

پیشگفتار

در صنایع بزرگ کشور و بالاخص در اکثر کاربردهای مهندسی فولادهای ساده کربنی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار هستند. در فولادهای ساده کربنی عنصر اصلی پس از آهن، کربن است که میزان و درصد آن در فولاد، انواع فولادهای ساده کربنی را تشکیل می‌دهند. این فولادها به‌عنوان فولادهای ساختمانی بیشترین کاربرد را در صنایع مختلف دارا هستند. عنصر دیگری که در افزایش خواص آهنگری و برشکاری فولادها موثر بوده و تواما باعث افزایش قابلیت ماشینکاری فولاد خواهد شد، گوگرد است که در حد معینی ($0/08-0/35\%$) به فولاد اضافه می‌شود. این فولادها تحت عنوان فولادهای خوش‌تراش مطرح هستند.

فولادهای مهم دیگر در کاربردهای صنعتی عبارتند از فولادهای بلبینگ که حاوی حدود یک درصد کربن و $1/5$ درصد کروم بوده و پس از عملیات حرارتی مناسب از مقاومت به سایش بالا و سختی مطلوبی (64 HRC) برخوردار خواهند شد. فولادهای نیتراسیون که در یک محیط حاوی نیتروژن در دمای $480-580^\circ\text{C}$ ساخته می‌شوند، از سختی بالاتری نسبت به فولادهای سمانتاسیون برخوردارند. این دسته از فولادها به‌عنوان فولادهای ابزار گرم استفاده می‌شوند.

از دیگر فولادهای پر اهمیت در صنایع، فولادهای زنگ‌نزن هستند. این فولادها به واسطه قابلیت پسیوشوندگی از مقاومت به خوردگی خوبی برخوردار هستند که این امر ناشی از حضور کروم (بیش از حدود 10 درصد) در این فولادهاست. در میان فولادهای زنگ‌نزن، فولادهای آستنیتی با حدود $16-26\%$ کروم و $8-20\%$ نیکل از مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به دیگر فولادهای زنگ‌نزن برخوردارند. فولادهای زنگ‌نزن فریتی مقاومت به خوردگی کمتری در مقایسه با فولادهای آستنیتی داشته، اما مقاومت به خوردگی آن‌ها بیش از فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی حاوی $11-14\%$ کروم است.

فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس حاوی مخلوطی از ساختار فریتی و آستنیتی بوده که دارای میزان کمتری از نیکل ($4-5\%$) و مقدار بیشتری از کروم ($18-28\%$) در مقایسه با فولادهای آستنیتی متداول است. این فولادها برخلاف فولادهای آستنیتی از قابلیت مغناطیسی برخوردار می‌باشند. فولادهای دوپلکس از مقاومت بالایی در برابر خوردگی تنشی (SCC) و یون کلراید برخوردار بوده و تواما قابلیت جوشکاری مطلوب و استحکام بالایی نیز دارند، که این خواص موجب ایجاد جایگاه ویژه‌ای برای این فولادها در صنعت شده است.

کتاب حاضر به منظور آشنایی بیشتر با این نوع فولادها تهیه شده، زیرا به نظر می‌رسد که اطلاعات موجود در رابطه با فولادهای دوپلکس نسبت به دیگر انواع فولادها اندک است. خواص عمومی این فولادها مابین فولادهای فریتی و آستنیتی بوده، و به لحاظ فرایند تولید نسبتاً ساده‌تر و هزینه کمتر از فولادهای آستنیتی، پتانسیل بکارگیری از آنها در صنایع مهم وجود دارد. در نتیجه

امکان استفاده از این فولادها در صنایع نفت و گاز، پتروشیمی و نیز آب و فاضلاب نیاز به کسب اطلاعات بیشتر در این مورد را افزایش داده است.

