

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

مقایسه خواص مکانیکی فولادهای دوفازی فریتی بینیتی و فریتی مارتنزیتی

میثم مشهدی کریمی

استاد راهنما:

دکتر شهرام خیراندیش

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مواد
گرایش انتخاب و شناسایی مواد فلزی

فروردین ۱۳۸۷

کلیه حقوق مادی و معنوی این پایان نامه متعلق به دانشگاه علم و صنعت ایران است.

تقديم به:

**پدر و مادر مهربانم، راهنمایانی صادق و دلسوز، که در همه حال مشتوق
و پشتیبانم بودند.**

چکیده

ایجاد استحکام بالا به همراه انعطاف پذیری مناسب در فولادهای معمولی که عموماً ساختار فریتی پرلیتی دارند غیر ممکن است. نیاز به تهیه فولادهایی با استحکام بالا و قابلیت شکل پذیری خوب سبب تولید نسل جدیدی از فولادها با عنوان فولادهای دوفازی گردید. ساختار این فولادها متشکل از فریت به همراه یک فاز سخت که مارتنزیت یا بینیت است می باشد. منبع استحکام بخشی این فولادها فاز سخت و عامل ایجاد انعطاف پذیری در آنها زمینه نرم فریت می باشد. مهم ترین عامل در تعیین خواص این فولادها کسر حجمی فاز سخت موجود در آنها می باشد، لذا در این پژوهش اثر تغییرات دما و زمان عملیات حرارتی بر روی کسر حجمی فاز سخت و ارتباط آن با خواص فولادهای دوفازی فریتی - بینیتی و فریتی - مارتنزیتی و مقایسه‌ی خواص این دو نوع فولاد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش دما و زمان عملیات حرارتی، کسر حجمی فاز سخت، استحکام کششی نهایی و سختی افزایش و درصد ازدیاد طول نهایی و توان کار سختی (σ) کاهش می یابند. همچنین مشخص گردید که فولادهای دوفازی فریتی - بینیتی دارای استحکام و سختی کمتر نسبت به فولادهای فریتی - مارتنزیتی می باشند اما درصد تغییر طول و توان کار سختی آنها بالاتر است.

کلمات کلیدی: فولادهای دوفازی فریتی بینیتی، فولادهای دوفازی فریتی مارتنزیتی، استحکام کششی نهایی، درصد ازدیاد طول نهایی، کار سختی، توان کارسختی.

با تشکر و سپاس فراوان از:

زحمات بی دریغ استاد ارجمندم دکتر شهرام خیر اندیش که در تمامی مراحل پروژه با راهنمایی‌های خویش یاریم نمود.

مساعدت و همکاری کلیه پرسنل زحمتکش آزمایشگاه‌های دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران که در کلیه مراحل تحقیق به روش‌های گوناگون یاریم نمودند.

فهرست عناوین

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۴	فصل دوم: مرور بر منابع
۵	۱-۲ ساختارهای چند فازي
۶	۲-۲ انواع فولادهای دوفازی و کاربرد آنها
۹	۳-۲ روش تهیه فولادهای دوفازی
۱۰	۱-۳-۲ مسیر آنیل میان بحرانی
۱۲	۲-۳-۲ روش کوئنچ میانی (آنیل پله‌ای)
۱۳	۳-۳-۲ مسیر کوئنچ پله‌ای (آنیل پیوسته)
۱۳	۴-۳-۲ نقش مسیرهای مختلف در تعادل بین فریت و آستنیت در ناحیه‌ی دوفازی
۱۵	۵-۳-۲ استحاله آستنیت پس از عملیات میان بحرانی
۱۷	۶-۳-۲ تبدیل آستنیت به بینیت پایینی یا بالایی در طی استحاله ایزو ترم
۱۹	۷-۳-۲ روش‌های صنعتی تولید قطعات فولادی دوفازی
۲۰	۴-۲ خواص کششی فولادهای دوفازی و عوامل مؤثر بر آن
۲۱	۱-۴-۲ کسر حجمی فاز سخت
۲۸	۲-۴-۲ تأثیر زمان عملیات آنیل میان بحرانی
۳۰	۳-۴-۲ تأثیر مورفولوژی فاز سخت
۳۱	۵-۲ کارسختی فولادهای دوفازی
۳۵	فصل سوم: روش انجام آزمایش‌ها
۳۶	۱-۳ فلوجارت انجام آزمایش‌ها
۳۶	۲-۳ تهیه فولاد
۳۶	۳-۳ تهیه نمونه کشش
۳۷	۴-۳ عملیات حرارتی
۳۸	۵-۳ آزمایش کشش
۳۹	۶-۳ آزمایش سختی سنجی و میکرو سختی سنجی
۳۹	۷-۳ متالوگرافی
۴۰	۸-۳ مطالعه رفتار کار سختی

