

خوردگی آلیاژ مونل 400 در محیط آب دریا

در این مقاله خواهیم خواند:

آلیاژهای پایه نیکل

خوردگی آلیاژ مونل 400 در محیط آب دریا

خوردگی PITTING مونل

خوردگی شیاری مونل 400

خوردگی گالوانیک مونل 400

DEALLOYING آلیاژ مونل 400

نویسنده: شایان زارعیان

مهندس بازرسی فنی شرکت پالایش نفت لاوان

سایت مرجع بازرسی فنی و کنترل کیفیت

www.QCPage.com

خوردگی آلیاژ مونل 400 در محیط آب دریا

نویسنده: شایان زارعیان

مهندس بازرسی فنی شرکت پالایش نفت لاوان

۱- مقدمه

به دلیل مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی خوب آلیاژهای پایه نیکل، این دسته از آلیاژها به طور وسیعی در صنایع مختلف و برای کاربردهای متنوع مطلوب هستند، از جمله؛ صنایع فرآوری مواد شیمیایی و پتروشیمی، کنترل آلودگی، استخراج نفت و گاز، مهندسی دریا، تولید برق و صنایع چوب و کاغذ. انعطاف پذیری و قابل اعتماد بودن، آلیاژهای پایه نیکل را به اولویت اول انتخاب متریال در ساخت مخزن تحت فشار، سیستم خط لوله، پمپ، شیر و بسیاری از کاربردهای دیگر در محیط‌های آبی و دما بالا تبدیل کرده است.

نیکل به صورت یک کریستال آستنیتی با ساختار FCC^۱ تا دمای ذوبش باقی می‌ماند. در سری الکتروشیمیایی نیکل از آهن بسیار نجیب‌تر بوده، هرچند فعال‌تر از مس می‌باشد. بنابراین در محیط‌های احیایی، نیکل نسبت به خوردگی مقاوم‌تر از آهن بوده هرچند مقاومت به خوردگی آن از مس پایین‌تر است. تأثیر دو عنصر نیکل و مس در آلیاژ پایه نیکل مونل ۴۰۰ به شرح زیر است.

نیکل: ایجاد پایداری متالورژیکی، ایجاد و بهبود پایداری حرارتی و جوش پذیری و افزایش مقاومت به SCC به ویژه در محیط‌های حاوی کلرید و کاستیک.

^۱. Face Center Cubic

^۲. Noble

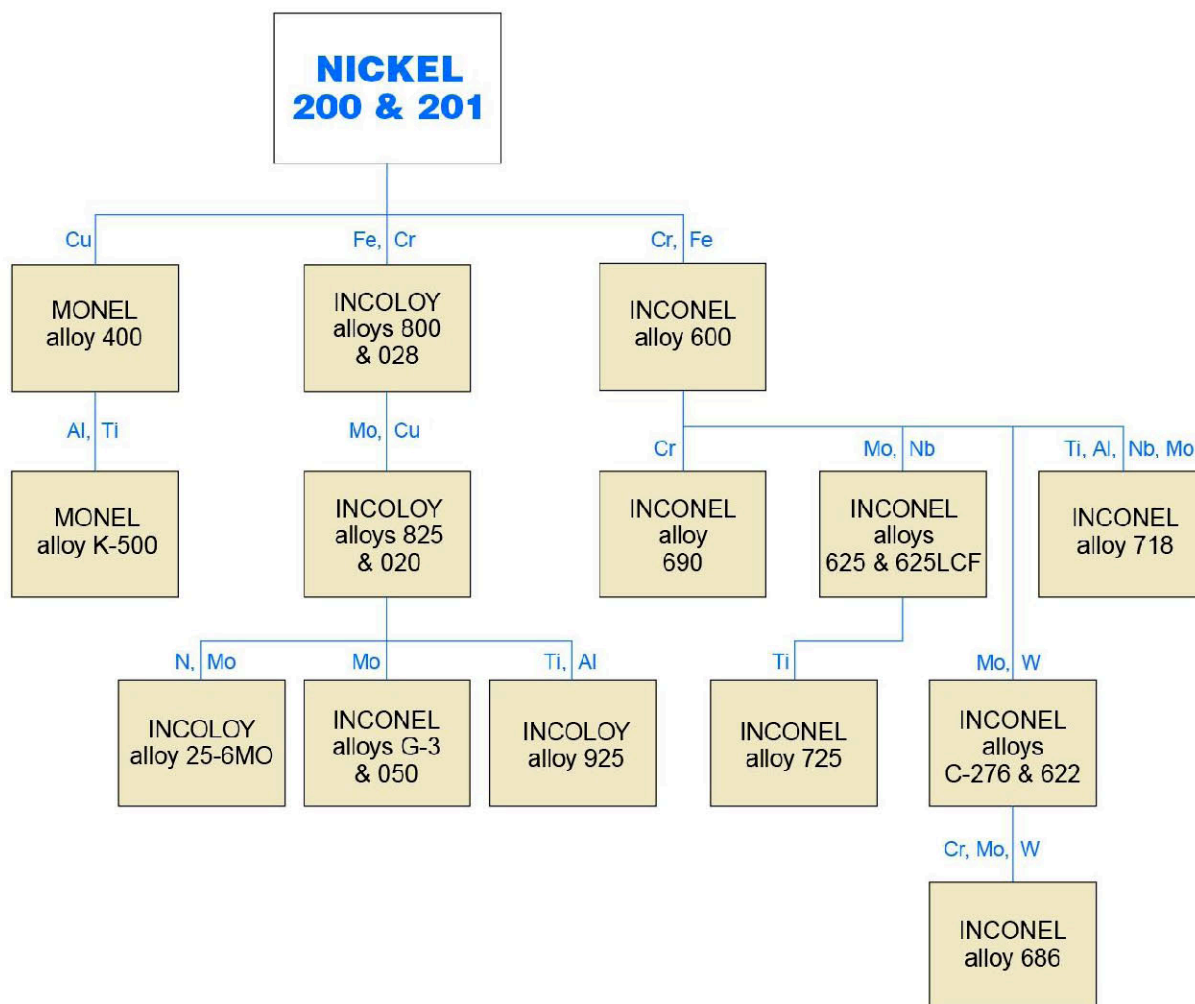
مس: افزایش مقاومت به اسیدهای احیایی (به ویژه اسید سولفوریک و هیدروفلوئوریک (non-aerated) و نمک-ها.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژهای نیکل

