک به مارتنزیت تبدیل می‌شود [۲،۳]. لذا مارتنزیت ایجاد شده در اثر تغییر شکل پلاستیک در برابر گردنی شدن مقاومت کرده و در نتیجه ترکیبی از استحکام بالا و داکتیلیتی یعنی چقرمگی مطلوب فراهم می‌سازد [۴]. فولاد TRIP<sup>۱</sup> یکی از انواع فولادهای چند فازی می‌باشد که در گروه فولادهای با استحکام بالا قرار می‌گیرد. این فولادها علاوه بر استحکام بالا دارای انعطاف پذیری مطلوبی هستند که این ویژگی آنها را از دیگر گروه‌های فولادی متمایز می‌سازد.

استفاده روزافزون از فولادهای پر استحکام در صنعت خودرو به منظور کاهش وزن و در نتیجه بهبود بازدهی، منجر به توسعه فولادهای TRIP شده است. این فولادها بخاطر ترکیبی از استحکام و انعطاف پذیری مناسب، مقاومت خوبی در برابر تصادفات دارند [۶]. خصوصیات فولادهای TRIP باعث شده است که این فولادها در خطوط لوله، بدنه خودروها و سازه‌های مقاوم در برابر زلزله استفاده شود. از دلایل استفاده این فولادها در صنعت خودروسازی می‌توان به کاهش مصرف سوخت به دلیل استفاده از ورق‌های نازک و همچنین افزایش ایمنی آنها استفاده نمود [۵،۶]. البته باید این نکته را نیز ذکر کرد که قابلیت فرم دهی آسان این فولادها نیز یکی از دلایل استفاده آنها در صنعت خودروسازی می‌باشد.

تاکنون مطالعات بسیاری بر خواص مکانیکی و شکل‌دهی فولادهای TRIP صورت گرفته است. اما تحقیقات کمی بر روی خواص خستگی این فولادها صورت گرفته است. در موارد کمی که خواص خستگی این فولادها مورد مطالعه قرار گرفته است، شرایط خستگی تحت کنترل بوده است. در این تحقیق خواص خستگی کنترل شده با تنش فولادهای TRIP مورد مطالعه

---

1- Transformation Induced Plasticity

قرار می‌گیرد و تاثیر پارامترها و ویژگی‌های آستنیت باقی‌مانده بر خواص خستگی این فولادها مورد بررسی قرار می‌گیرد.



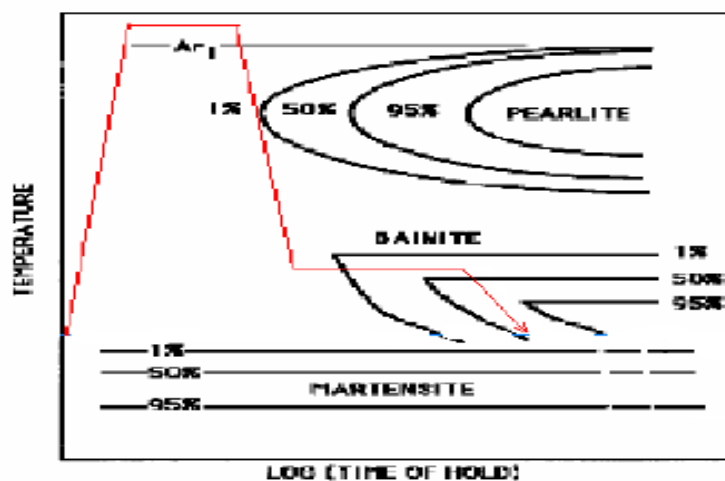
## فصل دوم : مروری بر منابع

### ۲-۱- فرایند تولید فولاد TRIP

فولادهای TRIP توسط دو فرایند تولید می‌شوند. روش اول انجام کار سرد اولیه و سپس یک سیکل عملیات حرارتی مشخص و اما روش دوم فرایندی ترمومکانیکی می‌باشد. روش اول بصورت متداول و بطور گسترده ای در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷]. در زیر به طور مختصر به شرح دو فرایند پرداخته می‌شود.

