

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“Optimización del proceso de metalización entre alambre de
cobre y tablero impreso PCB ENEPIG Thin Nickel”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA**

PRESENTA
José Ibarra González

DIRECTOR
Dr. Francisco David Mateos Anzaldo

CODIRECTOR
Dr. Nicola Radnev Nedev

Mexicali, Baja California, México

Septiembre de 2020

A Martha Paola

Valentina

José Emilio

Mi Madre

Pilares de mi perseverancia

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme estar sano y disfrutar este momento tan especial donde me enriquecí del mundo de la ciencia y la investigación.

A mis padres por todo lo que aportaron a mi vida, las enseñanzas, su humildad, dignidad y perseverancia es lo que me mueve y lo hago suyo ya que sin ustedes no hubiera sido posible.

A mi esposa Paola y a mis hijos Valentina y José Emilio, por el apoyo y comprensión de las ocasiones que no pude estar con ustedes por atender mis compromisos escolares.

De manera especial a mis directores que tuvieron la paciencia y le dieron seguimiento desde el inicio a esta aventura que ahora estamos concluyendo, mis sinceros agradecimientos para Dr. David Mateos y Dr. Nicola Radnev Nedev.

A la UABC por proporcionar los medios para la realización de este posgrado, en especial al Instituto de Ingeniería por permitirme aprender y realizar prácticas en sus laboratorios y obtener muestras ópticas que fueron claves para mi proyecto.

A la empresa, que me dio el soporte económico y me permitió tener horarios flexibles para asistir a clases y poder lograr el objetivo del proyecto de investigación, en especial a Víctor Rodríguez, Juan Carlos Corona, Andrés Corona y Francisco Del Ángel.

Al personal de la compañía de wirebond por brindarme información y soporte que fueron clave para entender el comportamiento de los equipos relacionados directamente con el proyecto y poder lograr el objetivo, en especial a Chris Morrison, Cheol Ang Yeon y Enrique Salazar.

Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Estado de arte.....	6
1.3	Justificación.....	7
1.4	Hipótesis	9
1.5	Objetivo general.....	9
1.6	Objetivos específicos	10
2	Marco Teórico.....	11
2.1	Procesos de Wirebond en la industria	11
2.2	Fenómeno de oxidación	17
2.3	Formación de FAB (Free Air Ball).....	18
2.4	Fenómeno de splash.....	19
3	Materiales y métodos.....	21
3.1	Materiales	21
3.1.1	Alambre de cobre	21
3.1.2	Dados de GaAs.....	21
3.1.3	Dados de Si	22
3.2	Equipos de soldado de cobre para la industria.....	23
3.3	Equipo utilizado en el proyecto	24
3.4	Selección del capilar	25
3.5	Alineación del transductor	28
3.6	Calibración de fuerza en soldado	29
3.7	Instalación del flowhead (cámara de zona inerte).....	31
3.8	Calibración de OBPF (On Bonder Personality Value)	34
3.9	Parámetros del proceso de Wirebond.....	34
3.9.1	Energía ultrasónica (USG)	34
3.9.2	Electronic Flame Off (EFO).....	37
3.9.3	Movimientos de scrub	38
3.9.4	Fuerza de soldado.....	38
3.9.5	Temperatura y tiempo.....	39

3.9.6	Optimización de parámetros de soldado	39
4	Diseño de Experimentos	42
4.1	Experimento de Bumps en el tablero.	42
4.2	Experimento para analizar la afectación en la formación y corte del Bump con respecto a la energía aplicada al FAB.	43
4.3	Experimento para evaluar el capilar de aluminio zirconio rubí.....	43
4.4	Experimento para medir la estabilidad en diferentes cortes de Bump.....	44
4.4.1	Single Smooth.....	45
4.4.2	Tail Tear.....	45
4.4.3	Double Smooth	45
4.4.4	Double Smooth en dirección del alambre.....	45
4.4.5	Double Smooth en dirección del eje X.....	45
4.5	Experimento de tiempo de soldado de Bump.....	46
4.6	Experimento de temperatura de soldado.....	46
4.7	Experimento de aplicación de MTMV (por sus siglas en inglés machine to machine variation)	46
4.8	Experimento para incrementar el factor de integración.....	46
4.9	Experimento por evento de Pad Peeling (Parámetros de soldado)	47
4.10	Experimento de condición del alambre.....	49
4.11	Experimento de condición del flowhead	50
4.12	Experimento de condición del transductor	50
5	Resultados y discusiones.....	51
5.1	Experimento de Bumps en el tablero.	51
5.2	Experimento para analizar la afectación en la formación y corte del Bump con respecto a la energía aplicada al FAB.	51
5.3	Experimento para evaluar el capilar de aluminio zirconio rubí.....	53
5.4	Experimento en cortes de Bump.....	55
5.4.1	Single Smooth.....	55
5.4.2	Tail Tear.....	56
5.4.3	Double Smooth	56
5.4.4	Experimento Double Smooth en dirección del alambre	57
5.4.5	Experimento Double Smooth en dirección del alambre cortando el Bump solo en el eje X	58

5.5	Experimento de tiempo de soldado de Bump	59
5.6	Experimento de temperatura de soldado.....	60
5.7	Experimento de aplicación de MTMV.....	62
5.8	Experimento para incrementar el factor de integración.....	70
5.9	Experimento por evento de Pad Peeling (Parámetros de soldado)	71
5.9.1	Optimización de receta para incrementar el FAB.....	73
5.10	Experimento de condición del alambre	76
5.11	Experimento de condición del flowhead	78
5.12	Experimento de condición del transductor	80
5.13	Resultados de Yield hasta diciembre del 2019.....	84
6	Conclusiones y trabajo futuro.....	85
6.1	Conclusiones.....	85
6.2	Trabajo futuro.....	87
	Referencias Bibliográficas	88

1. Introducción

1.1 Antecedentes

México se encuentra en el mapa mundial de los productores de circuitos integrados. La evolución de esta tecnología, basada en la miniaturización de circuitos de alta integración y en el aumento en su velocidad de trabajo, implica que las empresas electrónicas mexicanas requieran de especialistas en los procesos de diseño y creación de circuitos integrados, que contribuyan a consolidar el clúster (conjunto de industrias que trabajan en un mismo sector para obtener beneficios comunes) de la industria electrónica. Es importante señalar, que el mayor número de empresas del ramo electrónico en México están localizadas en Baja California, Guadalajara y Puebla [1], en donde cada vez más empresas están dedicadas a la electrónica, incorporando áreas de desarrollo de productos electrónicos con valor agregado para poder competir con empresas asentadas en países asiáticos. Esto implica la demanda de recursos humanos expertos en diseño para poder satisfacer las necesidades de la industria regional en el corto y mediano plazos.

La formación de expertos en diseño por universidades ubicadas en estas regiones del país se convierte en una necesidad que, al ser atendida, puede provocar la llegada de más empresas de semiconductores, ya no de maquila sino de diseño, con un efecto positivo que se vería reflejado en el fortalecimiento del campo electrónico y la generación de empleos en el país a largo plazo.

En la figura 1 se muestran los principales procesos de la planta de ensamble de una empresa de la región.

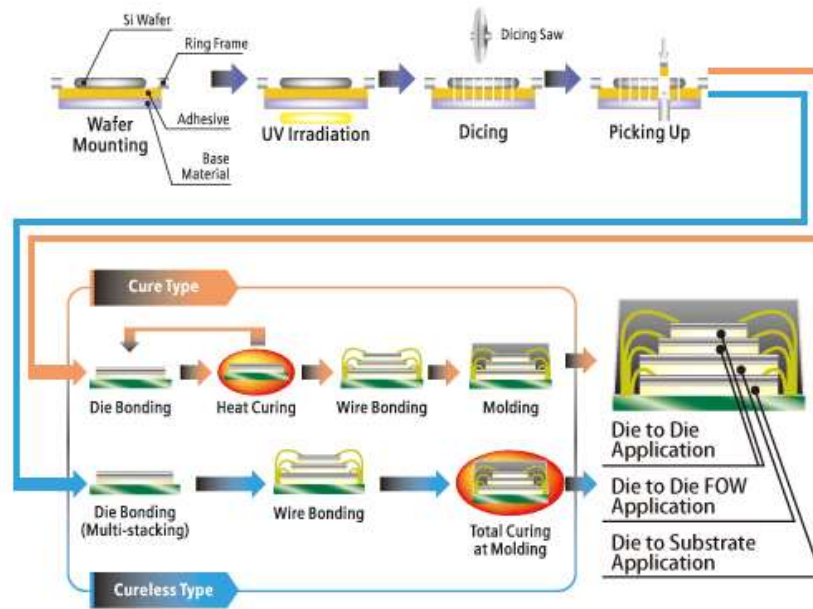


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de ensamblado. [2]

En la figura 2 y 3 se muestra a detalle el proceso básico de alambrado de los dados donde enfocaremos nuestro proyecto de investigación. El método por termo compresión o cabeza de clavo es el más utilizado para formar una conexión eléctrica entre el dado y el tablero, fue originalmente usado con oro, utilizando alambre con diámetros de 17 μm a 75 μm a una temperatura de 150 $^{\circ}\text{C}$ a 200 $^{\circ}\text{C}$ [4], pero debido al incremento del precio del Au, desde el año 2008 la industria semiconductora está considerando como sus principales sustitutos al cobre y plata por su similitud en propiedades eléctricas y mecánicas [3,4].