Nominal chemical compositions (% by weight)								
Designation	UNS	Werkstoff	Ni	Cr	Mo	Fe	Cu	Other
Nickel 200	N02200	2.4060	99.6					C 0.04
Nickel 201	N02201	2.4061	99.6					C 0.02 max.
MONEL alloy 400	N04400	2.4360	65.1			1.6	32.0	Mn 1.1
MONEL alloy K-500	N05500	2.4375	64.7			1.0	30.2	Al 2.7, Ti 0.6
INCONEL alloy 600	N06600	2.4816	76.0	15.0		8.0		
INCONEL alloy 622	N06022	2.4602	59.0	20.5	14.2	2.3		W 3.2
INCONEL alloys 625 and 625LCF	N06625 N06626	2.4856	61.0	21.5	9.0	2.5		Nb 3.6
INCONEL alloy 686	N06686	2.4606	58.0	20.5	16.3	<1.0		W 3.8
INCONEL alloy 690	N06690	2.4642	61.5	29.0		9.0		
INCONEL alloy 718	N07718	2.4668	54.0	18.0	3.0	18.5		Nb 5.0, Ti 1.0
INCONEL alloy 725	N07725		57.0	21.0	8.0	7.5		Nb 3.5, Ti 1.5, Al 0.3
INCONEL alloy C-276	N10276	2.4819	57.0	16.0	16.0	5.5		W 4.0
INCONEL alloy G-3	N06985	2.4619	44.0	22.0	7.0	19.5	2.0	
INCONEL alloy 050	N06950		50.0	20.0	9.0	17.0		
INCOLOY alloy 800	N08800	1.4876	32.5	21.0		46.0		C 0.05
INCOLOY alloy 825	N08825	2.4858	42.0	21.5	3.0	28.0	2.0	
INCOLOY alloy 864	S35135		34.0	21.0	4.2	39.0		Si 0.8, Ti 0.6
INCOLOY alloy 925	N09925		44.0	21.0	3.0	28.0	1.8	Ti 2.1, Al 0.3
INCOLOY alloy 020	N08020	2.4660	35.0	20.0	2.5	37.0	3.5	Nb 0.6
INCOLOY alloy 028	N08028	1.4563	32.0	27.0	3.5		1.0	Mn 2.0
INCOLOY alloy 25-6MO	N08926	1.4529	25.0	20.0	6.5	47.0	0.9	N 0.20

MONEL 400: این متریال، آلیاژ Ni-Cu با استحکام بالا و مقاومت به خوردگی در محدوده وسیعی از محیط‌ها نظیر آب دریا، HF و H_2SO_4 رقیق شده و همچنین قلیاها (NaOH) می‌باشد. این آلیاژ در مهندسی دریا و فرا ساحل، تولید نمک و فرآوری مواد شیمیایی و هیدروکربن‌ها کاربرد دارد. آلیاژ مونل با مقدار سولفور

کنترل شده خواص ماشینکاری بالایی داشته و در شکل‌های مختلف مثل Rod, Billet و Wire تولید می‌شود.



شکل ۱: دیاگرام آلیاژهای مختلف نیکل

۲- خوردگی MONEL در محیط نمک‌ها

هنگامیکه نمک‌ها درون آب حل شده باشد، هدایت آب را افزایش داده و در نتیجه توانایی حمل جریان خوردگی بالایی را دارند. در نتیجه اثر گالوانیک در محلول‌ها نمکی از آب خالص بالاتر می‌باشد. نمک‌ها به نحوی که در جدول زیر آورده شده است از لحاظ خواص خوردگی طبقه بندی می‌شوند.

معمول‌ترین آلیاژهای نیکل در محیط‌های فرآیندی دارای نمک‌های سولفات، آلیاژهای INCOLOY نوع 25-6Mo و 825 و 020 و INCONEL نوع G-3، 625، 622، C-276 و 686 می‌باشد. برای نمک‌های کلریدی نیز پر مصرف‌ترین آلیاژها MONEL 400 (برای شرایط احیایی)، آلیاژهای INCOLOY نوع 25-6Mo و 825 و 020 و INCONEL نوع G-3، 625، 622، C-276 و 686 می‌باشد.

