

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

تأثیر عملیات سرد کردن زیر صفر بر ساختار میکروسکوپی و رفتار
تریبولوژیکی فولاد ۱/۷۱۴۷

پایان نامه کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد

سیما ترکیان

اساتید راهنما

دکتر محمد رضا طرقی نژاد

دکتر علی شفیعی



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد خانم سیما ترکیان تحت عنوان
تأثیر عملیات سرد کردن زیر صفر بر ساختار میکروسکوپی و رفتار تریبولوژیکی فولاد

۱/۲۱۴۷

در تاریخ ۹۳/۱۰/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|-------------------------|-------------------------------|
| دکتر علی شفیعی | ۱- استاد راهنمای پایان نامه |
| دکتر محمد رضا طرقی نژاد | ۲- استاد راهنمای پایان نامه |
| دکتر حسین ادريس | ۳- استاد داور |
| دکتر احمد رضاییان | ۴- استاد داور |
| دکتر کیوان رئیسی | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |

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

تقدیم به پدرم

او که خورشید چشانش غروب کرد تا ستاره های آسمانش درخشان بماند

و

تقدیم به مادرم

او که دلش دریاست اما مانند کوه استوار است.

تقدیر و تشکر از اساتید گرانمایه
دکتر شفیع و دکتر طریقی نژاد

که بی دریغ قطره‌ای از دریای علم خویش را شمار این تشنه‌کام نموده و از بیچ کوششی برای به ثمر رسیدن این نهال دریغ نمودند.
تقدیر و تشکر از جناب آقای مهندس صفری و کلیه‌ی دوستان و هم‌قطاری‌های ارجمند که همواره روزنی بودند در هنگامه‌ی سراسیمگی

فهرست مطالب

| عنوان | صفحه |
|---|------|
| فهرست مطالب | هشت |
| چکیده | ۱ |
| فصل اول: مقدمه | |
| فصل دوم: مروری بر مطالب | |
| ۱-۲- معرفی و تاریخچه | ۵ |
| ۲-۲- آستنیت باقیمانده | ۵ |
| ۱-۲-۲- پایداری آستنیت | ۸ |
| ۳-۲- مشخصه‌های سطوح کربوره شده | ۱۴ |
| الف) ریزساختار | ۱۴ |
| ۱-۳-۲- رفتار سایشی فولادهای کربوره شده | ۱۸ |
| ۴-۲- عملیات سردسازی و زیر صفر فولاد | ۱۹ |
| ۱-۴-۲- تأثیر دما و زمان آستنیته کردن | ۲۲ |
| ۲-۴-۲- انواع فولادها که میتوانند تحت عملیات زیر صفر قرار گیرند: | ۲۳ |
| الف) فولاد ابزار | ۲۳ |
| ب) فولادهای زنگ نزن | ۲۷ |
| ج) فولاد AISI 4340 | ۲۸ |
| د) فولادهای سطح سخت شونده | ۲۸ |
| ۵-۲- بازگشت و تاثیر آن بر نمونه‌های عملیات زیر صفر شده | ۲۸ |
| ۶-۲- انواع سایش | ۳۱ |
| ۲-۶-۲- سایش چسبان | ۳۳ |
| ۳-۶-۲- سایش خوردگی | ۳۴ |
| فصل سوم: مواد و روش‌های آزمایش | |
| ۱-۳- آلیاژ مورد استفاده | ۳۶ |
| ۲-۳- عملیات حرارتی نمونه‌ها | ۳۶ |
| ۳-۳- آزمون‌ها | ۳۷ |
| ۱-۳-۳- سختی سنجی | ۳۷ |
| ۲-۳-۳- سایش | ۳۸ |
| ۳-۳-۳- متالوگرافی نمونه‌ها | ۳۸ |
| ۴-۳-۳- فازیابی با استفاده از پراش پرتوی ایکس | ۳۹ |
| فصل چهارم: نتایج و بحث | |
| ۱-۴- بررسی ریزساختاری | ۴۰ |
| ۱-۱-۴- متالوگرافی | ۴۰ |
| ۲-۱-۴- بررسی ریزساختار با اشعه‌ی ایکس | ۴۶ |
| ۲-۴- سختی سنجی | ۴۷ |
| ۳-۴- سایش | ۴۹ |

| | |
|----|---|
| ۴۹ |۱-۳-۴ ضریب اصطکاک |
| ۵۲ |۲-۳-۴ بررسی سطوح سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی |
| ۵۹ |۳-۳-۴ تغییرات نرخ سایش |
| | فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات |
| ۶۶ |مراجع |