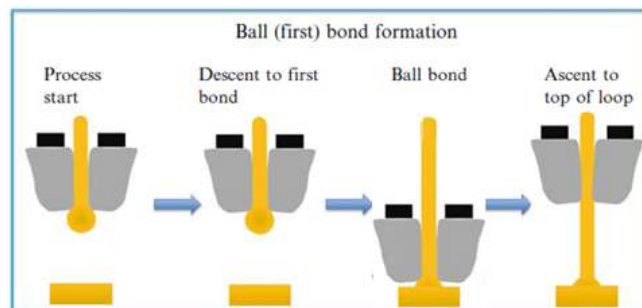


Figura 2. Primer punto de soldado. [3]

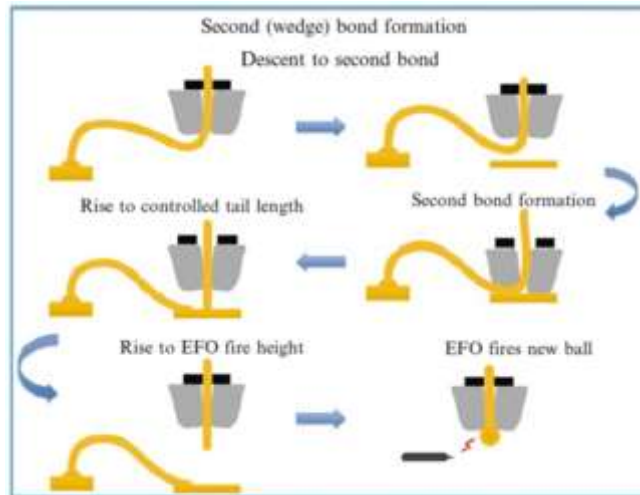


Figura 3. Segundo punto de soldado. [3]

El diagrama esquemático de la figura 2 se observa como la herramienta llamada capilar, se dirige hacia abajo para formar el primer punto de soldado donde el FAB (por sus siglas en inglés Free Air Ball) a base de energía ultrasónica, fuerza, movimientos de scrub (movimientos de servomotores X, Y, Z) y temperatura, pasará a formar algo llamado bola sobre la terminal del circuito integrado de arseniuro de galio o silicio, posteriormente en el esquemático de la figura 3, se forma el Loop a base de parámetros y perfiles dependiendo de la forma, altura y cantidad de alambre utilizado. Adicionalmente, se muestra que para terminar con la conexión el equipo forma algo llamado stitch, el cual es de vital importancia para el alambre que está finalizado, y a su vez, para el inicio de uno nuevo, ya que posteriormente se formará algo llamado tail (cola de alambre), el cual dependerá en gran medida de la buena calidad del stitch.

La mayor parte de la investigación se enfocará en el proceso de alambrado mostrado en la fig. 3, la cual ilustra un metalización entre un dado y un tablero, en nuestro caso utilizaremos el tablero ENEPIG (Electroless Nickel / Electroless Palladium / Immersion Gold) Thin Nickel, los espesores de níquel en estos tableros oscilan entre los 0.2 μm - 0.5 μm , cabe mencionar que los espesores de níquel anteriormente estaban entre 2 – 5 μm , pero fueron reducidos con el fin de encontrar

una mejor respuesta eléctrica del circuito integrado [2]. Esto representa un reto para la metalización en las delgadas capas de níquel para el proceso de alambrado, ya que tenemos que formar un soldado que supere los 4 gr de pruebas de jalón (pull test) con un alambre de 20 μm de espesor. En la figura 4 se muestra el proceso de jalón [2,3].

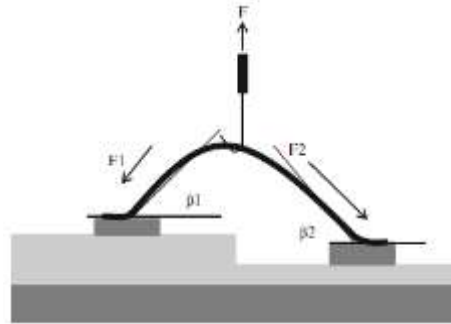


Figura 4. Prueba destructiva de pull test. [3]

El aumento en el precio de los metales, está moviendo la industria de los semiconductores a cambiar el metal de oro a cobre. Como observamos en la figura 5 el costo de onza de cobre contra oro representa 0.17 % del valor, lo que nos indica un ahorro en el gasto del material utilizado para realizar las interconexiones.



Figura 5. Comparativo de precio de oro y cobre. [5]

Como observamos en la figura 6, para la industria está resultando atractivo el utilizar cobre como metal para las interconexiones, dada la demanda de equipos con dichas características.

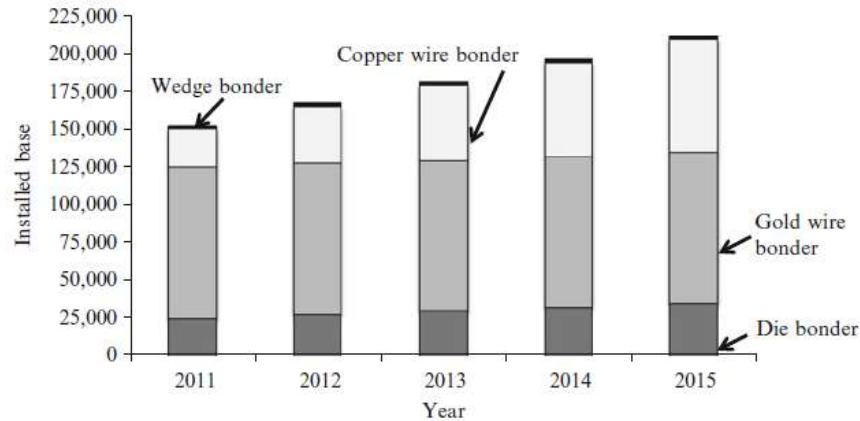


Figura 6. Equipos instalados de ensamble. [3]

Las propiedades mecánicas de los metales utilizados como alambre de interconexión se muestran en la tabla 1.

Property	Au	Cu	Ag
Thermal conductivity (W/mK)	320	400	430
Electrical resistivity (Ω m)	2.20	1.72	1.63
Young's modulus (GPa)	60	130	82.50
Poisson's ratio	0.44	0.34	0.364
Yield stress (MPa)	32.70	200	45.50
Coefficient of thermal expansion (ppm/ $^{\circ}$ C)	14.40	16.50	18.90
Vicker's hardness (MPa)	216	369	251

Tabla 1. Propiedades de los materiales Au, Cu y Ag. [3]

Podemos observar fácilmente un mejor nivel de conductividad térmica y eléctrica del cobre comparada con la del oro, más sin embargo las propiedades de dureza son mayores y las de cociente de Poisson son menores, lo cual representará un reto para realizar la metalización en el tablero ENEPIG thin nickel, ya que por la dureza se generará estrés en una pequeña área de la superficie y dado el cociente de Poisson perderemos fácilmente los lazos entre las conexiones [3].

1.2 Estado de arte

El proceso de wirebond, fue comúnmente el medio de interconexión a base de oro más empleado alrededor del mundo desde 1950, utilizando compresión y aplicación de calor y fuerza, sin embargo esto no fue suficiente para formar uniones más confiables en términos de óxido, esto trajo consigo el surgimiento del método de unión termosónico en 1960 que incorpora la energía ultrasónica. Por décadas se ha incrementado la confiabilidad del empaquetamiento de los dispositivos, al mismo tiempo se han sumado los esfuerzos por hacer los productos a más bajo costo y al alcance de todas las personas.

En general el proceso unión de alambre de cobre es similar al proceso de unión de alambre de oro, se puede utilizar el mismo equipo solo con actualizaciones de hardware y software, en lugar de oro, se reemplaza por cobre dependiendo del diámetro del alambre desde 15-50 μm . El alambre de cobre presenta bastantes ventajas sobre el oro, un mejor desempeño del dispositivo en términos de conductividad térmica y eléctrica, una mejor confiabilidad debido al lento crecimiento intermetálico que causa defectos, así como también un alto nivel de pull test, debido a que el cobre maneja una carga de ruptura mayor.