جدول ۲: طبقه بندی نمک‌ها از نظر خواص خوردگی

Classification of salts by corrosive characteristics		
Characteristic pH	Halide	Non-halide
Neutral	Sodium chloride Potassium chloride	Sodium sulfate Potassium sulfate
Neutral and Alkaline-Oxidizing	Sodium hypochlorite Calcium hypochlorite	Sodium nitrate Sodium nitrite Potassium permanganate
Acid	Magnesium chloride	Potassium bisulfate Ammonium sulfate Aluminum sulfate
Acid-Oxidizing	Cupric, ferric, mercuric, stannic chloride	Cupric, ferric, mercuric, nitrate, or sulfate
Alkaline	Potassium fluoride	Sodium and potassium phosphates, carbonates

جدول ۳: جدول انتخاب مواد آلیاژهای مختلف نیکل در محیط‌های گوناگون

A Guide to Aqueous Corrosion-Resistance (All alloys listed are resistant to chloride cracking) ★ = Good to excellent ☆ = Acceptable - = Not suitable									
	Sulfuric Acid	Hydrochloric Acid	Hydrofluoric Acid	Phosphoric Acid	Nitric Acid	Organic Acids	Alkalines & Salts	Seawater	
Nickel 200	☆	☆	★	☆	-	★	★	☆	
Nickel 201	☆	☆	★	☆	-	★	★	☆	
DURANICKEL® alloy 301	☆	☆	★	☆	-	★	★	☆	
MONEL® alloy 400	★	☆	★	★	-	★	★	★	
MONEL® alloy R-405	★	☆	★	★	-	★	★	★	
MONEL® alloy K-500	★	☆	★	★	-	★	★	★	
INCONEL® alloy 600	☆	-	☆	☆	-	★	★	☆	
INCONEL® alloy 622	★	★	★	★	★	★	★	★	
INCONEL® alloy 625	★	★	★	★	★	★	★	★	
INCONEL® alloy 625LCF®	★	★	★	★	★	★	★	★	
INCONEL® alloy 686	★	★	★	★	★	★	★	★	
INCONEL® alloy 690	☆	☆	★	★	★	★	★	☆	
INCONEL® alloy 718	☆	☆	☆	☆	☆	★	★	★	
INCONEL® alloy 725™	★	★	★	★	★	★	★	★	
INCONEL® alloy C-276	★	★	★	★	☆	★	★	★	
INCONEL® alloy G-3	★	★	★	★	★	★	★	★	
INCONEL® alloy 050	★	★	★	★	★	★	★	★	
INCOLOY® alloy 800	☆	☆	-	☆	★	★	☆	☆	
INCOLOY® alloy 825	★	★	★	★	★	★	★	★	
INCOLOY® alloy 864™	☆	☆	☆	☆	★	★	★	★	
INCOLOY® alloy 925™	★	★	★	★	★	★	★	★	
INCOLOY® alloy 020	★	★	★	★	★	★	★	★	
INCOLOY® alloy 25-6MO	★	★	☆	★	★	★	★	★	
INCOLOY® alloy 028	☆	★	☆	☆	★	★	★	★	

آلیاژهای Nickel 200 و MONEL 400 در هیچ یک از نمک‌های کلریدی در معرض^۱ SCC نیستند و مقاومت خوردگی عمومی خوبی به کلیه هالیدهای غیراکسیدی دارند. این رفتار خوردگی با تست‌های انجام شده در محلول potash liquor شامل 21% KCl، 14% NaCl، 1.0% CaCl₂، 0.1 CaSO₄ و 2.5%

¹. Stress Corrosion Cracking

MgCl₂ با pH=7.1 و دمای 113 °C بررسی شده است. بعد از 1000 ساعت آلیاژهای MONEL 400 و Cu-Ni در نرخهای کم و قابل اندازه گیری دچار خوردگی شده بودند. آلیاژهای Ni-Cr-Fe با مقدار کمتر از 6% Mo دچار خوردگی pitting و crevice شده و آلیاژهای با مقادیر نیکل کمتر در نتیجهی وقوع SCC دچار خرابی شده‌اند.

جدول ۴: خوردگی آلیاژهای پایه نیکل در محیط نمک‌های کلریدی

Corrosion test results for various alloys in potash liquor at 235°F (113°C). Duplicate U-bent stress-corrosion cracking specimens with PTFE insulators tested for 1000 h				
Alloy	Corrosion rate, mpy (mm/a)	Pitting	Crevice corrosion*	SCC
MONEL alloy 400	0.5 (0.01) 0.6 (0.02)	No No	No No	No No
INCONEL alloy 800	<1 (<0.025) –	Yes Yes	No Yes	No No
INCOLOY alloy 825	<1 (<0.025) –	Yes Yes	No No	No No
70-30 Cu-Ni	0.5 (0.01) 0.5 (0.01)	No No	No No	No No
90-10 Cu-Ni	0.4 (0.01) 0.4 (0.01)	No No	No No	No No
Ti-12	<1 (<0.025) –	No No	Yes Yes	No No

