

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

چکیده

آزمون غیر مخرب عملیاتی است که بازرسی و یا آزمون مجموعه‌ای از قطعات را با استفاده از روش‌هایی که بر کارایی نهایی آن‌ها تأثیر نمی‌گذارد شامل می‌گردد؛ به عبارت دیگر بازرسی قطعه بدون تخریب نمودن آن می‌باشد.

در این پژوهش، به بررسی توانایی روش آنالیز سیگنال بارک هاوزن در تعیین ریز ساختار فولاد با سمانتیت کروی پرداخته شد. به این منظور نمونه‌هایی از جنس فولاد CK60 ابتدا تحت عملیات حرارتی نرماله و سپس کروی سازی قرار گرفتند. بررسی‌های ریز ساختاری توسط میکروسکپ نوری و الکترونی روبشی (SEM) انجام گرفت و سپس به کمک نرم‌افزار پردازش تصویر Clemex، پارامتر درصد کروی شدن و اندازه ذرات سمانتیت محاسبه شد. در مرحله بعد برای بررسی خواص مکانیکی و شکل‌پذیری فولاد مورد نظر، آزمون کشش و ماشین‌کاری بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای بررسی‌های غیر مخرب از آزمون سیگنال بارک هاوزن استفاده شد و پراب مورد نیاز برای آزمون، متناسب با ابعاد نمونه ساخته شد. از آن جایی که تغییر در خواص متالورژیکی و مکانیکی مواد فلزی باعث تغییر در خواص فیزیکی و در نتیجه سیگنال‌های بارک هاوزن شده بنابراین می‌توان ارتباط منطقی بین خواص متالورژیکی و مکانیکی با سیگنال‌های بارک هاوزن¹ ایجاد کرد.

¹ Barkhausen noise

فهرست عناوین

۱	مقدمه	۲
۲	مروری بر منابع	۵
۶	۱-۲ عملیات حرارتی کرومی سازی فولادها	۶
۶	۱-۱-۲ عملیات حرارتی کرومی سازی	۶
۶	۱-۱-۱-۲ عملیات حرارتی زیر حد بحرانی	۶
۸	۲-۱-۱-۲ عملیات حرارتی میان بحرانی	۸
۸	۲-۱-۲ مکانیزم‌ها	۸
۹	۱-۲-۱-۲ نظریه اغتشاشی رایلی	۹
۱۱	۲-۲-۱-۲ نظریه اغتشاشی اصلاح شده توسط مولینز و نیکولز	۱۱
۱۲	۳-۲-۱-۲ نظریه شیارهای حرارتی	۱۲
۱۳	۴-۲-۱-۲ نظریه مهاجرت عیوب	۱۳
۱۴	۳-۱-۲ استوالد رایپنینگ	۱۴
۱۵	۲-۲ ماشین کاری	۱۵
۱۵	۱-۲-۲ تعریف ماشین کاری	۱۵
۱۵	۲-۲-۲ انواع براده	۱۵
۱۶	۳-۲-۲ اندازه گیری قابلیت ماشین کاری	۱۶
۱۶	۱-۳-۲-۲ سرعت برشی	۱۶
۱۷	۲-۳-۲-۲ مصرف نیرو	۱۷
۱۷	۳-۳-۲-۲ پرداخت سطحی	۱۷
۱۷	۴-۳-۲-۲ عمر ابزار	۱۷

۱۹	۳-۲ خواص الکتریکی و مغناطیسی مواد
۱۹	۱-۳-۲ خواص الکتریکی مواد فلزی
۱۹	۲-۳-۲ خواص مغناطیسی مواد
۲۰	۱-۲-۳-۲ میدان مغناطیسی (H)
۲۱	۲-۲-۳-۲ چگالی شار
۲۱	۳-۲-۳-۲ شدت میدان مغناطیسی
۲۱	۴-۲-۳-۲ نفوذپذیری مغناطیسی
۲۳	۵-۲-۳-۲ القای مغناطیسی
۲۳	۳-۳-۲ دسته‌بندی مواد مغناطیسی
۲۴	۱-۳-۳-۲ دیامغناطیس
۲۵	۲-۳-۳-۲ پارامغناطیس
۲۷	۳-۳-۳-۲ فرومغناطیس
۲۸	۴-۳-۲ حوزه‌های مغناطیسی
۲۹	۱-۴-۳-۲ ساختار تعادلی حوزه‌ها
۳۰	۲-۴-۳-۲ دیواره حوزه‌ها
۳۲	۵-۳-۲ حلقه‌ی هیستریزس
۳۴	۴-۲ سیگنال‌های بارک هاوزن
۳۴	۱-۴-۲ روش غیر مخرب بارک هاوزن
۳۵	۲-۴-۲ اندازه‌گیری سیگنال‌های مغناطیسی
۳۶	۳-۴-۲ تحلیل داده‌ها
۳۸	۵-۲ مثال‌های کاربردی از روش سیگنال بارک هاوزن
۳۸	۱-۵-۲ اثر اندازه دانه بر سیگنال‌های بارک هاوزن در فولاد کربنی

