ساخت آندهای منیزیمی و کاربرد آن در حفاظت کاتدی

عبدالله افشار (دانشیار)
دانشکده مهندسی و علم مواد
دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار ساخت آندهای منیزیمی به‌روش ریخته‌گری و کیفیت آنها در حفاظت کاتدی فولاد مورد بررسی قرار گرفته است. ریخته‌گری و تهیه‌ی آند با ترکیب شیمیایی مناسب، بررسی بازدهی و کیفیت آند در حفاظت کاتدی فولاد در خاک مطابق با روش استاندارد و همچنین در محلول کلرید سدیم ۳درصد و در چگالی‌های مختلف انجام شده است. در ذوب منیزیم از کوره‌های مقاومتی و از ترکیب کلرور و فلوئور فلزات قلیایی خاکی و اکسید منیزیم به‌عنوان روانساز[۱] استفاده شده است.

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که آند ریخته‌گری شده با ترکیب شیمیایی Mn ۰/۲۴درصد, Zn ۲/۷درصد, Al ۵/۱درصد, Mg علاوه بر قطبش آندی و دارابودن نیروی محرکه‌ی خوب، بازده مناسبی داشته (۳۹ درصد) و خوردگی آن به‌صورت یکنواخت است. بازده آند در محلول کلرید سدیم ۳درصد به‌شدت کاهش یافته و تابع چگالی آند است.

منحنی‌های قطبش آندی و نتایج به دست آمده در محلول‌های ۰/۰۱ درصد و ۳ درصد کلرور سدیم و سولفات کلسیم اشباع نشان می‌دهند که منیزیم خالص تجاری نسبت به آند ریخته‌گری‌شده فعال‌تر، و خوردگی آن در تمام محلول‌ها بیشتر از آند است. در محلول‌های حاوی آنیون‌های Cl و SO_4 میزان قطبش آندی منیزیم بسیار ناچیز است.

مقدمه

منیزیم سبک‌ترین فلز صنعتی است و به‌دلیل دارابودن خواص الکتروشیمیایی مناسب، نظیر اکی‌والان الکتروشیمیایی کم، عدم قطبش آندی و نیروی محرکه‌ی زیاد، نسبت به اکثر فلزات متداول ساختمانی به‌عنوان «آند ازبین‌رونده»[۲] در حفاظت کاتدی به کار می‌رود. آندهای منیزیمی مورد استفاده در حفاظت کاتدی عمدتاً دو ترکیب شیمیایی دارند: الف) آندهای منیزیمی AZ۶۳ که ۰/۱۵ تا ۰/۳۵ درصد منگنز دارند؛ ب) آندهای منیزیمی با خلوص بالا که حاوی ۰/۵ تا ۱/۳ درصد منگنز باشند. آندهای نوع اول بیشترین مصرف را در صنعت کشورمان داشته و به‌خصوص در حفاظت خطوط لوله و تأسیسات مدفون در خاک از آنها استفاده می‌شود. این آندها غالباً به‌روش ریخته‌گری و در مواردی به‌روش اکستروژن تهیه می‌شوند. لذا بخش اول تحقیقات انجام شده به تهیه‌ی این آندها از طریق ریخته‌گری اختصاص داده شده است.

ریخته‌گری منیزیم به‌دلیل میل ترکیبی شدید آن با اکسیژن کار ساده‌یی نیست و می‌تواند سبب بروز مشکلاتی شود. بنابراین ریخته‌گری این آندها شرایط و امکانات خاصی را می‌طلبد. روانسازهای مناسب برای ریخته‌گری منیزیم و آلیاژهای آن عمدتاً کلرور و فلوئور فلزات قلیایی خاکی، حاوی منیزیم و اکسید منیزیم است و استفاده از جوّ محافظ در عملیات ذوب و ریخته‌گری امری اجتناب‌ناپذیر است.[۱]

بازدهی آند، نیروی محرکه‌ی آند، و چگونگی الگوی خوردگی آن از ویژگی‌های اساسی یک آند ازبین‌رونده است که باید مورد توجه قرار گیرند. بازده آند منیزیمی را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه و بیان کرد:

$$CE\% = \frac{۱۰۰}{I^{\circ}_{corr} / I + (۱+K)}$$

که در آن I°_{corr} چگالی جریان خوردگی در حالت مدار باز، I چگالی جریان آندی خالص، و K عددی ثابت است.