Uno de los mayores inconvenientes al utilizar alambre de cobre es que se presenta el fenómeno de oxidación, que puede ocasionar la pérdida de confiabilidad e integridad dentro del circuito encapsulado, como sabemos la oxidación retrasa la deformación de la bola en la terminal de unión ya sea en el circuito integrado o en la terminal del tablero, al igual se han presentado bastantes avances en los alambres de cobre, así como en las terminales de los lead frame y los de sustrato para complementar la utilización de cobre, también la utilización de forming gas (95% nitrógeno y 5% de hidrógeno) para un proceso libre de óxido durante la formación del FAB y la formación del stitch.

Hoy en día todos los equipos automáticos de wirebond para aplicaciones de cobre están equipados con sistema de EFO (Electronic Fire Off). Así como también, el alambre de cobre con recubrimiento de paladio es una opción para retardar la oxidación.

Otro de los avances, son las mejoras en el software que vienen integrados en los nuevos equipos de alambre de cobre para mejorar la adherencia de la bola en las terminales al generar menos splash, y la programación de segmentos con diferentes características para la formación del stitch.

Un uso especial de capilares con acabado rugoso para un mejor agarre del capilar sobre el alambre reduciendo los short tail (falla en la extensión de alambre), siendo este, uno de los principales paros de equipo durante el proceso de formación del stitch.

1.3 Justificación

Desde la introducción del tablero ENEPIG thin nickel, el proceso de alambrado de cobre ha presentado un impacto negativo en el nivel de rendimiento (Yield) de 99.55 % a 99.45 %, esto se debe principalmente a la reducción de capa de níquel en el tablero donde es montado el circuito integrado, la dureza del alambre de cobre y el control en la formación de FAB por el fenómeno de oxidación. En la tabla 2 se muestra una comparación entre el tablero de níquel y el tablero de capas delgadas de níquel.

Características	Normal Ni	Thin Ni
Espesor μm	3	0.2
Yield prueba electrica	Bajo	Alto
Duracion de plasma hrs	6	2
Rugosidad	Baja	Alta
Resistivida delectrica	Alta	Baja
Impacto stitch gr.	70	50
Dureza	Alta	Baja
Precio del PCB	Alto	Bajo

Tabla 2. Características del los tableros nickel y thin nickel. [2]

Como podemos observar en la figura 7 se muestra un comparativo del nickel en su versión normal (a) y thin nickel (b), una conexión presenta alambre sin aleación metálica y otro de ellos con pobre metalización, este es un ejemplo muy práctico del efecto de utilizar delgadas capas de níquel y combinado con un material con propiedades de dureza elevadas como el cobre. En la figura 7(b) se observa un alambre levantado y un comportamiento llamado fish tail en el stitch [1].

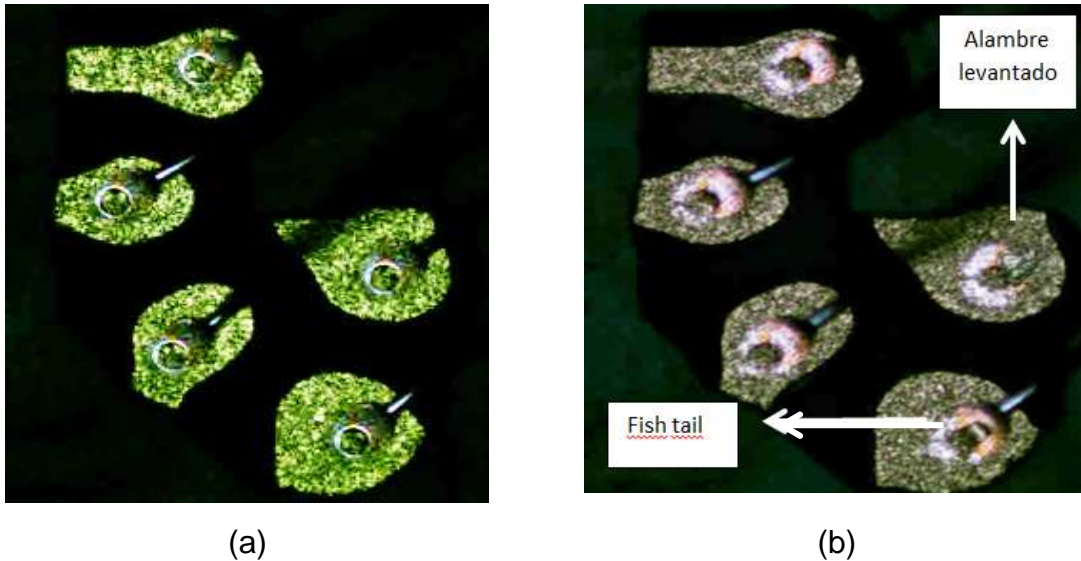


Figura 7. Comparación entre nickel normal (a) y thin nickel (b). [2]

En la figura 8 se muestran las mediciones de los espesores correspondientes al tablero PCB (por sus siglas en inglés Printed Circuit Board) de thin nickel.

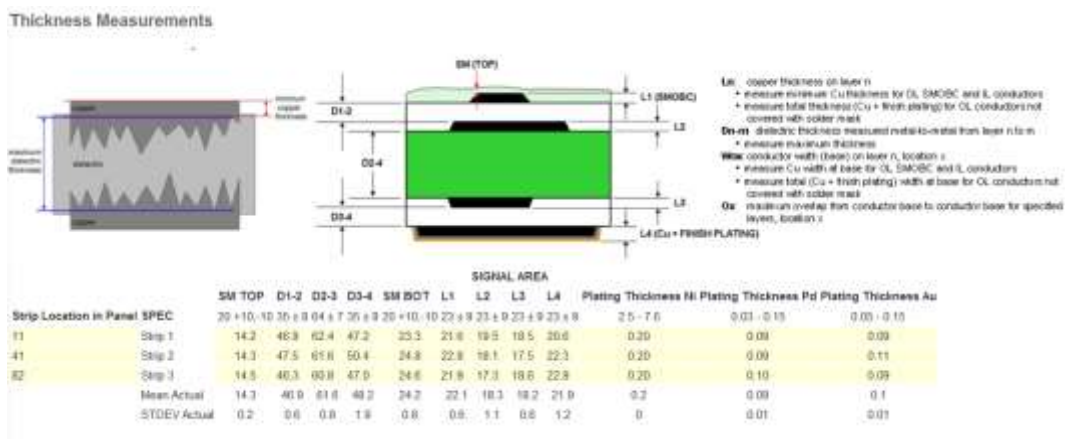


Figura 8. Comparativo de espesores entre nickel normal y thin nickel. [2]

Se pretende buscar alternativas con el proceso que lleven a mejorar el rendimiento del proceso de alambrado, esto representa un reto para el departamento ya que esta estrategia de utilizar delgadas capas de níquel con procesos de alambrado en cobre representa un alto nivel de eficiencia de nuestros equipos así como la optimización de los procesos debido al estrecho margen entre poder realizar buenas metalizaciones o no hacerlas, de lograrlo esto será considerada como una ventaja competitiva en la industria de los semiconductores.

1.4 Hipótesis

Se espera que agregando un soporte metálico (Bump) a las terminales del tablero, para reducir el estrés provocado con el impacto de la herramienta de soldado, dicho soporte contara con más del doble del área de contacto, comparado con el stitch (punto de soldado con solo alambre) normalmente utilizado, reduciendo así el nivel de estrés por área.

1.5 Objetivo general

Estudiar los efectos ocasionados en el tablero de thin nickel, utilizando alambre de cobre durante el proceso de alambrado y establecer las condiciones que permitan lograr mejores niveles de rendimiento, es decir, de **99.45 % a 99.7 %** sostenidos.

1.6 Objetivos específicos

- Reducir el stress del contacto sobre el tablero, mediante el uso de bolas de cobre soldadas en la superficie del tablero (Bumps).
- Establecer recetas de soldado para Bump y stitch, que aseguren la estabilidad del proceso.
- Validar diferentes tipos de corte de Bump que estabilicen el corte de alambre para mejorar el stitch sobre el Bump.
- Medir el impacto de la temperatura sobre el tablero.
- Implementar un método de ajuste y verificación de equipos que aseguren un comportamiento estable en el despliegue de las recetas.
- Entrenar al personal en calibraciones críticas y ajustes requeridos para el cobre.
- Medir la estabilidad de los equipos con el fin de evaluar el posible remplazo de piezas por deterioro o fuera de especificación.

2. Marco Teórico

El proceso de wirebond con cobre, es una técnica que está tomando fuerza debido al incremento de precio de los metales, pero tiene un comportamiento distinto al alambre de oro o aluminio utilizado al inicio de los procesos de wirebond, para comprender las limitantes será necesario definir algunos conceptos claves para el tema de estudio entre los cuales se encuentran primeramente entender el proceso de wirebond y los parámetros claves que utiliza para lograr soldar como son la energía ultrasónica, fuerza, movimientos de servomotores, temperatura y el tiempo de soldado, para posteriormente entender el proceso utilizando cobre y los recursos adicionales requeridos como forming gas, evitar el fenómeno de oxidación y considerar la dureza del cobre comparada con el alambre de oro, en general los controles necesarios para lograr el objetivo del proyecto.

