خوردگی و انتخاب مواد

در صنایع نفت و گاز

تألیف:

محمدرضا قصابی

انتشارات پندار پارس

اسفند ۱۴۰۲

سرشناسه : قصابی، محمدرضا، ۱۳۵۸ –
عنوان و نام پدیدآور : خوردگی و انتخاب مواد در صنایع نفت و گاز/ تالیف محمدرضا قصابی.
مشخصات نشر : تهران : پندار پارس، ۱۴۰۲.
مشخصات ظاهری : ۶۶۶ ص.: مصور (بخشی رنگی)، جدول، نمودار.
شابک : ۵۵۰۰۰۰۰ ریال : 978-622-7785-27-2
وضعیت فهرست نویسی : فیپا
موضوع : خوردگی
Corrosion and anti-corrosives
نفت –– صنعت و تجارت –– وسایل و تجهیزات –– خوردگی
Petroleum industry and trade -- Equipment and supplies -- Corrosion
گاز –– صنعت و تجارت –– وسایل و تجهیزات –– خوردگی
Gas industry -- Equipment and supplies -- Corrosion
رده بندی کنگره : ۴۶۲TA
رده بندی دیویی : ۱۱۲۲۳/۶۲۰
شماره کتابشناسی ملی : ۹۵۱۶۶۳۶
اطلاعات رکورد کتابشناسی : فیپا

نام کتاب : خوردگی و انتخاب مواد در صنایع نفت و گاز
ناشر : انتشارات پندار پارس
تالیف : محمدرضا قصابی
چاپ نخست : اسفند ۱۴۰۲
شمارگان : ۵۰۰ نسخه
طرح جلد : رامین شکراللهی
چاپ، صحافی : روز
قیمت : ۵۵۰.۰۰۰ تومان شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۷۷۸۵-۲۷-۲

تمامی حقوق اعم از چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس برای مولف محفوظ است.

تقدیم به همسرم

محبوب، عزیز و همراه؛

و

برای ایران

بهترین سرزمینی که مزدا آفرید.

فهرست مطالب

فصل اول-اصول خوردگی و انتخاب مواد در صنایع نفت وگاز ۲۷
۱-۱- مقدمه ۲۷
۱-۲- عوامل کلی تخریب ۲۸
۱-۲-۱- پارامترهای مهندسی ۲۸
۱-۲-۲- پارامترهای غیرمهندسی ۲۸
۱-۲-۲-۱- فقدان دستورالعمل‌های لازم ۲۸
۱-۲-۲-۲- خطای انسانی ۲۹
۱-۲-۲-۳- بازرسی ضعیف ۲۹
۱-۲-۲-۴- چیدمان، نصب و هماهنگی ضعیف ۲۹
۱-۲-۲-۵- بروز موارد ناخواسته ۲۹
۱-۲-۲-۶- سایر موارد ۲۹
۱-۳- شرایط اقلیمی ایران ۳۰
۱-۴- انواع خوردگی در صنایع نفت و گاز ۳۰
۱-۴-۱- خوردگی یکنواخت ۳۱
۱-۴-۲- حفره‌دار شدن ۳۱
۱-۴-۳- خوردگی بین‌دانه‌ای ۳۲
۱-۴-۴- خوردگی سایشی ۳۳
۱-۴-۵- خوردگی گالوانیک ۳۴
۱-۴-۶- خوردگی توام با تنش ۳۵
۱-۵- انواع چاه‌های نفت و گاز ۳۷
۱-۵-۱- تفاوت چاه‌های نفت و گاز ۳۹
۱-۵-۲- اسیدی کردن ۴۱
۱-۵-۳- تغییر ترکیب شیمیایی مخازن نفت و گاز ۴۱
۱-۶- فاکتورهای انتخاب مواد ۴۲
۱-۶-۱- خواص مکانیکی ۴۳

۱-۶-۲- خواص تکنولوژیکی ۴۷
۱-۶-۳- خواص شیمیایی ۴۷
۱-۶-۴- محل کاربرد ۴۸
۱-۶-۵- شرایط مواد ۵۰
۱-۶-۶- هزینه‌های تامین کالا، اجرا و بهره‌برداری ۵۰
۱-۶-۷- قابلیت دسترسی ۵۱
۱-۶-۸- ویژگی‌های خاص ۵۱
۱-۶-۹- عوامل محیطی ۵۱
۱-۶-۱۰- خواص خزشی ۵۲
۱-۶-۱۱- سایر موارد ۵۳
۱-۷- گروه کلی آلیاژهای متداول ۵۳
۱-۷-۱- فولادهای کربنی ۵۴
۱-۷-۲- فولادهای کم‌آلیاژ ۵۴
۱-۷-۳- فولادهای زنگ‌نزن ۵۵
۱-۷-۳-۱- فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۵۵
۱-۷-۳-۲- فولادهای زنگ‌نزن فریتی (سری ۴۰۰) ۵۶
۱-۷-۳-۳- فولادهای زنگ‌نزن مارتنزینی (سری ۴۰۰ و ۵۰۰) ۵۶
۱-۷-۳-۴- فولاد زنگ‌نزن رسوب‌سختی ۵۶
۱-۷-۳-۵- فولاد زنگ‌نزن دوبلکس ۵۷
۱-۷-۴-۶- چدن‌ها ۵۷
۱-۷-۴-۷- آلیاژهای آلومینیوم و مس ۵۸
۱-۷-۴-۸- آلیاژهای نیکل ۵۹
۱-۷-۴-۹- آلیاژهای تیتانیم ۶۰
۱-۷-۴-۱۰- مواد غیرفلزی ۶۰
۱-۸ مروری بر میزان مصرف مواد متداول ۶۳
۱-۹- فرایند انتخاب مواد ۶۵
فصل دوم-عوامل خوردگی در محیط‌های هیدروکربنی ۶۷

۲-۱- مقدمه ۶۷
۲-۲- عوامل محیطی ۶۸
۲-۲-۱- آب ۶۸
۲-۲-۲- مقادیر پیش‌فرض گونه‌های کربوکسیلی آب همراه ۷۲
۲-۲-۳- سولفید هیدروژن ۷۳
۲-۲-۴- دی‌اکسیدکربن ۷۴
۲-۲-۴-۱ حمله **Mesa** ۷۵
۲-۲-۴-۲ خوردگی موضعی ناشی از جریان ۷۶
۲-۲-۴-۳ حفره‌دارشدن ۷۶
۲-۲-۵- کلریدها ۷۸
۲-۲-۶- ذرات جامد ۷۹
۲-۲-۷- بی‌کربنات‌ها ۷۹
۲-۲-۸- اسیدهای ارگانیک و قدرت یونی محلول ۸۰
۲-۲-۹- دمای عملیاتی ۸۲
۲-۲-۱۰- نسبت گاز به نفت ۸۳
۲-۲-۱۱- نسبت هیدروکربن‌ها به آب ۸۳
۲-۲-۱۲- نسبت آب (مایع) به گاز ۸۴
۲-۲-۱۳- درصد حجمی آب در نفت یا برش آب ۸۴
۲-۲-۱۴- گوگرد عنصری ۸۶
۲-۲-۱۵- غلظت یون هیدروژن (**pH**) ۸۷
۲-۲-۱۶- نوع جریان ۸۸
۲-۲-۱۷- اکسیژن ۹۲
۲-۲-۱۸- سرعت ظاهری گاز ۹۴
۲-۲-۱۹- گرید **API** ۹۶
۲-۲-۲۰- باکتری‌ها ۹۷
۲-۲-۲۱- ماسه و ذرات جامد ۹۹
۲-۲-۲۲- جیوه ۱۰۱