۳- خوردگی MONEL در محیط آب دریا

در آب دریا و شور آلیاژهای MONEL 400 و K-500، به مانند بسیاری از دیگر از آلیاژهای نیکل، مقاومت خوردگی و کارکرد بسیار عالی در سیستم‌های با سرعت آب متوسط تا بالا دارند. این آلیاژها دارای مقاومت عالی به cavitation و erosion-corrosion بوده و نرخ خوردگی در آب دارای جریان معمولاً کمتر از 1 mpy می‌باشد. در آب دریای راکد و یا کند، رسوبگذاری و به دنبال آن pitting رخ می‌دهد. این pitting‌ها پس از یک حمله‌ی آغازین و سریع، در ادامه کند شده و به ندرت عمق آن‌ها به بیش از 1.3 mm می‌رسد. در مورد نیکل غیرآلیاژی Soutwell و Alexander گزارش کرده‌اند که بیشترین عمق pitting در سال اول رخ می‌-



دهد و عمق pit با گذشت زمان پس از یکسال با سرعت کمی افزایش می‌یابد. MONEL 400 به نسبت نیکل غیرآلیاژی به pitting مقاوم‌تر است، اگرچه MONEL 400 به شدت دچار pitting می‌شود. عمده عناصر آلیاژی در ایجاد مقاومت به pitting، Cr و Mo می‌باشند. Kain و Tipton نشان داده‌اند که کاهش ضخامت خوردگی MONEL 400 در دمای 30°C به بیشینه خود می‌رسد و بعد در دمای 50°C به مقادیر بسیار کمی کاهش می‌یابد. عمق pitting در دمای 18°C بیشترین مقدار و در دمای 50°C کاهش می‌یابد.

جدول ۵: طبقه بندی آلیاژهای نیکل در محیط دریایی

CLASSIFICATION OF NICKEL ALLOYS THAT MAY FIND SPECIAL APPLICATION IN MARINE ENVIRONMENTS (2)		
Alloy	Composition, Weight Percent	Remarks
<i>Class I: Most Resistant</i>		
Hastelloy C	57Ni-16Cr-17Mo plus Fe, W, Co	Completely resistant except at welds.
Hastelloy C-276	57Ni-16Cr-17Mo plus Fe, W, Co	Low carbon ($< 0.02\text{ C}$) can be welded.
Inconel 625	61Ni-22Cr-9Mo plus Fe, Cb	Approaches Hastelloy C in total resistance.
MP35N	35Ni-35Co-20Cr-10Mo	Excellent, so far, in preliminary experiments.
Chlorimet-3	60 Ni-18Cr-18Mo plus Fe, Si	Cast alloy; excellent for pumps, etc.
René 41	56Ni-11Co-19Cr-10Mo-3.1Ti	Good-to-excellent resistance to pitting.
Hastelloy X	52Ni-22Cr-9Mo-19Fe plus W, Co	Good-to-excellent resistance to pitting.
<i>Class II: Very Resistant</i>		
Hastelloy F	46Ni-22Cr-7Mo-21Fe	Usually satisfactory; molybdenum content provides resistance to pitting.
Hastelloy G	45Ni-21Cr-7Mo-20Fe-2Cu-25Co	
Illium R	68Ni-21Cr-5Mo-3Cu	
Inconel 700	46Ni-28Co-15Cr-4Mo plus Ti, Al	
Elgiloy	15Ni-40Co-20Cr-7Mo-15Fe-2Mn	
Inconel 718	53Ni-19Cr-3Mo-18Fe plus Co, Ti, Al	
<i>Class III: Resistant, Some Pitting</i>		
Inconel 600	76Ni-16Cr-7Fe	May be some pitting at sites where seawater is stagnant.
Inconel X750	73Ni-15Cr-7Fe plus Cb, Ti, Al	
Incoloy 800	32Ni-21Cr-46Fe	
Incoloy 825	42Ni-22Cr-30Fe-3Mo-2Cu	
Monel-400	66Ni-32Cu-2Fe	
Monel-K500	65Ni-30Cu-1Fe-3Al	

۴- ملاحظات متالورژیکی

۴-۱- رویین سازی

رویین سازی^۱ شامل تشکیل یک فیلم نازک و محافظ بر روی سطح فلز می‌باشد، که فلز را رویین (مقاوم به خوردگی) می‌سازد. در حالیکه فولاد زنگ نزن نیازمند یک کار اسیدی^۲ به منظور رویین شدن هستند، نیکل و آلیاژهای پایه نیکل در معرض هوا رویین می‌شوند. در آلیاژهای پایه نیکل دارای کروم فیلم رویین یک اکسید کروم-آهن-مولیبدن می‌باشد. کروم جزء اصلی است که به فیلم مقاومت به خوردگی بالایی می‌دهد.

فیلم تشکیل شده روی سطح در معرض هوا در کارخانه پایدار است. اگرچه در طول فرآیند تولید، فیلم ممکن است به صورت موضعی آسیب ببیند زمانیکه آهن، پاشش جوش، لکه قوس باعث ایجاد محل‌های عیوب موضعی شود. بخش آسیب ندیده سطح در طول تولید رویین می‌ماند. حذف عیوب با pickling، الکتروپولیش و یا ابزار مکانیکی باعث بازیابی سریع فیلم می‌شود.

رویین سازی سطح فولادهای زنگ نزن با اسید نیتریک در ASTM A380 شرح داده شده است، هرچند لازم به توضیح است در مورد آلیاژهای نیکل انجام چنین عملیاتی ضروری نمی‌باشد.

