به نام ایزد یکتا

بولتن فنی شرکت میراب (۱۳۹۷)، شماره ۴

MIRAB TECHNICAL BULLETIN (4)

بررسی انواع متریال های قابل استفاده جهت سیال آب دریا

مقایسه و تحلیل فنی خواص مکانیکی و رفتار خوردگی

با رویکرد

" استفاده از شیرآلات صنعتی با متریال نیکل - آلومینیوم- برنز "

مقدمه:

بدلیل محدودیت منابع آب شیرین، استفاده از آب دریا در صنایع مختلف جهت اهداف گوناگون اجتناب ناپذیر و بطور وسیع در حال رشد می باشد. خوردگی ناشی از تماس این سیال با بدنه و قطعات شیرآلات صنعتی از جمله بزرگترین چالش های پیش روی طراحان و تولیدکنندگان جهت انتخاب متریال مناسب در ساخت تجهیزات با عمر مفید مطلوب برای سیال آب دریا می باشد.

پارامترهای کلیدی در مسیر انتخاب مناسب ترین متریال شامل موارد زیر می باشد:

- خواص مکانیکی
- قابلیت ریخته گری
- قابلیت جوش پذیری
- قابلیت ماشینکاری
- مقاومت به خوردگی
- توصیه های محافظت در برابر خوردگی
- دسترسی آسان در بازار
- هزینه های اولیه
- عمر مفید طراحی
- شرایط کاری سرویس

رویکرد این نوشتار عمدتا به منظور مطالعه، بررسی و مقایسه دو آلیاژ داپلکس[1] و نیکل-آلومینیوم-برنز[2] به لحاظ خواص مکانیکی، ترکیب شیمیایی و رفتارهای خوردگی آنها در تماس با آب دریا می باشد.

بدین منظور از بررسی های صورت گرفته روی فلزات جدول زیر، نتایج مربوط به آلیاژهای فوق برداشت و تحلیل گردیده است.

انواع متریال:

Name	Std	Grade	UNS	Also known as
Cast Iron	Various			
Bronze	B62		C83600	Gunmetal, valve bronze, leaded bronze
NiAlBrnze	B148		C95800	NAB
Ni-Cu alloy	A494	M35-1	N24135	Monel ®
Carbon Steel	A216	WCB	J03002	
Stainless St.	A351	CF8M	J92600	316
6Mo	A351	CK3MCuN	J93254	
Duplex	A890	4A / CD3MN	J92205	
Super Duplex	A744	1A / CD4MCu	J93370	
Ni Alloy 625	A494	CW6MC	N26625	Inconel ® 625
Ni Alloy C22	A494	CX2MW	N26022	Hastelloy ® C22
Ti C2	B367	C-2	R50400	
Ti C3	B367	C-3	R50550	

1. Duplex Stainless Steel
2. Nickel Aluminum Bronze (Ni.Al.Bz.)

نکته : استفاده از متریال Cast Iron و Carbon Steel با تمهیدات پوششی مناسب توصیه می گردد.

۱) آلیاژ داپلکس (Duplex):

بر اساس استاندارد ASTM A890، فولاد ضد زنگ Duplex آلیاژی از آهن، کروم، نیکل و مولیبدن است که با ساختار آستنیتی- فریتی با شرط انتخاب ترکیب شیمیایی مناسب و انجام عملیات حرارتی مطلوب دارای استحکام مکانیکی و مقاومت به خوردگی بالا می باشد.

ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی انواع گریدهای متریال ریختگی Duplex بر اساس استاندارد ASTM A890 ، طبق جداول زیر ارائه می گردد:

Grade	1B	2A	3A	4A	5A[A]	6A[A]
Type	25Cr-5Ni-M0-Cu-N	24Cr-10Ni-Mo-N	25Cr-5Ni-Mo-N	22Cr-5Ni-Mo-N	25Cr-7Ni-Mo-N	25Cr-7Ni-Mo-N
UNS	J93372	J93345	J93371	J92205	J93404	J93380
ACI	CD4MCuN	CE8MN	CD6MN	CD3MN	CE3MN	CD3MWCuN
Composition:						
Carbon, max	0.040	0.080	0.060	0.030	0.030	0.030
Manganese, max	1.00	1.00	1.00	1.50	1.50	1.00
Silicon, max	1.00	1.50	1.00	1.00	1.00	1.00
Phosphorus, max	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040	0.030
Sulfur, max	0.040	0.040	0.040	0.020	0.040	0.025
Chromium	24.5-26.5	22.5-25.5	24.0-27.0	21.0-23.5	24.0-26.0	24.0-26.0
Nickel	4.7-6.0	8.0-11.0	4.0-6.0	4.5-6.5	6.0-8.0	6.5-8.5
Molybdenum	1.70-2.30	3.0-4.5	1.75-2.50	2.5-3.5	4.0-5.0	3.0-4.0
Copper	2.7-3.3	. . .	. . .	1.00, max	. . .	0.50-1.00
Tungsten	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	0.50-1.00
Nitrogen	0.10-0.25	0.10-0.30	0.15-0.25	0.10-0.30	0.10-0.30	0.20-0.30

[A] % Cr + 3.3 % Mo + 16 % N ≥ 40.

Grade	1B	2A	3A	4A	5A	6A
Type	25Cr-5Ni-Mo-Cu-N	24Cr-10Ni-Mo-N	25Cr-5Ni-Mo-N	22Cr-5Ni-Mo-N	25Cr-7Ni-Mo-N	25Cr-7Ni-Mo-N
Tensile strength, ksi [MPa], min	100 [690]	95 [655]	95 [655]	90 [620]	100 [690]	100 [690]
Yield strength (0.2 % offset), ksi [MPa], min	70 [485]	65 [450]	65 [450]	60 [415]	75 [515]	65 [450]
Elongation in 2 in. [50 mm], %, min[A]	16	25	25	25	18	25

[A] When ICI test bars are used in tensile testing as provided for in this specification, the gage length to reduced section diameter ratio shall be 4:1.