۴۰	..... اثر پرلیت بر سیگنال بارک هاوزن در فولاد ساده‌ی کربنی
۴۲	..... تأثیر ریز ساختار بر سیگنال بارک هاوزن
۴۵	..... تأثیر فرایند تمپر بر سیگنال بارک هاوزن
۴۸	..... تأثیر عملیات حرارتی کروی کردن بر سیگنال بارک هاوزن
۵۲	..... مواد و روش آزمایش
۵۲	..... ۱-۳ مواد آزمایش
۵۲	..... ۲-۳ عملیات حرارتی
۵۴	..... ۳-۳ متالوگرافی
۵۵	..... ۴-۳ آنالیز پردازش تصویر Clemex
۵۶	..... ۵-۳ آزمون سختی سنجی
۵۶	..... ۶-۳ آزمون کشش
۵۶	..... ۷-۳ آزمون ماشین‌کاری
۵۷	..... ۱-۷-۳ ماشین ستر عمودی
۵۷	..... ۲-۷-۳ ابزار برشی
۵۸	..... ۳-۷-۳ دینامومتر
۵۹	..... ۴-۷-۳ کارت اکتساب داده
۵۹	..... ۵-۷-۳ پارامترهای برشی
۶۰	..... ۸-۳ آزمون غیر مخرب سیگنال بارک هاوزن
۶۰	..... ۱-۸-۳ دستگاه اندازه‌گیری سیگنال‌های بارک هاوزن
۶۲	..... ۲-۸-۳ پارامترهای مورد بررسی در سیگنال‌های بارک هاوزن
۶۲	..... ۳-۸-۳ طراحی یوک مغناطیسی و کوئل خواننده
۶۳	..... ۴-۸-۳ اندازه‌گیری و آنالیز سیگنال‌های بارک هاوزن در نمونه‌های عملیات حرارتی شده

۳-۸-۱-۱	روش محاسبه پارامتر RMS سیگنال بارک هاوزن	۶۴
۳-۸-۲	روش محاسبه پارامتر بیشینه ارتفاع سیگنال بارک هاوزن	۶۴
۳-۸-۵	بررسی ارتباط نتایج سختی سنجی، خواص مکانیکی و خواص ماشین کاری با آزمون غیر مخرب	۶۴
۴	نتایج و بحث	۶۶
۴-۱	بررسی های متالوگرافی	۶۶
۴-۲	آنالیز تصاویر پردازش شده توسط نرم افزار Clemex	۶۹
۴-۲-۱	اندازه ذرات	۶۹
۴-۲-۲	درصد کروی سازی	۷۳
۴-۳	سختی سنجی	۷۴
۴-۴	آزمون کشش	۷۵
۴-۵	آزمون ماشین کاری	۷۷
۴-۶	آزمون غیر مخرب سیگنال بارک هاوزن	۸۰
۴-۶-۱	بررسی نتایج آزمون سیگنال بارک هاوزن در نمونه های عملیات حرارتی شده	۸۰
۴-۶-۲	بررسی ارتباط نتایج آزمون های مکانیکی و ماشین کاری با سیگنال های بارک هاوزن	۸۳
۵	نتیجه گیری و پیشنهادها	۸۷
۵-۱	نتیجه گیری	۸۷
۵-۲	پیشنهادها	۸۹
۶	مراجع	۹۱
۷	پیوست	۹۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: خواص مکانیکی بعد از عملیات حرارتی ۴۴
- جدول ۲-۲: ترکیب شیمیایی فولاد SAE ۴۱۴۰ (%wt) ۴۶
- جدول ۳-۲: مقادیر سختی و پارامترهای بارک هاوزن نمونه‌های مختلف ۴۶
- جدول ۱-۳: ترکیب شیمیایی فولاد CK۶۰ (%wt) ۵۲
- جدول ۲-۳: روند تکرار در پروسه عملیات حرارتی کروی کردن نمونه‌های فولادی ۵۴
- جدول ۳-۳: مقادیر پارامترهای برشی آزمون ماشین‌کاری ۵۹
- جدول ۱-۴: عامل‌های آزمون کشش برای نمونه نرماله و کروی شده ۷۶
- جدول ۲-۴: نتایج آزمون ماشین‌کاری ۷۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: میکروگراف SEM از فولاد AISI ۴۰۳۷ آنیل شده زیر دمای بحرانی در دمای 704°C بعد از (الف) ۴ ساعت و (ب) ۱۲ ساعت نگهداری ۷
- شکل ۲-۲: میکروگراف SEM از فولاد AISI ۴۰۳۷ آنیل شده در دمای بحرانی بعد از (الف) ۴ ساعت و (ب) ۱۲ ساعت نگهداری ۹
- شکل ۳-۲: شماتیکی از نظریه اغتشاشی رایلی در استوانه‌هایی با طول‌های مختلف ۱۰
- شکل ۴-۲: شماتیک نظریه اصلاح شده اغتشاشی مولینز و نیکولز؛ (الف) کاربیدهای بشقابی (ب) ضخیم شدن لبه‌ی بشقاب‌های مسطح به خاطر پتانسیل‌های شیمیایی متفاوت (ج) ضخیم شدن لبه‌های خارجی باعث گسترش اغتشاش سینوسی می‌شود (د) حلقه‌ها به ذرات کوچک‌تر شکسته می‌شوند ۱۲
- شکل ۵-۲: شماتیک نظریه شیارهای حرارتی برای شکستن کره‌ها ۱۳
- شکل ۶-۲: شماتیک نظریه مهاجرت عیوب در شکستن کره‌ها ۱۴
- شکل ۷-۲: شماتیک انواع براده، (الف) براده غیر پیوسته (ب) براده پیوسته با لبه انباشت (ج) براده غیر پیوسته ۱۶
- شکل ۸-۲: براده‌های آهن میدان مغناطیسی اطراف یک میله مغناطیسی را نمایش می‌دهند ۲۰
- شکل ۹-۲: شماتیکی از گراف مغناطیسی که نشان‌دهنده قطبیت و جهت خطوط است ۲۲
- شکل ۱۰-۲: (الف) ماده دیامغناطیس: خطوط نیرو دفع می‌شوند (ب) ماده پارامغناطیس: خطوط نیرو به