2.1 Procesos de Wirebond en la industria

Es una de las formas primarias de interconexión entre un circuito integrado y un lead frame (laminado) o PCB (Printed Circuit Board) en un paquete de circuito integrado. Es un proceso ampliamente aceptado en la industria a un nivel conocido como componentes “fine pitch” lo cual se refiere a que entre las conexiones mantienen estable una separación entre terminales de 50 μm , con un alto grado de manejo de señales de entrada y salida.

El proceso de wirebond es una técnica de interconexión donde dos metales el alambre y la terminal, son soldados utilizando una combinación de temperatura, fuerza, energía ultrasónica, tiempo y movimientos de scrub, existen tres tipos de tecnologías de soldado: termocompresión, ultrasónico y termosónico, el enfoque de este proyecto está basado en el soldado tipo termosónico. A continuación se brinda una breve explicación de cada proceso de interconexión:

- i) Termocompresión: se basa en temperaturas por encima de 300 °C y un alto nivel de fuerza que oscila entre los 150 gr y 250 gr, que prácticamente fractura la zona de contacto.
- ii) Ultrasónico: es una combinación de la fuerza y vibración ultrasónica a temperatura ambiente 25 °C, donde la vibración ultrasónica produce un cambio morfológico que equivaldría a tener un nivel alto de temperatura, ya que se puede alcanzar los 600 °C durante el soldado.
- iii) Termosónico: se caracteriza por utilizar energía ultrasónica, fuerza y temperatura. La fuerza y el tiempo de soldado son menores en soldado ultrasónico y termosónico comparado con el soldado de termocompresión, en la tabla 3 se ilustra el comparativo de las tecnologías de wirebond.

	Thermocompression	Thermosonic	Ultrasonic
Ultrasonic power	No	Yes	Yes
Bonding force	High	Low	Low
Temperature	High (>300 °C)	Middle (120–220 °C)	Low (room temperature)
Bonding time	Long	Short	Short
Wire material	Au	Au	Au, Al
Pad material	Au, Al	Au, Al	Au, Al
Contamination	Strongly affected	Middle	Middle

Tabla 3. Tecnologías de wirebond. [3]

El proceso de wirebond se clasifica en 2 tipos:

- **Proceso Wedge**: también conocidas como Stitch-Stitch, se utilizan para aplicaciones de diámetro de alambre superior a los 51 µm. Las distancias de interconexión son cortas, con aplicaciones de microondas y optoelectrónicas. El equipo requiere de cuatro ejes de movimiento (X, Y, Z, Φ), ya que tiene que dirigir el ángulo del stitch de acuerdo a la dirección del alambre y usualmente se utiliza alambre de aluminio.

- **Proceso Ball:** Los equipos que utilizan la tecnología bola-stitch, requieren solo 3 ejes de movimiento (X, Y, Z) ya que el equipo puede formar el stitch en cualquier ángulo dado que la punta del capilar es circular y permite soldar en cualquier ángulo sin necesidad de rotarlo. Comúnmente se utilizaba alambre de oro pero hoy en día el cobre ha tomado importancia debido al ahorro que representa utilizarlo, este proceso utiliza el tipo de soldado termosónico, donde en el primer punto de soldado se coloca una bola, normalmente es la terminal del dado y el segundo punto de soldado o soldado stitch es colocado usualmente en el tablero o PBC, en las figuras 2 y 3 mostradas anteriormente lo explicamos al detalle.

Antes de que se forme el primer punto de soldado o bola, se deberá contar con un Free End of the Wire, o cola (tail) y este posteriormente se dividirá en tres partes como se ilustra en la figura 9, el llamado FAB (Free Air Ball), seguido del HAZ (Heat Affected Zone) y finalmente el proceso as-drawn wire, estas áreas se forman debido al efecto producido al elevar la temperatura por el EFO (Electronic Flame Off).

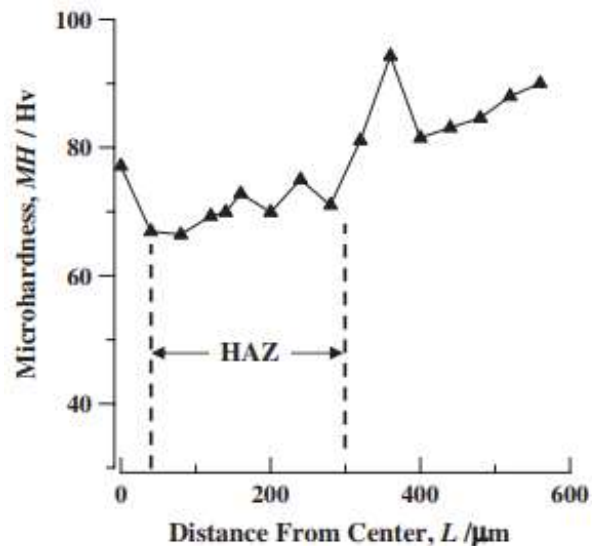


Figura 9. Efecto de EFO del centro de la bola al resto del alambre. [3]

El diagrama esquemático que se muestra en la figura 9 representa las zonas afectadas por el cambio de dureza generado por la descarga eléctrica EFO, que a su vez representara unas ligeras dificultades al tratar de doblar el alambre que le dará la altura y forma al alambre (Loop) y de igual forma podría afectar en los cortes de las conexiones con Bumps.

2.1.1 Tipos de conexiones en Wirebond

Debido a la necesidad de formar conexiones eléctricas entre diferentes componentes, la industria ha desarrollado nuevos perfiles de soldado que ayudan a formar el lazo eléctrico con altos niveles de efectividad, en la figura 10, se muestran los perfiles disponibles para soldar los alambres.

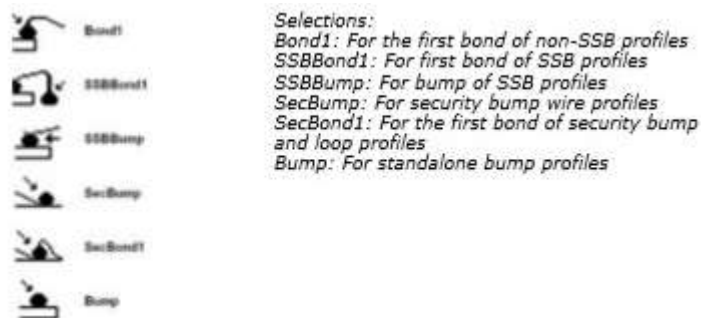


Figura 10. Perfiles para formar alambres en wirebond KNS ProCu Plus. [3]

- **Proceso de cambio de alambre de Au a Cu**

El alambre de oro ha sido el más utilizado para interconectar las terminales de aluminio de los circuitos integrados, y se ha considerado aceptable en términos de fabricación y fiabilidad. Sin embargo, el alambre de cobre es menos costoso que el de oro.

La figura 11 muestra el comportamiento del precio del oro del 2006 al 2020, y se observa un incremento, que lleva a la exploración de metales alternativos, entre los cuales aparece el cobre y la plata. En la tabla 1 se muestran las propiedades de los alambres de Au, Cu y Ag.

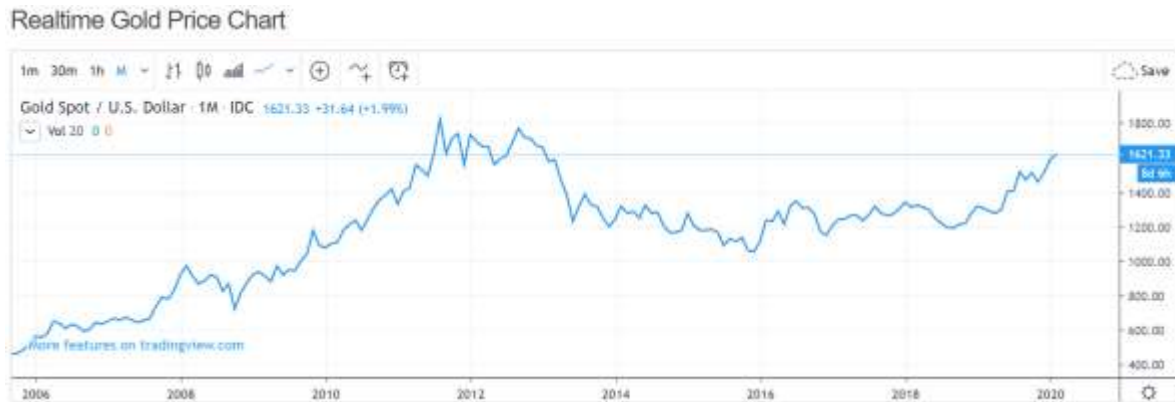


Figura 11. Comportamiento del precio del oro de 2006 a 2020. [5]