۴۰	..... ۹-۳ بررسی سطح مقطع شکست
۴۱	..... فصل چهارم: نتایج تحقیق
۴۲	..... ۱-۴ متالوگرافی کیفی
۴۳	..... ۴-۲ شناسایی بینیت و مارتنزیت
۴۵	..... ۱-۴ متالوگرافی کمی
۴۵	..... ۱-۳-۴ تاثیر دما
۵۰	..... ۲-۳-۴ تاثیر زمان
۵۳	..... ۴-۴ نتایج سختی سنجی و میکرو سختی سنجی
۵۳	..... ۱-۴-۴ نتایج سختی سنجی
۵۶	..... ۲-۴-۴ نتایج میکرو سختی سنجی
۵۸	..... ۵-۴ خواص کششی
۶۰	..... ۱-۵-۴ تاثیر دما بر خواص کششی
۶۳	..... ۲-۵-۴ تاثیر زمان بر خواص کششی
۶۹	..... ۶-۴ بررسی رفتار کار سختی
۷۱	..... ۷-۴ سطح زی ر منحنی تنش کرنش (چقرمگی).
۷۲	..... ۸-۴ بررسی سطح مقطع شکست
۷۷	..... فصل پنجم: تحلیل نتایج
۷۸	..... ۱-۵ تحلیل مشاهدات متالوگرافی
۷۸	..... ۱-۱-۵ تحلیل تاثیر دما بر مشاهدات متالوگرافی
۸۰	..... ۲-۱-۵ تحلیل تاثیر زمان بر مشاهدات متالوگرافی
۸۲	..... ۲-۵ تحلیل نتایج سختی سنجی و میکرو سختی سنجی
۸۶	..... ۳-۵ تحلیل خواص کششی
۸۸	..... ۱-۳-۵ تحلیل تاثیر دما و زمان بر خواص کششی
۹۰	..... ۴-۵ تحلیل رفتار کار سختی
۹۳	..... ۱-۴-۵ کرنش شروع مرحله دوم کار سختی
۹۳	..... ۵-۵ تحلیل بررسی سطح مقطع شکست
۹۵	..... نتیجه گیری
۹۷	..... منابع و مراجع

فهرست اشکال

صفحه

شماره‌ی شکل

- ۱-۱. ساختار داخلی یک فولاد دوفازی فریتی-مارتنزیتی ۷
- ۲-۲. ساختار داخلی فولاد دوفازی فریتی-بینیتی ۸
- ۳-۲. مقایسه‌ی شماتیک رفتار کششی فولادهای فریتی-مارتنزیتی و فریتی-بینیتی ۹
- ۴-۲. شماتیک مسیر عملیات حرارتی آنیل میان بحرانی ۱۰
- ۵-۲. ساختار فریتی مارتنزیتی ایجاد شده از مسیر آنیل میان بحرانی ۱۱
- ۶-۲. شماتیک مسیر عملیات حرارتی کوئنچ میانی (آنیل پله‌ای) ۱۲
- ۷-۲. ساختار فریتی مارتنزیتی ایجاد شده از مسیر کوئنچ میانی (آنیل پله‌ای) ۱۳
- ۸-۲. شماتیک مسیر عملیات حرارتی کوئنچ پله‌ای (آنیل پیوسته) ۱۴
- ۹-۲. ساختار فریتی مارتنزیتی ایجاد شده از مسیر کوئنچ پله‌ای (آنیل پیوسته) ۱۴
- ۱۰-۲. دیاگرام تعادلی آهن-کربن در ناحیه دوفازی ۱۵
- ۱۱-۲. تشکیل فریت جدید در کنار فریت‌های قدیمی پس از کوئنچ ۱۶
- ۱۲-۲. تشکیل نوارهای مارتنزیت در اطراف دانه‌های آستنیت پس از سرد کردن ۱۷
- ۱۳-۲. دمای انتقال از بینیت بالایی به بینیت پایینی بر حسب درصد کربن ۱۸
- ۱۴-۲. گرادیان درصد کربن طی تشکیل بینیت ۱۹
- ۱۵-۲. شماتیک روش صنعتی تولید (دیاگرام TTT) ورق‌های دوفازی ۲۰
- ۱۶-۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از تشکیل نابجایی‌ها در فریت در اثر تشکیل مارتنزیت ۲۱
- ۱۷-۲. نمودار تنش- کرنش برای فولاد دوفازی با درصدهای مختلف مارتنزیت ۲۳
- ۱۸-۲. تغییرات استحکام 0.2% بر حسب درصد مارتنزیت ۲۳
- ۱۹-۲. تغییرات استحکام کششی و استحکام تسلیم بر حسب دما برای درصدهای مختلف مارتنزیت ۲۴
- ۲۰-۲. تاثیر ترکیب شیمیایی بر درصد مارتنزیت تشکیل شده ۲۵
- ۲۱-۲. تاثیر سرعت سرد کردن بر درصد فریت تشکیل شده ۲۶
- ۲۲-۲. افزایش درصد مارتنزیت در اثر افزایش دمای عملیات آنیل میان بحرانی ۲۷
- ۲۳-۲. افزایش سختی و استحکام کششی در اثر افزایش دمای عملیات آنیل میان بحرانی ۲۸
- ۲۴-۲. تشکیل مارتنزیت اتوتمپر در مرکز یک دانه درشت آستنیت ۲۹
- ۲۵-۲. تغییرات استحکام کششی و استحکام تسلیم با دما ۳۰
- ۲۶-۲. تغییرات $\ln \sigma$ بر حسب $\ln \varepsilon$ برای یک نمونه فولاد دوفازی فریتی بینیتی ۳۳
- ۲۷-۲. تغییرات توان کارسختی (n) بر حسب درصد فاز فریت برای یک نمونه فولاد دوفازی ۳۴
- ۱-۳. فلوجارت مراحل انجام آزمایشات ۳۶
- ۲-۳. مشخصات ابعادی نمونه کشش مورد استفاده ۳۷
- ۳-۳. مسیر شماتیک عملیات حرارتی جهت تهیه فولادهای دوفازی فریتی بینیتی ۳۸
- ۴-۳. مسیر شماتیک عملیات حرارتی جهت تهیه فولادهای دوفازی فریتی مارتنزیتی ۳۸