در فصول اولیه کتاب حاضر ابتدا مروری بر انواع فولادها آورده شده و همچنین نحوه دسته‌بندی آنها توسط انستیتوها و انجمن‌های بین‌المللی و نیز خواص برخی از مهم‌ترین فولادهای ساختمانی و نقش عناصر تشکیل دهنده آنها مطرح گردیده است. در ادامه تاریخچه مختصری از نحوه تولید به همراه ترکیب شیمیایی و متالورژی فولادهای دوپلکس تشریح و تاثیرات ناشی از نسبت ساختاری فریت به آستنیت، اثرات عملیات حرارتی و تشکیل فازهای مختلف مورد بررسی واقع شده است. همچنین مقاومت به خوردگی این فولادها، به خصوص در مقابل خوردگی‌های تنش‌ی، ترک خوردگی‌های هیدروژنی و انواع دیگر خوردگی، در کنار سینتیک واکنش‌ها و مقاومت به اکسیداسیون آنها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت نیز قابلیت جوشکاری، خواص مکانیکی و فیزیکی، به همراه شکل‌دهی، ماشینکاری و عملیات حرارتی این فولادها تشریح گردیده و کاربردهای آن در شرایط و صنایع مختلف آورده شده است.

مطالبی که در این کتاب گردآوری شده به‌عنوان یک پیش‌زمینه در رابطه با خواص و کاربرد فولادهای دوپلکس مطرح بوده و به‌عنوان یک کار اولیه طبعاً بدون عیب و ایراد نیست. این کتاب برای دانشجویان دوره‌های کارشناسی و کارشناسی ارشد رشته‌های متالورژی و مواد در نظر گرفته شده و تا حدودی نیز نیازهای اولیه محققین علاقه‌مند به فعالیت‌های پژوهشی در رابطه با این فولادها را برآورده می‌سازد. لذا مستدعی است که متخصصان و پژوهشگران و کلیه صاحب نظران محترم در راستای رفع اشکالات موجود در مطالب گردآوری شده این کتاب ما را از نظرات و پیشنهادات اصلاحی خود مطلع نمایند تا در چاپ‌های بعدی نسبت به تصحیح آن موارد اقدام گردد.

در انتها بر خود لازم می‌دانم که از آقای مهندس سهیل مهدوی که در جمع‌آوری مطالب این کتاب زحمات بسیاری کشیده‌اند و دیگر عزیزانی که در ویرایش، چاپ و توزیع این کتاب کوشش نموده‌اند صمیمانه سپاسگزاری کرده و برای همگی آنها آرزوی تندرستی و توفیق روزافزون و موفقیت نموده و امیدوارم در راستای تهیه و غنای متون علمی و کاربردی برای دانشجویان و کارشناسان صنایع، باهمت والا به تلاش و کوشش بیشتر ادامه دهند.

سعیدرضا اله کرم

akaram@ut.ac.ir

فهرست مطالب

فصل اول مروری بر انواع فولاد ۱

مقدمه ۲	۱.۱
دسته‌بندی فولادها ۲	۲.۱
سیستم دسته‌بندی انستیتو آهن و فولاد آمریکا (AISI) و انجمن مهندسی خودرو (SAE) ۶	۱.۲.۱
سیستم طبقه‌بندی انجمن آزمون و مواد آمریکا (ASTM) ۷	۲.۲.۱
سیستم طبقه‌بندی شماره‌گذاری یکپارچه (UNS) ۷	۳.۲.۱
فولادهای کربنی و کم‌آلیاژ ۷	۳.۱
فولادهای ساده‌ی کربنی ۸	۱.۳.۱
فولادهای آلیاژی ۱۲	۲.۳.۱
فولادهای کم‌آلیاژ با استحکام بالا ۱۴	۳.۳.۱
فولادهای کم‌آلیاژ دیگر ۱۶	۴.۳.۱
فولادهای پرآلیاژ ۱۸	۴.۱
فولادهای مقاوم در برابر سایش (فولادهای ابزار) ۱۸	۱.۴.۱
فولادهای مقاوم در برابر حرارت ۱۹	۲.۴.۱
فولادهای مقاوم در برابر خوردگی (زنگ‌نزن) ۱۹	۳.۴.۱

فصل دوم تاریخچه فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس ۲۹

فصل سوم ترکیب شیمیایی و نقش عناصر آلیاژی ۳۵

ترکیب شیمیایی فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس ۳۶	۱.۳
نقش عناصر آلیاژی در فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس ۳۶	۲.۳
کروم ۳۶	۱.۲.۳
مولیبدن ۳۷	۲.۲.۳
نیتروژن ۳۷	۳.۲.۳
نیکل ۳۸	۴.۲.۳