### ۲-۱-۱- نورد سرد و عملیات حرارتی دو مرحله ای

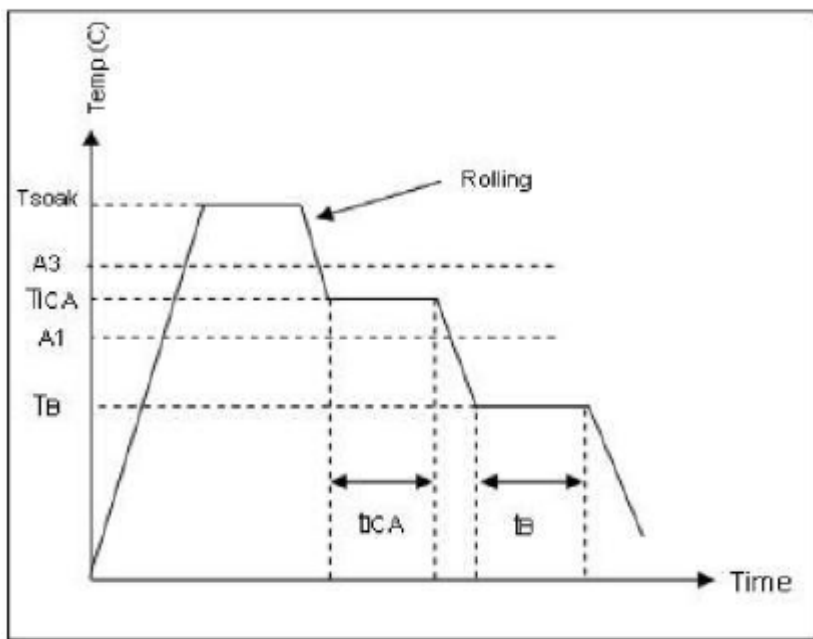
بعد از انجام کار سرد اولیه فولاد در معرض عملیات حرارتی دو مرحله‌ای قرار می‌گیرد که ابتدا در منطقه پایداری فریت و آستنیت برای مدت زمان مشخص قرار می‌گیرد و سپس با سرعت بالایی وارد منطقه پایداری بینیت می‌شود. پس از این مرحله که رنج زمانی مشخصی دارد تا دمای محیط سرد می‌شود، شکل ۱-۲.



شکل ۱-۲ : دیاگرام شماتیک مراحل تولید نمونه نورد سرد شده فولاد TRIP [۷]

## ۲-۱-۲- فرایند ترمومکانیکی

در این روش همانطور که از شکل ۲-۲ مشخص است، ابتدا فولاد در دمای Tsoak در ناحیه آستنیتی برای مدت زمان مشخصی قرار می‌گیرد و سپس تحت عملیات نورد گرم تا دمای TICA سرد می‌شود. در این دما که بین دمای A1 و A3 می‌باشد برای مدت زمان tICA ننگه داشته می‌شود. آنگاه به سرعت تا دمای TB (حدوداً ۳۰۰-۵۰۰°C)، ناحیه پایداری بینیت سرد می‌شود تا عملیات آستمپرینگ صورت گیرد. سریع سرد کردن از دمای TICA تا دمای آستمپرینگ به این علت است که آستنیت به فریت و پرلایت تبدیل نشود. بعد از عملیات آستمپرینگ نمونه‌ها تا دمای محیط سرد می‌شود [۸].



شکل ۲-۲: دیاگرام شماتیک مراحل تولید فولاد TRIP به روش ترمومکانیکال [۸]

## ۲-۱-۳- آنیل بین بحرانی<sup>۱</sup>

آنیل بین بحرانی که مرحله اول عملیات حرارتی می‌باشد توسط قرارگیری نمونه بین دو دمای  $A_1$  و  $A_3$  حاصل می‌شود. اما قبل از انجام این عملیات باید این دو دما برای فولاد مورد نظر تعیین شود که معمولاً توسط روش دیلاتومتری تعیین می‌شود. با قرارگیری نمونه در این محدوده دمایی فریت‌های اولیه تحت تبلور مجدد استاتیکی قرار می‌گیرند و همچنین فاز آستنیت ایجاد می‌شود [۸]. در واقع فاز آستنیت از سمنتیت‌هایی که در اثر آنیل کروی شده‌اند تشکیل می‌شود. با تشکیل فاز آستنیت ساختاری متشکل از فریت و آستنیت بدست خواهد آمد. بدلیل اینکه فریت مقدار بسیار کمی کربن را در خود حل می‌کند که این مقدار کمتر از ۰.۰۲٪ می‌باشد، بنابراین آستنیت غنی از کربن می‌شود. کربن عنصر بسیار مهمی در پایداری فاز آستنیت می‌باشد. در واقع دمای آنیل بین بحرانی بر مقدار آستنیت، مقدار کربن، اندازه فاز آستنیت باقی‌مانده و دیگر پارامترها تاثیر گذار می‌باشد.

