

Análisis microestructural y conductividad eléctrica del dieléctrico en conductor de Cu-Al modificado por envejecimiento artificial térmico

Francisco Hernandez^{a*}, Benjamín Vargas^a, Veronica Estrella^a, Miriam Aguilar^b, Nadxieli Palacios^a

^aTecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, División de Estudios de Posgrado, Av. Tecnológico S/N, Col. la Comunidad, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, México.

^bDepartamento de Materiales, Área de Ingeniería de Materiales, División de CBI, UAM – Azcapotzalco, Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Azcapotzalco, 02200, CDMX, México.

*ingfrancisco5354@yahoo.com

Resumen

Se evaluó el efecto del calor sobre el recubrimiento dieléctrico en conductor de Cu-Al con dimensiones de 10x10x1.58 mm mediante la conductividad eléctrica por el método de cuatro puntas y caracterización microestructural por medio de microscopias óptica y electrónica de barrido. Para analizar el efecto del calor, las probetas del material se envejecieron a 150, 200, 300 y 400°C por 24 h de forma continua. Se encontró que la conductividad mejoro con el aumento de la temperatura del envejecido, a pesar de que el dieléctrico evidentemente se degrado, es decir, con pérdida de la homogeneidad del recubrimiento conforme aumento la temperatura, lo cual podría relacionarse con el cambio microestructural de incremento en tamaño de grano alfa promedio como consecuencia del incremento en temperatura del envejecimiento acelerado. Los parámetros establecidos podrían mejorar la calidad del cobre para aplicaciones industriales.

Palabras clave: Conductividad eléctrica, aleación Cu-Al, envejecimiento artificial, recubrimiento dieléctrico, microestructura.

1. Introducción

El presente trabajo está dirigido al análisis del envejecimiento artificial del dieléctrico [1] en conductor de Cu-Al utilizado en motores eléctricos industriales [2]. Se analizó como afecto el envejecimiento térmico en la microestructura [3,4] y conductividad eléctrica [5] del dieléctrico, debido a que es la fuente principal de las perdidas eléctricas [6] por calor que presentan estos motores. Al mismo tiempo, reportan la degradación del dieléctrico en condiciones de temperatura que oscilan entre 150 a 400°C, y cómo influye en las pérdidas de la energía en los bobinados de los motores eléctricos. Este estudio esta enfocado a prevenir las condiciones de degradación y pérdidas, para así conservar la resistividad eléctrica del dieléctrico y prevenir los efectos nocivos del calor generado por altas temperaturas relacionadas con el envejecimiento del dieléctrico protector del bobinado. Lo anterior, reduciría la vida útil del motor en óptimas condiciones de trabajo establecida entre 15 a 20 años.

En el pasado, el valor de la eficiencia del motor reportada se consideraba de menor importancia. Actualmente, existe un interés científico y tecnológico profundo en la conservación de la energía en procesos sustentables. Por lo tanto, en la industria de los motores eléctricos se buscan alternativas adecuadas en el aumento de la eficiencia en la conducción eléctrica, para complementar los estándares existentes tales como IEEE 112-1996, IEC 334-2, IEC 34-2 y NOM-016-1997, para reducir la huella de carbono.

El objetivo de esta investigación fue caracterizar los cambios microestructurales y conductividad eléctrica del recubrimiento dieléctrico del conductor de Cu-Al después del envejecimiento isotérmico acelerado bajo los parámetros de trabajo reales (temperaturas considerables) que presentan los motores eléctricos industriales.

2. Parte experimental

2.1. Materiales

Se prepararon probetas de lámina de Cu-Al con uso eléctrico, mediante una limpieza con alcohol y agua destilada, seguida de la operación de sonicado por 10 min y finalmente, secado con gas Ar. Posteriormente, una serie de probetas fueron recubiertas con esmalte utilizado industrialmente. Estas probetas junto con otra serie de probetas testigo sin recubrimiento se envejecieron artificialmente bajo diferentes temperaturas durante 24 h, en mufla con control digital y enfriamiento al aire calmado, de acuerdo a la tabla 1.

Tabla 1. Temperaturas del envejecimiento artificial a las que se trataron las láminas de Cu-Al.