فصل چهارم متالورژی فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس ۴۱

نسبت فریت/آستنیت ۴۳	۱.۴
فازهای تشکیل‌شده در اثر عملیات حرارتی ۴۷	۲.۴
فاز سیگما ۴۷	۱.۲.۴
تردی ۴۷۵°C ۶۰	۲.۲.۴
فاز چی ۶۱	۳.۲.۴
فاز G ۶۲	۴.۲.۴
فاز R ۶۲	۵.۲.۴
فاز S ۶۳	۶.۲.۴
نیتريدها ۶۴	۷.۲.۴
سینتیک تشکیل فازهای مخرب ۶۴	۸.۲.۴
پالایش و ریزدانه‌سازی فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس ۶۷	۳.۴

فصل پنجم خوردگی فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس ۶۹

مقاومت در برابر اسیدها ۷۰	۱.۵
مقاومت در محیط‌های خورنده با PH بالا ۷۲	۲.۵
مقاومت در برابر خوردگی شیاری و حفره‌دار شدن ۷۲	۳.۵
مقاومت در برابر ترک‌های ناشی از خوردگی تنشی (SCC) ۷۵	۴.۵
اشاعه‌ی ترک خوردگی خستگی ۷۹	۵.۵
سرعت رشد ترک ماکروسکپی ۸۲	۱.۵.۵
سرعت‌های رشد میکروسکپی ۸۳	۲.۵.۵
مکانیزم شکست ۸۴	۳.۵.۵
تردی هیدروژنی ۹۲	۶.۵
رفتار مکانیکی ۹۴	۱.۶.۵
مورفولوژی شکست ۹۶	۲.۶.۵
گسیختگی فیلم پسیو در اثر تغییر فرم ۱۰۲	۳.۶.۵
مکانیزم جذب هیدروژن ۱۰۳	۴.۶.۵
دام‌های هیدروژنی و عمق تردی ۱۰۵	۵.۶.۵
خوردگی بین دانه‌ای ۱۰۶	۷.۵
خوردگی فرسایشی ۱۰۶	۸.۵
خوردگی گالوانیک ۱۰۷	۹.۵

فصل ششم اکسیداسیون فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس ۱۰۹

سینتیک اکسیداسیون ۱۱۰	۱۶
مشخصات لایه‌ی اکسیدی ۱۱۴	۲۶
بررسی طیف‌های XPS ۱۲۷	۳۶
تأثیر دما ۱۳۱	۴۶
تأثیر منگنز ۱۳۴	۵۶

فصل هفتم مشخصات و کنترل کیفیت ۱۳۷

نیازمندی‌های انجام یک آزمون استاندارد ۱۳۸	۱.۷
ترکیب شیمیایی ۱۳۸	۱.۱.۷
آنیل انجالی و کوئنچ ۱۳۹	۲.۱.۷
شرایط آزمون‌های خاص ۱۴۰	۲.۷
آزمون‌های سختی و کشش ۱۴۰	۱.۲.۷
آزمون خمش ۱۴۱	۲.۲.۷
آزمون ضربه و بررسی‌های متالوگرافی برای تعیین فازهای اینترمتالیک ۱۴۱	۳.۲.۷
تعیین تعادل فازی به‌روش متالوگرافی یا اندازه‌گیری‌های مغناطیسی ۱۴۳	۴.۲.۷
آزمون خوردگی ۱۴۳	۵.۲.۷
جوشکاری و بررسی جوش ۱۴۹	۶.۲.۷

فصل هشتم خواص مکانیکی ۱۵۱

تأثیر نیتروژن ۱۵۳	۱.۸
مقاومت به ضربه و انتقال نرمی به تردی ۱۵۵	۲.۸
خمش ۱۵۹	۳.۸
خواص مکانیکی دما بالا ۱۶۰	۴.۸
خستگی ۱۶۲	۵.۸
سوپرپلاستیسیته ۱۶۹	۶.۸

فصل نهم خواص فیزیکی ۱۷۵

فصل دهم قطع کردن ۱۷۹

اره کردن ۱۸۰	۱.۱۰
--------------	------

برش ۱۸۰	۲.۱۰
چاک دادن ۱۸۱	۳.۱۰
پانچ کردن ۱۸۱	۴.۱۰
برش پلاسما و لیزر ۱۸۲	۵.۱۰

فصل یازدهم شکل‌دهی ۱۸۳

شکل‌دهی داغ ۱۸۴	۱.۱۱
آنیلینگ انحلالی ۱۸۵	۱.۱.۱۱
شکل‌دهی گرم ۱۸۷	۲.۱۱
شکل‌دهی سرد ۱۸۷	۳.۱۱
شکل‌دهی با پرس ۱۸۹	۴.۱۱
شکل‌دهی چرخشی ۱۹۰	۵.۱۱