اگر I°_{corr} بزرگ باشد، بازده آند در مقدارهای کم چگالی‌های خارجی، که در حفاظت کاتدی با آن مواجهیم، کم است. با افزایش شدت جریان خارجی (I) بازدهی زیاد می‌شود تا آنجا که به سمت مقدار حدی خود یعنی ۱۰۰/۱+K میل می‌کند. کمترین مقدار گزارش شده برای K نزدیک به ۰/۵ است. به این ترتیب مقدار حدی برای بازدهی آند منیزیم برابر ۶۷ درصد است[۱ و ۲]، اگرچه این مقدار در موارد عملی ۲۵ درصد و ۵۰ درصد گزارش شده است.[۳، ۴ و ۵]

توانش[۳] اکسایش آند، بیان‌کننده‌ی نیروی محرکه‌ی آند نسبت به سازه‌ی حفاظت‌شونده است و تغییرات آن نسبت به زمان، میزان قطبش آند را مشخص می‌کند. به هرحال این سه متغیر بر کیفیت آند تأثیر دارد، و در انتخاب آند به‌عنوان یک معیار اقتصادی ملحوظ می‌شود. نیروی محرکه‌ی زیاد و بازدهی بالای آند، و نیز خوردگی یکنواخت آن سبب کاهش هزینه‌های نصب و نگه‌داری یک سیستم حفاظت کاتدی است.[۶] لذا در مرحله‌ی بعدی تحقیقات، پس از تهیه‌ی آند در ابعاد استاندارد و ترکیب شیمیایی مناسب، انجام

جدول ۱. ترکیب شیمیایی روانسازهای مصرفی[۱ و ۷ و ۸]

ردیف	ویژگی روانساز	ترکیب شیمیایی روانساز (درصد وزنی)							
		$MnCl_2$	MgO	CaF_2	$BaCl_2$	NaCl	KCl	$CaCl_2$	$MgCl_2$
۱	روانساز با گرانروی مناسب	–	۱۲	۲۰	–	۷	۷	۱۴	۴۰
۲	کاملاً پوششی	–	–	–	–	۳۰	۲۰	۴۰	۱۰
۳	تصفیه کننده‌ی آلیاژهای منگنزدار	۷۲	–	۲/۵	۲/۵	–	۲۳	–	–
۴	روانساز پوششی موقت	نسبت حجمی مساوی از پودر گوگرد و پودر اسید بوریک							

جدول ۲. ترکیب شیمیایی منیزیم (بار فلزی)

عناصر	%Mg	%Ni	%Cu	%Fe	%Mn	%Zn	%Al
ترکیب شیمیایی (درصدوزنی)	Rem.	–	–	۰/۲۲	–	۰/۰۰۴۴	–

جدول ۳. ترکیب شیمیایی آند ریخته گری شده

عناصر	%Mg	%Ni	%Cu	%Fe	%Mn	%Zn	%Al
ترکیب شیمیایی(درصدوزنی)	Rem.	–	–	۰/۰۲۰	۰/۲۴	۲/۷۶	۵/۱

آزمایش خوردگی و بررسی و تعیین کیفیت آند در حفاظت کاتدی فولاد، مورد هدف قرار گرفته است.

روش تحقیق

ذوب و ریخته‌گری منیزیم

در ذوب و ریخته‌گری آندهای منیزیمی از روانسازهای پوششی و تصفیه کننده، و نیز روانسازهایی برای حفاظت موقتی سطح مذاب استفاده شده است. جدول ۱ ترکیب شیمیایی روانسازهای مصرفی را ارائه می‌دهد. برای بار مصرفی از منیزیم خالص تجارتی با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۲، و برای افزایش عناصر آلیاژی آلومینیم و روی از فلزات خالص آنها استفاده شده است. منگنز نیز به‌صورت پودر کلرور منگنز همراه با روانساز تصفیه کننده به مذاب اضافه شده است و برای انجام ذوب و ریخته‌گری از کوره‌ی مقاومتی استفاده شده است. همچنین به‌منظور جلوگیری از اکسایش احتمالی مذاب در محیط کوره، از پودر گوگرد برای ایجاد جوّی از گاز دی‌اکسید گوگرد استفاده شده است.

در دمای ۷۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، پس از پاشیدن روانساز بر روی سطح مذاب، عناصر آلیاژی روی و آلومینیم به مذاب اضافه شده است. پس از حل‌شدن این عناصر، روانساز روی مذاب نیز به داخل آن فرو برده شده و به مدت ۳۰ ثانیه با حرکت دورانی کاملاً مخلوط شده است. سپس مذاب به درون قالب فلزی ریخته شده است.