ویژگی های آلیاژ Duplex :

- قابلیت مطلوب برای ریخته گری
- قابلیت متوسط برای جوشکاری (خصوصا در ضخامتهای بالا)
- مقاومت بالا به خوردگی
- استحکام مکانیکی بالا
- قابلیت متوسط برای ماشینکاری
- انتقال حرارت خیلی خوب
- هدایت الکتریکی خیلی خوب
- چکش خواری کمتر نسبت به فولاد آستنیتی
- تحمل دمای پایین تا ۸۰- درجه سانتیگراد

۲) آلیاژ نیکل- آلومینیوم- برنز (Ni.Al.Bz):

بر اساس استاندارد ASTM B148 یکی از گریدهای این آلیاژ با کد UNS No. C95800 تعریف می شود. این آلیاژ نبایستی با برنز و یا آلومینیوم- برنز اشتباه گرفته شود چرا که طبق نمودارها و جداولی که در ادامه ارائه شده است از نظر خواص مکانیکی و خوردگی تفاوت هایی با هم دارند و تنها وجه اشتراک این است که هر سه آلیاژ مس هستند. برنز از ترکیب مس و قلع بدست می آید و قدمت بسیار زیادی دارد اما آلومینیوم برنز و نیکل آلومینیوم برنز اولین بار حدود یک قرن پیش ریخته گری شدند. (سال ۱۹۱۳ میلادی)

ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی انواع گریدهای متریال ریختگی آلومینیوم برنز بر اساس استاندارد ASTM B148 ، طبق جداول زیر ارائه می گردد: در اینجا به عنوان نمونه، آلیاژ با شماره C95800 مورد بررسی قرار گرفته است.

Copper Alloy UNS No.	Old Designation	Commercial Designation	Nominal Composition, %					
			Copper	Nickel	Iron	Aluminum	Silicon	Manganese
C95200	9A	Grade A	88.0	...	3.0	9.0	...	...
C95300[A]	9B	Grade B	89.0	...	1.0	10.0	...	...
C95400[A]	9C	Grade C	85.0	...	4.0	11.0	...	...
C95410[A]	...	...	84.0	2.0	4.0	10.0	...	...
C95500[A]	9D	Grade D	81.0	4.0	4.0	11.0	...	...
C95520[A]	...	...	78.5	5.5	5.0	11.0	...	...
C95600	9E	Grade E	91.0	...	...	7.0	2.0	...
C95700	9F	Grade F	75.0	2.0	3.0	8.0	...	12.0
C95800	...	...	81.3	4.5	4.0	9.0	...	1.2
C95820	...	...	79.0	5.2	4.5	9.5	...	1.0
C95900	...	...	87.5	...	4.5	13.0	...	...

[A] These grades respond to heat treatment.

Classification	Aluminum Bronze				Nickel Aluminum Bronze		Silicon Aluminum Bronze	Manganese-Nickel Aluminum Bronze	Nickel Aluminum Bronze		Aluminum Bronze
Copper Alloy UNS No.	C95200	C95300	C95400	C95410	C95500	C95520[A]	C95600	C95700	C95800	C95820[B]	C95900
	Composition, %										
Copper	86.0 min	86.0 min	83.0 min	83.0 min	78.0 min	74.5 min	88.0 min	71.0 min	79.0 min	77.5 min	remainder
Aluminum	8.5–9.5	9.0–11.0	10.0–11.5	10.0–11.5	10.0–11.5	10.5–11.5	6.0–8.0	7.0–8.5	8.5–9.5	9.0–10.0	12.0–13.5
Iron	2.5–4.0	0.8–1.5	3.0–5.0	3.0–5.0	3.0–5.0	4.0–5.5	...	2.0–4.0	3.5–4.5[C]	4.0–5.0	3.0–5.0
Manganese	...	...	0.50 max	0.50 max	3.5 max	1.5 max	...	11.0–14.0	0.8–1.5	1.5 max	1.5 max
Nickel (incl cobalt)	...	...	1.5 max	1.5–2.5	3.0–5.5	4.2–6.0	0.25 max	1.5–3.0	4.0–5.0[C]	4.5–5.8	0.5 max
Silicon	...	...	...	...	...	0.15 max	1.8–3.2	0.10 max	0.10 max	0.10 max	...
Lead	...	...	...	...	...	0.03 max	...	0.03 max	0.03 max	0.02 max	...

[A] Chromium shall be 0.05 max, cobalt 0.20 max, tin 0.25 max, and zinc 0.30 max.
[B] Zinc shall be 0.2 max and tin 0.02 max.
[C] Iron content shall not exceed the nickel content.

Classification	Aluminum Bronze			Nickel Aluminum Bronze		Silicon Aluminum Bronze	Manganese-Nickel Aluminum Bronze	Nickel Aluminum Bronze	Aluminum Bronze
	As-Cast			As-Cast					
Copper Alloy UNS No.	C95200	C95300	C95400 and C95410	C95500	C95820	C95600	C95700	C95800[A]	C95900[B]
Tensile strength, min, ksi[C] (MPa[D])	65 (450)	65 (450)	75 (515)	90 (620)	94 (650)	60 (415)	90 (620)	85 (585)	. . . . .
Yield strength,[E] min, ksi[C] (MPa[D])	25 (170)	25 (170)	30 (205)	40 (275)	39[F] (270)[F]	28 (195)	40 (275)	35 (240)	. . . . .
Elongation in 2 in. (50.8 mm), %	20	20	12	6	13	10	20	15	. . .
Brinell hardness No.[G] (3000-kg load)	110	110	150	190	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
	Heat-Treated								
Copper Alloy UNS No.		C95300	C95400 and C95410	C95500	C95520[H]				
Tensile strength, min, ksi[C] (MPa)[D]	. . . . .	80 (550)	90 (620)	110 (760)	125 (862)	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
Yield strength,[E] min, ksi[C] (MPa)[D]	. . . . .	40 (275)	45 (310)	60 (415)	95[F] (655)[F]	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
Elongation in 2 in. (50.8 min), %	. . .	12	6	5	2	. . .	. . .	. . .	. . .
Brinell hardness No.[G] (300-kg load)	. . .	160	190	200	255[I]	. . .	. . .	. . .	241 min

