

بررسی خواص الکتریکی و شیمیایی مینای ویژه مقاومت سیم‌پیچی شده نیکل-کروم

مهدی محسنی، علیرضا میرحبیبی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران

ar_mirhabibi@iust.ac.ir

چکیده: در پژوهش حاضر خواص الکتریکی و شیمیایی مینای مناسب برای پوشش دادن مقاومت سیم‌پیچی شده نیکل-کروم مورد بررسی قرار گرفت. برای یافتن پوشش مناسب، ترکیب‌های مختلفی از میناها بررسی شد. نتایج نشان داد که ترکیب حاوی یک درصد وزنی اکسید کبالت و سه درصد وزنی اکسید کروم با دمای پخت 840°C ترکیب بهینه می‌باشد. تغییر هدایت الکتریکی مینا با دما با استفاده از دستگاه طراحی شده توسط محققین و رابطه *Rasch-Hinrichsen* اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما تا 275°C هدایت الکتریکی مینا به $10^{-7/6} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ می‌رسد. اندازه‌گیری استحکام دی‌الکتریک مینا نشان داد که ولتاژ شکست پوشش برابر با $10 \cdot \text{KV/cm}$ می‌باشد. بررسی پایداری شیمیایی پوشش که بر اساس افت وزن در واحد سطح پوشش و در محیط‌هایی با pH مختلف انجام شد نشان داد که بیشترین پایداری شیمیایی در محیط آبی یا محیط با pH خنثی می‌باشد.

کلید واژه: مینا، نیکل-کروم، هدایت الکتریکی، استحکام دی‌الکتریک، پایداری شیمیایی

۱- مقدمه

مقاومت‌های الکتریکی سیم‌پیچی شده به دلیل طراحی ویژه دارای توان بالاتری نسبت به سایر مقاومت‌های الکتریکی می‌باشند. این نوع از مقاومت‌ها متشکل از یک هسته‌ی سرامیکی و یک سیم‌پیچ فلزی می‌باشند. سیم مورد استفاده از انواع المنت‌های دارای مقاومت الکتریکی، به ویژه آلیاژهای نیکل-کروم و هسته‌ی سرامیکی نیز به شکل لوله یا میله می‌باشد. متداول‌ترین هسته‌های سرامیکی استفاده شده برای این مقاومت‌ها پرسلان‌های الکتریکی و استاتیوی می‌باشند. از مهم‌ترین کاربردهای این مقاومت‌ها می‌توان به استفاده در صنایع نظامی و نیز استفاده به عنوان منبع تامین گرما اشاره نمود [۱، ۲ و ۳].

برای محافظت از مقاومت در برابر عوامل محیطی همچون رطوبت و نیز صدمات مکانیکی و ... لازم است که مقاومت را پوشش داد [۴، ۵ و ۶]. متداول‌ترین پوشش استفاده شده برای این نوع مقاومت‌ها میناهای شیشه‌ای و شیشه سرامیکی می‌باشد [۵ و ۶].

در بسیاری از کاربردها شیشه می‌بایست به عنوان یک عایق الکتریکی و یا هادی به کار گرفته شود، بنابراین دانستن هدایت الکتریکی آن دارای اهمیت می‌باشد. در حالیکه بیشتر شیشه‌ها در ماهای معمول خواص عایقی (الکتریکی) خوبی از خود نشان می‌دهند، اما در برخی موارد افزایش دما منجر به افزایش قابل توجه هدایت الکتریکی در آن‌ها می‌گردد. در بیشتر شیشه‌های اکسیدی هدایت الکتریکی ناشی از حرکت یون‌ها می‌باشد. در بیشتر شیشه‌های تجاری یون ایجادکننده هدایت، سدیم می‌باشد. در برخی موارد یون‌های پتاسیم و هیدروژن حامل جریان می‌باشند، اگرچه تحرک آن‌ها معمولاً کمتر از سدیم است [۷]. آگاهی از