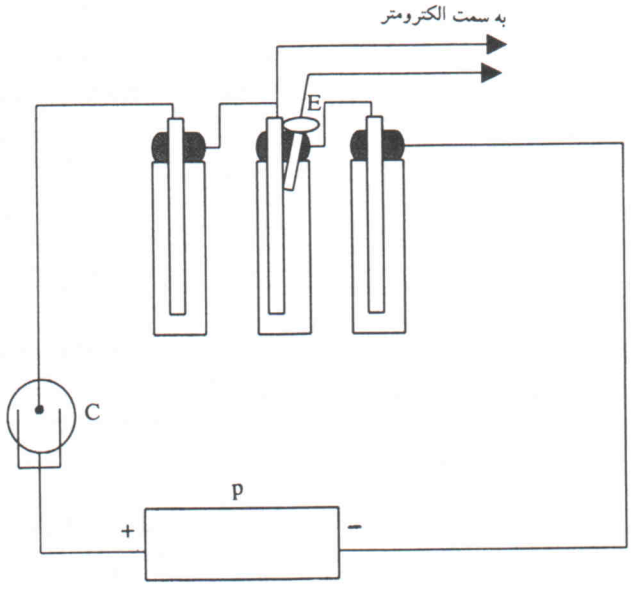
آزمایش‌ها

بررسی وارزیابی آزمایشگاهی آندمنیزیمی برای حفاظت کاتدی فولاد در خاک

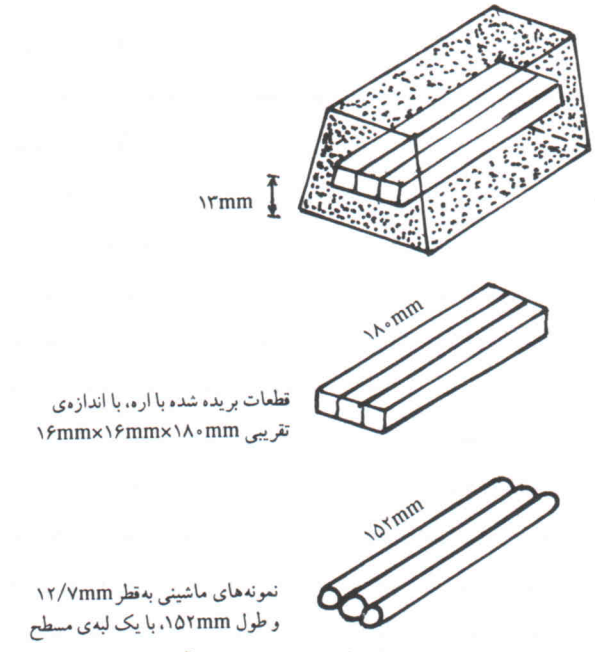
این آزمایش معمولاً برای اطمینان از کیفیت آندهای منیزیمی تولیدشده توسط سازندگان و مصرف‌کنندگان آنها، و مطابق با روش استاندارد ارائه شده در ASTM Designation G97-89[۹] انجام می‌شود. در این آزمایش، «توانش اکسایش» و «بازدهی آند»، دو ویژگی اساسی تعیین‌شده در عملکرد آندهاست.

در این آزمایش، جریان مستقیم (DC) مشخصی از سل‌های آزمایش که به‌طور سری به هم متصل بودند، عبور داده شد (شکل ۱). هر سل آزمایش شامل آند (از نمونه‌های منیزیمی)، کاتد (مخازن فولادی) و الکترولیت (محلولی از سولفات کلسیم و هیدروکسید منیزیم اشباع‌شده) بوده است. شکل ۲ چگونگی تهیه‌ی نمونه‌های منیزیمی را از آند ریخته‌گری شده نشان می‌دهد. شرایط الکترولیت مذکور، مشابه شرایط محیط اطراف آند در پشت‌بند[۴] است. توانش اکسایش آند نسبت به الکترود کالومل[۵] اشباع شده، طی ۱۴ روز آزمایش و پس از یک ساعت از قطع جریان در انتهای آزمایش اندازه‌گیری شده و مقدار آمپرساعت عبوری از مدار، هنگامی که وزن سیم مسی کولن‌سنج که به‌طور سری در مدار قرار داشت افزایش می‌یافت، براساس رابطه‌ی زیر محاسبه شده است:

$$A.h = ۰/۸۴۳۳ \times \Delta M_{cu}$$



شکل ۱. مدار آزمایش
(E: الکترود مرجع، C: کولن‌سنج و P: منبع تغذیه‌ی جریان مستقیم)



شکل ۲. چگونگی تهیه‌ی نمونه از آند

در رابطه‌ی فوق ΔM_{cu} نشان‌دهنده‌ی میزان افزایش وزن سیم کولن‌سنج است.

در پایان آزمایش، نمونه‌ها از محلول خارج شده و محصولات خوردگی آنها با محلول اسید کرمیک (۲۵۰ گرم Cr_2O_3 در یک لیتر آب مقطر) در دمای ۶۰ تا ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تمیز و سپس خشک و وزن شده‌اند. آنگاه آمپرساعت تولیدی در واحد مصرفی نمونه‌های منیزیمی محاسبه و نهایتاً نتیجه به‌صورت «بازده» بیان شده است.

نمونه‌ها در دو حالت قبل و بعد از رسوب‌زدایی بررسی ظاهری شده‌اند. همچنین ترکیب شیمیایی رسوب‌های تشکیل‌شده بر روی نمونه‌های منیزیمی و مخازن فولادی به‌روش پراکنش اشعه‌ی ایکس بررسی شده‌اند.