۲-۲-۲۳- اثر واکس ۱۰۲
۲-۲-۲۴- اثر نوع فولاد ۱۰۲
۲-۲-۲۵- آهن محلول ۱۰۲
فصل سوم- خوردگی ترش و شیرین ۱۰۵
۳-۱- مقدمه ۱۰۵
۳-۲- تاول هیدروژنی ۱۰۹
۳-۳- تردی هیدروژنی ۱۱۰
۳-۴- ترک خوردگی تحت تاثیر هیدروژن (HIC) ۱۱۱
۳-۴-۱- فاکتورهای محیطی موثر بر HIC ۱۱۲
۳-۴-۲- فاکتورهای موادی موثر بر HIC ۱۱۲
۳-۴-۳- روش‌های جلوگیری یا کنترل HIC ۱۱۳
۳-۵- خوردگی تنشی سولفیدی ۱۱۶
۳-۶- اثر H_2S بر خوردگی تنشی ۱۱۹
۳-۷- مقایسه HIC و SSC ۱۲۰
۳-۸- ترک‌خوردن تحت تاثیر هیدروژن و تنش (SOHIC/SZC) ۱۲۲
۳-۹ خوردگی شیرین ۱۲۵
۳-۱۰- سرعت خوردگی بر حسب نسبت $CO2/H2S$ ۱۲۷
۳-۱۱- محصولات خوردگی ۱۲۷
۳-۱۱-۱-سیستمهای شیرین($CO2/H2S > 200-500$) ۱۲۷
۳-۱۱-۲- سیستمهای ترش($CO2/H2S < 20-50$) ۱۲۸
۳-۱۱-۳- سیستمهای متوسط ($20-50 < CO2/H2S < 200-500$) ۱۲۸
فصل چهارم- ارزیابی مواد برای کاربرد در محیط‌های ترش ۱۳۱
۴-۱- مقدمه ۱۳۱
۴-۲- حساسیت به خوردگی سولفیدی تنشی (SSC) ۱۳۲
۴-۲-۱- گزارش شرکت NKK ۱۳۲
۴-۲-۲- استاندارد NACE MR0175/ISO15156 ..... ۱۳۳
۴-۲-۳- استاندارد EFC Publication No.16 ..... ۱۴۱

۴-۲-۴- استاندارد NACE MR0103 ..... ۱۴۲
۴-۳- نحوه محاسبه فشار جزیی گازهای اسیدی ۱۴۳
۴-۳- حساسیت به ترک خوردگی تحت تاثیر هیدروژن (HIC) ۱۴۴
۴-۴- تست‌های آزمایشگاهی ۱۴۹
۴-۴-۱- آزمایش خوردگی تنشی سولفیدی(SSC) ۱۵۰
۴-۴-۲- آزمایش ترک خوردن تحت تاثیر هیدروژن (HIC) ۱۵۲
۴-۴-۳- آزمایش ترک خوردگی تحت تاثیر هیدروژن و تنش (SOHIC) ۱۵۳
۴-۴-۴- فرکانس پیشنهادی انجام تست‌های خوردگی ۱۵۵
فصل پنجم – مدل‌های محاسبه نرخ خوردگی ۱۵۷
۵-۱- مقدمه ۱۵۷
۵-۲- مبانی مدل‌های پیش‌بینی نرخ خوردگی ۱۵۹
۵-۳- صحت و دقت پارامترهای ورودی ۱۶۲
۵-۴- سطح یا شدت خوردگی ۱۶۳
۵-۴-۱- مرحله اول: مطالعات امکان‌سنجی یا مفهومی ۱۶۳
۵-۵- احتمال خوردگی ۱۶۷
۵-۶- مدل نیمه تجربی De Waard and Milliams/De Waard and Lotz 1991 ..... ۱۶۹
۵-۶-۱- محاسبه نرخ خوردگی نهایی ۱۷۲
۵-۶-۲- اثر گلایکول ($F(g)$) ۱۷۲
۵-۶-۳- اثر پوسته‌های خوردگی محافظ ($F(s)$) ۱۷۳
۵-۶-۴- اثر آب همراه ($F(w)$) ۱۷۴
۵-۶-۵- اثر ممانعت‌کننده ($F(i)$) ۱۷۶
۵-۶-۶- اثر فرایند میعان (FC) ۱۷۶
۵-۶-۷- اثر اسیدیته آب همراه (FpH) ۱۷۷
۵-۶-۸- اثر سولفید هیدروژن ۱۸۰
۵-۷- مدل نیمه تجربی De Waard, Lotz, & Dugstadt 1995 ..... ۱۸۲
۵-۷-۱- تاثیر دما بر تشکیل رسوب (محصولات خوردگی) ۱۸۳
۵-۷-۲- معادله تصحیح شده ۱۸۳

۵-۷-۳- تاثیرات رفتار بازدارندگی خوردگی و گلایکول ۱۸۴
۵-۸- مدل Cassandra ۱۸۵
۵-۹- مدل Hydrocor ۱۸۵
۵-۱۰- مدل Corplus ۱۸۵
۵-۱۱- مدل KSC ۱۸۶
۵-۱۲- مدل Multicorp ۱۸۶
۵-۱۳- مدل ECE ۱۸۶
۵-۱۴- مدل Predict ۱۸۸
۵-۱۵- مدل Corpos ۱۸۹
۵-۱۶- مدل Corprog ۱۸۹
۵-۱۷- مدل SweetCor ۱۹۰
۵-۱۸- مدل دانشگاه Tulsa ۱۹۰
۵-۱۹- مدل OLI ۱۹۰
۵-۲۰- مدل دانشگاه ULL ۱۹۰
۵-۲۱- مدل Norsok ۱۹۱
۵-۲۲- مدل CorPos™ ۱۹۳
۵-۲۲-۱- شبیه‌سازی جریان‌های چند فازی ۱۹۳
۵-۲۲-۲- شبیه‌سازی فاز آبی ۱۹۳
۵-۲۲-۳- pH و ترکیب شیمیایی آب ۱۹۴
۵-۲۲-۴- شبیه‌سازی خوردگی نقطه‌ای ۱۹۴
۵-۲۳- مدل سوکراتز ۱۹۵
۵-۲۴- مدل IFE ۱۹۵
فصل ششم – خوردگی خطوط لوله خشکی و دریایی ۱۹۹
۶-۱- مقدمه ۱۹۹
۶-۲- بررسی اجمالی خوردگی ۲۰۰
۶-۳- چشم‌انداز خوردگی ۲۰۲
۶-۳-۱- توالی و پیامدهای خوردگی ۲۰۲

۶-۳-۲- خطوط لوله انتقال ۲۰۳
۶-۳-۳- خطوط لوله توزیع گاز طبیعی ۲۰۵
۶-۳-۴- خطوط جمع‌آوری گاز ۲۰۶
۶-۴- حفاظت در برابر خوردگی ۲۰۷
۶-۴-۱- هزینه‌های مستقیم ۲۰۸
۶-۴-۲- هزینه‌های غیرمستقیم ۲۰۸
۶-۴-۲-۱- توقف بهره‌برداری ۲۰۸
۶-۴-۲-۲- آلوده شدن سیال ۲۰۹
۶-۴-۲-۳- از دست دادن محصول ۲۰۹
۶-۴-۲-۴- از دست دادن بازده ۲۰۹
۶-۴-۲-۵- آسیب زیست‌محیطی ۲۱۰
۶-۴-۲-۶- طراحی اضافه ۲۱۰
۶-۵- کیفیت فولاد ۲۱۱
۶-۶- خوردگی خارجی ۲۱۱
۶-۶-۱- خطوط لوله دریایی ۲۱۴
۶-۶-۲- روش‌های پیشگیری یا کاهش خوردگی ۲۱۵
۶-۷- خوردگی داخلی ۲۱۵
۶-۸- اصول کلی مطالعه خوردگی داخلی خطوط لوله ۲۱۶
۶-۹- استفاده از آلیاژهای مقاوم به خوردگی ۲۱۹
۶-۱۰- تزریق بازدارنده‌های خوردگی ۲۱۹
۶-۱۱ خوردگی نواحی تحتانی خطوط لوله ۲۲۰
۶-۱۲ خوردگی نواحی فوقانی خطوط لوله ۲۳۸
۶-۱۲-۱ مکانیک سیال ۲۴۱
۶-۱۲-۲ انتقال جرم و حرارت ۲۴۴
۶-۱۲-۳ ترکیب شیمیایی ۲۴۷
۶-۱۲-۳-۱ اثر CO_2 بر خوردگی نواحی فوقانی خط لوله ۲۴۸
۶-۱۲-۳-۲ اثر H_2S بر خوردگی نواحی فوقانی خط لوله ۲۴۹