فهرست جداول

| <u>صفحه</u> | <u>عنوان</u> |
|-------------|---|
| ۷ | جدول ۱-۲. تأثیر ۱٪ از عناصر آلیاژی بر دمای شروع استحاله مارتنزیت در فولادهایی با ۰/۹ - ۱٪ کربن..... |
| ۷ | جدول ۲-۲. تأثیر ۱٪ کروم بر دمای شروع استحاله مارتنزیتی در فولادهایی با درصد کربن مختلف..... |
| ۱۹ | جدول ۲-۳. نقطه‌ی جوش عادی سیالات زیر صفر رایج..... |
| ۲۴ | جدول ۲-۴. مقایسه‌ی دریل‌های عملیات حرارتی معمولی شده و زیر صفر شده..... |
| ۳۶ | جدول ۳-۱. ترکیب شیمیایی فولاد ۱/۷۱۴۷٪..... |
| ۳۷ | جدول ۳-۲. عملیات حرارتی نمونه‌ها..... |
| ۴۷ | جدول ۴-۱. سختی بر اساس نوع عملیات انجام شده (DCT)..... |

فهرست اشکال

| <u>صفحه</u> | <u>عنوان</u> |
|-------------|--|
| ۶ | شکل ۱-۲. دمای شروع و پایان استحاله مارتنزیت (M_s و M_f) با توجه به درصد کربن در فولاد..... |
| ۷ | شکل ۲-۲. منحنی استحاله مارتنزیت..... |
| ۸ | شکل ۳-۲. سختی راکول C به عنوان تابعی از درصد کربن..... |
| ۹ | شکل ۴-۲. درصد آستنیت باقیمانده به عنوان تابعی از درصد کربن..... |
| ۱۱ | شکل ۵-۲. تغییر دمای M_s و اندازه دانه‌ی آستنیت با دمای آستنیت کردن..... |
| ۱۱ | شکل ۶-۲. تغییرات دمای M_s با زمان حرارت دهی آستنیت کردن..... |
| ۱۲ | شکل ۷-۲. تغییرات (M_b با الف) اندازه دانه‌ی آستنیت ب) دمای آستنیت کردن و ج) میزان مارتنزیت انفجاری..... |
| ۱۳ | شکل ۸-۲. اثر پیرسازی در 250°C بر M_s (Fe-1.06% C-1.63% Cr)..... |
| ۱۴ | شکل ۹-۲. تغییر در میزان آستنیت باقیمانده با دمای کوئنچ (در فولادهای کربنی)..... |
| ۱۶ | شکل ۱۰-۲. کاربردهای درشت اولیه‌ی تشکیل شده در فولاد SAE 4130..... |
| ۱۷ | شکل ۱۱-۲. شبکه‌های کاربیدی در مرز دانه‌های آستنیت اولیه..... |
| ۱۷ | شکل ۱۲-۲. کاربردهای ریز اولیه در مارتنزیت تیغه‌ای که به وسیله‌ی کربن دهی..... |
| ۲۰ | شکل ۱۳-۲. تجهیزات فرایند زیر صفر..... |
| ۲۱ | شکل ۱۴-۲. یک سیکل عملیات حرارتی شامل عملیات زیر صفر..... |
| ۲۲ | شکل ۱۵-۲. اثر سرمایش تا فرایند زیر صفر بر تعداد کاربردهای فولاد D2..... |
| ۳۲ | شکل ۱۶-۲. انواع تماس در طول سایش خراشان..... |
| ۳۲ | شکل ۱۷-۲. پنج مکانیزم سایش خراشان..... |
| ۳۳ | شکل ۱۸-۲. تصویر ساده شده‌ی سایش چسبان..... |
| ۳۴ | شکل ۲۱-۲. مدل سایش اکسیدی..... |
| ۳۸ | شکل ۱-۳. تصویر دستگاه سایش..... |
| ۴۰ | شکل ۱-۴. اندازه گیری عمق نفوذ کربن با استفاده از نرم افزار TS View..... |
| ۴۱ | ادامه‌ی شکل ۴-۱، ه) 48DCT..... |
| ۴۲ | شکل ۲-۴. تصاویر میکروساختار توسط میکروسکوپ نوری..... |
| ۴۳ | شکل ۳-۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از کاربردها، سمت راست BSE و سمت چپ SE..... |
| ۴۴ | ادامه‌ی شکل ۴-۳، ط و ظ) 48DCT در بزرگنمایی $2000 \times$ |
| ۴۴ | شکل ۴-۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از کاربردها..... |
| ۴۵ | شکل ۵-۴. تصویر تهیه شده از تصاویر میکروسکوپی جهت محاسبات نرم افزاری..... |
| ۴۵ | شکل ۶-۴. توزیع اندازه‌ی کاربردها در نمونه‌های مختلف..... |
| ۴۶ | شکل ۷-۴. الگوی پراش نمونه‌ی CHT..... |
| ۴۶ | شکل ۸-۴. الگوی پراش پرتوی ایکس از نمونه‌های مختلف..... |
| ۴۷ | شکل ۹-۴. سختی بر اساس نوع عملیات انجام شده (DCT)..... |
| ۴۸ | شکل ۱۰-۴. پروفیل میکرو سختی نمونه..... |
| ۴۸ | شکل ۱۱-۴. درصد افزایش سختی در نمونه‌های مختلف..... |
| ۵۰ | شکل ۱۲-۴. ضریب اصطکاک بر حسب مسافت، الف) CHT، ب) 1DCT..... |
| ۵۱ | ادامه‌ی شکل ۴-۱۲. ج) 24DCT، د) 30DCT و ه) 48DCT در بار اعمالی ۸۰N..... |