بررسی کیفیت آند ریخته‌گری‌شده درحفاظت کاتدی فولاد در محلول ۳درصد کلرور سدیم

پنج عدد آند منیزیمی استوانه‌یی (۱۳ میلی‌متر قطر و ۱۷۰ میلی‌متر ارتفاع) در محلول ۳درصد کلرور سدیم به صفحات فولادی با ابعاد ۶۰×۶۰×۲ میلی‌متر متصل شدند. برای تنظیم جریان در مدار از یک مقاومت متغیر، و برای کنترل جریان از یک ولت‌متر با مقاومت داخلی خیلی زیاد و یک مقاومت کوچک استفاده شد. جریان‌های عبوری از مدارها طوری تنظیم شد که چگالی‌های آندی به‌ترتیب صفر (در مدار باز)، ۳۶، ۱۱۰، ۲۷۰، ۴۵۰، ۵۹۰ میلی‌آمپر بر فوت مربع حاصل شود. توانش آندهای منیزیمی در هر ۲۴ ساعت یک‌بار نسبت به الکترود مرجع کالومل اشباع شده اندازه‌گیری شد. بعد از ۱۴ روز آزمایش، نمونه‌ها تمیز و سپس خشک و وزن شدند. با توجه به جریان عبوری از مدار و مدت زمان آزمایش، انرژی مصرفی در مدار در هر مورد محاسبه و در نتیجه بازده آند به‌دست آمده است.

اندازه‌گیری سرعت خوردگی

سرعت خوردگی نمونه‌های تهیه‌شده از آند ریخته‌گری‌شده و منیزیم خالص تجاری، در محلول‌های ۰/۰۱ و ۳درصد کلرور سدیم و سولفات کلسیم اشباع شده به روش غوطه‌وری اندازه‌گیری شده است. ابتدا چربی نمونه‌های استوانه‌یی به‌مساحت ۱۰ سانتی‌متر مربع، با استن زدوده شده و سپس در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و به مدت ۳۰ دقیقه خشک شدند. پس از خنک‌شدن در دمای اطاق نمونه‌ها وزن شدند. حجم الکترولیت ۳۰۰ میلی‌لیتر انتخاب شده است. مدت زمان آزمایش برای محلول‌های ۳درصد کلرور سدیم و سولفات کلسیم اشباع شده ۱۲۰ ساعت، و برای محلول ۰/۰۱ درصد کلرور سدیم برابر ۲۸۸ ساعت بوده است. محصولات خوردگی نمونه‌ها با محلول اسیدکرمیک (۲۰۰ گرم Cr_2O_3 در یک لیتر آب مقطر) جوشان جدا شده و وزن آنها اندازه‌گیری شده است.

بررسی رفتارقطبش‌آندی و تعیین توانش مدارباز (O.C.P)

برای بررسی رفتار آندی نمونه‌های منیزیم خالص تجاری و آند ریخته‌گری شده در محلول سولفات کلسیم و محلول‌های ۰/۰۱ و ۳درصد کلرور سدیم، منحنی‌های قطبش رسم، و مقدار توانش مدار

باز نمونه‌ها نیز در محلول‌های فوق اندازه‌گیری شده است. نمونه‌ها با سطح مؤثر ۱/۱۳ سانتی‌متر مربع مانت سرد شده و توانش آنها نسبت به الکترود کالومل اشباع شده، پس از یک ساعت قرار گرفتن در محلول اندازه‌گیری شده‌اند.

بررسی ساختار میکروسکوپی

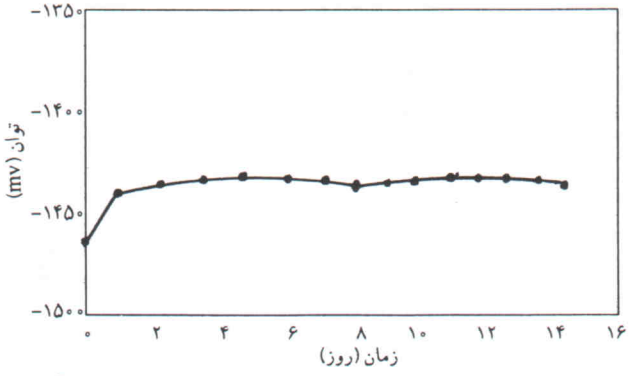
عنصر منگنز در آلیاژ منیزیمی اثر کاتدی ناخالصی آهن را به شدت کاهش می‌دهد.[۱۰ و ۱۱] به‌منظور چگونگی تأثیر منگنز بر ناخالصی آهن، ساختار میکروسکوپی نمونه‌یی از آند ریخته‌گری شده مورد بررسی قرار گرفت. نمونه در محلول ۳درصد نایتال و به‌مدت ۱۵ ثانیه اچ شده است.

* * * *

پس از انجام ذوب‌های مختلف، آند منیزیمی به‌وزن ۷/۷ کیلوگرم و به‌ابعاد ۴۳×۱۰×۱۰ سانتی‌متر و با ترکیب شیمیایی مناسب تهیه شد. ترکیب شیمیایی آند در جدول ۳ آمده است. در شکل ۳ منحنی توانش ـ زمان آندهای منیزیمی ارائه شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود میزان قطبش آند ریخته‌گری شده در این شرایط بسیار ناچیز است.