۶-۱۲-۳-۳ اثر نسبت CO_2/H_2S بر خوردگی نواحی فوقانی خط لوله ۲۵۱
۶-۱۲-۴ الکتروشیمی ۲۵۲
۶-۱۲-۵ سرعت گاز ۲۵۲
۶-۱۲-۶ گلایکول ۲۵۳
۶-۱۲-۷ بازدارنده‌های خوردگی ۲۵۴
۶-۱۲-۸ نرخ میعان آب و هیدروکربن ۲۵۶
۶-۱۲-۹ مقدار اسید استیک در آب حاصل از میعان ۲۵۸
۶-۱۲-۱۰ تثبیت خوردگی نواحی فوقانی با گذشت زمان [۹۰] ۲۵۸
۶-۱۲-۱۱ دمای عملیاتی ۲۵۹
۶-۱۲-۱۲ اثر متانول ۲۶۰
۶-۱۲-۱۳ انواع خوردگی نواحی فوقانی خطوط لوله ۲۶۱
۶-۱۲-۱۳-۱ خوردگی نواحی فوقانی شیرین ۲۶۴
۶-۱۲-۱۳-۱-۱ احتمال خوردگی شیرین در نواحی فوقانی خطوط لوله ۲۶۵
۶-۱۲-۱۳-۱-۲ نرخ خوردگی شیرین در نواحی فوقانی خطوط لوله ۲۶۶
۶-۱۲-۱۳-۱-۳ محل بروز خوردگی شیرین در نواحی فوقانی خطوط لوله ۲۶۸
۶-۱۲-۱۳-۱-۴ پیشگیری از خوردگی شیرین در نواحی فوقانی خطوط لوله ۲۶۹
۶-۱۲-۱۳-۱-۵ الزامات خاص در مورد اضافه مجاز خوردگی ۲۸۲
۶-۱۲-۱۳-۱-۶ الزامات خاص برای پوشش‌های محافظ ۲۸۴
۶-۱۲-۱۳-۱-۷ استفاده احتمالی از تکنیک تثبیت pH ۲۸۴
۶-۱۲-۱۳-۲ خوردگی نواحی فوقانی ترش ۲۸۸
۶-۱۲-۱۳-۲-۱ احتمال خوردگی ترش در نواحی فوقانی خطوط لوله ۲۸۸
۶-۱۲-۱۳-۲-۲ پیشگیری از خوردگی ترش در نواحی فوقانی خطوط لوله ۲۹۰
۶-۱۲-۱۴ حلقه یا مدارهای خوردگی ۲۹۴
۶-۱۲-۱۵ سناریوهای بهره‌برداری ۲۹۵
۶-۱۲-۱۶ پایش و بازرسی خوردگی نواحی فوقانی خطوط لوله ۳۰۰
۶-۱۲-۱۷ داده‌های مورد نیاز برای پیش‌بینی خوردگی نواحی فوقانی خطوط لوله ۳۰۱
۶-۱۳ خوردگی ناشی از تشکیل هیدرات ۳۰۳

۶-۱۳-۱ اثر تشکیل هیدرات و نمک‌ها بر خوردگی ۳۰۴
۶-۱۳-۱-۱ اثر بازدارنده‌های ترمودینامیکی بر خوردگی ۳۰۸
۶-۱۳-۱-۲ اثر بازدارنده‌های هیدرات با دوز کم بر تشکیل هیدرات ۳۰۹
۶-۱۴ تشکیل رسوب ۳۰۹
۶-۱۴-۱ رسوب‌گیری خطوط لوله ۳۱۰
۶-۱۴-۲ سازگاری بازدارنده‌های ضدرسوب با MEG و LDHI ۳۱۲
۶-۱۴-۳ نتیجه‌گیری و توصیه‌های فنی ۳۱۴
فصل هفتم – انتخاب آلیاژهای مقاوم به خوردگی ۳۱۹
۷-۱- مقدمه ۳۱۹
۷-۲- مراحل ارزیابی فولادهای مقاوم به خوردگی ۳۲۳
۷-۲-۱ارزیابی مقاومت به خوردگی عمومی ۳۲۳
۷-۲-۲- ارزیابی مقاومت به ترک خوردگی تنشی(SCC) ۳۲۴
۷-۲-۳- ارزیابی مقاومت به خورگی حفره‌ای ۳۲۹
۷-۲-۴- ارزیابی مقاومت به ترک‌های تنشی سولفیدی SSC ۳۳۰
فصل هشتم – ممانعت‌کننده‌های مورد استفاده در صنایع نفت و گاز ۳۳۳
۸-۱- مقدمه ۳۳۳
۸-۲- دسته‌بندی ممانعت‌کننده‌ها ۳۳۴
۸-۳- انواع رویین‌کننده‌ها ۳۳۶
۸-۴- بررسی میزان بازدهی مواد بازدارنده خوردگی ۳۳۷
۸-۵- روش‌های تزریق مواد بازدارنده ۳۳۸
۸-۵-۱- عدم تزریق ۳۳۸
۸-۵-۲- روش ناپیوسته یا منقطع ۳۳۸
۸-۵-۳- تزریق دوره‌ای ۳۳۹
۸-۵-۴- روش پیوسته ۳۳۹
۸-۵-۵- روش فشاری ۳۳۹
۸-۶- راندمان بازدارندگی ۳۴۰
۸-۷- کاربرد بازدارنده‌های خوردگی در چاه‌های نفت و گاز ۳۴۱

۸-۸- بازدارنده‌های محیط‌های آبی ۳۴۱
۸-۹- کاربرد بازدارنده‌ها در پالایشگاه‌ها ۳۴۳
۸-۹-۱- خوردگی در سیستم بالاسری برج تقطیر ۳۴۵
۸-۹-۲- روش‌های جلوگیری از خوردگی در سیستم‌های بالاسری ۳۴۹
۸-۹-۳- نمک‌زدایی از نفت خام ۳۵۰
۸-۹-۴- خنثی‌سازی ۳۵۱
۸-۹-۵- بازدارنده‌های تشکیل‌دهنده فیلم ۳۵۶
فصل نهم – پایش خوردگی ۳۵۷
۹-۱- مقدمه ۳۵۷
۹-۲- نقش پایش خوردگی ۳۵۸
۹-۳- تفاوت مفاهیم بازرسی خوردگی و پایش خوردگی ۳۵۹
۹-۴- نقش پایش خوردگی در نظام مدیریت یکپارچه ۳۶۰
۹-۵- انتخاب بهترین روش پایش خوردگی ۳۶۰
۹-۶- روش‌ها و فنون پایش خوردگی ۳۶۱
۹-۶-۱- کوپن‌های خوردگی (روش نفوذی) ۳۶۲
۹-۶-۱-۱- مزایا ۳۶۲
۹-۶-۱-۲- محدودیت‌ها و معایب ۳۶۳
۹-۶-۲- پراب مقاومت الکتریکی (روش نفوذی) ۳۶۳
۹-۶-۲-۱- مزایا ۳۶۳
۹-۶-۲-۲- محدودیت‌ها و معایب ۳۶۴
۹-۶-۳- پراب‌های مقاومت القایی (نفوذی) ۳۶۴
۹-۶-۳-۱- مزایا ۳۶۵
۹-۶-۳-۲- محدودیت‌ها و معایب ۳۶۵
۹-۶-۴- پراب‌های مقاومت پلاریزاسیون خطی (روش نفوذی) ۳۶۵
۹-۶-۴-۱- مزایا ۳۶۵
۹-۶-۴-۲- محدودیت‌ها و معایب ۳۶۵
۹-۶-۴-۳- کاربردهای اصلی ۳۶۶