هدایت الکتریکی در شیشه‌ها به چند دلیل دارای اهمیت می‌باشد. نخست آنکه کاربردهایی همچون عایق الکتریکی اساساً به هدایت وابسته می‌باشند. علاوه بر آن هدایت یونی می‌تواند برای پیش بینی برخی دیگر از خواص، همچون پایداری شیمیایی، که با نقل و انتقال یون مرتبط می‌باشند نیز به کار رود. از سوی دیگر تغییر هدایت با ترکیب می‌تواند به شناسایی ساختار شیشه‌ها کمک کند [۸]. شیشه‌های سیستم $PbO-B_2O_3-SiO_2-Al_2O_3$ (PBSA) از نظر شیمیایی در محدوده وسیعی از ترکیب پایدار بوده و دارای خواص الکتریکی مطلوبی همچون هدایت الکتریکی بالا می‌باشند [۹]. هدایت الکتریکی در شیشه‌ها را می‌توان در یک بازه دمایی وسیع (در دماهای کمتر از دمای انتقال به حالت شیشه‌ای) با استفاده از معادله آرنیوسی ۱ بیان نمود [۱۰]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (۱)$$

در رابطه ۱: σ هدایت الکتریکی شیشه در دمای T ، σ_0 ضریبی ثابت، E انرژی فعال سازی برای هدایت و T دما (بر حسب کلونین) می‌باشند. شکل لگاریتمی معادله ۱ به رابطه Rasch-Hinrichsen (معادله ۲) معروف است [۱۰]:

$$\log \sigma = A + \frac{B}{T} \quad (۲)$$

در رابطه ۲ ثوابت A و B برای شیشه‌های مختلف متفاوت می‌باشند.

برای تعیین پایداری شیمیایی شیشه‌ها می‌توان از آزمایش‌های مختلفی استفاده کرد. تعیین کاهش وزن، اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی محلول‌ها پس از قرار گرفتن شیشه در داخل آن‌ها از روش‌های معمول است. وقتی لعاب شیشه‌ای در تماس با محلول قرار می‌گیرد، معمولاً یون‌های قلیایی به درون محلول وارد می‌شوند و یک لایه دارای قلیایی کم بر روی سطح شیشه تشکیل می‌شود. ضخامت این لایه‌های غنی از سیلیس با ترکیب شیشه، شرایط آزمایش، زمان، دما و pH محلول تغییر می‌کند [۱۱ و ۱۲].

همان گونه که گفته شد از جمله کاربردهای مقاومت‌های سیم‌پیچی شده استفاده به عنوان منبع گرما می‌باشد و به طور کلی با توجه به اینکه این مقاومت‌ها دارای توان‌های بالا می‌باشند در حین کار تولید گرما می‌کنند. این گرما می‌تواند منجر به افزایش هدایت الکتریکی پوشش شیشه‌ای شود و خاصیت عایقی آن را کاهش دهد لذا در پژوهش حاضر تغییرات هدایت الکتریکی پوشش با افزایش دما اندازه‌گیری گردید. از سوی دیگر با توجه به عبور جریان‌های با ولتاژ بالا از مقاومت پوشش مورد استفاده بایستی دارای ولتاژ شکست مناسبی باشد بنابراین استحکام دی‌الکتریک یا ولتاژ شکست پوشش نیز مورد بررسی قرار گرفت. همان گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد مهم‌ترین نقش پوشش، محافظت از مقاومت (سیم‌پیچ) در برابر عوامل محیطی مخرب همچون رطوبت می‌باشد بنابراین پایداری شیمیایی پوشش نیز به عنوان خاصیت مهم دیگری که در استفاده از مقاومت و پایداری آن نقش مهمی دارد مورد بررسی قرار گرفت.

۲- فعالیت‌های تجربی

ترکیب مورد استفاده بر اساس نتایج تحقیقات محققین [۱۳] می‌باشد. برای ساخت پوشش‌ها ابتدا فریت پوشش‌ها تهیه شدند. ساخت فریت‌ها در بوت‌های شاموتی و در محدوده دمایی $1200-1300^\circ C$ ، با استفاده از کوره‌ی گازی، و با توقف ۳۰ دقیقه‌ای

در این دما انجام شد. سرد کردن مذاب فریت‌ها در هوا و بر روی صفحه‌ی فولادی صورت گرفت. سپس فریت‌های تهیه شده توسط آسیای ماهواره‌ای آسیا شده و از الک مش ۲۰۰ عبور داده شدند. پوشش نهایی (مینا) با افزودن ۳٪ وزنی اکسید کروم به فریت حاصل شد. ترکیب پوشش مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی پوشش مورد استفاده