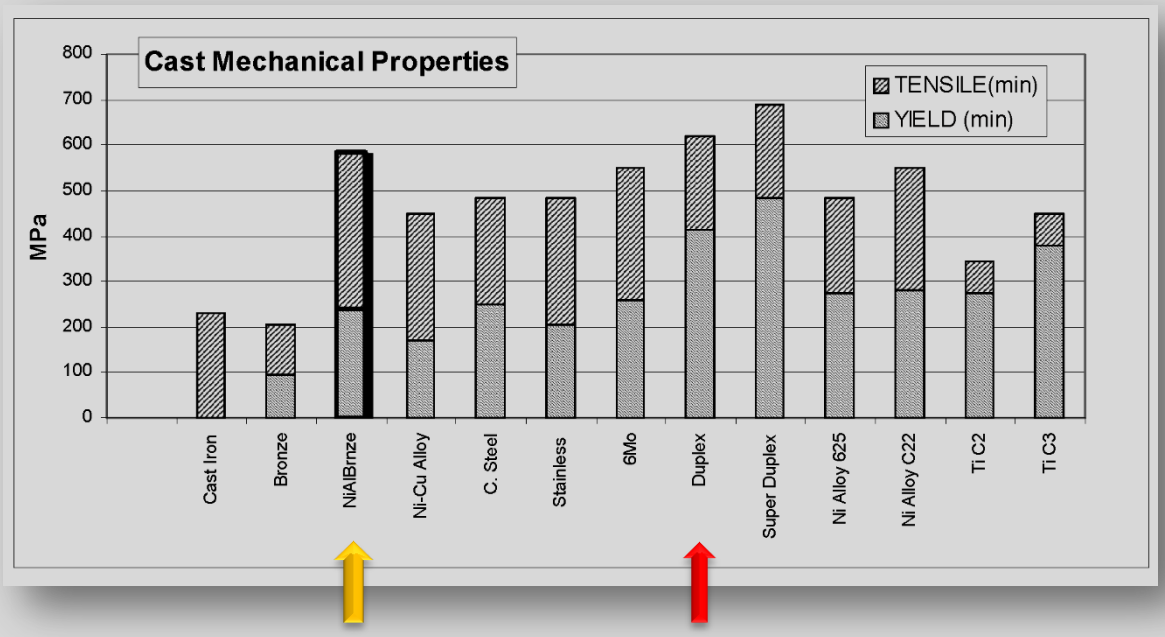
[A] As cast or temper annealed.
[B] Normally supplied annealed between 1100 and 1300°F for 4 h followed by air cooling.
[C] ksi = 1000 psi.
[D] See Appendix X1.
[E] Yield strength shall be determined as the stress producing an elongation under load of 0.5 %, that is, 0.01 in. (0.254 mm) in a gage length of 2 in. (50.8 mm).
[F] Yield strength at 0.2 % offset, min, ksi[C] (MPa)[D].
[G] For information only.
[H] Copper Alloy UNS No. C95520 is used in the heat-treated condition only.
[I] Sand castings and sand cast test specimens shall be 25 HRC or equivalent minimum.

ویژگی های آلیاژ .Ni.Al.Bz:

- قابلیت مطلوب برای ریخته گری
- قابلیت متوسط برای جوشکاری
- مقاومت بالا به خوردگی
- مقاومت خوب به سایش و ضربه
- قابلیت خوب برای ماشینکاری
- هدایت مغناطیسی کم
- انتقال حرارت خیلی خوب
- هدایت الکتریکی خیلی خوب
- حفظ استحکام و چکش خواری در دمای پایین
- قابل استفاده برای سرویس های دمای پایین

بررسی و مقایسه خواص مکانیکی:

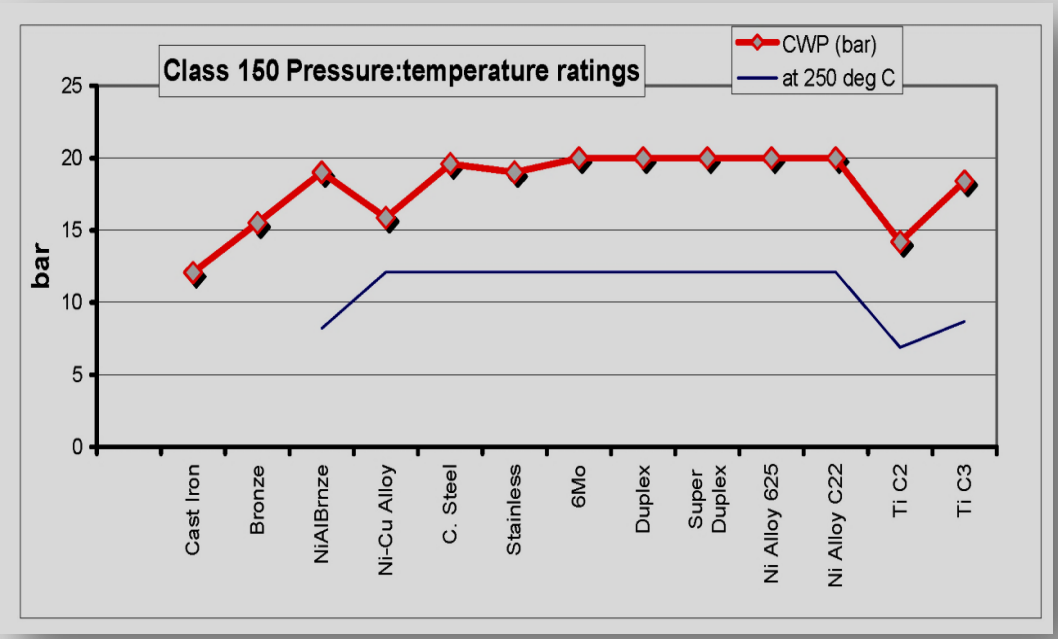
در نمودار زیر استحکام تسلیم و کششی انواع متریال های ریختگی قابل استفاده برای آب دریا مقایسه شده است . همانطور که از نمودار مقایسه ای مشاهده می گردد خواص مکانیکی Duplex و .Ni.Al.Bz ریختگی بهم نزدیک و از متریال های ریختگی Ni-Cu (Monel) و Stainless Steel و حتی گریدهای کاربردی از تیتانیوم نیز بیشتر است.
تفاوت بارز Bronze و .Ni.Al.Bz نیز در این نمودار قابل مشاهده است.



نمودار شماره ۱

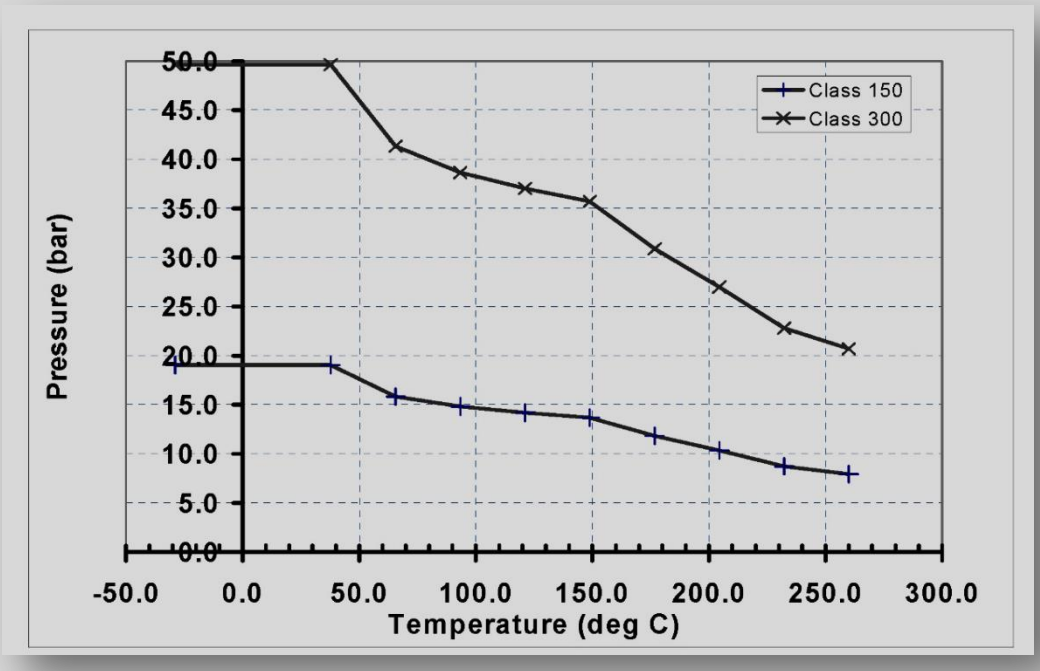
مقدار حداقل استحکام کششی (Tensile) برای متریال Duplex معادل 620 Mpa و برای متریال .Ni.Al.Bz معادل 585 Mpa است و این دو مقدار بهم نزدیک است.

برای مقایسه بهتر متریال ها، خصوصیات فشار-دما نیز بررسی شده است.
شکل زیر Cold working pressure (CWP) متریال ها برای Class 150 نشان می دهد. در دمای معمولی فشار قابل تحمل متریال .Ni.Al.Bz در حد قابل رقابت با Duplex است.
نمودار دمای ۲۵۰ درجه حاکی از این مطلب است که .Ni.Al.Bz و تیتانیوم در این دما کمترین فشار را تحمل می کنند و Duplex بالاتر از آن است لیکن این موضوع در مورد سیال آب دریا که دمای پایینی دارد موضوعیت مقایسه پیدا نمی کند.



نمودار شماره ۲

توضیح : طبق نمودار فوق، مقادیر فشار قابل تحمل برای متریال های .Ni.Al.Bz و Duplex در دمای معمولی (Cold working pressure) بهم نزدیک می باشند. (منحنی قرمز رنگ)



نمودار شماره ۳

در نمودار فوق نرخ فشار – دمای متریال NI.AL.BZ برای Class 150 و Class 300 مشخص شده است.

خوردگی در آب دریا :

خوردگی یک موضوع پیچیده با متغیرهای متعدد است. این متغیرها شامل عناصر شیمیایی تشکیل دهنده فلز، ساختار میکروسکوپی و عملیات حرارتی و ... می باشد. تنوع نامحدود در شرایط کاری سیال مانند نوع سیال، دما، فشار و نرخ جریان نیز تاثیرگذار بوده و بر این پیچیدگی اضافه می کند. در مورد سیال آب دریا، شرایط جغرافیایی و میزان فعالیتهای بیولوژیکی نیز موثر خواهد بود. خوردگی عمومی برای اغلب متریال های در تماس مستقیم با آب دریا پدیده ای طبیعی است.