- ۴-۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از فولاد دوفازی ۴۲
- ۴-۲. تصویر میکروسکوپ نوری از فولاد دوفازی ۴۳
- ۴-۳. تصویر اچ رنگی از ساختار دوفازی فریتی بینیتی ۴۴
- ۴-۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) از تیغه‌های بینیت در ساختار دوفازی ۴۴
- ۴-۵. تصویر اچ رنگی از ساختار دوفازی فریتی مارتنزیتی ۴۵
- ۴-۶. منحنی تغییرات درصد بینیت با دمای عملیات آنیل میان بحرانی در زمان‌های مختلف ۴۶
- ۴-۷. منحنی تغییرات درصد مارتنزیت با دمای عملیات آنیل میان بحرانی در زمان‌های مختلف ۴۷
- ۴-۸. ساختار فریتی بینیتی ۴۸
- ۴-۹. ساختار فریتی مارتنزیتی ۴۹
- ۴-۱۰. منحنی تغییرات درصد فاز سخت (مارتنزیت و بینیت) با دمای عملیات آنیل میان بحرانی در زمان ۱۵ دقیقه ... ۵۰
- ۴-۱۱. منحنی تغییرات درصد بینیت با زمان عملیات آنیل میان بحرانی در دماهای مختلف ۵۱
- ۴-۱۲. منحنی تغییرات درصد مارتنزیت با زمان عملیات آنیل میان بحرانی در دماهای مختلف ۵۱
- ۴-۱۳. منحنی تغییرات درصد فاز سخت (مارتنزیت و بینیت) با زمان در دمای ۷۸۵ درجه‌ی سانتیگراد ۵۲
- ۴-۱۴. منحنی تغییرات سختی با دمای عملیات آنیل میان بحرانی برای فولاد های فریتی - بینیتی ۵۳
- ۴-۱۵. منحنی تغییرات سختی با دمای عملیات آنیل میان بحرانی برای فولاد های فریتی - مارتنزیتی ۵۴
- ۴-۱۶. منحنی تغییرات سختی با زمان عملیات آنیل میان بحرانی برای فولاد های فریتی - بینیتی ۵۵
- ۴-۱۷. منحنی تغییرات سختی با زمان عملیات آنیل میان بحرانی برای فولاد های فریتی - مارتنزیتی ۵۵
- ۴-۱۸. منحنی تغییرات سختی فازهای فریت و بینیت با کسر حجمی بینیت ۵۶
- ۴-۱۹. منحنی تغییرات سختی فازهای فریت و مارتنزیت با کسر حجمی مارتنزیت ۵۷
- ۴-۲۰. تغییرات سختی فولاد با کسر حجمی بینیت به دست آمده از آزمون سختی سنجی و قانون مخلوط‌ها ۵۷
- ۴-۲۱. تغییرات سختی فولاد با کسر حجمی مارتنزیت به دست آمده از آزمون سختی سنجی و قانون مخلوط‌ها ۵۸
- ۴-۲۲. منحنی تنش کرنش مهندسی برای دو نمونه که در دمای ۸۱۰ درجه‌ی سانتیگراد ۵۹
- ۴-۲۳. منحنی تنش کرنش مهندسی برای نمونه فریتی بینیتی که در دمای ۷۶۰ درجه به مدت ۱۰ دقیقه آنیل شده ... ۶۰
- ۴-۲۴. میکرو ساختار فولادی که منحنی تنش کرنش آن در شکل ۴-۲۳ آمده است ۶۱
- ۴-۲۵. منحنی تغییرات استحکام کششی نهایی با دما برای فولادهای فریتی بینیتی ۶۱
- ۴-۲۶. منحنی تغییرات استحکام کششی نهایی با دما برای فولادهای فریتی مارتنزیتی ۶۲
- ۴-۲۷. منحنی تغییرات درصد ازدیاد طول نهایی با دما برای فولادهای فریتی بینیتی ۶۳
- ۴-۲۸. منحنی تغییرات درصد ازدیاد طول نهایی با دما برای فولادهای فریتی مارتنزیتی ۶۴
- ۴-۲۹. منحنی تغییرات استحکام کششی نهایی با دما در زمان ۱۰ دقیقه ۶۴
- ۴-۳۰. منحنی تغییرات درصد ازدیاد طول نهایی با دما در زمان ۱۰ دقیقه ۶۵
- ۴-۳۱. منحنی تغییرات استحکام کششی نهایی با زمان برای فولادهای فریتی بینیتی ۶۵
- ۴-۳۲. منحنی تغییرات استحکام کششی نهایی با زمان برای فولادهای فریتی مارتنزیتی ۶۶
- ۴-۳۳. منحنی تغییرات درصد ازدیاد طول نهایی با زمان برای فولادهای فریتی بینیتی ۶۷