- شکل ۴-۱۳. سطح سایش دیسک در بار اعمالی 80 N ۵۲
- شکل ۴-۱۴. سطح سایش دیسک در بار اعمالی 110 N ۵۳
- شکل ۴-۱۵. تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی سطوح سایش ۵۴
- شکل ۴-۱۶. تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات سایش ۵۵
- شکل ۴-۱۷. نتایج آنالیز EDS نمونه‌ی CHT، (۱) محصولات سایش، (۲) ذرات چسبیده به سطح سایش ۵۶
- شکل ۴-۱۸. نتایج آنالیز EDS محصولات سایش نمونه‌ی 1DCT ۵۷
- شکل ۴-۱۹. نتایج آنالیز EDS نمونه‌ی 24DCT ۵۷
- ادامه‌ی شکل ۴-۱۹. (۱) محصولات سایش، (۲) ذرات چسبیده به سطح سایش ۵۸
- شکل ۴-۲۰. نتایج آنالیز EDS محصولات سایش نمونه‌ی 30DCT ۵۹
- شکل ۴-۲۱. نتایج آنالیز EDS محصولات سایش نمونه‌ی 48DCT ۶۰
- شکل ۴-۲۲. نمودار کاهش جرم برحسب مسافت برای نمونه‌های مختلف، الف) 80 N و ب) 110 N ۶۰
- شکل ۴-۲۳. نرخ سایش برحسب مسافت برای نمونه‌های مختلف، الف) 80 N و ب) 110 N ۶۱
- شکل ۴-۲۴. درصد افزایش مقاومت سایشی بر اساس نوع عملیات حرارتی ۶۲

چکیده

در این پژوهش تأثیر زمان عملیات زیر صفر بر رفتار سایشی فولاد ۱/۷۱۴۷ (۵۱۲۰) مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت انجام عملیات کربوره کردن، نمونه‌ها درون جعبه‌هایی از فولاد نسوز با ترکیبی از پودر زغال، باریم کربنات و سدیم هیدروکسید به نسبت ۱:۱:۵۰ قرار گرفت و به مدت ۶ ساعت، در دمای 920°C کربوره شد؛ سپس در داخل این جعبه در هوا تا دمای محیط خنک شدند. عملیات آستنیت‌ه کردن در دمای 930°C به مدت ۱ ساعت بر روی نمونه‌ها اعمال و در روغن کوئنچ شد. به منظور بررسی تأثیر زمان فرایند زیر صفر عمیق، نمونه‌ها به مدت زمان ۱، ۲۴، ۳۰ و ۴۸ ساعت در نیتروژن مایع در دمای 196°C - نگهداری شدند و سپس در دمای محیط در اتاق نگهداری شد. به منظور بهبود خواص فولاد و آزادسازی تنش‌های داخلی ناشی از کوئنچ، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای 200°C در کوره نگهداری شدند. نمونه‌ها پس از آماده سازی سطحی، تحت آزمون‌های مختلف قرار گرفتند. برای تعیین فازها از روش پراش پرتو ایکس استفاده شد؛ بدین منظور نمونه‌ها در ابعاد مناسب تهیه و با استفاده از نرم‌افزار Xpert فازهای موجود با استفاده از عناصر اولیه تعیین شد. آزمون سایش به روش گلوله روی دیسک با استفاده از گلوله‌ای از جنس کاربید تنگستن بر نمونه‌های دیسکی با دو بار ۸۰ و ۱۱۰ نیوتون به مسافت ۱۰۰۰ متر در رطوبت هوای $30 \pm 5\%$ و درجه حرارت $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ انجام شد. سختی نمونه‌ها به صورت ماکرو در مقیاس راکول سی اندازه گیری شد. اندازه گیری سختی نمونه‌ها قبل و بعد از بازگشت، با بار اعمالی ۳۰ کیلوگرم انجام گردید. همچنین ریز سختی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ریز سختی سنجی و با نیروی ۱۰۰g انجام گردید؛ سطوح سایش ابتدا توسط استون تمیز شده و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مورد مطالعه قرار گرفت. محصولات سایش نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS) مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات پراش پرتو ایکس حاکی از کاهش در مقدار آستنیت باقیمانده در اثر اعمال عملیات زیر صفر بوده بگونه‌ای که در زمان‌های بیش از یک ساعت، پیک آستنیت باقیمانده مشاهده نشده است. بررسی‌های میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی توزیع بهتر کاربیدها، ریز شدن و افزایش کسر حجمی کاربیدها را در عملیات زیر صفر عمیق نشان داد. بدین ترتیب عملیات زیر صفر عمیق منجر به افزایش در سختی در حد ۴ تا ۳۳٪ و تا ۲۴ ساعت، افزایش مقاومت سایشی تا ۱۹۱/۳۹٪ می‌گردد. با افزایش بیش تر زمان عملیات زیر صفر، مقاومت سایشی نمونه‌ها کاهش یافته است؛ به گونه‌ای که در نمونه‌ی ۴۸ ساعت عملیات زیر صفر شده مقاومت سایشی کاهش یافته است. علت افزایش سختی نمونه‌ها کاهش میزان آستنیت باقیمانده در اثر عملیات زیر صفر عمیق و دلیل کاهش مقاومت سایشی نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت، رشد کاربیدها و توزیع غیریکنواخت آن در ساختار و در نتیجه ضعیف شدن زمینه بوده است؛ بنابراین مدت زمان ۲۴ ساعت عملیات زیر صفر عمیق بر فولاد ۱/۷۱۴۷ زمانی بهینه است.