۹-۶-۴-۴- مقایسه روش‌های ER و LPR ۳۶۶
۹-۶-۵- روش نویز الکتروشیمیایی (روش نفوذی) ۳۶۷
۹-۶-۵-۱- مزایا ۳۶۹
۹-۶-۵-۲- محدودیت‌ها و معایب ۳۶۹
۹-۶-۶- پایش هیدروژن (روش نفوذی و غیر نفوذی) ۳۷۰
۹-۶-۶-۱- مزایا ۳۷۱
۹-۶-۶-۲- محدودیت‌ها و معایب ۳۷۱
۹-۶-۷- روش پایش pH یا ترکیب شیمیایی آب (روش نفوذی و غیر نفوذی) ۳۷۱
۹-۶-۷-۱- مزایا ۳۷۱
۹-۶-۷-۲- محدودیت‌ها و معایب ۳۷۲
۹-۷- استقرار برنامه پایش خوردگی ۳۸۳
فصل دهم – انتخاب مواد در کارخانه‌های تولید، جمع‌آوری و فراورش نفت و گاز ۳۸۵
۱۰-۱- مقدمه ۳۸۵
۱۰-۲- تعریف پارامترهای خوردگی ۳۸۶
۱۰-۲-۱- دمای نقطه شبنم ۳۸۷
۱۰-۲-۲- فوگاسیته ۳۸۷
۱۰-۲-۳- هیدروکربن ۳۸۷
۱۰-۲-۴- کسر مولی ۳۸۷
۱۰-۲-۵- نفت ۳۸۷
۱۰-۲-۶- نرخ خوردگی پیش بینی‌شده ۳۸۸
۱۰-۲-۷- مخزن ۳۸۸
۱۰-۲-۸- نرخ خوردگی باقی‌مانده ۳۸۹
۱۰-۲-۹- وزن مخصوص ۳۸۹
۱۰-۲-۱۰- تر شدن سطوح با آب ۳۸۹
۱۰-۲-۱۱- سیستم‌های مایع و چند فازی ۳۹۰
۱۰-۲-۱۲- سیستم‌های گازی و گاز همراه با میعانات ۳۹۰
۱۰-۳- پارامترهای خوردگی ۳۹۱

۱۰-۳-۱- دما ۳۹۱
۱۰-۳-۲- فشار ۳۹۲
۱۰-۳-۳- برش آب ۳۹۲
۱۰-۴- انواع سیالات ۳۹۳
۱۰-۵- کارخانه‌های جمع‌آوری و فراورش گاز ۳۹۳
۱۰-۶- کارخانه‌های جمع‌آوری نفت و گاز ۳۹۳
۱۰-۷- کارخانه‌های فراورش نفت ۳۹۵
۱۰-۸- کارخانه‌های فراورش گاز ۳۹۶
۱۰-۹- مواد فلزی ۳۹۷
۱۰-۱۰- روش‌های کنترل خوردگی ۳۹۷
۱۰-۱۱- کلاس خورندگی سیستم‌های فرایندی مختلف ۳۹۷
۱۰-۱۱-۱- سیستمهای چند فازی و هیدروکربن‌های مایع (سیستم فرایندی نوع .I.L) ۳۹۸
۱۰-۱۱-۲- سیستم گازی همراه با میعانات گازی (سیستم فرایندی نوع .I.G) ۳۹۸
۱۰-۱۱-۳- گلایکول ۳۹۹
۱۰-۱۱-۴- آمین ۴۰۰
۱۰-۱۱-۴-۱- غلظت محلول آمین ۴۰۱
۱۰-۱۱-۴-۲- بارگیری گاز اسیدی ۴۰۱
۱۰-۱۱-۵- انواع آب‌ها ۴۰۱
۱۰-۱۱-۵-۱- خوردگی در آب‌های شیرین ۴۰۳
۱۰-۱۲- کارخانه‌های جمع‌آوری نفت و گاز ۴۰۸
۱۰-۱۲-۱- موارد عمومی ۴۰۸
۱۰-۱۲-۲- خطوط لوله جریانی نفت و خطوط چند فازی ۴۰۹
۱۰-۱۲-۳- خطوط لوله جریانی گاز ۴۱۱
۱۰-۱۲-۴- خط لوله جریانی آب همراه ۴۱۳
۱۰-۱۲-۵- تفکیک‌گر سرچاهی ۴۱۴
۱۰-۱۲-۶- خط لوله گلایکول ۴۱۴
۱۰-۱۲-۷- چند راهه‌ها ۴۱۴

۱۰-۱۲-۸- پیچ‌ها ۴۱۴
۱۰-۱۳- کارخانه‌های فراورش نفت ۴۱۵
۱۰-۱۳-۱- موارد عمومی ۴۱۵
۱۰-۱۳-۲- خطوط چند فازی بین چند راهه و تفکیک‌گر ۴۱۶
۱۰-۱۳-۳- مبدل‌های حرارتی ۴۱۶
۱۰-۱۳-۴- کولرهای هوایی ۴۱۸
۱۰-۱۳-۵- تفکیک‌گرها (یک، دو و سه فازی) ۴۱۸
۱۰-۱۳-۶- خطوط نفت مابین تفکیک‌گرها ۴۲۰
۱۰-۱۳-۷- خطوط جمع‌آوری گاز ۴۲۱
۱۰-۱۳-۸ خطوط آب همراه ۴۲۱
۱۰-۱۳-۹- تثبیت‌کننده ۴۲۳
۱۰-۱۳-۱۰- خطوط جریانی نفت ۴۲۳
۱۰-۱۳-۱۱- خطوط نفت ۴۲۴
۱۰-۱۴-۱- موارد عمومی ۴۲۴
۱۰-۱۴-۲- خطوط گاز اشباع از آب ۴۲۴
۱۰-۱۴-۳- کارخانه‌های تفکیک (جداسازی) ۴۲۵
۱۰-۱۴-۴- خطوط لوله جریانی آب همراه ۴۲۷
۱۰-۱۴-۵- خطوط میعانات گازی ۴۲۷
۱۰-۱۴-۶- پیش‌گرم‌کن‌های گاز مرطوب ۴۲۸
۱۰-۱۴-۷- برج‌های نم‌زدایی ۴۲۸
۱۰-۱۴-۸- خطوط گاز خشک ۴۲۸
۱۰-۱۴-۹- خطوط جمع‌آوری گاز بعد از افت فشار ۴۲۹
۱۰-۱۵- شیرها ۴۲۹
۱۰-۱۵-۱- علامت مشخصه ۴۲۹
۱۰-۱۵-۲- قطعات شیر ۴۳۰
۱۰-۱۶- پمپ ۴۳۲
۱۰-۱۶-۱- علامت مشخصه ۴۳۲