۵- خوردگی pitting

متداول‌ترین نوع خرابی در آب دریا برای آلیاژهای پایه نیکل خوردگی pitting و crevice می‌باشد. زمانیکه تحت شرایط خاصی جریان روی سطح یک فلز برقرار نباشد و حالت ایستا داشته باشد، سطوح آندی روی سطح این فلز به جای نازک شدن عمومی از خود خوردگی کاملاً موضعی تحت عنوان pitting نشان می‌دهند. اگرچه

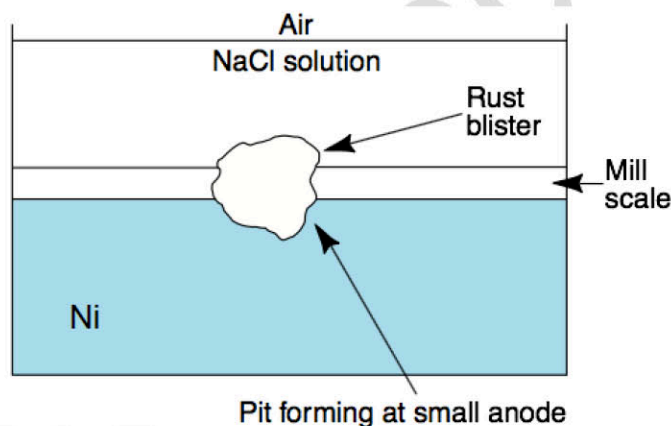
¹. Passivation

². Acid Treatment

pitting می تواند دلایل مختلفی داشته باشد، مواد شیمیایی خاصی، عمدتاً نمک های هالیدها و به ویژه کلریدها از جمله NaCl و $MgCl_2$ به خوبی به عنوان تولید کننده ی pitting شناخته می شوند.

نکته: این موضوع که یک فلز منفرد چگونه دارای هر دو سطوح آندی و کاتدی است کمی عجیب به نظر می رسد. در عمل، چنین تفاوت هایی به کمک فاکتورهای ذاتی بسیاری در فلز ایجاد می شود، نظیر آخال ها، وجود صفحات کریستالوگرافی مختلف، تغییرات در ترکیب آلیاژ و عیوب سطحی میکروسکوپی.

فلزات رویین در محیط های کلریدی به طور ویژه ای در معرض pitting هستند. به نظر می رسد که یون های کلرید در سطوح آندی تجمع کرده و در این نقاط درون فیلم رویین نفوذ کرده و یا حل می شوند.

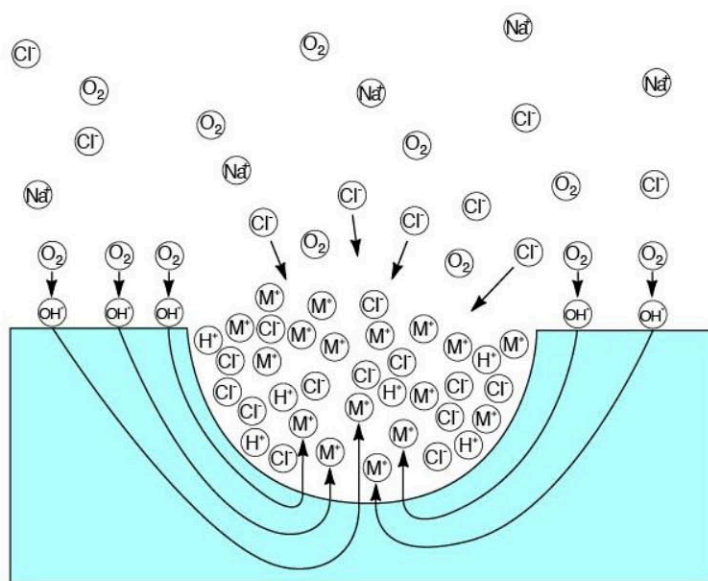


شکل ۲: شماتیک وقوع pitting

از آنجاییکه محصول خوردگی کلرید، نمک های اسیدی است. اسیدی بودن در آند، با مهاجرت بیشتر کلرید به آند افزایش یافته و در نتیجه نرخ خوردگی با زمان افزایش می یابد. واکنش های self-accelerating از این نوع تحت عنوان autocatalytic شرح داده می شوند.

کلریدهای اکسیدی مثل کلریدهای Hg^{2+} و Cu^{2+} ، Fe^{3+} هجومی ترین عوامل pitting هستند. کاتیون فلزی در موقعیت های کاتد احیاء شده و هوا یا اکسیژن انحلال یافته یک پیش شرط برای خوردگی نمی باشد. در مورد

کلریدهای غیر اکسیدی مثل MgCl_2 و NaCl احیاء اکسیژن واکنش کاتدیک بوده و pitting در حالت نرمال کندتر است زیرا سرعت واکنش کاتدیک با نفوذ اکسیژن به درون کاتد کنترل می‌شود. لازم به توضیح است آلیاژهای پایه آهن و نیکل که دارای Cr و Mo هستند به خوردگی pitting مقاوم‌تر هستند.