- صورت جزئی جذب می‌شوند (ج) ماده فرومغناطیس: خطوط نیرو به شدت جذب می‌شوند ۲۴
- شکل ۱۱-۲: تصویر شماتیک دوقطبی‌های مغناطیسی برای مواد دیامغناطیس (الف) در حضور و (ب) در عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی ۲۵
- شکل ۱۲-۲: تصویر شماتیک دوقطبی‌های مغناطیسی برای ماده پارامغناطیس (الف) در حضور و (ب) در عدم حضور میدان مغناطیسی خارجی ۲۶
- شکل ۱۳-۲: تصویر شماتیک دوقطبی‌های مغناطیسی برای ماده فرومغناطیس در عدم حضور میدان مغناطیس. ۲۸
- شکل ۱۴-۲: چگونگی شکل‌گیری حوزه‌های فرومغناطیسی برای کاهش انرژی استاتیکی (الف) تک حوزه (ب) دو حوزه با جهت مغناطیسی مخالف (ج) چهار حوزه با مغناطیس پذیری متناوب (د) حوزه‌های گوشه‌ای که باعث کاهش انرژی مگنتواستاتیک می‌شوند ۲۹
- شکل ۱۵-۲: انواع دیواره حوزه‌ها: (الف) دیواره بلوخ (ب) دیواره نیل ۳۱
- شکل ۱۶-۲: تغییرات میدان مغناطیسی با اعمال نیروی مغناطیسی (حلقه‌ی هیستریزیس). ۳۲
- شکل ۱۷-۲: شماتیک دستگاه اندازه‌گیری سیگنال بارک هاوزن ۳۵
- شکل ۱۸-۲: تصویر شماتیک دستگاه اندازه‌گیری سیگنال بارک هاوزن. (الف) کوئل برگیر (ب) کوئل سطحی ۳۶
- شکل ۱۹-۲: داده‌های خام سیگنال‌های بارک هاوزن رسم شده بر حسب زمان ۳۷
- شکل ۲۰-۲: مشخصه یابی مغناطیسی آهن خالص: (الف) ولتاژ I.m.S. برای سه اندازه دانه متفاوت (ب) تغییرات بیشینه پیک ولتاژ I.m.S. سیگنال بارک هاوزن با اندازه دانه ۳۹
- شکل ۲۱-۲: ولتاژ I.m.S. در مقابل زمان در رسوبات مرز دانه‌ای (130 p.p.m. Fe-C) - محلول جامد یا آهن خالص ۴۰
- شکل ۲۲-۲: (الف) منحنی توزیع ارتفاع سیگنال‌های بارک هاوزن برای مقدار پرلیت متفاوت (ب) مقایسه منحنی توزیع نمونه‌ی ۱۰۹۵ در حالت‌های نرماله و سرد شده در کوره ۴۲
- شکل ۲۳-۲: (الف) سمانتی ته‌ای کروی شده در فریت (ب) پرلیت‌های لایه‌ای، مارتنزیت تمپر شده در (ج) 400°C و (د) در 180°C ۴۳
- شکل ۲۴-۲: پروفیل مشخصه یابی سیگنال‌های بارک هاوزن برای نمونه‌های با ریز ساختار متفاوت در شکل ۲۳-۲، ارتفاع پیک V_p و مساحت زیر پروفیل A برای نمونه‌ی کروی شده با این کمیت‌ها مشخص شده است، V_0 و A_0 موقعیت پیک I_p با دامنه‌ی جریان بیشینه I_{max} مشخص شده است ۴۵