میانگین آمپرساعت بر واحد جرم مصرفی به دست آمده از آندهای منیزیمی برابر ۳۹۰ A.h/lb یا ۸۶۰ A.h/kg است. مقدار بازدهی به دست آمده ۳۹ درصد است که مربوط به چگالی آندی ۳۶ میلی‌آمپر بر فوت مربع است که با افزایش چگالی بازده آن نیز افزایش می‌یابد.[۱۰]

سرعت خوردگی آندهای منیزیمی و منیزیم خالص تجارتی در محلول‌های سولفات کلسیم اشباع‌شده، ۰/۰۱ و ۳ درصد کلرور سدیم در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود



شکل ۳. منحنی توانش ـ زمان آند منیزیمی در چگالی جریان ۳۶ میلی‌آمپر بر فوت مربع در محلول سولفات کلسیم اشباع شده.

جدول ۴. سرعت خوردگی منیزیم خالص تجارتی و آند ریخته گری شده

محلول	سرعت خوردگی (mpy)	
	آند ریخته گری شده	منیزیم خالص تجارتی
۰/۰۱ درصد کلرورسدیم	۳/۹۴	۱۳/۶
۳درصد کلرور سدیم	۱۲۵۲	۱۳۶۲
سولفات کلسیم اشباع‌شده	۱۷۵	۳۷۸

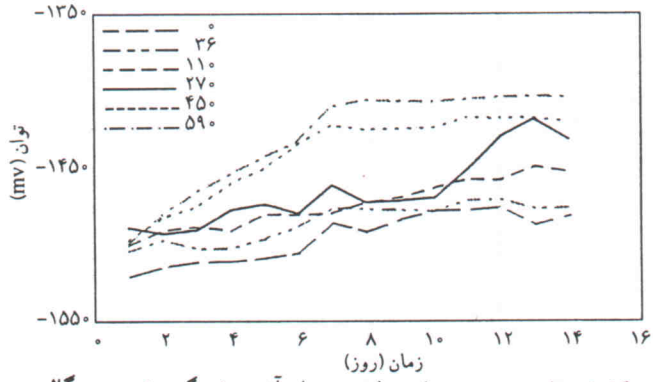
جدول ۵. توانش مدارباز منیزیم خالص تجارتی و آند ریخته گری‌شده

محلول	سرعت خوردگی (mpy)	
	آند ریخته گری شده	منیزیم خالص تجارتی
۰/۰۱درصد کلرورسدیم	-۱۱۷۷	-۱۲۷۴
۳درصد کلرور سدیم	-۱۵۷۲	-۱۶۵۴
سولفات کلسیم اشباع‌شده	-۱۴۸۸	-۱۵۰۲

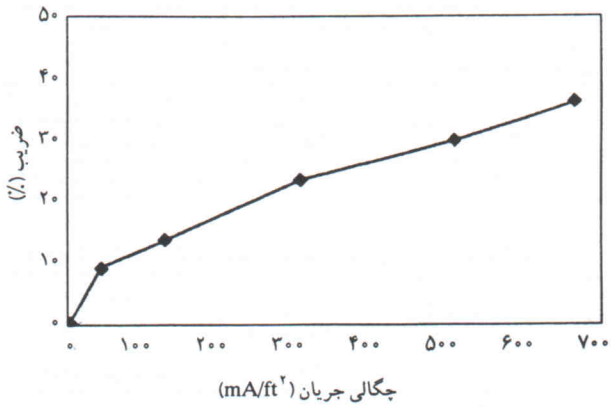
سرعت خوردگی نسبت به محلول ۰/۰۱ درصد کلرور سدیم بیشتر و از محلول ۳درصد کلرور سدیم کمتر است. همچنین در تمام موارد سرعت خوردگی منیزیم خالص تجاری کاملاً موضعی بوده و عمق حفره‌های موجود بر سطح قطعه زیاد است. خوردگی نمونه‌های آند به‌صورت حفره‌های ریز و با توزیع تقریباً یکنواخت صورت گرفته است.

توانش مدار باز آلیاژ ریخته‌گری شده و منیزیم خالص تجارتی در محلول‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است. مقادیر O.C.P ریخته‌گری شده نسبت به منیزیم خالص نسبتاً بیشتر است. به‌طور کلی براثر افزایش عناصر آلیاژی، توانش مدار باز منیزیم خالص به سمت مقادیر بیشتر میل می‌کند. همچنین این مقادیر (در هر دو مورد) با افزایش غلظت نمک کاهش می‌یابد. این مقادیر برای محلول سولفات کلسیم اشباع شده کمتر از محلول ۰/۰۱ درصد کلرور سدیم و بیشتر از محلول ۳ درصد آن است.

شکل ۴ منحنی‌های توانش ـ زمان آندهای منیزیمی را در چگالی‌های آندی ۰، ۳۶، ۱۱۰، ۲۷۰، ۴۵۰، ۵۹۰ میلی آمپر بر فوت



شکل ۴. مقایسه‌ی منحنی‌های توانش ـ زمان آند ریخته گری شده در چگالی جریان‌های مختلف در محلول ۳ درصد کلرور سدیم.