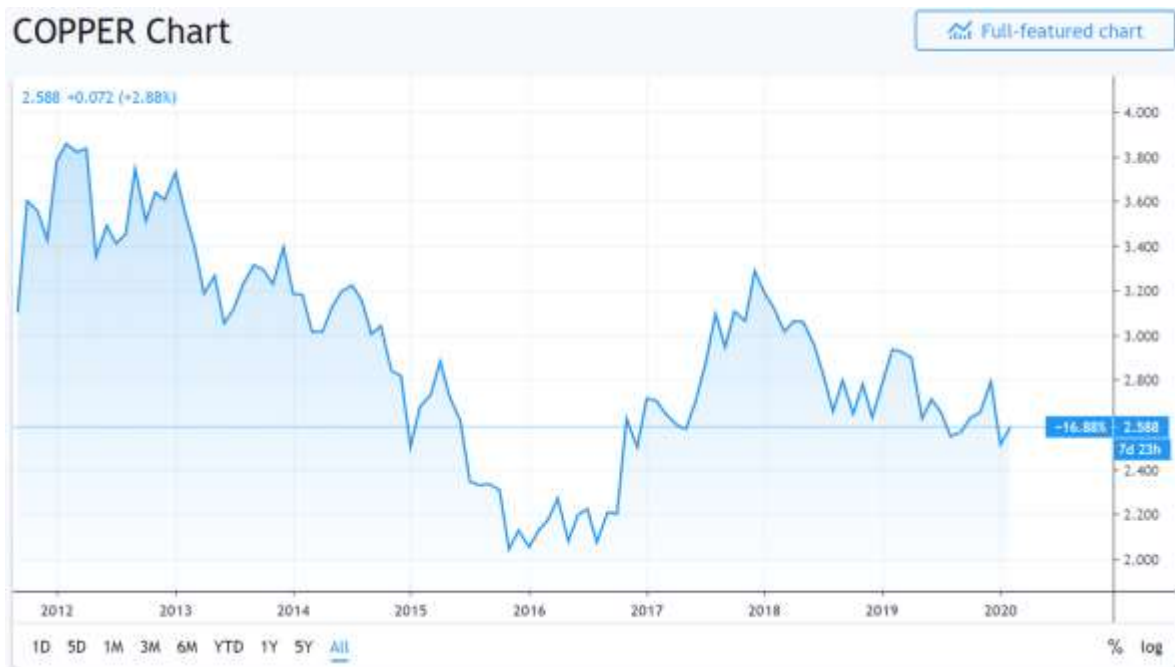


Figura 12. Comportamiento del precio del cobre del 2012 al 2020. [5]

El cobre cuenta con un alto módulo de Young's, así como también una alta conductividad térmica y eléctrica, comparada con Au. Sin embargo, Ag puede ser soldado con menor fuerza que el Cu, y esto implica menor daño de splash en la terminal del dado (circuito integrado de silicio o arseniuro de galio).

Si hablamos de ahorro, Ag representa una opción viable (figura 13), sin embargo, la plata ha presentado baja confiabilidad en pruebas a altas temperaturas 175°C; ya que después de las 300 horas de exposición presenta un agrietado interfacial. El uso de Ag de alta pureza representa un riesgo pues puede presentar fenómenos de migración y corrosión en las terminales, por lo tanto se requiere de un sistema de inyección de nitrógeno para realizar la soldadura. La consideración de algunas aleaciones de Au y Pd, incrementan el costo y la resistencia eléctrica, por lo que las aleaciones de Ag, continúan siendo un poco más económicas que el Au. Finalmente, el alambre de Cu recubierto con Pd es la opción más económica (figura 12) y con mejor respuesta en pruebas de confiabilidad. También se encontró que la plata no es adecuada para aplicaciones de radiofrecuencia.

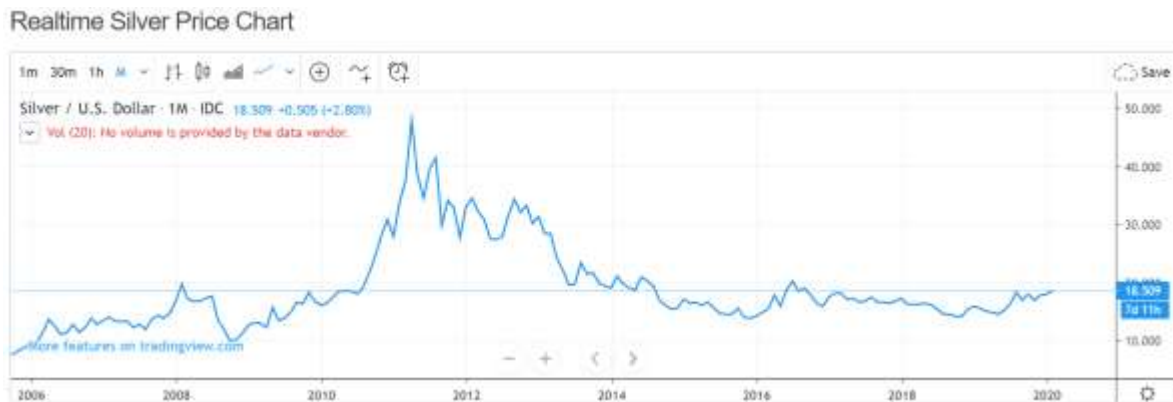


Figura 13. Comportamiento del precio de la plata del 2006 al 2020. [5]

El alambre de Cu, es el mejor candidato para las aplicaciones de alta potencia, debido a que en una pequeña interfaz entre Cu-Al, es capaz de generar poco calor y baja resistencia ($7 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ vs $37.5 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$), obteniéndose mejores pruebas de confiabilidad que las interfaces entre Au-Al. Gracias a que el Cu conduce más rápido el calor, el área de HAZ es más corta comparada con el alambre de Au, debido a que durante la formación del FAB se utiliza una corriente alta y por lo tanto se eleva la temperatura en el alambre hasta el punto de fusión. El calor generado promoverá el crecimiento del grano a lo largo del alambre, lo cual es una condición poco deseable para las pruebas de confiabilidad. Una mejor

conductividad térmica reduce el crecimiento de grano y el área de HAZ, lo cual resulta en una ventaja para la estabilidad del loop, especialmente en aplicaciones de muy bajo loop. El loop se basa en utilizar justamente el alambre posterior a la bola para formar la aplicación de bajo loop, llamada cuello de bola.

El alambre de cobre presenta otras ventajas con respecto al oro, como una alta fuerza de tensión, lo cual lo hace más firme y duro al corte, y a las fuerzas de tracción, esto genera a su vez que presente mejor estabilidad en los alambres durante el diseño de los loops entre los que resaltan la repetitividad de los alambres a distancias largas, poder manejar alambres de menor diámetro con la misma respuesta eléctrica y loops confiables, al igual que mejorar la estabilidad durante los procesos de moldeo y encapsulado del circuito integrado.

En la industria semiconductora, se incrementó el uso del alambre de cobre en las aplicaciones de wirebond. La compañía Kulicke and Soffa (K&S) para el 2010 reporto 25 % de incremento, en comparación del 2009 que menos de 5 % de los equipos eran producidos para manufacturar con alambre de cobre.

El alambre de cobre es la alternativa más adecuada para remplazar al oro, debido a consideraciones de costo, así como mejores propiedades eléctricas, mecánicas y una mejor confiabilidad en la interfaz comparada con el alambre de oro. El cobre ofrece mayor conductividad eléctrica, térmica y mejor rendimiento del HTS (High Temperature Storage) que el oro, otras ventajas incluye una HAZ más corta y mayor resistencia a la tracción, rigidez y dureza que el oro, muchas compañías de semiconductores como Texas Instruments, ASE y SPIL adoptaron en sus sitios de diseño prototipos y ensamble la tecnología a base de cobre.

2.2 Fenómeno de oxidación

Para la formación del FAB se requiere la aplicación de un alto voltaje, que a su vez producirá una alta corriente que se descargará sobre el tail y derretirá el alambre de cobre, para formar una bola esférica. Se deberá evitar la oxidación para evitar principalmente alteraciones en las propiedades del alambre, tales como la resistividad, calidad de unión y formación de intermetálicos. Adicionalmente la

oxidación limita la formación de una bola esférica, lo que provoca que el primer punto de soldado sea de baja calidad, debido a que el óxido se antepone al cobre formando un intermetálico de baja calidad y el cobre se vuelve más rígido.