شکل ۲-۲۵: نمودار اثر انگشت در نمونه‌های مختلف ۴۷

شکل ۲-۲۶: تصاویر میکروسکوپ الکترونی SEM، (الف) نمونه نرماله، (ب) نمونه ۷۲ ساعت کروی شده ۴۹

شکل ۲-۲۷: (الف) منحنی اثر انگشت برای مقادیر مختلف کروی (ب) تغییرات ارتفاع پیک با میزان کروی سازی ۵۰

شکل ۳-۱: فرایند عملیات حرارتی کروی کردن فولاد $ck60$ ؛ ابتدا نرماله در دمای $885^{\circ}C$ به مدت ۳۰ دقیقه و سپس عملیات حرارتی کروی سازی که قرار دادن نمونه‌ها در کوره $740^{\circ}C$ به مدت ۱۵ دقیقه و بلافاصله قرار دادن در کوره $700^{\circ}C$ و نگهداری برای ۳ ساعت در این دما و سپس سرد کردن در هوا تا دمای محیط (الف) نمونه اول، یک مرحله تکرار (ب) نمونه دوم، دو مرحله تکرار ۵۳

شکل ۳-۲: (الف) تصویر SEM نمونه ۵ (ب) تصویر SEM بعد از ایجاد کنتراست توسط نرم افزار پردازش تصویر Clemex ۵۵

شکل ۳-۳: (الف) تصویر واقعی ماشین ستر عمودی، (ب) تصویر شماتیک ماشین ستر عمودی ۵۷

شکل ۳-۴: ابزار برشی اینسرت ۵۸

شکل ۳-۵: دینامومتر ۵۸

شکل ۳-۶: کارت اکتساب داده ۵۹

شکل ۳-۷: تصویر دستگاه طراحی و ساخته شده به منظور اندازه‌گیری سیگنال‌های بارک هاوزن، (الف) اسپلاتور (ب) یوک مغناطیس کننده و کویل خواننده (ج) تقویت کننده (د) کارت اسپلوسکپ (ه) داده خام نمایش داده شده در نرم‌افزار Origin ۶۱

شکل ۳-۸: سیگنال‌های بارک هاوزن خام گرفته شده از نمونه‌ی نرماله فولاد $CK60$ ۶۳

شکل ۴-۱: تصاویر نمونه‌های عملیات حرارتی شده میکروسکپ نوری (الف) نرماله و SEM، نمونه ۱ مرحله کروی شده (ب) نوری (ج) SEM، ۲ مرحله کروی شده (د) نوری (ه) SEM، ۳ مرحله کروی شده (پ) نوری (ت) SEM، ۴ مرحله کروی شده (ر) نوری (ز) SEM، ۶ مرحله کروی شده (س) نوری (ش) SEM، ۷ مرحله کروی شده (ص) نوری (ض) SEM، ۸ مرحله کروی شده (ط) نوری (ظ) SEM ۶۸

شکل ۴-۲: هیستوگرام اندازه ذرات کروی در زمان‌های متفاوت عملیات حرارتی کروی سازی فولاد $CK60$. (الف) نمونه ۱ مرحله کروی شده (ب) نمونه ۲ مرحله کروی شده (ج) نمونه ۳ مرحله کروی شده (د) نمونه ۴ مرحله کروی شده (ه) نمونه ۶ مرحله کروی شده (پ) نمونه ۷ مرحله کروی شده (ت) نمونه ۸ مرحله کروی شده ۷۲