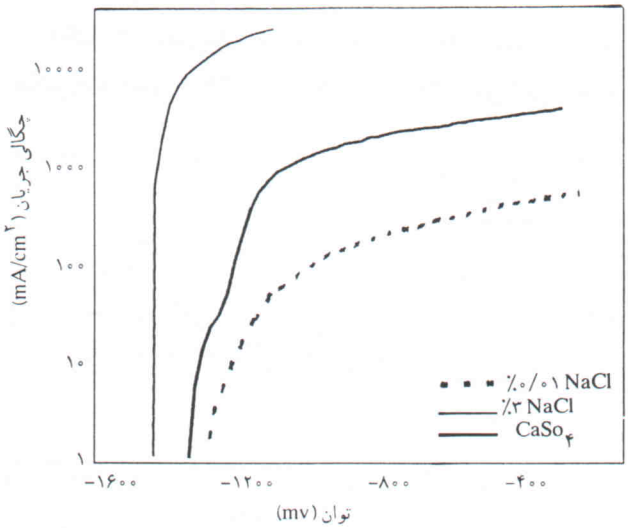


شکل ۵. منحنی بازده ـ چگالی جریان آند در محلول ۳٪ کلرور سدیم.

مربع نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود، میزان قطبش آند در محلول ۳ درصد کلرور سدیم حتی در چگالی‌های بالا بسیار ناچیز است. همچنین در محلول مذکور تنها حدود ۷۰ میلی‌ولت، نسبت به چگالی‌های مختلف، قطبش رخ داده است.

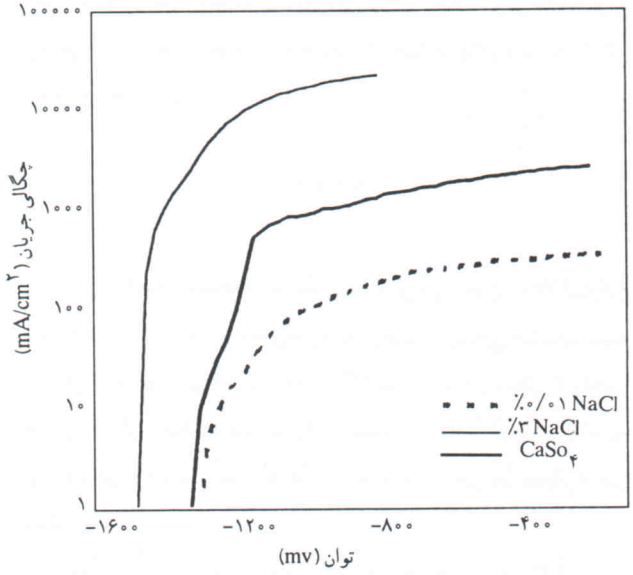
شکل ۵ منحنی بازده ـ چگال جریان آند را نشان می‌دهد. شکل منحنی بیانگر افزایش خوردگی انگلی[۶] و خوردگی حاصل از عبور جریان در مدار، براثر افزایش چگالی است. چنانچه مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی بازده آن نیز بیشتر می‌شود.

شکل‌های ۶ و ۷ منحنی‌های قطبش آندی آلیاژ ریخته‌گری شده و منیزیم خالص تجاری را به‌طور مقایسه‌یی در محلول‌های مختلف نشان می‌دهد. در هر دو مورد، با افزایش غلظت کلراید، توانش نمونه‌ها به سمت مقادیر کم‌تر میل می‌کند. همچنین توانش نمونه‌ها در سولفات کلسیم اشباع‌شده بیشتر از محلول ۰/۰۱ درصد کلرور سدیم و نجیب‌تر از محلول ۳درصد آن است. در محلول‌های ۳درصد کلرور

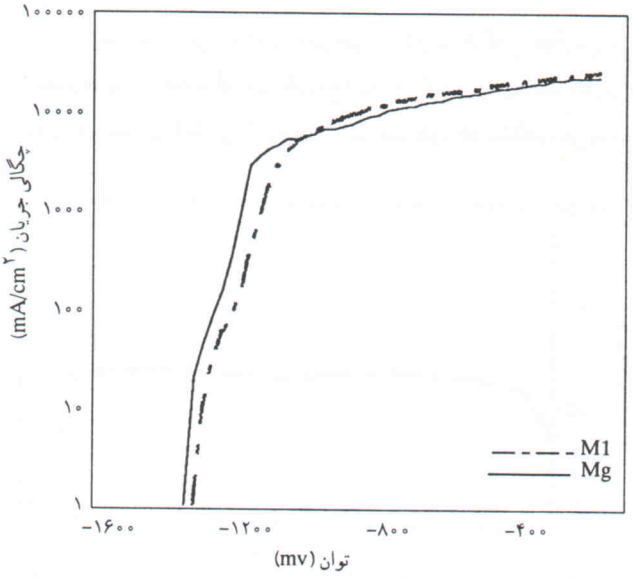


شکل ۶. منحنی‌های قطبش آندی آلیاژ ریخته‌گری شده در محلول‌های ۰/۰۱ و ۳درصد کلرور سدیم و سولفات کلسیم اشباع شده

