

Cathodic protection – Part 2: General principles of cathodic protection in seawater

حفاظت کاتدی - قسمت ۲:

اصول کلی حفاظت کاتدی در آب دریا

ویرایش اول

اسفند ۱۴۰۱

پیش‌گفتار صنعت نفت

استانداردهای نفت ایران (IPS) منعکس‌کننده دیدگاه‌های وزارت نفت ایران است و برای استفاده در تأسیسات تولید نفت و گاز، پالایشگاه‌های نفت، واحدهای شیمیایی و پتروشیمی، تأسیسات انتقال و فراورش گاز، فرآورده‌های نفتی و سایر تأسیسات مشابه تهیه شده است.

استانداردهای نفت، براساس استانداردهای قابل قبول بین‌المللی و داخلی تهیه شده و شامل گزیده‌هایی از استانداردهای مرجع می‌باشد. همچنین براساس تجربیات صنعت نفت کشور و قابلیت تأمین کالا از بازار داخلی و نیز برحسب نیاز، مواردی به طور تکمیلی و یا اصلاحی در این استاندارد لحاظ شده است. مواردی از گزینه‌های فنی که در متن استانداردها آورده نشده است در داده برگ‌ها به صورت شماره‌گذاری شده برای استفاده مناسب کاربران آورده شده است.

استانداردهای نفت، به شکلی کاملاً انعطاف پذیر تدوین شده است تا کاربران بتوانند نیازهای خود را با آنها منطبق نمایند. با این حال ممکن است تمام نیازمندی‌های پروژه‌ها را پوشش ندهند. در این گونه موارد باید الحاقیه‌ای که نیازهای خاص آنها را تأمین می‌نماید تهیه و پیوست شوند. این الحاقیه همراه با استاندارد مربوطه، مشخصات فنی آن پروژه و یا کار خاص را تشکیل خواهند داد.

استانداردهای نفت هر پنج سال یکبار مورد بررسی قرار گرفته و روزآمد می‌گردند. در این بررسی‌ها ممکن است استانداردی حذف و یا الحاقیه‌ای به آن اضافه شود و بنابراین همواره آخرین ویرایش آنها ملاک عمل می‌باشد.

در اجرای قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد ابلاغی ریاست محترم جمهوری، این استاندارد در تاریخ ۱۴۰۱/۱۲/۰۱ با شماره (INSO 18749-2) توسط سازمان ملی استاندارد ملی اعلام گردید.

از کاربران استاندارد، درخواست می‌شود نقطه نظرها و پیشنهادهای اصلاحی و یا هرگونه الحاقیه‌ای که برای موارد خاص تهیه نموده‌اند، به نشانی زیر ارسال نمایند. نظرات و پیشنهادهای دریافتی در کارگروه‌های فنی مربوطه بررسی و در صورت تصویب در تجدید نظرهای بعدی استاندارد منعکس خواهد شد.

ایران، تهران، خیابان کریمخان زند، خردمند شمالی، کوچه چهاردهم، شماره ۱۷

استانداردها و ضوابط فنی

کدپستی : ۱۵۸۵۸۸۶۸۵۱

تلفن : ۶۰ - ۸۸۸۱۰۴۵۹ و ۶۶۱۵۳۰۵۵

دور نگار : ۸۸۸۱۰۴۶۲

پست الکترونیک: Standards@nioc.ir

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، وظیفه تعیین، تدوین، به روزرسانی و نشر استانداردهای ملی را بر عهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند در کمیته ملی طرح، بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)^۱، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استانداردهای کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت می‌کند. ترویج دستگاه بین‌المللی یکاها، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2- International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)

4- Contact point

5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«حفاظت کاتدی - قسمت ۲: اصول کلی حفاظت کاتدی در آب دریا»

رئیس:سمت و/یا محل اشتغال:

معصومی، محسن

کمیته فنی متناظر ISIRI/TC 35

(دکتری مهندسی پلیمر)

دبیر:

سنگ سفیدی، لاله

پژوهشگاه استاندارد

(کارشناسی ارشد شیمی آلی)

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

آخوندنسب، سعید

شرکت ملی گاز ایران

(کارشناسی ارشد مهندسی مواد - خوردگی)

آریانسب، فزه

پژوهشگاه استاندارد

(دکتری شیمی آلی)

ابراهیم، الهام

پژوهشگاه استاندارد

(کارشناسی شیمی کاربردی)

اعتماد مقدم، امین

شرکت مهندسی مشاور نارگان

(کارشناسی ارشد مهندسی مواد - خوردگی و حفاظت از مواد)

الداغی، حامد

شرکت نفت و گاز پارس

(کارشناسی ارشد مهندسی مواد - شناسایی و انتخاب مواد)

امیدی، رحمت‌الله

شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی

(کارشناسی ارشد مهندسی مواد - خوردگی و حفاظت از فلزات)

پاکزاد، الهام

شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

(کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر - صنایع رنگ)

سمت و/یا محل اشتغال:**اعضا:** (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

شرکت نفت و گاز پارس	جلایی، علی (کارشناسی ارشد مهندسی مواد- شناسایی و انتخاب مواد)
شرکت مهندسين مشاور سازه	حسینی، سیدروح الله (کارشناسی ارشد مهندسی متالوژی- خوردگی و حفاظت از مواد)
شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی	حامدیان مقدم، مجتبی (کارشناسی ارشد مهندسی شیمی- پلیمر)
پژوهشگاه استاندارد، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی	خالقی مقدم، ماهرو (دکتری شیمی آلی)
شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران	رستگار زارع، محمدحسن (کارشناسی ارشد مهندسی مواد- خوردگی)
شرکت ملی گاز ایران	سراقی، حسین (مهندسی شیمی- فرایند پالایش)
شرکت صنایع پتروشیمی کرمانشاه	سلیمی، علیرضا (کارشناسی مکانیک- تکنولوژی تاسیسات حرارتی و برودتی)
شرکت پالایش نفت تبریز	سیدریحانی، سید مهدی (کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی)
شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی	شمشیری، علیرضا (کارشناسی ارشد مهندسی متالوژی- خوردگی)
شرکت مهندسين مشاور ناموران	صالحی، علیرضا (کارشناسی ارشد مهندسی مواد)
پژوهشگاه مواد و انرژی	صداقت، علی (دکتری مهندسی مواد- سرامیک)
شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب	ظفري، محمود (کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر- صنایع رنگ)

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

سمت و/یا محل اشتغال:

غفوری یزدی، سید حسین (کارشناسی ارشد مهندسی مواد- خوردگی و حفاظت از مواد)	شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب
غلامی، آذر (کارشناسی ارشد مهندسی مواد- شناسایی و انتخاب مواد فلزی)	شرکت ملی پخش فراورده های نفتی ایران
فولادی، محمد (کارشناسی ارشد انتخاب و شناسایی مواد)	شرکت نارگان
کوشکی، عظیم (کارشناسی ارشد مهندسی بازرسی فنی)	معاونت مهندسی وزارت نفت- اداره کل فنی و اجرایی و ارزشیابی طرح ها
متشکر، ابوالفضل (دکتری مهندسی مواد)	شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب
ناصری اسکویی، محمدرضا (کارشناسی مهندسی شیمی - صنایع پتروشیمی)	شرکت مهندسی و توسعه نفت

ویراستار:

ابراهیم، الهام (کارشناسی شیمی کاربردی)	پژوهشگاه استاندارد
---	--------------------

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ی	پیش‌گفتار
ک	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۲	۳ اصطلاحات و تعاریف
۸	۴ کاربرد حفاظت کاتدی در آب دریا
۸	۱-۴ کلیات
۸	۲-۴ روش آند گالوانی
۱۰	۳-۴ روش جریان‌رسانی
۱۲	۴-۴ سامانه‌های ترکیبی
۱۳	۵ تعیین سطح حفاظت کاتدی
۱۳	۱-۵ اندازه‌گیری سطح حفاظت
۱۳	۲-۵ الکترودهای مرجع
۱۳	۳-۵ پتانسیل‌های الکترودهای مرجع
۱۳	۴-۵ تصدیق الکترودهای مرجع
۱۴	۵-۵ اندازه‌گیری پتانسیل
۱۴	۶ معیارهای پتانسیل حفاظت کاتدی
۱۴	۱-۶ کلیات
۱۵	۲-۶ فولادهای کربن-منگنز و کم‌آلیاژ
۱۷	۳-۶ سایر مواد فلزی
۲۰	۷ ملاحظات طراحی
۲۰	۱-۷ مقدمه
۲۱	۲-۷ داده‌های فنی و عملیاتی
۲۱	۳-۷ سطوحی که باید حفاظت شوند

صفحه	عنوان
۲۲	۴-۷ پوشش‌های حفاظتی
۲۲	۵-۷ فراهمی توان الکتریکی
۲۲	۶-۷ محدودیت‌های وزنی
۲۲	۷-۷ سازه‌های مجاور
۲۲	۸-۷ ملاحظات نصب
۲۳	۹-۷ تقاضای جریان
۲۴	۸ اثر عوامل محیطی بر تقاضای جریان
۲۴	۱-۸ مقدمه
۲۴	۲-۸ اکسیژن محلول
۲۴	۳-۸ جریان‌های آب دریا
۲۴	۴-۸ رسوبات آهکی
۲۵	۵-۸ دما
۲۶	۶-۸ شوری
۲۶	۷-۸ pH
۲۶	۸-۸ رسوب دریایی
۲۷	۹-۸ اثر عمق
۲۷	۱۰-۸ تغییرات فصلی و طوفان‌ها
۲۷	۹ اثرات ثانویه حفاظت کاتدی
۲۷	۱-۹ کلیات
۲۷	۲-۹ قلیابیت
۲۸	۳-۹ ترک‌خوردن به کمک محیط
۳۰	۴-۹ کلر
۳۱	۵-۹ جریان‌های سرگردان و اثرات تداخلی
۳۱	۱۰ استفاده از حفاظت کاتدی همراه با پوشش‌ها
۳۱	۱-۱۰ مقدمه
۳۲	۲-۱۰ انتخاب پوشش

صفحه	عنوان
۳۲	۳-۱۰ گسیختگی پوشش
۳۳	پیوست الف (آگاهی دهنده) خوردگی آلیاژهای کربن-منگنز و فولادهای کم آلیاژ
۳۸	پیوست ب (آگاهی دهنده) اصول حفاظت کاتدی
۴۲	پیوست پ (آگاهی دهنده) الکترودهای مرجع
۴۶	پیوست ت (آگاهی دهنده) خوردگی مواد فلزی به غیر از فولادهای کربن-منگنز و فولادهای کم آلیاژ که معمولاً تحت حفاظت کاتدی در آب دریا قرار دارند
۴۹	پیوست ث (آگاهی دهنده) مشخصات آند
۵۳	پیوست ج (آگاهی دهنده) ضرایب گسیختگی پوشش برای طراحی حفاظت کاتدی
۵۶	کتابنامه

پیش‌گفتار

استاندارد «حفاظت کاتدی- قسمت ۲: اصول کلی حفاظت کاتدی در آب دریا» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط تهیه و تدوین شده است، در یکصد و نود و چهارمین اجلاس کمیته ملی استاندارد فلزشناسی مورخ ۱۴۰۱/۱۲/۱ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، به‌عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوه نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و سرویس، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدیدنظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

با انتشار این استاندارد، استاندارد ملی ایران به شرح زیر باطل و این استاندارد جایگزین آن می‌شود:

این استاندارد جایگزین استاندارد ملی ایران شماره ۱۸۷۴۹ : سال ۱۴۰۰ می‌شود.

منابع و مآخذی که برای تهیه و تدوین این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

ISO 12473: 2017, General principles of cathodic protection in seawater

IPS-C-TP-820: 2013, Construction standard for cathodic protection

IPS-E-TP-820: 2010, Engineering standard for cathodic protection

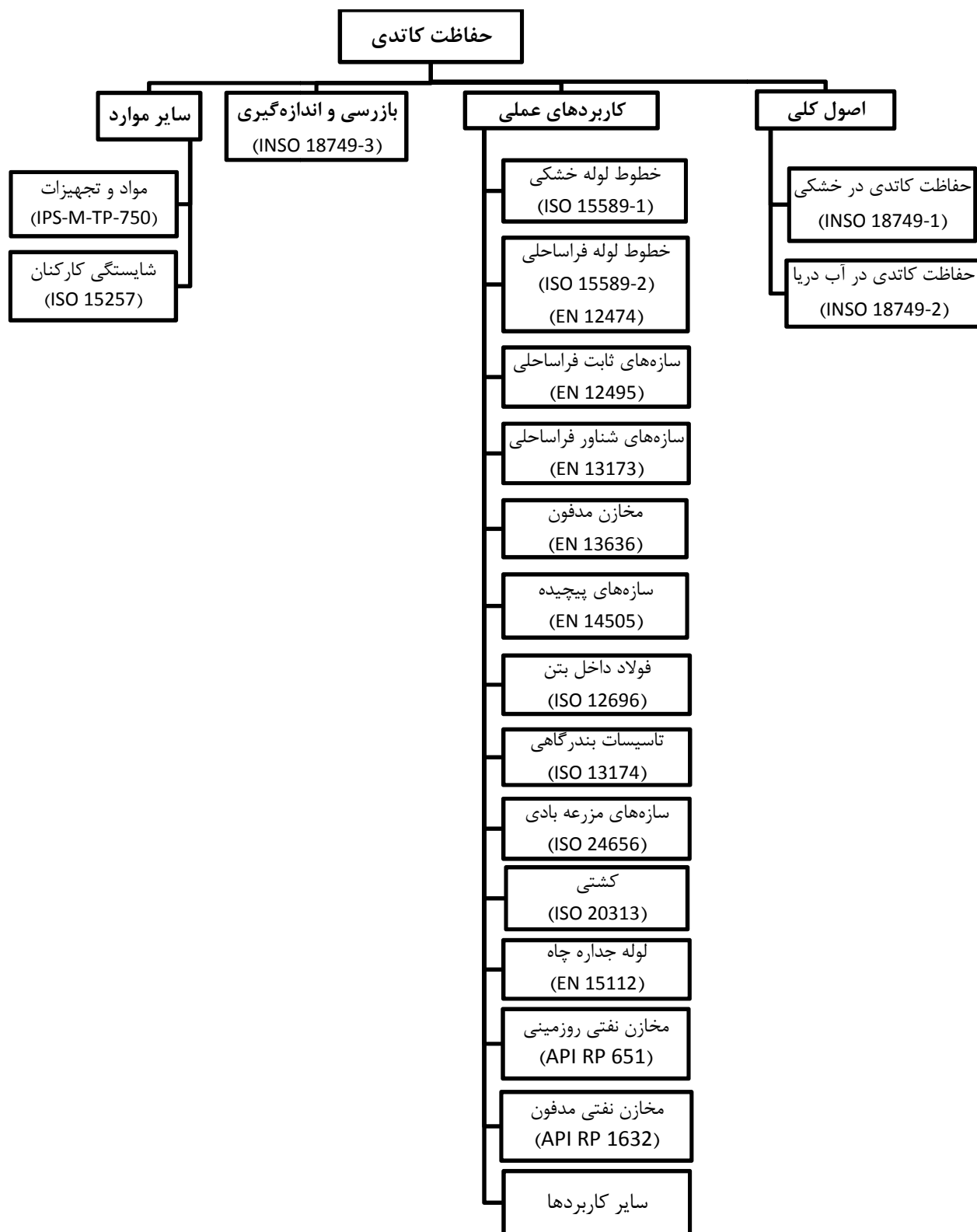
مقدمه

این استاندارد یک قسمت از مجموعه استانداردهای ملی ایران شماره ۱۸۷۴۹ است و سایر قسمت‌های این استاندارد به شرح زیر است:

— قسمت ۱: اصول کلی حفاظت کاتدی در خشکی

— قسمت ۳: بازرسی و آزمون

استانداردهای مربوط به حفاظت کاتدی را می‌توان مطابق با شکل ۰ (صفر) دسته‌بندی کرد.



شکل -۰- دسته‌بندی استانداردهای حفاظت کاتدی

حفاظت کاتدی - قسمت ۲: اصول کلی حفاظت کاتدی در آب دریا

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، ارائه اصول کلی حفاظت کاتدی هنگام به کارگیری در آب دریا، آب‌های لب‌شور^۱ و گِل دریایی^۲ است. این استاندارد به عنوان مقدمه‌ای برای ایجاد ارتباط بین جنبه‌های نظری و کاربردهای عملی و همچنین به منظور تامین پشتیبانی از سایر استانداردهای اختصاصی حفاظت کاتدی سازه‌های فلزی در آب دریا، در نظر گرفته می‌شود.

این استاندارد، معیارهای لازم برای حفاظت کاتدی را مشخص می‌کند. این استاندارد، توصیه‌ها و اطلاعات مربوط به الکترودهای مرجع، ملاحظات طراحی و جلوگیری از اثرات ثانویه حفاظت کاتدی را فراهم می‌کند.

استانداردهای زیر برای کاربردهای عملی حفاظت کاتدی در آب دریا به کار می‌روند:

— استاندارد EN 12495 برای حفاظت کاتدی سازه‌های فولادی فراساحلی ثابت؛

— استاندارد EN 13174 برای حفاظت کاتدی تاسیسات بندرگاهی؛

— استاندارد EN 12496 برای آندهای گالوانی به منظور حفاظت کاتدی در آب دریا و گِل نمکی؛

— استاندارد ISO 13173 برای حفاظت کاتدی سازه‌های فراساحلی شناور؛

— استاندارد EN 16222 برای حفاظت کاتدی بدنه‌های کشتی؛

— استاندارد EN 12474 برای حفاظت کاتدی خطوط لوله زیردریایی؛

— استاندارد ISO 15589-2 برای حفاظت کاتدی خطوط لوله فراساحلی.

برای حفاظت کاتدی بتن تقویت‌شده با فولاد، چه در معرض آب دریا و چه در معرض جو، استاندارد ISO 12696 کاربرد دارد.

۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به صورت الزامی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب، آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

در صورتی که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است.

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

¹ - Brackish water

² - Marine mud

- 2-1 EN 50162, Protection against corrosion by stray current from direct current systems
 2-2 ISO 8044, Corrosion of metals and alloys — Basic terms and definitions

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات با تعاریف زیر به کار می‌رود^۱.

یادآوری - تعاریف ارائه‌شده در زیر، نسبت به نسخه‌های آن‌ها در استاندارد ISO 8044 غالب هستند.

۱-۳

اسیدیته

acidity

وجود یون‌های هیدروژن اضافی نسبت به یون‌های هیدروکسیل ($\text{pH} < 7$) است.

۲-۳

قلیابیت

alkalinity

وجود یون‌های هیدروکسیل اضافی نسبت به یون‌های هیدروژن ($\text{pH} > 7$) است.

۳-۳

شرایط بی‌هوازی

anaerobic condition

نبود اکسیژن آزاد حل‌شده در الکترولیت است.

۴-۳

رسوبات آهکی

calcareous deposits

مواد معدنی رسوب‌کرده روی کاتد فلزی، به علت قلیابیت افزایش یافته ناشی از حفاظت کاتدی هستند.

۵-۳

جدایش کاتدی

cathodic disbondment

خرابی چسبندگی بین پوشش و سطح فلزی که به‌طور مستقیم قابل انتساب به اعمال حفاظت کاتدی است.

۶-۳

سامانه حفاظت کاتدی

cathodic protection system

کلیه تاسیساتی که تامین‌کننده حفاظت کاتدی هستند.

یادآوری - تاسیسات ممکن است شامل آندها، منبع تغذیه، کابل‌ها، امکانات آزمون، اتصال‌های عایقی و اتصال‌های الکتریکی باشد.

۱ - اصطلاحات و تعاریف به‌کاررفته در استانداردهای ISO و IEC در وب‌گاه‌های <http://www.iso.org/obp> و <http://www.electropedia.org/> قابل دسترس است.

۷-۳

ضریب گسیختگی پوشش

 f_c **coating breakdown factor**

نسبت «چگالی جریان کاتدی برای فلز پوشش شده» به «چگالی جریان کاتدی فلز بدون پوشش» است.

۸-۳

الکتروود مرجع Cu/CuSO_4 **copper/copper sulphate reference electrode**

الکتروود مرجع متشکل از مس در محلول اشباع مس سولفات است.

۹-۳

سپردی الکتریک

dielectric shield

پوشش آلی مقاوم به قلیا که روی سازه حفاظت شده در مجاورت و در تماس با آند جریان اعمالی^۱ اعمال می شود؛ تا گستره حفاظت کاتدی را افزایش و خطر آسیب هیدروژنی به سازه حفاظت شده در مجاورت آند را کاهش دهد.

۱۰-۳

ولتاژ محرکه

driving voltage

تفاوت بین پتانسیل سازه/الکتروولت و پتانسیل آند/الکتروولت هنگام عملیاتی شدن حفاظت کاتدی است.

۱۱-۳

الکترواسمز

electro-osmosis

عبور مایع از درون محیطی متخلخل تحت تاثیر اختلاف پتانسیل است.

۱۲-۳

ترک خوردن به کمک محیط

environmentally assisted cracking

ترک خوردن فلز یا آلیاژ مستعد، ناشی از عمل ترکیبی محیط و تنش است.

۱۳-۳

آند گالوانی

galvanic anode

الکتروودی که جریان حفاظت کاتدی را با استفاده از عمل گالوانی تامین می کند.

^۱ - Impressed current

۱۴-۳

بستر

groundbed

سامانه آندهای جریان اعمالی یا گالوانی مدفون یا غوطه ور است که به پایانه مثبت یک منبع مستقل جریان مستقیم متصل است و برای هدایت جریان حفاظت کاتدی به سمت سازه حفاظت شده استفاده می شود.

۱۵-۳

تُردي هیدروژنی

hydrogen embrittlement

فرایندی که به دلیل جذب هیدروژن به وسیله فلز، منجر به کاهش چقرمگی یا شکل پذیری آن می شود.

۱۶-۳

ترک خوردن تنش هیدروژنی

HSC

hydrogen stress cracking

ترک خوردن ناشی از وجود هیدروژن در فلز و تنش کششی (پسماند و/یا اعمالی) است.

یادآوری - HSC ترک خوردن در فلزاتی را توصیف می کند که ممکن است توسط هیدروژن تولید شده توسط پلاریزه شدن کاتدی بدون هیچ گونه اثر مضر ناشی از مواد شیمیایی خاص مانند سولفیدها، تُرد شوند.