فصل دوازدهم ماشین‌کاری فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس ۱۹۱

راهنمای کلی برای ماشین‌کاری فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس ۱۹۲	۱.۱۲
تراش‌کاری و صیقل‌کاری ۱۹۳	۲.۱۲
فرزکاری با ابزارهای کاربیدی ۱۹۴	۳.۱۲
سوراخ‌کاری پیچشی با مته‌های فولادی سرعت بالا ۱۹۵	۴.۱۲

فصل سیزدهم جوشکاری فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس ۱۹۷

راهنمای عمومی جوشکاری ۱۹۸	۱.۱۳
تفاوت بین فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس و آستنیتی ۱۹۸	۱.۱.۱۳
انتخاب مواد اولیه ۱۹۸	۲.۱.۱۳
تمیزکاری پیش از جوشکاری ۱۹۹	۳.۱.۱۳
طراحی اتصال ۱۹۹	۴.۱.۱۳
پیش‌گرم کردن ۱۹۹	۵.۱.۱۳
گرمای ورودی و دمای میان‌پاس ۲۰۲	۶.۱.۱۳
عملیات حرارتی پس از جوشکاری ۲۰۲	۷.۱.۱۳
تعادل فازی مطلوب ۲۰۲	۸.۱.۱۳
جوش فلزات غیرمشابه ۲۰۳	۹.۱.۱۳
توصیف و کیفیت فرآیند جوشکاری ۲۰۴	۲.۱۳
روش‌های جوشکاری ۲۰۶	۳.۱۳

جوشکاری قوس تنگستن تحت پوشش گاز محافظ (GTAW/TIG) ۲۰۷	۱.۳.۱۳
جوشکاری قوس فلز تحت پوشش گاز محافظ (GMAW/MIG) ۲۱۰	۲.۳.۱۳
جوشکاری قوس با الکتروود توپودری (FCW) ۲۱۳	۳.۳.۱۳
جوشکاری قوس با الکتروود محافظ روکش دار (SMAW) ۲۱۵	۴.۳.۱۳
جوشکاری قوس زیرپودری (SAW) ۲۱۸	۵.۳.۱۳
جوشکاری با پرتو الکترونی و لیزر ۲۱۹	۶.۳.۱۳
جوشکاری مقاومتی ۲۱۹	۷.۳.۱۳

فصل چهاردهم سایر تکنیک‌های اتصال ۲۲۱

آماده‌سازی محل اتصال ۲۲۲	۱.۱۴
چسب‌ها ۲۲۳	۲.۱۴
لحیم‌کاری دما پایین ۲۲۳	۳.۱۴
لحیم‌کاری دما بالا ۲۲۳	۴.۱۴

فصل پانزدهم تمیز کردن پس از تولید ۲۲۵

مقدمه ۲۲۶	۱.۱۵
نشانه‌های کرایون، رنگ، چرک، روغن ۲۲۷	۱.۱۵
آهن جاسازی شده (آلودگی‌های آهنی) ۲۲۷	۲.۱۵
پاشش جوش، تغییر رنگ جوش، فلاکس، سرباره، بریدگی‌های کناره‌ی جوش ۲۲۸	۴.۱۵

فصل شانزدهم کاربردهای فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس ۲۳۱

دی‌سولفورده کردن گازهای خروجی از دودکش ۲۳۲	۱.۱۶
نمک‌زدایی ۲۳۳	۲.۱۶
نفت و گاز ۲۳۴	۳.۱۶
سوخت‌های آلی ۲۳۶	۴.۱۶
صنایع خوراکی و آشامیدنی ۲۳۶	۵.۱۶
سیستم اکسیداسیون آب فوق‌بحرانی (SCWO) ۲۴۰	۶.۱۶
معماری ۲۴۲	۷.۱۶

پیوست‌ها ۲۴۵

منابع و مراجع ۲۵۳

فهرست الفبایی ۲۶۱

فصل اول

مروری بر انواع فولاد