



Conciencia Tecnológica

ISSN: 1405-5597

Instituto Tecnológico de Aguascalientes

Dueñas-Araiza, Moises Eliud
Optimización de variables y su correspondiente efecto
sobre migración de soldadura en sensores de temperatura
Conciencia Tecnológica, núm. 66, 2023, Julio-Diciembre, pp. 49-57
Instituto Tecnológico de Aguascalientes

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94477589005>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Optimización de variables y su correspondiente efecto sobre migración de soldadura en sensores de temperatura

Variables optimization and its corresponding effect above solder migration in temperature sensors

Moises Eliud Dueñas-Araiza
Centro de Tecnología Avanzada, México
mduenasaraiza@hotmail.com

Recibido: 04 agosto 2023
Aceptado: 06 febrero 2024

Resumen:

Derivado de “La continua miniaturización e incremento de la densidad del voltaje en los dispositivos electrónicos” (De acuerdo con Huang Xingyi) (Xingyi Huang, Pingkai Jiang, & Yoshio Bando, 2012) ocurre la electromigración (EM), también denominada como termomigración (TM). Como lo define Limin: “movimiento masivo de átomos originado por la corriente eléctrica y portadores de carga, causando cambios microestructurales en la unión de soldadura y la capa de compuestos intermetálicos (IMC)” (Ma, Xu, Sun, Guo, & Wang, 2011).

Se investigaron las causas de la generación del fenómeno de EM en un sensor de temperatura que usa un termistor con coeficiente de temperatura negativo (NTC por sus siglas en inglés) para generar recomendaciones para el diseño de estos sensores. “El tiempo que toma para fallar es clasificado dependiendo si la humedad es visible (migración mojada), o no visible (migración húmeda). La migración mojada sucede en un corto periodo de tiempo, incluso en situaciones de bajo voltaje” (Joo Hyung & Sang-Dae, 2013). Una de las consideraciones del estudio es investigar la diferencia en este factor entre los epóxidos base agua y aceite tomando como principal consideración el tiempo de respuesta. El estándar ISO 26142 menciona “está definido como el intervalo, entre el tiempo al cuál ocurre una variación instantánea entre el aire caliente y el gas de prueba y el tiempo al cual la respuesta alcanza un porcentaje determinado de la señal establecida en el gas de prueba estándar” (ISO 26142:2010, 2010).

Palabras clave: Ingeniería y tecnología, tecnología de materiales, propiedades de los materiales.

Abstract:

As result of “The continuing miniaturization and increase of power density in electronic devices” (According to Huang Xingyi) electromigration (EM) occurs, also known as thermomigration (TM). As Limin defines: “mass transportation of atoms driven by electric current and charge carriers. It can cause microstructural changes in solder joint and intermetallic compound (IMC) layer” (Ma, Xu, Sun, Guo, & Wang, 2011).

Causes for the generation of EM phenomena has been studied in a temperature sensor that uses a negative temperature coefficient (NTC by its acronym) thermistor to generate recommendations for the sensor design. “The time it takes to fail is classified by whether moisture is visible (wet migration), or not visible (humid migration). Wet migration happens in a brief time, even in low voltage situations” (Joo Hyung & Sang-Dae, 2013). One of the considerations is to investigate the difference in this factor between the water and oil based taking as main consideration its response time. The standard ISO 26142 says “is defined as the interval, between the time to which occurs an instantaneous variation between the heat air and the test gas and the time to which the response reaches a determined percentage of the established signal in the standard test gas” (ISO 26142:2010, 2010).

Keywords: Engineering and technology, technology of materials, properties of materials.

Introducción

Un termistor es un dispositivo el cual es sensible a la temperatura y cambia su salida, regularmente resistencia, en relación con la temperatura aplicada. Hay diferentes tipos de termistores, para esta investigación una aplicación de Resistor de Coeficiente de Temperatura Negativo (NTC por sus siglas en inglés) es el objeto de estudio. NTC como otros tipos de termistores tienen cables soldados próximos al área sensitiva, en el caso de estudio, es soldadura de plata la cual puede migrar bajo ciertas condiciones catastróficas para este tipo de tecnología. Migración de soldadura es un fenómeno común en uniones de soldadura metálicas y ha sido estudiada en diferentes direcciones en el pasado.