۱۰-۱۶-۲- قطعات پمپ ۴۳۳
۱۰-۱۷- سرویس‌های جانبی (غیرهیدروکربنی) ۴۳۶
۱۰-۱۸ - قوانین سرانگشتی در انتخاب مواد ۴۳۷
۱۰-۱۸-۱- تاسیسات پایین‌دستی ۴۳۷
۱۰-۱۸-۲- تاسیسات بالادستی ۴۳۹
۱۰-۱۹- انتخاب مواد در دمای پایین ۴۶۱
۱۰-۱۹-۱- تعیین حداقل دمای طراحی ۴۶۱
۱۰-۲۰- استفاده از تاسیسات قدیمی در طراحی تاسیسات جدید ۴۶۲
۱۰-۲۱- نقشه های انتخاب مواد ۴۶۲
فصل یازدهم – خوردگی در محیط‌های هیدروکربنی در دمای بالا ۴۶۵
۱۱-۱- مقدمه ۴۶۵
۱۱-۲- اکسیداسیون ۴۶۶
۱۱-۳- سولفیداسیون ۴۶۷
۱۱-۴- سولفیداسیون بدون حضور هیدروژن ۴۶۸
۱۱-۵- سولفیداسیون در حضور هیدروژن ۴۶۸
۱۱-۶- کربوره شدن ۴۶۹
۱۱-۷- دکربوره شدن ۴۷۰
۱۱-۸- نیتروره شدن ۴۷۱
۱۱-۹- خسارت‌های هیدروژنی دمای بالا ۴۷۲
فصل دوازدهم – طراحی برنامه‌های بازرسی فنی ۴۷۵
۱۲-۱- مقدمه ۴۷۵
۱۲-۲- هدف از انجام بازرسی فنی تجهیزات ۴۷۶
۱۲-۳- طراحی برنامه بازرسی ۴۷۶
۱۲-۳-۱- اطلاعات مورد نیاز برای طراحی برنامه بازرسی ۴۷۶
۱۲-۳-۲- شناسایی نوع خسارت‌ها و محل بروز آنها ۴۷۷
۱۲-۳-۳- انتخاب روش‌های مناسب برای انجام برنامه بازرسی ۴۸۱
۱۲-۴- روش تعیین دوره زمانی انجام برنامه‌های بازرسی ۴۸۳

فصل سیزدهم – اقتصاد مهندسی خوردگی ۴۹۹
۱۳-۱- مقدمه ۴۹۹
۱۳-۲- انواع هزینه‌های خوردگی ۵۰۰
۱۳-۳- معرفی روش‌های تجزیه و تحلیل هزینه های خوردگی ۵۰۲
۱۳-۳-۱- نرخ بازگشت سرمایه داخلی (IROR) ۵۰۳
۱۳-۳-۲- ارزش فعلی درآمد آتی (PWRR) ۵۰۳
۱۳-۳-۳- بازپرداخت تنزیل شده (DPB) و نسبت سود - هزینه (BCR) ۵۰۳
۱۳-۳-۴- ارزش فعلی (PW) یا ارزش خالص فعلی (NPV) ۵۰۴
فصل چهاردهم – مدیریت خوردگی ۵۰۵
۱۴-۱- مقدمه ۵۰۵
۱۴-۲- مفهوم مدیریت خوردگی ۵۰۶
۱۴-۳- فرایند مدیریت خوردگی ۵۰۸
۱۴-۴- نقش مهندس خوردگی در مدیریت خوردگی ۵۱۰
پیوست‌ها ۵۱۳
پیوست شماره ۱ ..... ۵۱۳
فولادهای دما پایین (LT) ۵۱۳
پیوست شماره ۲ ..... ۵۳۷
مواد فلزی – استانداردهای منتخب ۵۳۷
پیوست شماره ۳ ..... ۶۱۱
ایندکس مقاومت به خوردگی حفرهای آلیاژهای مقاوم به خوردگی ۶۱۱
واژهنامه فارسی انگلیسی ۶۱۹
تعاریف و اختصارات ۶۲۵
مراجع برای مطالعه بیشتر ۶۲۷
اطلس خوردگی ۶۳۷

مقدمه مولف

کشورمان، ایران، بر خلاف اینکه به عنوان اولین کشور دارنده مخازن نفت و گاز جهان شناخته می-شود، با رشد فزاینده مصرف و محدودیت تولید انرژی روبرو است. وابستگی ۷۰ درصدی بخش‌های مختلف مصرفی به گاز طبیعی از یکسو و افت فشار میادین اصلی تولید گاز از سوی دیگر، در کنار کسری منابع لازم در فرازآوری و توسعه میادین، کشور را با چالش‌های جدی روبرو ساخته است. بر اساس گزارش کمیسیون انرژی اتاق ایران، بیش از ۹۵ درصد سبد انرژی کشور از نفت و گاز تامین می‌گردد و در حال حاضر بیش از ۹۰ درصد صنایع و نیروگاه‌های کشور وابسته به نفت و گاز است. علاوه بر این، ۹۰ درصد محصولات کشور توسط بیش از ۲۰ هزار واحد صنعتی بزرگ و مهم تولید می‌گردد که همگی وابسته به این دو ماده حیاتی هستند. در واقع نفت و گاز، کالایی امنیتی، اقتصادی، رفاهی و اجتماعی محسوب می‌گردد و کاهش یا نوسان آن بحران‌های امنیتی و اجتماعی گسترده‌ای به همراه دارد؛ لذا موضوعاتی که به هر نحوی امنیت تولید، فرآورش و انتقال این مواد حیاتی و فرآورده-های آن را به خطر می‌اندازد به همان اندازه حیاطی است و آینده و رفاه فرزندان ما را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

سوای از مسائل مرتبط با ناترازی تولید و مصرف انرژی، افت فشار مخازن گازی موجود، خطوط لوله جریانی و انتقال نفت و گاز که نقش شریان‌های اصلی تولید و انتقال سیالات هیدروکربنی به تاسیسات فرآورشی را بازی می‌کنند، با مسائل پیچیده‌تر و جدیدتری روبرو ساخته که در طراحی و ساخت اولیه مطرح نبوده و در نظر گرفته نشده است.

عدم بررسی جامع ابعاد برجسته خوردگی، بالاخص در خصوص خوردگی خطوط لوله دریایی در مراجع رسمی در کنار تحریم‌های ظالمانه، اهمیت حفظ خطوط لوله موجود و به‌کارگیری علوم جدید در توسعه تاسیسات نفت و گاز، ضرورت بررسی، تدوین و انتشار نتایج تحقیقات بین‌المللی را بیش از پیش نمایان ساخته است و این انگیزه را برای مولف، ایجاد کرده است که جهت حفظ موقعیت کشور به عنوان دارنده گسترده‌ترین شبکه گازرسانی جهان و طولانی‌ترین شبکه خطوط لوله نفت و گاز در خاورمیانه، نقشی هر چند کوچک ایفاء نماید.

در همین ارتباط، کتاب **"خوردگی و انتخاب مواد در صنایع نفت و گاز"** با هدف تدوین تجارب مرتبط با موضوعات خوردگی و انتخاب مواد و ارائه آخرین دستاوردهای معتبر تهیه شده و در اختیار متخصصین این صنعت قرار گرفته است. موضوعات مطرح در این مجلد با محوریت خوردگی و انتخاب مواد تاسیسات بالادستی و میان‌دستی نفت و گاز شامل بررسی عوامل محیطی موثر بر یکپارچگی سیستم‌ها، تعیین محدوده‌های مجاز پارامترهای بهره‌برداری، معرفی مدل‌های مطرح در محاسبه نرخ خوردگی، مرور خسارت‌های ناشی از محیط‌های ترش و شیرین، ارزیابی مواد در محیط-های ترش، بررسی مشخصات ممانعت‌کننده‌های خوردگی، تعیین روش‌های نوین و متداول پایش و مدیریت خوردگی می‌باشد.