- ۶۷ ۳۴-۴ منحنی تغییرات درصد ازدیاد طول نهایی با زمان برای فولادهای فریتی مارتنزیتی
- ۶۸ ۳۵-۴ منحنی تغییرات استحکام کششی نهایی (UTS) با کسر حجمی فاز سخت
- ۶۸ ۳۶-۴ منحنی تغییرات درصد ازدیاد طول نهایی با کسر حجمی فاز سخت
- ۶۹ ۳۷-۴ منحنی تغییرات $\ln \sigma$ بر حسب $\ln \varepsilon$ در فولادهای دوفازی فریتی بینیتی
- ۷۰ ۳۸-۴ منحنی تغییرات $\ln \sigma$ بر حسب $\ln \varepsilon$ فولادهای دوفازی فریتی مارتنزیتی
- ۷۰ ۳۹-۴ منحنی تغییرات توان کار سختی (n) با کسر حجمی بینیت در فولادهای فریتی بینیتی
- ۷۱ ۴۰-۴ منحنی تغییرات توان کار سختی (n) با کسر حجمی مارتنزیت در فولادهای فریتی مارتنزیتی
- ۷۲ ۴۱-۴ منحنی تغییرات کرنش شروع مرحله دوم کارسختی با کسر حجمی فاز سخت
- ۷۳ ۴۲-۴ منحنی تغییرات سطح زیر منحنی تنش کرنش با کسر حجمی بینیت در فولادهای فریتی بینیتی
- ۷۳ ۴۳-۴ منحنی تغییرات سطح زیر منحنی تنش کرنش با کسر حجمی مارتنزیت در فولادهای فریتی مارتنزیتی
- ۷۴ ۴۴-۴ سطح مقطع شکست نمونه‌های فریتی - بینیتی
- ۷۵ ۴۵-۴ سطح مقطع شکست نمونه‌های فریتی - مارتنزیتی

فهرست جداول

صفحه

شماره‌ی جدول

- ۳-۱. آنالیز شیمیایی فولاد مورد استفاده ۳۶
- ۴-۱. اطلاعات خواص مکانیکی و ریزساختاری فولادهای دوفازی فریتی بینیتی و فریتی مارتنزیتی ۷۶
- ۵-۱. تغییرات درصد کربن فاز سخت با کسر حجمی این فاز ۸۳

مقدمه



استحکام فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا (HSLA) به میزان عناصر آلیاژی موجود در این نوع فولادها بستگی دارد. این افزایش استحکام سبب کاهش قابلیت شکل‌دهی این نوع فولادها می‌شود. بنابراین انعطاف پذیری مورد نیاز برای طراحی قطعات، خصوصاً زمانی که ساخت قطعات با اشکال پیچیده مدنظر است، شدیداً محدود می‌شود. نتیجه‌ی این امر افزایش روز افزون کاربرد فولادهای دو فازی در زمینه‌های مختلف بوده است [۱].