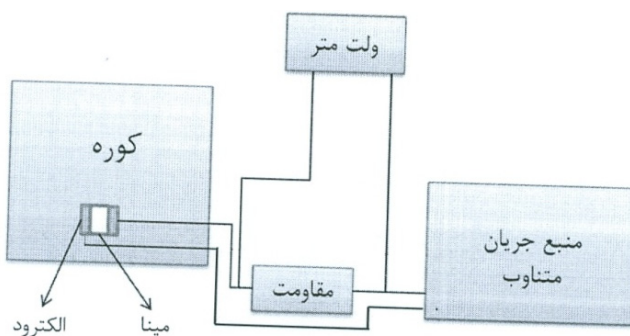
اکسید	PbO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂	CoO	Cr ₂ O ₃
درصد وزنی	۵۰	۲۰	۱۲	۱۴	۲	۱	۱	۳ علاوه بر ۱۰۰

برای اندازه‌گیری تغییرات هدایت الکتریکی مینا با دما از دستگاه ساخته شده بر اساس شمای نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شد [۱۴]. برای این منظور پس از ذوب مینا در کوره الکتریکی نمونه‌ای به شکل مکعب مستطیل برش داده شد. نمونه تهیه شده سپس در دمای ۴۸۰°C تنش‌گیری و در داخل کوره تا دمای محیط سرد شد. پس از پولیش نمودن سطوح نمونه، دو سطح مقابل به یکدیگر توسط نقره مایع پوشانده شد و در دمای ۳۵۰°C پخت گردید تا لایه نازکی از پوشش هادی بر روی سطح نمونه ایجاد شده و امکان تماس بین الکترودها و نمونه فراهم گردد. با قرار دادن نمونه در داخل کوره و افزایش دما امکان برقراری جریان در سیستم از طریق الکترودهای مسی متصل به نمونه فراهم گردید. محاسبه میزان هدایت الکتریکی در هر دما با استفاده از رابطه ۳ انجام گرفت [۱۴].

$$\chi_x = \frac{1}{R_x} \frac{L}{Z} = \frac{1}{R_p} \frac{L}{\left(\frac{U}{U_p} - 1\right) A} \quad (3)$$

در رابطه ۳، χ_x (یا σ) هدایت الکتریکی مینا است که برابر مقدار هدایت الکتریکی واحد مقطع عرضی یک مکعب از مینا می‌باشد (واحد هدایت الکتریکی زیمنس بر متر یا Sm^{-1} است که $S = \Omega^{-1}$)، R_x مقاومت الکتریکی مینا (Ω)، U اختلاف پتانسیل اعمالی (V)، U_p اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت R (مقاومت مصرف کننده) (V)، A سطح مقطع نمونه‌ی شیشه‌ای (cm)، L ضخامت نمونه‌ی شیشه‌ای (cm) و R_p مقاومت معادل مقاومت‌های R_1 و R_2 می‌باشد (Ω) که با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود. در رابطه ۴: R_1 مقاومت داخلی ولت‌متر و R_2 مقاومت مصرف کننده می‌باشد [۱۴].

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$



شکل ۱- سیستم مورد استفاده برای اندازه‌گیری تغییرات هدایت الکتریکی با دما

برای اندازه‌گیری استحکام دی‌الکتریک از دستگاه ولتاژ بالا^۱ مدل WB ساخت شرکت Messwandler آلمان استفاده گردید. بررسی فازی با استفاده از دستگاه XRD مدل GDX-8030 ساخت شرکت JEOL ژاپن انجام شد. برای بررسی پایداری شیمیایی مینا از سه محیط با pH متفاوت (اسیدی، خنثی و بازی) استفاده شد. برای این منظور از سه محلول با pH ۲ (اسید هیدروکلریک)، ۷ (آب مقطر) و ۱۲ (هیدروکسید آمونیوم) استفاده شد. نمونه‌ها پس از ذوب و تنش‌گیری به شکل ورقه‌هایی برش داده شدند. پس از قرارگیری نمونه‌ها در محیط‌های آزمایش افت وزن آن‌ها در فواصل زمانی معین اندازه‌گیری شد. برای افزایش اعتبار نتایج به دست آمده در هر محیط از سه نمونه شیشه‌ای استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