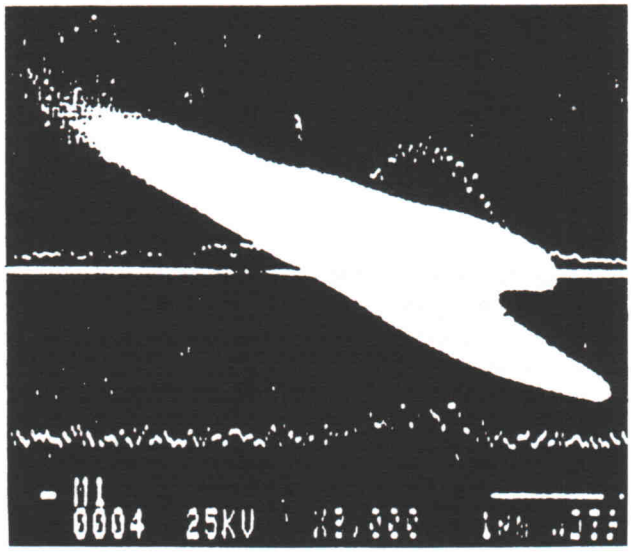
سدیم و سولفات کلسیم اشباع‌شده، تغییرات توانش نسبت به تغییرات چگالی بسیار کم است. در چگالی‌های بالا، منحنی‌های قطبش نمونه‌ها، به‌خصوص در محلول‌های سولفات کلسیم اشباع‌شده و ۳درصد کلرور سدیم، شکست ناگهانی از خود بروز می‌دهند و به‌شدت قطبیده می‌شوند. (قطبش شدید منیزیم و آلیاژهای آن در چگالی‌های بالا، به‌علت کاهش تفاوت منفی است.) منظور از «تفاوت منفی»، آزادشدن ئیدروژن بیشتر در سطح آند براثر قطبش آندی فلز



شکل ۷. منحنی‌های قطبش آندی منیزیم خالص تجاری درمحلول‌های ۰/۰۱ و ۳درصد کلرور سدیم و سولفات کلسیم اشباع شده



شکل ۸. منحنی‌های قطبش آندی آلیاژ ریخته‌گری شده و منیزیم خالص تجاری در محلول سولفات کلسیم اشباع شده



شکل ۹. ساختار میکروسکوپی آلیاژ ریخته‌گری شده (فاز غنی از منگنز که دارای ذرات ناخالص آهن است)

منیزیم است که با کاهش وزن اضافی فلز همراه است.[۲]

مقایسه‌ی منحنی‌های قطبش آندی آلیاژ و منیزیم خالص تجارتی نشان داد که در تمام محلول‌ها رفتار قطبش آندی این دو تقریباً یکسان است. اما در چگالی‌های معمولی در حفاظت کاتدی، منیزیم خالص تجاری حدود ۱۰۰ میلی‌ولت توانش بیشتری از خود بروز می‌دهد.

در شکل ۸ منحنی‌های قطبش آندی آلیاژ ریخته‌گری شده و منیزیم خالص تجارتی در محلول سولفات کلسیم اشباع‌شده مقایسه شده است. در شکل ۹ نیز ساختار میکروسکوپی آلیاژ ریخته‌گری شده نشان داده شده است. با بررسی تجزیه‌ی خطی مشخص شد که فاز سفید نسبت به زمینه، منگنز بیشتری دارد.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که در ذوب منیزیم و آلیاژهای آن، پاشیدن روانساز پوششی بر روی قطعات بار جامد و کف و دیواره‌های بوته، با تشکیل یک پوشش محافظ بر روی فلز از اکسایش آن در حالت جامد و مذاب جلوگیری می‌کند. استفاده از اتمسفر گاز دی‌اکسید گوگرد نیز به این فرایند کمک می‌کند. همچنین هرچقدر فاصله‌ی زمانی بین قرارگرفتن بار جامد در بوته و ذوب‌شدن آن کوتاه‌تر باشد، عملیات ذوب به‌نحو مطلوب‌تری صورت می‌گیرد. زیرا روانساز محافظ سطح مذاب را بهتر از سطح جامد پوشانده و از سوختن آن ممانعت می‌کند. به همین دلیل بهتر است بار فلزی را در دو یا چند مرحله (بسته به مقدار ذوب) با افزودن فلز جامد به فلز نیمه‌مذاب انجام داد.

در ذوب منیزیم، استفاده از کوره‌های مقاومتی (به‌دلیل کنترل بهتر مذاب در آنها) بر کوره‌های زمینی که با سوخت مایع کار می‌کند، مرجح است. به‌هنگام ریخته‌گری مذاب به درون قالب، پاشیدن مخلوطی از پودر گوگرد و اسید بوریک بر روی جریان مذاب تأثیر به‌سزایی در جلوگیری از اکسایش مذاب دارد.