Probeta	Cu-Al-1	Cu-Al-2	Cu-Al-3	Cu-Al-4
	Temperatura del envejecimiento (°C)			
Testigo				
Recubrimiento superficial	150	200	300	400

2.2. Prueba de conductividad eléctrica

Esta prueba incluyó las mediciones dimensionales en láminas de conductor y limpieza superficial con alcohol. Una punta de la resistencia constante se soldó con Sn en láminas, así como dos cables de referencia para cada una de las terminales de canales del equipo y otro cable en cada extremo de la probeta que cierra el circuito, para utilizar los dos canales. Se midieron lecturas de voltaje a lo largo de probeta para asegurar que la sección transversal fuese uniforme.

Al ensamblar en paralelo el sistema de medición, se aplicó una corriente inicial para ajustar ambos equipos y minimizar fallas de medición. Una vez ajustado este sistema, se conectaron contactos limpios de sonda de borde de cuchilla asegurando un contacto firme contra la superficie en probeta. Con la fuente de alimentación de CC que proporcionó micro-corriente de 0.002 mA, se pulsó a cero, tanto el primer equipo conectado a la resistencia estándar, como el segundo conectado a la sonda de borde de cuchilla sobre cada probeta.

Posteriormente, se procedió a registrar las veinte lecturas de micro-voltaje obtenido mediante el método por resistividad de materiales de conductores eléctricos, considerando la pendiente formada por las lecturas de micro-voltaje en la resistencia testigo, así como en las probetas tratadas térmicamente a 150, 250, 300 y 400 °C. Los cálculos de conductividad se basaron en estándar NIST Technical Note 1531, 2004 [5].

2.3. Análisis estructural mediante microscopías óptica, electrónica de barrido y difracción de rayos X

Para la caracterización microestructural en probetas envejecidas y montadas en baquelita requirieron preparación metalográfica en base al estándar ASTM E3 [7], mediante el desbaste progresivo con agua y papel abrasivo de SiC con diferentes grados desde grueso hasta fino (120, 180, 240, 320, 400, 600, 1000, 1200, 1500 y 2000), seguido de pulido mediante paño húmedo conteniendo inicialmente pasta de diamante y posteriormente partículas de Al_2O_3 con diámetro de 0.05 μm suspendidas en agua, sobre disco giratorio adaptado a máquina pulidora. Adicionalmente, se realizó ataque químico sobre superficies pulidas utilizando reactivo HCl durante 4 s [8], aplicando agua para eliminarlo, limpieza con alcohol y secado con aire comprimido.

Finalmente, el análisis microestructural se realizó mediante microscopio óptico (MO) Carl Zeiss Axiovert 40 MAT conectado a computadora, para revelar las diferentes características microestructurales para cada condición de envejecido, generando una serie de micrografías digitales.

Las técnicas de caracterización de microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX) se utilizaron para generar el estudio morfológico y estructural del recubrimiento dieléctrico,

para las cuatro temperaturas del envejecimiento analizadas.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis visual del recubrimiento envejecido

Se evaluó el recubrimiento superficial sobre las láminas de Cu-Al tratadas con envejecimiento bajo diferentes temperaturas (150, 200, 300 y 400°C) durante 24 h, resultando que dieléctrico se degradó física (coloración diferente) y químicamente conforme se incrementó la temperatura del envejecimiento, tal como se observa en fotografías de tabla 2, en comparación con las probetas testigo bajo mismos envejecidos sin protección superficial.

Tabla 2. Macrografías de láminas testigo y con recubrimiento dieléctrico bajo diferentes temperaturas del envejecimiento.

Probeta	Temperatura del envejecido (°C)			
	150	200	300	400
Testigo				
Recubrimiento superficial				

3.2. Análisis microestructural mediante microscopía óptica en láminas envejecidas

Se analizó la microestructura de las probetas de lámina mediante diez micrografías para cada una de las cuatro temperaturas del envejecimiento, para determinar el tamaño de grano promedio de acuerdo al estándar ASTM E-112-96 [9]. Se observó que la microestructura fue compuesta por matriz de granos alfa con diferente orientación cristalográfica y tamaño de grano mixto, como se muestra en figura 1.