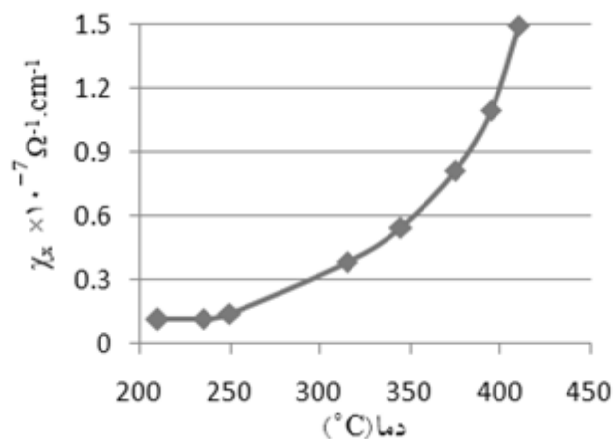
۳-۱- هدایت الکتریکی

ابعاد نمونه و مشخصات ولت متر مورد استفاده برای اندازه‌گیری تغییرات هدایت الکتریکی مینا با دما در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مشخصات نمونه و ابزارهای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نمونه

$\Omega R_p(\)$	$R_2 (\Omega)$	$R_1 (\Omega)$	U (v)	L (cm)	A (cm ²)
6×10^5	10^6	$1/5 \times 10^6$	۷۰	۰/۵	۲/۰۵

شکل ۲ منحنی تغییرات هدایت الکتریکی مینا را نسبت به دما نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود افزایش هدایت الکتریکی با دما روندی لگاریتمی دارد. به دلیل عدم تغییر محسوس اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت (U_p) در دماهای کمتر از ۲۱۰°C و احتمال بروز خطا در اندازه‌گیری مقادیر کمتر از این دما در نمودار وارد نشده‌اند.



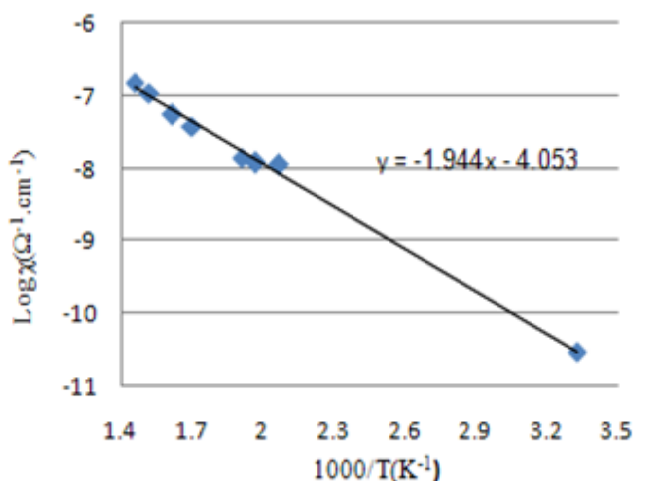
شکل ۲- تغییرات هدایت الکتریکی مینا با دما

شکل ۳ منحنی تغییرات هدایت الکتریکی مینا را نسبت به معکوس دما نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با افزایش دما هدایت الکتریکی مینا به طور خطی افزایش یافته به طوری که هدایت الکتریکی در حدود دمای ۳۲۰°C تقریباً ۱۰۰۰ برابر هدایت در

^۱ High voltage

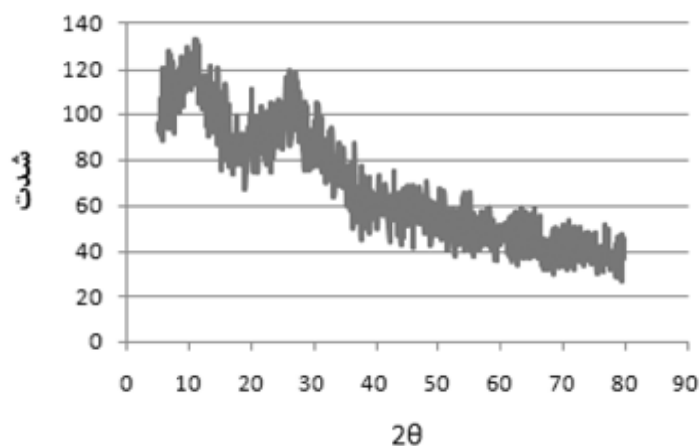
دمای محیط (27°C) می باشد (مقدار هدایت الکتریکی در دمای 320°C با استفاده از معادله خط رسم شده محاسبه گردیده است و مستقیماً اندازه گیری نشده است).