Los sensores de temperatura en las aplicaciones industriales y automotrices, como se muestra en la Ilustración 1, comúnmente se componen de un termistor como elemento sensitivo el cual se encapsula dentro de una carcasa metálica para proteger el mismo del fluido que será medido y mejorar su compatibilidad.

Algunos materiales cerámicos son comúnmente usados para darle su funcionalidad al termistor al poseer propiedades resistivas que varían con la temperatura y por su facilidad de manejo, se usan mayoritariamente para aplicaciones de bajas temperaturas como es el caso de la aplicación que se estudió y del tipo de termistor NTC. La salida esperada se logra mediante el control de la densidad y dimensiones del elemento sensitivos y sumergiendo el elemento en el fluido donde se mide la temperatura.

La carcasa metálica del sensor contiene usualmente un químico base agua o aceite, denominado como epóxido, el cuál es curado para remover su contenido de agua y hacerlo sólido. Este epóxido es importante para la función del dispositivo ya que es el elemento para la transmisión de temperatura de la carcasa externa al termistor. Ver Ilustración 1.

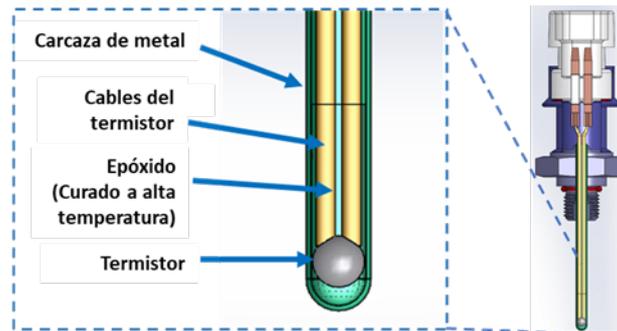


ILUSTRACIÓN 1

Esquema del área de medición de temperatura (corte cruzado).

La presente investigación está intencionada a estudiar el fenómeno de electromigración en la soldadura y optimizar las variables para crear un diseño robusto: ¿Es posible que el material, dimensiones y/o variables del ambiente generen o aceleren la electromigración en la soldadura?

Fundamentos teóricos

Varios materiales semiconductores pueden ser usados como elemento sensitivo en un termistor, luego la curva de respuesta Temperatura-Resistencia (RT) es ajustada, de acuerdo con Xiang, Hong, Ya, Jia y Zhicheng, por medio de “pequeños cambios en la presión parcial de oxígeno en procesos de sinterización o recocido” (Xiang, Hong, Ya, Jia, & Zhicheng, 2016).

Otro elemento importante de la construcción del sensor de temperatura es el epóxido el cuál se usa como conductor de temperatura y aislante eléctrico del elemento sensitivo para facilitar la absorción de temperatura hacia el área sensitiva y una lectura más exacta de la temperatura real en el fluido que se está midiendo.

Descrito por Pashayi: “Los compuestos conductores de temperatura (TCCs) son mezclas de aglutinantes conductores de temperatura incrustados en matrices poliméricas como el epóxido, polivinilpirrolidona, y silicón” (Pashayi, Fard, Lai, Iruvanti, & Plawsky, 2012).

“En general, aglutinantes de alta conductividad térmica incluyen aglutinantes de base carbono, aglutinantes metálicos, y aglutinantes cerámicos.” (Yinhang, Jang, & Soo-Jin, 2018). Como describe Hailin Mo et al. “A pesar de la alta conductividad térmica, los compuestos epóxidos generalmente ya no tienen las ventajas de la resina epóxido a granel, incluyendo la baja densidad, facilidad de procesamiento y excelentes propiedades térmicas y dieléctricas” (Mo, y otros, 2014).

La definición del material epóxido a usar en una aplicación obedece a una decisión de costo-beneficio donde usualmente se busca calibrar el sistema al uso del tiempo de respuesta más largo que no afecte el desempeño del sistema mismo y que tenga un costo viable.