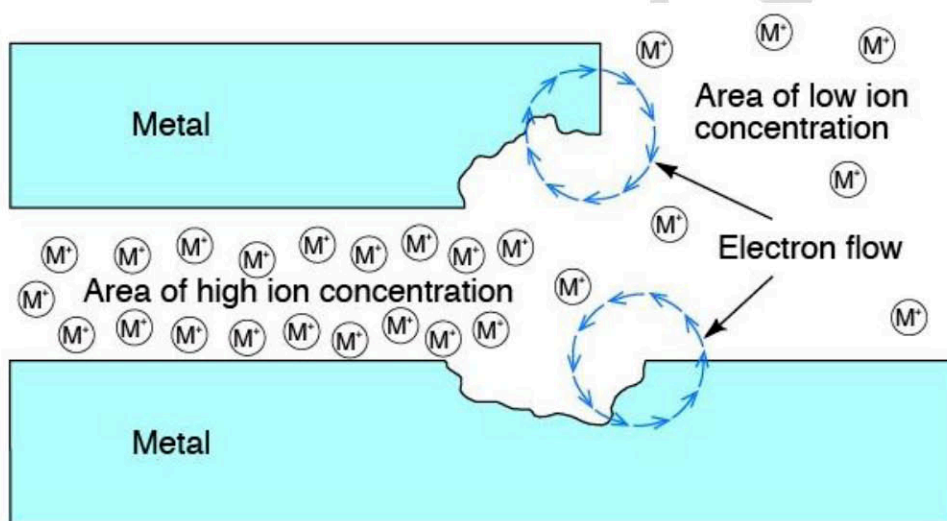


شکل ۳: واکنش‌های self-accelerating

۶- خوردگی شیاری

خوردگی شیاری نوع دیگری از هجوم موضعی است که از اسم آن مشخص است که درون شیارهای تشکیل شده در نتیجه‌ی همپوشانی بخش‌های مختلف فلز و یا زیر سازه‌های غیر فلزی که محکم به سطح فلز چسبیده است رخ می‌دهد. به مانند pitting خوردگی شیاری آلیاژهای پایه نیکل معمولاً با نمک‌های هالید، به ویژه کلریدها و فلوئوریدها تشدید می‌شود. به طور کلی دو مکانیزم اصلی وجود دارد که خوردگی شیاری را ایجاد می‌کنند؛ سلول‌های غلظت یون و سلول‌های غلظت اکسیژن. هر دو مکانیزم به طور نرمال بستگی به حضور یون‌های کلرید که نقش اشاعه‌ی تهاجم را دارند، دارد.

درون یک شیار بعضی از فلزات ممکن است انحلال یافته و به عنوان یون فلزی درون محلول انتقال یابند. بیرون شیار، فرآیند یکسانی رخ می‌دهد، هرچند مقدار نسبی محلول در بیرون شیار منجر به غلظت کمتری نسبت به داخل آن خواهد گردید. فلز دقیقاً بیرون شیار به منظور ایجاد تعادل در غلظت شروع به انتقال به درون محلول با سرعتی بیشتر می‌نماید. به عبارت دیگر فلز بیرون شیار نسبت به فلز درون شیار آندیک شده و این اختلاف پتانسیل باعث ایجاد یک جریان می‌شود. اگر محلول در حال حرکت باشد، یون‌ها به محض تولید از محل شیار دور خواهند شد، از تعادل جلوگیری شده و خوردگی ادامه خواهد یافت (شکل ۴). در این شرایط که یک سلول غلظت یون فلزی را تشکیل می‌دهد، شیار به عنوان کاتد عمل می‌کند.

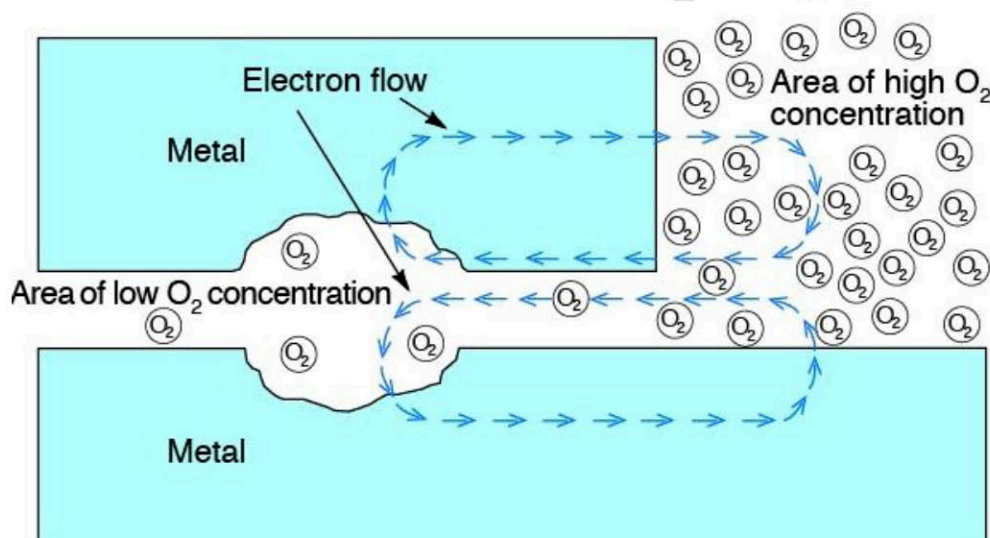


شکل ۴: خوردگی شیار ناشی از غلظت یون فلزی

این نوع از خوردگی ممکن است به واسطه‌ی اختلاف در وجود اکسیژن انحلال یافته نیز رخ دهد. در این شرایط، خوردگی به واسطه‌ی یک سلول غلظت اکسیژن رخ می‌دهد. یکی از متداول‌ترین انواع خوردگی که این نوع نیز خوردگی شیار نامیده می‌شود. یک شیار به عنوان یک سد نفوذی عمل کرده و خوردگی اغلب مواقع درون شیار و یا در بیرون شیار رخ می‌دهد.