بیشتر بودن هدایت الکتریکی مینا نسبت به شیشه های بوروسیلیکات سرب و آلومینو بوروسیلیکات سرب [۹ و ۱۵] می تواند ناشی از حضور یون سدیم و تحرک بالای آن باشد، البته وجود یون هایی همچون کبالت و کروم که در لعاب های نیمه هادی نقش مهمی را در ایجاد هدایت ایفا می کنند نیز می تواند در افزایش هدایت نقش داشته باشد [۱۶].



شکل ۳- تغییر هدایت الکتریکی مینا با معکوس دما

شکل ۴ الگوی پراش اشعه ایکس مینا را نشان می دهد که نشان دهنده آمورف بودن مینا است. وجود فازهای بلورین در داخل زمینه شیشه می تواند بسته به نوع فازهای بلورین یعنی پیوسته بودن یا نبودن آن ها در زمینه منجر به افزایش و یا کاهش هدایت الکتریکی گردد چراکه فازهای پیوسته می توانند مسیری برای حرکت الکترون ها فراهم نمایند و هدایت الکتریکی را افزایش دهند در مقابل فازهای غیر پیوسته به صورت مانعی در برابر حرکت یون ها عمل نموده و از حرکت آن ها ممانعت به عمل می آورند و هدایت را کاهش می دهند.



شکل ۴- الگوی پراش اشعه ایکس پوشش

با توجه به ترکیب مینا و ساختار بلوری آن می‌توان پیش‌بینی نمود که هدایت الکتریکی مینا از نوع یونی (به دلیل وجود یون سدیم) باشد. برای کاهش هدایت الکتریکی و افزایش خاصیت عایقی مینا می‌توان یون‌های سدیم را به نسبت مولی برابر با استفاده از یون‌های دو ظرفیتی که گدازآوری مناسبی دارند، همچون کلسیم، جایگزین نمود. علت این امر ناشی از این موضوع است که حرکت یون‌های بزرگتر از میان شبکه نسبت به یون‌های کوچکتر دشوارتر می‌باشد. به طور کلی با افزایش نسبت اکسیدهای شبکه ساز به ویژه سیلیس نسبت به اکسیدهای دگرگون ساز شبکه می‌توان اتصالات قویتری در ساختار شیشه ایجاد نمود [۱۰] البته این امر مستلزم افزایش دمای پخت نمونه می‌باشد که در اینجا مطلوب نیست.

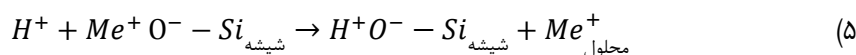
گزارش شده است که حداکثر دمای کاری مقاومت‌های سیم‌پیچی شده 275°C می‌باشد [۱، ۵ و ۱۷] که در این دما هدایت الکتریکی مینا $10^{-7/6} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ است. مقدار هدایت الکتریکی مینا در این دما آن را همچنان در ناحیه مواد با مقاومت الکتریکی مناسب قرار می‌دهد و می‌توان انتظار داشت مینای مذکور از نظر این خاصیت نیز بتواند در کاربرد مورد نظر مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از معادله خط رسم شده می‌توان دریافت دمایی که در آن هدایت الکتریکی مینا برابر $10^{-8} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ می‌باشد تقریباً 220°C است (این میزان از هدایت الکتریکی معیاری برای مقایسه مواد مختلف می‌باشد) این دما برای شیشه سودالایم (شیشه در و پنجره) تقریباً 150°C است [۱۸].

۳-۲- استحکام دی‌الکتریک

نتیجه آزمایش نشان داد که ولتاژ شکست مینا برابر با ۵۰ کیلو ولت می‌باشد، با توجه به ضخامت نمونه (۵ میلی‌متر) می‌توان نتیجه گرفت که استحکام دی‌الکتریک مینا برابر با 10KV/mm یا 100KV/cm (ضخامت پوشش مورد استفاده نیز در محدوده میلی‌متر است) می‌باشد. مقدار استحکام دی‌الکتریک به دست آمده در محدوده استحکام دی‌الکتریک شیشه‌ی سودالایم می‌باشد [۱۹]. اما با توجه به اینکه مقاومت‌های توان بالا معمولاً در ولتاژ بالاتر از $2/5$ کیلو ولت مورد آزمایش قرار نمی‌گیرند لذا استحکام دی‌الکتریک به دست آمده برای کاربرد مورد نظر کافی است [۱].