En figura 1a) se encontró un tamaño de grano promedio de 5.7 μm para la condición inicial. Para el envejecido a 150°C se observó un tamaño de 6.9 μm (figura 1b). Después del envejecido a 200°C, el grano fue de 7.1 μm (figura 1c), mientras que se encontraron granos de 8.3 μm con el envejecido a 300 °C, ver figura 1d). Finalmente, a 400 °C del envejecimiento, los granos alcanzaron un tamaño de 9.6 μm (figura 1e). Entonces, el cambio microestructural por efecto del calor consistió en que los granos alfa aumentaron de tamaño conforme incremento la temperatura del envejecido. Por lo tanto, el diámetro de grano promedio fue directamente proporcional a la temperatura del envejecido, tal como se aprecia con detalle en figura 1.

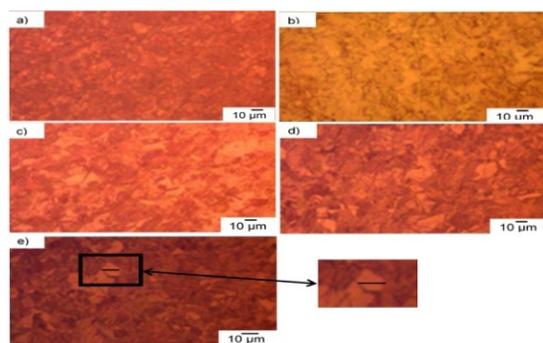
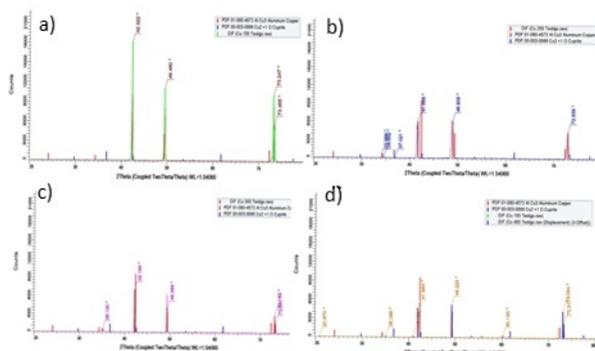


Figura 1. Micrografías obtenidas por microscopía óptica para muestras de lámina de Cu-Al envejecidas: a) granos de 5.7 μm para condición inicial, b) tamaño de grano de 6.9 μm a 150°C, c) granos de 7.1 μm para 200°C, d) tamaño de grano de 8.3 μm a 300 °C y e) granos de 9.6 μm con 400°C.

3.3. Difracción de rayos X del dieléctrico envejecido

Del análisis de los diferentes difractogramas para las cuatro temperaturas del envejecimiento artificial, se observó que los espectrogramas correspondieron con un ángulo de difracción similar de $2\theta = 42^\circ$. Además, la intensidad de las reflexiones permaneció constante a 9800 u.a., con excepción de la muestra envejecida a 400°C que registró aumento a 10500, como se muestra



en figura 2.

Figura 2. Difractogramas de probetas envejecidas con diferentes temperaturas: a) 150°C, b) 200°C, c) 300 °C, y d) 400 °C.

3.4. Análisis microestructural mediante MEB del recubrimiento envejecido

Con las observaciones del análisis morfológico del recubrimiento superficial del dieléctrico sobre las láminas de Cu-Al envejecidas térmicamente bajo cuatro diferentes temperaturas durante 24 h, se observó que el recubrimiento presento mayor grado de rugosidad superficial a 150 y 400°C, mientras que el envejecido a 200 y 300°C genero un recubrimiento con menor rugosidad. Lo anterior en comparación con las láminas testigo sin recubrimiento con superficie más rugosa para las cuatro temperaturas del envejecido. Por lo tanto, se confirmó la degradación del dieléctrico con el envejecimiento artificial, la cual fue directamente proporcional al aumento de la temperatura del

envejecimiento, como se observa en tabla 3.

Tabla 3. Análisis comparativo mediante MEB del recubrimiento dieléctrico envejecido a diferentes temperaturas.