درون یک شیار، غلظت اکسیژن معمولاً کمتر از غلظت اکسیژن در بیرون آن است. از آنجاییکه واکنش کاتدی اکسیژن مصرف می‌کند، سطح بیرون نسبت به سطح داخل شیار کاتدی شده و از هجوم شتاب یافته تأثیر خواهد پذیرفت. خوردگی تا زمانی ادامه خواهد یافت که غلظت اکسیژن متعادل شده یا اگر تأمین اکسیژن در مورد محیط بیرون شیار ادامه یابد، ممکن است تا زمانی که فلز تخریب شود ادامه یابد.

شکل ۵ یک مکان سلول اکسیژن را نشان می‌دهد. شیار ناشی از همپوشانی، با عمل کردن به عنوان یک سد circulation با جلوگیری از تعادل بین غلظت اکسیژن در داخل و بیرون شیار منجر به هجوم سلول اکسیژن خواهد گردید.



شکل ۵: خوردگی شیار ناشی از غلظت اکسیژن



۷- خوردگی متأثر از میکروب

باکتری‌های شناخته شده به عنوان عامل MIC، درون حفرات مرزهای دانه، سوختگی کنار جوش و درون دیواره تیوب‌های مبدل‌های حرارتی و سایر سازه‌های مرتبط با آب دریا، زندگی کرده، پیشرفت کرده و چند برابر می‌شوند. باکتری‌های MIC تحت دو دسته کلی باکتری‌های غیرهوازی یا احیاء کننده (احیاء کننده سولفات و منگنز) و هوازی یا اکسیژن گیر دسته بندی می‌شوند. MIC در گستره وسیعی از کاربردها می‌تواند رخ دهد، به ویژه وقتی که آب راکد وجود دارد. رویکرد معمول و استاندارد در جلوگیری از MIC تزریق میکروب کش^۱ درون آب است که عمدتاً شامل مشتقات کلر می‌باشد. آلیاژهای INCOLOY به MIC مقاوم‌تر بوده و در خطوط لوله با سرویس آب در بسیاری از نیروگاه‌ها کاربرد دارند.

۸- رتبه بندی آلیاژهای مقاوم به خوردگی موضعی

مقاومت به خوردگی pitting و شیاری تا حدودی با فاکتورهای مقایسه‌ای قابل اندازه گیری است. دمای بحرانی pitting (CPT)، دمای بحرانی شیار (CCT) و عدد معادل مقاومت به pitting (PREN) از آن جمله هستند.

۸-۱- PREN

PREN برای آلیاژهای مقاوم به خوردگی با پایه نیکل با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$PREN = \%Cr + 1.5 (\%Mo + \%W + \%Nb)$$

به طور کلی هرچه عدد PREN بالاتر باشد، مقاومت به pitting بالاتر است. از رابطه بالا مشخص است که عناصر آلیاژی Cr، Mo، W و Nb مقاومت به pitting را افزایش می‌دهند.

^۱. Biocide

CCT - ۲-۸

CPT با انجام آزمونی طبق استاندارد ASTM G-48، روش D اندازه گیری می شود و برای آلیاژهای پایه نیکل از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$CCT \text{ (deg. C)} = 3.2 (\%Cr) + 7.6 (\%Mo) + 10.5 (\%N) - 81.0$$

CPT - ۳-۸

CPT با انجام آزمونی طبق استاندارد ASTM G-48، روش C اندازه گیری می شود و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$CPT \text{ (deg. C)} = 2.5 (\%Cr) + 7.6 (\%Mo) + 31.9 (\%N) - 41.0$$

همانطور که از رابطه بالا مشخص است وجود عناصر آلیاژی Cr و Mo باعث انتقال دمای وقوع pitting به دماهای بالاتر می شود.

۹- خوردگی گالوانیک

هنگامیکه دو فلز غیر مشابه در یک الکترولیت در تماس الکتریکی قرار گیرند، فلزی که کمتر نجیب است با شدت بیشتری نسبت به حالتیکه به تنهایی در معرض آن محیط قرار گیرد دچار خوردگی می شود.

اگرچه سری نیروی محرکه الکتریکی (جدول ۶) یک رتبه بندی از فلزات را طبق فعالیت شیمیایی آنها ارائه می دهد، ولی برخی از فاکتورهایی که بر واکنش های خوردگی اثرگذار هستند را در نظر نمی گیرد. به این دلیل رتبه بندی دیگری که تحت عنوان “سری گالوانیکی” شناخته می شود بیشتر مواقع به کار می رود (جدول ۷). این سری شاخصی از نرخ خوردگی بین فلزات مختلف و قتیکه درون یک الکترولیت، به ویژه آب دریا به عنوان یک