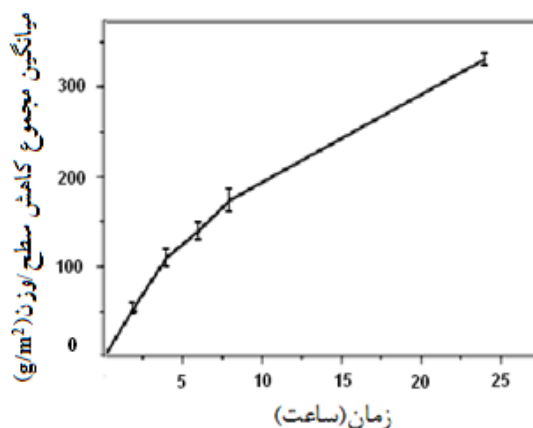
۳-۳- پایداری شیمیایی

شکل ۵ پایداری شیمیایی مینا را در محلول HCl و در دمای 60°C نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود در ۴ ساعت اول شیب منحنی نسبت به زمان‌های پس از آن بیشتر می‌باشد که نشان دهنده بیشتر بودن سرعت خوردگی در این مدت است. به نظر می‌رسد که دلیل این امر آن است که طی این مدت یون H^{+} از اسید به داخل شبکه شیشه نفوذ می‌کند و جایگزین یک یون قلیایی می‌شود. این واکنش برای شیشه سیلیسی به صورت زیر است [۱۱ و ۲۱].



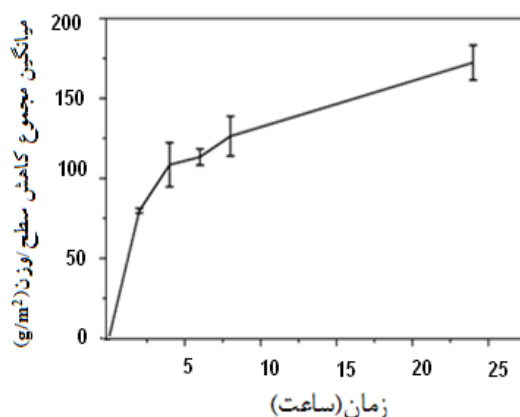
چنانچه یون‌های H^{+} جایگزین Me^{+} شوند، یک لایه سطحی تشکیل می‌شود که همانند سیلیس زجاجی یا سیلیکا ژل است و خواصش با شیشه اصلی تفاوت دارد. با گذشت زمان ضخامت این لایه افزایش می‌یابد. و به عنوان سدی در برابر واکنش‌های دیگر عمل می‌کند و سرعت نفوذ به داخل و خارج از سطح را کاهش می‌دهد. بنابراین از حمله بیشتر جلوگیری می‌کند. در نتیجه نرخ خوردگی کاهش یافته و شیب منحنی با گذشت زمان به تدریج کاهش می‌یابد. البته انتظار می‌رود که به تدریج و با گذشت زمان با

توجه به افزایش ضخامت لایه محافظ شیب منحنی صفر یا منفی گردد یا به عبارت دیگر افت وزن متوقف شده یا افزایش وزن مشاهده گردد، اما در آزمایش انجام شده زمان لازم برای رخ دادن این شرایط فراهم نبوده است. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج گزارش شده توسط داگلاس و همکارانش [۲۰] نشان می‌دهد که افت وزن ایجاد شده در مینا در محیط اسیدی کمتر از شیشه بوروسیلیکات سرب و بیشتر از شیشه‌ی آلومینوبوروسیلیکات سرب می‌باشد. علت افزایش مقاومت به اسید مینا نسبت به شیشه بوروسیلیکات سرب را می‌توان ناشی از حضور اکسید آلومینیوم در مینا دانست. کاهش مقاومت به اسید مینا نسبت به شیشه آلومینوبوروسیلیکات سرب نیز می‌تواند ناشی از حضور یون سدیم در مینا و اثر آن بر کاهش مقاومت شیمیایی بر اساس رابطه ۴ باشد.



شکل ۵- پایداری شیمیایی مینا در محلول HCl در دمای ۶۰°C و pH=۲.