La formación del FAB de cobre deberá ser en una atmósfera inerte, para ello se deberá controlar el flujo de gas necesario para mantenerlo, de no controlarlo de la forma debida, agregará complicaciones al proceso ya que impactara en las características del FAB, ocasionando una ventana de operación estrecha. La oxidación actualmente se controla de 2 formas, i) la utilización de gas inerte (nitrógeno o forming gas) durante el soldado, y ii) recubriendo el alambre de cobre. El uso de nitrógeno puro puede traer complicaciones, por lo que es más adecuado la utilización de forming gas, el cual contiene 5 % de hidrógeno y 95 % de nitrógeno y mejores propiedades antioxidantes que el nitrógeno. El mayor propósito de utilizar forming gas, es formar una cubierta de gas inerte entre el tail del alambre y el FAB para prevenir la oxidación antes de soldar el alambre. La utilización de hidrógeno tiene un propósito de doble acción, una que ayuda a derretir el alambre y la otra como agente reductor, puesto que suministra electrones y el oxígeno es un oxidante que capta estos electrones. Como resultado de esta reacción se obtiene agua y se minimiza la oxidación del alambre en la superficie de FAB.

2.3 Formación de FAB (Free Air Ball)

Inicia cuando el alambre de cobre es calentado y subsecuentemente derretido por el plasma de baja energía descargado, el alambre fundido se convierte en una bola esférica debajo del efecto de la tensión superficial, al final de la descarga, la bola esférica derretida se solidifica y se forma el FAB (figura 14).

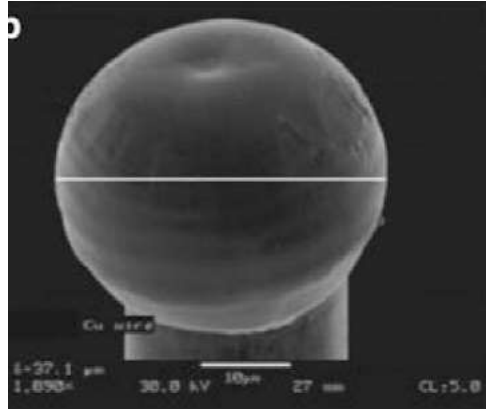


Figura 14. FAB de cobre de 37 µm de diámetro. [3]

Posteriormente a base de fuerza, movimiento ultrasónico, temperatura y movimientos de scrub se transforma en una bola soldada (figura 15).

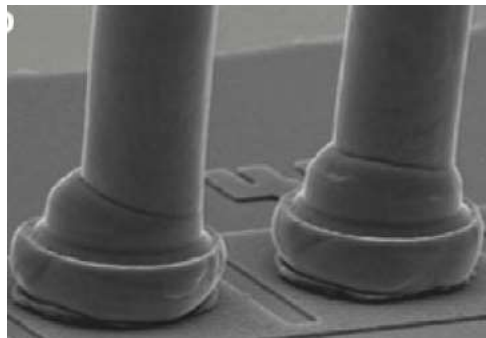


Figura 15. Bola soldada de cobre de 43 µm de diámetro. [3]

2.4 Fenómeno de splash

Otro mecanismo dañino relacionado con el proceso de cobre es el conocido en la industria como aluminio splash, que se define como la cantidad de materia desplazada fuera del perímetro del punto de soldado. Este deberá ser reducido con el fin de evitar corto circuito entre las terminales vecinas. Como ejemplo, el comparativo entre soldar una terminal con aluminio o cobre, el FAB de cobre es de 80 HV (hardness vickers) y el de Au es 60 HV. La bola soldada de cobre es de 100-128 HV, mientras que el Au es de 70-80 HV, similar a la dureza del aluminio que es de 70-80 HV y mucho más baja que la del cobre, esto explica el fenómeno

del aluminio splash cuando se realiza un punto de soldado entre una terminal de aluminio con alambre de cobre.

En la figura 16 podemos observar el comparativo de una bola de cobre con un diámetro de $43.73 \mu\text{m}$ (eje Y) que genera un splash de $54.28 \mu\text{m}$.

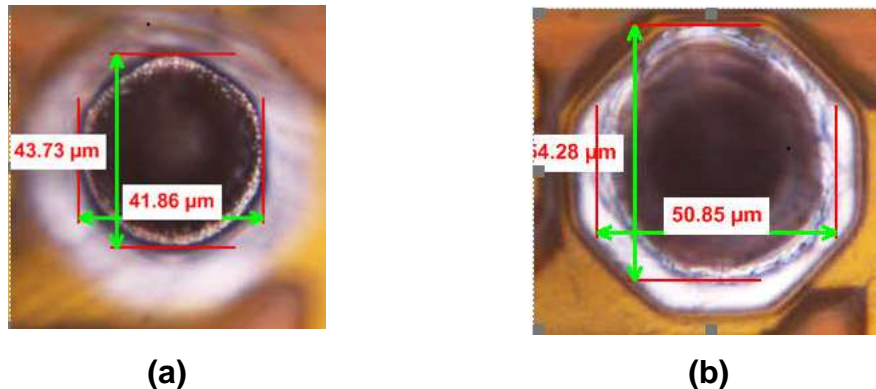


Figura 16. Comparativo de diámetro de bola (a) y splash (b). [2]

Se ha encontrado que el borde exterior del FAB, es más duro que el interior, esto debido a que presenta más estrés durante el proceso de unión. Algunas soluciones para minimizar el estrés en la terminal son i) disminuir la fuerza aplicada, ii) reducir la distancia de desplazamiento durante el proceso de unión y iii) incrementar la dureza de la terminal con alguna aleación al aluminio como por ejemplo NiPdAu o NiAu, esto ha mostrado una excelente robustez y rendimiento en fiabilidad en la superficie de las terminales de aluminio, soldadas con alambre de cobre y eliminación del splash de aluminio.

3. Materiales y métodos

3.1 Materiales

3.1.1 Alambre de cobre

Se trata de un alambre de la compañía Tanaka (figura 17), diámetro de 20 μm , recubrimiento de paladio para mejorar la unión y aleación de oro, con una fuerza de ruptura de 4 a 8.9 grf (gramos fuerza), un alargamiento del 5 al 15 % y mayor dureza a comparación del alambre de cobre puro. La gran ventaja es que los FAB son más estables, dada la cobertura de paladio que ayuda a mejorar la calidad, debido a que sea menos probable que se forme óxido en la superficie del FAB durante su formación. También presenta una mejor respuesta a evitar la corrosión en el cuerpo del alambre durante los siguientes procesos, por ejemplo en Moldeo.



Figura 17. Carrete de alambre de cobre. [19]

3.1.2 Datos de GaAs

El arseniuro de galio, es un compuesto de los elementos galio y arsénico, es un semiconductor III-V, con una estructura cristalina tipo: blenda de zinc. El GaAs se utiliza en la fabricación de dispositivos tales como circuitos integrados de frecuencia de microondas, circuitos integrados de microondas monolíticos, diodos emisores de luz infrarroja, diodos láser, celdas solares y ventanas ópticas. El GaAs se usa a menudo como material de sustrato para crecimiento epitaxial de otros semiconductores III-V, incluidos arseniuro de indio y galio, arseniuro de aluminio y galio entre otros.

Las ventajas que tiene sobre las tecnologías a base de silicio son: i) un menor ancho de banda ~ 1.441 eV, ii) mayor movilidad del electrón, iii) menor consumo de energía, iv) separación de banda directa, esta propiedad es de gran importancia para los dispositivos optoelectrónicos, y v) presentan menor impacto de splash, al utilizar terminales de oro a comparación de los dados de silicio con terminales de aluminio.

3.1.3 Datos de Si

En la física del estado sólido el germanio fue uno de los primeros materiales que llamaron la atención, pero fue a inicios de los 60's cuando el silicio paso a ser el más utilizado como material semiconductor dado que cuenta con ciertas ventajas.

- Puede ser fácilmente oxidado, obteniéndose un aislante de alta calidad
- La capa de óxido crea una barrera en los procesos de difusión o implantación necesarios en la fabricación de circuitos integrados.
- Su abundancia en la corteza terrestre hace posible encontrarlo a bajo costo, ver (figura 18).
- El ancho de banda es de 1.11 contra 0.66 eV del germanio (tabla 4).
- Puede operar a mayor temperatura, en comparación al germanio (tabla 4).

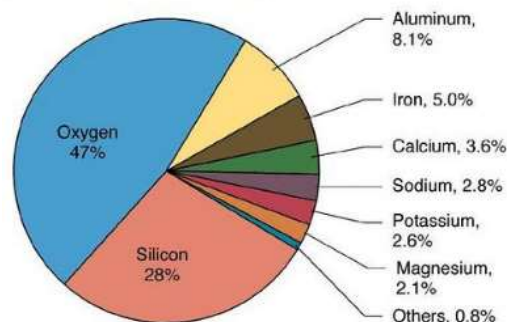


Figura 18. Disponibilidad del silicio en la corteza terrestre. [19]

Propiedad/Elemento	Germanio	Silicio
Ancho de banda	0.66	1.11
% Disponibilidad en la corteza terrestre	x<0.5%	28%
Punto de fusion (°C)	960	1414

Tabla 4. Comparativo entre el silicio y germanio. [19]

Las terminales de los dados de silicio son de aluminio, por lo que para lograr un contacto uniforme sobre la terminal empleando alambre de cobre, es necesario trabajar en el control de splash, con el fin de reducir el desplazamiento total del aluminio durante el soldado.