آب دریا سیالی به شدت خورنده است چرا که حاوی غلظت بالایی از نمک (غالبا کلرید سدیم) و مقادیری اکسیژن و دی اکسید کربن محلول و همچنین موجودات دریایی بیولوژیکی[۳] می باشد.
بر اساس تعاریف کتاب مرجع موسسه توسعه نیکل [۴] (شماره ۱۱۰۰۳، سال ۱۹۸۷)، آب دریا را از نظر خوردگی می توان محلول کلرایدی خنثی بشمار آورد که موجب افزایش نرخ خوردگی یکنواخت[۵] و انواع خوردگی های موضعی[۶] می شود.

اجزاء اصلی سیال آب دریا طبق جدول زیر می باشد:

Ion	Parts per million	Equivalents per million	Parts per million per unit Chlorinity
Chloride, (Cl^-)	18,980.0	535.3	998.90
Sulfate, (SO_4^{-2})	2,649.0	55.1	139.40
Bicarbonate, (HCO_3^-)	139.7	2.3	7.35
Bromine, (Br^-)	64.6	0.8	3.40
Fluoride, (F^-)	1.3	0.1	0.07
Boric acid, (H_3BO_3)	26.0	‡	1.37
Total		593.6	
Sodium, (Na^+)	10,556.1	159.0	555.60
Magnesium, (Mg^{+2})	1.272.0	104.6	66.95
Calcium, (Ca^{+2})	400.1	20.0	21.06
Potassium, (K^{+2})	380.0	9.7	20.00
Strontium, (Sr^{+2})	13.3	0.3	0.70
Total		2593.6	

* H.U. Sverdrup, M.W. Johnson, and R.H. Fleming, *The Oceans*, Prentice-Hall, Inc., New York, 1942. J. Lyman and R.H. Fleming, J. Marine Research, 3, 134-146, 1940.
† 0/00 is used to denote grams per kilogram or parts per thousand.
‡ Undissociated at usual pH.

1. Biological marine life
2. Nickel Development Institute
3. General Corrosion
4. Localized Corrosion

در شرایطی که آب دریا راکد[۷] و یا آلوده[۸] باشد، عوامل خورنده دیگری از جمله آمونیاک[۹] ، ترکیبات سولفیدی[۱۰] و باکتری های کاهنده سولفات[۱۱] نیز می تواند تاثیراتی بر عملکرد متریال ها داشته باشد. از طرفی میزان کلر یا اوزون تزریقی به منظور کنترل مقدار جرم گرفتگی ناشی از فعالیت میکروبیولوژیکی[۱۲] نیز بر نرخ خوردگی می افزاید.

کلراید حل شده در آب دریا بعلاوه نمک موجود در آن باعث ایجاد خوردگی از نوع حفره ای، شیاری و در صورت بالا بودن دما موجب ترک خوردگی تنشی در فلزات می گردد. این نوع خوردگی ها در ادامه توضیح داده شده است.

هدایت الکتریکی بالا در سیال آب دریا موجب افزایش خوردگی های گالوانیک در فلز می گردد. بنابراین متریالی که جهت این سیال بکار برده می شود بایستی مقامت به خوردگی گالوانیک کافی را داشته باشد.

در جدول زیر **مهمترین متغیرهای آب دریا** که بر عملکرد و نرخ خوردگی متریال های در تماس با آن تاثیرگذار است مشاهده می گردد:

- Salinity and Chlorinity
- Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids (TDS)
- Oxygen and other Dissolved Gases (H_2S, CO^2)
- pH
- Temperature
- Biological Activity (Microbes & Bio-fouling)
- Pollutants & Turbidity (Suspended solids , Silt and Sediments)
- Scale Deposits and Hardness
- Velocity and Fluid Flow Rate
- Intermittent or continuous duty – Stagnant Conditions?
- Chlorination Practices

میزان نمک و کلر – هدایت الکتریکی (TDS) – اکسیژن و سایر گازهای محلول (دی کسید کربن ، سولفید هیدروژن) – اسیدیته – دما – فعالیت های بیولوژیکی – میزان کدورت و آلاینده ها – میزان رسوب و سختی – نرخ جریان و سرعت سیال – تناوب ، پیوستگی یا راکد بودن جریان – کلرزنی مورد نیاز

5. Stagnant Sea Water
6. Polluted Sea Water
7. Ammonia
8. Sulfide Compounds
9. Sulfate Reducing Bacteria, SRB
10. Bio-fouling

بعضی از انواع خوردگی هایی که در اثر تماس فلز با آب دریا ایجاد می شود بدین شرح است:

خوردگی حفره ای[۱۳] : نوعی خوردگی موضعی می‌باشد که باعث ایجاد حفره‌های کوچک در فلزات می‌شود.

عوامل شروع خوردگی حفره ای به شرح زیر است:

۱. تخریب موضعی مکانیکی یا شیمیایی در فیلم اکسیدی محافظ به علت غلظت بالای کلراید
۲. تخریب موضعی یا اعمال نامناسب پوشش های محافظ
۳. نایکنواختی های موجود در سطح فلز

بدلیل مشکلات فراوان در تشخیص و پیش بینی، معضل حفره دار شدن موضوعی خطرناکتر از خوردگی یکنواخت به نظر می رسد، چرا که یک حفره کوچک و باریک موجب از دست رفتن میزان اندکی از فلز شده اما می تواند منجر به ایجاد مشکل برای کل تجهیز گردد. این نوع خوردگی می تواند توسط آب راکد دریا تشدید شود. فولادها بالاترین نرخ خوردگی حفره ای را دارند اما با افزایش آلیاژ ، نرخ این خوردگی کمتر می شود.