خوردگی نواحی تحتانی و فوقانی خطوط لوله سه‌فازی، بررسی مدل‌های مطرح و معیارهای به‌روز مورد استفاده در بررسی و ارزیابی استراتژی‌های کنترل خوردگی، هیدرات و رسوب‌گذاری خطوط لوله و در نهایت معرفی روش‌های مدیریت خوردگی این خطوط، از دیگر مباحث بااهمیتی است که با تکیه بر صدها منبع معتبر بررسی و تدوین شده است.

به دلیل گستردگی مباحث مرتبط با خوردگی و انتخاب مواد، موضوعات مرتبط با خوردگی در صنعت پالایش، مکانیزم‌های تخریب و محل بروز آنها در واحدهای پالایشگاهی در مجلد دیگری تحت عنوان **"خوردگی پیشرفته پالایشگاهی"** تدوین شده و در آینده نزدیک به چاپ خواهد رسید. بررسی موضوعات مرتبط با **"رنگ‌های صنعتی و پوشش‌های محافظ"** نیز در مجلد دیگری به همین نام تدوین و منتشر شده است که می‌تواند مورد استفاده متخصصین محترم صنایع نفت، گاز و پتروشیمی قرار گیرد.

اگرچه در گردآوری متون این کتاب نهایت تلاش به‌عمل آمده، به‌دلیل بضاعت ناچیز مولف، این مجموعه نمی‌تواند تمام الزامات و روش‌های مورد نیاز در ارزیابی خوردگی و انتخاب مواد در تمام شرایط را پوشش دهد. لذا مهندسین این حرفه باید علاوه‌بر اطلاعات ارائه شده، عوامل محیطی مختص هر پروژه را در ارزیابی‌ها مدنظر قرار دهند.

مطالب مطرح شده در این کتاب از مراجع معتبر داخلی و بین‌المللی انتخاب شده و مولف وظیفه خود می‌داند از کلیه محققین و اساتیدی که از نتایج تحقیقات آنها در تهیه این کتاب استفاده شده است، قدردانی نماید. همچنین از تمامی متخصصین و صاحب‌نظران آگاه و متعهدی که آرا، پیشنهادها و نظرهای اصلاحی و سازنده خویش را جهت تکمیل چاپ‌های آتی این کتاب ارائه می‌فرمایند، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌نماید.

محمدرضا قصابی

کارشناس مهندسی مواد و خوردگی

فصل اول

اصول خوردگی و انتخاب مواد در صنایع نفت و گاز

۱-۱- مقدمه

پدیده مخرب خوردگی دارای قدمت زیادی است و بشر همواره با مشکلات ناشی از آن سر و کار داشته است. اما برخورد علمی و مطالعه در این زمینه سابقه زیادی ندارد. شاید اولین سند مکتوب درباره زنگ‌زدگی مطالبی باشد که پلینی فیلسوف بزرگ یونانی درباره ادوات جنگی ساخته شده از آهن و زنگ‌زدگی آن در قرن نوزدهم برای امپراطور زمان خویش نگاشت.

در کشور ما در سال ۱۳۴۸ آموزش خوردگی به‌صورت درسی مستقل در دانشگاه صنعتی شریف آغاز گردید. در سال ۱۳۶۲ بعد از تشکیل ستاد انقلاب فرهنگی، تدریس خوردگی در برنامه درسی رشته‌های مهندسی شیمی و متالورژی دانشگاه‌ها گنجانده شد و در سال ۱۳۷۱ انجمن ملی خوردگی ایران با همکاری متخصصین خبره و اساتید دانشگاه با هدف ارتقاء سطح دانش مهندسی خوردگی تاسیس گردید.

۱-۲- عوامل کلی تخریب

عوامل مختلف موثر بر تخریب‌های ناشی از خوردگی در صنعت را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱-۲-۱- پارامترهای مهندسی

عوامل مهندسی شامل طراحی، انتخاب مواد و فرایند نادرست بیشترین سهم را در ایجاد تخریب دارند. موارد مهم طراحی عبارتند از:

- انتخاب صحیح تکنیک‌های فرایندی مورد نیاز در کنترل نرخ خوردگی (تزریق مواد بازدارنده، تثبیت pH و ...)؛
- انتخاب مواد صحیح با توجه به شرایط محیطی، مشخصات مکانیکی، ترکیب شیمیایی و تکنولوژیکی مواد؛
- تعیین صحیح مشخصات ابعادی و ضخامت با توجه به متغیرهایی مانند فشار و دمای طراحی.

۱-۲-۲- پارامترهای غیرمهندسی

۱-۲-۲-۱- فقدان دستورالعمل‌های لازم

فقدان دستورالعمل‌های مشخص و یا به‌کارگیری دستورالعمل‌های نادرست یا ناقص، باعث سردرگمی در انجام فعالیت‌ها و یا انجام ضعیف کارهای اجرایی می‌گردد. دستورالعمل‌هایی که می‌بایست بعد از مراحل طراحی تهیه و تصویب شده و سپس مورد استفاده قرار گیرند عبارتند از:

- دستورالعمل‌های نصب صحیح؛
- دستورالعمل‌های تعمیر و نگهداری؛
- دستورالعمل‌های بهره‌برداری و فرایندی.

۱-۲-۲-۲- خطای انسانی

خطای انسانی در تمام مراحل از جمله طراحی، خرید، ساخت، نصب، تعمیر، نگهداری و بازرسی فنی تاثیرگذار است. بیشترین سهم خطای انسانی در مرحله نصب، تعمیر و نگهداری رخ می‌دهد که گاهی ناخواسته صورت می‌گیرد و گاهی نتیجه استفاده از نیروی انسانی بی‌تجربه و یا غیرمتخصص است. در این ارتباط خطای بهره‌برداری و فرایندی را نبایستی فراموش کرد.

۱-۲-۲-۳- بازرسی ضعیف

عدم شناسایی نوع خسارت‌ها، محل بروز آنها، عدم‌دسترسی به اطلاعات مربوط به طراحی و ساخت تجهیزات و سامانه‌ها، عدم اطلاع از ترکیب شیمیایی سیال و همچنین عدم‌دسترسی به تاریخچه عملیاتی تجهیزات، همه و همه از عواملی هستند که می‌توانند منجر به انتخاب روش‌های نادرست برای انجام برنامه‌های بازرسی گردند.

۱-۲-۲-۴- چیدمان، نصب و هماهنگی ضعیف

گاهی با وجود دستورالعمل‌های مناسب ساخت و نصب، به‌دلیل عدم مهارت نیروی انسانی و هماهنگی ضعیف در مدیریت فعالیت‌های مرتبط با ساخت و نصب ادوات و تجهیزات فرایندی، مشکلات خوردگی در مراحل بعدی تشدید می‌گردد.

۱-۲-۲-۵- بروز موارد ناخواسته

تغییر شرایط طراحی و عملیاتی و شرایط محیطی ناشی از طبیعت دینامیک سیستم‌های تولید و فراورش نفت و گاز از مشکلات پیش‌رو در طرح‌های مختلف بوده است.

۱-۲-۲-۶- سایر موارد

مواردی نظیر سرعت سیال، تخریب پوشش یا آب‌بندی، عایق‌کاری و ... در بروز خسارت‌های خوردگی نقش چشم‌گیری دارند. میزان تاثیر عوامل مختلف در تخریب‌های ناشی از خوردگی، در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.

جدول ۱-۱- میزان تاثیر عوامل مختلف در تخریب‌های ناشی از خوردگی.