کلمات کلیدی: عملیات زیر صفر عمیق، آستنیت باقیمانده، کاربید، مقاومت سایشی، سختی

فصل اول

مقدمه

در بسیاری از کاربردهای صنعتی نیاز به قطعاتی است که دارای سطحی سخت بوده و درعین حال از چقرمگی یا مقاومت به ضربه‌ی خوبی نیز برخوردار باشند. از جمله مواردی که می‌توان در این رابطه به‌عنوان مثال به آن‌ها اشاره کرد عبارت‌اند از: میل‌لنگ، میل بادامک، چرخ‌دنده و قطعات مشابه. این قطعات باید سطحی بسیار سخت و مقاوم در برابر سایش داشته و همچنین بسیار چقرمه و مقاوم در برابر ضربه‌های وارده در حین کار باشند.

بسیاری از قطعات فولادی را می‌توان به نحوی عملیات حرارتی کرد که در پایان دارای مجموعه‌ای از خواص بالا باشند، یعنی درحالی که از مقاومت به سایش خوبی برخوردارند، دارای استحکام دینامیکی خوبی نیز باشند. این نوع عملیات حرارتی که اصطلاحاً به سخت کردن سطحی موسوم‌اند، آخرین عملیاتی هستند که باید در مرحله‌ی پایانی ساخت قطعه و پس از انجام تمام مراحل مربوط به شکل‌دهی نظیر ماشین‌کاری انجام شود.

روش‌های مختلف عملیات حرارتی که به کمک آن‌ها می‌توان سطح قطعات را سخت کرد، عمدتاً به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته‌ی اول عملیاتی که منجر به تغییر در ترکیب شیمیایی سطح فولاد می‌شوند و به عملیات حرارتی شیمیایی یا ترموشیمی موسوم‌اند، نظیر کربن‌دهی، نیتروژن‌دهی و کربن نیتروژن‌دهی. دسته‌ی دوم روش‌هایی که بدون تغییر ترکیب شیمیایی سطح و فقط به کمک عملیات حرارتی که در لایه‌ی سطحی متمرکز شده، انجام می‌شوند و باعث سخت شدن سطح می‌گردند و به عملیات حرارتی موضعی موسوم‌اند، مانند سخت کردن شعله‌ای و سخت کردن القایی. در آلیاژهای آهن-کربن و فولادها، مارتنزیت از سرد کردن سریع آستنیت به وجود می‌آید. واژه‌ی مارتنزیت که برای مدت‌ها فقط به ساختار سخت حاصل از سریع سرد کردن فولادهای کربنی اطلاق می‌شود برای قدردانی از دانشمند معروف آلمانی به نام مارتنز است. در به‌کار بردن واژه‌ی مارتنزیت، اخیراً به‌جای محصولات حاصل، تأکید بیشتر بر روی طبیعت دگرگونی گذاشته شده است. مارتنزیت فازی است که توسط یک دگرگونی مارتنزیتی یا جابجایی

اتم‌ها حاصل می‌شود، گرچه ممکن است فاز یادشده، ترکیب شیمیایی، ساختار بلوری و خواص کاملاً متفاوتی از مارتنزیت در فولادها داشته باشد. دمایی را که در یکک آلیاژ دگرگونی آستنیت به مارتنزیت شروع می‌شود، دمای شروع تشکیل مارتنزیت نامیده و آن را با M_s نشان می‌دهند. در حقیقت، M_s نشان دهنده‌ی مقدار نیروی محرکه‌ی ترمودینامیکی لازم برای شروع دگرگونی برشی آستنیت به مارتنزیت است. با افزایش درصد کربن، دمای M_s به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در حقیقت کربن موجود به‌صورت محلول جامد، استحکام یا مقاومت برشی آستنیت را افزایش می‌دهد و بنابراین با افزایش کربن نیرومحرکه‌ی بیش‌تری جهت شروع لغزش برای تشکیل مارتنزیت لازم است. این نیروی محرکه‌ی بیش‌تر، با سرد کردن فولاد تا دمایی پایین‌تر و یا به‌عبارت‌دیگر تحت تبرید بیش‌تر (M_s کمتر) به دست می‌آید. دمای پایان تشکیل مارتنزیت (M_f) یا دمایی که دگرگونی آستنیت به مارتنزیت در یکک آلیاژ داده‌شده خاتمه می‌یابد نیز تابعی از درصد کربن آلیاژ است.