- با افزایش کلراید در آب دریا، مقاومت به خوردگی حفره ای در متریال Duplex 22Cr بطور چشمگیری کاهش یافته و نرخ خوردگی بیشتر می شود. لذا برای جلوگیری از ایجاد خوردگی های حفره ای در داپلکس ها از روش هایی مانند پوشش، حفاظت کاتدی و حذف اکسیژن استفاده می شود.

(Smith Celant & Pourbaix, 2000; HSE Safety Notice 7/2007, Norsok M-001)

- نیکل–آلومینیوم-برنز دچار خوردگی ناشی از کلراید نمی شود از اینرو حملات در شیارها حداقل بوده و خوردگی های حفره ای و سطوح سخت تشکیل نمی گردد. همچنین تحقیقات نشان می دهد متریال .Ni.Al.Bz تمایلی به ترک خوردگی تنشی[۱۴] نیز بر اثر تماس با کلراید ندارد. (Oldfield and Masters, 1996; Horwath, 2002)

نمونه ای از ترک خوردگی تنشی (SCC)

نمونه ای از خوردگی حفره ای در متریال استنلس استیل

11. Pitting Corrosion
12. Stress Corrosion Cracking

نمونه ای از خوردگی حفره ای ناشی از کلراید

خوردگی شیاری[۱۵] : نوعی از خوردگی است که واکنش آندی آن درون شیاری در سطح که تماس چندانی با بیرون ندارد (مانند شیاری که در نقطه اتصال دو قطعه مانند پیچ یا واشر باشد) همچنین الکترولیت بتواند در آن راکد بماند رخ می دهد. برای بروز این خوردگی بایستی متریال بتواند رویین (غیر فعال در خوردگی) شده و یون مهاجم که اغلب هالید (Cl- و Br-) است موجود باشد.

- از آنجا که فولادهای زنگ نزن مثل داپلکس می‌توانند رویین شوند، این خوردگی فراوان‌ترین گونه در بین آن‌ها در تماس با آب دریا می باشد.
- برای متریال .Ni.Al.Bz در تماس با آب دریا این نوع خوردگی رخ نمی دهد.

نمونه ای از خوردگی شیاری

13. Crevice Corrosion

خوردگی گالوانیک[۱۶] : این نوع خوردگی زمانی ایجاد می شود که دو فلز متفاوت در تماس با یکدیگر و در حضور الکترولیتی مانند آب دریا باشند. نرخ خوردگی به مقدار فاصله دو فلز طبق جدول سری گالوانیک و همچنین اختلاف پتانسیل الکتریکی آن دو بستگی دارد. جهت جلوگیری از این نوع خوردگی غالبا متریال شیرآلات بر اساس متریال خط لوله انتخاب می گردد.

بطور کلی آلیاژ .Ni.Al.Bz نسبت به سایر متریال های مورد بحث (به استثنای کربن استیل، چدن و برنز) خاصیت آندی بیشتری دارد و در نتیجه در تماس با سایر متریال های مذکور دچار خوردگی گالوانیک بیشتری می شود و به این دلیل توصیه شده است از تماس این متریال با متریال داپلکس 25Cr در سرویس آب دریا اجتناب گردد .(Francis, 1999)

نمونه ای از خوردگی گالوانیک در متریال استنلس استیل

سایر پارامترهای موثر بر خوردگی

تاثیر سرعت سیال بر خوردگی: دسته ای از انواع خوردگی ها شامل خوردگی سایشی[۱۷] ، خوردگی ناشی از کاویتاسیون[۱۸] و خوردگی موجی[۱۹] بر اثر *سرعت های بالای سیال* و از طرفی خوردگی نوع جرم گرفتگی (رسوب)[۲۰] بر اثر *نرخ جریان پایین یا راکد* ایجاد می شوند.

با افزایش سرعت آب دریا، جریان اکسیژن روی سطح قطعه بیشتر شده که موجب افزایش قابل توجه نرخ خوردگی می گردد. در مورد آلیاژهای پایه مس از جمله .Ni.Al.Bz محدودیت در سرعت سیال وجود دارد. نظرات متفاوتی در این مورد ارائه شده است اما غالبا برای خطوط با سایز ۵۰ میلیمتر و بالاتر، حد سرعت ۱ تا ۱,۷ متر بر ثانیه و سرعت ماکزیمم ۱۰ متر بر ثانیه برای سرویس های متناوب توصیه شده است. (Norsok M-001, Wharton et al, 2005)

جرم گرفتگی یا رسوب زمانی رخ می دهد که ارگانیسم های دریایی به سطح متریال می چسبند. بدلیل قرار گرفتن در مجاورت هوا، خوردگی اختلاف دمشی (پیل هوایی) ایجاد می شود. در آلیاژهای پایه مس لایه ای نازک از اکسید مس روی سطح قطعه تشکیل می شود که موجب مقاومت بالای این آلیاژ در برابر خوردگی جرم گرفتگی می گردد. (Efird, 1975)

14. Galvanic Corrosion
15. Wear Corrosion
16. Cavitation Corrosion
17. Impingement Corrosion
18. Fouling Corrosion

(۱)

(۲)

(۳)

۱: نمونه ای از خوردگی ناشی از کاویتاسیون در سیلندر

۲: نمونه ای از خوردگی موجی

۳: نمونه ای از خوردگی جرم گرفتگی یا رسوب در مبدل حرارتی

تاثیر دما بر خوردگی: بطور کلی افزایش دما باعث بالا رفتن سرعت واکنش های شیمیایی و در نتیجه افزایش نرخ خوردگی می گردد. از طرفی دمای بالاتر، کاهش حجم اکسیژن را در پی دارد که در نتیجه تاثیر متضادی بر نرخ خوردگی خواهد داشت. بنابراین لازم است تعادلی بین این دو فاکتور جهت رسیدن به نرخ خوردگی بهینه ایجاد گردد.
افزایش نرخ خوردگی بر اثر بالا رفتن دما در آلیاژ Duplex نسبت به .Ni.Al.Bz بیشتر محسوس می باشد.