## ۲-۱-۴- آستمپرینگ

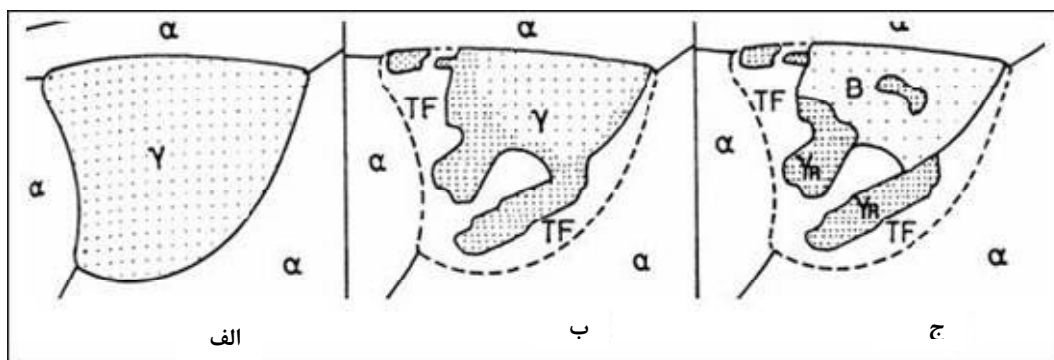
بعد از آنیل بین بحرانی نمونه‌ها با سرعت زیاد وارد منطقه پایداری بینیت می‌شوند تا عملیات آستمپرینگ در مدت زمان مشخصی روی آنها صورت گیرد. محدوده دمایی در این مرحله ۳۰۰ تا ۵۰۰ °C می‌باشد [۹]. این محدوده دمایی بالاتر از دمای  $M_s$  (دمای تشکیل مارتنزیت در اثر کوئنچ) و پایین‌تر از دمای  $T_0$  (دمایی که فریت و آستنیت انرژی یکسانی دارند) می‌باشد. در طی فرایند آستمپرینگ فاز آستنیت به بینیت تبدیل می‌شود و لذا بعد از این فرایند در دمای محیط بینیت، فریت (به عنوان فاز زمینه) و آستنیت باقی‌مانده بدست می‌آید. به دلیل حلالیت پایین کربن در فاز بینیت، با تشکیل این فاز کربن به داخل فاز

---

1- Intercritical annealing

آستنیت پس زده می‌شود و باعث افزایش غلظت کربن آستنیت نسبت به حالت تعادلی می‌شود. لذا باعث پایداری آستنیت می‌شود [۱۲] که همین پایداری بالای آستنیت دلیلی بر عدم تشکیل مارتنزیت در اثر سرد شدن نمونه‌ها تا دمای محیط می‌شود [۲۴، ۲۵]. اگر سرعت سرد شدن از دمای آنیل بین بحرانی زیاد نباشد احتمال تشکیل فریت هم محور<sup>۱</sup> و پرلیت می‌باشد. همانطور که از شکل ۳-۲ (الف) مشخص است در ابتدا دو فاز فریت و آستنیت مشخص هستند. در شکل ۳-۲ (ب) قسمتی از فاز آستنیت به فریت هم محور در طی آستمپرینگ تبدیل می‌شود.

بعد از تشکیل فریت هم محور به دلیل حلالیت کم کربن در فریت، غلظت کربن در فاز آستنیت یکنواخت نخواهد بود و همانطور که از شکل ۳-۲ (ب) مشخص است نقاط سیاه رنگ که معلوم کننده غلظت کربن می‌باشد تراکم غیریکنواختی دارد. در ادامه با تشکیل بینیت از فاز آستنیت غلظت کربن در فاز آستنیت بیشتر خواهد شد زیرا حلالیت کربن در فاز بینیت همانند فریت کم می‌باشد [۶].



شکل ۳-۲ : تاثیر سرعت سرمایش پایین از دمای آنیل بحرانی بر ریز ساختار فولادهای TRIP [۶]