آستنیت باقیمانده فازی نرم بوده و در دمای پایین ناپایدار است؛ به‌گونه‌ای که در دمای پایین و در حین کار به مارتنزیت ترد تبدیل می‌شود. تبدیل آستنیت به مارتنزیت تقریباً ۴٪ انبساط حجمی ایجاد می‌کند که منجر به اعوجاج قطعات می‌شود. بنابراین از عملیات زیر صفر یا بازگشت چندتایی در دمایی نسبتاً بالا و یا مدت‌زمان طولانی برای کمینه کردن میزان آستنیت باقیمانده در فولادها استفاده می‌شود.

دو نوع عملیات زیر صفر وجود دارد: (۱) زیر صفر سطحی که در محدوده دمایی 100°C تا 60°C انجام می‌شود. این عملیات منجر به کاهش آستنیت باقیمانده و افزایش مقاومت سایشی می‌شود. (۲) زیر صفر عمیق که در دماهای زیر 125°C انجام می‌شود.

اثرات زیر صفر عمیق عبارت‌اند از:

۱. تبدیل آستنیت باقیمانده به مارتنزیت
۲. کاهش تنش‌های پسماند
۳. تشکیل کاربیدهای بسیار ریز که در بین کاربیدهای درشت قرار می‌گیرند
۴. تشکیل ابرهای نابجایی در فصل مشترک زمینه‌ی مارتنزیتی و کاربیدها در طول فرایند هم‌دما سازی و تشکیل کاربید
۵. توزیع یکنواخت کاربیدها، کوچک شدن اندازه‌ی کاربیدهای ثانویه، افزایش میزان و چگالی آنها
۶. افزایش مقاومت سایش خراشان و سایش خستگی
۷. افزایش استحکام کششی و پایداری
۸. افزایش سختی
۹. پایداری ابعادی ماده
۱۰. تولید ساختار مولکولی چگال‌تر
۱۱. افزایش هدایت الکتریکی فلزات
۱۲. افزایش مقاومت به خوردگی

پارامترهای زیر صفر عبارت‌اند از: نرخ سرمایش، دمای هم‌دما سازی، زمان هم‌دما سازی، نرخ گرمایش، دما و زمان بازگشت و دمای آستنیت‌ه کردن.

تحقیقات بسیاری بر روی فولادهایی که درصد عناصر آلیاژی و یا کربن آن‌ها بالاست، صورت گرفته است. در این پژوهش‌ها با حصول ترکیب مناسبی از توزیع کاربیدها و کاهش یا حذف آستنیت باقیمانده خواص فولادهای مورد مطالعه را بهبود داده‌اند.

فولاد ۱/۷۱۴۷، فولادی کربوره شونده (سمانته) بوده که در ساخت قطعاتی که ترکیبی از استحکام متوسط، چقرمگی و مقاومت سایشی بالا نیاز است، مورد استفاده قرار گرفته است و گاه برای تهیه قطعات مورد مصرف صنایع خودروسازی همچون چرخ‌دنده و میل‌لنگ کاربرد دارد. در فولادهایی که به منظور سختی کاری سطحی تحت عملیات کربوره کردن قرار می‌گیرند، با افزایش درصد کربن سطح، M_s کاهش و میزان آستنیت باقیمانده در اثر سریع سرد کردن در سطح افزایش خواهد یافت.

در این پژوهش عملیات زیر صفر عمیق به منظور بهبود خواص سایشی فولاد ۱/۷۱۴۷ در زمان‌های مختلف انجام شده است؛ در فصل دوم تحقیقات صورت گرفته بر فولادهای مختلف، فصل سوم مواد و روش تحقیق، فصل چهارم نتایج و بحث و در نهایت در فصل پنجم، نتایج حاصل و پیشنهاداتی در راستای بررسی‌های بیشتر و کارآمد گردآوری شده است.