عامل تاثیرگذار در تخریب	درصد تاثیر در تخریب
طراحی، انتخاب مواد و فرایند	۳۶
فقدان دستورالعمل‌های لازم	۱۶
خطای انسانی	۱۲
بازرسی ضعیف	۱۰
چیدمان، نصب و هماهنگی ضعیف	۱۴
بروز موارد ناخواسته	۸
سایر موارد	۴

۱-۳- شرایط اقلیمی ایران

با توجه به شرایط اقلیمی و تنوع شرایط آب و هوایی در ایران، مناطق خورنده زیادی در کشور وجود دارد. آب خلیج همیشه فارس و دریای عمان، از خورنده‌ترین آب‌های دنیا محسوب می‌گردند و تجهیزاتی که در این نواحی مورد استفاده قرار می‌گیرد تحت تاثیر مکانیزم‌های مخرب و شرایط خوردگی شدیدی قرار دارند. بنابراین مسائل مرتبط با مهندسی و مدیریت خوردگی در تاسیسات نفت و گاز کشور از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

۱-۴- انواع خوردگی در صنایع نفت و گاز

به‌منظور درک بیشتر مهندسین خوردگی و طراح، انواع مختلف خوردگی به دو گروه اصلی و فرعی تقسیم شده‌اند. انواع اصلی عبارتند از؛ خوردگی عمومی، خوردگی حفره‌ای، خوردگی مرزدانه‌ای، خوردگی انتخابی و خوردگی تنشی.

انواع فرعی، که تحت تاثیر طراحی قرار دارند، عبارتند از؛ خوردگی شکافی، خوردگی گالوانیک، خوردگی سایشی، خوردگی فرسایشی، خوردگی خستگی. در ادامه انواع رایج‌تر خوردگی در صنایع تولید و اکتشاف نفت[۱] به صورت مختصر مرور می‌گردد.

---

۱ Exploration and Production (E&P)

۱-۴-۱- خوردگی یکنواخت

خوردگی یکنواخت متداول‌ترین شکل خوردگی است و مشخصه آن واکنشی شیمیایی یا الکتروشیمیایی است که به‌طور یکنواخت در کل سطح اتفاق می‌افتد. در این نوع خوردگی، ضخامت مواد به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد و از نظر تناژ مهمترین نوع خوردگی است. خوردگی یکنواخت به‌آسانی قابل اندازه‌گیری و پیش‌بینی است و به‌ندرت منجر به شکست‌های خطرناک می‌شود. خرابی سیستم‌های پوششی اغلب باعث این خوردگی می‌شود. این نوع خوردگی، از نظر فنی تهدید بزرگی تلقی نمی‌شود؛ زیرا طول عمر تجهیزات را می‌توان با غوطه‌وری نمونه شاهد فلزی در محیط خورنده و محاسبه خوردگی آن، برآورد نمود. اطلاعات حاصل از سرعت خوردگی می‌تواند پس از آن، در طراحی تجهیزات مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب مواد، استفاده از پوشش‌های مناسب، به کارگیری ممانعت‌کننده‌ها و استفاده از حفاظت کاتدی بخشی از روش‌های جلوگیری از این نوع خوردگی محسوب می‌گردند.

۱-۴-۲- حفره‌دار شدن

خوردگی حفره‌ای، گونه‌ای از حمله موضعی است که باعث سوراخ‌شدگی موضعی فلز می‌شود و یکی از مخرب‌ترین و خطرناک‌ترین انواع خوردگی به‌شمار می‌رود.

دوره شروع حفره‌دار شدن معمولا طولانی است و بین ماه‌ها و سال‌ها طول می‌کشد. ولی به محض اینکه شروع شد با سرعت دائما فزاینده‌ای به داخل نفوذ می‌کند. حفره‌ها در موقع رشد تمایل به خالی کردن زیر سطح فلز[۱] دارند.

حفره‌دار شدن معمولا به‌همراه محیط خورنده ساکن و مرده مثل مایع درون یک تانک یا مایع جمع شده در قسمت غیرفعال سیستم لوله‌کشی اتفاق می‌افتد. افزایش سرعت حرکت محیط خورنده غالبا این خوردگی را تقلیل می‌دهد. pH پایین و غلظت بالای یون کلرید درون حفره منجر به بیشتر شدن سرعت خوردگی می‌گردد. در بین آلیاژها، فولادهای زنگ‌نزن برای حفره‌دار شدن مستعدتر از بقیه می-

۱ Undercut

باشند. افزودن مولیبدن به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، مقاومت آن در برابر خوردگی حفره‌ای را بهبود می‌بخشد. مقاومت برخی مواد مصرفی متداول در برابر حفره‌دار شدن به این ترتیب خواهد بود:

فولاد زنگ‌نزن نوع ۳۰۴ < فولاد زنگ‌نزن نوع ۳۱۶ < هستلوی F < هستلوی C < تیتانیم

در محاسبه عمر تجهیزات در آزمون‌ها، عمر عمیق‌ترین حفره (که زودتر موجب از کار افتادن سیستم می‌شود) معیار تعیین عمر خوردگی است. استانداردهای ASTM G46 [93] و ASTM [94] G48 به ترتیب به منظور بررسی و ارزیابی خوردگی حفره‌ای و ارزیابی مقاومت فولادهای زنگ‌نزن در برابر خوردگی‌های موضعی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

استفاده از روش جوشکاری به جای اتصالات پیچ و مهره‌ای، تخلیه کامل مخازن و تانک‌ها، بازرسی دوره‌ای و تمیزکاری رسوبات، حذف مواد جامد و فیلتراسیون مناسب سیال در نقاط ورودی و در نهایت جلوگیری از توقف طولانی‌مدت فعالیت تجهیزات مستعد به این نوع خوردگی از روش‌های جلوگیری از این پدیده محسوب می‌گردند.

۱-۴-۳- خوردگی بین‌دانه‌ای

مرزدانه‌ها در آلیاژها و فلزات به‌دلیل آرایش اتم‌ها از پتانسیل بالاتری برای خورده‌شدن برخوردار بوده و نسبت به خود دانه حساس‌تر هستند. خوردگی بین دانه‌ای می‌تواند به‌دلیل ناخالصی‌های موجود در مرزدانه‌ها، غنای یکی از عناصر موجود در آلیاژ و یا نبود یکی از این عناصر در سطح مرزدانه باشد. شکست‌های زیادی در فولاد زنگ‌نزن (۱۸-۸)، به خوردگی بین‌دانه‌ای نسبت داده شده است. فولادهای مذکور، موقعی که تا دمای ۹۵۰-۱۴۵۰°F حرارت داده می‌شوند، آماده‌ی پذیرش خوردگی بین‌دانه‌ای می‌گردند. این شکل حمله، به از دست رفتن کروم در موقعیت مرزدانه نسبت داده شده است. خوردگی بین‌دانه‌ای در فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی را می‌توان از طریق گرم و سرد نمودن سریع فلز یا افزودن کاربید فلزات مقاومی نظیر نیوبیوم یا تانتالیوم یا از طریق کاهش کربن موجود به کمتر از ۰/۰۳٪، کنترل نموده یا به حداقل رساند. آلیاژ را می‌توان تا ۱۹۵۰-۲۰۵۰°F حرارت داد و متعاقبا آن را به وسیله آب، خنک نمود. این بهینه‌سازی باعث انحلال کاربید کروم و تولید آلیاژی یکنواخت‌تر می‌گردد.

کاهش کربن فولادهای زنگ‌نزن و افزودن عناصر آلیاژی مناسب نظیر کلمبیوم (Cb) و تانتال (Ta) می‌تواند از بروز این نوع خوردگی جلوگیری کند.

۱-۴-۴- خوردگی سایشی[۱]

این خوردگی در اثر حرکت نسبی بین یک مایع خورنده و سطح فلز ایجاد شده و افزایش سرعت سیال خورنده باعث تسریع در سرعت خوردگی می‌گردد. در این نوع خوردگی، محصولات جامد حاصل از حرکت سیال به طریق مکانیکی از سطح فلز کنده می‌شود. این خوردگی دارای ظاهری شیاردار، موجی شکل، سوراخ‌های کروی شکل و ناهموار می‌باشد که معمولا این اشکال در جهت خاصی قرار گرفته‌اند.