مقایسه‌ی ترکیب شیمیایی آند ریخته‌گری شده با ترکیب بار مصرفی نشان می‌دهد که عملیات ته‌نشین‌سازی آهن به نحو مطلوبی انجام شده است. (مقدار آهن در ترکیب آند ۱۰۰ برابر کمتر از مقدار آن در بار فلزی است). بررسی میکروسکوپی آند نیز نشان می‌دهد که منگنز، آهن را محاط می‌کند یا با آن ترکیب جدیدی به وجود آورده است که اثر کاتدی ناخالصی آهن در آند را کاهش می‌دهد.

نتیجه‌ی آزمایش‌های خوردگی نشان می‌دهد که علاوه بر کمتربودن سرعت خوردگی آند ریخته‌گری شده نسبت به منیزیم خالص تجارتی، خوردگی آند ــ به ویژه در محلول ۳درصد کلرور سدیم ــ با حفره‌های ریز و با توزیع تقریباً یکنواخت صورت می‌گیرد. به‌طور کلی در محلول‌های حاوی آنیون‌های Cl^- و SO_4^{2-} منیزیم (اعم از منیزیم خالص تجارتی یا آند ریخته‌گری شده) فعال، و سرعت خوردگی آن زیاد است. همچنین میزان قطبش آندی منیزیم در این محلول‌ها بسیار ناچیز است.

نتایج به‌دست آمده از آزمایش آند در شرایط مشابه با خاک نشان می‌دهد که آند ریخته‌گری شده با توانش انحلال ۱/۵۱- ولت نسبت به الکترود مرجع مس (سولفات مس که قابل مقایسه با توانش انحلال آندهای منیزیمی استاندارد است) اختلاف پتانسیلی حدود ۰/۸ تا ۱/۲ ولت نسبت به فولاد دارد. حتی زمانی که فولاد کاملاً قطبیده باشد، با توجه به معیار حفاظت ۰/۸۵- ولت، نیروی محرکه‌ی آند نسبت به فولاد ۰/۵۶ ولت خواهد بود و بازده آند نیز ۳۹درصد است که در محدوده‌ی بازده‌های گزارش‌شده برای آندهای منیزیمی است.

با توجه به مطالب فوق نتیجه می‌گیریم که آند تهیه شده علاوه بر عدم قطبش آندی و دارابودن نیروی محرکه‌ی خوب و قابل اطمینان در حفاظت کاتدی فولاد، بازدهی مناسبی دارد و در آن خوردگی یکنواخت صورت می‌گیرد.

مقایسه‌ی بازده‌های حاصل درمحلول سولفات کلسیم اشباع‌شده و ۳درصد کلرور سدیم در چگالی $36 mA/ft^2$ نشان می‌دهد که بازده آند به ترکیب شیمیایی محیط بستگی دارد. سرعت‌خوردگی بیشتر آند در محلول ۳درصد کلرور سدیم نسبت به سولفات کلسیم اشباع‌شده، سبب کاهش بازدهی آند در این محلول شده است. بازدهی آند به چگالی آن نیز بستگی دارد، به گونه‌یی که با افزایش چگالی بازدهی نیز زیاد می‌شود و به خوردگی یکنواخت‌تر آند می‌انجامد.

پانوشت‌ها

1. flux
2. sacrificial anode
3. potential
4. backfill
5. calomel electrod
6. parasitic corrosion

منابع

1. Emley, E.F. **Principles of Magnesium Technology**, Magnesium Electron Ltd,. (1966).
2. Tunold, R., Hotan, H. and Berge, M., "The corrosion of magnesium in aqueous solution containing choloride ion",*Corrosion Science,* **17,** pp. 353-365 (1979).
3. Peabody, A.W., **Control of Pipe line Corrosion**, NACE, pp. 116-127 (1967).
4. Morgan, J.H., **Cathodic Protection,** NACE, pp. 113-114 (1987).
5. Krissinger, S.S., "How to select and use magnesium anodes", *Pipe line and Gass Jour.,* **211,**(2), pp. 20-28 (Feb., 1984).
6. Staff, P. and Staff, G.J.,"Magnesium anode utilization", *Pipe line and Gass Jour.,* **25,** (2), pp. 23-26 (Feb., 1988).

۷. حجازی ، جلال. ریخته گری فلزات غیرآهنی، جامعه ریخته گران، ۱۳۶۰.

8. Proffitt, H., "Magnesium and magnesium alloy", *Metals Handbook, ASM.,* **15,** pp. 798-811 (1988).
9. ASTM, "Standard test method for laboratory evalution of magnesium sacrificial anode test specimens for underground application", *Annual Book of ASTM Standards, ASTM,* **03:02,** Designation G97-89 (1989).
10. Robinson, H.A., and George, P.F., "Effect of alloying and impurity elements in magnesium alloy cast anodes", *Corrosion,* **10**,(6), pp. 122-188 (1954).
11. George, P.F., and Newport, J.J., "A high potential magnesium anode", *Corrosion,* **12**, (12), pp. 6271-633t (1959).