- شکل ۳-۴: تغییرات میانگین اندازه ذرات کرووی شده حین عملیات حرارتی کرووی سازی فولاد CK۶۰. ... ۷۳
- شکل ۴-۴: تغییرات درصد کرووی سازی حین عملیات حرارتی کرووی سازی فولاد CK۶۰. ۷۴
- شکل ۵-۴: تغییرات ماکرو سختی نمونه‌های نرماله و کرووی شده حین عملیات حرارتی کرووی سازی فولاد CK۶۰. ۷۵
- شکل ۶-۴: منحنی تنش-کرنش نمونه‌های نرماله و کرووی شده. ۷۶
- شکل ۷-۴: تغییرات نیروی برشی در نمونه‌های نرماله و کرووی شده. ۷۸
- شکل ۸-۴: اثر سختی بر قابلیت ماشین‌کاری. ۷۹
- شکل ۹-۴: تغییرات شدت سیگنال بارک هاوزن با ولتاژ اعمالی برای نمونه‌های نرماله و کرووی شده. ۸۲
- شکل ۱۰-۴: تغییرات بیشینه ولتاژ و RMS با افزایش زمان در نمونه‌های نرماله و کرووی شده. ۸۳
- شکل ۱۱-۴: بازه کنترل کیفیت برای قابلیت ماشین‌کاری نمونه‌های کرووی شده به کمک دو پارامتر سختی و شدت ارتفاع پیک بارک هاوزن. ۸۵

فصل اول

مقدمه

۱ مقدمه

روش‌های غیر مخرب به فرایندهایی گفته می‌شود که بدون تخریب و یا تغییری در ماده به بررسی خواص ماده می‌پردازند. از این‌رو در سال‌های اخیر بررسی‌های غیر مخرب کاربردی در صنعت به چندین روش مختلف دسته‌بندی می‌شوند. اصلی‌ترین روش‌های غیر مخرب شامل آزمون فرا صوتی، الکترومغناطیس، پرتونگاری، مایع نافذ، ذرات مغناطیسی، ترموگرافی، نشت، حافظه مغناطیسی و نشر صوتی می‌شود. اساس کار این روش‌ها در مطالعه مواد بر اندازه‌گیری خواص فیزیکی از ماده است که تحت تأثیر ویژگی‌های ماده مثل ترکیب شیمیایی، ریز ساختار و غیره تغییر می‌کند. در نتیجه با بررسی خواص فیزیکی ماده و ارتباط دادن با ویژگی مورد نظر مثل ترکیب شیمیایی یا ریز ساختار می‌توان به شکل غیر مخرب خواص ماده را مورد مطالعه قرار داد.

در صنعت بر روی اغلب قطعات تولیدی، سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی انجام می‌شود تا خواص مکانیکی مورد نظر حاصل شود. از آن‌جا که در بسیاری از موارد، ریز ساختار حاصل از یکی از فرایندهای عملیات حرارتی به عنوان ریز ساختار اولیه فرایند دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد، همواره احتمال اختلاط ناخواسته قطعات وجود داشته و بنابراین جداسازی آن‌ها بر اساس نوع عملیات حرارتی اعمال‌شده از اهمیت خاصی برخوردار است. معمولاً برای بررسی ویژگی‌های یک ماده، خواص مکانیکی و ریز ساختار بررسی می‌شود. برای این کار باید قسمتی از قطعه جدا و مراحل آماده‌سازی برای شناسایی ریز ساختار و یا آزمون خواص مکانیکی انجام شود؛ بنابراین ارزیابی خواص یک قطعه صنعتی با استفاده از این روش‌های مخرب نیازمند صرف هزینه و زمان زیاد می‌باشد. از این‌رو مطالعه روش‌های غیر مخرب در بررسی‌های ریز ساختاری مواد فلزی در جهت کنترل خواص قطعات صنعتی با کمترین هزینه و زمان و بیش‌ترین کارایی لازم می‌باشد. در دهه‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روش‌های الکترومغناطیس شامل روش سیگنال بارک هاووزن انجام شده

است. باتیستا و همکارانش در سال ۲۰۱۳ به بررسی میکروسکوپی اثر شکل و درصد فاز سمانتیت بر خواص مغناطیسی فولادهای غیر آلیاژی پرداختند [۱-۲]. در این گزارش به بررسی روش بارک هاوزن نوین در تغییرات ریز ساختاری پرداخته شده است.

فصل دوم

مروری بر منابع

۲ مروری بر منابع

در این فصل به بررسی تعاریف و مفاهیم اولیه پژوهش پرداخته می‌شود و شامل ۵ بخش است. بخش اول به بررسی روش‌های عملیات حرارتی کروی سازی فولادها و مکانیزم این فرایند می‌پردازد. در بخش دوم به بررسی قابلیت ماشین‌کاری فولادها پرداخته می‌شود. بخش سوم شامل مفاهیم الکترومغناطیس بر پایه مغناطیس و الکتریسته است. بخش چهارم روش غیر مخرب سیگنال بارک هاوزن مطالعه می‌شود و بخشی از کاربردهای این روش نیز در بخش پنجم گنجانده شده است.