کلیه تجهیزاتی که در تماس با مایعات متحرک می‌باشند در معرض خوردگی سایشی قرار دارند. این سیستم‌ها عبارتند از: سامانه‌های لوله‌کشی به‌خصوص زانویی‌ها، پیچ و خم‌ها، سه‌راه‌ها، شیرها، پمپ‌های دمنده، پروانه‌ها[۲] ، همزن‌ها[۳]، و تانک‌های متحرک، لوله‌های مبدل‌های حرارتی، بویلرها، خنک‌کننده‌ها، دودکش‌ها و دستگاه‌های تصفیه گاز[۴].

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به‌دلیل ایجاد پوسته مقاوم به خوردگی در سطح آنها، نسبت به خوردگی یکنواخت مقاوم بوده ولی در برابر خوردگی سایشی ضعیف هستند (پوسته مقاوم در خوردگی سایشی برداشته می‌شود).

خوردگی سایشی ناشی از ضربات سیال یا کلرید در سطح لوله در نواحی با سرعت سیلان بالا ایجاد می‌گردد. برای جلوگیری از این نوع خوردگی، باید سرعت سیلان را کمتر از حد بحرانی کنترل نمود. سرعت بحرانی سرعتی است که در این سرعت بازدارنده‌ها از روی سطح لوله زدوده می‌شوند.

برخی عوامل دخیل در خوردگی سایشی شامل ماهیت لایه‌های سطحی روی سطح فلز، سرعت سیال در حال حرکت، میزان تلاطم جریان مایع، میزان برخورد سیال با سطوح، اثر گالوانیکی، ترکیب

---

۱ Corrosion-Erosion
۲ Impellers
۳ Agitators
٤ Scrubber

شیمیایی، سختی، مقاومت در برابر خوردگی و سابقه‌ی متالورژیکی فلز و آلیاژ می‌باشند. در بین آلیاژهای موجود، در محیط‌های متعدد، تیتانیم بیشترین مقاومت در برابر خوردگی سایشی را از خود نشان داده است که این امر به‌دلیل پایداری اکسید تیتانیم (TiO_2) ایجاد شده بر روی سطح این فلز است. فلزات نادر به‌طور ذاتی در برابر این نوع خوردگی مقاوم هستند. در شرایطی که تمامی عوامل دیگر با هم معادل باشند، ۸۰/۲۰ : Ni/Cr قابلیت بهتری نسبت به ۸۰/۲۰ : Fe/Cr از خود نشان خواهد داد؛ زیرا نیکل، به‌طور ذاتی از مقاومت بهتری نسبت به آهن برخوردار است. افزایش یک فلز سوم نظیر آهن به کوپرونیکل، موجب افزایش قابل توجه میزان مقاومت در برابر خوردگی سایشی این آلیاژ در مقابل آب دریا می‌گردد. افزایش کروم تا ٪۱۳ به فولاد و آلیاژهای آهن نیز موجب افزایش مقاومت در برابر خوردگی سایشی در آب‌های معدنی اسیدی شده است.

کاربرد مواد مقاوم‌تر، تغییر طراحی، تغییر در محیط خورنده (هوازدایی و افزودن ممانعت‌کننده)، کاربرد پوشش‌های مناسب و در نهایت حفاظت کاتدی روش‌های مناسبی برای جلوگیری از این نوع خوردگی محسوب می‌گردند.

۱-۴-۵- خوردگی گالوانیک

خوردگی گالوانیک زمانی روی می‌دهد که میان دو فلز نامشابه در یک محلول خورنده اختلاف پتانسیل برقرار گردد. اختلاف پتانسیل میان دو فلز، جریانی از الکترون ایجاد می‌نماید. فلزی که در برابر خوردگی از مقاومت کمتری برخوردار است، آند شده و فلز مقاوم‌تر، کاتد می‌گردد. به‌طورکلی این نوع خوردگی در محل اتصال دو فلز نامشابه، بیشتر ملاحظه می‌شود و شدت حمله با افزایش فاصله از محل اتصال، کاهش می‌یابد. تاثیر فاصله، به میزان هدایت الکتریکی محلول بستگی دارد. در این نوع خوردگی، نسبت مساحت کاتد به آند، عامل مهمی است. منطقه کاتدی با مساحت زیاد و منطقه آندی با مساحت کوچک، خوردگی گالوانیکی شدیدی ایجاد می‌کند.

استفاده از فلزات با سطح الکتریکی نزدیک به هم، اجتناب از سطح نامطلوب آند به کاتد، تعمیر پوشش نواحی آندی، استفاده از ممانعت‌کننده‌های خوردگی، طراحی مناسب قسمت‌های آندی (قابل تعویض)، ایزوله‌کرن قسمت‌های غیرهم‌جنس از یکدیگر، پرهیز از ایجاد اتصالات پیچ و مهره‌ای میان

دو فلز نامتشابه، استفاده از فلز سوم به عنوان آند بین دو فلز غیر همجنس روش‌های مناسبی برای جلوگیری از این نوع خوردگی محسوب می‌گردند.

۱-۴-۶- خوردگی توام با تنش

ترک خوردگی تنشی[۱] ناشی از عملکرد همزمان تنش‌های کششی و محیط خورنده روی آلیاژ یا فلز است. شکست‌های ترد ناشی از مواد قلیایی که به تردی بازی معروف است نمونه‌ای از این تخریب‌ها است. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی در محیط‌های کلردار ترک می‌خورند ولی در محیط‌های حاوی آمونیاک ترک نخواهند خورد. فاکتورهای مهم در ایجاد ترک خوردگی تنشی، درجه حرارت، ترکیب شیمیایی محلول، ترکیب شیمیایی فلز، میزان تنش و ساختار آلیاژها هستند. در ترک خوردگی تنشی هر دو نوع ترک بین‌دانه‌ای و میان‌دانه‌ای مشاهده می‌گردد. همچنین با افزایش درجه حرارت، شدت خوردگی افزایش می‌یابد. در فولادهای زنگ‌نزن با افزایش درصد فریت در ساختار متالورژیکی فلز، مقاومت به ترک خوردگی تنشی افزایش می‌یابد. مناطق فریتی در زمینه آستنیتی مانع پیش‌روی ترک‌ها می‌گردد.

کاهش سطح تنش به زیر حد مجاز، حذف ناخالصی‌های مضر محیط مثل گاززدایی، دمینراله کردن یا تقطیر نمودن، تغییر جنس آلیاژ (انتخاب مواد مناسب) و حفاظت کاتدی روش‌های مناسبی برای مقابله با این نوع خوردگی محسوب می‌گردند.

خوردگی تنشی و تردی ناشی از محیط از خطرناکترین شکل‌های شکست در قطعات می‌باشند؛ چراکه تمایل زیادی به شکست ناگهانی بدون هشدار دارند. در این حالت‌ها، هیچ‌گونه فیلم اکسیدی و اضمحلال قطعه در اثر خوردگی مشاهده نمی‌شود و ترک‌های عرضی در ضخامت قطعه می‌توانند در عرض یک تا دو ساعت پس از قرار گرفتن در محیط تردکننده به وجود آیند. خوردگی تنشی معمولا در محیط کلریدها، بازها، آمونیاک، آمین‌ها و اسید پلی‌تیونیک رخ می‌دهد.

کلریدها، معمول‌ترین محیط‌های خوردگی تنشی برای فولاد زنگ نزن آستنیتی و آلیاژهای پایه نیکل می‌باشند. برای بروز این‌گونه ترک‌ها، حضور یون کلر، آب و تنش‌های کششی اعمالی یا پسماند

---

۱ Stress Corrosion Cracking (SCC)