De acuerdo con Thomas Hubert, et al. “una respuesta rápida al cambio de composición de gas es una de las características clave para la evaluación de la utilidad para la seguridad del sensor de hidrógeno” (Hubert, Majewski, Banach, Detjens, & Tiebe, 2017) (u otras aplicaciones como en este caso). Así mismo comenta que “el tiempo de respuesta es un término comúnmente usado para definir la rapidez de la respuesta de los sensores de gas la cual es relevante para muchas aplicaciones y por lo tanto un objeto de investigación contemporánea” (Hubert, Majewski, Banach, Detjens, & Tiebe, 2017).

Es importante para este proyecto de investigación, la migración de componentes de las uniones de soldadura de ambas placas para comprenderlas y como resultado optimizar los valores para obtener una mejor protección al fenómeno de migración. Chengchao declara en una revista: “La segregación de fase ha sido siempre observada en uniones de soldadura de estaño-plomo (Sn-Pb), indio-estaño (In-Sn), y estaño-bismuto (Sn-Bi) que están electro-migradas” (Chengchao, Xue, & Zhongmin, 2016).

Como menciona Limin en su estudio: “EM ha sido definido como el movimiento masivo de átomos originado por la corriente eléctrica y portadores de carga. Esto puede causar cambios microestructurales en la unión de soldadura ocasionados por el movimiento de la soldadura y la capa de compuestos intermetálicos (IMC). En aleaciones basadas en Sn-Ag-Cu (SAC), como el efecto de polaridad, nucleación vacía y propagación pueden ser inducidos por EM” (Ma, Xu, Sun, Guo, & Wang, 2011). En otro artículo de revista S. Schub, K. Weinberg y C. Hesch describen TM “cuando un gradiente de temperatura existe en un sólido y resulta en el flujo de átomos” (S., K., & C., 2018).

Este movimiento de iones causado por la EM puede generar dos efectos descritos por Luis Briceño en sus estudios.

Huecos: “Debido a la traslación de los átomos de metal se producen espacios que aumentan la resistencia del conductor, ocasionando la falla del dispositivo por corte de corriente” (Briceño Prado, 2022).

Acumulaciones: “El material que en unas zonas dejó huecos, en otras, va creando mayores áreas. Se aumenta la sección del conductor hasta el punto de juntarse con una pista adyacente y producir los cortocircuitos” (Briceño Prado, 2022).

Estas acumulaciones de material migrado que conectan dos polos eléctricos son también conocidas por su término en inglés “tin whiskers”, en español “bigotes de estaño”. Como mencionan Jing Chen et al. “Los bigotes de estaño (Sn) son generalmente cristales individuales de decenas a cientos de micras de largo y varias micras de diámetro. En un ambiente normal (temperatura ambiente, humedad media) pueden crecer espontáneamente de un acabado de estaño puro electroplateado sobre un marco de plomo de base cobre (Cu)” (Cheng, Vianco, Zhang, & M. Li, 201).

En el caso origen de esta investigación, los patrones metálicos vecinos se ponen en corto circuito por el fenómeno de acumulación, resultando finalmente en una falla. El fenómeno de EM ocurre en la presencia de los factores de calor, voltaje y humedad que juegan rol importante en la generación del ambiente físico para que el EM pueda ocurrir.

En la presencia de humedad, incluso con un menor calor y temperatura, es mayormente probable que la EM suceda dado que la humedad es un medio para que los componentes de la soldadura se muevan más fácilmente.

Como lo menciona Limin en su estudio: “Debido a los requerimientos por un desempeño más alto de los dispositivos portátiles, la dimensión del punto de soldadura continúa en decremento y la densidad de la corriente continúa aumentándose. Por consecuencia, los problemas de fiabilidad asociados con la electromigración (EM) en interconexiones de paquetes de microelectrónicos han captado más y más atenciones” (Ma, Xu, Sun, Guo, & Wang, 2011).

Materiales y métodos

Mediante un diagrama de árbol se compilaron las causas de falla para generar un fenómeno de migración de soldadura dentro de este dispositivo. Se definieron condiciones límite para descartar las posibles causas de falla descritas.