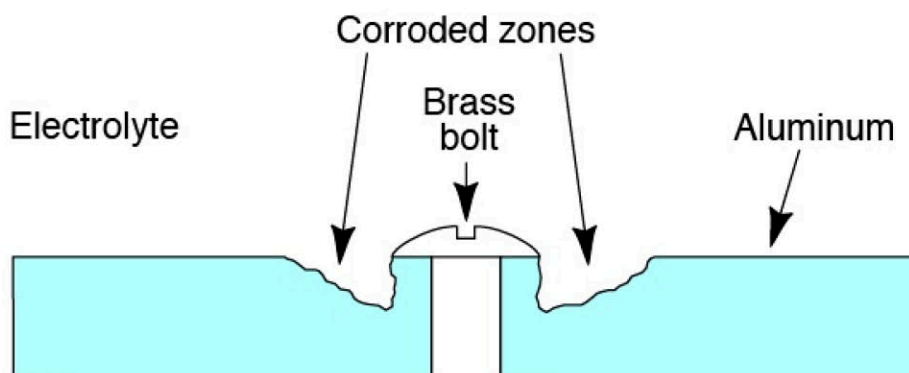
الکترولیت شاخص، در تماس با یکدیگر هستند را ارائه می‌دهد. برای مثال شکل ۶ مثالی از خوردگی گالوانیک در حالتیکه متریال bolt نجیب‌تر از فلز ورق اصلی است را نشان می‌دهد.

جدول ۶: پتانسیل‌های استاندارد اکسایش و کاهش

Standard oxidation reduction potentials at 25°C (77°F). Volts vs normal hydrogen electrode*		
Element	Electrode Reaction	Redox Potential
Gold	$\text{Au} = \text{Au}^{+3} + 3\text{e}$	+1.498
Oxygen (acid media)	$\text{O}_2 + 4\text{H} + 4\text{e} = 2\text{H}_2\text{O}$	+1.229
Platinum	$\text{Pt} = \text{Pt}^{+2} + 2\text{e}$	+1.2
Iron (ferric)	$\text{Fe}^{+3} = \text{Fe}^{+2} + \text{e}$	+0.771
Oxygen (neutral or alkaline media)	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} = 4\text{OH}$	+0.401
Copper	$\text{Cu} = \text{Cu}^{+2} + 2\text{e}$	+0.337
Hydrogen	$\text{H}_2 = 2\text{H}^{+} + 2\text{e}$	0.000
Nickel	$\text{Ni} = \text{Ni}^{+2} + 2\text{e}$	-0.250
Iron (ferrous)	$\text{Fe} = \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}$	-0.440
Chromium	$\text{Cr} = \text{Cr}^{+3} + 3\text{e}$	-0.744
Zinc	$\text{Zn} = \text{Zn}^{+2} + 2\text{e}$	-0.763

*Electrode potential values are given and are invariant, e.g. $\text{Zn} = \text{Zn}^{+2} + 2\text{e}$ and $\text{Zn}^{+2} + 2\text{e} = \text{Zn}$ are identical and represent zinc in equilibrium with its ions with a potential of -0.763 volts vs normal hydrogen electrode.

همانطور که در جدول ۷ مشخص است آلیاژ مونل ۴۰۰ از بسیاری دیگر از آلیاژهای نیکل کمتر نجیب بوده و خوردگی گالوانیکی آن در تماس با فلزی یکسان بیشتر رخ می‌دهد.



شکل ۶: خوردگی گالوانیکی



جدول ۷: سری گالوانیکی

Galvanic series in seawater	
	Active (anodic, or least noble)
	Magnesium Magnesium alloys Zinc Aluminum alloys Mild steel Ni-Resist cast iron AISI 304 stainless steel (active) AISI 316 stainless (active) Manganese bronze Nickel 200 (active) INCONEL alloy 600 (active) Admiralty brass Aluminum brass Copper 70-30 copper-nickel Nickel 200 (passive) INCONEL alloy 600 (passive) MONEL alloy 400 AISI 304 stainless steel (passive) AISI 316 stainless steel (passive) INCOLOY alloys 825 and 925 INCOLOY alloy 25-6MO INCONEL alloys 625 and 725 INCONEL alloy C-276 and 622 INCONEL alloy 686 Titanium Graphite Gold
	Passive (cathodic, or most noble)

۱۰- خوردگی سایشی

سایش به سادگی تحت عنوان از بین رفتن فلز به وسیله‌ی جریان شدید سیال شناخته می‌شود. خوردگی سایشی در حقیقت تسریع خوردگی در نتیجه‌ی از بین رفتن سطح محافظ ایجاد شده به وسیله‌ی فیلم محصولات خوردگی به کمک جریان سیال می‌باشد. به طور کلی با استفاده از آلیاژهای نیکل از این نوع تخریب تا حدود زیادی اجتناب می‌شود.

۱۱- آلیاژ زدایی

در بعضی از آلیاژها یک جزء سازنده ممکن است به صورت انتخابی در بعضی از محیط‌ها انحلال یابد. این نوع تخریب بعضاً تحت عنوان خوردگی انتخابی بیان می‌شود. مشهورترین نوع آن dezincification آلیاژ برنج زرد می‌باشد. در مورد آلیاژ MONEL 400 نیز آلیاژ زدایی به نام denickelification در محیط‌هایی مثل اسید هیدروفلوئوریک و سایر اسیدها به وقوع می‌پیوندد. لازم به توضیح است در آلیاژهای مس-نیکل 30-70 پدیده denickelification در دماهای بیش از 100°C و در جریان سیال کند بیشتر رخ می‌دهد.

منابع و مراجع

- 1- High-Performance Alloys for Resistance to Aqueous Corrosion, special metals corporation
- 2- ASM metal handbook, Vol.13, Corrosion
- 3- Seawater Circuits: Treatments and Materials, French Oil and Gas Association
- 4- Material for Marine Systems and Structures, D.F. Hasson and C.R. Crowe
- 5- API RP 571, Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry