



خوردگی فلزات

(رشته شیمی)

دکتر حسن کرمی دکتر شهرام قاسمی میر

بسم الله الرحمن الرحيم

پیشگفتار ناشر

کتاب‌های دانشگاه پیام نور حسب مورد و با توجه به شرایط مختلف یک درس در یک یا چند رشته دانشگاهی، به صورت کتاب درسی، متن آزمایشگاهی، فرادرسی، و کمک درسی چاپ می‌شوند.

کتاب درسی ثمره کوشش‌های علمی صاحب اثر است که براساس نیازهای درسی دانشجویان و سرفصل‌های مصوب تهیه و پس از داوری علمی، طراحی آموزشی، و ویرایش علمی در گروه‌های علمی و آموزشی، به چاپ می‌رسد. پس از چاپ ویرایش اول اثر، با نظرخواهی‌ها و داوری علمی مجدد و با دریافت نظرهای اصلاحی و متناسب با پیشرفت علوم و فناوری، صاحب اثر در کتاب تجدیدنظر می‌کند و ویرایش جدید کتاب با اعمال ویرایش زبانی و صوری جدید چاپ می‌شود.

متن آزمایشگاهی (م) راهنمایی است که دانشجویان با استفاده از آن و کمک استاد، کارهای عملی و آزمایشگاهی را انجام می‌دهند.

کتاب‌های فرادرسی (ف) و **کمک درسی** (ک) به منظور غنی‌تر کردن منابع درسی دانشگاهی تهیه و بر روی لوح فشرده تکثیر می‌شوند و یا در وبگاه دانشگاه قرار می‌گیرند.

مدیریت تولید محتوا و تجهیزات آموزشی

فهرست

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۳	۱-۱ عوامل مؤثر بر خوردگی
۴	۲-۱ خسارات ناشی از خوردگی
۵	۳-۱ انواع خوردگی
۱۴	۴-۱ راه‌های جلوگیری از خوردگی
۱۶	پرسش‌های پایان فصل
۱۷	فصل دوم: مبانی الکتروشیمی خوردگی
۱۷	۱-۲ تعادلات شیمیایی
۲۰	۲-۲ سلول الکتروشیمیایی و اجزای آن
۲۵	۳-۲ تعادلات الکتروشیمیایی و پتانسیل الکترودی
۳۵	۴-۲ الکترودهای مرجع
۴۰	۵-۲ ارتباط پتانسیل سلول با خوردگی
۴۴	۶-۲ دیاگرام‌های پوربه
۵۱	پرسش‌های پایان فصل
۵۵	فصل سوم: سینتیک خوردگی
۵۸	۱-۳ مفهوم سینتیک در واکنش‌های الکتروشیمیایی
۶۰	۲-۳ واکنش‌های برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر
۶۳	۳-۳ محاسبه‌ی چگالی جریان
۶۵	۱-۳-۳ چگالی جریان نیم واکنش کاتدی (احیایی)
۶۶	۲-۳-۳ چگالی جریان نیم واکنش آندی (اکسایش)
۶۷	۳-۳-۳ واکنش‌های غیرتعادلی
۶۹	۴-۳ قطبش فعال‌سازی

۷۷	۵-۳ تئوری پتانسیل مختلط
۸۱	۱-۵-۳ نمودارهای ایوانس
۸۳	۲-۵-۳ کاربرد نمودارهای ایوانس
۹۱	۳-۵-۳ منحنی قطبش غیرخطی
۹۴	۴-۵-۳ کاربرد تئوری پتانسیل مختلط
۹۴	۱-۴-۵-۳ اثر یک اکسید کننده
۹۷	۲-۴-۵-۳ پیش‌بینی تمایل به خوردگی
۹۹	۳-۴-۵-۳ اثر جفت شدن گالوانیکی
۱۰۰	۵-۵-۳ سرعت خوردگی
۱۱۵	۶-۳ خلاصه‌ی روابط مهم مسائل سینتیک خوردگی
۱۱۷	پرسش‌های پایان فصل

فصل چهارم: محیط‌های خوردگی

۱۲۱	۱-۴ آب
۱۲۱	۱-۱-۴ آب شیرین
۱۳۳	۲-۱-۴ آب دریا
۱۳۷	۳-۱-۴ آب در نیروگاه‌های بخار
۱۳۸	۲-۴ خاک
۱۳۸	۱-۲-۴ طبیعت خاک
۱۳۹	۲-۲-۴ مکانسیم خوردگی در خاک
۱۴۲	۳-۴ اتمسفر
۱۴۳	۱-۳-۴ طبقه‌بندی خوردگی اتمسفری
۱۴۴	۲-۳-۴ طبقه‌بندی اتمسفرها بر حسب شدت خوردندگی آنها
۱۴۵	۳-۳-۴ اثر عوامل مختلف بر خوردگی اتمسفری
۱۵۱	۴-۳-۴ سرعت خوردگی اتمسفری
۱۵۲	۴-۴ گازهای خشک
۱۵۳	۱-۴-۴ مکانسیم واکنش خوردگی در گازهای خشک
۱۵۶	۲-۴-۴ ماهیت الکتروشیمیایی واکنش‌های اکسایشی در گازهای خشک
۱۵۹	۳-۴-۴ اقدامات حفاظتی برای خوردگی دمای بالا
۱۶۰	پرسش‌های پایان فصل

۱۶۳	فصل پنجم: آزمایشات خوردگی
۱۶۷	۱-۵ اقدامات مهم مرتبط با آزمون‌های خوردگی
۱۶۷	۱-۱-۵ آماده‌سازی نمونه‌ها
۱۶۹	۲-۱-۵ هوادهی
۱۷۰	۳-۱-۵ تمیز کردن نمونه‌ها بعد از آزمایش
۱۷۱	۴-۱-۵ تنظیم درجه‌ی حرارت
۱۷۲	۲-۵ آزمایشات تسریع شده
۱۷۲	۱-۲-۵ آزمون پاشش آب نمک و مه آب نمک
۱۷۵	۲-۲-۵ آزمون غوطه‌وری یا کاهش وزن
۱۷۵	۳-۵ آزمون‌های ویژه
۱۷۵	۱-۳-۵ آزمون‌های رطوبتی
۱۷۶	۲-۳-۵ آزمون کوپن
۱۷۷	۳-۳-۵ آزمون خوردگی همراه با تنش
۱۷۸	۴-۳-۵ آزمایش هیوبی
۱۷۸	۵-۳-۵ آزمایش وارن
۱۷۹	۶-۳-۵ آزمایش استراس
۱۷۹	۷-۳-۵ آزمایش استریچر
۱۸۰	۴-۵ آزمون‌های الکتروشیمیایی خوردگی
۱۸۲	۱-۴-۵ تجهیزات آزمایشات الکتروشیمیایی
۱۸۴	۲-۴-۵ آزمون‌های ترمودینامیکی
۱۸۴	۱-۲-۴-۵ آزمون نیروی محرکه‌ی پیل گالوانیکی
۱۸۴	۲-۲-۴-۵ آزمون پیل غلظتی
۱۸۵	۳-۴-۵ آزمون‌های سینتیکی
۱۸۵	۱-۳-۴-۵ قطبش پتانسیودینامیک برای اندازه‌گیری سرعت خوردگی به روش برونیایی تافل
۱۹۰	۲-۳-۴-۵ اندازه‌گیری مقاومت قطبشی
۱۹۶	۳-۳-۴-۵ قطبش پتانسیواستاتیک
۱۹۶	۴-۳-۴-۵ قطبش پتانسیودینامیک چرخه‌ای
۱۹۷	۴-۴-۵ سایر روش‌های الکتروشیمیایی
۱۹۷	پرسش‌های پایان فصل