3.2 Equipos de soldado de cobre para la industria

En sus inicios el cobre fue puesto en producción modificando los sistemas convencionales con los que se trabajaba el alambre de oro, por ejemplo, para la compañía Kulicke and Soffa (KNS) los equipos modificados fueron los Maxum, Ultra, IConn, cabe mencionar que estos equipos se logró con un nivel máximo de rendimiento de 99.2 %. Posteriormente muchas compañías como ESEC, ASM y KNS invirtieron en sistemas mejorados de fuerza de soldado en sus equipos, un mejor control del flujo de gas para mantener una atmosfera libre de oxígeno a la hora de formar el FAB y soldar sobre el material.

Aproximadamente en el 2010 KNS fabricó el equipo ProCu Estándar, el cual fue diseñado para trabajar con alambres de cobre y oro. Este modelo ya contaba con librerías y procedimientos con los cuales se lograban niveles de rendimiento de hasta 99.5 %, donde su mayor debilidad se estaba en que continuaba siendo insuficiente su sistema de control de atmósfera ya que se presentaban problemas de variación de FAB, al igual que se presentaban problemas de exceso de splash, generando a su vez quebrado de terminales o fueras de offset.

Posteriormente sale al mercado el equipo ProCu Plus el cual logra una ventana de operación más extensa comparada con los equipos ProCu, al igual con menor nivel de splash, y una mayor área de contacto en la unión, y a una capacidad de unidades por hora mayor al modelo anterior.

3.3 Equipo utilizado en el proyecto

El equipo para soldar utilizado en este proyecto, es proveniente de la compañía KNS, modelo IConn ProCu Plus, y realiza el proceso llamado unión de bolas (figura 19). El equipo realiza las interconexiones en los circuitos integrados mediante un proceso termosónico; el cual emplea calor, fuerza y energía ultrasónica para soldar cada extremo del cable al dispositivo. El término “unión de bolas,” se refiere al proceso donde la cola de cada alambre se derrite en forma de bola antes de unirse. Este equipo salió al mercado en el 2014 y a la fecha, ha mejorado sus librerías para el proceso de cobre con este enfoque.

1. Incrementar el área de contacto entre el alambre de cobre y la terminal del dado.
2. Reducir la cantidad de splash del generador de corriente ultrasónica (USG).



Figura 19. Equipo de soldado KNS Modelo ProCu Plus. [17]

3.4 Selección del capilar

Para lograr altos niveles de rendimiento es importante la selección del capilar para la aplicación deseada. En la figura 20 se pueden observar las partes que forman la punta del capilar.

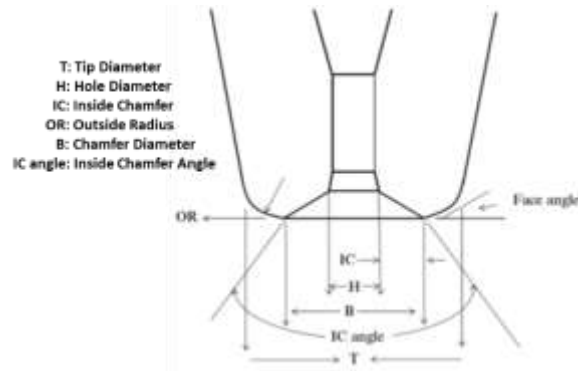


Figura 20. Partes de un capilar. [3]

En el proceso de wirebond es necesario aplicar fuerza y energía ultrasónica para que esa energía sea transferida al alambre para formar la unión en la terminal del dado o tablero. La dureza del alambre de cobre es aproximadamente 25 %, más grande comparada con el alambre de oro, por lo que es complicado soldar especialmente en circuitos montados en tecnología lead frame.

Para mejorar los stitch del alambre de cobre es necesario aplicar una energía mucho mayor al punto de soldado en comparación con la del alambre de oro (fuerza, energía proporcionada por el USG, tiempo y scrub), esto causará una mayor marca en el tablero y muy probablemente errores de pérdidas de tail o fallas de EFO Open.

Debido a la necesidad de utilizar más energía sobre los capilares, fue necesario optimizar: TIP diameter, Face Angle, OR, acabado superficial de los capilares y los parámetros del proceso de alambrado. Para el caso del cobre, se obtuvo como resultado un incremento de golpes soportados de 400 mil a 1 millón y para el caso del oro, un incremento de 1 a 2.5 millones.

Sin embargo algunos de estos parámetros están limitados por la distancia entre terminales, por ejemplo para una distancia de 50 μm , el diámetro de TIP está limitado a 63 μm . Comparado con un capilar estándar un cambio de face angle de 11° a 8° mejora el stitch, pero podría traer consigo bajas lecturas de pull test, al igual que el cambio de OR de 8 μm a 5 μm , mejora el stitch pero podría ocasionar una falla conocida en la industria como “heel cracking”, la figura 21 indica la zona donde ocurre la fractura.

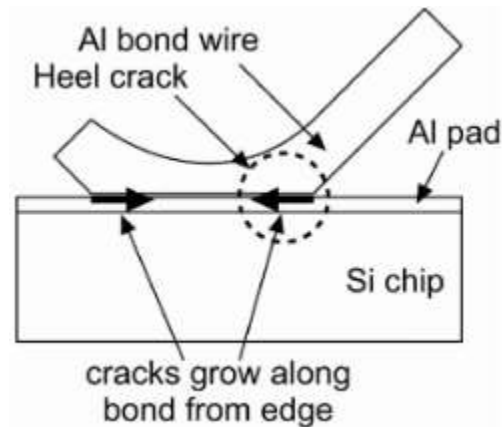


Figura 21. Heel Cracking debido a un OR bajo. [16]

La optimización de los componentes que forman la punta del capilar, será crítica para el proceso de alambre de cobre, debido a que si se hace una buena selección del capilar y un buen diseño para nuestra aplicación, se verá reflejado tanto en la reducción de los parámetros de corriente de USG y fuerza del equipo, como también en una menor cantidad de splash y una mayor área de contacto entre el alambre y la terminal. Obteniéndose como resultado final un punto de soldado óptimo.

Los capilares de cobre son granulados para poder sujetar el alambre durante el proceso ultrasónico, lo que implica una pérdida de vida útil del capilar. Investigaciones relacionadas han encontrado que para el primer punto de soldado, el Chamfer Angle, Chamfer Diameter y el Inside Chamfer, afectan la deformación de la bola, y la optimización de estas dimensiones pueden modificar el comportamiento de área de contacto con la terminal. Por ejemplo, si comparamos

un capilar de diseño optimizado y uno standard, obtenemos un Chamfer Angle menor y mayores Inner Chamfer y Chamfer Diameter. Esto resulta de soldar una bola pequeña y limitar la cantidad de alambre dentro del capilar durante el impacto, disminuyendo por ende, la cantidad de alambre que sale de los bordes del capilar que forman el diámetro de bola. Aproximadamente el 40 % del FAB se puede contener dentro del Inner Chamfer.

Los diseños nuevos de capilares han mostrado mejoras para aplicaciones en bolas pequeñas y en wirebond de Ultrafine-Pitch. La continua contracción de los circuitos integrados lleva consigo que la distancia entre terminales sea más pequeña, de la misma manera la demanda de capilares para aplicaciones Ultrafine-Pitch y el rediseño de perfiles que logren una transferencia de la energía ultrasónica consistente hacia la punta del capilar durante el proceso de wirebond.

En las aplicaciones de soldado termosónico, la amplitud de la vibración ayuda a determinar la confiabilidad de los puntos de soldado. La máxima vibración ultrasónica deberá de estar cercana o en la punta del capilar para obtener un rendimiento óptimo en los puntos de soldado. El comportamiento vibratorio del capilar se debe a la transmisión ultrasónica del transductor para formar los puntos de soldado, dependiendo del requerimiento para el tamaño de bola, tanto la corriente de USG y la fuerza utilizada, puede variar el desplazamiento de la punta del capilar entre 0.56 y 3 μm . Un alto desplazamiento implica una bola grande. Dependiendo del diseño del capilar, el punto de nodo puede estar posicionado cerca o lejano a la punta del capilar, al mover el punto de nodo lejos de la punta del capilar, se logra un desplazamiento grande. Es decir que la vibración de la amplitud del capilar depende de la ubicación del punto nodo, la longitud total también afecta al comportamiento vibratorio. Otros factores como el Internal Taper Angle, Tip Diameter y Bottleneck Height, afectan también a las características de vibración de un capilar. Estas dimensiones cambian la amplitud del desplazamiento en la punta del capilar, el cual es directamente responsable de la calidad de los puntos de soldado, los cuales son las bolas y los stitch, así como también la capacidad de corte de los Bump y la estabilidad del loop.