Factor 1: Humedad no sale de la cabeza del termistor durante el curado

Grupo “A”: Termistores sumergidos durante un fin de semana (Mojados)

Grupo “B”: Termistores horneados a 120C por 1 hora (Secos)

Factor 2: Humedad entra después del curado a través de la unión de soldadura o el sello elástico

Grupo 1: Sensores sin sello elástico

Grupo 2: Sensores con sello elástico dañado

Grupo 3: Sensores con sellador aplicado al conector

Factor 3: Humedad entra después del curado a través de las terminales

Grupo “1”: Sensores ensamblados con conector de la cavidad 1

Grupo “2”: Sensores ensamblados con conector de la cavidad 2

Grupo “3”: Sensores con sellado aplicado en las terminales del conector

Factor 4: Humedad se queda en el aire interno y luego se condensa; *Factor 5:* El calor nunca llega al material;

Factor 6: Cambio en la composición del químico

Grupo “A”: Sensores regulares (Con epóxido)

Grupo “B”: Sensores sin epóxido

Exploración adicional; *Factor 3:* Humedad entra después del curado a través de las terminales

Grupos “A” y “B”: Sensores expuestos a 40%RH (Dos grupos para extender la cantidad)

Grupo “C”: Sensores expuestos a 80%RH

Grupo “D”: Sensores expuestos a 60%RH

Exploración adicional; Factor 4: Humedad se queda en el aire interno y luego se condensa; *Factor 5:* El calor nunca llega al material; *Factor 6:* Cambio en la composición del químico.

Se construyeron 20 piezas y registraron sus pesos antes y después del proceso de curado regular para verificar la pérdida de masa en porcentaje tomando en cuenta la pérdida estándar medida de 0.004 gramos por el conector.

Con dichos datos se diseñaron subsecuentemente pruebas exploratorias para diferentes materiales y su desempeño en características funcionales.

Uso de epóxido alternativo de estructura similar base agua

Grupo “A”: Sensores sin epóxido dispensado

Grupo “B”: Sensores regulares dispensados con epóxido 865

Grupo “C”: Sensores dispensados con el epóxido alternativo 575N

Se pesaron las piezas previo y posterior al curado y ciclos de humedad para identificar si el epóxido se cura completamente o que tanto tiempo le toma para ser completamente curado a una temperatura de 150°C y verificar si éste reabsorbe humedad al ser expuesto a condición de 80% de humedad relativa (RH por sus siglas en inglés) y 80°C.

Uso de epóxido alternativo de estructura diferente base aceite

Se seleccionó material y estructura diferentes Dow Corning 3-1818 así como muestras de control para realizar comparaciones, y se sometieron a diferentes condiciones de prueba.

Resistencia a absorber humedad. 15 muestras dispensadas de cada grupo sometidas a proceso de curado requerido posteriormente sometidas a proceso de humedad de 85%RH y 40C por 4 horas, se registraron las diferencias en peso.

Tiempo de respuesta en medio constante. 30 muestras construidas en sensores de cada grupo sumergidas en una tina de aceite sin presión, se registró tiempo de respuesta por método T63.

Tiempo de respuesta en medio oscilante (turbulencia de aire). 30 muestras construidas en sensores de cada grupo a flujo de aire con velocidad a velocidades de 9m/s, 11m/s y 13 m/s, en alta temperatura, se registró tiempo de respuesta por método T63 y con las diferentes temperaturas se realizaron extrapolaciones de los datos.

Resultados y discusión

La única variable mediante la cual se presentaron fallas por EM fue mediante la reabsorción por las terminales, el sello elástico fue descartado al no presentar fallas como se muestra en la Tabla 1.

Así mismo se logró recrear la falla en las piezas mediante un proceso de exposición a humedad 85% RH y 45C y prueba funcional para verificar la caída en la respuesta de resistencia del sensor característica de la migración de soldadura en este tipo de sensor..

En pruebas realizadas se observó una diferencia significativa en la reabsorción de humedad mediante las pruebas de peso, donde el material epóxido base aceite no presenta reabsorción de humedad, comprobando su naturaleza hidrofóbica sobre la naturaleza higroscópica del epóxido base agua.

Tiempo de respuesta en medio constante (tinas de aceite)

En la Ilustración 2 para ambos grupos se observan las distribuciones sobrepuestas pero sus medias siendo estadísticamente diferentes al aceptar la hipótesis de la prueba “t” de que las medias son diferentes entre sí. En este caso siendo 0.8 segundos más para el grupo “B” del epóxido 3-1818. A pesar de que los grupos tienen cierto traslape en su tiempo de respuesta existe aún la diferencia la cual puede ser entendida debido a la diferencia en la composición química y naturaleza de esta, agua contra aceite respectivamente.