۲۰۱	فصل ششم: راه‌های جلوگیری از خوردگی
۲۰۱	۱-۶ پوشش‌های محافظ
۲۰۲	۱-۱-۶ پوشش‌های معدنی یا پوشش‌های تبدیلی
۲۰۲	۱-۱-۱-۶ پوشش‌های تبدیلی فسفاتی
۲۰۴	۲-۱-۱-۶ پوشش‌های تبدیلی کروماتی
۲۰۵	۳-۱-۱-۶ پوشش‌های حاصل از آندایز کردن فلزات
۲۰۶	۲-۱-۶ حفاظت خوردگی با پوشش‌های فلزی
۲۰۷	۱-۲-۱-۶ روش‌های تهیه پوشش فلزی
۲۱۲	۲-۲-۱-۶ مکانسیم حفاظت در برابر خوردگی
۲۱۲	۳-۱-۶ پوشش‌های آلی
۲۱۶	۲-۶ حفاظت الکتروشیمیایی
۲۱۶	۱-۲-۶ حفاظت کاتدی و انواع آن
۲۱۶	۱-۱-۲-۶ حفاظت کاتدی گالوانیکی
۲۱۸	۲-۱-۲-۶ حفاظت کاتدی الکترولیزی (تکنیک جریان اعمالی)
۲۲۰	۳-۱-۲-۶ اصول الکتروشیمیایی حفاظت کاتدی
۲۲۴	۴-۱-۲-۶ جریان‌های سرگردان
۲۲۶	۵-۱-۲-۶ الکتروود مرجع برای حفاظت کاتدی
۲۲۶	۶-۱-۲-۶ معیار در حفاظت کاتدی
۲۲۷	۲-۲-۶ حفاظت آندی
۲۲۹	۱-۲-۲-۶ اصول الکتروشیمیایی حفاظت آندی
۲۳۱	۲-۲-۲-۶ مثال‌هایی برای حفاظت آندی
۲۳۴	۳-۲-۲-۶ تجهیزات مورد استفاده برای حفاظت آندی
۲۳۵	۳-۲-۶ مقایسه‌ی حفاظت کاتدی و آندی
۲۳۶	۳-۶ بازدارنده‌های خوردگی
۲۳۷	۱-۳-۶ طبقه‌بندی بازدارنده‌ها
۲۳۸	۱-۱-۳-۶ بازدارنده‌های آندی
۲۳۹	۲-۱-۳-۶ بازدارنده‌های کاتدی
۲۴۰	۳-۱-۳-۶ بازدارنده‌های مخلوط
۲۴۰	۴-۱-۳-۶ بازدارنده‌های غیرفعال کننده
۲۴۲	۵-۱-۳-۶ بازدارنده‌های فاز بخار

۲۴۲	۶-۳-۲ کارآیی بازدارنده
۲۴۳	۶-۴ انتخاب آلیاژ مقاوم در برابر خوردگی
۲۴۴	۶-۴-۱ آلیاژهای آلومینیم
۲۴۴	۶-۴-۲ چدن‌ها
۲۴۶	۶-۴-۳ مس و آلیاژهای آن
۲۴۸	۶-۴-۴ تیتانیم و آلیاژهای آن
۲۵۰	۶-۴-۵ فولاد زنگ نزن
۲۵۲	۶-۴-۵-۱ خوردگی فولادهای زنگ نزن در محیط‌های اسیدی
۲۵۳	۶-۴-۵-۲ خوردگی فولادهای زنگ نزن در محیط قلیایی و خشتی
۲۵۴	۶-۴-۶ نیکل و آلیاژهای آن
۲۵۶	۶-۴-۶-۱ آلیاژهای نیکل - مس
۲۵۶	۶-۴-۶-۲ آلیاژهای نیکل - کروم - آهن
۲۵۶	۶-۴-۶-۳ آلیاژهای نیکل - آهن - کروم
۲۵۶	۶-۴-۶-۴ آلیاژهای نیکل - کروم - مولیبدن
۲۵۷	پرسش‌های پایان فصل

۲۶۱	فصل هفتم: خوردگی در صنایع
۲۶۲	۷-۱ خوردگی در چاه‌های نفت و گاز و راه‌های حفاظت از آنها
۲۶۳	۷-۱-۱ لوله‌های حفاری چاه نفت
۲۶۳	۷-۱-۲ تجهیزات تزریق آب
۲۶۴	۷-۱-۳ تجهیزات سر چاه
۲۶۴	۷-۱-۴ تجهیزات و سکوها دریایی
۲۶۸	۷-۲ خوردگی در پالایشگاه نفت خام
۲۷۴	۷-۲-۱ کنترل خوردگی در پالایشگاه و پتروشیمی
۲۷۴	۷-۲-۱-۱ کنترل خوردگی در واحد تقطیر نفت خام
۲۷۷	۷-۲-۱-۲ کنترل خوردگی در لوله‌ها و سایر تجهیزات
۲۷۸	۷-۲-۱-۳ استفاده از آلیاژهای مقاوم به خوردگی
۲۷۹	۷-۲-۱-۴ بازدارنده‌های فیلم‌ساز
۲۸۰	۷-۲-۱-۵ پوشش‌های محافظ

۲۸۱	۳-۷ خوردگی در دیگ‌های بخار
۲۸۴	۱-۳-۷ انواع خوردگی در دیگ‌های بخار
۲۸۴	۱-۳-۷ خوردگی حفره‌دار شدن (ناشی از اکسیژن)
۲۸۶	۲-۱-۳-۷ خوردگی قلیایی
۲۸۷	۳-۱-۳-۷ آسیب‌های هیدروژنی
۲۸۸	۴-۱-۳-۷ خوردگی توأم با تنش
۲۸۸	۲-۳-۷ خوردگی در میرد
۲۹۱	۳-۳-۷ خوردگی در پیش گرم کن آب ورودی به دیگ بخار
۲۹۲	۴-۳-۷ جلوگیری از خوردگی در دیگ‌های بخار
۲۹۶	۴-۷ خوردگی در توربین‌ها
۲۹۶	۱-۴-۷ خوردگی در توربین‌های بخار
۲۹۷	۲-۴-۷ خوردگی در توربین‌های گازی
۲۹۹	۵-۷ خطوط لوله
۳۰۰	۱-۵-۷ کنترل خوردگی در خطوط لوله
۳۰۰	۱-۱-۵-۷ آلیاژهای مقاوم به خوردگی
۳۰۰	۲-۱-۵-۷ بازدارنده‌های خوردگی
۳۰۱	۳-۱-۵-۷ میزان مجاز خوردگی
۳۰۲	۴-۱-۵-۷ حفاظت کاتدی
۳۰۳	۵-۱-۵-۷ طراحی حفاظت کاتدی
۳۰۳	۶-۱-۵-۷ پوشش‌ها
۳۰۵	۶-۷ خوردگی دریایی
۳۰۷	پرسش‌های پایان فصل
۳۰۸	مراجع