۱۷-۳

اتصال (یا کوپلینگ) عایقی

isolating joint (or coupling)

اتصال یا کوپلینگ از نظر الکتریکی ناپیوسته، بین دو طول از لوله است؛ که به منظور تامین ناپیوستگی الکتریکی بین آنها قرار داده می شود.

۱۸-۳

الکتروود مرجع اصلی

master reference electrode

الکتروود مرجع، کالیبره شده با الکتروود مرجع کالیبراسیون اولیه است که برای تصدیق الکتروودهای مرجع مورد استفاده در اندازه گیری های میدانی یا آزمایشگاهی استفاده می شود.

۱۹-۳

پلاریزه شدن بیش از حد

over-polarization

رویدادی که در آن نسبت پتانسیل های سازه به الکتروولیت منفی تر از پتانسیل های مورد نیاز برای حفاظت کاتدی رضایت بخش است.

یادآوری - پلاریزه شدن بیش از حد کارکرد مفیدی ندارد و حتی ممکن است باعث آسیب زدن به سازه شود.

۲۰-۳

عدد معادل مقاومت به حفره‌دارشدن
PREN
pitting resistance equivalent number

عددی است که به منظور نشان دادن مقاومت آلیاژ مقاوم به خوردگی در مقابل حفره‌دارشدن در صورت وجود آب، کلریدها و اکسیژن یا محیط اکسایشی، با احتساب اثرات مفید نیتروژن، به کار می‌رود.

یادآوری - برای مقاصد این استاندارد، PREN از معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$PREN = w_{Cr} + 3,3(w_{Mo} + 0,5w_W) + 16w_N \quad (1)$$

که در آن:

 w_{Cr} درصد (جرمی) کروم در آلیاژ؛

 w_{Mo} درصد (جرمی) مولیبدن در آلیاژ؛

 w_W درصد (جرمی) تنگستن در آلیاژ؛

 w_N درصد (جرمی) نیتروژن در آلیاژ است.

۲۱-۳

اختلاف پتانسیل
potential gradient

تفاوت پتانسیل بین دو نقطه مجزا در یک میدان الکتریکی است.

۲۲-۳

الکتروود مرجع کالیبراسیون اولیه
primary calibration reference electrode

الکتروود مرجع مورد استفاده برای کالیبراسیون الکتروودهای مرجع اصلی، الکتروود معمول هیدروژن^۱ (N.H.E) است.

یادآوری - ساخت الکتروود مرجع رسمی، الکتروود استاندارد هیدروژن^۲ (S.H.E)، که ضریب فوگاسیته برای گاز هیدروژن و ضریب فعالیت برای یون‌های H^+ را در نظر می‌گیرد، در عمل غیرممکن است.

۲۳-۳

جریان حفاظتی
protection current

جریانی که از محیط الکترولیتی به سمت سازه فلزی جاری می‌شود؛ تا حفاظت کاتدی سازه تامین شود.

¹ - Normal hydrogen electrode

² - Standard hydrogen electrode

۲۴-۳

الکتروود مرجع**reference electrode**

الکتروود دارای پتانسیل پایدار و تجدیدپذیر، که به عنوان مرجع در اندازه‌گیری پتانسیل‌های الکتروود استفاده می‌شود.

یادآوری - برخی از الکتروودهای مرجع از الکتروولیتی که در آن اندازه‌گیری انجام می‌شود، استفاده می‌کنند. پتانسیل این الکتروودها برحسب ترکیب این الکتروولیت تغییر می‌کند.

۲۵-۳

مقاومت ویژه (الکتروولیت)**resistivity (of an electrolyte)**

مقاومت الکتروولیت به ازای سطح مقطع واحد و طول واحد است.

یادآوری - مقاومت ویژه برحسب اهم \times متر ($\Omega.m$) بیان می‌شود. مقاومت ویژه به عواملی از جمله مقدار نمک‌های حل شده در الکتروولیت بستگی دارد.

۲۶-۳

الکتروود مرجع کالومل اشباع**saturated calomel reference electrode**

الکتروود مرجع متشکل از جیوه و کلرید در محلول اشباع پتاسیم کلرید است.

۲۷-۳

الکتروود مرجع Ag/AgCl**silver/silver chloride reference electrode**

الکتروود مرجع متشکل از نقره، پوشش شده با نقره کلرید، در الکتروولیتی حاوی غلظتی معلوم از یون‌های کلرید است.

یادآوری ۱- الکتروودهای KCl/AgCl/Ag اشباع، الکتروودهایی هستند که در حال حاضر در آزمایشگاه و به عنوان الکتروود مرجع اصلی استفاده می‌شوند.

یادآوری ۲- الکتروودهای AgCl/Ag/آب دریا، الکتروودهایی هستند که در حال حاضر برای اندازه‌گیری‌های میدانی در آب دریا استفاده می‌شوند.

۲۸-۳

آزمون نرخ آهسته کرنش**slow strain rate test**

آزمونی برای ارزیابی مستعدبودن فلز به «ترک خوردن به کمک محیط» (مطابق با زیربند ۳-۱۲) است؛ که رایج‌ترین روش آن شامل کشیدن آزمون کششی در یک محیط نماینده، با نرخ ثابت جابجایی انتخاب شده برای تولید نرخ‌های کرنش اسمی در گستره $10^{-5} s^{-1}$ تا $10^{-8} s^{-1}$ ، تا رسیدن به شکست است.

یادآوری - آزمون نرخ آهسته کرنش ممکن است روی سایر هندسه‌های آزمون (مانند آزمون‌های خم) نیز انجام شود.

۲۹-۳

حداقل استحکام تسلیم مشخص شده

SMYS

specified minimum yield strength

حداقل استحکام تسلیم تعیین شده به وسیله مشخصاتی است که اجزای فولادی تحت آن تولید می شوند، که با استفاده از تجزیه و تحلیل استاندارد به دست می آید و نشانگر یک مقدار احتمالی است.

یادآوری - SMYS نشان دهنده حداقل تنشی که ممکن است اجزای فولادی تجربه کنند و منجر به تغییر شکل پلاستیک (دایمی) شود. مقدار SMYS براساس استاندارد مواد تعیین می شود.

۳۰-۳

جریان های سرگردان

stray currents

جریانی که از مسیرهایی غیر از مدارهای مورد نظر جاری می شود.

۳۱-۳

پتانسیل سازه به الکترولیت

stray currents

اختلاف پتانسیل بین سازه و الکتروود مرجع مشخص در تماس با الکترولیت، در نقطه ای به اندازه کافی نزدیک به سازه (ولی بدون تماس با آن) است؛ تا از خطای ناشی از افت ولتاژ همراه با هرگونه جریان جاری در الکترولیت جلوگیری شود.

۳۲-۳

باکتری های کاهنده سولفات

SRB

sulphate reducing bacteria

گروهی از باکتری ها که در بیشتر خاک ها و آب های طبیعی یافت می شوند، ولی فقط در شرایط نزدیک به خنثی و در نبود اکسیژن فعال بوده و با تولید سولفیدها، سولفات های محیط خود را احیا می کنند و خوردگی مواد سازه را تسریع می کنند.

۳۳-۳

جریان های زمینی

telluric currents

جریان های الکتریکی القاشده به وسیله تغییرات میدان مغناطیسی زمین با زمان هستند.

یادآوری - جریان های زمینی می توانند در رساناهای فلزی کارگذاری شده در خاک یا دریا، جاری شوند.

۳۴-۳

الکتروود مرجع روی

zinc reference electrode

الکتروود متشکل از روی خالص یا آلیاژ روی، مخصوص آندهای در تماس با الکتروولیتی است که اندازه‌گیری‌ها در آن انجام می‌شود.

یادآوری - الکترودهای مرجع روی در حال حاضر برای اندازه‌گیری‌هایی که در آب دریا و در مکان‌های دائمی انجام می‌شوند، استفاده می‌شوند.

۴ کاربرد حفاظت کاتدی در آب دریا

۱-۴ کلیات

فلزات در محیط‌های آبی (مانند آب دریا) مستعد خوردگی ناشی از واکنش‌های الکتروشیمیایی هستند. اطلاعات کلی در مورد خوردگی فولادهای کربن-منگنز یا فولادهای کم‌آلیاژ در پیوست الف ارائه شده است.

حفاظت کاتدی، یک سامانه پیشگیری از خوردگی الکتروشیمیایی براساس کاهش پتانسیل خوردگی تا سطحی است که در آن سطح، نرخ خوردگی فلز به‌طور قابل توجه کاهش می‌یابد (مطابق با استاندارد ISO 8044). برای سازه‌های صنعتی، نرخ خوردگی پسماند کمتر از $10 \mu\text{m}/\text{year}$ معمولاً با سامانه حفاظت کاتدی کاملاً موثر حاصل می‌شود.

حفاظت کاتدی با اعمال ولتاژی که بتواند جریان کافی به‌منظور کاهش پتانسیل سطح فلزی را تامین کند، به‌دست می‌آید. اطلاعات کلی در مورد اصول کلی حفاظت کاتدی در پیوست ب ارائه شده است.

یادآوری - برای سازه‌های فراساحلی با اجزای داخلی پر از آب مانند الکترودها^۱ و پایه‌های سازه‌های ژاکتی، نمی‌توان انتظار داشت که آندهای واقع در سطوح بیرونی، حفاظت کاتدی داخلی را در سوراخ‌های تعبیه‌شده برای تسهیل طغیان^۲، تامین کنند.

دو روش برای تامین جریان حفاظتی به‌منظور پلاریزه‌شدن سطح وجود دارد:

الف - سامانه‌های آند گالوانی، که در آن‌ها جریان لازم برای حفاظت، به‌وسیله فلزی با پتانسیل خوردگی منفی‌تر از اقلام تحت حفاظت تامین می‌شود؛ یعنی آند آلیاژهای آلومینیم، روی و منیزیم برای حفاظت از فولاد، و آند آهنی برای حفاظت از مس و آلیاژهای مس،

ب - سامانه‌های جریان اعمالی، که در آن‌ها جریان مستقیم (که معمولاً به‌وسیله یک مبدل یکسوکننده، از جریان متناوب تولید می‌شود) همراه با آندهای نسبتاً خنثی مانند گرافیت، پوشش‌های نازک پلاتین یا مخلوط اکسیدهای فلزی فعال‌شده روی فلزاتی مانند تیتانیم یا نیوبیم، آلیاژهای سرب، آهن سیلیسی و غیره استفاده می‌شود؛ در برخی از موارد، آند مصرفی مانند آهن قراضه یا فولاد استفاده می‌شود.

۲-۴ روش آند گالوانی

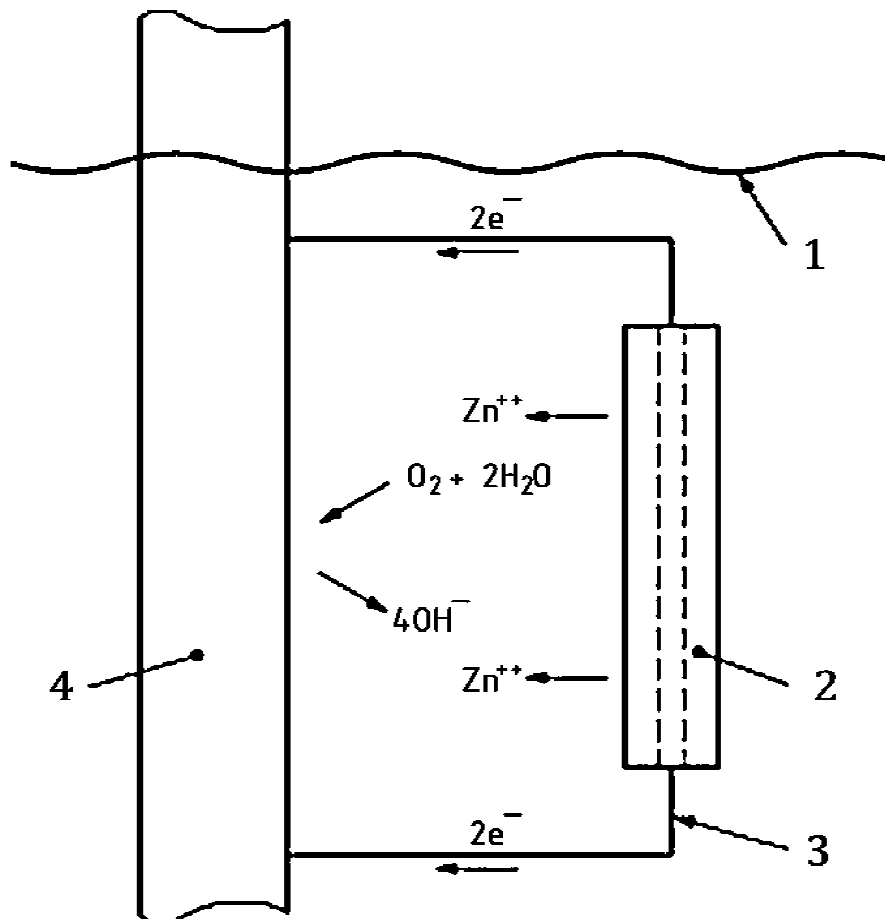
اگر دو فلز نامشابه در یک الکتروولیت به یکدیگر متصل شوند، یک پیل گالوانی تشکیل می‌شود. ولتاژ مدار باز، اختلاف پتانسیل طبیعی بین دو فلز است. اگر مدار بسته شود، این اختلاف پتانسیل یک جریان الکتریکی

¹ - Bracelets

² - Flooding

ایجاد می‌کند. الکتروود منفی‌تر به‌عنوان آند رفتار کرده و الکترون‌هایی را درون مدار آزاد می‌کند و سریع‌تر حل می‌شود؛ درحالی‌که الکتروود مثبت‌تر به‌عنوان کاتد رفتار کرده و به‌راحتی حل نمی‌شود. استفاده از آندهای گالوانی در حفاظت کاتدی براساس این پدیده است.

با فرض این‌که سازه تحت حفاظت، از فولاد ساخته شده باشد، آندهای گالوانی آلیاژ آلومینیم یا روی می‌توانند به‌منظور تشکیل پیل استفاده شوند؛ زیرا این آلیاژها نسبت به فولاد کمتر نجیب هستند (الکترونگاتیوتر هستند). الصاق آند به سازه از طریق یک هسته فولادی که مواد آند روی آن ریخته‌گری شده، انجام می‌شود. بنابراین، سازه در تماس فلزی با مواد آند و همچنین در تماس الکترولیتی با آن پس از غوطه‌ور شدن سازه است. این موضوع در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، الکترون‌های آزادشده به‌وسیله انحلال اتم‌های فلز، در احیای کاتدی اکسیژن روی سازه مصرف می‌شوند و یون‌های هیدروکسید در سطح سازه تولید می‌شوند.



راهنما:

- ۱ آب دریا
- ۲ آند گالوانی
- ۳ الصاق آند
- ۴ سازه حفاظت‌شده در آب دریا

شکل ۱- نمایش حفاظت کاتدی با استفاده از آند گالوانی روی سازه‌ای در آب دریا

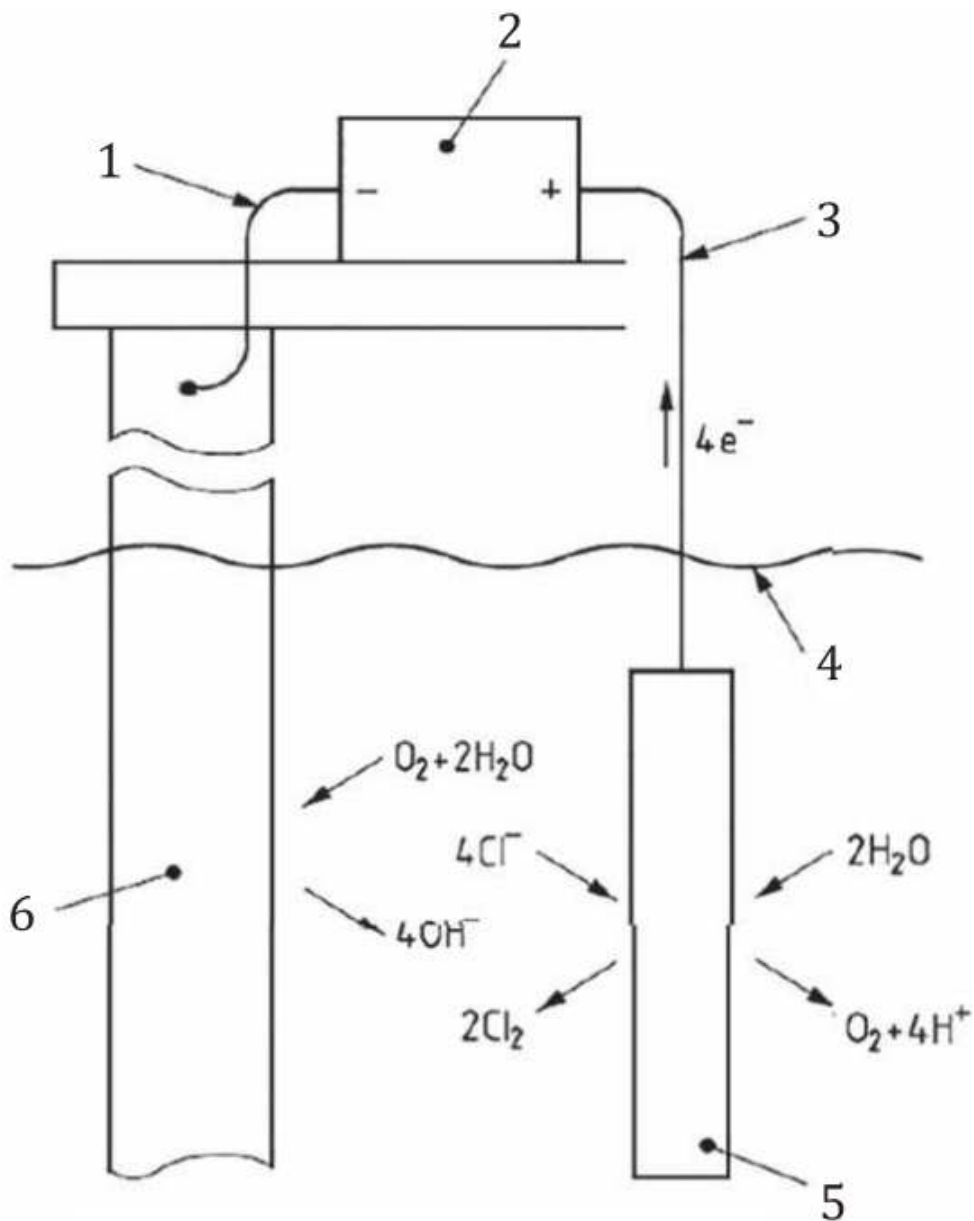
۳-۴ روش جریانِ عملی

اغلب آندهای جریانِ عملی، از نوعی هستند که به راحتی با پلاریزه شدن آندی حل نمی شوند؛ ولی می توانند محیط را متحمل واکنش های جایگزین (که شامل تجزیه محیط آبی یا اکسایش یون های کلرید حل شده در آن است) کنند، یعنی:

(۱)

(۲)

شکل ۲ یک سامانه حفاظت کاتدی جریانِ عملی با استفاده از آند خنثی در آب دریا را نشان می دهد؛ که در واکنش های ثانویه، هیدروژن و کلر ایجاد می شوند.



راهنما:

- 1 کابل عایق‌دار کاتد
- 2 منبع تغذیه (DC)
- 3 کابل عایق‌دار آند
- 4 آب دریا
- 5 آند جریان‌رسانی
- 6 سازه حفاظت‌شده در آب دریا

شکل ۲- نمایش حفاظت کاتدی جریان‌رسانی با استفاده از آند خنثی در آب دریا

یکی از مزایای سامانه جریان‌رسانی این است که داشتن یک ولتاژ محرکه بزرگ قابل تنظیم را امکان‌پذیر می‌کند؛ طوری که حتی برای حفاظت از سازه‌های بزرگ بدون پوشش در محیط‌های با مقاومت نسبتاً بالا، نیاز به نصب تعداد نسبتاً کمی آند وجود دارد. مقایسه سامانه‌های آند گالوانی و آند جریان‌رسانی، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقایسه سامانه‌های گالوانی و جریان اعمالی

سامانه‌های گالوانی	سامانه‌های جریان اعمالی	
محیط	در خاک‌ها یا آب‌های با مقاومت ویژه بالا ممکن است غیر عملی باشند.	استفاده از آن‌ها با مقاومت ویژه خاک‌ها یا آب‌ها، محدود نمی‌شود.
نصب	نصب آن‌ها آسان است.	مستلزم طراحی دقیق هستند؛ در غیر این صورت نصب آن‌ها ممکن است پیچیده شود.
منبع تغذیه	مستقل از هرگونه منبع تغذیه الکتریکی هستند. نمی‌توانند به صورت نادرست، اتصال الکتریکی داده شوند.	منبع بیرونی مورد نیاز است. لازم است مراقبت شود تا از اتصال الکتریکی در جهت اشتباه پرهیز شود.
آنها	بدنه آند می‌تواند جریان آب را محدود کند و منجر به مشکلات آشفستگی ^۱ و دراگ ^۲ در جریان شود.	معمولا سبک‌تر و به تعداد کم هستند. آندها می‌توانند طوری طراحی شوند که حداقل تاثیر را بر جریان آب داشته باشند.
کنترل	جریان در این سامانه‌ها تمایل به خودتنظیم‌شوندگی دارد.	قابل کنترل هستند. کنترل معمولا خودکار است و می‌تواند پیوسته باشد.
برهم‌کنش ^۳	در این سامانه‌ها احتمال کمتری برای تاثیر روی هرگونه سازه مجاور وجود دارد.	اثرات روی سایر سازه‌های قرارگرفته در مجاورت آندها، نیاز به ارزیابی دارد.
نگهداشت	عموما لازم نیست. ممکن است در برخی شرایط، تعویض شوند.	تجهیزات برای عمر طولانی طراحی شده‌اند، ولی بررسی‌های منظم تجهیزات الکتریکی حین سرویس لازم است. برق مستمر لازم است.
آسیب	آنها مقاوم هستند و خیلی مستعد آسیب مکانیکی نیستند. در مواردی که سامانه شامل تعداد زیادی آند است، از دست دادن تعداد کمی آند تاثیر کلی اندکی بر سامانه دارد. اتصال‌ها باید توانایی مقاومت به هرگونه نیروی وارد بر سازه را داشته باشند. عایق‌کاری الکتریکی کابل‌ها ضروری نیست.	ساختار آندها سبک‌تر است و بنابراین مقاومت آن‌ها به آسیب مکانیکی کمتر است. از دست دادن آندها ممکن است تاثیر بحرانی‌تری بر کارایی سامانه داشته باشد. عایق‌کاری الکتریکی کامل کابل‌های مثبت که در معرض الکترولیت هستند، الزامی است.