شکل ۶ پایداری شیمیایی مینا را در محیط قلیایی و در دمای ۶۰°C نشان می‌دهد. مکانیزم اصلی خوردگی شیشه‌ها در محیط‌های قلیایی تهاجم گروه‌های هیدروکسیل به شبکه شیشه و گسستن اتصالات سیلیسیم و اکسیژن می‌باشد [۲۱]. بنابراین به نظر می‌رسد افزایش مقدار سیلیس در شیشه به دلیل افزایش احتمال انجام واکنش مذکور می‌تواند باعث بیشتر شدن خوردگی در محیط‌های قلیایی شده باشد. با توجه به همین موضوع می‌توان بیشتر بودن میزان خوردگی مینا را نسبت به شیشه PBSA [۲۰] توجیه نمود، چراکه مقدار سیلیس در مینا دو برابر آن در شیشه PBSA^۱ می‌باشد.

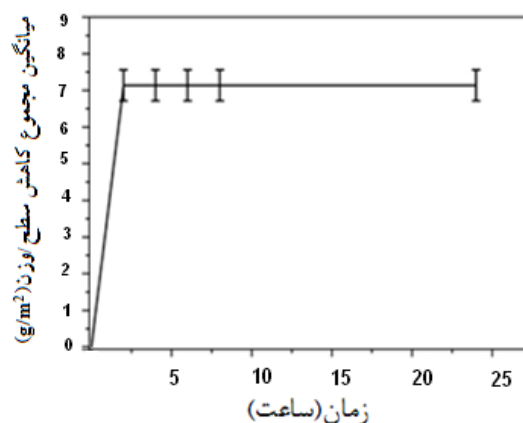


شکل ۶- پایداری شیمیایی مینا در محلول NaOH در دمای ۶۰°C و pH=۱۲.

^۱ PbO-B₂O₃-SiO₂-Al₂O₃

شکل ۷ پایداری شیمیایی مینا را در آب مقطر و در دمای 95°C نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود در دو ساعت اول شیب منحنی زیاد می‌باشد که نشان دهنده خوردگی شدید در این مدت است. اما پس از آن تغییری در شیب منحنی دیده نمی‌شود و افت وزنی مشاهده نمی‌گردد. این امر را می‌توان با استفاده از رابطه ۴ و تبادل یونی توجیه نمود. وجود یون سدیم در ترکیب مینا به عنوان یک یون قلیایی فعال می‌تواند عامل تبادل یون (H^+) آب با مینا گردد. در این جا نیز به نظر می‌رسد اختلاف بین نتایج به دست آمده با نتایج مرجع ۲۰ ناشی از همین مسئله باشد. عدم کاهش وزن پس از دو ساعت نیز ناشی از تشکیل لایه محافظ سطحی است. با توجه به نتایج به دست آمده برای پایداری شیمیایی مینا در محیط‌های مختلف می‌توان چنین نتیجه گرفت که مینا دارای پایداری مناسبی در محیط‌های شامل رطوبت می‌باشد.

در پایان لازم است به این نکته اشاره نمود که مقاومت‌های سیم‌پیچی شده با پوشش‌های سیلیکونی و سیمانی نیز امروزه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این پوشش‌ها در مقایسه با پوشش‌های شیشه‌ای دمای قابل تحمل کمتری داشته، مقاومت سایشی کمتری دارند و نیز امکان آتش گرفتن (برای نوع سیلیکونی) وجود دارد. اما به دلیل دارا بودن خواصی چون عدم ترشوندگی در برابر آب و در نتیجه عدم نفوذ آب در آن (در نوع سیلیکونی) و امکان تهیه در دماهای کمتر که می‌تواند منجر به کاهش هزینه تمام شده گردد استفاده از آن‌ها نیز مور توجه قرار گرفته است.



شکل ۷- پایداری شیمیایی مینا در آب مقطر در دمای 95°C و $\text{pH}=7$

۴- نتیجه‌گیری

خواص الکتریکی و شیمیایی مینای مناسب برای پوشش دادن مقاومت سیم پیچی شده نیکل-کرم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات نشان داد که مینای تهیه شده دارای استحکام دی‌الکتریک 10KV/cm می‌باشد که برای استفاده به عنوان پوشش مقاومت مناسب است. همچنین اندازه‌گیری تغییر هدایت الکتریکی مینا با دما نشان داد که تا دمای 210°C افت قابل توجهی در مقاومت الکتریکی رخ نمی‌دهد ولی پس از آن با افزایش دما هدایت الکتریکی به تدریج افزایش می‌یابد و در دمای 275°C به $10^{-7/6}\ \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ می‌رسد. هدایت الکتریکی مینا از هدایت الکتریکی شیشه‌های بوروسیلیکات سرب و آلومینو بوروسیلیکات سرب بیشتر می‌باشد که می‌تواند ناشی از حضور یون‌های سدیم، کبالت و کروم در مینا باشد. بررسی پایداری شیمیایی پوشش در محیط‌هایی با pH متفاوت نشان داد که پایداری مینا در محیط‌های حاوی رطوبت بسیار بیشتر از محیط‌های