این فولادها شامل درصد معینی از یک فاز ثانویه با استحکام بالا، مانند مارتنزیت یا بینیت، که در یک زمینه نرم‌تر، مانند فریت، پخش شده است می‌باشند [۲]. نتیجه‌ی این ترکیب فازها، تولید مواد پیشترفته‌ای با استحکام و انعطاف پذیری مطلوب است [۳]. تولید موادی با این خواص می‌تواند زمینه‌ای برای تولید قطعات پیچیده با استحکام بالا مانند قطعات اتومبیل‌ها (بدنه، رینگ‌ها و سپر) با وزن پایین‌تر نسبت به فولادهای معمولی باشد [۴].

با بهبود شکل پذیری، قابلیت فلز برای جذب انرژی برخورد و مقاومت در برابر خستگی افزایش می‌یابد، بنابراین خاصیت شکل پذیری در کنار استحکام بالا یک ویژگی مهم از فولادهای دوفازی است که باعث شده استفاده از فولادهای دوفازی به سرعت افزایش یابد. به علاوه استفاده از فولادهای دوفازی به علت کاهش قیمت تمام شده محصول در اثر کاهش زمان تولید مورد توجه تولید کنندگان قرار گرفته است [۴].

حرارت دادن فولادهای کم کربن در محدوده دو فازی آستنیت (γ) و فریت (α) (محدوده آنیل میان بحرانی) منجر به تشکیل آستنیت در کنار فریت می‌شود که با سرد کردن کنترل شده‌ی این مجموعه می‌توان ساختارهای دو یا سه فازی با درصد حجمی و مورفولوژی‌های متفاوت فاز ثانویه به دست آورد.

همانطور که پیش از این نیز گفته شد استحکام بالا و انعطاف پذیری مناسب از خصوصیات این نوع فولادها می‌باشد، اما شرایط و متغیرهای عملیات حرارتی با تأثیر بر کسر حجمی و مورفولوژی فاز ثانویه بر خواص این نوع فولادها تأثیر می‌گذارند، بنابراین خواص مکانیکی این فولادها مستقیماً به ساختاری که طی عملیات حرارتی و/یا حرارتی-مکانیکی ایجاد می‌شود، بستگی دارد.

تحقیق بر روی فولادهای دو فازی از دهه‌ی ۸۰ میلادی توسط هیامی و فوراکاوا^۱ در سال ۱۹۷۵ و رشید^۲ در سال ۱۹۷۶ آغاز شده است. عمده‌ی تحقیقاتی که تاکنون بر روی فولادهای دوفازی صورت گرفته مربوط به فولادهای دو فازی فریتی-مارتنزیتی بوده و بررسی ساختارهایی شامل مخلوطی از فریت و بینیت (فولادهای دو فازی فریتی-بینیتی) چندان مورد توجه قرار نگرفته است [۵].

خواص کششی فولادهای دوفازی بسیار مورد توجه محققین بوده است [۶-۱۲]. بسیاری از تحقیقات نشان داده است که استحکام کششی فولادهای دو فازی با افزایش کسر حجمی مارتنزیت (V_m) افزایش پیدا می‌کند [۷-۱۰].

چانگ^۳ و همکارانش [۸]، تأثیر اندازه دانه‌ی فریت بر روی استحکام کششی فولادهای دوفازی را بررسی کرده‌اند. همچنین تحقیقات ساروار و پرسترنر^۴ [۹]، نشان داد که استحکام کششی فولادهای دو فازی با افزایش کسر حجمی مارتنزیت ارتباط مستقیمی دارد. علاوه بر این تومیتا^۵ [۶] و کای^۶ [۱۰]، بر روی مورفولوژی فازهای موجود در فولادهای دوفازی و تأثیر آن بر استحکام کششی این نوع فولادها تحقیقاتی را انجام دادند و نتیجه گرفتند که در بین ساختارهایی با مورفولوژی‌های متفاوت ولی دارای درصد حجمی مارتنزیت یکسان، ساختاری با فریت‌های ریز فیبری شکل بهترین خواص مکانیکی را خواهد داشت.

این مثال‌ها نشان می‌دهد که فولادهای دوفازی به دلیل ساختارهای متعددی که می‌توانند داشته باشند بسیار مورد توجه محققین بوده‌اند. هدف از کار حاضر نیز تهیه دو ساختار فریتی-مارتنزیتی و فریتی-بینینی (با استفاده از عملیات حرارتی متفاوت) از یک فولاد کم کربن و مقایسه استحکام این دو نوع ساختار با یکدیگر می‌باشد.