1- Turbulance
2- Drag
3- Interaction

۴-۴ سامانه‌های ترکیبی

این سامانه‌ها شامل ترکیبی از آندهای گالوانی و آندهای جریان اعمالی با منبع تغذیه بیرونی هستند.

به دلیل اینکه ممکن است بین غوطه‌وری اولیه سازه و راه‌اندازی سامانه جریان اعمالی مدت‌زمان قابل توجهی وجود داشته باشد، معمولا تعداد کافی از آندهای گالوانی به منظور پلاریزه کردن ناحیه بحرانی سازه تعبیه می‌شود.

توصیه می‌شود که آندهای گالوانی هنگامی که سامانه جریان اعمالی، به منظور پیمایش و نگهداشت زیر دریا حین طول عمر سازه، خاموش می‌شود، نیز حفاظت سازه را تامین کنند.

۵ تعیین سطح حفاظت کاتدی

۵-۱ اندازه‌گیری سطح حفاظت

برای تعیین اینکه سازه به اندازه کافی حفاظت می‌شود، لازم است پتانسیل فلز/آب دریا اندازه‌گیری شود. برای این منظور، اتصال‌ها باید هم در سازه و هم در الکترولیت ایجاد شوند. اتصال به سازه، یک اتصال ساده فلزی است؛ ولی برای اتصال به الکترولیت، یک هادی فلزی باید درون الکترولیت قرار داده شود. این هادی، پتانسیل الکتروود خود را دارد؛ که ناگزیر در مقدار اندازه‌گیری شده گنجانده می‌شود. این مشکل را می‌توان با استفاده از یک هادی با پتانسیل الکتروود تعریف‌شده و تجدیدپذیر برطرف کرد؛ این الکتروود، الکتروود مرجع نامیده می‌شود.

۵-۲ الکتروودهای مرجع

اغلب، الکتروودهای مرجع مورد استفاده در شرایط میدانی، الکتروودهایی مانند الکتروودهای AgCl/Ag آب دریا یا الکتروودهای روی با خلوص بالا^۱ یا با مشخصات آند آلیاژی^۲ هستند. این الکتروودها برای بیشتر اهداف عملی به اندازه کافی دقیق در نظر گرفته می‌شوند؛ حتی اگر الکتروولیت به‌طور کامل تعریف نشده باشد و تجدیدپذیر نباشد.

یادآوری - معمولاً الکتروود کالومل اشباع یا الکتروودهای KCl/AgCl/Ag برای پایش و کنترل سامانه‌های حفاظت کاتدی در آب دریا استفاده نمی‌شوند؛ زیرا برای استفاده میدانی به اندازه کافی مقاوم نیستند. علاوه بر این، الکتروودهای کالومل به‌دلیل زیست‌محیطی قابل پذیرش در نظر گرفته نمی‌شوند.

جزئیات الکتروودهای مرجع برای کاربردهای دریایی در پیوست پ ارائه شده است.

۵-۳ پتانسیل‌های الکتروودهای مرجع

پتانسیل‌های الکتروودهای مرجع مختلف نسبت به الکتروود معمول هیدروژن در جدول پ-۱ پیوست پ ارائه شده است.

۵-۴ تصدیق الکتروودهای مرجع

الکتروودهای مرجع مورد استفاده در شرایط میدانی باید به‌طور دوره‌ای با یک الکتروود مرجع اصلی دارای گواهی کالیبراسیون معتبر، بررسی شوند. این الکتروود اصلی باید به‌صورت دوره‌ای (حداقل یک‌بار در سال) با یک الکتروود مرجع کالیبراسیون اولیه (N.H.E.) کالیبره شود.

الکتروودهای مرجع مانند الکتروود کالومل اشباع یا الکتروودهای مختلف AgCl/Ag با غلظت‌های مختلف الکتروولیت پتاسیم کلرید ممکن است به‌عنوان الکتروودهای مرجع اصلی استفاده شوند.

¹ - High purity zinc electrodes

² - Anode alloy specification zinc electrodes

۵-۵ اندازه‌گیری پتانسیل

صرف‌نظر از نوع الکتروود مرجع مورد استفاده، اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بین سطح فلز و الکتروولیت می‌تواند تحت تأثیر افت پتانسیل ایجادشده به‌وسیله جریان حفاظتی که از میان الکتروولیت اطراف به‌سمت سازه جاری می‌شود، قرار گیرد. این اثر که به‌عنوان افت IR شناخته می‌شود، پتانسیل اندازه‌گیری‌شده را منفی‌تر از پتانسیل واقعی در فصل مشترک فلز/الکتروولیت می‌کند. افت IR به مقاومت ویژه الکتروولیت بستگی دارد و به‌ویژه به سازه‌های مدفون مربوط می‌شود.

به‌طور کلی خطاهای افت IR در کاربردهای دریایی، به‌ویژه هنگامی که از آندهای گالوانی استفاده می‌شود، ناچیز در نظر گرفته می‌شوند. با این حال، اندازه‌گیری‌های پتانسیل با استفاده از تکنیک‌های «لحظه خاموش»^۱ یا تکنیک‌های «لحظه خاموش کوپن»^۲ (مطابق با استاندارد EN 13509) یا پس از قطع سامانه‌های جریان اعمالی، ممکن است برای نشان دادن دستیابی به معیارهای حفاظتی، به‌ویژه در آب‌های شور و نزدیک به آندهای جریان اعمالی، ضروری باشد.

برای تعیین خطرات حفاظت بیش از حد^۳ (طبق زیربند ۶-۱)، ضروری است که پتانسیل سازه بلافاصله پس از خاموش کردن منبع جریان و قبل از دپلاریزه‌شدن مواد فلزی اندازه‌گیری شود. این پتانسیل را می‌توان با استفاده از یک ثبت‌کننده سریع داده‌های نمونه‌برداری یا یک نوسان‌نما^۴ به‌دست آورد.

اگر پتانسیل‌های اندازه‌گیری‌شده در نوسان باشند، ممکن است به‌دلیل تداخل جریان‌های سرگردان یا تداخل جریان‌های زمینی باشد.

۶ معیارهای پتانسیل حفاظت کاتدی

۱-۶ کلیات

معیارهای پتانسیل مورد نیاز برای حفاظت کاتدی مواد فلزی پرکاربرد در آب دریا، آب‌های لب‌شور و گِل نمکی در جدول ۲ ارائه شده است. سایر الزامات، به‌وسیله استانداردهایی که کاربردهای خاص را پوشش می‌دهند، ارائه می‌شود. در صورت اثبات قابل اعتماد، موجه و مستند بودن سایر مقادیر، می‌توان از آن‌ها استفاده کرد.

بعضی از مواد فلزی در برخی شرایط (همانطور که در زیربندهای ۲-۹ و ۳-۹ توضیح داده شده است) تحت تأثیر مخرب پتانسیل‌های بیش از حد منفی (حفاظت بیش از حد) قرار می‌گیرند. در این موارد، معیارهای حفاظتی باید شامل یک حد منفی برای جلوگیری از این اثرات مخرب باشند (طبق جدول ۲).

معیارهای پتانسیل و مقادیر حدی مربوط به خطرات حفاظت بیش از حد، «پلاریزه» هستند و بدون خطاهای IR بیان می‌شوند.

1- Instant Off

2- Coupon Instant Off

3- Over-protection

4- Oscilloscope

اگر مستندات کافی برای یک ماده معین موجود نباشد، باید حد پتانسیل منفی خاص باتوجه به شرایط متالورژیکی و مکانیکی به وسیله آزمون در پتانسیل پلاریزه^۱ حدی تعیین شود.

پتانسیل‌های بیش از حد منفی می‌توانند برای چسبندگی پوشش‌ها نیز مضر باشد (همانطور که در بند ۱۰ توضیح داده شده است).

۲-۶ فولادهای کربن-منگنز و کم‌آلیاژ

هنگامی که فولاد کربنی در آب دریا تا $V - 0.80$ (اندازه‌گیری شده با توجه به الکتروود مرجع $AgCl/Ag$ آب دریا) یا پتانسیل‌های منفی‌تر پلاریزه می‌شود، نرخ خوردگی تا سطح پایین قابل پذیرشی کاهش می‌یابد.

در مورد فولادهای در تماس با آب‌ها یا گل حاوی مقادیر بحرانی از باکتری‌های کاهنده سولفات (در شرایط بی‌هوازی در سطح فلزی)، پتانسیل حفاظت باید $V - 0.90$ (الکتروود مرجع $AgCl/Ag$ آب دریا) به جای $V - 0.80$ باشد. در مواردی که امکان خوردگی میکروبی وجود دارد، توصیه می‌شود که از پوشش‌ها استفاده شود و در فضاهای با دسترسی محدود، توصیه می‌شود که استفاده از باکتری‌کش‌ها^۱ در نظر گرفته شود.

هنگامی که دمای سطح فولاد بالاتر از $60^{\circ}C$ بوده و دمای الکتروولیت در مجاورت سطح فولاد نیز، به دلیل اثر کم‌خنک‌کنندگی به وسیله محیط، بالا باشد (مانند سطوح مدفون در گل یا سطوح در تماس با آب دریای گرم)، پتانسیل حفاظت باید $V - 0.90$ (الکتروود مرجع $AgCl/Ag$ آب دریا) باشد. پتانسیل حفاظت برای دماهای بین $40^{\circ}C$ تا $60^{\circ}C$ ، باید بین $V - 0.80$ و $V - 0.90$ (الکتروود مرجع $AgCl/Ag$ آب دریا) درون‌یابی شود.

با منفی‌تر شدن پتانسیل، امکان تاول‌زدن^۲ یا جدایش کاتدی پوشش‌ها (طبق بند ۱۰)، اثر نامطلوب بر خواص خستگی (طبق زیربند ۳-۳-۹) و خطر HSC (ترک خوردن تنشی هیدروژنی) فولادهای با استحکام بالا به دلیل تردی هیدروژنی (طبق زیربند ۳-۳-۹) وجود دارد. برای جلوگیری از این اثرات مضر، پتانسیل باید محدود شود.

برای فولادهای کربن-منگنز و کم‌آلیاژ با $SMYS \geq 550 \text{ N/mm}^2$ ، حد منفی $V - 1.10$ (الکتروود مرجع $AgCl/Ag$ آب دریا)، از این خطرات مختلف جلوگیری می‌کند؛ و در سازه‌های حفاظت‌شده با آندهای گالوانی روی یا آلومینیم به دست می‌آید.

برای فولادهای با $SMYS < 550 \text{ N/mm}^2$ ، به‌طور کلی یک حد پتانسیل منفی در محدوده $V - 0.83$ تا $V - 0.95$ (الکتروود مرجع $AgCl/Ag$ آب دریا) مشخص می‌شود. برای یک ماده معین، باید حد پتانسیل منفی خاص باتوجه به شرایط متالورژیکی و مکانیکی به وسیله آزمون در پتانسیل پلاریزه حدی تعیین شود. برای اطلاعات بیشتر به [۱۴] کتاب‌نامه مراجعه شود.

1- Biocides

2- Blistering

یادآوری - در پی مشاهده مواردی از HSC (ترک خوردن تنش‌ی هیدروژنی) در فولادهای با استحکام بالا (برای مثال، مورد استفاده در ساخت سکوهای حفاری دریایی جک سرخود^۱)، به‌ویژه در نواحی مجاور جوش‌ها، به‌وسیله آزمون‌های نرخ آهسته کرنش اثبات شده است که آسیب هیدروژنی وارد بر فولاد ناچیز است؛ به شرطی که پتانسیل‌های کاتدی منفی‌تر از $-۰٫۸۳\text{ V}$ (الکتروود مرجع AgCl/Ag /آب دریا) نباشند^[۱۶].

جدول ۲- معیارهای پتانسیل برای حفاظت کاتدی فلزات و آلیاژهای مختلف در آب دریا

ماده	حداقل پتانسیل منفی (V نسبت به AgCl/Ag /آب دریا)	حداکثر پتانسیل منفی (V نسبت به AgCl/Ag /آب دریا)
فولادهای کربن-منگنز و کم‌آلیاژ با $\text{SMYS} \leq 550\text{ N/mm}^2$ — در محیط هوازی	-۰٫۸۰	-۱٫۱۰
— در محیط بی‌هوازی و/یا دمای فولاد بیش از $60\text{ }^\circ\text{C}$	-۰٫۹۰	-۱٫۱۰
فولادهای با استحکام بالا ($550\text{ N/mm}^2 < \text{SMYS}$)	-۰٫۸۰	-۰٫۸۳ تا -۰٫۹۵ الف
آلیاژهای آلومینیوم (Al Mg Si و Al Mg)	-۰٫۸۰ (نوسان پتانسیل منفی، 0.10 V)	-۱٫۱۰
فولادهای آستنیتی یا آلیاژهای نیکل حاوی کروم و/یا مولیبدن — ($\text{PREN} \geq 40$)	-۰٫۳۰	برای آستنیتی کامل، بدون محدودیت؛ وگرنه به پانوشت پ مراجعه شود.
— ($\text{PREN} < 40$)	ب -۰٫۵۰	برای آستنیتی کامل، بدون محدودیت؛ وگرنه به پانوشت پ مراجعه شود.
فولادهای زنگ‌زن دوفازی یا مارتنزیتی	ب -۰٫۵۰	به پانوشت پ مراجعه شود.
آلیاژهای مس — بدون آلومینیوم	-۰٫۴۵ تا -۰٫۶۰	بدون محدودیت
— با آلومینیوم	-۰٫۴۵ تا -۰٫۶۰	-۱٫۱۰
آلیاژهای نیکل-مس	-۰٫۵۰	به پانوشت ت مراجعه شود.

الف توصیه می‌شود که حد پتانسیل منفی، به‌وسیله آزمون فولاد استحکام بالا برای شرایط متالورژیکی و مکانیکی خاص تعیین شود (طبق زیربند ۹-۳-۲).

ب برای اغلب کاربردها، این پتانسیل‌ها برای حفاظت درمقابل خوردگی شیاری کافی هستند؛ اگرچه در صورت مستندبودن، پتانسیل‌های مثبت‌تر ممکن است در نظر گرفته شوند.

ج بسته به ساختار متالورژیکی، این آلیاژها می‌توانند مستعد ترک خوردن تنش‌ی هیدروژنی (HSC) باشند و توصیه می‌شود که از پتانسیل‌های بیش از حد منفی پرهیز شود (طبق زیربندهای ۶-۳-۲ و ۹-۳-۲).

ت آلیاژهای نیکل-مس با استحکام بالا می‌توانند در معرض HSC قرار گیرند و توصیه می‌شود که از پتانسیل‌هایی که منجر به آزادشدن مقدار قابل توجه هیدروژن می‌شوند، پرهیز شود (طبق زیربند ۹-۳-۲).

شکل ۳ چکیده‌ای از «اثرات پتانسیل بر فولادها در آب دریا» را نسبت به «الکترودهای مرجعی که معمولاً در آب دریا استفاده می‌شوند»، نشان می‌دهد.



شکل ۳- الگوهای خوردگی، حفاظت کاتدی و پلاریزه شدن بیش از حد فولاد به عنوان تابعی از پتانسیل الکتروود مرجع

۳-۶ سایر مواد فلزی

۱-۳-۶ کلیات

اطلاعات کلی در مورد خوردگی مواد فلزی، به غیر از فولادهای کربن- منگنز یا فولادهای کم آلیاژ، که معمولاً تحت حفاظت کاتدی در آب دریا قرار دارند، در پیوست ت ارائه شده است.

۲-۳-۶ فولادهای زنگ نزن

۱-۲-۳-۶ نقش ریزساختار

ریزساختار آستنیتی با گستره وسیعی از پتانسیل های تجربه شده در حفاظت کاتدی سازگار است. ریزساختارهای فریتی و مارتنزیتی ممکن است در پتانسیل های بسیار منفی متحمل تَر دی هیدروژنی به شکل HSC (ترک خوردن تنشی هیدروژنی) شوند؛ که حالتی غیر شکل پذیر از خرابی به دلیل برهم کنش بین تنش ها، حفاظت کاتدی و یک ماده مستعد است (طبق زیربند ۲-۳-۹).

۲-۲-۳-۶ فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی

به‌طور کلی، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی را می‌توان با استفاده از پتانسیل $V \pm 0.50$ (الکتروود مرجع Ag/AgCl/آب دریا) حفاظت کرد؛ ولی برای فولادهای زنگ‌نزن مقاوم‌تر به خوردگی ($PREN \geq 40$)، پتانسیل $V \pm 0.30$ (الکتروود مرجع Ag/AgCl/آب دریا) برای اغلب کاربردها قابل پذیرش است.

با این حال، با توجه به گستره وسیع فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی موجود، توصیه می‌شود که سایر پتانسیل‌ها تنها هنگامی استفاده شوند، که با عملکرد سرویس مستند شده یا آزمون‌های آزمایشگاهی مناسب اثبات شوند. اگر فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی بیش از حد پلاریزه شوند، در صورتی که ساختار متالورژیکی آن‌ها کاملاً آستنیتی باشد، در مقابل HSC آسیب‌پذیر نیستند. با این حال، هنگامی که فازهای فریتی و/یا مارتنزیتی وجود داشته باشند (برای مثال، به دلیل تغییر شکل سرد یا جوشکاری)، باید محدودیت‌های یکسان با فولادهای زنگ‌نزن دوفازی (طبق زیربند ۳-۲-۳-۶) رعایت شود (به DNV RP B401^[17] مراجعه شود).

۳-۲-۳-۶ فولادهای زنگ‌نزن دوفازی

مانند فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، ممکن است حد مثبت پتانسیل برای حفاظت از فولادهای زنگ‌نزن دوفازی در نظر گرفته شود (طبق زیربند ۳-۲-۳-۶).

در صورت نامناسب بودن ساختار متالورژیکی این آلیاژها (برای مثال، اگر حاوی فریت بیش از حد، اندازه دانه درشت یا دانه‌های ناهم‌تراز^۱ باشند)، ممکن است هنگامی که به‌صورت کاتدی حفاظت می‌شوند، مستعد تردی هیدروژنی به شکل HSC شوند. جوش‌ها و نواحی متأثر از گرما^۲ (HAZ) در آن‌ها محتمل‌ترین مکان برای این ریزساختارهای نامطلوب هستند. ریزساختار در صورتی مناسب است که یک تعادل فازی خوب وجود داشته باشد؛ یعنی حداقل ۴۰٪ درصد آستنیت در ریزساختار وجود داشته باشد و فلز پایه پس از آنیلینگ محلولی^۳ به‌درستی سردسازی^۴ شده باشد. جوش‌ها و نواحی متأثر از گرما در آن‌ها به شرطی که مقدار و توزیع آستنیت رضایت‌بخش باشد، به همان اندازه در مقابل ترک خوردن مقاوم خواهند بود.

فولادهای زنگ‌نزن دوفازی که دارای ریزساختارهای مناسب فلز پایه و فلز جوش هستند، در صورتی که حداکثر پتانسیل منفی آن‌ها در آب دریا $V \pm 0.5$ باشد (الکتروود مرجع Ag/AgCl/آب دریا) باشد، به‌طور معمول مستعد HSC نیستند.

در مواردی که ریزساختار ماده یا ناحیه جوش در شرایط بهینه نباشد، توصیه می‌شود که از یک حد پتانسیل کمتر منفی استفاده شود. اگر پتانسیل طراحی سازه منفی تر از $V \pm 0.80$ باشد (الکتروود مرجع Ag/AgCl/آب دریا) باشد، ارزیابی ویژه‌ای باید انجام شود تا اطمینان حاصل شود که خطر HSC به حداقل می‌رسد^{[۹] و [۲۳]}.

¹ - Misaligned

² - Heat affected zone

³ - Solution annealing

⁴ - Quench

این مطالعه ارزیابی باید تمام سهم‌های نیرو در ایجاد تنش و کرنش را در نظر بگیرد. DNV-RP-F112 می‌تواند برای ارزیابی تنش‌ها و کرنش‌های قابل پذیرش استفاده شود^[۱۳].

۴-۲-۳-۶ فولادهای زنگ‌زن مارتنزیتی

مانند فولادهای زنگ‌زن آستنیتی، ممکن است حد مثبت پتانسیل برای حفاظت از فولادهای زنگ‌زن مارتنزیتی در نظر گرفته شود (طبق زیربند ۴-۲-۳-۶).

اگر پتانسیل طراحی سازه منفی‌تر از $V_{0.80}$ (الکتروود مرجع $AgCl/Ag$ آب دریا) باشد، HSC خطری قابل توجه برای فولادهای زنگ‌زن مارتنزیتی ایجاد می‌کند. برای اطمینان از به حداقل رسیدن خطر HSC، باید ارزیابی ویژه‌ای با توجه به تنش‌ها و کرنش‌ها انجام شود. برای اطلاعات بیشتر به مرجع [۲۳] کتاب‌نامه مراجعه شود.

۳-۳-۶ آلیاژهای نیکل

حفاظت کاتدی آلیاژهای نیکل آستنیتی حاوی کروم و مولیبدن به‌عنوان عناصر آلیاژی اصلی ممکن است با استفاده از معیارهای حفاظتی مشابه با فولادهای زنگ‌زن آستنیتی انجام شود (طبق زیربند ۴-۲-۳-۶).

آلیاژهای مس-نیکل برای مقاصد مقاوم به خوردگی در کاربردهای مختلف در محیط دریایی از جمله روکش فلزی لوله‌های عمودی^۱، بست‌ها^۲، محورهای پروانه^۳ و جعبه‌های آب^۴ استفاده شده‌اند. در بیشتر موارد، این اقلام با پتانسیلی در گستره $V_{0.80}$ تا $V_{1.10}$ (الکتروود مرجع $AgCl/Ag$ آب دریا) به نواحی بزرگی از سازه‌های فولادی متصل می‌شوند؛ ولی پتانسیل‌هایی در حدود $V_{0.20}$ (الکتروود مرجع $AgCl/Ag$ آب دریا) می‌توانند برای حفاظت کافی باشد.