با pH اسیدی و بازی می‌باشد بطوریکه میزان خوردگی پس از ۲۴ ساعت در محیط اسیدی تقریباً ۵۰ برابر محیط مرطوب می‌باشد. از سوی دیگر پایداری شیمیایی مینا در محیط قلیایی بیشتر از محیط اسیدی است که با توجه با ترکیب مینا یعنی سربی بودن آن چنین امری نیز منطقی می‌باشد.

مراجع

- [1] Mar baker, E., "Coatings for Wire-Wound Resistors", J. Am. Ceram. Soc, Vol. 28, pp 329-342, (1945).
- [2] Jones, D., "Navy electricity and electronics training", naval education and training professional development and technology center, Washington, D.C., (1998).
- [3] Hailing, J., "Power wire-wound resistors", J. electronics and power, Vol. 29, pp 244-245, (1983).
- [4] Hubertus, J., deceased, J., " wire-wound resistor", US patent NO.4406994, (1983).
- [5] Deyrup, A. J., " Enamels for resistors", US patent NO.2425032, (1944).
- [6] Costa. U., Electrical resistor with a polycrystalline ceramic cover and process for manufacture, US patent NO. 3919682, (1975).
- [7] Robert H. Doremus. Glass science, John Wiley and sons, pp 146-148, (1973).
- [8] Klein R. M. and Ploof. D. A., Technique to measure ionic conductivity of glass, J. Ceramic Bulletin, Vol. 57, No. 6 , pp 582–586, (1978).
- [9] Buchanan R. C. and Zuegel M. A., Electrical Properties of Glasses in the System PbO-Al₂O₃-B₂O₃-SiO₂, J. Am. Ceram. Soc, Vol. 51, No. 1, pp 28-32, (1968).
- [10] Kirby P. L., Electrical Conduction in Glass, J. British applied physics, Vol. 1, pp 193-201, (1950).
- [۱۱] ریچارد اپلر و داگلاس اپلر. لعاب‌ها و پوشش‌های شیشه‌ای. ترجمه سعید باغشاهی، علیرضا میرحبیبی، مهدی قهاری و رویا آقابازاده. جهاد دانشگاهی امیرکبیر، چاپ اول، (۱۳۸۲).
- [۱۲] واهاک مارقوسیان، شیشه: ساختار، خواص و کاربرد. انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ دوم، (۱۳۸۶).
- [۱۳] مهدی محسنی، علیرضا میرحبیبی، حسین قصابی، تهیه پوشش مناسب برای مقاومت سیم‌پیچی شده نیکل-کروم و بررسی گرانروی و کشش سطحی آن، مجله علمی-پژوهشی مهندسی مواد و متالورژی- پذیرفته شده.
- [14] Rasch, E. Hinrichsen, F.W: Über eine Beziehung Zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Temperature. Z. Elektrochem. Vol. 14, pp 41-46, (1908).
- [15] Damrawia, G. El., Mansour, E., Electrical properties of lead borosilicate glasses, J. Physica B

- 364, pp190–198, (2005).
- [16] Forrest. J. S., The electrical properties of semi-conducting ceramic glazes, J. Sci. Instrum, Vol. 24, pp 211-217, (1947).
- [17] Extruded aluminum casings for protection of wire-wound power resistors, J. Materials & Design, Vol. 11, pp333, No. 6, (1990).
- [18] Scholze. H., "Glas" Natur, Struktur und Eigenschaften Springer Verlag, Berlin (1977).
- [19] David. R. Lide., CRC Handbook of Chemistry & Physics, Dielectric Strength of Insulating Materials, 84th Edition, (2003).
- [20] Mattox. D. M. and Robinson. J. H., Chemical durability of lead-oxide-based thick-film binder glasses, J. Am. Ceram. Soc, Vol. 80, No. 5, pp 1189–92, (1997).
- [21] Scholze. H., chemical durability of glasses, J. Non-Crystalline Solids, Vol. 52, pp 81–103, (1982). H. SCHOLZESCHOLZE