فصل دوم

مروری بر مطالب

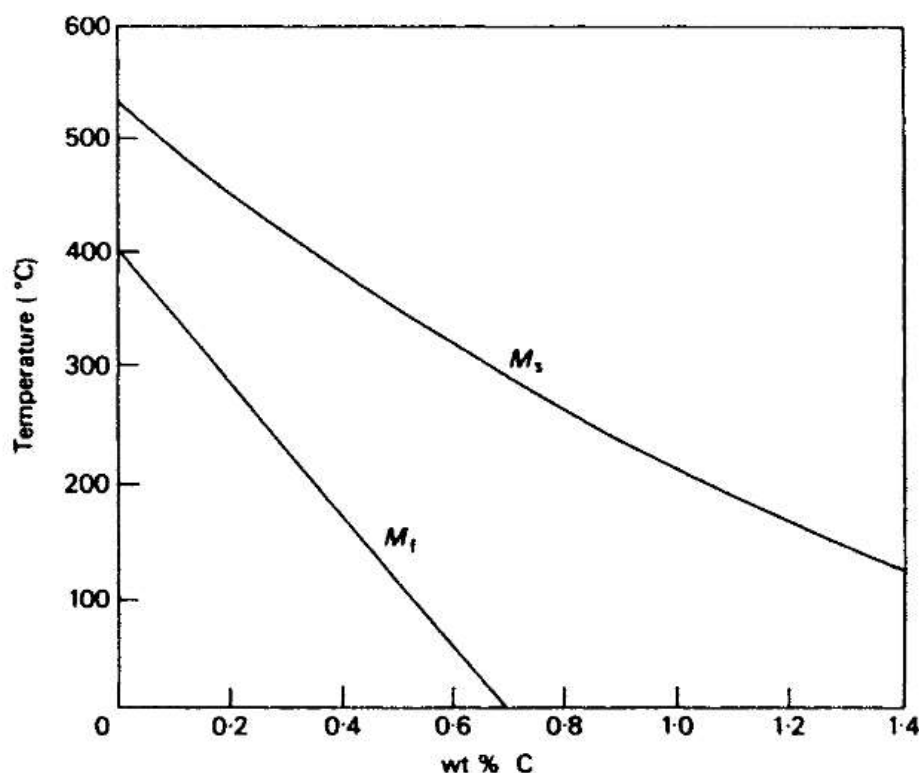
۲-۱- معرفی و تاریخچه

فولاد آستنیتی آلیاژی از آهن و کربن همراه با عناصر دیگر در حالت محلول است که با عملیات نفوذی در محلول آستنیتی تجزیه و همگن سازی می شود. زمانی که فولاد حرارت داده می شود ساختار کریستالی آهن به مکعبی مرکزدار تغییر می یابد. استحاله ی آستنیت به مارتنزیت از دمایی که دمای آغاز مارتنزیت یا M_s نامیده می شود، آغاز می شود. برای اغلب فولادهای خاص، استحاله هم دما بوده و همان طور که دما به دمای پایان مارتنزیت می رسد (M_f)، توسعه می یابد. مقداری آستنیت، آستنیت باقیمانده، همیشه پس از سخت سازی حضور دارد. مارتنزیت بیش تر و درصد کربن بیش تر، سختی فولاد را افزایش می دهد. میزان کربن، دمای آغاز و پایان استحاله ی مارتنزیت را تحت تأثیر قرار می دهد. M_f و M_s می تواند پایین تر از دمای اتاق باشد؛ فولاد به صورت جزئی به مارتنزیت تبدیل شده و بقیه ی ساختار را آستنیت باقیمانده تشکیل می دهد. این دو دما همچنین با افزایش اندازه دانه کاهش می یابد [۱].

۲-۲- آستنیت باقیمانده

دمای شروع استحاله مارتنزیت (M_s) و دمای پایان این استحاله (M_f) در فولادها به درصد کربن و درصد عناصر آلیاژی بستگی دارد (شکل ۲-۱). همان طور که از شکل ۲-۱ مشخص است، وقتی فولادی با درصد کربن بالای ۰/۶۵٪ کوئچ می شود، تغییر حالت آستنیت به مارتنزیت در دمای اتاق (20°C) پایان نمی یابد. در نتیجه مقداری از آستنیت باقی خواهد ماند که به آستنیت باقیمانده موسوم است [۲]. در جدول ۲-۱ تأثیر ۱٪ از عناصر آلیاژی بر دمای شروع استحاله مارتنزیت فولادهایی با ۰/۹-۱٪ کربن آورده شده است. البته تأثیر عناصر آلیاژی بر دمای استحاله مارتنزیتی به درصد کربن در فولاد نیز بستگی دارد. در جدول ۲-۲ تأثیر ۱٪ کروم بر دمای شروع استحاله مارتنزیتی در فولادهایی با درصدهای مختلف از کربن آورده شده است [۳]. در شکل ۲-۲ منحنی استحاله مارتنزیت آورده شده

است. همان طوری که مشخص است استحاله مارتنزیت در $A_1'(M)$ ، که همان دمای M_s است شروع می شود. اگر دما کاهش پیدا کند، استحاله پیشرفت کرده و مقدار مارتنزیت افزایش می یابد. اگر عملیات کوئنچ تا دمای محیط انجام شود، استحاله مارتنزیتی در دمای $20^\circ C$ متوقف می گردد. سرد کردن فولاد تا دمای A_1' که همان دمای M_f است منجر به افزایش درصد مارتنزیت می شود ولی مقداری آستنیت باقیمانده در ساختار حضور دارد [۲]. آستنیت باقیمانده که یک فاز نرم است باعث کاهش سختی فولاد پس از کوئنچ خواهد شد. اگر درصد آستنیت باقیمانده بالاتر از ۱۰٪ باشد باعث کاهش فاحش سختی در نمونه می شود (شکل ۲-۳). هر چه درصد کربن بالاتر باشد، درصد آستنیت باقیمانده نیز بیش تر خواهد بود (شکل ۲-۴). اگر یک فولاد هایپریوتکتوئید از منطقه کاملاً آستنیتی در بالای A_{cm} سرد شود، ساختار پس از سرد کردن از مارتنزیت و آستنیت باقیمانده تشکیل خواهد شد و همان طور که در شکل ۲-۳ مشخص است سختی با افزایش درصد کربن، به دلیل افزایش در مقدار آستنیت باقیمانده، کاهش خواهد یافت؛ اما اگر فولادهای هایپریوتکتوئید از منطقه دوفازی آستنیت - سمانتیت، کوئنچ شوند، ساختار نهایی فولاد از مارتنزیت - سمانتیت - آستنیت باقیمانده تشکیل می شود. تحت این شرایط سختی این فولادها یکسان بوده و وابسته به درصد کربن نیست [۲].