شکست پیچ‌های ساخته‌شده از آلیاژهای استحکام بالای نیکل-مس و نیکل-کروم-آهن در زیر دریا گزارش شده است. نوع شکست به هیدروژن تولیدشده در عملیات عادی آندهای فداشونده و سامانه‌های حفاظت کاتدی جریان‌رسانی نسبت داده شده است، که باعث تخریب مواد می‌شود.

در حال حاضر توصیه مقادیر ایمن حفاظت کاتدی برای این مواد ممکن نیست؛ ولی به‌نظر می‌رسد که آزمون‌های کشش با نرخ آهسته کرنش با استفاده از آزمون‌های شارژشده با هیدروژن را می‌توان برای غربال‌گری مواد مستعد تخریب هیدروژنی استفاده کرد.

۴-۳-۶ آلیاژهای آلومینیم

1- Risers
2- Fasteners
3- Propeller shafts
4- Water boxes

پتانسیل آلیاژهای آلومینیم-منیزیم و آلومینیم-منیزیم-سیلیسیوم در آب دریا عموماً در گستره $V - 0.70$ تا $V - 0.90$ (الکتروود مرجع $AgCl/Ag$ آب دریا) است؛ و می‌توان آن‌ها را در آب دریا با یک نوسان پتانسیل منفی $V - 0.10$ نسبت به پتانسیل خوردگی، به صورت کاتدی حفاظت کرد.

حد منفی معمولاً $V - 0.10$ (الکتروود مرجع $AgCl/Ag$ آب دریا) در نظر گرفته می‌شود. از پتانسیل‌های منفی‌تر به‌ویژه در شرایط راکد^۱ باید پرهیز شود؛ زیرا قلیای تولیدشده می‌تواند به‌شدت به آلومینیم حمله کرده و تولید آلومینات کند. آندهای روی و آلومینیم، به‌غیر از آندهای آلومینیم حاوی جیوه، را می‌توان برای حفاظت از آلومینیم استفاده کرد.

۵-۳-۶ آلیاژهای مس

چگالی جریان مورد نیاز برای حفاظت آلیاژهای مس یا جفت‌های آلیاژی آهن/مس می‌تواند به‌طور قابل توجهی بیشتر از چگالی مورد نیاز برای حفاظت فولاد به‌تنهایی باشد؛ به‌ویژه هنگامی که سطح مس عاری از اکسید باشد. با این حال، در مواردی که نرخ خوردگی فقط با احیای اکسیژن محلول کنترل می‌شود، چگالی جریان از جریان حدی برای احیای اکسیژن فراتر نخواهد رفت.

۷ ملاحظات طراحی

۱-۷ مقدمه

هدف از این بند ارائه طرح کلی از برخی از عواملی است که می‌توانند بر طراحی یک سامانه حفاظت کاتدی تأثیر گذارند. اطلاعات با جزئیات بیشتر، در هر یک از استانداردهای مربوط ارائه شده است.

هنگام طراحی یک سامانه حفاظت کاتدی، مهم است که اطمینان حاصل شود که کل سازه به‌اندازه کافی حفاظت می‌شود و نواحی به‌طور اساسی بیش از حد پلاریزه نمی‌شوند؛ تا از اثرات نامطلوب احتمالی ذکرشده در بندهای ۹ و ۱۰ پرهیز شود.

با استفاده از آندهای گالوانی، که منابع ولتاژپایین جریان هستند، دستیابی به توزیع به‌اندازه کافی یکنواخت جریان چندان دشوار نیست؛ به شرطی که بتوان آندها را تقریباً متناسب با سطح نمایان توزیع کرد. با این حال، اگر مساحت موضعی فولاد زیاد باشد و محدودیت‌هایی در محل آندها وجود داشته باشد (برای مثال، در مسیر گره‌ها و غیره)؛ ممکن است مشکلاتی ایجاد شود. در این شرایط، استفاده از پوشش‌ها می‌تواند سودمند باشد.

آندهای جریان‌رسانی را می‌توان به‌عنوان منبع نقطه‌ای جریان‌بالا در نظر گرفت. این مورد باید در طراحی در نظر گرفته شود؛ تا بتوان حفاظت کافی در نواحی دورتر از آندها را بدون پلاریزه‌شدن بیش از حد در نواحی مجاور آندها، به‌دست آورد. به‌منظور دستیابی به توزیع مناسب حفاظت، ممکن است استفاده از سپرهای دی‌الکتریک در نواحی مجاور آندها یا نصب آندها در فاصله‌ای از سازه مفید باشد.

اطلاعات لازم برای طراحی یک سامانه جامع حفاظت کاتدی تا حد زیادی به نوع، پیچیدگی و پارامترهای عملیاتی سازه بستگی دارد. به طور کلی اطلاعات لازم شامل موارد زیر است:

الف- داده‌های فنی و عملیاتی سازه؛

ب- تقاضای جریان^۱.

۲-۷ داده‌های فنی و عملیاتی

۱-۲-۷ عمر طراحی

برای بسیاری از سازه‌ها مانند سازه‌های فراساحلی ثابت و خطوط لوله، توصیه می‌شود که سامانه توانایی حفاظت از سازه حین عمر کامل طراحی آن را داشته باشد؛ اما برای کشتی‌ها و سایر سازه‌های شناور که قابلیت پهلوگیری در اسکله خشک^۲ را دارند و با آندهای گالوانی حفاظت می‌شوند، توصیه می‌شود که عمر طراحی سامانه مطابق با فاصله زمانی اتصال کشتی/سازه^۳ باشد.

همچنین توصیه می‌شود که عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی شامل دوره‌های غیرعملیاتی (مانند ساخت، آزمون، ذخیره‌سازی، حمل و نقل، نصب و غیره) باشد، که سازه یا کشتی در معرض آب دریا قرار می‌گیرد.

۲-۲-۷ مواد ساخت

نوع مواد مورد حفاظت باید فولادهای با استحکام بالا، فولادهای زنگ‌نزن دوفازی و آلیاژهای غیرآهنی خاص باشند. این مواد در صورت قرارگرفتن در معرض پتانسیل‌های بیش از حد منفی (پلاریزه‌شدن بیش از حد)، مستعد کاهش خواص مکانیکی هستند؛ و توصیه می‌شود که توصیه‌های ارائه‌شده در بند ۵ نیز باتوجه به حداکثر حد منفی رعایت شوند.

این موضوع می‌تواند بر انتخاب سامانه‌ها، محل آندها و استفاده احتمالی از پوشش‌ها یا سپرهای دی‌الکتریک نیز اثر گذارد.

۳-۷ سطوحی که باید حفاظت شوند

توصیه می‌شود که تمام سطوح غوطه‌ور بیرونی (شامل سطوح زیر تراز متوسط آب^۴ سازه‌های ثابت فراساحلی) به وسیله حفاظت کاتدی، حفاظت شوند. این موضوع، شامل سازه اصلی و سایر متعلقات آن می‌شود.

هنگامی که مساحت کاتد در نظر گرفته می‌شود، معمولاً به سطح غوطه‌ور ظاهری^۵ اشاره می‌شود؛ و این را می‌توان از نقشه‌های ابعادی و با جزئیات کامل سازه محاسبه کرد. با این حال، سطح دچار خوردگی یا هوازده زیر خواهد بود؛ و مساحت واقعی سطح می‌تواند به طور قابل توجهی بیشتر باشد. برای عناصری از سازه که

1- Current demand

2- Dry dock

3- Docking

4- Mean water level

5- Superficial immersed area

مدفون بوده و از نظر الکتریکی با سازه پیوسته هستند، توصیه می‌شود که حد مجاز جبرانی در نظر گرفته شود.

۴-۷ پوشش‌های حفاظتی

در حالی که پوشش‌های آلی در مقابل اکسیژن و آب به‌طور کامل غیرقابل نفوذ نیستند، هنگامی که روی سطح فلز اعمال می‌شوند، خوردگی را محدود می‌کنند. در یک سطح پوشش‌شده، خوردگی در زیر پوشش سالم رخ نمی‌دهد؛ بلکه در ریشه رخنه‌ها^۱ و روزنه‌ها^۲ رخ می‌دهد. اگر حفاظت کاتدی روی سطح پوشش‌شده اعمال شود، پوشش به‌عنوان یک سدگر مقاومتی قابل توجه در مقابل جاری شدن جریان عمل می‌کند و جریان به‌سمت رخنه‌ها یا روزنه‌ها جاری می‌شود. از نظر حفاظت کاتدی، اثر پوشش‌ها کاهش سطح فولاد نمایان و در نتیجه کاهش جریان کلی مورد نیاز برای حفاظت و بهبود توزیع جریان است.

یادآوری - استفاده از پوشش‌ها ممکن است برای بخش‌هایی از سازه‌های غوطه‌ور که نیاز به بازرسی مکرر برای ترک‌های خستگی دارند، مناسب نباشد؛ برای مثال، گره‌های بحرانی جوش داده‌شده سازه‌های ژاکتی.

۵-۷ فراهمی توان الکتریکی

استفاده از حفاظت کاتدی جریان اعمالی، به فراهمی تامین پیوسته توان الکتریکی بستگی دارد.

۶-۷ محدودیت‌های وزنی

در مورد سازه‌های دریایی ثابت، وزن شناور می‌تواند بسیار مهم باشد و ممکن است بر نوع سامانه مورد استفاده اثر گذارد. استفاده از یک سامانه ترکیبی می‌تواند به‌طور قابل توجهی وزن را در مقایسه با وزن سامانه آند گالوانی کامل کاهش دهد.

۷-۷ سازه‌های مجاور

وجود سازه‌های دیگر در مجاورت سازه حفاظت‌شده می‌تواند منجر به خوردگی به‌وسیله جریان‌های سرگردان یا خروج جریان از سازه حفاظت‌شده شود. به‌منظور حفاظت، توصیه می‌شود که عایق کاری یا اتصال به یکدیگر همراه با حد مجاز جبرانی برای مواد اضافی در نظر گرفته شود.

۸-۷ ملاحظات نصب

نصب آند گالوانی ممکن است نیاز به تعداد زیادی آند برای متصل شدن به سازه داشته باشد، و به‌دلیل تمرکزهای تنش ممکن است محدودیت‌هایی در محل الصاق آندها وجود داشته باشد.

در حالی که ممکن است بتوان از آندهای جریان اعمالی کمتری استفاده کرد، مسیریابی کابل‌های تغذیه آندها و الکترودهای مرجع می‌تواند مشکلاتی را ایجاد کند. برای اطمینان از آب‌بندی، توصیه می‌شود که کابل‌ها تا حد امکان با استفاده از چیدمان مناسب بستاب^۳ در محل‌های نفوذ، از سازه عبور داده شوند.

1- Holidays
2- Pin holes
3- Cofferdam

در مواردی که کابل ها از میان مجراهای الصاق شده به سازه عبور می کنند، توصیه می شود که این مجراها به صورت مناسب طراحی شوند؛ تا در برابر تمام شرایطی که ممکن است با آن مواجه شوند، مقاومت کنند.

برای کاهش خطر آسیب کابل حین عملیات، توصیه می شود که از طول های بلند کابل بدون تکیه گاه پرهیز شود.

در مواردی که کابل ها از مناطق خطرناک عبور می کنند، باید اقدامات احتیاطی مناسب انجام شود. هشدار - حفاظت کاتدی در محفظه های بسته بدون تهویه ممکن است باعث ایجاد گاز هیدروژن به اندازه ای شود که در نهایت یک مخلوط گاز انفجاری، یعنی هیدروژن/اکسیژن، ایجاد شود.

برای آگاهی بیشتر به DNV-RP-B401 مراجعه شود.

۷-۹ تقاضای جریان

همانطور که در بند ۵ بحث شد، معیار حفاظت این است که پتانسیل فلز نسبت به الکترولیت مجاور و در تماس با آن، در تمام موقعیت ها منفی تر از پتانسیل های حفاظتی مناسب برای آن فلز خاص باشد. جریان مورد نیاز برای دستیابی به این منظور با توجه به نوع سازه ای که باید حفاظت شود و شرایط محیطی حاکم، متفاوت است.

توصیه هایی برای چگالی های جریان مورد استفاده در هر کاربرد عملی در استانداردهای ملی/بین المللی مربوط ارائه شده است.

عوامل محیطی مختلف که بر الزامات جریان اثر می گذارند، در بند ۸ مورد بحث قرار گرفته اند.

توصیه می شود که به منظور تامین ظرفیت پلاریزه کنندگی کافی و حفظ حفاظت کاتدی در طول عمر طراحی، تقاضای جریان (I_c) برحسب A ، مطابق با معادله ۱ محاسبه می شود.

(۱)

که در آن:

A_c مساحت سطح هر واحد حفاظت کاتدی، برحسب m^2 ؛

i_c چگالی جریان طراحی، برحسب A/m^2 ؛

f_c ضریب گسیختگی پوشش است.

مقادیر i_c و f_c مطابق با DNV-RPB401 انتخاب می شوند.

برای سازه های با سطوح اصلی فلز بدون پوشش، تقاضاهای جریان حفاظت کاتدی برای پلاریزاسیون اولیه (I_{ci}) و پلاریزاسیون در پایان عمر طراحی (I_{cf})، به ترتیب باید همراه با میانگین تقاضای جریان (I_{cm}) مورد نیاز برای حفظ حفاظت کاتدی در طول دوره طراحی محاسبه شوند. برای سازه های مورد حفاظت که تقاضای جریان عمدتاً مربوط به سطوح پوشش شده است، تقاضای جریان اولیه ممکن است در محاسبات طراحی

حذف شود. توصیه می‌شود که برای مراجعات بعدی، تمام داده‌های محاسبه‌شده در گزارش طراحی مستند شوند.

۸ اثر عوامل محیطی بر تقاضای جریان

۱-۸ مقدمه

مشخصه‌های شیمیایی و فیزیکی محیط و سرعت تغییر روزانه یا فصلی آن‌ها نیاز است در ارزیابی الزامات چگالی جریان در نظر گرفته شوند. سرعت حرکت آب، شوری، pH، دما و عمق آب و تأثیر آن‌ها بر مقدار اکسیژن محلول، رسوبات آهکی و رسوب دریایی^۱، عوامل اصلی مؤثر بر الزامات چگالی جریان در آب دریا هستند.

این بند، طرح کلی اثر احتمالی این عوامل بر الزامات چگالی جریان را ارائه می‌دهد.

۲-۸ اکسیژن محلول

یکی از مهم‌ترین عواملی که در طراحی سامانه حفاظت کاتدی باید در نظر گرفت، مقدار اکسیژن محلول در آب دریا است.

فرض بر این است که یک هم‌بستگی^۲ مستقیم بین مقدار اکسیژن محلول و نرخ خوردگی در آب دریا وجود دارد؛ و چگالی جریان کاتدی لازم برای حفاظت در مقابل خوردگی، با سرعت نفوذ اکسیژن محلول در سطح فولاد متناسب است.

مقدار اکسیژن محلول در آب دریا به‌طور قابل توجهی با عمق آب و موقعیت جغرافیایی تغییر می‌کند؛ و از آنجایی که حلالیت تابعی از دما و شوری است، مقدار اکسیژن محلول می‌تواند با فصل نیز تغییر کند.

۳-۸ جریان‌های آب دریا

باتوجه به اینکه نرخ انتقال اکسیژن محلول به سطح فولاد تحت کنترل نفوذ است، افزایش جریان‌های آب دریا باعث افزایش الزامات چگالی جریان حفاظت کاتدی برای فولاد بدون پوشش می‌شود؛ به‌ویژه حین پلاریزه‌شدن اولیه و قبل از اینکه رسوبات آهکی یا دریایی فرصت تشکیل داشته باشند. ته‌نشین‌های^۳ موجود در دریا می‌توانند سطح فولاد را دچار آب‌شستگی^۴ کرده و چگالی جریان لازم برای حفاظت را افزایش دهند.

۴-۸ رسوبات آهکی

رسوبات آهکی به‌خوبی شکل گرفته، نرخ نفوذ اکسیژن محلول در آب دریا به سطوح فولادی را کاهش می‌دهند و در نتیجه چگالی جریان لازم برای حفظ پلاریزه‌شدن کاتدی را کاهش می‌دهند.

1- Marine fouling

2- Correlation

3- Sediment

4- Scour

اجزای اصلی رسوبات آهکی، پلی مورف‌های کلسیم کربنات، آراگونیت^۱ و کلسیت^۲ و ترکیب منیزیمی منیزیم هیدروکسید (بروسیت^۳) هستند؛ ولی ترکیب واقعی به عواملی مانند pH، دما، چگالی جریان، سرعت جریان آب و عمق آب دریا بستگی دارد.

آب دریا، گاز کربن دی‌اکسید را از جو و همچنین از موجودات زنده دریایی نزدیک سطح اقیانوس می‌گیرد؛ که منجر به شرایط فوق اشباع کلسیم کربنات می‌شود.

واکنش‌های تعادلی کربن دی‌اکسید/کربنات و آب را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

(۳)

(۴)

(۵)

با افزودن OH⁻ به سامانه حین فرایندهای کاتدی، واکنش‌های زیر می‌توانند همراه با رسوب در نواحی کاتدی رخ دهند:

(۶)

(۷)

در گستره‌ای از چگالی جریان که پوسته‌ها^۴ تشکیل می‌شوند، آن‌ها عمدتاً از نوع کلسیم کربنات هستند. با افزایش چگالی جریان، پوسته نازک‌تر و فشرده‌تر می‌شود و حفاظت بهبود می‌یابد. به‌طور کلی توصیه می‌شود که یک چگالی جریان اولیه بالا بلافاصله پس از غوطه‌وری روی فولاد پلاریزه‌نشده القا شود؛ تا پلاریزه‌شدن کاتدی سریع رخ دهد و تشکیل رسوب آهکی با حفاظت بالا، ترویج شود. با این حال، در چگالی جریان بسیار بالا، رسوب ممکن است مقدار قابل توجهی منیزیم داشته باشد؛ که در ابتدا به صورت منیزیم هیدروکسید وجود دارد، ولی امکان تشکیل منیزیم کربنات نیز وجود دارد. منیزیم هیدروکسید در آب دریا ناپایدار است و معمولاً در pH کمتر از حدود ۹٫۷ ته‌نشین می‌شود. به‌طور کلی، رسوبات غنی از کلسیم کربنات نسبت به رسوبات غنی از منیزیم حفاظت بیشتری دارند.

۸-۵ دما

دما، اثری قابل توجه بر مقاومت ویژه آب دریا، اکسیژن محلول و تشکیل رسوب آهکی دارد.

باتوجه به اینکه دما همراه با شوری آب دریا، اثر قابل توجهی بر مقاومت ویژه آب دریا دارد و از آنجاکه این مقاومت ارتباطی مستقیم با مقاومت موثر آندهای گالوانی دارد، توصیه می‌شود که این موضوع در طراحی سامانه‌های حفاظت کاتدی در نظر گرفته شود.

1- Aragonite

2- Calcite

3- Brucite

4- Scales

اثر دما بر چگالی جریان حدی پیچیده است؛ زیرا با افزایش دما حلالیت اکسیژن کاهش ولی ثابت نفوذ آن افزایش می‌یابد. اثر خالص آن می‌تواند منجر به افزایش اندک چگالی جریان لازم با افزایش دما شود. این وضعیت با افزایش حلالیت کلسیم کربنات با کاهش دما پیچیده‌تر می‌شود. این امر، ماهیت حفاظتی رسوبات را کاهش داده و الزامات چگالی جریان برای حفاظت را به‌طور بالقوه افزایش می‌دهد.

۸-۶ شوری

اثر عمده شوری بر حفاظت کاتدی، اثر آن بر مقاومت ویژه آب دریا است و به‌طور کلی، در یک دمای معین، هر چه شوری بیشتر باشد، مقاومت ویژه و مقدار اکسیژن محلول کمتر خواهد بود.

بنابراین افزایش شوری از این نظر مفید است که سطح اکسیژن محلول و مقاومت آند را کاهش می‌دهد.

در مواردی که از سامانه‌های جریان اعمالی استفاده شود، هر گونه رقیق‌سازی با آب شیرین می‌تواند باعث نوسانات گسترده در توان مورد نیاز شود؛ و این موضوع می‌تواند منجر به آسیب‌دیدن یکسوکننده‌ها شود، مگر اینکه به‌طور مناسب حفاظت شوند.

۸-۷ pH

pH آب دریای آزاد در گستره ۷٫۴ تا ۸٫۴ متغیر است و به‌وسیله یک سامانه کربناتی پیچیده به‌شدت بافر می‌شود. با این حال، در نزدیکی بستر دریا به‌دلیل تجزیه مواد آلی، ممکن است کاهشی اندک در pH رخ دهد. این تجزیه، اکسیژن مصرف می‌کند و بنابراین نرخ خوردگی باید کاهش یابد؛ ولی کاهش pH تشکیل رسوب آهکی را به تاخیر می‌اندازد. از سوی دیگر، قلیای تولیدشده به‌وسیله واکنش‌های کاتدی، به تولید رسوبات آهکی کمک می‌کند و چگالی جریان لازم برای حفاظت را کاهش می‌دهد.

۸-۸ رسوب دریایی

رسوب دریایی بسته به نوع ماده، موقعیت جغرافیایی، عمق و فصل، با درجات مختلف روی سازه‌های دریایی تشکیل می‌شود.

رسوب دریایی، وزن و بارگذاری موج روی سازه را اضافه می‌کند، هزینه‌های نگهداشت را افزایش می‌دهد و می‌تواند پوشش را تخریب کند. همچنین، سطح موثر فولاد در معرض آب دریا را کاهش می‌دهد و از نفوذ اکسیژن به سطح جلوگیری می‌کند؛ و در نتیجه چگالی جریان لازم برای حفاظت را کاهش می‌دهد. اگرچه، از طرف دیگر، موجودات زنده در رسوب دریایی می‌توانند در رسوبات آهکی به‌دام افتند و پس از مرگ موجود زنده، باعث ایجاد حفره در رسوب شوند. ریزمحیط^۱ تولیدشده در اثر مرگ موجود زنده می‌تواند برای نرخ‌های بالای خوردگی شرایط مساعدی را ایجاد کند.

بعید است که روی آندهای جریان اعمالی از نوع فلزات گران‌بها، حین کار رسوب دریایی شکل گیرد؛ و اگرچه ممکن است رسوب دریایی روی آندهای گالوانی تشکیل شود، این احتمال وجود دارد که پوسته سخت فقط بخش‌هایی از آن‌ها را بپوشاند و کارایی آن‌ها را کاهش دهد.