TABLA 1
Resultados con pruebas con peores condiciones.

Grupo	Factor	Conector (paloma significa sellado)	Soldadura	Sello elástico	Falla SI/NO?
1	2	✓	✓	✗	NO
2	2	✓	✓	✗ Peor que grupo 1	NO
1	3	✗	✓	✓	SI
2	3	✗	✓	✓	SI
3	Ambos	✓	✓	✓	NO

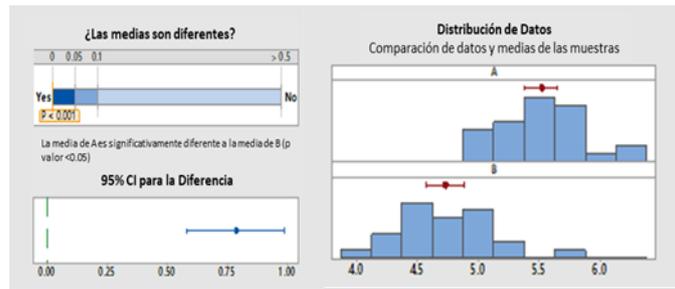


ILUSTRACIÓN 2
 Prueba de tiempo de respuesta en medio constante.

Tiempo de respuesta en medio oscilante (turbulencia de aire)

De acuerdo con la Ilustración 3, el tiempo de respuesta en el grupo “D” material base aceite fue más lento que el grupo de control con alrededor de 1 segundo de diferencia entre ellos.

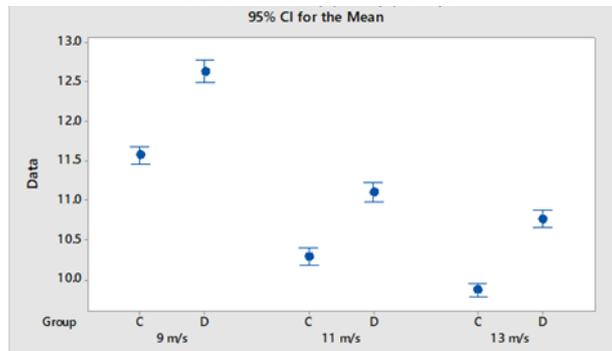


ILUSTRACIÓN 3
 Gráfica de intervalos de tiempo de respuesta a diferentes velocidades.

Adicionalmente se considera la posibilidad de que se haya tenido un flujo laminar a 6 m/s en las pruebas originales donde se definió la especificación del sensor y que a 9 m/s se tenga ya un flujo turbulento y por ello se haya obtenido un tiempo de respuesta más lento en las nuevas pruebas. La desviación estándar también es mayor en los grupos de prueba, susceptible a mejorarse al optimizar el proceso debido a que en esta prueba se cubrió un rango más largo que el esperado a nivel de producción.

De acuerdo con las correlaciones estadísticas mostradas en la Ilustración 4 con la velocidad del fluido, el peso de epóxido tiene una correlación significativa teniendo un valor cercano “P” cercano o menor a 0.5. Se realizó el cálculo del peso ideal necesario en el epóxido y su factibilidad, partiendo de la definición de las distancias mínimas y máximas a cubrir por el material y su relación con el peso en ambiente controlado de dispensado y con tolerancia de proceso normal en el equipo de dispensado.

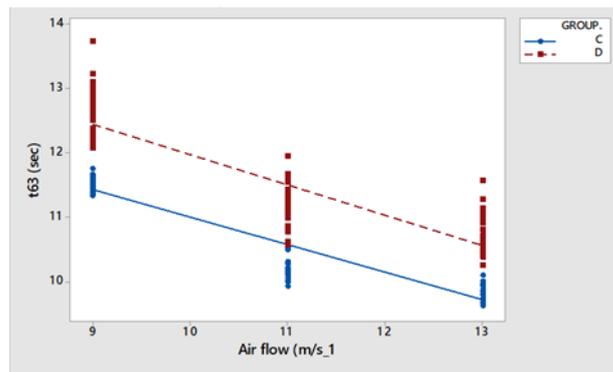


ILUSTRACIÓN 4

Gráfico de dispersión de tiempo de respuesta vs flujo de aire.