خوردگی ناشی از بروز کاویتاسیون: بروز پدیده کاویتاسیون در شیر می تواند منجر به آسیب متریال بدنه و اجزاء داخلی شیر گردد. در این نوشتار با فرض اینکه سایزینگ شیر به درستی انجام شده و سطح بروز پدیده کاویتاسیون در حد ایجاد آسیب نمی باشد به خوردگی ناشی از آن پرداخته نشده است.

ضمنا همانطور که در جدول صفحه بعد ملاحظه می گردد، مقاومت به سایش بر اثر کاویتاسیون در هر دو متریال .Ni.Al.Bz و Duplex در حد مطلوب و دارای مقادیر یکسانی می باشد.

جمع بندی در مورد رفتار خوردگی:

جدول زیر که حاصل تحقیقات اولدفیلد و مسترز[۲۱] در سال ۱۹۹۶ می باشد، ضرایب نسبی مقدار خوردگی برای متریال های مورد استفاده جهت آب دریا را نشان می دهد. این مقادیر عددی، حاکی از عملکرد کلی هر متریال در مقابل انواع خوردگی ناشی از آب دریا می باشند. اعداد جدول صرفا یک رتبه بندی نسبی مربوط به هر کدام از انواع خوردگی است و عدد ۱۰ به معنای دو برابر بهتر بودن عدد ۵ نیست. همچنین اعداد بزرگتر نشانگر بهتر بودن متریال است. نتایج حاصل برای متریال Ni.Al.Bz. و مقایسه آن با متریال Duplex تصمیم گیری را برای طراحان شیرهای صنعتی آسان کرده است.

Arbitrary scale, higher is better	Polluted Seawater	Corrosion Fatigue	Fouling Resistance	Galvanic	Wear & Gall
Bronze	-	-	10	5	10
Ni-Al-Bronze	4	9	8	6	10
Ni-Cu Alloy	?	?	4	8	5
Carbon	-	-	-	1	8
Stainless	4	6	1	4/7	6
6Mo	9	6	1	9	5
Duplex	5	9	1	8	4
Super-Duplex	9	9	1	10	3
Ni Alloy 625	-	12	1	10	3
Ni Alloy C22	-	-	1	10	3
Titanium	-	-	1	9	2

Arbitrary scale, higher is better	General Corrosion	Pitting Corrosion	Crevice Corrosion	Erosion Corrosion	Erosion Cavitation	Stress Corrosion
Bronze	8	9	9	7	5	-
Ni-Al-Bronze	9	10	8	8	8	10
Ni-Cu Alloy	10	5	2	10	8	?
Carbon	3	3	-	-	2	-
Stainless	10	4	3	10	7	8
6%Mo	10	9	8	10	8	8
Duplex	10	5	4	10	8	9
Super- Duplex	10	9	8	10	8	9
Ni Alloy 625	10	13	12	-	13	-
Ni Alloy C22	10	14	-	-	10	-
Titanium	10	15	10	-	9	-

19. Olfield and Masters

نتیجه گیری:

در جمع بندی کلی نتایج بررسی و مقایسه پارامترهای خواص مکانیکی، شیمیایی، رفتارهای خوردگی و سایر فاکتورهای تاثیرگذار در انتخاب فلزات Duplex و .Ni.Al.Bz برای استفاده در آب دریا به خوبی می توان سازگاری بسیار نزدیک هر دو فلز را مشاهده کرد.

در شرایطی که ویژگی خاصی از فلز، مورد انتظار نباشد آلیاژ .Ni.Al.Bz جایگزین بسیار مطلوبی برای فلز Duplex است و در بعضی موارد نسبت به آن ارجحیت استفاده دارد.

معیارهای مقایسه در این بررسی به شرح زیر مورد توجه بوده است:

۱) از نمودار میله ای شماره ۱ نزدیکی بسیار زیاد خواص مکانیکی دو فلز قابل برداشت می باشد. مقدار حداقل استحکام کششی معادل ۶۲۰ مگاپاسکال برای Duplex و۵۸۵ مگاپاسکال برای .Ni.Al.Bz

۲) استفاده هر دو فلز در آب دریا با دمای حداکثر حدود ۵۰ درجه سانتیگراد می باشد و لذا تغییر خصوصیات فشار– دما برای دماهای بالاتر موضوعیت نخواهد داشت. با این حال نمودار شماره ۲ تحمل پذیری فشار قابل قبول هر دو فلز را در دمای فوق نشان می دهد.

۳) در خصوص رفتارهای هر دو فلز در برابر انواع خوردگی های در تماس با آب دریا با استناد به برداشت های نتایج حاصله از مطالعات استانداردی توسط Oldfield و Masters در سال ۱۹۹۶ ، هر دو فلز از رتبه های نسبی بسیار خوبی برخوردار بوده و در شرایط بکارگیری در سرویس متعارف یکسان در آب دریا فلز .Ni.Al.Bz وضعیت بهتری دارد، از آن جمله می توان از مقاومت بیشتر نسبت به رایج ترین نوع خوردگی یعنی خوردگی حفره ای ناشی از کلراید و نیز خوردگی تنشی تماس با کلراید و همچنین از عدم رخداد خوردگی شیاری در آن نام برد.

۴) در مورد خوردگی های ناشی از تاثیرات سرعت سیال، با عنایت به لزوم محدود سازی سرعت سیال عبوری از خط لوله به لحاظ هیدرولیکی با رعایت ماکزیمم و مینیمم سرعت مجاز، هر دو فلز از آسیب بدور خواهند بود.