پیش گفتار مؤلف

بی شک خوردگی یکی از پدیده‌های طبیعی مخرب می‌باشد که سالیانه بشر هزینه‌های گزافی صرف جلوگیری از آن و هزینه بیشتری را صرف تعمیر و جایگزینی ماشین‌آلات، ابزار و وسایل آسیب دیده‌ی ناشی از خوردگی می‌نماید. خوردگی می‌تواند در تمام سامانه‌ها رخ دهد ولی خوردگی در سامانه‌های فلزی بسیار چشمگیرتر و پرهزینه‌تر از سایر موارد است. از طرف دیگر، بخش عمده‌ی خوردگی فلز یا آلیاژهای فلزی از طریق فرآیندهای الکتروشیمیایی صورت می‌گیرد. به همین دلیل در این کتاب سعی شده است که بخش‌های اصلی کتاب به خوردگی فلزات به ویژه خوردگی الکتروشیمیایی فلزات اختصاص داده شود. در فصل اول به منظور آشنایی دانشجویان با مفاهیم کلی خوردگی، به صورت اختصار به انواع خوردگی و راه‌های مقابله با آن‌ها اشاره شده است. در فصل دوم برای ایجاد آمادگی دانشجویان برای ورود به مبحث خوردگی فلزات، مبانی الکتروشیمی مورد نیاز برای مباحث خوردگی ارائه شده است. در فصل‌های بعدی کتاب به سینتیک خوردگی، آزمایشات خوردگی، خوردگی در محیط‌های مختلف، راه‌های مختلف جلوگیری از خوردگی و خوردگی در صنایع اشاره می‌شود. با توجه به اینکه کتاب حاضر به عنوان کتاب آموزشی برای دانشجویان مقطع کارشناسی رشته شیمی کاربردی تألیف شده است، لذا در ارائه مطالب سعی شده است که بیان مفاهیم به صورت ساده و قابل درک برای دانشجویان بوده و با ارائه مثال‌های حل شده در لابه‌لای مطالب، توانایی دانشجویان برای پاسخگویی به تمرین‌های داخل متن و سؤالات آخر هر فصل افزایش یابد. در تدوین کتاب نهایت سعی و تلاش صورت گرفته تا هیچ‌گونه اشتباهی در آن رخ ندهد. ولی با توجه به اینکه این کتاب برای اولین بار چاپ شده است، بدون شک عاری از اشتباه نخواهد بود.

امیدوارم که کلیه‌ی صاحب‌نظران، اساتید محترم و دانشجویان عزیز با راهنمایی و پیشنهادات خود مرا در رفع نواقص و کاستی‌های کتاب یاری دهند. امید است که تألیف این کتاب بتواند بخش هرچند کوچکی از دین اینجانب را به جامعه‌ی علمی ایران عزیز اداء نماید.

در پایان از راهنمایی‌ها و مساعدت‌های دوست و همکار گرامی جناب آقای دکتر شهرام قاسمی‌میر (هیأت علمی دانشگاه مازندران) کمال سپاس و تشکر را دارم.

حسن کرمی

دانشیار شیمی تجزیه

دانشگاه پیام نور مرکز ابهر

زمستان ۱۳۹۰

فصل اول

مقدمه

خوردگی را تخریب یا فاسد شدن یک جسم در اثر برهمکنش با محیط اطراف خود تعریف می‌کنند. عوامل ایجادکننده خوردگی را عوامل خورنده می‌گویند. تمام اجسام چه فلزی و چه غیرفلزی در طبیعت دچار خوردگی می‌شوند ولی با توجه به اینکه سرعت خوردگی اجسام فلزی بسیار بیشتر از سایر اجسام نظیر پلاستیک، سنگ و غیره می‌باشد، بیشتر مباحث خوردگی به خوردگی فلزات معطوف می‌شود. بررسی ترکیبات فلزی در طبیعت نشان می‌دهد که بخش عمده‌ی فلزها در طبیعت به صورت ترکیب با عناصر دیگر هستند. با توجه به این اصل که هر ماده‌ای تمایل دارد تا به پایدارترین حالت خود برسد، می‌توان نتیجه گرفت که حالت ترکیبی فلزها، پایدارتر از حالت آزاد (حالت عنصری) می‌باشد. این اصل باعث می‌شود که انسان برای بدست آوردن فلزها به حالت خالص هزینه‌های گزافی را پردازد تا آنها را از ترکیبات به صورت خالص استخراج کند و از طرف دیگر مجبور است برای جلوگیری از تبدیل فلزهای خالص به حالت‌های ترکیبی، هزینه‌های هنگفتی را نیز متحمل شود. جهان پیرامون ما به صورت مستمر در حال تغییر و فعل و انفعال می‌باشد. این تغییر و دگرگونی‌ها می‌تواند سازنده و یا مخرب باشد. یکی از این تغییرات، تخریب مواد در اثر برهم کنش‌های مختلف با محیط پیرامون خود می‌باشد که این تخریب را به صورت جامع و کلی، خوردگی می‌گویند. به عبارت دیگر در این راستا، کلیه وسایل و تجهیزاتی که انسان با آن سروکار دارد نظیر ساختمان‌ها، ماشین‌ها و محصولات تولیدی هیچ‌یک، از تخریب خوردگی در امان نیستند. سالیانه هزینه و انرژی بسیاری را بشر صرف می‌کند تا بتواند به نحوی این فرایند مهم را مهار کرده یا با آن مقابله کند.

یکی از مثال‌های ساده و آشنا برای همگان، زنگ زدن آهن است که آن را به رنگ زرد مایل به قهوه‌ای درمی‌آورد. در این شرایط، آهن اکسید شده و به حالت پایدارتری تبدیل می‌شود. تمام فلزها تمایل دارند به حالت پایدار تبدیل شوند که در اثر این تغییرات، مقداری انرژی آزاد می‌شود. بعنوان مثال وقتی فلز مس خورده می‌شود، اتم‌های این فلز با از دست دادن الکترون به کاتیون خود تبدیل می‌شوند:



در معادله واکنش فوق، x می‌تواند هر عامل طبیعی و یا مصنوعی باشد که باعث خوردگی مس فلزی و تولید یون‌های پایدار مس می‌شود.

پدیده خوردگی ممکن است به صورت‌های متفاوتی رخ دهد که یکی از مکانیسم‌های عمومی خوردگی، انتقال اتمی، یونی و یا مولکولی از سطح به محیط پیرامون خود می‌باشد که این انتقال در فصل مشترک ماده و محیط رخ می‌دهد. معمولاً، این انتقال چند مرحله‌ای می‌باشد و کندترین مرحله، کنترل‌کننده‌ی سرعت نهایی واکنش است. خوردگی می‌تواند در فلزها، پلیمرها و سرامیک‌ها رخ دهد ولی بیشترین خوردگی مربوط به ابزارها، سازه‌ها و تأسیسات فلزی می‌باشد و به همین دلیل زمانی که از خوردگی صحبت می‌شود ناخودآگاه ذهن انسان به خوردگی فلزها معطوف می‌شود و واقعیت نیز گویای این حقیقت است که خسارت‌های ناشی از خوردگی سیستم‌های فلزی در مقایسه با خوردگی سایر سیستم‌ها، بسیار چشمگیرتر می‌باشد.

چرا فرآیند خوردگی اتفاق می‌افتد؟

پاسخ به این سؤال مستلزم درک این حقیقت است که خوردگی یک فرآیند خودبخودی است و یک فرآیند خودبخودی تنها زمانی اتفاق می‌افتد که منجر به تولید گونه‌های پایدارتر شود. به عنوان مثال، در محیط حاوی اکسیژن و بخار آب، اکسید آهن از لحاظ ترمودینامیکی پایدارتر از فلز آهن است به همین دلیل فلز آهن تمایل دارد تا از طریق خوردگی الکتروشیمیایی به اکسید آهن تبدیل شود. بر این اساس اغلب عناصر فلزی پرمصرف تمایل دارند تا به ترکیبات پایدارتر تبدیل شوند. به طور کلی می‌توان گفت خوردگی فلزها شامل واکنش فلزها با محیط اطراف خود برای تبدیل شدن به شکل

پایدارتر خود یعنی اکسید، سولفور و یا کربنات می باشد. خوردگی اغلب از سطح فلز آغاز می شود و تا درون آن نفوذ می کند که این کار تدریجی و پیوسته اتفاق می افتد ولی در عمل مشاهده می شود که سرعت خوردگی در مقایسه با تمایل ترمودینامیکی فلزها برای خورده شدن کمتر است و این شاید یکی از خوش شانسی های بشر است که می تواند از سرعت کم خوردگی استفاده کرده و با آن مقابله کند ولی با وجود سرعت کم فرآیندهای خوردگی، مشاهده می شود که هر ساله خوردگی خسارت های جبران ناپذیری به سیستم های مختلف به ویژه سیستم های فلزی وارد می کند.

غالب فرآیندهای خوردگی در محیط های مایع و گاز صورت می گیرد و تنها در برخی شرایط خاص، واکنش های خوردگی جامد- جامد رخ می دهد. خوردگی از هر نوع و در هر شرایطی در مقیاس اتمی و مولکولی اتفاق می افتد ولی بررسی عملی خوردگی در این مقیاس امکان پذیر نیست لذا برای اندازه گیری ها و مشاهدات از شواهد عینی مثل تغییرات در وزن و ابعاد، سرعت تولید محصولات خوردگی در محیط، بررسی تغییرات ظاهری سطح جسم توسط میکروسکوپ های نوری یا الکترونی و یا از مطالعه تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی استفاده می شود.

۱-۱ عوامل مؤثر بر خوردگی

عوامل متعددی در ایجاد و افزایش سرعت خوردگی اثر می گذارند که در زیر به شش عامل مهم و مؤثر اشاره می شود:

۱. درجه خلوص فلز: هر چه فلز خالص تر باشد و ناهمگونی کمتری داشته باشد، دیرتر خورده می شود.

۲. تغییرات فیزیکی و مکانیکی در قطعه: بروز تغییراتی نظیر تبدیل فاز، تنش و کشش های مکانیکی و غیره ممکن است شرایط را برای شروع خوردگی قطعه مساعدتر نماید.

۳. غلظت و ماهیت ماده خورنده: هر چه در محیط عامل خورنده ی قوی تر و یا غلظت بیشتری از آن عامل حضور داشته باشد، سرعت خوردگی بیشتر خواهد شد.

۴. مقدار اکسیژن: خوردگی های ناشی از اکسیژن یکی از فراوان ترین نوع خوردگی در سیستم های فلزی است. هرچه مقدار اکسیژن محیط به ویژه اکسیژن محلول در آب بیشتر باشد، سرعت خوردگی های مبتنی بر اکسیژن افزایش خواهد یافت.

۵. pH محیط: بر اساس ماهیت قطعه، سرعت خوردگی با pH محیط تغییر می‌کند. به عنوان مثال، سرعت خوردگی فلزهایی نظیر آهن، مس، روی و... با کاهش pH محیط افزایش می‌یابد ولی این ترتیب برای تمام فلزها صادق نمی‌باشد.

۶. درجه حرارت: در اغلب فرآیندهای خوردگی، افزایش دما باعث افزایش سرعت خوردگی می‌شود.

مثال ۱-۱: میزان خوردگی‌های لوله‌های رادیاتورهای آلومینیومی خودروها در آب بیشتر است یا در ضد یخ (اتیلن گلیکول)؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

پاسخ: به چند دلیل خوردگی رادیاتور زمانی که با آب پر شده باشد بیشتر از زمانی است که از اتیلن گلیکول استفاده می‌شود:

الف) حلالیت ناخالصی‌هایی نظیر نمک‌ها و یون‌های مختلف در آب بیشتر از ضدیخ است بنابراین قدرت یونی آب بسیار بالاتر از ضدیخ می‌باشد و این عامل موجب افزایش سرعت خوردگی آلومینیم خواهد شد.

ب) میزان تفکیک آب بیشتر از ضدیخ است بنابراین به دلیل حضور یون‌های بیشتر و قدرت یونی بالاتر، حل شدن لایه اکسید آلومینیوم تشکیل شده بر روی جدار داخلی رادیاتور در آب بیشتر و در نتیجه خوردگی بیشتر خواهد بود.

ج) میزان حلالیت اکسیژن در آب بیشتر است بنابراین خوردگی را تشدید می‌کند.

۱-۲ خسارت‌های ناشی از خوردگی

کنترل خوردگی از دو جنبه ایمنی و اقتصادی حائز اهمیت می‌باشد. تجهیزات، ماشین‌آلات و قطعات در کارخانجات در اثر خوردگی شکسته شده و می‌توانند علاوه بر خسارت‌های مالی، خسارت‌های جانی نیز در پی داشته باشد. در زیر به چند مثال خوردگی در صنایع اشاره می‌شود:

۱. زنگ زدن فولاد و چدن در تانک‌ها و لوله‌های آب صنایع مختلف و سازه‌های مستقر در آب دریاها مثل سکوها و پایه ی پل‌ها و اسکله‌ها

۲. خوردگی مس، آلومینیوم و چدن در سیستم‌های خنک‌کننده

۳. خوردگی آلیاژها در فرآیندهای شیمیایی مثل آلیاژهای پایه آهن، مس و نیکل

۴. خوردگی آگزوز اتومبیل در اثر تماس فلز با گازها، حرارت و بخار آب

۵. خوردگی پره‌های توربین‌های گازی در اثر تماس با گازهای داغ ناشی از احتراق
۶. تخریب سازه‌های بتنی و سنگی در اثر واکنش با رطوبت و آلودگی‌های اسیدی موجود در هوا از قبیل اکسیدهای گوگرد و نیتروژن
۷. خوردگی شیمیایی طلا و برنج در اثر تماس با جیوه
۸. تنش و حفردار شدن فولاد زنگ نزن در آب دریا
۹. نشست آب از سامانه لوله کشی‌های فلزی ساختمان‌های مسکونی در اثر سوراخ شدگی و ترک‌های ناشی از پوسیدگی

۱-۳ انواع خوردگی

قبل از دسته‌بندی انواع خوردگی لازم است که انواع حمله‌های خوردگی معرفی شود. حمله‌های خوردگی به فلزها می‌تواند یکنواخت و موضعی (غیریکنواخت) باشد که در زیر توضیح داده می‌شوند:

الف) حمله خوردگی یکنواخت: از این نوع حمله می‌توان به خوردگی توسط گاز هیدروژن و اکسیژن اشاره نمود که به صورت یکنواخت سطح کل قطعه دچار خوردگی می‌شود.

ب) حمله غیر یکنواخت: گاهی به صورت موضعی خوردگی منجر به تشکیل حفره، نازک‌تر شدن لایه سطحی و کاهش مقاومت فلز و یا خستگی و یا شکست فلزها در اثر تنش‌های مکانیکی می‌شود.

فرایندهای خوردگی در حالت کلی می‌تواند به چهار نوع مختلف تقسیم‌بندی شوند که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود:

الف) خوردگی شیمیایی: این نوع خوردگی بدون انتقال الکترون بین قطعه‌ی فلزی مورد نظر و محیط خورنده انجام می‌شود. در خوردگی شیمیایی اگر محیط خورنده، گاز باشد، خوردگی حاصل را گاهی خوردگی خشک هم می‌نامند و اگر محیط خورنده، مایع باشد، خوردگی تر و یا خوردگی الکترولیتی نامیده می‌شود. برای این نوع خوردگی، مثال‌های کمی وجود دارد که مهم‌ترین مثال برای این نوع خوردگی، خورده شدن فلزهای مختلف توسط جیوه می‌باشد که در آن فلز از طریق حل شدن در جیوه دچار خوردگی می‌شود.

تمرین: برای خوردگی شیمیایی، چند مثال غیر از خوردگی فلزها توسط جیوه ذکر کنید.
جواب: خوردگی تانک‌های ذوب فلزهایی نظیر آلومینیم، روی، سرب، قلع و... به دلیل حل شدن فلز تانک در داخل مذاب فلزی

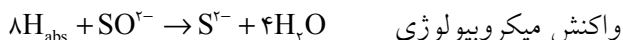
ب) خوردگی الکتروشیمیایی: این نوع خوردگی هنگامی رخ می‌دهد که در فلز یا جسم رسانا، ناهمگنی وجود داشته باشد. این ناهمگنی در فلز سبب ایجاد پیل الکتروشیمیایی شده و بین کاتد و آنود جریان الکتریکی بوجود آمده و باعث خوردگی فلز می‌شود. چون اغلب فلزها همگن نیستند، بنابراین وقتی در یک الکترولیت قرار می‌گیرند، خورده می‌شوند که این نوع خوردگی را خوردگی الکتروشیمیایی می‌گویند. هنگامی که خوردگی الکتروشیمیایی رخ می‌دهد، می‌توان مکانیسم خوردگی را با اندازه‌گیری جریان و پتانسیل الکتریکی مشخص نمود.

خوردگی الکتروشیمیایی با آزاد شدن یون‌ها در محیط و حرکت الکترون‌ها در ماده همراه است و این زمانی رخ می‌دهد که در محیط، یون‌ها و موادی حضور داشته باشند که هادی الکترون باشند. مثال عمومی و ساده این فرآیند، خوردگی فلزها در محیط‌های آبی می‌باشد که اتم‌ها در سطح فلز به صورت یونی وارد محلول شده و الکترون‌ها از طریق فلز به جایی منتقل می‌شوند که بتوانند مصرف شوند و به این صورت روند واکنش حفظ می‌شود. در برخی موارد، یون‌های فلزی به صورت کمپلکس وارد محیط می‌شوند و با تولید ترکیباتی مثل هیدروکسیدها، اکسیدها و یا سولفورها، رسوب می‌کنند. دما نیز در این فرآیندها نقش مهمی دارد به عنوان مثال، با افزایش دما فرایند اکسید شدن سریع‌تر می‌شود.

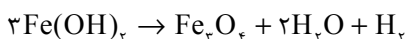
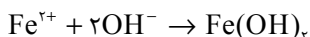
زمانی که یک فلز دچار خوردگی الکتروشیمیایی می‌شود، در واقع آن فلز و محیط خورنده تشکیل یک پیل الکتروشیمیایی می‌دهند که در آن یک واکنش خودبخودی اتفاق می‌افتد که همان واکنش خوردگی می‌باشد. پیل‌های الکتروشیمیایی خوردگی از لحاظ اندازه و وسعت به صورت زیر تقسیم می‌شوند:

۱. پیل‌های خوردگی میکرو که سطح اندکی در آن خورده می‌شود.
۲. پیل‌های خوردگی نیمه میکرو که نقاط متعدد و جدا از هم را تحت تأثیر قرار می‌دهد.
۳. پیل خوردگی ماکرو که در سطح وسیعی باعث خوردگی می‌شود.

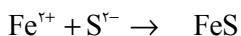
ج) خوردگی بیوشیمیایی: هرگاه انجام یکی از مراحل واکنش خوردگی وابسته به حضور میکروارگانیسم‌ها باشد، خوردگی حاصل را بیوشیمیایی می‌گویند. حضور میکروارگانیسم‌هایی مثل باکتری‌ها باعث خوردگی در فلزهایی نظیر آهن و فولاد می‌شوند که اغلب در عمق خاک و در حضور آب انجام می‌شود بنابراین غیرهوازی می‌باشند. به عنوان مثال باکتری‌های دسول فویلیریو^۱، فروباسیلوس^۲ و تیوباسیلوس^۳ از عوامل خوردگی بیوشیمیایی هستند. از آنجا که این میکروارگانیسم‌ها برای بقای خود نیازمند گاز H_2 می‌باشند، با تخریب فلز این گاز را تولید می‌کنند که فرآیند خوردگی و تولید گاز به صورت زیر اتفاق می‌افتد:



علاوه بر واکنش‌های فوق، واکنش‌های ثانویه زیر ممکن است رخ دهند:



و در نهایت:



می‌توان واکنش کل را با رعایت نسبت استوکیومتری به صورت زیر نوشت:



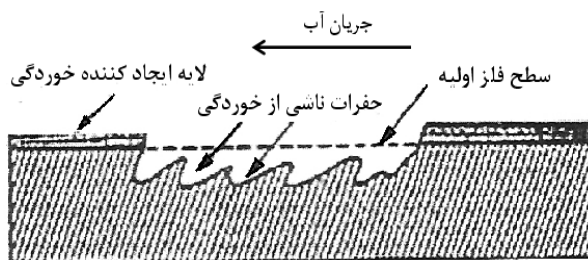
از مشخصه این نوع خوردگی علاوه بر وجود Fe_3O_4 (سیاه‌رنگ)، این است که مقدار قابل توجهی FeS نیز در محیط ایجاد می‌شود.

1. Desul phovilihrio
2. Ferrobacillus
3. Thiobacilus

(د) خوردگی مکانیکی: این نوع خوردگی را می‌توان به دو صورت سایشی^۱ و فرسایشی^۲ تقسیم نمود:

الف) خوردگی سایشی: حرکت نسبی بین یک مایع خورنده و سطح فلز می‌تواند علاوه بر افزایش سرعت انواع دیگر خوردگی، باعث ایجاد نوع دیگری از خوردگی شود که آن را خوردگی سایشی می‌نامند. در این نوع خوردگی که سطح فلز در اثر حرکت مایع خورنده دچار سایش و خوردگی می‌شود، افزایش سرعت نسبی حرکت مایع نسبت به سطح فلز باعث افزایش میزان سایش و خوردگی می‌شود. به دلیل حرکت مایع خورنده، یون‌های فلزی حاصل از خوردگی در سطح فلز باقی نمی‌مانند و همین باعث تشدید خوردگی می‌شود. فلزهایی که سختی کمی دارند مثل مس و سرب به سهولت صدمه دیده و از طریق مکانیکی، سریع سائیده می‌شوند و از طرف دیگر فلزهای سختی مثل آلومینیوم و فولاد، سرعت خوردگی سایشی کمتری داشته و مقدار آن بستگی به نوع پوسته‌ی سطحی دارد. در مجموع اکثر فلزها در حالت آلیاژ، مستعد برای خوردگی سایشی هستند. در شکل ۱-۱، نحوه‌ی خوردگی سایشی در دیواره‌ی داخلی یک لوله آب به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، حرکت پیوسته آب باعث خوردگی در دیواره‌ی داخلی لوله می‌شود. از محیط‌های خورنده که می‌توانند باعث خوردگی سایشی شوند، می‌توان به گازها، محلول‌های آبی و فلزهای مذاب اشاره نمود. به عنوان مثال، گازهای گرم می‌توانند فلز را اکسید نمایند و یا اینکه جامدات معلق در مایعات (مثل گل و لای) می‌توانند سرعت خوردگی سایشی را تشدید کنند. تجهیزاتی نظیر زانویی‌ها^۳، پیچ‌ها^۴، شیرها^۵، پروانه‌ها^۶، همزن‌ها^۷ و دیگ‌های بخار^۱ در سیستم‌های لوله‌کشی می‌توانند در معرض خوردگی سایشی قرار گیرند.

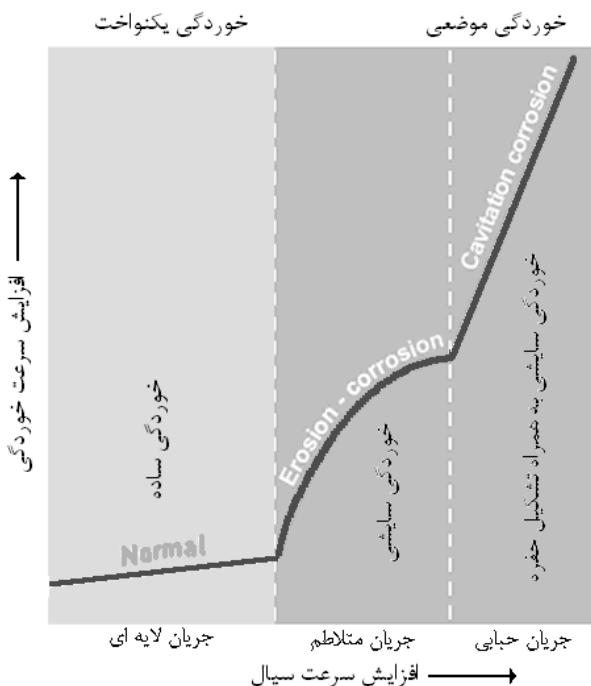
-
1. Erosion corrosion
 2. Freching corrosion
 3. Elbow
 4. Bolt
 5. Valve
 6. Propeller
 7. Mixer



شکل ۱-۱ نمایش شماتیک خوردگی سایشی در سطح داخلی لوله ی آب

سرعت خوردگی سایشی به عوامل مختلفی بستگی دارد که در زیر به چند مورد مهم اشاره می شود:

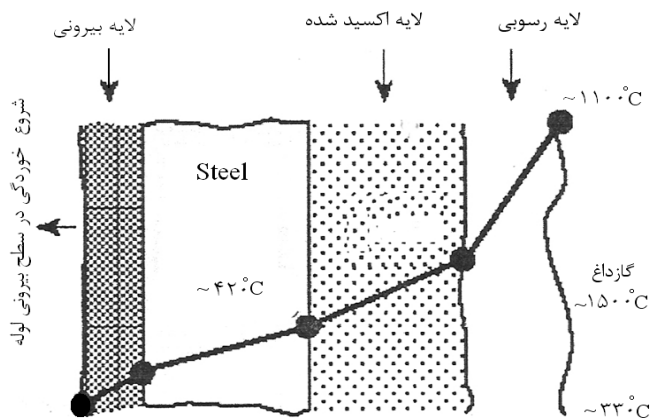
۱. **ماهیت سیال:** سرعت خوردگی سایشی به طور مستقیم به ماهیت و ترکیب درصد سیال خورنده بستگی دارد. در این میان، pH سیال یکی از عوامل مهم وابسته به سیال است که سرعت خوردگی در اغلب بسترهای فلزی را می تواند دستخوش تغییر نماید.
۲. **سرعت سیال:** یکی از عوامل بسیار مؤثر بر خوردگی است که با افزایش سرعت حرکت سیال، خوردگی از نوع ساده به خوردگی سایشی و در نهایت خوردگی سایشی همراه با تشکیل حفره منجر می شود. اثر سرعت حرکت سیال بر نوع خوردگی و سرعت آن در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده است، در سرعت های کم سیال، خوردگی سطح فلز تنها از نوع خوردگی ساده نظیر خوردگی الکتروشیمیایی است ولی وقتی سرعت سیال افزایش می یابد تا به سرعت آستانه یعنی کمترین سرعت حرکت سیال که می تواند منجر به خوردگی سایشی شود برسد، علاوه بر خوردگی ساده و معمولی، خوردگی سایشی نیز شروع می شود. در این حالت اغلب، حرکت سیال به صورت متلاطم و گردابی می باشد. سرعت خوردگی سایشی به صورت یک تابع نمایی با افزایش سرعت حرکت سیال زیاد می شود تا وقتی که سرعت حرکت سیال به اندازه ای زیاد شود که بتواند از طریق خوردگی سایشی در سطح قطعه حفره ایجاد کند، در این حالت، خوردگی سایشی تشدید شده و سرعت آن به صورت خطی با سرعت حرکت سیال زیاد خواهد شد.



شکل ۱-۲ اثر سرعت حرکت سیال خورنده بر نوع و سرعت خوردگی

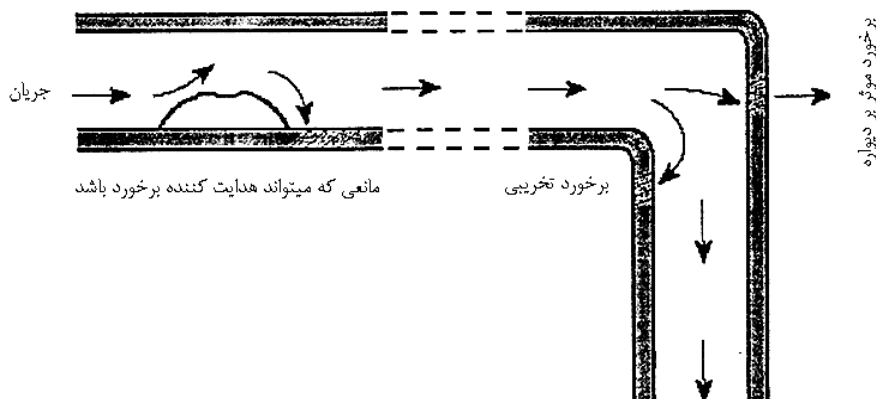
۳. دما: افزایش دمای بستر و دمای سیال در حال حرکت اغلب باعث افزایش سرعت خوردگی می‌شود به گونه‌ای که در دماهای بالا، سرعت خوردگی افزایش چشمگیری می‌یابد. خوردگی سایشی فلزها را در دماهای بالا، خوردگی داغ می‌نامند. این خوردگی در لوله‌های حاوی بخارات داغ سیستم‌های گرمایشی ساختمان‌ها به وفور مشاهده می‌شود. در این سیستم‌ها، گرادیان دمایی در لایه‌های مختلف دیواره‌ی لوله‌ها متفاوت می‌باشد و لایه‌های نزدیک به سیال داغ، به سرعت خورده شده و لایه‌های اکسیدی و رسوبی بر روی دیواره‌ی داخلی آن تشکیل می‌شود. در شکل ۱-۳ نحوه‌ی تغییرات دما در لایه‌های مختلف تشکیل شده در دیواره داخلی لوله‌ی حاوی بخار آب داغ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود، در روی دیواره‌ی داخلی لوله، رسوباتی بر اثر واکنش یون‌های آهن حل شده از دیواره‌ی لوله با آنیون‌های موجود در بخار و نیز برخی نمک‌های موجود در خود بخار به صورت یک لایه‌ی عایق تشکیل می‌شود. در این لایه به دلیل هدایت حرارتی کم، افت دما زیاد

می‌باشد به گونه‌ای که دما از 1100°C تا حدود 700°C افت می‌کند. در زیر این لایه، اکسیدهای حاصل از خوردگی مستقیم لوله به صورت یک لایه مشاهده می‌شود. چون هدایت حرارتی لایه‌ی اکسیدی از لایه‌ی رسوبی بیشتر است، با وجود ضخامت بیشتر، میزان افت دما در طول این لایه نسبت به لایه‌ی رسوبی کمتر است (دما از 700°C تا 420°C کاهش می‌یابد). در زیر لایه‌ی خوردگی (لایه‌ی اکسیدی)، بدنه‌ی سالم لوله مشاهده می‌شود که به دلیل هدایت حرارتی بالای فلز، افت دما بسیار کمتر است (کاهش دما از 420°C به 350°C). در سطح بیرونی لوله نیز لایه خوردگی دیگری مشاهده می‌شود که ناشی از اثر اکسیژن و بخار آب موجود در هوا می‌باشد که به دلیل دمای بالای لوله، سرعت این خوردگی نیز تشدید می‌شود.



شکل ۳-۱ گرادین دمای در لایه‌های مختلف یک لوله حاوی بخار داغ

۴. **شکل هندسی سازه:** طرح و شکل مخازن و لوله‌های انتقال سیال‌های خورنده مثل آب و بخار آب داغ یکی از عوامل اصلی در خوردگی می‌باشد. بر این اساس در هنگام طراحی باید تا حد امکان سعی شود تا از ایجاد انحنا و زوایای تند در مسیر که باعث افزایش خوردگی می‌شود جلوگیری شود. در شکل ۴-۱ اثر شکل لوله بر خوردگی به نمایش گذاشته شده است. مشاهده‌ی شکل ۴-۱ نشان می‌دهد که بخش‌هایی که در معرض برخورد شدیدتر با جریان سیال هستند، دچار خوردگی سایشی بیشتری شده‌اند.



شکل ۴-۱ اثر شکل هندسی لوله‌ی انتقال سیال بر سرعت خوردگی

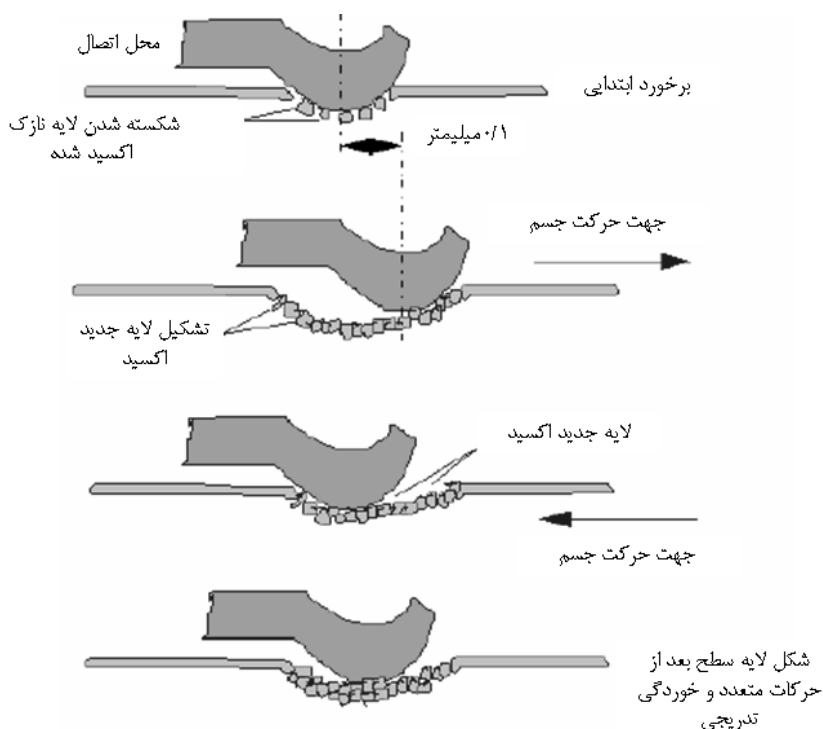
برای مبارزه با خوردگی سایشی در سیستم‌های فلزی می‌توان از روش‌های زیر کمک گرفت:

۱. استفاده از مواد مناسب در برابر سایش
۲. طراحی مناسب
۳. ایجاد تغییرات در محیط ایجادکننده خوردگی
۴. استفاده از پوشش‌های مناسب
۵. حفاظت کاتدی

لازم به ذکر است که حفاظت کاتدی برای جلوگیری از خوردگی الکتروشیمیایی می‌باشد ولی چون اغلب خوردگی‌های سایشی با خوردگی الکتروشیمیایی همراه هستند و خوردگی الکتروشیمیایی از طریق زبر کردن سطح باعث افزایش سرعت خوردگی سایشی می‌شود. بنابراین استفاده از حفاظت کاتدی باعث کاهش سرعت خوردگی الکتروشیمیایی و در نتیجه کاهش سرعت خوردگی سایشی می‌شود.

ب. خوردگی فرسایشی: این نوع خوردگی بین دو فلز در حال لغزش و ارتعاش اتفاق می‌افتد و به صورت حفره‌ها و شیارهایی ظاهر می‌شود. این نوع خوردگی حالت خاصی از خوردگی سایشی است که در این حالت به جای سیال خورنده، یک قطعه‌ی دیگر باعث خوردگی می‌شود. این نوع خوردگی به وفور در اجزاء موتورها، قطعات اتومبیل و اجزایی که به هم پیچ شده‌اند، مشاهده می‌شود. در شکل ۵-۱ چگونگی انجام این خوردگی نشان داده است. این شکل نشان می‌دهد که حرکت قطعه بر روی بستر

به مرور زمان باعث شکستگی در لایه سطحی اکسید شده می‌شود. با شکسته شدن لایه‌ی اکسیدی، لایه‌ی سالم فلزی زیرین، اکسید می‌شود و در طی حرکات بعدی، لایه اکسیدی جدید نیز شکسته شده و این چرخه ادامه می‌یابد و خوردگی فرسایشی باعث از کار افتادن سیستم می‌شود.



شکل ۵-۱ چگونگی انجام خوردگی فرسایشی

باید توجه شود که حرکت بین دو قطعه‌ی فلزی می‌تواند خواسته و یا ناخواسته باشد. حرکت خواسته بین دو فلز زمانی است که طراحی سامانه برای حرکت نسبی این دو قطعه می‌باشد. به عنوان مثال، لولای در خودرو شامل دو قطعه‌ی فلزی هم محور می‌باشد که روی هم حرکت می‌کنند و این حرکت مطلوب بوده و باید همواره وجود داشته باشد و نمی‌توان از این حرکت جلوگیری نمود. در حرکت ناخواسته، طراحی دو قطعه‌ی فلزی به گونه‌ای است که باید روی هم ثابت بوده و حرکت نسبی نداشته باشند. به عنوان مثال دو لوله انتقال آب که توسط پیچ و مهره به یکدیگر بسته و ثابت

شده‌اند. در ایجاد و تقویت خوردگی فرسایشی عوامل متعددی می‌توانند دخالت داشته باشند که در زیر به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود:

۱. وجود بار و فشار در محل تماس
 ۲. ارتعاش یا حرکت نسبی مکرر بین دو سطح
 ۳. وجود بار و حرکت نسبی مازاد در فصل مشترک سطوح
- با توجه به اهمیت این نوع خوردگی و فراوانی آن در سیستم‌های مختلف، لازم است که راه‌های عملی برای جلوگیری و یا کاهش سرعت این خوردگی ارائه شود. در اینجا چند روش مهم برای مقابله با این نوع خوردگی مکانیکی ذکر می‌شود:
۱. استفاده از روغن و گریس بین سطوح در حال تماس و لغزش (مخصوص حرکات خواسته)
 ۲. افزایش سختی فلزهای در حال تماس (بیشتر برای حرکات خواسته)
 ۳. کاهش زبری سطوح در حال تماس (بیشتر برای حرکات خواسته)
 ۴. استفاده از واشر جهت کم کردن تماس بین دو قطعه و حذف هوا (بیشتر برای حرکات ناخواسته)
 ۵. افزایش بار روی سطوح در حال تماس با یکدیگر و جلوگیری از لغزش (مخصوص حرکات ناخواسته)
 ۶. کاهش بار روی سطوح در حال ارتعاش و چرخش نظیر یاتاقان‌ها (مخصوص حرکات خواسته)

تمرین ۱-۱: لق شدن یاتاقان‌های موتور خودروها باعث می‌شود که میل لنگ با بدنه موتور برخورد پیدا نماید. کدام نوع از خوردگی باعث لق شدن یاتاقان می‌شود و در اثر برخورد میل لنگ با بدنه‌ی موتور کدام نوع از خوردگی اتفاق می‌افتد؟
جواب: هر دو از نوع خوردگی فرسایشی می‌باشند.

۱-۴ راه‌های جلوگیری از خوردگی

به هفت دلیل عمده، حفاظت از فلزها در برابر خوردگی امری ضروری بشمار می‌آید:

۱. حفظ ظاهر سطوح به منظور کاربری نهایی
۲. نگهداری شکل و اندازه ی ابعاد سطوح مورد نظر
۳. جلوگیری از هدر رفتن منابع اولیه و مواد خام

۴. حفظ و افزایش ارزش فرآورده‌ها و جلوگیری از تغییرات نامطلوب در خواص مکانیکی آنها

۵. تضمین عملیات نهایی بر روی ورق‌های خام

۶. کاهش هزینه‌های نگهداری

۷. اطمینان از کارکرد و کارایی دستگاه‌ها و تجهیزات فلزی

براساس استاندارد صنعتی آلمان (DIN 50900) روش‌های جلوگیری از خوردگی

به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند که این سه روش عبارتند از:

الف) ایجاد پوشش محافظ^۱: و به عبارت ساده‌تر قرار دادن ماده‌ای مقاوم بین

محیط و فلز به منظور جلوگیری از خوردگی

ب) حفاظت الکتروشیمیایی: در این روش فلز مورد نظر از طریق اتصال به یک

فلز دیگر و یا از طریق اتصال به یک منبع پتانسیل، به پتانسیلی برده می‌شود که در آن

پتانسیل، شدت واکنش خوردگی فلز مورد نظر صفر و یا بسیار ناچیز می‌شود و در

نتیجه عمر قطعه مورد نظر افزایش می‌یابد.

ج) حفاظت با بازدارنده‌های خوردگی^۲: یکی از راه‌های جلوگیری از خوردگی،

ممانعت از تماس عامل خورنده موجود در محیط با سطح جسم می‌باشد. برای رسیدن

به این هدف می‌توان عامل خورنده را از محیط دور نمود و یا اینکه ترکیباتی را به

محیط اضافه کرد که از انجام واکنش خوردگی جلوگیری کرده و یا سرعت آن را

کاهش دهد.

راه‌های اساسی مبارزه با خوردگی در فصل ششم کتاب به‌طور کامل بحث خواهد شد.