Con base en los resultados mostrados en la Tabla 2 se confirma que a pesar de que al reducir la cantidad de material dispensado y tener una respuesta más rápida que los resultados iniciales aún no se puede obtener el desempeño de las piezas con el material actual. La mejor tolerancia que se puede realizar para el peso del material dispensado es de 0.04 a 0.01 considerando la variación natural del proceso de dispensado actual con materiales similares, resultando en un tiempo de respuesta de 0.8 segundos más lento que el actual epóxido a 9m/s con una dispersión similar.

Aunque se encontró una diferencia de 1.0 segundos en el tiempo de respuesta entre grupos es posible reducir la diferencia de las piezas con epóxido 3-1818, el peso mínimo funcional de material dispensado en el sensor es el que asegure cubrir el área del termistor, con base en los datos se concluye que en esta aplicación en específico se puede reducir como mínimo a una diferencia de 0.8 segundos.

TABLA 2

Cálculo de peso requerido en el grupo D para obtener el tiempo de respuesta del grupo de control.

	9 m/s	11 m/s	13 m/s
m	9.476	5.441	5.117
B	11.73	10.57	10.27
Media Grupo C	11.573	10.286	9.8673
Desviación Std Grupo C	0.287	0.303	0.2332
Desviación Std Grupo D	0.317	0.304	0.263
Media Grupo D	12.616	11.08	10.745
Peso requerido en el grupo D para llegar a la media del grupo C	-0.01657	-0.0522	-0.0787
@0.04	12.10904	10.78764	10.47468
@0.07	12.39332	10.95087	10.62819
@0.1	12.6776	11.1141	10.7817

En cuanto a la desviación estándar se tuvo resultados similares teniendo una pequeña diferencia en el grupo con material Dow Corning 3-1818 misma que se puede mejorar y obtener una desviación estándar considerablemente menor al controlar el proceso de dispensado.

Conclusiones

Se extienden las siguientes recomendaciones para el diseño de sensores de temperatura con termistor NTC y la selección de materiales adecuada para evitar el fenómeno de EM. Cabe mencionar que una selección temprana de componentes y materiales en el diseño puede hacer más fácil adaptar un tiempo de respuesta más lento con una apropiada calibración del sistema que lo usará.

1. Es importante entender las características de la aplicación en su tipo de flujo del fluido que pueden ser laminar u oscilante para la selección del NTC adecuado dado que el desempeño del sensor es diferente.

2. De ser posible usar algún conector y un diseño encapsulados para evitar cualquier ingreso potencial de humedad lo que abriría la posibilidad de usar cualquier NTC que se ajuste a la respuesta deseada. Cabe mencionar que es común el uso de conectores de plástico sobre moldeado sobre sus terminales metálicas debido a costo y compatibilidad con las aplicaciones, se sugiere explorar el uso de conectores metálicos con encapsulamiento de vidrio para su aislamiento eléctrico con las terminales. Esta solución debe conjuntarse con el uso de un sello hermético que puede ser mediante soldado y sellos elásticos para evitar el ingreso de humedad por cualquier área del sensor.

3. En caso de no ser factible la recomendación 2 y usar un conector no hermético se recomienda explorar el uso de un aislante que selle las áreas no herméticas del mismo como las terminales como puede ser algún silicón o fluido de curado apropiado que se adapte a la aplicación final y su uso, se debe considerar el espacio para el dispensado y el diseño dimensional del conector y procesos para adaptar dicha característica al sensor.

4. En caso de no ser factible la recomendación 3, se sugiere el uso de epóxidos base aceite que muestran una propiedad hidrofóbica (no absorben agua) para la superficie que rodea a las uniones de soldadura y el NTC sobre los componentes base agua debido a la propiedad higroscópica (absorben agua) de éstos, ésta puede ser una opción más viable en cuanto a costo que las anteriores, pero usualmente arrojaría un tiempo de respuesta más diferenciado de los epóxidos base agua.

5. En caso de no ser factible la recomendación 4, se sugiere usar termistores herméticos por ejemplo de encapsulamiento de fibra de vidrio para proteger su área sensitiva de cualquier fenómeno de humedad, aun cuando éstos pueden presentar tiempos de respuesta más lentos que los termistores con encapsulamientos no herméticos.