۱ .Hayami & Furukawa
۲ . Rashid
۳ . chang
۴ . Sarwar & Priestner
۵ . Tomita
۶ . Cai

مرور بر منابع



۲-۱ ساختارهای چند فازی

تعداد زیادی از موادی که امروزه نقش بسیار مهم و تکنولوژیکی در صنعت دارند دارای ساختارهای دو و/ یا چند فازی هستند. برخی از این مواد عبارتند از آلیاژهای تیتانیوم چند فازی، فولادهای دو فازی، آلیاژهای چند فازی مس و دیگر آلیاژهای مهم [۱۳].

استفاده از آلیاژهای چند فازی قدمتی بسیار طولانی دارد به طوری که برنج‌های دو فاز α/β ، برای دهه‌های متمادی، پیش از آنکه فولادهای دوفازی و همچنین آلیاژهای دوفازی تیتانیوم کشف شوند، مورد استفاده قرار می‌گرفته است [۱۳].

علت کاربرد عمده‌ی ساختارهای چند فازی خواص مطلوب و بسیار مفیدی است که می‌توان از این نوع ساختارها بدست آورد، که از آن جمله می‌توان به دانسیته پایین و مقاومت اکسیداسیون بالای آلیاژهای AL-Ti با ساختار دوفازی اشاره نمود [۱۴].

در ساختارهای چند فازی، فازها همواره مکمل خواص یکدیگرند. به این معنی که همواره یکی از فازها دارای یک خاصیت مطلوب (به عنوان مثال استحکام کششی) بوده ولی دیگر خاصیت آن (به عنوان مثال انعطاف پذیری) مناسب نمی‌باشد. این فاز اگر در ساختاری همراه با فاز دیگری که دارای انعطاف پذیری بالا است ولی استحکام آن پایین است وجود داشته باشد، می‌تواند ترکیب مناسبی از استحکام و انعطاف پذیری را به وجود آورد و اینگونه ساختارهای چند فازی هستند که از نظر خواص و کاربرد مهندسی حائز اهمیت می‌باشند.

مطلب فوق در واقع همان تئوری مورد استفاده در ساخت کامپوزیت‌ها است و به همین دلیل است که در برخی موارد فولادهای با ساختار دوفازی را کامپوزیت‌های فولاد/ فولاد می‌نامند و می‌توان از برخی روابط کامپوزیت‌ها نیز برای بدست آوردن خواص این نوع مواد استفاده نمود [۱۷-۱۵].

در مورد فولادها نیز ساختار این آلیاژ معمولاً ترکیبی از دو یا چند فاز خواهد بود. زیرا همواره حضور فازهای ناخواسته اجتناب ناپذیر است و تهیه فولادی متشکل از یک فاز مستلزم کنترل دقیق ترکیب شیمیایی و پروسه تولید است [۱۸].

به عنوان مثال فولادهایی با ساختار فریتی- پرلیتی، در فولادهای هیپووتکتوئید نیز دارای دو فاز متفاوت در ساختار خود هستند اما همانطور که پیش از این نیز گفته شد فازهای تشکیل دهنده‌ی این ساختار از نظر

خواص مکانیکی اختلاف زیادی با هم نداشته و بنابراین نمی‌توانند ضعف فاز دیگر را برطرف سازند اما برخلاف این حالت، در فولادها می‌توان با کنترل شرایط تولید، دو یا چند فاز که دارای خواص متفاوت نسبت به یکدیگر هستند را در ساختار ایجاد نمود که از جمله این ساختارها، ساختار فولادهای دوفازی است که در ادامه به بحث پیرامون این نوع فولادها، خواص آن‌ها و عوامل موثر بر خواص آن‌ها بحث خواهد شد.

۲-۲ انواع فولادهای دوفازی و کاربرد آن‌ها

فولادهای دوفازی^۱ به وسیله‌ی ساختار داخلی آن‌ها که شامل زمینه‌ای از دانه‌های فریت و حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد فاز سخت، که در زمینه‌ی نرم پخش شده است، شناخته می‌شوند [۱۹].