۸-۹ اثر عمق

تغییرات عمق احتمالا همراه با تغییرات دما، انحلال پذیری اکسیژن و نرخ‌های جریان دی‌اکسید کربن و سایر پارامترهای محیطی است. توصیه می‌شود که این موارد و به‌ویژه اثر آن‌ها بر تشکیل رسوبات آهکی در نظر گرفته شود.

اثر عمق به‌تنهایی بر الزامات چگالی جریان حفاظت کاتدی واضح نیست، ولی بعید است که اثری قابل توجه داشته باشد.

به‌نظر می‌رسد که تغییر عمق، اثر اندکی بر عملکرد آندهای آلومینیم و روی دارد.

با افزایش عمق، فشار هیدروستاتیک بر تردی هیدروژنی فولادهای با مقاومت کششی بالا که به‌وسیله حفاظت کاتدی حفاظت می‌شوند، اثر می‌گذارد. در آزمون‌ها، نیروی لازم برای شکست آزمون‌های شکافدار فولادی با مقاومت کششی بالا با افزایش فشار هیدروستاتیک کاهش می‌یابد؛ اگرچه نرخ نفوذ هیدروژن، تحت تأثیر افزایش فشار قرار نمی‌گیرد.

۸-۱۰ تغییرات فصلی و طوفان‌ها

تغییرات دمای آب نزدیک به سطح و طوفان‌هایی که اغلب با تغییرات فصلی همراه هستند، احتمالا باعث شکست رسوبات آهکی می‌شوند؛ و این موضوع می‌تواند منجر به افزایش الزامات چگالی جریان در سازه‌های نزدیک به سطح شود.

۹ اثرات ثانویه حفاظت کاتدی**۹-۱ کلیات**

اِعمال حفاظت کاتدی می‌تواند منجر به اثرات ثانویه مانند ایجاد قلیابیت و تولید هیدروژن در سازه حفاظت‌شده و تولید گاز کلر روی آندهای جریانِ اِعمالی شود.

اثراتی که ممکن است رخ دهد، شامل موارد ارائه‌شده زیربندهای ۹-۲ تا ۹-۵ است.

۹-۲ قلیابیت

قلیابیت می‌تواند پوشش‌های آلکیدی پایه‌روغنی و اولئو-رزینی^۱ را به‌وسیله فرایند صابونی‌کردن^۲ تخریب کند (طبق بند ۱۰). قلیابیت به تشکیل رسوبات آهکی کمک می‌کند که می‌تواند مفید باشد؛ زیرا چگالی جریان مورد نیاز برای حفظ حفاظت کاتدی کاهش می‌یابد. با این حال، این رسوبات ممکن است باعث زبری پره‌ها یا پروانه‌ها شود؛ که این موضوع می‌تواند اثرات حفره‌زایی^۳ در سایر نقاط سامانه ایجاد کند.

اگر فلز حفاظت شده آسفوتر باشد، ممکن است به‌وسیله قلیا مورد حمله قرار گیرد. آلومینیم نسبت به این اثر حساس است و بنابراین توصیه می‌شود که حفاظت کاتدی فقط هنگامی روی آن اعمال شود که پتانسیل در

1- Oleo-resinous

2- Saponification

3- Cavitation

محدوده خاصی حفظ شود (طبق بند ۵). در شرایط راکد، پوشش‌های حاوی رنگدانه آلومینیم نیز ممکن است به‌وسیله قلیا تخریب شوند.

در شرایط استثنایی، ممکن است سرب نیز مورد حمله قرار گیرد؛ ولی غلظت قلیا در الکترولیت باید بالا باشد.

۳-۹ ترک خوردن ناشی از محیط

۱-۳-۹ کلیات

دو مورد از الزامات اساسی طراحی برای سازه‌های دریایی این است که دارای استحکام استاتیکی و دوام خستگی کافی باشند. هر دو مورد به‌وسیله «ترک خوردن به کمک محیط» آسیب می‌بینند؛ و بنابراین لازم است، اثر حفاظت کاتدی بر این پدیده در نظر گرفته شود.

ترک خوردن به کمک محیط، شامل خستگی خوردگی و تردی هیدروژنی می‌شود؛ و اعمال سطوح مختلف حفاظت کاتدی ممکن است به‌طور قابل توجهی بر حساسیت و مقاومت مواد به این پدیده اثر گذارد.

۲-۳-۹ تردی هیدروژنی

به‌طور کلی چنین فرض می‌شود که در نتیجه اعمال حفاظت کاتدی در پتانسیل‌های منفی‌تر، هیدروژن اتمی تولید می‌شود، که به دلیل اندازه کوچک خود می‌تواند در شبکه فلز نفوذ کند؛ در حالی که هیدروژن مولکولی که بسیار بزرگتر است، این توانایی را ندارد.

اثرات تردکنندگی هیدروژن در فولاد وابسته به حضور هیدروژن در فریت یا مارتنزیت است، که خواص پلاستیک فولاد را مختل می‌کند. تحت این شرایط، هنگامی که فولاد با نرخ و در دمای مناسب تحت کرنش قرار می‌گیرد، نمی‌تواند به‌صورت پلاستیک جریان یابد؛ تا یک شکاف یا محل تمرکز تنش را به‌صورت موضعی اصلاح کند. در نتیجه، یک ترک ایجاد می‌شود و به دنبال آن شکست ترد می‌تواند رخ دهد. برای اینکه این مورد رخ دهد، هیدروژن نیاز به زمان دارد تا به مکان حرکت نابجایی‌ها^۱ نفوذ کرده و از جریان پلاستیک جلوگیری کند. بنابراین تردی هیدروژنی به احتمال زیاد در نرخ‌های آهسته کرنش رخ می‌دهد. در دماهای پایین، نرخ نفوذ هیدروژن ممکن است برای برهم‌کنش با حرکت نابجایی‌ها بسیار کم باشد؛ در حالی که در دماهای بالا هیدروژن در ایجاد تردی بی‌تأثیر است.

پدیده HSC (ترک خوردن تنشی هیدروژنی)، به‌عنوان پیامد تردی هیدروژنی، حالتی از شکست غیر شکل‌پذیر است؛ که در اثر برهم‌کنش بین تنش‌ها، حفاظت کاتدی و ماده مستعد ایجاد می‌شود. برای اطمینان از به حداقل رسیدن خطر HSC، اغلب یک ارزیابی ویژه لازم است. بخش اصلی ارزیابی، در نظر گرفتن تنش‌ها و کرنش‌ها است. سهم تمام نیروها در ایجاد تنش و کرنش باید در نظر گرفته شود.

برای آگاهی بیشتر به DNV-RPB401 مراجعه شود.

۳-۳-۹ خستگی خوردگی

1- Dislocation

خستگی، فرایندی شامل شروع ترک همراه با تاخیر زمانی و گسترش نسبتاً آهسته ترک است؛ که می‌تواند در سازه‌های فلزی تحت بارگذاری چرخه‌ای، رخ دهد. به‌طور کلی، هر چه تنش چرخه‌ای بیشتر باشد، تعداد چرخه‌های لازم برای شکست کمتر می‌شود. وجود ترک‌های خستگی یا خستگی خوردگی می‌تواند استحکام استاتیکی و توانایی تحمل بار سازه‌های فولادی را تا حد زیادی کاهش دهد.

به‌طور کلی، ترک‌های خستگی معمولاً از نواقص مختلف، عیوب یا نواحی تمرکز تنش آغاز می‌شوند؛ و در سازه‌های جکت^۱ فولادی فراساحلی همواره از پنجه جوش‌ها^۲ که در آن تنش پسماند بالاترین مقدار است، شروع می‌شوند (همان‌طور که در استاندارد BS 7608 توضیح داده شده است).

در مورد خاص فولادهای کربنی و کم‌آلیاژ، در غیاب خوردگی، این فولادها یک حد خستگی را نشان می‌دهند؛ که گستره تنشی است که در زیر آن ترک خستگی رخ نمی‌دهد. همان‌طور که در منحنی معمول S-N (حداکثر تنش دینامیکی در مقابل تعداد چرخه‌های خستگی قبل از ترک خوردن) نشان داده شده است (طبق شکل ۴)، این پدیده معمولاً در تقریباً 10^7 چرخه رخ می‌دهد. کدهای طراحی سازه‌ها، بر اساس این حد خستگی هستند.

در صورت وجود محیط خورنده، ترک خوردن در زمانی کوتاه‌تر نسبت به هنگامی که فقط تنش‌های نوسانی وجود دارند، رخ می‌دهد. در صورتی که خوردگی نیز رخ دهد، استحکام خستگی برای همان تعداد چرخه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد؛ و مهم‌تر از آن، این است که دیگر هیچ حد خستگی وجود ندارد.

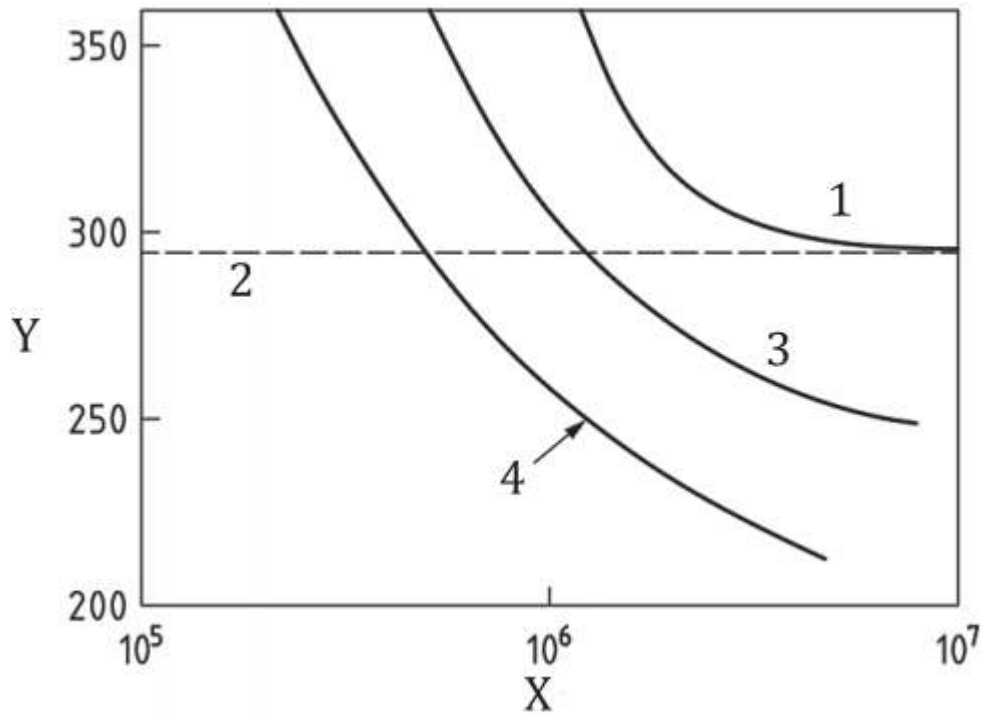
شکل ۴، اثر محیط خورنده روی منحنی S-N را نشان می‌دهد.

اعمال مناسب حفاظت کاتدی، مقاومت به خستگی مواد در معرض آب دریا را بهبود می‌دهد؛ اگرچه ممکن است امکان دستیابی به همان سطح مقاومت به خستگی اندازه‌گیری شده در محیط‌های بدون آلودگی خورنده وجود نداشته باشد. به همین دلیل، در مواردی که خطر خستگی خوردگی وجود دارد، ضروری است که حفاظت کاتدی مطابق با معیارهای مشخص شده در این استاندارد اعمال شود. کدهای سازه‌ای مربوط به خستگی، هیچ‌گونه خوردگی احتمالی را در نظر نمی‌گیرند.

با این حال، پتانسیل‌های بیش از حد منفی ممکن است سرعت گسترش ترک‌ها را تشدید کند (طبق زیربند ۲-۶).

1- Jacket

2- Toes of welds



راهنما:

- 1 هوا
- 2 حد خستگی هوا
- 3 آب
- 4 محلول کلرید سدیم
- X تعداد چرخه‌ها
- Y حداکثر تنش (N/mm²)

شکل ۴- منحنی S-N معمول برای رفتار خستگی فولاد در محیط‌های مختلف

۴-۹ کلر

در تاسیسات حفاظت کاتدی جریان‌های عملی در یک محیط دریایی، واکنش‌های آندی منجر به تشکیل الکتروشیمیایی کلر می‌شوند. آب دریا معمولاً اندکی قلیایی است و کلر آن باعث تشکیل سدیم هیپوکلریت^۱ و هیپوکلرو اسید^۲ می‌شود. در شرایط راکد، کلر می‌تواند به گاز تبدیل شود و این می‌تواند خطری برای کارکنان بازرسی و نگهداشت باشد.

سدیم هیپوکلریت می‌تواند نرخ خوردگی بسیاری از آلیاژها را افزایش دهد، و توصیه می‌شود که این موضوع به‌ویژه در مواردی که یک سامانه جریان‌های عملی برای شرایط راکد پیشنهاد می‌شود و در مواردی که سدیم هیپوکلریت می‌تواند تغلیظ شود، در نظر گرفته شود.

1- Sodium hypochlorite
2- Hypochlorous acid

۵-۹ جریان‌های سرگردان و اثرات تداخلی

در مواردی که یک سازه حفاظت‌شده، یا آندها یا بسترها در نزدیکی سایر سازه‌های فلزی غوطه‌ور یا مدفونی قرار دارند که به‌طور کامل از زمین عایق نشده‌اند، سازه فلزی ممکن است، به‌دلیل شیب بالقوه در آب یا گل، بخشی از جریان حفاظتی را گرفته و در نقاط دیگر آن را به زمین برگرداند؛ که منجر به خوردگی آن سازه می‌شود.

روش غلبه بر این اثر بستگی به شرایط دارد؛ ولی ممکن است شامل استفاده از اتصالات تخلیه جریان^۱، به‌وسیله فلنج‌ها یا اتصال‌های عایقی یا به‌وسیله سازه‌های عایقی با پوشش‌های مناسب باشد.

در صورت لزوم، باید الزامات و توصیه‌های مشخص‌شده در استاندارد EN 50162، در کاربردهای درون آب دریا استفاده شود.

۱۰ استفاده از حفاظت کاتدی همراه با پوشش‌ها

۱-۱۰ مقدمه

با این‌که پوشش‌های آلی در مقابل اکسیژن و آب به‌طور کامل نفوذناپذیر نیستند، هنگامی که روی سطح فلز اعمال می‌شوند، خوردگی را محدود می‌کنند. در یک سطح پوشش‌شده، خوردگی در زیر پوشش سالم رخ نمی‌دهد، بلکه در ریشه رخنه‌ها و روزنه‌ها رخ می‌دهد. اگر حفاظت کاتدی روی سطح پوشش‌شده اعمال شود، پوشش به‌عنوان یک سدگر^۲ مقاومتی قابل توجه در مقابل جاری‌شدن جریان عمل می‌کند و جریان به‌سمت رخنه‌ها یا روزنه‌ها جاری می‌شود. از نظر حفاظت کاتدی، وجود پوشش‌ها، توزیع جریان را بهبود داده و تقاضای جریان و اثرات تداخلی را کاهش می‌دهد.

در مواردی که در نبود حفاظت کاتدی به پوشش آسیب وارد شود، فلز در معرض آب دریا قرار می‌گیرد؛ که در مورد فولاد، قرارگیری آن در معرض خوردگی است. با اعمال حفاظت کاتدی، فولاد نمایان در جهت منفی پلاریزه می‌شود؛ که حاصل آن افزایش سرعت واکنش کاتدی و مهم‌تر از آن، کاهش سرعت واکنش آندی است. با این‌حال، روی سطح حفاظت‌شده به‌روش کاتدی قلیا تولید می‌شود؛ و این موضوع می‌تواند منجر به جدایش کاتدی پوشش از محل عیوب پوشش شود، ولی مکانیسم واقعی جدایش ناشی از قلیا واضح نیست.

پوشش‌های متداول اولئو-رزینی یا آلکیدی مورد حمله قلیایی قرار می‌گیرند، یعنی در معرض صابونی‌شدن هستند؛ و در نتیجه برای استفاده همراه با حفاظت کاتدی توصیه نمی‌شوند. پوشش‌های حاوی آلومینیم رفتاری متغیر از خود نشان می‌دهند؛ و ممکن است که در شرایط راکد، به‌وسیله قلیای تولیدشده در کاتد مورد حمله قرار گیرند. استفاده از آسترهای^۳ تجاری پلی‌وینیل بوتیرال^۴ نیز در ترکیب با حفاظت کاتدی، باعث افت چسبندگی شده است.

1- Drainage bonds

2- Barrier

3- Primer

4- Poly vinyl butyral

همچنین پوشش می‌تواند رطوبت را به دلیل عمل الکترواسمز (که در آن به دلیل تفاوت‌های پتانسیل در سراسر پوشش، مایع از منافذ پوشش عبور می‌کند) جذب کند. آب درون تاول‌ها به دلیل واکنش کاتدی، قلیایی می‌شود و در نتیجه از خوردگی جلوگیری می‌شود.

در عمل امکان دستیابی به پتانسیل یکسان روی سطح مورد حفاظت وجود ندارد؛ و در برخی موارد، پتانسیل می‌تواند به اندازه کافی منفی باشد تا گاز هیدروژن آزاد شود. این موضوع می‌تواند از طریق یک عمل مکانیکی بر چسبندگی پوشش تأثیر گذارد.

به‌طور مشابه، گاز کلر ممکن است در نزدیکی آندهای سامانه‌های حفاظت کاتدی جریان‌های اعمالی تولید شود؛ و در شرایط راکد، این کلر می‌تواند به پوشش مجاور آندها حمله کرده و رنگ آن را تغییر دهد.

هنگامی که درجه حفاظت در مقابل خوردگی قابل کنترل نباشد، دسترسی به تمام قسمت‌های سطح، قبل از دفن یا غوطه‌وری قطعه، برای اعمال پوشش‌ها لازم است.

از طرف دیگر، حفاظت کاتدی از فاصله دور روی نواحی بدون پوشش عمل می‌کند و حفاظت را پس از نصب می‌توان کنترل کرد.

توصیه می‌شود که پوشش‌ها و حفاظت کاتدی به‌عنوان روش‌های پیشگیری از خوردگی در نظر گرفته شوند؛ که مکمل و وابسته به هم بوده و در رقابت با یکدیگر نیستند.

۱۰-۲ انتخاب پوشش

مناسب‌ترین نوع پوشش بستگی به نوع سازه و محیط اطراف آن دارد. در انتخاب یک پوشش، توصیه می‌شود که هدف، دستیابی به صرفه‌جویی کلی در هزینه‌های ترکیبی سازه حفاظت‌شده و هزینه‌های اولیه و جاری طرح‌های حفاظتی باشد. در صورت لزوم توصیه می‌شود که به عمر طراحی سازه و به‌صرفه بودن تعمیر پوشش توجه شود. اطلاعات بیشتر در استانداردهای مربوط ارائه شده است.

۱۰-۳ گسیختگی پوشش

پوشش‌ها با گذشت زمان تخریب می‌شوند و احتمال آسیب مکانیکی از طریق رویه‌های نصب، عملیات تمیزکاری برای حذف رویدنی‌های دریایی و اثرات فرسایشی امواج و جریان آب وجود دارد.

به‌منظور در نظر گرفتن این موضوع در مرحله طراحی، معمولاً ضرایب گسیختگی پوشش معرفی می‌شوند. این ضرایب به شدت به شرایط واقعی نصب و عملیات وابسته هستند، و لزوماً معیاری از مقدار گسیختگی چشمی نیستند؛ ولی توصیه می‌شود که به‌عنوان ضرایب مرتبط با الزامات جریان در نظر گرفته شوند.

ضریب گسیختگی (f_c) یک پوشش، نسبت پیش‌بینی‌شده برای «چگالی جریان کاتدی یک ماده فلزی پوشش‌شده» به «چگالی جریان کاتدی ماده بدون پوشش» را توصیف می‌کند. هنگامی که $f_c = 0$ است، پوشش کاملاً عایق در نظر گرفته می‌شود؛ ولی هنگامی که $f_c = 1$ است، پوشش هیچ‌گونه خاصیت حفاظتی ندارد و چگالی جریان مانند چگالی جریان سطح فلزی بدون پوشش خواهد بود.

در مورد ضرایب مورد استفاده برای یک ترتیب خاص، توصیه‌هایی در استانداردهای ملی / بین‌المللی مربوط ارائه شده‌اند.

پیوست الف (آگاهی دهنده)

خوردگی آلیاژهای کربن-منگنز و فولادهای کم آلیاژ

الف-۱ ماهیت خوردگی فلزی

هنگامی که یک فلز در تماس با یک الکترولیت دچار خوردگی می‌شود، کاتیون‌ها در آب ظاهر می‌شوند و بار منفی مربوط در فلز تشکیل می‌شود. این پدیده ممکن است به صورت زیر بیان شود:

(الف-۱)

بنابراین به دلیل حرکت کاتیون‌ها به داخل الکترولیت و الکترون‌ها به داخل فلز، خوردگی متناظر با جاری شدن جریان الکتریکی از فلز به سمت الکترولیت است. هر ناحیه‌ای که جریان از فلز به سمت آب جاری شود، ناحیه آندی نامیده شده و واکنش، واکنش آندی نامیده می‌شود. یون‌های فلزی می‌توانند با یون‌های منفی در الکترولیت واکنش دهند و محصولات خوردگی نامحلول ایجاد کنند (برای مثال، زنگ‌زدگی در مورد فولاد). این واکنش‌ها، به جز در مواردی که محصولات خوردگی نامحلول جلوی حملات خوردگی بیشتر را می‌گیرند؛ از نظر ماده‌ای، بر فرایند خوردگی اثر نمی‌گذارند.

برای ادامه واکنش خوردگی، خنثی بودن الکتریکی کلی باید حفظ شود. بنابراین، حرکت الکترون‌ها به داخل فلز و یون‌های مثبت به الکترولیت در نواحی آندی باید با مصرف الکترون‌ها در سایر نواحی که به عنوان نواحی کاتدی شناخته می‌شوند، در تعادل باشد.

واکنش‌های مختلفی می‌تواند در نواحی کاتدی رخ دهد؛ که به عنوان واکنش‌های کاتدی شناخته می‌شوند.

فرمول‌های زیر، رایج‌ترین واکنش‌هایی را نشان می‌دهد، که در کاتدها رخ می‌دهند:

(الف-۲)

(الف-۳)

(الف-۴)

اولین مورد از این واکنش‌ها در حضور اکسیژن محلول و شرایط تقریباً خنثی رخ می‌دهد.