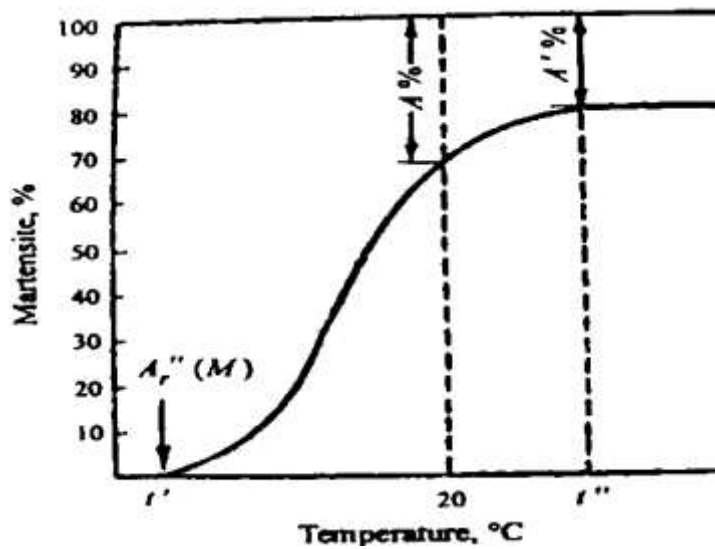
شکل ۲-۱. دمای شروع و پایان استحاله مارتنزیت (M_s و M_f) با توجه به درصد کربن در فولاد [۳].

جدول ۲-۱. تأثیر ۱٪ از عناصر آلیاژی بر دمای شروع استحاله مارتنزیت در فولادهایی با ۰/۹ - ۱٪ کربن [۳]

| عنصر آلیاژی | تغییر در دمای شروع استحاله مارتنزیتی (°C) |
|-------------|---|
| Mn | -۵۵ |
| V | -۳۵ |
| Mo | -۳۰ |
| Ni | -۱۷ |
| Cr | -۱۵ |
| W | -۱۲ |
| Cu | -۱۰ |
| Si | ۰ |
| Co | ۱۲ |
| Al | ۳۰ |

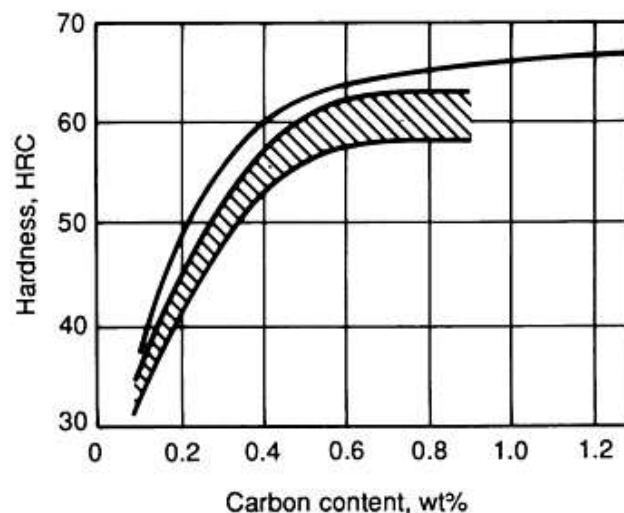
جدول ۲-۲. تأثیر ۱٪ کروم بر دمای شروع استحاله مارتنزیتی در فولادهایی با درصد کربن مختلف [۳]

| درصد کربن فولاد | تغییر در دمای شروع استحاله مارتنزیتی به ازاء ۱٪ کروم (°C) |
|-----------------|---|
| ۰/۴٪ | -۴ |
| ۰/۸٪ | -۱۰ |
| ۱٪ | -۱۷ |
| ۱/۲٪ | -۲۵ |



شکل ۲-۲. منحنی استحاله مارتنزیت [۲، ۳].