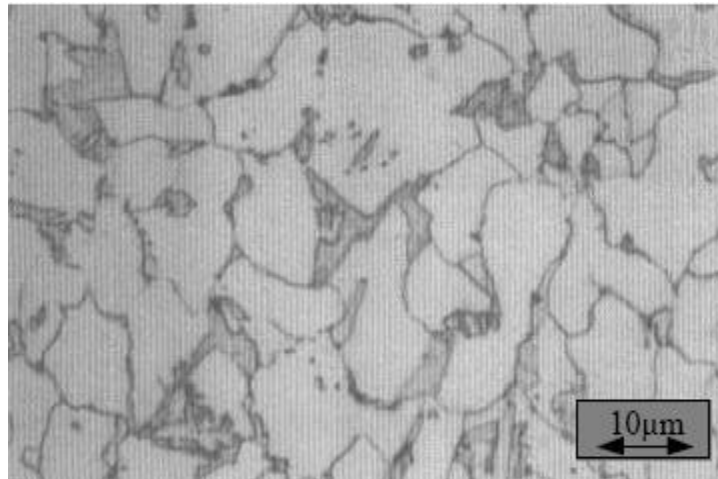
برای اینکه ساختار این نوع فولادها از ساختار فریتی-پرلیتی حاصل از عملیات‌های متداول بر روی فولادهای کم کربن یا HSLA متمایز گردد، نام دو فازی برای این ساختار انتخاب شده است [۲۰]. علاوه بر این ساختارهایی که شامل ترکیبی از بینیت و مارتنزیت هستند و معمولاً با نام فولادهای چند فازی و/یا فولادهای با ساختار مرکب شناخته می‌شوند [۲۱ و ۲۲] نیز در زمره‌ی فولادهای دوفازی محسوب نمی‌شوند. فولادهای دوفازی برحسب نوع فاز سخت موجود در این نوع فولادها به دو دسته‌ی فریتی-مارتنزیتی، که فاز سخت موجود در ساختار آن مارتنزیت است و فریتی-بینیتی، که فاز سخت موجود در ساختار آن بینیت است، تقسیم‌بندی می‌شوند.

الف- فولادهای دو فازی فریتی مارتنزیتی^۲

تولید این نوع فولاد دوفازی مدت زمان زیادی قبل از اینکه فولادهای دوفازی فریتی-بینیتی تولید شوند، آغاز شده بود. همانطور که پیش از این نیز گفته شد، ساختار داخلی این نوع فولادها، شامل زمینه‌ی فریت به همراه جزایر پراکنده مارتنزیت است. علاوه بر فریت و مارتنزیت در ساختار این نوع فولادها همواره مقادیری بینیت و آستنیت باقیمانده نیز وجود دارد. شکل ۲-۱ نمونه‌ای از ساختار این نوع فولادها را نشان می‌دهد.

۱ . Dual Phase Steel

۲ . Ferritic Martensitic Dual Phase Steels



شکل ۱-۲. ساختار داخلی یک فولاد دوفازی فریتی-مارتنزیتی (ناحیه سفید فریت و ناحیه تیره مارتنزیت است) [۱۹].

کسر حجمی فاز مارتنزیت در این نوع فولادها، با توجه به نوع عملیات حرارتی و/یا عملیات حرارتی-مکانیکی انجام شده متفاوت بوده و تعیین کننده خواص مکانیکی این نوع فولادها می باشد [۲۳]. کاربرد عمده این نوع فولادها در صنعت خودروسازی خصوصاً در تولید بدنه و شاسی و رینگ چرخ خودرو می باشد [۲۳]. همچنین به دلیل مقاومت به خستگی مناسب این نوع فولادها می توان از آنها برای تولید قطعاتی نظیر ریل‌های راه آهن استفاده نمود [۲۴].

ب- فولادهای دوفازی فریتی-بینیتی^۱

فولادهای دوفازی فریتی-مارتنزیتی با تمام مزایایی که داشتند، دچار مشکلاتی نیز بودند. این نوع فولادها در ناحیه‌ی متأثر از حرارت جوشکاری استحکام مناسبی ندارند. علاوه بر این جهت تولید این نوع فولادها به سرعت سردکردن بسیار بالایی، برای رسیدن به زیر دمای M_s نیاز می باشد که این امر در تولید صنعتی (رجوع شود به بخش ۲-۳) به غلطک‌هایی با سرعت چرخش بسیار بالا نیاز دارد [۲۲]. بنابراین نگاه‌ها به سمت تولید فولادی که در آن فاز سخت به جای مارتنزیت، بینیت است معطوف شد. نخستین فعالیت‌ها در این زمینه در سال ۱۹۸۵، توسط ازکا^۲ و همکارانش انجام گرفت [۲۵]. بنابراین ساختار این نوع فولادها شامل ذرات بینیت، که در زمینه‌ی فریت پخش شده‌اند، می باشد. علاوه بر فریت و بینیت در

۱ . Ferritic Bainitic Dual Phase Steel

۲. Esaka

ساختار این نوع فولادها مقادیری مارتنزیت و آستنیت باقیمانده نیز وجود دارد. شکل ۲-۲ نمونه‌ای از این نوع ساختار را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲. ساختار داخلی فولاد دوفازی فریتی- بینیتی (ناحیه سفید فریت و ناحیه تیره بینیت است) [۲۴].