Probeta	Temperatura de envejecimiento (°C)			
	150	200	300	400
Testigo				
Recubrimiento superficial				

3.5. Conductividad y resistencia eléctrica del recubrimiento envejecido

Los valores de la conductividad eléctrica del recubrimiento dieléctrico en función de las temperaturas del envejecimiento aplicado en las probetas de láminas (tabla 4) indicaron que la conductividad aumento con la temperatura del envejecido, alcanzando el mayor valor a 400°C, lo cual se asoció al cambio microestructural del aumento en el tamaño de grano alfa promedio.

Por otro lado, la resistencia eléctrica del dieléctrico dependiendo de la temperatura del envejecimiento artificial se presenta en tabla 4, donde se observa que la resistencia es inversamente proporcional a la temperatura, es decir, la resistividad disminuye con el incremento en temperatura de envejecido, resultando la menor resistencia a 400°C, lo cual se asoció con el mejoramiento de la conductividad en lámina de Cu-Al envejecida.

Finalmente, la resistencia eléctrica de probetas testigo disminuyo con el incremento de la temperatura del envejecido, así como fue menor que la generada en el recubrimiento, por lo que el recubrimiento podría proteger al conductor del incremento en temperatura de servicio del motor eléctrico.

Tabla 4. Valores de la resistencia y conductividad eléctrica en recubrimiento sobre láminas de Cu-Al después del envejecido.

Probeta	Temperatura del envejecimiento (°C)			
	150	250	300	400
Resistencia en testigo (Ω)	∞	11	2	2.25
Resistencia en recubrimiento (Ω)	74	33	11.6	8.55
Conductividad en recubrimiento ($\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$)	1.34×10^{-8}	3.03×10^{-2}	9.09×10^{-2}	1.16×10^{-1}

4. Conclusiones

La conductividad eléctrica del recubrimiento dieléctrico sobre láminas de Cu-Al envejecidas

artificialmente a 150, 200, 300 y 400°C por 24 h aumento notablemente con la temperatura, resultando la mayor conductividad a 400°C. Lo anterior, a pesar de que el recubrimiento fue dañado, es decir, deteriorado por el calor del envejecimiento, favoreciendo que su resistencia eléctrica disminuya gradualmente con la temperatura del envejecimiento, alcanzado la menor resistencia a 400°C.

Este comportamiento eléctrico del recubrimiento podría relacionarse con el cambio microestructural del incremento en el tamaño de grano promedio de la microestructura en lámina con el aumento en temperatura del envejecimiento, ya que se alcanzó un incremento del 68% en diámetro de grano a 400°C del envejecimiento.

5. Agradecimientos

Al técnico académico Francisco Alvarado Cesar del SEES Cinvestav-Zacatenco por el apoyo en las caracterizaciones XRD y MEB, y Técnico Miguel Luna por el soporte en pruebas de conductividad de cuatro puntas.

6. Referencias

1. Castro H. L. C. Diagnostico del aislamiento principal de bobinas estatoricas sometidas a esfuerzos termoeléctricos en laboratorios. Tesis de doctorado, Universidad del Valle, Cali Colombia, Abril 2015.
2. Manfredi, L.B.; Rodriguez, E. S. *Polymer*. 2006, 2, 255-261.
3. Ares, A. E.; Caram, R.; Schvezov, C.E. *Rev. Cienc Tec.* 2004, 6, 29-38
4. Montecinos, S. De Los A.; Cuniberti, A. M.; Romero, R. J.; Stipcich, M. F. *Springer J.* 2015, 11, 3994-4002
5. Janezic, M. D.; Kaiser, R. F.; Backer, J. NIST Technical Note 1531; *Mediciones de conductividad D.C. de metales*; National Institute of standards and technology. 2004; pp. 5-8
6. Mucsi, A. *Mater. Sci. Forum.* 2013, 729, 455-459
7. ASTM international. *ASTM E3, Standard guide for preparation of metallographic specimens*; ASTM international: USA, 2001; pp. 1-11.
8. ASTM international. *ASTM E407-07, Standard Practice for Microetching Metal and Alloys*; ASTM international: USA, 2015; pp. 14.
9. ASTM international. *ASTM E112- 96, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*; ASTM international: USA, 2004; pp. 8-12.