۱-۲ بخش ۱

در این بخش انواع فرایندهای عملیات حرارتی کرووی سازی و نظریه‌هایی که برای مکانیزم این فرایند بیان شده‌اند، بررسی می‌شود.

۱-۱-۲ عملیات حرارتی کرووی سازی

عملیات حرارتی کرووی سازی در فولادها با تغییر در مورفولوژی فاز سمانتیت به کرووی شده باعث کاهش استحکام و افزایش انعطاف‌پذیری می‌شود. این عملیات حرارتی یک زمینه فریتی پیوسته در فولاد ایجاد می‌کند که فولاد کرووی شده را شامل یک ساختار با انعطاف‌پذیری بالا می‌کند. تغییر در مورفولوژی کاربید نیرو محرکه ترمودینامیکی است که از کاهش فصل مشترک فریت-کاربید ناشی می‌شود.

دو مرحله در فرایند کرووی سازی وجود دارد. در مرحله اول تمام کاربیدها با نسبت هندسی بالا (مثل سمانتیت‌های لایه‌ای در پرلیت) به تکه‌های کوچک‌تر کاربیدهای کرووی شکسته می‌شوند. ذرات کرووی شده در مقایسه با ساختار کشیده نسبت هندسی کمتری دارند. این ذرات کرووی شده کوچک با فرایند استوالد راپینینگ به ذرات بزرگ تبدیل شده از این رو کاهش بیشتری در نسبت هندسی نهایی پیدا می‌کنند. سینتیک هر دو مرحله کرووی سازی تحت کنترل نفوذ کربن و دیگر عناصر آلیاژی زمینه فریت یا آستنیتی است [۳].

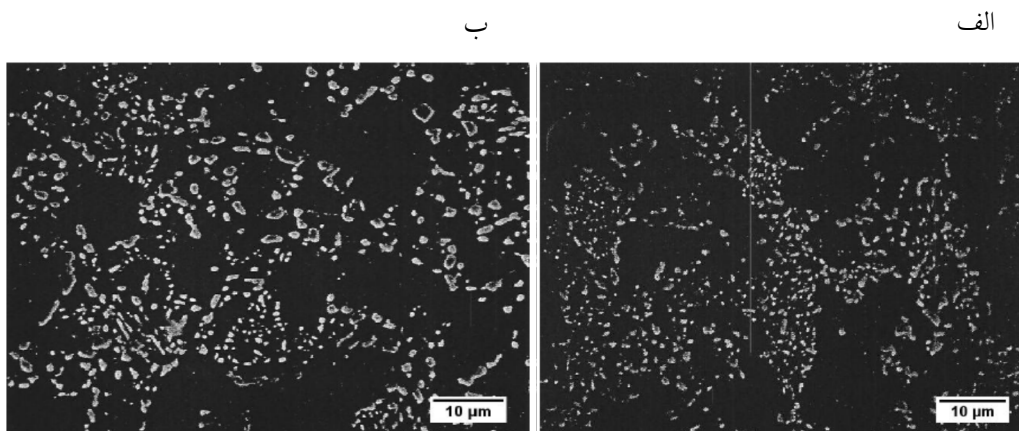
چهار فرایند عملیات حرارتی متفاوت برای کرووی سازی وجود دارد که دو روش معمول‌تر آن عبارت‌اند از: روش‌های زیر حد بحرانی^۱ و میان بحرانی^۲.

۱-۱-۱-۲ عملیات حرارتی زیر حد بحرانی

برای اعمال عملیات حرارتی زیر حد بحرانی، فولادها در زیر دمای A_1 خود حرارت دهی می‌شوند و برای

¹ subcritical
² intercritical

مدتی معمولاً چندین ساعت در این دما نگه داشته می‌شوند و سپس تا دمای اتاق سرد می‌شوند. در این حالت فولادها به فاز آستنیت بازخواهند گشت. از این رو یک ساختار پرلیتی ریز باقی می‌ماند که فواصل نفوذی را کاهش داده و سینتیک کروی سازی را افزایش می‌دهد. ساختار فولاد تحت عملیات زیر دمای بحرانی معمولاً شامل تعداد زیادی کاربید کروی ریز در زمینه‌ی فریت است در نتیجه نیرومحرکه‌ی بزرگی برای استدوالد راپینینگ فراهم می‌کند. اندازه نهایی کاربید توسط تنظیم دقیق زمان و دمای عملیات حرارتی کنترل می‌شود. شکل ۱-۲ (الف) کروی سازی تقریباً کامل یک فولاد پرلیتی طی ۴ ساعت با تعداد زیادی ذرات کروی کوچک در زیر دمای بحرانی 704°C را نشان می‌دهد. شکل ۱-۲ (ب) درشت شدن ذرات بعد از نگه‌داشتن به مدت ۱۲ ساعت را نشان می‌دهد [۴].