ریزساختار فولادهای مارتنزیتی متناسب با درصد کربن به دورویه تغییر می‌کند: اول، فولادهای غیر آلیاژی با درصد کربن کمتر از ۰/۵ - ۰/۶ Wt% که مارتنزیت تیغه‌ای جابجا شده^۱ در آن‌ها حین کوئنچ کردن تشکیل می‌شود؛ فولادهایی با درصد کربن بیش از ۰/۱، مارتنزیت بشقابی دوقلویی شده^۲ تشکیل می‌دهند و ترکیبی از مارتنزیت‌های تیغه‌ای و بشقابی در سطوح میانی درصد کربن تشکیل می‌شوند. بنابراین سطح کربوره شده می‌تواند مخلوطی از مورفولوژی‌های مارتنزیت را داشته باشد؛ به گونه‌ای که مارتنزیت بشقابی در لایه‌های بیرونی پر کربن غالب بوده و با نزدیک شدن به مغز قطعه، مارتنزیت تیغه‌ای غالب است. عناصر آلیاژی که آستنیت را مستحکم می‌کنند، تشکیل مارتنزیت بشقابی را در سطوح پایین تر کربن، ترغیب می‌کنند. در محدوده‌ی کربن که انتقال از مارتنزیت تیغه‌ای به بشقابی رخ می‌دهد، میزان آستنیت باقیمانده در ساختار کوئنچ شده افزایش می‌یابد؛ به هر حال، میزان آستنیت باقیمانده تابعی از متغیرهای دیگر است؛ این میزان با کاهش نرخ کوئنچ و افزایش درصد عناصر آلیاژی، افزایش می‌یابد. بنابراین در یک درصد مشخص کربن، درصد آستنیت قطعات کوئنچ شده می‌تواند بیش تر از مقادیر نشان داده شده در شکل ۲-۴ باشد. اگرچه سختی مارتنزیت با افزایش درصد کربن به طور یکنواخت افزایش می‌یابد، سختی کامپوزیت‌های آستنیتی-مارتنزیتی حاصل از کوئنچ، معمول بالای ۰/۶ Wt% تقریباً، حالت مسطح خواهد داشت (شکل ۲-۳) [۴].



شکل ۲-۳. سختی راکول C به عنوان تابعی از درصد کربن. منحنی بالاتر تخمین سختی مارتنزیت با ناحیه‌ی سایه زده شده بالای ۰/۹ Wt% کربن به دلیل عدم اطمینان از حضور آستنیت باقیمانده است. نوار پایینی، تخمینی از ماکزیمم سختی حاصل از کوئنچ متداول است [۴].

۲-۲-۱- پایداری آستنیت

دشوار نمودن استحاله‌ی آستنیت به مارتنزیت، پایدارسازی آستنیت نامیده می‌شود که در بیش تر حالات رخ می‌دهد؛ پایدارسازی معمولاً به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود:

- 1 Dislocated Lath Martensite
- 2 Twinned Plate Martensite

- پایداری شیمیایی (به دلیل تغییر ترکیب شیمیایی)
- پایداری حرارتی (به دلیل عملیات حرارتی) و
- پایداری مکانیکی (به دلیل تغییر شکل پلاستیک)

از این سه مورد، پایداری شیمیایی، کاهش M_s به دلیل تغییر در ترکیب شیمیایی است [۵].

الف) دسته‌بندی علل پایداری

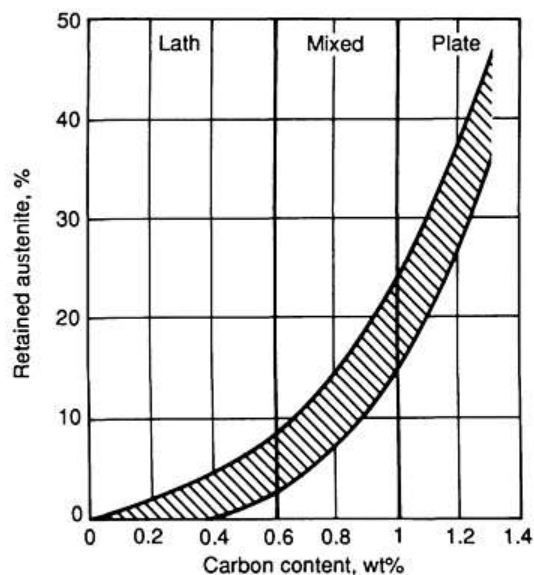
می‌توان مکانیزم‌های پایداری آستنیت را به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

I. پایداری شیمیایی

۱. تغییر در ترکیب شیمیایی (نفوذ اتم‌ها)
۲. آرایش اتمی (برای مثال منظم شدن)
۳. کشش و فشار داخلی

II. پایداری غیر شیمیایی

۴. تنش برشی داخلی (کرنش شبکه‌ای بلند برد)
۵. عیوب شبکه و کرنش شبکه‌ای کوتاه برد
 - a. مانع رشد
 - b. مکان‌های جوانه‌زنی
۶. اتمسفر کاترل و رسوب گذاری همدوس^۱
۷. جاهای خالی ساکن (مکان‌های جوانه‌زنی) [۵].



شکل ۲-۴. درصد آستنیت باقیمانده به‌عنوان تابعی از درصد کربن. خطوط عمودی محدوده‌ای از کربن را نشان می‌دهد که مارتنزیت‌های تیغه‌ای و بشقابی در آلیاژهای آهن-کربن یافت می‌شود [۴].