۵) در مورد تاثیر دما در خوردگی، با پذیرش اینکه دمای آب دریا در سرویس های متعارف در خطوط لوله کمتر از ۵۰ درجه سانتیگراد میباشد میتوان چنین فرض کرد که اصولا افزایش دمایی که واکنش شیمیایی را بالا ببرد عملا وجود ندارد و لذا بروز خوردگی ناشی از افزایش واکنش تحت اثر افزایش دما منتفی میباشد.

۶) در نهایت با استناد به توضیحات بندهای 4.1.13 و 5 استاندارد ASTM B148 ، متریال ریخته گری آلومینیوم برنز و به خصوص آلیاژ نیکل-آلومینیوم-برنز با گرید C95800 جهت استفاده در سرویس سیال آب دریا مناسب می باشد.

شرکت میراب شیرهای صنعتی ریخته گری شده از جنس .Ni.Al.Bz را در انواع مختلف تولید نموده است که از سال ۱۳۷۸ در فاز ۱ پارس جنوبی در خطوط آب دریا نصب شده و همچنان عملکرد مطلوبی دارند.

تصاویر برخی از این محصولات در ادامه مشاهده می گردد:

بدنه شیر کشویی زبانه فلزی
از جنس نیکل- آلومینیوم- برنز

شیر پروانه ای ویفری با دیسک خارج از مرکز
بدنه و دیسک از جنس نیکل- آلومینیوم- برنز

شیر پروانه ای فلنجدار
بدنه و دیسک شیر و پوسته گیربکس
از جنس نیکل- آلومینیوم- برنز

شیر هوای دو محفظه
بدنه و درپوش از جنس نیکل- آلومینیوم- برنز

سایر کاربردهای آلیاژ .Ni.Al.Bz در ساخت تجهیزات در تماس مستقیم با آب دریا:

برخی منابع و مآخذ:

- Oldfield, J.W. & Masters, G.L., 1996, *Collation of Data Comparing Properties of Aluminium Bronze with Cast Stainless Steels and Ni-Resist in Offshore Sea Water Environments,* CDA Publication 115, Copper Development Association.
- Efird, 1975, *The Interrelation of Corrosion and Fouling of Metals in Sea Water,* NACE Corrosion/75..
- Francis, R., 1999, 'Coupling of superduplex stainless steel and cast nickel-aluminium bronze in sea water', *British Corrosion Journal,* 1999, Vol 34 No 2, 139 – 144, IoM Communications.
- Gallager, P., Malpas, R.P. & Shone, E.P., 1986, 'Sea Water Handling Systems: Past, Present and Future', *Corrosion Protection of Materials in Sea Water Applications,* NCC/SMOZ Workshop: Amsterdam 1986.
- Horwath, John H., 2002, *Why Nickel Aluminium Bronze for Sea Water Pumps,* Ampco Pumps Company
- HSE, 2007, *Stress corrosion cracking of duplex stainless steel piping systems in hot chloride service, Offshore Information Sheet No 7/2007,* Health and Safety Executive, UK
- Kain, L.S., Marshall, D.G., Melton, D.G., Aylor, D.M., Hays, R.A. & Ferrara, R.J., 2004, 'Corrosion, galling and wear testing of duplex and austenitic stainless steels for seawater valve applications', *Valve World,* Aug 2004, KCI.
- Le Guyader, H., Grolleau, A.M., Debout, V., 2007, *Corrosion Behaviour of Copper Alloys in Natural Seawater and Polluted Seawater*, Paper 1264 Eurocorr 2007. Available from
- Meigh, H., 2000, *Cast and Wrought Aluminium Bronzes: Properties, Processes and Structure,* Copper Development Association / IOM Communications, London.
- Michels, H.T., Kain, R.M., 2005, *Effect of Composition and Microstructure on the Seawater Corrosion Resistance of Nickel-Aluminium Bronze*, NACE 05233,
- Norsok M-001, 2004, *Norsok Standard M-001 Rev. 4 August, 2004 Material Selection*
- NPL, 1982, *Guides to Good Practice in Corrosion Control – Pumps and Valves*
- Smith, L., Celant, M., & Pourbaix, A., (2000), 'A guideline to the successful use of duplex stainless steels for flow lines', *Duplex America 2000 conference*
- Todd, B., (1977), *Materials Selection for High Reliability Copper Alloy Seawater Systems,*
- Tuthill, A.H., 1987, 'Guidelines for the use of copper alloys in seawater', *Materials Performance,* Vol 26 No 9 12-22, NACE, Houston
- Tystad, M, 1997, 'Application of duplex stainless steel in the offshore industry', *Duplex Stainless Steels, 1997,* Stainless Steel World, KCI.
- Wharton, J.A., Barik, R.C., Kear, G., Wood, R. J. K., Stokes, K. R., Walsh, F. C., 2005, 'The Corrosion of Nickel-aluminium Bronze in Seawater*', Corrosion Science 47 (2005)*
- Blake, D. M., (2001), *Corrosion of Sea Water Systems on the RRS James Clark Ross,* NACE 01312, Corrosion 2001, NACE.
- CDA, 1981, *Aluminium Bronze Alloys Corrosion Resistance Guide,* Publication No. 80, Copper
Development Association.
- DEP 30.10.02.35 EPE, (2008), *Technical Requirements for the Supply of Components in 6Mo Austenitic, 22Cr Duplex and 25Cr Super Duplex Stainless Steel – July 2008,* Shell International Exploration and Production B.V.

- ASTM B148-97(2003), *Standard specification for Aluminium Bronze Sand Castings*
-ASTM A890, *Standard specification for Duplex Stainless Steel Castings*