دومین مورد به دلیل اسیدیته (یون‌های هیدروژن اضافی) رخ می‌دهد؛ در حالی که مورد سوم، در مقادیر pH بیشتر از خنثی، غالب است.

در شرایط هوادهی نزدیک به خنثی، یون‌های آهن تولید شده در آند با یون‌های هیدروکسیل تشکیل شده در مکان‌های کاتدی، واکنش داده و آهن هیدروکسید تولید می‌کنند.

(الف-۵)

آهن هیدروکسید به آسانی به وسیله اکسیژن محلول، اکسید می‌شود؛ و اکسید آهن آبدار $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ را تشکیل می‌دهد:

(الف-۶)

بنابراین واکنش کلی که از طریق یک سری مراحل میانی انجام می‌شود، ممکن است به صورت زیر نوشته شود:

(الف-۷)

در عمل نرخ خوردگی اغلب به وسیله نرخ که واکنش کاتدی می‌تواند ادامه یابد، تعیین می‌شود. در محیط‌های غرقابی بی‌هوازی تقریباً خنثی، باکتری‌های احیاکننده سولفات می‌توانند منجر به نوع دیگری از واکنش کاتدی در خوردگی آهن و فولاد شوند. این میکروباها از طریق واکنش زیر، سولفات‌های محلول را به سولفید احیا می‌کنند:

(الف-۸)

و مشخصه خوردگی این است که در نبود هوا و هنگام وجود سولفیدها در محصولات خوردگی، رخ می‌دهد. باتوجه به ترکیب محصولات واقعی تشکیل‌شده، این احتمال وجود دارد که مکانیسم خوردگی شامل دپلاریزه‌شدن کاتدی باشد؛ که ممکن است به وسیله فرمول ساده‌شده الف-۹ نشان داده شود:

(الف-۹)

تحریک واکنش کاتدی به باکتری‌های بستگی دارد که دارای آنزیم (هیدروژناز^۱) هستند؛ تا بتوانند هیدروژن موجود در مکان‌های کاتدی را اکسید کنند.

یون‌های سولفید تولیدشده به وسیله احیای سولفات گاهی اوقات می‌توانند فرایند آندی انحلال آهن را تحریک کنند.

الف-۲ پلاریزه‌شدن

در مواردی که خوردگی رخ می‌دهد، اختلاف پتانسیل بین دو واکنش الکتروشیمیایی روی سطح، نیروی محرکه واکنش را تامین می‌کند. در نتیجه، هر دو واکنش الکتروود از شرایط تعادلی خود تغییر می‌کنند؛ و باعث می‌شوند که یک واکنش آندی خالص در یک مورد و یک واکنش کاتدی خالص در مورد دیگر رخ دهد. این دو پتانسیل به یکدیگر نزدیک می‌شوند؛ زیرا تمام یا بخشی از اختلاف پتانسیل، برای انجام هر یک از واکنش‌ها استفاده می‌شود. برای اینکه خوردگی خود به خود اتفاق بیفتد، نه تنها باید بین دو پتانسیل واکنش تفاوت وجود داشته باشد، بلکه پتانسیل فرایند کاتدی باید مثبت‌تر از پتانسیل فرایند آندی باشد.

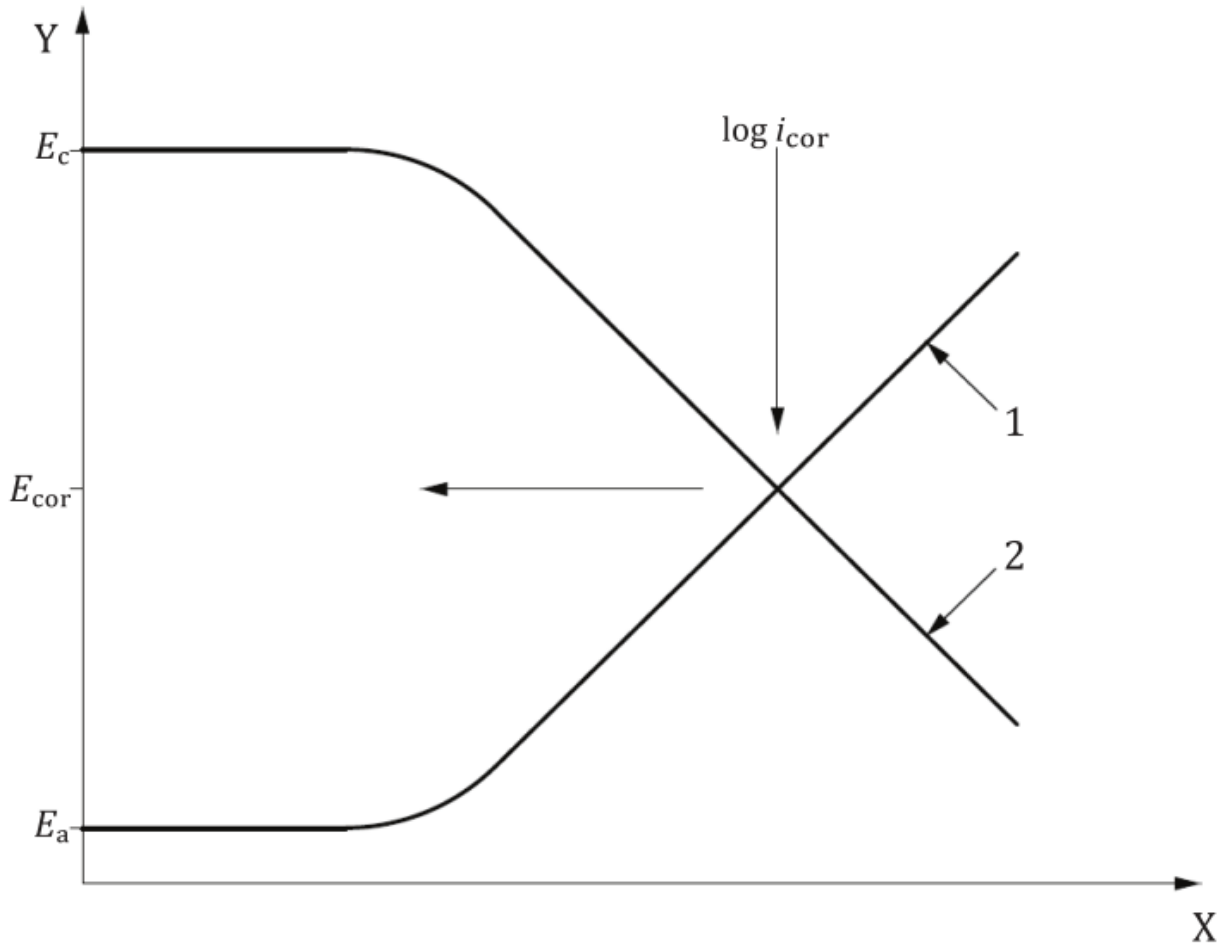
1- Hydrogenase

این شرایط به صورت شماتیک در شکل الف-۱، به صورت نمودار پتانسیل (E) الکتروود در مقابل لگاریتم سرعت واکنش، نشان داده شده است. به دلیل اینکه واکنش‌های آندی و کاتدی به ترتیب الکترون‌ها را آزاد و مصرف می‌کنند، سرعت‌های واکنش آندی و کاتدی، به وسیله جریان الکتریکی (I) نشان داده می‌شوند. برای سادگی، هر دو سرعت واکنش روی یک محور رسم می‌شوند، جهت جریان نادیده گرفته می‌شود؛ و فقط از بزرگی آن‌ها برای نشان دادن سرعت استفاده می‌شود.

E_c پتانسیل تعادل برای واکنش کاتدی است؛ که در آن سرعت واکنش کاتدی خالص وجود ندارد. منحنی تغییر منفی از E_c نشان می‌دهد که با منفی‌تر شدن پتانسیل، سرعت واکنش کاتدی افزایش می‌یابد. برعکس، E_a پتانسیل تعادل برای واکنش آندی است [برای مثال. فرمول الف-۱]؛ و در E_a نیز هیچ واکنش آندی خالص وجود ندارد. منحنی تغییر مثبت از E_a نشان می‌دهد که با مثبت‌تر شدن پتانسیل، سرعت واکنش آندی افزایش می‌یابد.

هنگامی که خوردگی رخ می‌دهد، سرعت واکنش آندی دقیقاً برابر با سرعت واکنش کاتدی است. در محیط‌هایی با رسانایی بالا (مانند آب دریا یا گل‌های بستر دریا)، فلز در حال خوردگی، پتانسیلی واحد بین E_c و E_a را نشان می‌دهد. در شکل الف-۱، این حالت هنگامی رخ می‌دهد که منحنی‌های آندی و کاتدی با هم تلاقی می‌کنند. پتانسیل این نقطه، پتانسیل خوردگی (E_{cor}) نامیده می‌شود. این پتانسیل، پتانسیل واحدی است که به وسیله یک فلز در حال خوردگی نشان داده می‌شود. جریان مربوط به آن (i_{cor}) نیز به عنوان جریان خوردگی شناخته می‌شود و نمایش الکتریکی نرخ خوردگی است. در عمل، یک فلز دچار خوردگی، پتانسیل E_a یا E_c را اشغال نمی‌کند، بلکه به طور خود به خود به E_{cor} منتقل می‌شود.

در حالی که شکل منحنی‌های « $E - \log i$ » ممکن است با توجه به شرایط محیطی حاکم تغییر کند، شیوه‌ای که در آن نمودارهای به اصطلاح پلاریزه شدن بر حسب E_{cor} و i_{cor} تفسیر می‌شوند، یکسان باقی می‌ماند.



راهنما:

$\log i$ X

Y پتانسیل الکتروود

1 سینتیک آندی

2 سینتیک کاتدی

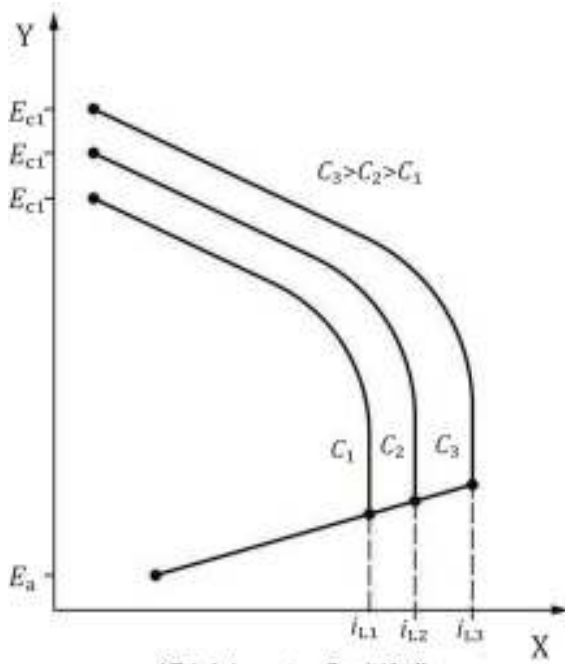
شکل الف-۱- نمودار پلاریزه شدن، که به طور شماتیک الکتروشیمی خوردگی در محیط آبی را نشان می دهد

در مورد فولاد در آب دریا، فرایند آندی آسان تر از واکنش کاتدی رخ می دهد؛ اما این فرایند، با سرعت واکنش کاتدی محدود می شود. این موضوع تا حدی زیاد به وسیله نرخ رسیدن اکسیژن به سطح فلز کنترل می شود؛ که می تواند ناشی از غلظت اکسیژن محلول در آب دریا و سرعت جریان آب باشد.

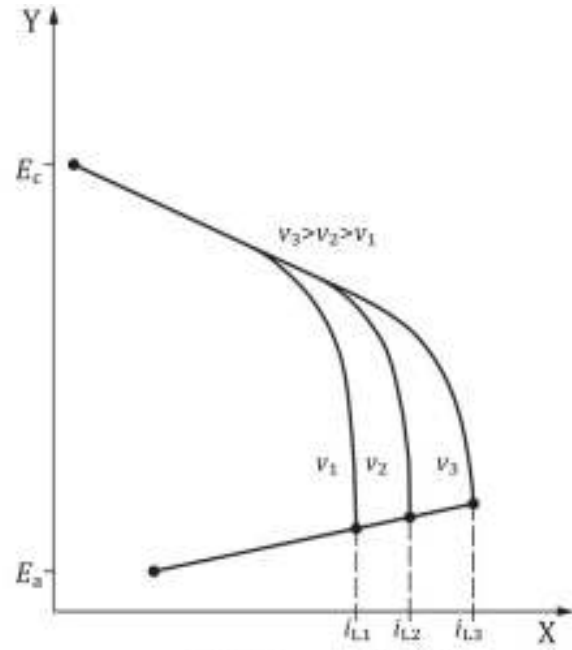
این پدیده ممکن است در یک نمودار پلاریزه شدن نشان داده شود (مطابق با شکل الف-۲).

افزایش سرعت و/یا غلظت اکسیژن، بر افزایش جریان حدی (i_L) تاثیر خواهد داشت.

حلالیت اکسیژن در آب دریا، تابعی از دما و شوری است؛ و بنابراین با عمق آب و موقعیت جغرافیایی تغییر می کند.



ب- اثر غلظت اکسیژن محلول (C_x)



الف- اثر سرعت محلول (V_x)

راهنما:

$\log i$ X

Y پتانسیل الکترود

شکل الف-۲- نمودار پلاریزه شدن نشان دهنده کنترل نرخ خوردگی به وسیله سینتیک آهسته کاتدی (که در این

مورد، با نرخ رسیدن اکسیژن به سطح کنترل می شود) و اثر افزایش فراهمی اکسیژن

پیوست ب
(آگاهی دهنده)

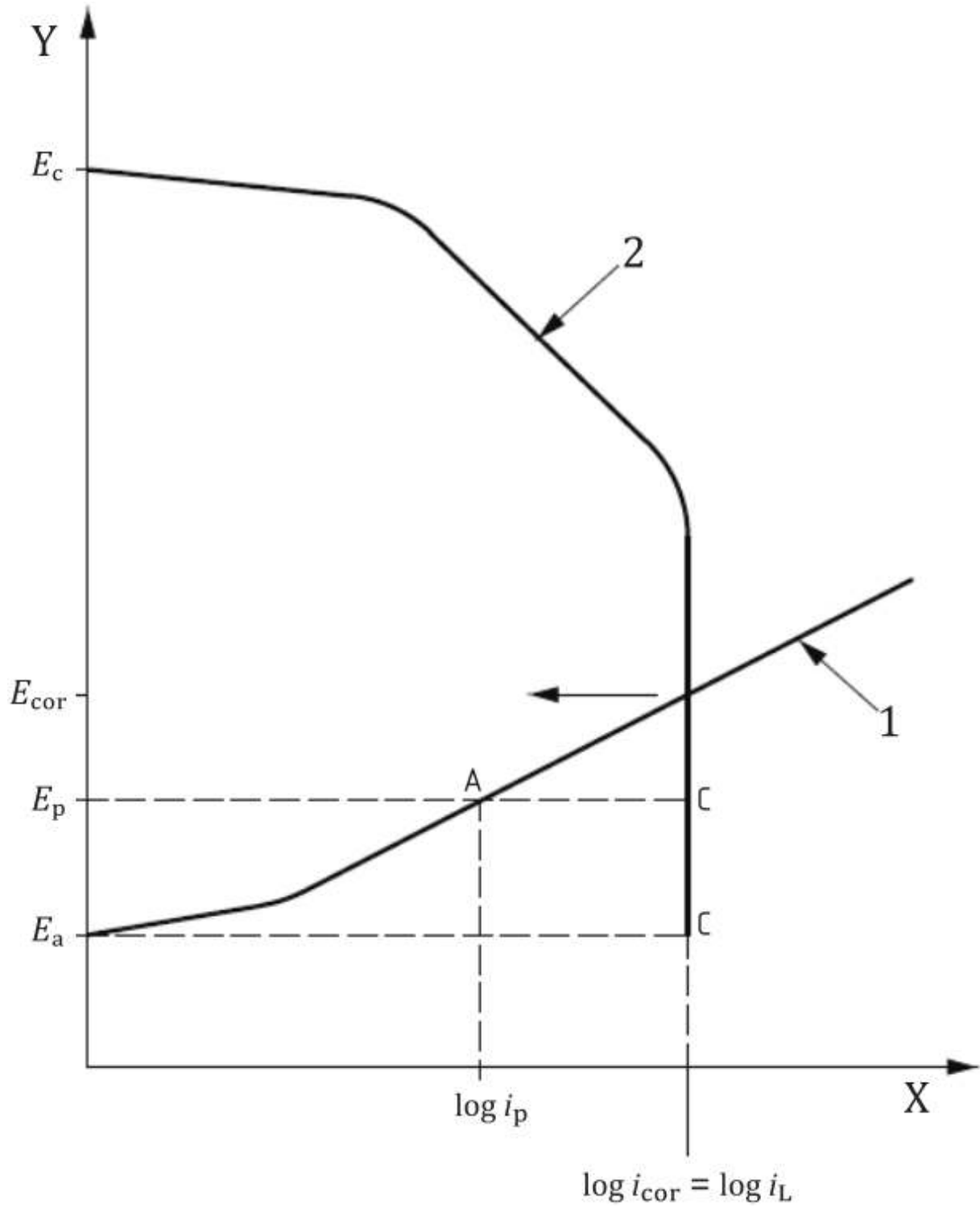
اصول حفاظت کاتدی

حفاظت کاتدی برای کاهش خوردگی گستره وسیعی از فلزات و آلیاژهای سازه‌ای در محیط‌های آبی (از جمله آب دریا)، در سطح قابل پذیرش برای کاربرد مورد نظر، استفاده می‌شود.

شکل ب-۱، نمودار شماتیک پلاریزه‌شدن برای فولاد در حال خوردگی با احیای اکسیژن به‌عنوان فرایند کاتدی را نشان می‌دهد. پتانسیل خوردگی آزاد به‌وسیله E_{cor} نشان داده می‌شود؛ و نرخ خوردگی (i_{cor})، از نظر بزرگی برابر با جریان حدی (i_L) برای احیای اکسیژن است.

هنگامی که پتانسیل از E_{cor} به E_p کاهش می‌یابد، سرعت واکنش آندی کمتر از i_p می‌شود؛ و سرعت کلی واکنش کاتدی برابر با i_L باقی می‌ماند. در این صورت، واکنش کاتدی الکترون‌های خود را از دو منبع (از طریق فرایند آندی و از یک منبع بیرونی جریان) دریافت می‌کند. واکنش آندی، الکترون‌های معادل i_p را فراهم می‌کند؛ و جریان اضافی مورد نیاز (C منهای A)، از منبع بیرونی تامین می‌شود.

اگر پتانسیل به E_a کاهش یابد، نرخ انحلال به مقداری ناچیز کاهش می‌یابد؛ و سرعت واکنش کاتدی i_L باقی می‌ماند. به‌دلیل اینکه هیچ واکنش آندی در این پتانسیل وجود ندارد، واکنش کاتدی اکنون باید به‌وسیله منبع بیرونی الکترون به‌تنهایی تداوم یابد؛ و بنابراین برای رسیدن به E_a ، جریان بیشتری [برابر با $(i_L - 0)$] نسبت به جریان لازم برای رسیدن به E_p نیاز است.



راهنما:

$\log i$ X

پتانسیل الکترود Y

1 واکنش آندی، $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$

2 واکنش کاتدی، $O_2 + 2 H_2O + 4e^- \rightarrow 4 OH^-$

شکل ب-۱- نمودار شماتیک نشان‌دهنده چگونگی کاهش یا توقف خوردگی با اعمال حفاظت کاتدی

اگر پتانسیل تا زیر E_a کاهش یابد، فقط فرایندهای کاتدی ثانویه بدون تأثیر بر واکنش آزاد خوردگی، از نظر انرژی قابل دوام می‌شوند.

جریان مورد نیاز برای کاهش نرخ خوردگی به صفر، برابر با « $i(E_{cor}) - i(E_a)$ » خواهد بود؛ و اگر خوردگی صرفاً به دلیل احیای اکسیژن محلول باشد، این جریان برابر با جریان حدی (i_L) برای احیای اکسیژن خواهد بود.

کاهش پتانسیل خوردگی به وسیله اعمال جریان، اساس حفاظت کاتدی است.

اصولاً حفاظت کاتدی را برای انواع کاربردهای فلز غوطه‌ور در محلول آبی الکترولیت (با گستره‌ای از آب نسبتاً خالص، آب لب‌شور و آب دریا، خاک‌ها و حتی محلول‌های اسیدی)، می‌توان استفاده کرد.

لازم به ذکر است که این روش، الکتروشیمیایی است؛ و هم‌سازه مورد حفاظت و هم‌آند مورد استفاده برای حفاظت باید در تماس فلزی و الکترولیتی باشند. بنابراین، حفاظت کاتدی را نمی‌توان برای کنترل خوردگی جوی و سایر اشکال مشابه خوردگی به کار برد.

انواع خوردگی که می‌توان به وسیله حفاظت کاتدی کنترل کرد، شامل تمام اشکال خوردگی عمومی، خوردگی حفره‌ای، خوردگی انتخابی، خوردگی شیاری، ترک‌خوردن به کمک محیط، کاپیتاسیون و خوردگی باکتریایی است.

به‌طور خلاصه:

— بدون حفاظت کاتدی، هنگامی که واکنش کاتدی از نوع احیای اکسیژن است، فولاد با نرخی معادل i_{cor} و i_L دچار خوردگی می‌شود؛

— با کاهش پتانسیل به E_a ، می‌توان خوردگی را به‌طور کامل متوقف کرد؛ ولی برای این منظور، نیاز به اعمال جریان بیرونی معادل با i_L است؛

— با کاهش پتانسیل به مقداری کمتر از i_T ولی بالاتر از E_a ، ممکن است با مقداری صرفه‌جویی در جریان تأمین‌شده، فلز تاحدی حفاظت شود؛

— به دلیل اینکه پلاریزه‌شدن آندی (یعنی رابطه بین پتانسیل E و جریان i) تقریباً لگاریتمی است، یک جابجایی منفی اولیه کوچک در پتانسیل (یا پلاریزه‌شدن) می‌تواند از نظر حفاظت، سود زیادی داشته باشد؛

— با حرکت پتانسیل به زیر E_a ، مقداری از جریان برای احیای الکتروشیمیایی آب به یون هیدروکسیل استفاده می‌شود.

پیوست پ (آگاهی دهنده)

الکترودهای مرجع

پ-۱ کلیات

الکترودهای مرجع، همان طور که در این پیوست توضیح داده شده است، معمولاً برای اندازه‌گیری پتانسیل‌های سازه/الکتروولت یا به‌عنوان الکترودهای حس‌گر برای سامانه‌های کنترل استفاده می‌شوند.

اندازه‌گیری‌های به‌اندازه کافی دقیق هنگامی حاصل می‌شوند که الکتروود دارای ویژگی‌های زیر باشد:
الف- اجازه دهد تا جریان کافی برای کارکرد یک میلی‌ولت‌سنج، بدون تغییر قابل توجه در پتانسیل آن، عبور داده شود؛

ب- به‌وسیله محیط اطراف، تخریب نشود یا آلوده نشود.

الکترودهای مرجع دقیق از یک الکتروولت کاملاً تعریف‌شده و تجدیدپذیر استفاده می‌کنند؛ که معمولاً با الکتروولتی که اندازه‌گیری‌های پتانسیل در آن انجام می‌شود، متفاوت است. الکتروود مرجع Cu/CuSO_4 ، دقیق‌ترین و مناسب‌ترین الکتروود مرجع برای تماس با خاک و آب شیرین است؛ ولی به‌دلیل آلودگی سریع به‌وسیله یون‌های کلرید، استفاده از آن در آب دریا و سایر کلریدهای حاوی الکتروولت توصیه نمی‌شود. الکترودهای کالومل اشباع یا $\text{KCl}/\text{AgCl}/\text{Ag}$ بسیار تُرد هستند و عموماً در کاربردهای میدانی استفاده نمی‌شوند؛ بلکه فقط برای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یا بررسی الکترودهای مرجع میدانی استفاده می‌شوند. علاوه بر این، استفاده از الکترودهای کالومل اشباع را می‌توان با توجه به استانداردهای ملی/بین‌المللی محدود کرد.

الکترودهای مرجع مورد استفاده برای پایش و کنترل سامانه‌های حفاظت کاتدی دریایی و فراساحلی معمولاً الکتروود AgCl/Ag آب دریا و الکتروود Zn/Zn آب دریا هستند. پتانسیل الکتروود اول، بستگی به مقدار کلرید آبی دارد که در آن غوطه‌ور است. اگرچه تجدیدپذیری الکتروود دوم مورد تردید است؛ ولی مقاوم‌تر است. حتی اگر این الکتروودها را بتوان به‌عنوان الکترودهای مرجع ناقص^۱ در نظر گرفت، هر دو برای اکثر اهداف عملی به‌اندازه کافی دقیق در نظر گرفته می‌شوند؛ حتی اگر الکتروولت کاملاً تعریف‌شده و تجدیدپذیر نباشد.

پ-۲ الکتروود AgCl/Ag آب دریا

این الکتروود شامل نقره فلزی پوشش‌شده با کلرید نقره و مقداری کم از نمک محلول است. هنگامی که الکتروود در آب دریا قرار می‌گیرد، به پتانسیل پایداری دست می‌یابد؛ که مقدار آن به سطح کلرید موجود در آب دریا بستگی دارد. واکنش الکتروشیمیایی برای الکتروود AgCl/Ag به شرح زیر است:

1- Imperfect reference electrodes

(پ-۱)

و این واکنش، برگشت پذیر به یون های کلرید است. غلظت یون های کلرید در محلول (یعنی در آب دریا)، بر پتانسیل الکتروود تأثیر می گذارد.

الکترودهای مرجع AgCl/Ag / آب دریا، فقط در آب دریای رقیق نشده با شوری $\% 3/5$ دقیق هستند. در صورت استفاده در آب با درصد شوری به غیر از $\% 3/5$ ، مقادیر نشان داده شده اشتباه خواهد بود. توصیه می شود که الکترودهای مرجع نسبت به پتانسیل نظری خود، در محدوده $\pm 10 \text{ mV}$ پایدار باشند.

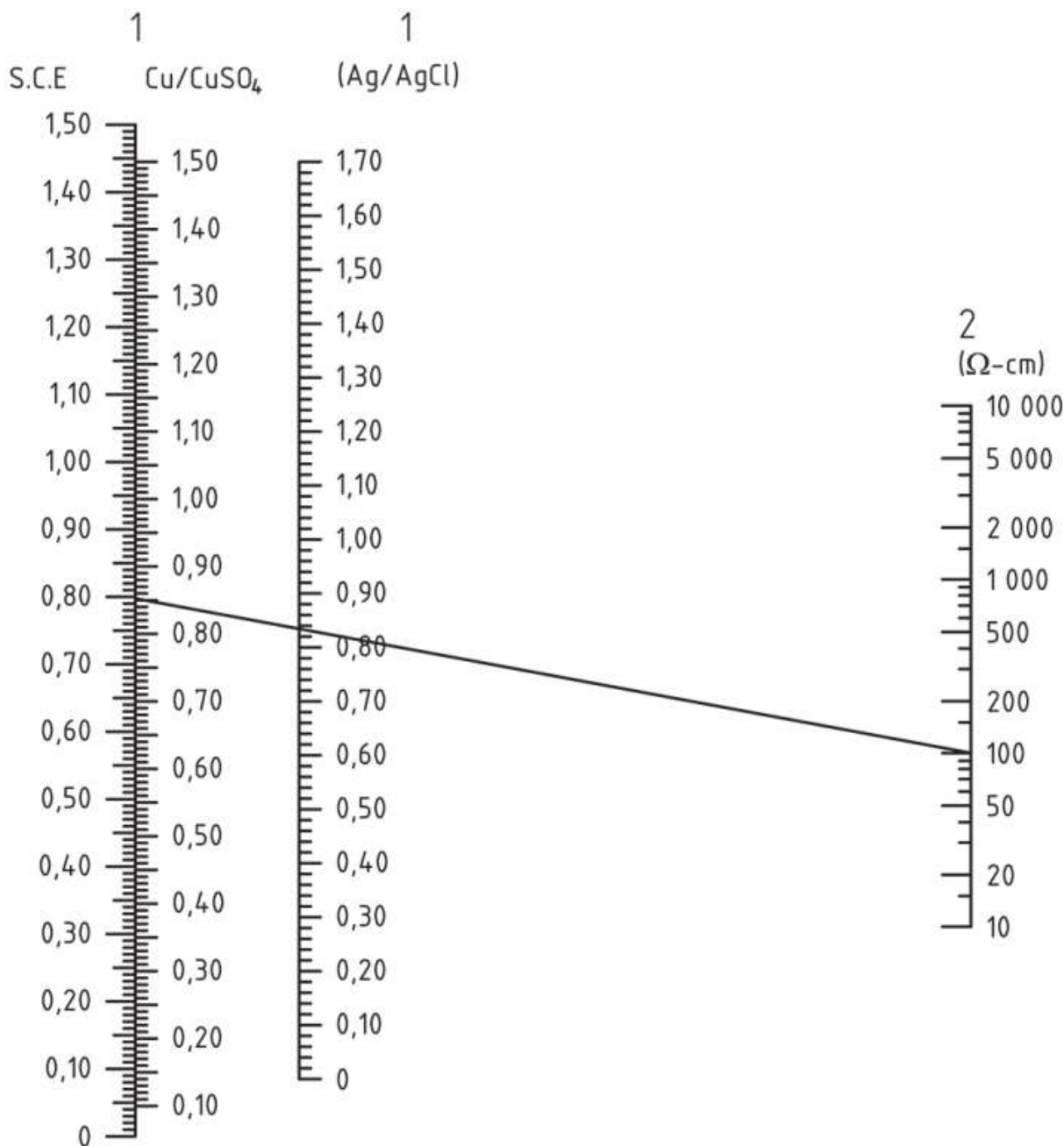
برای دستیابی به طول عمر بالا در سرویس دریایی، استفاده از الکتروود مقاوم با لایه ای ضخیم از نقره کلرید ضروری است. این الکتروود ممکن است با فرو بردن الکتروود با پوشش نازک در کلرید نقره مذاب تولید شود. غلظت ثابت کلرید در آب دریا، پتانسیل پایدار الکتروود را تضمین می کند.

توصیه می شود که الکترودهای سرویس دریایی نیز با قرارگیری درون سازه ای مناسب (با امکان حفظ تماس با الکتروولیت آب دریا از طریق ظروف سوراخ دار)، درمقابل سایش، رسوب یا سایر آلودگی ها حفاظت شوند. توصیه می شود که قبل از استفاده، آن ها چند ساعت در آب تازه دریا غوطه ور شوند. توصیه می شود که انتهای کابل عایق بندی شود، تا از اتصال کوتاه الکتروود جلوگیری شود.

تغییر شوری آب بر پتانسیل چنین الکتروودی تأثیر می گذارد. رقیق شدن آب دریا، همان طور که در دهانه رودخانه ها رخ می دهد، الکتروود را مثبت تر می کند. برای آب با دمای 25°C ، به ازای هر تغییر 10 برابری در غلظت، تغییر پتانسیل بیش از 60 mV نخواهد بود؛ طوری که در بسیاری از مکان ها، با انتخاب پتانسیل حفاظت اندکی منفی تر، می توان اجازه این تأثیر را داد.

معیارهای پتانسیل حفاظت نیز ممکن است مطابق با شکل پ-۱ تنظیم شوند. برای مثال، کمترین پتانسیل منفی برای حفاظت موثر درمقابل خوردگی برابر با $0,84 \text{ V}$ - و نه $0,80 \text{ V}$ -، با ارجاع به الکتروود Ag/AgCl در آب لب شور با مقاومت ویژه $100 \Omega \cdot \text{cm}$ خواهد بود.

یادآوری - پتانسیل ارجاع شده به الکتروود کالومل اشباع (S.C.E)، عملاً معادل با پتانسیل ارجاع شده به الکتروود AgCl/Ag / آب دریا در آب با شوری $\% 3/5$ است.



شکل پ-۱- نوموگرام برای تصحیح قرائت‌های پتانسیل، انجام‌شده با الکتروده $AgCl/Ag$ / آب دریا در آب‌هایی با مقاومت ویژه متغیر، درمقابل الکتروده کالومل اشباع (S.C.E) و الکترودهای مرجع $Cu/CuSO_4$

اگر داده‌های مربوط به اندازه‌گیری تغییرات شوری، مقدار کلرید یا مقاومت ویژه در دسترس نباشد، توصیه می‌شود که از الکترودهای مرجع $KCl/AgCl/Ag$ استفاده شود. در این حالت، توصیه می‌شود که المان، در محلولی با غلظت مشخص از کلرید پتاسیم در یک ظرف بدون سوراخ غوطه‌ور شود؛ و الکتروده به‌وسیله درپوشی متخلخل از محیط جدا شود. در صورت عدم استفاده، توصیه می‌شود که این نوع الکتروده در محلول پتاسیم کلرید نگهداری شود.

پ-۳ الکتروود روی/آب دریا

این الکتروود از فلز روی در تماس با آب دریا تشکیل شده است. علی‌رغم گونه‌های یونی فراوان موجود در آب دریا، الکتروود روی/آب دریا بدون توجه به تغییرات آب دریا، پتانسیل ثابت معقولی را حفظ می‌کند. ضروری است که فلز روی به اندازه کافی خالص بوده و مقدار آهن آن بیش از 0.014% نباشد (مانند آلیاژ نوع Z2 در استاندارد EN 12496) یا به صورت آلیاژ روی برای آند استفاده شود (مانند آلیاژ نوع Z1 یا Z3 در استاندارد EN 12496).

پتانسیل معمول با توجه به AgCl/Ag آب دریا، در آب دریای تمیز برابر با 1030 mV - برای فلز روی خالص و برابر با 1050 mV - برای آلیاژ روی است. پتانسیل در تمام موارد، بین 1060 mV و 1000 mV - متغیر است. در صورت وقوع آلودگی یا رسوب روی الکتروود، این گستره می‌تواند افزایش یابد. اگر الکتروود تمیز نگه داشته شود (برای مثال، با عبور مداوم یک جریان آندی کوچک از الکتروود و قطع آن قبل از اندازه‌گیری)، گستره کوچک‌تر خواهد بود. در روش جایگزین، می‌توان از الکتروود به عنوان یک الکتروود کنترل‌کننده با مدار امپدانس کم استفاده کرد؛ طوری که این کارکرد، الکتروود را حین سرویس تمیز نگه دارد.

پ-۴ تصدیق الکتروودهای مرجع

الکتروود مرجع کالیبراسیون اولیه، الکتروود هیدروژن عادی (N.H.E) است. این الکتروود کمترین حساسیت را به تغییرات در ترکیب الکتروود دارد. الکتروود اسیدی، در زیر پوششی از گاز هیدروژن با فشار یک اتمسفر و الکتروودیتی با دمای $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ نگاه‌داری می‌شود. با این حال، این الکتروود که از یک ورق پلاتینی پلاتینه‌شده در الکتروودیتی اسیدی با $\text{pH} = 0$ تشکیل شده است، برای استفاده میدانی مناسب نیست.

الکتروودهای مرجع اصلی برای بررسی الکتروودهای مرجع میدانی استفاده می‌شوند. آن‌ها به صورت دوره‌ای نسبت به الکتروود هیدروژن عادی (N.H.E) در یک آزمایشگاه بیرونی اعلام‌شده، کالیبره می‌شوند. دوره اعتبار به وسیله گواهی کالیبراسیون ارائه می‌شود. این دوره، به شرایط استفاده و نگاه‌داری الکتروود مرجع اصلی بستگی دارد. الکتروود کالومل اشباع که حاوی جیوه، کلرید جیوه و محلول کلرید پتاسیم اشباع است، اغلب به عنوان الکتروود مرجع اصلی استفاده می‌شود. اگرچه الکتروود کالومل اشباع نسبت به الکتروود هیدروژن عادی مناسب‌تر است، ولی معمولاً برای استفاده میدانی به اندازه کافی مقاوم نیست.

قاعده تصدیق یک الکتروود، شامل اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل بین الکتروود مورد بررسی و الکتروودی است که به عنوان مرجع گرفته شده و «الکتروود مرجع اصلی» نامیده می‌شود.

پتانسیل‌های الکتروودهای مرجع مختلف با توجه به الکتروود هیدروژن عادی در جدول پ-۱ ارائه شده است.

حداکثر خطای مجاز حین تصدیق، متناظر با حداکثر اختلاف قابل پذیرش بین پتانسیل الکتروود مورد بررسی و الکتروود مرجع اصلی است. در عمل، مقدار حداکثر خطای مجاز توسط کاربر، بسته به بازخورد تجربه و رویه‌های نوشتاری مورد استفاده توسط وی، تعیین می‌شود.

جدول پ-۱- پتانسیل‌های الکترودهای مرجع باتوجه به الکتروود هیدروژن عادی (در دمای ۲۵ °C)

پتانسیل (V)	الکتروود
+۰٫۲۰	KCl /AgCl/Ag اشباع
+۰٫۲۵ (تقریبی)	/AgCl/Ag آب دریا
+۰٫۲۴	کالومل (KCl اشباع)
-۰٫۸۰ (تقریبی)	آلیاژ روی (انواع Z1 و Z3) /آب دریا (طبق زیربند پ-۳)
-۰٫۷۸ (تقریبی)	فلز روی خالص (نوع Z2) /آب دریا (طبق زیربند پ-۳)

یادآوری ۱- اثر دمای محیط در تماس با الکتروود مرجع، معمولا حین اندازه‌گیری‌های میدانی در نظر گرفته نمی‌شود (برای آگاهی، ضریب دمایی برای /AgCl/Ag آب دریا، برابر با $+۰٫۳۳ \text{ mV}/^\circ\text{C}$ است).

یادآوری ۲- پتانسیل‌های الکترودهای مرجع عموما باتوجه به الکتروود هیدروژن عادی اعلام می‌شود؛ اگرچه الکتروود دومی فقط در آزمایشگاه‌ها استفاده می‌شود. هدف جدول این است که پتانسیل‌های اندازه‌گیری‌شده با یک الکتروود مرجع را بتوان بر حسب الکتروودی دیگر بیان کرد. برای مثال، مشاهده می‌شود که الکتروود آلیاژ روی /آب دریا، $۱٫۰۵ \text{ V}$ منفی‌تر از الکتروود /AgCl/Ag آب دریا است. بنابراین، پتانسیل $۰٫۸۰ \text{ V}$ - اندازه‌گیری‌شده با الکتروود /AgCl/Ag آب دریا نسبت به الکتروود آلیاژ روی /آب دریا $۱٫۰۵ \text{ V}$ مثبت‌تر (یعنی $۰٫۲۵ \text{ V}$ +) خواهد بود (به شکل ۴ مراجعه شود).

پیوست ت (آگاهی دهنده)

خوردگی مواد فلزی به غیر از فولادهای کربن - منگنز و فولادهای کم آلیاژ که معمولاً تحت حفاظت کاتدی در آب دریا قرار دارند

ت-۱ فولادهای زنگ‌نزن

فولاد زنگ‌نزن یک نام عمومی است که به گستره وسیعی از فولادهای آلیاژی اطلاق می‌شود، که شاخصه اصلی آن‌ها مقاومت به خوردگی است. مقاومت به محیط‌های مختلف را می‌توان با تغییر ترکیب فولاد در محدوده‌ای وسیع تنظیم کرد. ویژگی مشترک تمام فولادهای زنگ‌نزن، مقدار کروم بالای آن‌ها به میزان حداقل ۱۲٪ است؛ که یک لایه اکسید روی سطح تولید می‌کند، تا فولاد را در بسیاری از محیط‌ها غیرفعال کند.

گروه‌بندی فولادهای زنگ‌نزن بر اساس ریزساختار آن‌ها است و انواع موجود شامل آستنیتی، فریتی، مارتنزیتی و دوفازی (مخلوطی از آستنیت و فریت) می‌شود؛ ولی عمدتاً مواد آستنیتی، دوفازی و مارتنزیتی برای کاربردهای دریایی و فراساحلی استفاده می‌شوند.

فولادهای زنگ‌نزن در آب دریا، مستعد خوردگی حفره‌ای و شیاری هستند؛ و pH، دما و مقدار اکسیژن ممکن است بر این رفتار تأثیر گذارند. مشخص شده است که آغاز حفره‌دار شدن و مقاومت به خوردگی شیاری می‌تواند به‌طور گسترده مربوط به مقدار کروم، مولیبدن، نیتروژن و گاهی اوقات تنگستن فولادهای زنگ‌نزن باشد.

به‌طور کلی، اگر فولاد زنگ‌نزن دارای عدد معادل مقاومت به حفره‌دار شدن (PREN) حداقل ۴۰ باشد (که در آن، $PREN = w_{Cr} + 3,3(w_{Mo} + 0,5w_W) + 16w_N$ است)، در اینصورت بعید است که دچار خوردگی حفره‌ای یا شیاری در آب دریا با دمای ۲۰ °C شود. بنابراین اعمال حفاظت کاتدی روی بسیاری از فولادهای زنگ‌نزن مورد استفاده در محیط‌های دریایی مفید است.

فولادهای زنگ‌نزن دوفازی به دلیل مقاومت به خوردگی خوب و مشخصه‌های مکانیکی بالاتر نسبت به فولادهای کاملاً آستنیتی، به‌طور گسترده در کاربردهای فراساحلی و به‌ویژه در خطوط لوله کاربر دارند.

فولادهای زنگ‌نزن دوفازی عمدتاً در مقابل خوردگی عمومی در آب دریا مقاوم هستند، ولی ممکن است مستعد خوردگی موضعی، به شکل حفره‌دار شدن یا به احتمال بالاتر، خوردگی شیاری در دماهای بالا باشند. بنابراین، درجاتی از حفاظت کاتدی معمولاً اعمال می‌شود.

خوردگی شیاری معمولاً در پتانسیل‌های کمتر منفی نسبت به پتانسیل‌های لازم برای حفاظت کاتدی فولاد کربنی، شروع شده و گسترش می‌یابد. در سامانه‌هایی که فولاد کربنی و فولادهای زنگ‌نزن دوفازی در تماس الکتریکی با هم هستند، توصیه می‌شود که این دو ماده با پتانسیل یکسان پلاریزه شوند؛ تا احتمال ایجاد هرگونه جفت خوردگی گالوانی، کاهش یابد.

فولادهای زنگ‌نزن دوفازی در شرایط آنیل‌شده به سرعت سردسازی شده معمول، دارای ریزساختار حاوی ۴۰٪ تا ۵۰٪ فریت و ۶۰٪ تا ۵۰٪ آستنیت هستند.

ت-۲ آلیاژهای نیکل

آلیاژهای نیکل-مس برای مقاصد مقاوم به خوردگی در کاربردهای مختلف در محیط‌های دریایی از جمله روکش فلزی لوله‌های عمودی، بست‌ها، محوره‌های پروانه و در جعبه‌های آب استفاده می‌شوند.

ت-۳ آلیاژهای آلومینیم

آلیاژهای آلومینیم سال‌هاست که عمدتاً به دلیل ترکیب هم‌زمان سبکی با استحکام و مقاومت به خوردگی، در صنایع دریایی استفاده می‌شوند.

آلومینیم یک فلز بسیار واکنش‌پذیر با میل ترکیبی بالا به اکسیژن است. با این حال، به دلیل ماهیت خنثی و حفاظتی فیلم اکسیدی که روی سطح فلز تشکیل می‌شود، این فلز در مقابل اغلب جوها و گستره وسیعی از مواد شیمیایی بسیار مقاوم است.

دو گروه متمایز از آلیاژهای آلومینیم کار شده^۱ وجود دارد، که در کاربردهای دریایی استفاده می‌شوند. یک گروه، شامل آلیاژهای آلومینیم-منیزیم با استحکام متوسط و غیرقابل عملیات حرارتی با مقدار منیزیم در گستره ۳/۵٪ تا ۴/۹٪ است. سایر آلیاژها، آلیاژهای آلومینیم-منیزیم-سیلیسیوم قابل عملیات حرارتی با مقدار منیزیم بین ۰/۶٪ تا ۱/۲٪ و مقدار سیلیسیوم بین ۰/۴٪ تا ۱/۳٪ است.

آلیاژهای آلومینیم ریختگی به مقدار قابل توجه استفاده نشده‌اند؛ با این حال این آلیاژها باید دارای قابلیت ریخته‌گری خوب، مقاومت به خوردگی و عدم نشتی تحت فشار باشند. آلیاژهایی با مقدار سیلیسیوم در گستره ۱۰٪ تا ۱۲٪، به دلیل قابلیت ریخته‌گری و مقاومت به خوردگی خوب ترجیح داده می‌شوند، و این آلیاژها اغلب به صورت «ریخته‌شده» استفاده می‌شوند؛ اما آلیاژهایی با مقدار منیزیم بین ۰/۱۵٪ تا ۰/۴٪ را می‌توان عملیات حرارتی کرد.

در تمام موارد، مقدار مس معمولاً به ۰/۱٪ محدود می‌شود؛ تا خوردگی حفره‌ای به حداقل برسد.

اگرچه این آلیاژها به دلیل مقاومت به خوردگی انتخاب می‌شوند، ولی می‌توانند به صورت کاتدی حفاظت شوند.

ت-۴ آلیاژهای مس

مس و آلیاژهای مس در میان متعلقات سازه‌های دریایی، نه تنها به عنوان روکش‌های فلزی مقاوم به خوردگی، کاربردهایی متعدد پیدا می‌کنند؛ بلکه در کاربردهای هیدرولیکی و مشابه که اجزای کوچک به سازه‌ها متصل می‌شوند نیز کاربرد دارند. این امر به‌ویژه در واحدهای تکمیلی زیر دریا و مجموعه‌های سرچاهی، رایج است.

1- Wrought aluminium

مس و آلیاژهای مس که به درستی انتخاب شده باشند، دارای مقاومت بسیار خوب به خوردگی هستند و مقادیر کم یون مس در فصل مشترک فلز/آب دریا از نشست یا رشد موجودات دریایی جلوگیری می‌کند.

برای جلوگیری از خوردگی مس یا آلیاژهای آن، معمولاً حفاظت کاتدی لازم نیست، با این حال اجزای مسی متصل به فولاد حفاظت شده از نظر کاتدی، از حفاظت برخوردار می‌شوند؛ که این امر می‌تواند باعث از بین رفتن خواص «ضد رسوب» بسیاری از سطوح پایه مس شود. این موضوع ممکن است در مواردی که افزایش شدید رشد موجودات دریایی^۱ می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه وزن و نیروهای کششی شود، قابل توجه باشد.

1- Marine growth

پیوست ث (آگاهی دهنده)

مشخصات آند

ث-۱ هندسه آند و وسایل بست

سه نوع عمده آند برای سازه‌های دریایی وجود دارد:

— پایه‌دار لاغر^۱؛

— کشیده‌شده^۲، هم‌سطح کار^۳؛

— النگویی.

آندهای پایه‌دار و هم‌سطح کار ممکن است بر اساس نسبت طول به عرض به دو دسته کوتاه و بلند تقسیم شوند. نوع آند، فرمول مقاومت آند (مطابق با زیربند ث-۳) و ضریب بهره‌برداری^۴ از آند (مطابق با زیربند ث-۴) را تعیین می‌کند.

توصیه می‌شود که ساخت آندها مطابق با DNV-RP-B401 باشد.

نوع پایه‌دار لاغر معمولاً روی یک مغزی لوله‌ای ریخته‌گری می‌شود و برای آندهای نسبتاً بزرگ (برای مثال، آندهای روی زیرساخت‌های سکو و قالب‌های زیر دریا) استفاده می‌شود. مقدار جریان خروجی (I_a) نسبت به جرم خالص آند (M_a) و همچنین ضریب بهره‌برداری (u) آند، بالا است.

یادآوری- برای محاسبه جرم خالص آند، به DNV-RP-B401 مراجعه شود.

آندهای النگویی عمدتاً برای خطوط لوله استفاده می‌شوند؛ ولی در ناحیه بالایی پایه‌های سکو نیز کاربرد دارند، و نسبت «جریان خروجی به وزن» بالا را با دراگ کم ترکیب می‌کنند.

توصیه می‌شود که نوع آندها و هرگونه الزامات خاص اتصال آند حین طراحی مفهومی حفاظت کاتدی، با در نظر گرفتن نیروهای اعمال‌شده در مرحله نصب، (برای مثال، عملیات شمع‌کاری و فاز عملیاتی؛ نیروهای موج) تعریف شود. برای آندهای نوع پایه‌دار، ممکن است هنگام طراحی و توزیع آندها، اقدامات احتیاطی خاصی لازم باشد، تا مانع عملیات در زیر دریا نشود.

1- Slender stand-off
2- Elongated
3- Flush-mounted
4- Utilization factor

ث-۲ پارامترهای طراحی مواد آند گالوانی

به غیر از مواردی که مالک سازه مشخص یا قبول کرده باشد، محدودیت‌های ترکیبی برای عناصر آلیاژی و ناخالصی در آندهای پایه Al و Zn مطابق با جدول ث-۱ اعمال می‌شود. اگر سازنده بتواند عملکرد بهتری را نسبت به این آلیاژها اثبات و تضمین کند، ممکن است از گستره‌ای وسیع‌تر از ترکیبات نسبت به آنچه در جدول ث-۱ ارائه شده، استفاده شود. پارامترهای طراحی حفاظت کاتدی مربوط به عملکرد مواد آند عبارتند از:

— ظرفیت الکتروشیمیایی طراحی (ϵ)، بر حسب Ah/kg؛

— پتانسیل مدار بسته طراحی آند (E_0^a)، بر حسب V.

ظرفیت الکتروشیمیایی طراحی (ϵ)، پتانسیل مدار بسته طراحی آند (E_0^a)، و ضریب بهره‌برداری (u)، برای محاسبه موارد زیر استفاده می‌شود:

— جریان خروجی طراحی آند، با استفاده از قانون اهم؛

— جرم خالص مورد نیاز آند، با استفاده از قانون فارادی.

جدول ث-۱- حدود ترکیب درصد توصیه شده برای مواد آندی پایه Al و Zn

پایه Al	پایه Zn	آلیاژسازی/عنصر ناخالصی
۲٫۵ تا ۵٫۷۵	باقیمانده	Zn
باقیمانده	۰٫۱ تا ۰٫۵	Al
۰٫۰۴۰ تا ۰٫۰۱۵	کاربرد ندارد	In
$\geq ۰٫۰۰۲$	۰٫۰۲۵ تا ۰٫۰۷	Cd
$\geq ۰٫۱۲$	کاربرد ندارد	Si
$\geq ۰٫۰۹$	$\geq ۰٫۰۰۵$	Fe
$\geq ۰٫۰۰۳$	$\geq ۰٫۰۰۵$	Cu
کاربرد ندارد	$\geq ۰٫۰۰۶$	Pb

مقادیر طراحی برای ظرفیت الکتروشیمیایی (ϵ)، در جدول ث-۲ به منظور طراحی استفاده می‌شوند؛ به غیر از مواردی که مالک سازه طوری دیگر تعیین کرده باشد.

توصیه می‌شود که مقادیر طراحی برای پتانسیل مدار بسته آند (E_0^a)، که در جدول ث-۲ ارائه شده است، در طراحی استفاده شوند.

یادآوری- برای اطلاعات بیشتر در مورد پارامترهای طراحی مواد گالوانی، به DNV-RP-B401 مراجعه شود.

جدول ث-۲- ظرفیت الکتروشیمیایی طراحی و پتانسیل مدار بسته طراحی توصیه شده برای مواد آندی در دماهای محیط دریایی

در معرض ته نشین		در معرض آب دریا		دمای سطح آند °C	ماده آندی
ظرفیت الکتروشیمیایی Ah/kg	پتانسیل مدار بسته V	ظرفیت الکتروشیمیایی Ah/kg	پتانسیل مدار بسته V		
۱۵۰۰	-۱,۰۰۰	۲۰۰۰	-۱,۰۵۰	$30 \geq$	Al-Zn-In
۶۸۰	-۱,۰۰۰	۱۵۰۰	-۱,۰۵۰	۶۰	
۳۲۰	-۱,۰۰۰	۷۲۰	-۱,۰۰۰	۸۰	
۷۵۰	-۰,۹۸۰	۷۸۰	-۱,۰۳۰	$30 \geq$	Zn الف
۵۸۰	-۰,۹۸۰			$30 < \text{ تا } 50$	

الف برای دماهای سطحی آند فراتر از 50°C ، توصیه می‌شود که ماده آندی برای حداکثر دمای مخصوص پروژه مطابق با DNV-RP-B401 صلاحیت سنجی شود.

ث-۳ فرمول‌های مقاومت آند

مقاومت آند (R_a)، برحسب Ω ، با استفاده از فرمول ارائه شده در جدول ث-۳ محاسبه می‌شود؛ که برای شکل واقعی آند به کار می‌رود. محاسبات برای ابعاد اولیه آند و برای ابعاد تخمین زده شده آن هنگامی که آند تا ضریب بهره برداری خود مصرف شده است، انجام می‌شود.

جدول ث-۳- فرمول‌های توصیه شده مقاومت آند برای محاسبات طراحی حفاظت کاتدی

فرمول مقاومت	نوع آند
	پایه دار لاغر بلند الف، ب $L \geq 4r$
	پایه دار لاغر کوتاه الف، ب $L < 4r$
	هم سطح کار بلند ب، پ $L \geq 4 \cdot \text{width}$ و $L \geq 4 \cdot \text{thickness}$
	هم سطح کار کوتاه، النگویی و سایر انواع

الف معادله برای آندهایی با حداقل فاصله 0.30 m از سازه مورد حفاظت معتبر است. برای فواصل آند تا سازه که کمتر از 0.30 m ولی حداقل 0.15 m باشد، ممکن است همین معادله با ضریب تصحیح 1.3 به کار برده شود.

ب برای آندهای غیر استوانه‌ای، $r = c/2\pi$ است؛ که در آن، c پیرامون مقطع عرضی آند، برحسب m است.

پ S ، میانگین حسابی طول و عرض آند، برحسب m است.

ث-۴ ضریب بهره‌برداری از آند

ضریب بهره‌برداری از آند (u)، کسری از ماده آندی یک با طراحی خاص است که ممکن است هنگام محاسبه جرم خالص مورد نیاز آند برای حفظ حفاظت در طول عمر طراحی یک سامانه حفاظت کاتدی استفاده شود. هنگامی که یک آند تا ضریب بهره‌برداری خود مصرف می‌شود، ظرفیت پلاریزه‌کنندگی آن (که توسط جریان خروجی آند تعیین می‌شود) به دلیل از بین رفتن امکان پشتیبانی از ماده آندی یا افزایش سریع مقاومت آند به دلیل سایر عوامل، غیرقابل پیش‌بینی می‌شود.

ضریب بهره‌برداری، به طراحی آند، به‌ویژه ابعاد آند و محل هسته‌های آند بستگی دارد. توصیه می‌شود که ضرایب بهره‌برداری از آند ارائه‌شده در جدول ث-۴، برای محاسبات طراحی استفاده شوند؛ به‌غیر از مواردی که توسط مالک سازه طوری دیگر تعیین شده باشد.

یادآوری- اگر ابعاد طراحی آند و طراحی هسته آند مورد استفاده در طراحی، در خرید آن‌ها اجرا نشوند، ممکن است عملکرد طراحی آند حاصل نشود.

جدول ث-۴- ضرایب توصیه‌شده بهره‌برداری از آند برای محاسبات طراحی حفاظت کاتدی

ضریب بهره‌برداری آند	نوع آند
۰٫۹	پایه‌دار لاغر بلند $L \geq 4r$
۰٫۸۵	پایه‌دار لاغر بلند $L < 4r$
۰٫۸۵	هم‌سطح کار بلند ^ب $L \geq 4 \cdot \text{width}$ و $L \geq 4 \cdot \text{thickness}$
۰٫۸	هم‌سطح کار کوتاه، النگویی و سایر انواع

پیوست ج (آگاهی دهنده)

ضرایب گسیختگی پوشش برای طراحی حفاظت کاتدی

ضریب گسیختگی پوشش (f_c) تابعی از خواص پوشش، پارامترهای محیطی و زمان است. به عنوان یک رویکرد مهندسی ساده، f_c طبق معادله ج-۱ بیان می شود:

(ج-۱)

که در آن:

t عمر طراحی، بر حسب سال؛

a و b ثابت‌های وابسته به خواص پوشش و محیط هستند.

یادآوری - اثر رشد موجودات دریایی در ۳۰ متر بالاتر، بیشتر است؛ طوری که در این ناحیه، نیروهای موج ممکن است سهم بیشتری در تخریب پوشش داشته باشند. عامل دیگر، تمیزکاری دوره‌ای رشد موجودات دریایی در این ناحیه است.

توصیه می شود که مالک سازه، ثابت‌های a و b برای محاسبه ضرایب گسیختگی پوشش را بر اساس تجربه عملی خود از سامانه‌های پوشش خاص در یک محیط خاص مشخص کند. در صورتی که مالک سازه چنین داده‌ای را مشخص نکرده باشد، توصیه می شود که از مقادیر پیش فرض جدول ج-۱ استفاده می شود.

پس از تعریف a و b ، ضرایب گسیختگی میانگین و نهایی پوشش (f_{cm} و f_{cf})، که برای اهداف طراحی حفاظت کاتدی استفاده می شوند، با استفاده از طول عمر طراحی حفاظت کاتدی (t_f)، بر حسب سال، مطابق با فرمول‌های زیر محاسبه می شوند:

(ج-۲)

(ج-۳)

(ج-۴)

اگر مقدار محاسبه شده f_{cf} از ۱ بیشتر شود، توصیه می شود که $f_{cf} = 1$ در طراحی اعمال شود. در صورتی که عمر طراحی سامانه حفاظت کاتدی (t_f) طبق فرمول ج-۲، از عمر محاسبه شده واقعی سامانه پوشش (t) طبق فرمول ج-۱ بیشتر شود، f_{cm} ممکن است از معادله زیر محاسبه شود:

(ج-۴)

برای در نظر گرفتن اثر یک سامانه پوشش بر ضرایب گسیختگی پوشش، چهار دسته پوشش برای درج در جدول ج-۱ تعریف شده است:

دسته I: یک لایه پوشش اپوکسی، با ضخامت اسمی فیلم خشک حداقل $20 \mu\text{m}$ میکرومتر.

دسته II: یک یا چند لایه پوشش دریایی (بر پایه اپوکسی، پلی یورتان یا وینیل)، با ضخامت اسمی فیلم خشک حداقل $250 \mu\text{m}$ میکرومتر.

دسته III: دو یا چند لایه پوشش دریایی پایه اپوکسی با ضخامت اسمی فیلم خشک حداقل $350 \mu\text{m}$.

دسته IV: دو یا چند لایه از پوشش‌های پایه اپوکسی مطابق با سامانه‌های 3B یا 7 در NORSOK M-501، با ضخامت اسمی فیلم خشک حداقل $350 \mu\text{m}$ یا معادل آن و برآورده کردن کلیه الزامات برای صلاحیت‌سنجی سامانه پوشش، اعمال پوشش، بازرسی و تعمیرات ارائه شده در همان استاندارد.

دسته I شامل پوشش‌های از نوع آستری کارگاهی است. برای دسته‌های II، III و IV فرض می‌شود که مواد پوشش مخصوص تولیدکننده/سازنده که قرار است اعمال شوند، با عملکرد مستند در سرویس یا آزمون‌های مربوط صلاحیت‌سنجی شده‌اند. همچنین برای تمام دسته‌ها فرض می‌شود که تمام کارهای پوشش‌دهی طبق توصیه‌های تولیدکننده انجام شده است و آماده‌سازی سطح شامل زبره‌پاشی تا حداقل $Sa 2\frac{1}{2}$ مطابق با استاندارد ISO 8501 است. زبری سطح مطابق با مجموعه استانداردهای ISO 8503 و توصیه تولیدکننده/سازنده پوشش است.

جدول ج-۱- مقادیر توصیه شده برای ثابت‌های a و b به منظور محاسبه ضرایب گسیختگی پوشش

مقادیر توصیه شده برای ثابت‌های a و b برای دسته‌های I، II، III و IV				عمق
IV	III	II	I	m
(a = 0,02)	(a = 0,02)	(a = 0,05)	(a = 0,10)	۰ تا ۳۰
b = 0,008	b = 0,012	b = 0,025	b = 0,10	۳۰ <
b = 0,005	b = 0,008	b = 0,015	b = 0,05	

سامانه‌های پوشش لایه نازک خاص تولیدکننده/سازنده از نوع پوشش ضد اصطکاک، که معمولاً حاوی PTFE با پیوندها^۱ پلیمری پخت‌شونده با گرما هستند، ممکن است به‌عنوان پوشش دسته I یا دسته II تعریف شوند؛ به شرطی که موارد زیر رعایت شوند:

— زیربند به‌وسیله زبره‌پاشی، تا رسیدن به زبری سطح مشخص، آماده‌سازی شده باشد؛

— سطح آماده‌شده مطابق با رویه‌ای تعریف‌شده فسفات‌شده باشد؛

— پوشش با ضخامت اسمی فیلم خشک حداقل $50 \mu\text{m}$ (رده II) و 20 میکرومتر (دسته I) اعمال شده و سپس در شرایط کنترل‌شده با گرما پخت شده باشد؛

— مقاومت به جدایش کاتدی مطابق با استاندارد ISO 12944-9 در حداکثر دمای عملیاتی زیربند فولادی صلاحیت‌سنجی شده باشد.

برای هر پوشش دیگری که بدون تمیزکاری به وسیله زبره پاشی، تا رسیدن به یک زبری سطح مشخص اعمال می شود، از جمله سطوح ماشینکاری شده، سنگ زنی شده، برس خورده و نورد شده، توصیه می شود که ضریب گسیختگی پوشش $f_{cm} = f_{cf} = 1$ به کار برده شود؛ در حالی که تقاضای جریان اولیه ممکن است به صورت تقاضای جریان برای دسته I محاسبه شود.

یادآوری - برای هر سامانه پوششی که به وسیله دسته های I تا IV پوشش داده نمی شود و دارای اثر بالقوه عمده بر تقاضای کلی جریان است، مقادیر قابل اجرا برای a و b را می توان در سایر استانداردهای ملی/بین المللی مربوط (برای مثال، استانداردهای DNV-RP-F103 یا ISO 15589-2) یافت؛ یا مالک سازه مقادیر مربوط a و b را مشخص یا قبول می کند.

برای محاسبه تقاضای جریان اتاقک های غرقاب^۱ و اتاقک های بسته با دسترسی آزاد به هوا، مقادیر ثابت های a و b برای عمق ۳۰ m تا ۱۰۰ m، ارائه شده در جدول ج-۱ به کار می رود.

ثابت a در جدول ج-۱، آسیب قابل توجه به پوشش حین ساخت و نصب یا سطوحی که عمدا در حالت بدون پوشش مانده اند (برای مثال، جوش ها)، را در نظر نمی گیرد. اگر انتظار چنین آسیب یا سطوح بدون پوشش وجود داشته باشد، سطح تحت تاثیر باید تخمین زده شده و در محاسبات طراحی به عنوان سطح فلزی بدون پوشش لحاظ شود.

کتابنامه

- [1] EN 12474, Cathodic protection of submarine pipelines
- [2] EN 12495, Cathodic protection for fixed steel offshore structures
- [3] EN 12496, Galvanic anodes for cathodic protection in seawater and saline mud
- یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۲۰۳۴۵: سال ۱۳۹۴، آندهای گالوانی برای حفاظت کاتدی در آب دریا و گل شور، با استفاده از استاندارد EN 12496:2013 تدوین شده است.
- [4] EN 13173 , Cathodic protection for steel offshore floating structures
- [5] EN 13509, Cathodic protection measurement techniques
- [6] EN 16222, Cathodic protection of ship hulls
- [7] ISO 12696, Cathodic protection of steel in concrete
- [8] ISO 13174, Cathodic protection of harbour installations
- [9] ISO 15589-2 , Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline transportation systems — Part 2: Offshore pipelines
- یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۲-۱۲۹۹۴: سال ۱۳۹۴، صنایع نفت، پتروشیمی و گاز طبیعی- حفاظت کاتدی سامانه‌های خط لوله انتقال- قسمت ۲: خطوط لوله دریایی، با استفاده از استاندارد ISO 15589-2:2012 تدوین شده است.
- [10] BS 7361-1:1991, Cathodic protection, Part 1 - Code of Practice for land and marine applications
- [11] BS 7608, Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures
- [12] NORSOK/Standard M-CR 503, May 2007, Cathodic Protection
- [13] DNV-RP-F112, Design of duplex stainless steel subsea equipment exposed to cathodic protection (October 2008)
- [14] UK Health and Safety Executive, Research report 105, Review of the performance of high strength steels used offshore, 2003
- [15] The Marine Technology Directorate Ltd., Publication 90/102 , Design and Operational guidance on cathodic protection of offshore structures, subsea installations and pipelines, 1990
- [16] UK Health and Safety Executive, Offshore Technology Report OTH 91351, Hydrogen cracking of legs and spudcans on jack-up drilling rigs, 1993
- [17] Det Norske Veritas Industri Norge AS, RP B401, Cathodic Protection Design, October 2010, Amended April 2011
- [18] Hartt W., Culberson C.H., and Smith S.W., Corrosion Vol 40 No 11, Calcareous deposits on metal surfaces in seawater - a critical review, November 1984
- [19] Dexter S.C., Culberson C.H. Corrosion 79, Paper 227. Global Variability of Natural Seawater, 1979
- [20] Cathodic Protection Design Considerations for Deep Water Projects - NACE Publications 7L 192 , Item 24165, 2009

- [21] Lloyds Register of Shipping, Rules & Regulations for the Classification of Mobile Offshore Units, 1996
- [22] Peterson M.H., Grouver R.E. Tests indicate the Ag/AgCl electrode is the ideal reference cell in sea water. Mater. Prot. Perform. 1972, 11 (5) pp. 19 –2 2
- [23] EEMUA Publication no 194: 2012 , The engineering equipment and materials users association, Guidelines for materials selection and corrosion control for subsea oil and gas production equipment (3rd edition)
- [24] EN 13636, Cathodic protection of buried metallic tanks and related piping
- [25] EN 14505, Cathodic protection of complex structures
- [26] ISO 24656, Cathodic protection of offshore wind structures
- [27] ISO 20313, Ships and marine technology - Cathodic protection of ships
- [28] EN 15112, External cathodic protection of well casings
- [29] API RP 651, Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks
- [30] API RP 1632, Cathodic Protection of Underground Petroleum Storage Tanks and Piping Systems
- [۳۱] استاندارد ملی ایران شماره ۱۸۷۴۹-۳: حفاظت کاتدی- قسمت ۳: بازرسی و آزمون
- [32] DNV-RP-B401, Cathodic Protection Design