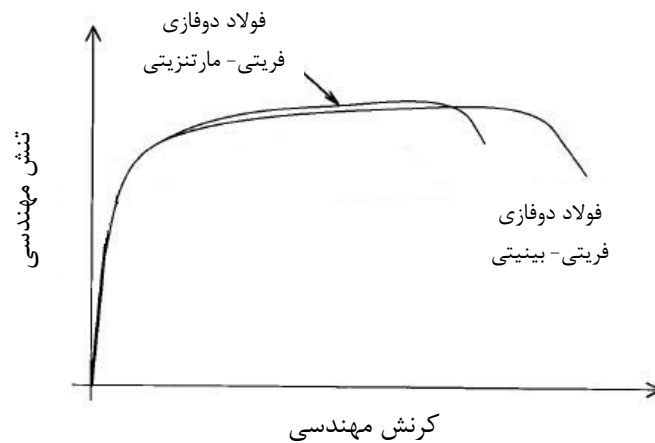
از کاربردهای عمده فولادهای دوفازی فریتی- بینیتی می‌توان به قطعات سیستم تعلیق در صنعت خودروسازی اشاره نمود. همچنین خاصیت جوش پذیری مناسب این نوع فولادها، کاربرد آن را در بخش‌هایی که عملیات جوشکاری مورد نیاز است مطلوب می‌نماید [۲۴].

اما نکته‌ی قابل توجه این است که فولادهای دوفازی فریتی- بینیتی اخیراً در صنعت ساختمان‌سازی مورد توجه قرار گرفته‌اند. دلیل این امر نسبت کم استحکام تسلیم به استحکام کششی این نوع فولادها می‌باشد. اسکلت ساختمان‌های بلند به فولادهای محکم و جوش‌پذیر نیاز دارند که این دو خصوصیت در فولادهای دوفازی فریتی- بینیتی وجود دارد [۲۲].

جهت طراحی ساختمان برای مقابله با زمین لرزه‌های احتمالی، نیاز است تا فولاد به کار رفته در اسکلت ساختمان از داکتیلیته لازم پس از تسلیم، جهت تحمل تغییر شکل‌های اعمال شده بدون اینکه گسیخته شود، برخوردار باشد [۲۲].

شکل ۲-۳ مقایسه‌ای از نمودار تنش- کرنش مهندسی فولادهای دوفازی فریتی- مارتنزیتی و فریتی- بینیتی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، فولادهای فریتی- بینیتی با وجود استحکام کششی کمتر نسبت به فولادهای فریتی مارتنزیتی، دارای تغییر طول نهایی بیشتری هستند که این خاصیت

فولادهای فریتی- بینیتی، آن‌ها را برای کاربرد در شرایطی که نیاز به تغییر شکل بیشتر قبل از گسیختگی است مناسب می نماید [۲۲].



شکل ۲-۳. مقایسه‌ی شماتیک رفتار کششی فولادهای فریتی- مارتنزیتی و فریتی- بینیتی [۲۲].

۳-۲ روش تهیه فولادهای دوفازی

تمامی فولادهای دوفازی در مراحل تولید عبور از ناحیه ی دو فازی $\alpha + \gamma$ (ناحیه‌ی پایداری آستنیت و فریت در دیاگرام تعادلی $Fe-Fe-C$ را تجربه می‌کنند. حرارت دادن فولاد در این ناحیه را که بین خطوط بحرانی A_{c1} و A_{c3} دارد با عنوان عملیات آنیل میان بحرانی شناخته می‌شود [۲۳].

دمای خطوط A_{c1} و A_{c3} ثابت نبوده و بسته به میزان عناصر آلیاژی موجود در فولاد تغییر می‌کند. تأثیر عناصر آلیاژی بر روی خط دمای بحرانی پایین (A_{c1}) و خط دمای بحرانی بالایی (A_{c3}) در دیاگرام تعادلی $Fe-Fe-C$ توسط معادله‌های ۱-۲ و ۲-۲ که توسط کراوس^۱ [۲۶] ارائه شده است، نشان داده می‌شود.

$$A_{c1} = 723 - 10.7 Mn - 16.9 Ni + 19.1 Si + 16.9 Cr + 26.4 W \quad (\text{معادله ی ۱-۲})$$

$$A_{c3} = 910 - 20.3 \sqrt{C} - 15.2 Ni + 44.7 Si + 10.4 V + 31.5 Mo + 26.4 W \quad (\text{معادله ی ۲-۲})$$

معمولاً توصیه می‌شود ماده‌ی اولیه، که ساختار آن عموماً فریتی- پرلیتی است، قبل از انجام عملیات اصلی جهت تولید فولاد دوفازی، تحت عملیات همگن سازی و نرماله کردن قرار گیرد [۲۷].

عموماً سه مسیر متفاوت برای عملیات حرارتی فولادهای دو فازی پیشنهاد می‌شود.

۱ . Krauss