شکل ۱-۲: میکروگراف SEM از فولاد AISI ۴۰۳۷ آنیل شده زیر دمای بحرانی در دمای 704°C بعد از (الف) ۴ ساعت و (ب) ۱۲ ساعت نگهداری [۴].

۲-۱-۱-۲ عملیات حرارتی میان بحرانی

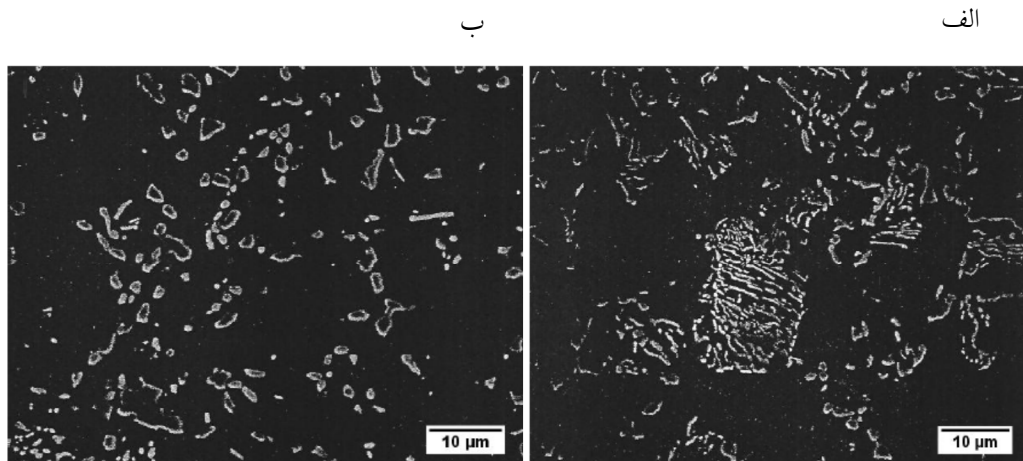
در روش عملیات حرارتی میان بحرانی، فولاد در بالای دمای A_1 به مدت دو یا سه ساعت حرارت داده می‌شود و سپس به آرامی تا زیر این دما سرد می‌شود و تا قبل از سرد کردن تا دمای اتاق چندین ساعت در این دما نگهداری می‌شود. در روش عملیات حرارتی میان بحرانی، تغییر حالت به فاز آستنیت منجر به انحلال کربن شده و سپس سرد کردن آهسته مواد ممکن است باعث جوانه زنی ذرات سمانتیت شود که به ذرات کروی درشت تبدیل خواهند شد. این ساختار معمولاً قابلیت رسوب کردن ذرات بزرگ سمانتیت در مرز دانه‌ها را دارد. ذرات با اندازه بزرگ‌تر می‌توانند مکان‌های جوانه زنی بیشتری برای ریز حفرات فراهم کنند بنابراین باعث کاهش استحکام شکست فولاد می‌شوند. با سرد کردن از فاز آستنیت همچنین ممکن است مواد به پرلیت‌های درشت تبدیل شوند؛ بنابراین زمان نگهداری در دمای زیر حد بحرانی به جای اینکه باعث درشت شدن کره‌های سمانتیتی شود صرف شکسته شدن پرلیت‌های درشت می‌شود. در فولاد AISI ۴۰۳۷ ساختار با پرلیت‌های درشت که حین عملیات حرارتی میان بحرانی ایجاد می‌شود بعد از ۴ ساعت عملیات حرارتی هم چنان مشاهده می‌شود (شکل ۲-۲ الف). پرلیت‌های درشت فواصل نفوذی بزرگ‌تری نسبت به پرلیت‌های ریز دارند و بسیار آهسته‌تر کروی می‌شوند. شکل ۲-۲ (ب) ریز ساختار کروی شدن کامل بعد از ۱۲ ساعت عملیات حرارتی میان بحرانی را نشان می‌دهد. عملیات حرارتی میان بحرانی اندازه ذرات کروی شده بزرگ‌تری را (تصویر ۲-۲ ب) در مقایسه با عملیات حرارتی زیر دمای بحرانی (تصویر ۲-۲ ب) تسلیم خواهد کرد [۴].