6. En caso de no ser factible la recomendación 5, se sugiere estudiar las variables que puedan causar una exposición a humedad del sensor en transporte y almacenaje y usar un empaque hermético o con uso de elementos como bolsas disecantes que puedan reducir la experiencia de exposición a humedad de los sensores. Cabe mencionar que el control de las variables de humedad a las que se puede exponer el sensor previo a su instalación y sellado suelen ser difíciles de controlar o factores de ruido que son meramente ambientales no susceptibles a control.

7. Para el diseño del proceso de dispensado es importante considerar la dispersión que éste arroje a las partes y agregar dicha variable en las pruebas de validación de producto iniciales y en aplicación final dado que es una característica crítica en el tiempo de respuesta final del sensor.

Para el rediseño de componentes con problemas de EM en su aplicación igualmente se sugiere revisar el listado de recomendaciones en el orden mostrado, sin embargo, es probable que las recomendaciones iniciales no sean factibles al implicar cambios mayores a diseño que afectan también a la aplicación en especial al modificar las dimensiones del sensor o su tiempo de respuesta.

Adicionalmente, como seguimiento a esta tesis de maestría se recomienda estudiar la ventana de velocidad de flujo oscilante para la prueba de tiempo de respuesta de 0 m/s a 9 m/s para entender en qué punto se cambia de un flujo laminar a oscilante a la vez de entender si este cambia entre los diferentes materiales ya sea por su naturaleza o composición individual de cada uno de ellos. Así mismo se identifica la prueba de exposición a temperatura y monitoreo como efectiva para la detección de piezas con humedad presente, es importante

denotar que la salida de las piezas puede ser intermitente por lo que es importante la lectura por un tiempo significativo.

Referencias

- Briceño Prado, L. (2022). Viabilidad técnico económica del uso de las celdas peltier en la climatización de tableros eléctricos para prolongar la vida útil de la aparamenta eléctrica. Modelamiento y Simulación de Sistemas Electromecánicos.
- Cheng, J., Vianco, P., Zhang, B., & M. Li, J. (201). Nucleation and grown of tin whiskers. Materials Science Program (98).
- Chengchao, D., Xue, W., & Zhongmin, L. (2016). Generation of near eutectic phase layer in Sn-15Bi solder joint during electro-migration.
- Hubert, T., Majewski, J., Banach, U., Detjens, M., & Tiebe, C. (2017). Response time measurement of hydrogen sensors. ISO 26142:2010. (2010). Hydrogen detection apparatus - Stationary applications.
- Joo Hyung, K., & Sang-Dae, P. (2013). Acceleration of applied voltage on metallic ion migration of wires in NTC thermistor temperature sensors. 28(252–263).
- Ma, L., Xu, G., Sun, J., Guo, F., & Wang, X. (2011). Effects of Co additions on electromigration behaviors in Sn–3.0 Ag–0.5 Cu-based solder joint. J Mater Sci(46).
- Mo, H., Huang, X., Liu, F., Yang, K., Li, S., & Jiang, P. (2014). Nanostructured electrical insulating epoxy thermosets with high thermal conductivity, high thermal stability, high glass transition temperatures and excellent dielectric properties. 22(2).
- Pashayi, K., Fard, H. R., Lai, F., Iruvanti, S., & Plawsky, J. (2012). High thermal conductivity epoxy-silver composites based on selfconstructed nanostructured metallic networks. 111(10).
- S., S., K., W., & C., H. (2018). Thermomigration in SnPb solders: Material model.
- Xiang, S., Hong, Z., Ya, L., Jia, G., & Zhicheng, L. (2016). Characterization of new negative temperature coefficient thermistors based on Zn–Ni–O system. 5 (4)(329–336).
- Xingyi Huang, C. Z., Pingkai Jiang, D. G., & Yoshio Bando, T. T. (2012). Polyhedral Oligosilsesquioxane-Modified Boron Nitride. 23(14).
- Yinhang, Z., Jang, R., & Soo-Jin, P. (2018). Interlayer polymerization in amine-terminated macromolecular chain-grafted expanded graphite for fabricating highly thermal conductive and physically strong thermoset composites for thermal management applications. 109: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing(4).