۲-۱-۲ مکانیزم‌ها

چهار نظریه پذیرفته‌شده‌ی معمول برای مکانیزم شکسته شدن پرلیت در فرایند کروی سازی وجود دارد: (۱) نظریه اغتشاشی رایلی^۱، (۲) نظریه اغتشاشی اصلاح‌شده^۱ توسط مولینز و نیکولز، (۳) نظریه شیارهای حرارتی^۲، (۴)

^۱ Rayleigh's perturbation

نظریه مهاجرت عیوب^۳. هرچند نظریه اغتشاشی رایلی و نظریه شیپارهای حرارتی اهمیت کمتری نسبت به دو نظریه دیگر دارند.



شکل ۲-۲: میکروگراف SEM از فولاد AISI ۴۰۳۷ آنیل شده در دمای بحرانی بعد از (الف) ۴ ساعت و (ب) ۱۲ ساعت نگه‌داری [۴].

۱-۲-۱-۲ نظریه اغتشاشی رایلی

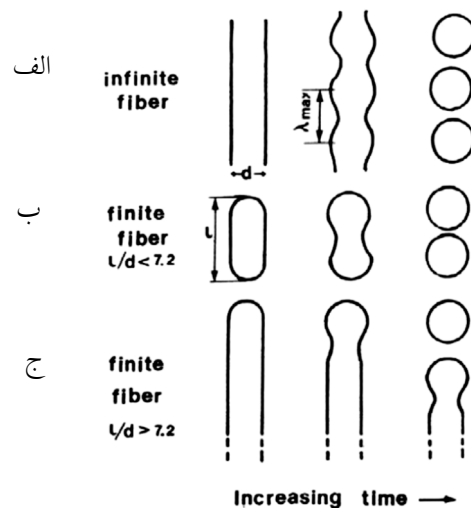
نظریه اغتشاشی رایلی فرض می‌کند که کاربیدهای استوانه‌ای شکل یک اغتشاش سینوسی در طول زمان را در نتیجه اغتشاش لوله مویین خواهند داشت. اگر طول موج بیشینه (λ_{max}) از طول موج بحرانی (λ_c) بیشتر شود این اغتشاش با گذشت زمان بیشتر و شدیدتر خواهد شد. مقدار این طول موج وابسته به نرخ کنترل مکانیزم انتقال جرم است. با افزایش پیوسته آشفستگی سرانجام استوانه به ردیفی از کره‌ها بافاصله‌ای برابر با λ_{max} شکسته خواهد شد. شکل ۲-۳ شماتیک نظریه اغتشاشی رایلی را نشان می‌دهد (زمان از چپ به راست افزایش پیدا می‌-

¹ modified perturbation

² thermal groove

³ fault migration

کند). در زمان‌های کم در سمت چپ یک ذره استوانه‌ای مستقیم نشان داده شده است. با افزایش زمان استوانه آشفته‌گی را با طول موج λ_{max} افزایش می‌دهد. سپس استوانه به ذرات کروی کوچک در سمت راست شکل تبدیل می‌شود. شکل ۳-۲ هم‌چنین اثر نسبت ارتفاع به قطر را بر اغتشاش نشان می‌دهد. شکل ۳-۲ (الف) یک فیبر نامحدود طویل را نشان می‌دهد که اغتشاش را در سراسر طول گسترش می‌دهد. شکل ۳-۲ (ب) ذره‌ای با نسبت ارتفاع به قطر کمتر از $7/2$ را نشان می‌دهد که به دو ذره کروی شکسته می‌شود. ذره‌ای با نسبت ارتفاع به قطر بزرگ‌تر از $7/2$ اغتشاش را در یک سمت گسترش می‌دهد و در سمت دیگر به تدریج به ذرات کروی شکسته می‌شود. مشکل نظریه رایلی در کروی سازی پرلیت وجود فرضیه استوانه‌ای بودن شکل ذرات در مقایسه با شکل واقعی پرلیت به صورت صفحه‌ای است. مورفولوژی صفحه‌ای پرلیت دارای یک سطح تخت بزرگ است که در برابر اغتشاش مویرگی پایدار می‌باشد. از آن جا که مورفولوژی اولیه پرلیت بشقاب مانند است نظریه اغتشاشی رایلی بعدها توسط مولینز و نیکولز با در نظر گرفتن شکل بشقابی پرلیت اصلاح شد [۵].



شکل ۳-۲: شماتیکی از نظریه اغتشاشی رایلی در استوانه‌هایی با طول‌های مختلف (الف) فیبر نامحدود (ب) فیبر با نسبت ارتفاع به قطر کمتر از $7/2$ (ج) فیبر با نسبت ارتفاع به قطر بزرگ‌تر از $7/2$ [۵].