3.5 Alineación del transductor

Esta calibración mecánica asegura que la punta del capilar trabajará de manera perpendicular durante el proceso de soldado y el transductor operará de forma uniforme, para lograr esto se requiere contar con los siguientes ajustes mecánicos:

- Verificar que los tornillos sujetadores del transductor no entren en contacto con las paredes del mismo, esto se logra empleando tornillos de hombro, los cuales centran el transductor y posteriormente son removidos. Esto permite que los cristales del transductor tengan un desplazamiento libre y una transmisión de energía ultrasónica a la punta del capilar.
- Emplear un gauge de perpendicularidad, para lograr un contacto entre el capilar y la superficie de contacto, así como el uso de un sistema de coordenadas (puntos específicos), para tomar mediciones precisas y poder lograr una repetitividad de los métodos de calibración, por parte del responsable del ajuste mecánico.

El método de coordenadas es un logro local de ajuste del transductor, ya que el manual de usuario solo especifica realizar esta calibración en la parte frontal y trasera del transductor, esto ocasionaba que el personal tomara diferentes referencias para la asignación del CERO del eje Z, y con ello excesivas calibraciones innecesarias debido a la asignación de un nuevo CERO, cuando la diferencia se generó por los puntos de medición. Con el método de coordenadas, los operadores asignan valores del eje Z en el mismo punto, y con esto se logra realizar el ajuste con la certeza de que si lo realizan de nuevo llegarán al mismo resultado.

3.6 Calibración de fuerza en soldado

Es la fuerza necesaria para que la corriente eléctrica mueva el cabezal de soldar a través del aire. La figura 22 muestra la corriente eléctrica necesaria para 0 g y para 50 g de fuerza, así como el factor de escala.

Bond Force Calibration		
Current Bond Force Information:		
0 gram force current	-3.1	DAC
50 gram force current	-340.7	DAC
Force DAC	6.70	counts/gram
Sensor A/D	11.09	counts/gram
1 Calibrate		
2 Verify		
3 Change Bond Force Offset		
4 Verify with External Sensor		
9 More		
Done		

Figura 22. Información de calibración de fuerza. [17]

El calibrador de fuerza se muestra en la figura 23 y consta de una referencia de 65.2 gramos que nos ayuda a que el equipo pueda calcular la diferencia entre el DAC (Digital Analog Count) a cero gramos y a 50 g. De esta forma el equipo realiza el cálculo de la ecuación y la pendiente. Posteriormente dependiendo del valor de gramos-fuerza que se asignen para el punto de soldado, el equipo calcula el valor del DAC para ejecutarlo.

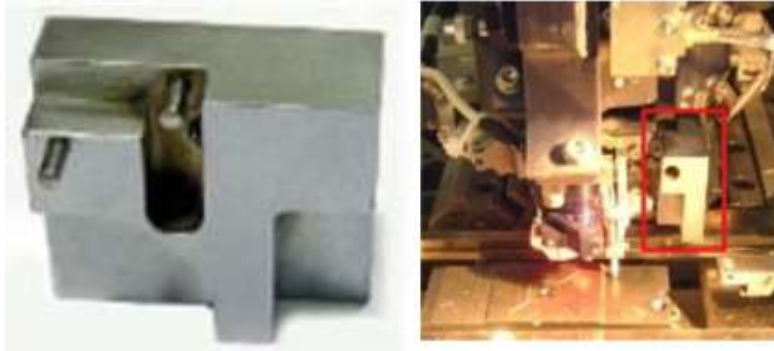


Figura 23. Calibrador de fuerza y montaje en equipo. [17]

Posterior a la calibración de fuerza, el equipo realiza una serie de movimientos en los ejes X, Y, Z, simulando la operación normal de producción, con el fin de detectar ruidos en el sistema eléctrico de la cabeza de soldado. Al igual realiza una medición en la aplicación de fuerza, mediante un sensor de fuerza instalado entre el transductor y la cabeza de soldado. Para ejecutarlo, es necesario la instalación de la herramienta mostrada en la figura 24, el cual es un pin metálico de la dimensiones del capilar.



Figura 24. Montaje del calibrador de sensor de fuerza. [17]

3.7 Instalación del flowhead (cámara de zona inerte)

El flowhead es instalado en el área de bondhead. Este ensamble incluye al electrodo ya que va instalado dentro del flowhead. Durante el proceso de soldado, el forming gas o nitrógeno es suministrado a través de la flowhead hacia el alambre de cobre (FAB) y hacia el tablero (BOND) en el punto de soldado. En la figura 25, se muestra el flowhead completo y sus principales componentes.

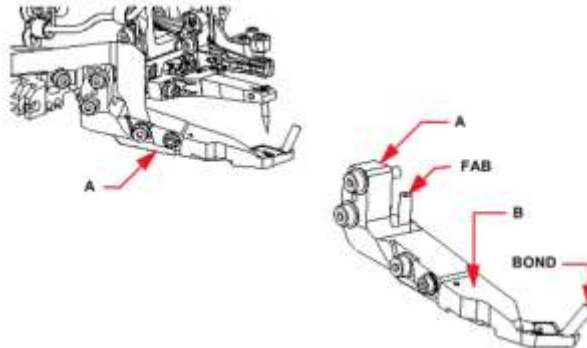


Figura 25. Completo ensamble de Flowhead, A: Flowhead, B: Electrodo oculto. [17]

En la figura 26, se observa la flowhead con sus partes internas como son: A) Tornillo sujetador; B) Base de electrodo; C) Electrodo y D) Ensamble de flowhead.

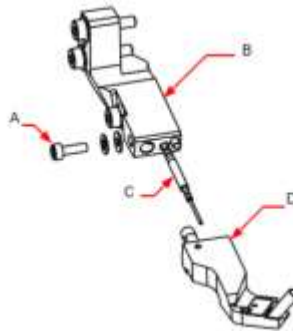


Figura 26. Completo ensamble de Flowhead. [17]

El procedimiento para la instalación del flowhead requiere de dos calibradores. El primero (figura 27) dará la posición al electrodo dentro del ensamble de la flowhead con sus componentes: A) pin; B) calibrador de electrodo; C) clamp; D) tornillo; E) opresor, F) ensamble de flowhead y G) área de contacto entre el clamp y el flowhead.

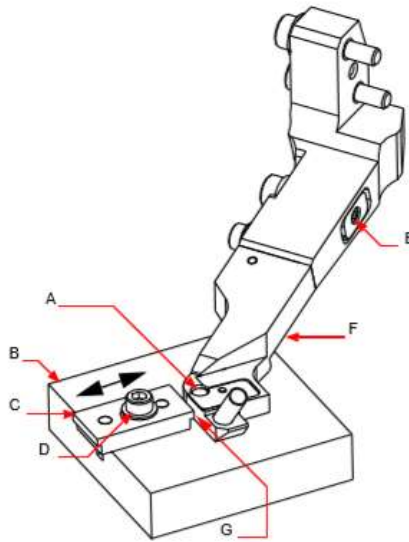


Figura 27. Calibrador de posición de electrodo. [17]

Una vez ajustado el electrodo dentro del flowhead, se procederá a la instalación en el equipo. El segundo calibrador (figura 30) es necesario para ajustar la posición del flowhead en los ejes X, Y, Z.

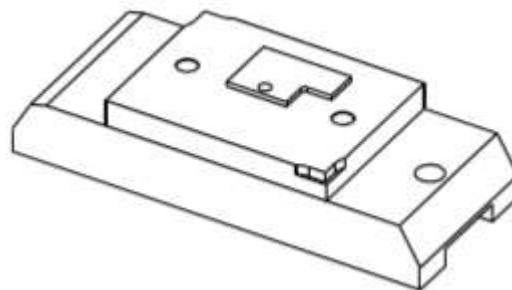


Figura 28. Instalador de Flowhead. [17]

El procedimiento se basa en colocar el instalador de la flowhead (figura 30) en el equipo y montar el flowhead en el equipo sobre el calibrador. Esto nos ayudará a colocar el flowhead en una posición donde el capilar cruce por el centro del orificio del flowhead, sin tocar los bordes. Posteriormente se procede a ajustar los tornillos candado, para lograr la posición y funcionamiento deseado. Las partes mostradas en la figura 29, son: A) opresor de ajuste Z; B) tornillo candado para eje X y Z; C) opresor de movilidad X; D) tornillo candado eje Y; E) tornillo de ajuste eje Y; F) tornillo sujetador de cable de electrodo; G) cable de electrodo; H) tornillo sujetador del cable electrodo en flowhead; I) punta de capilar; J) instalador de flowhead.

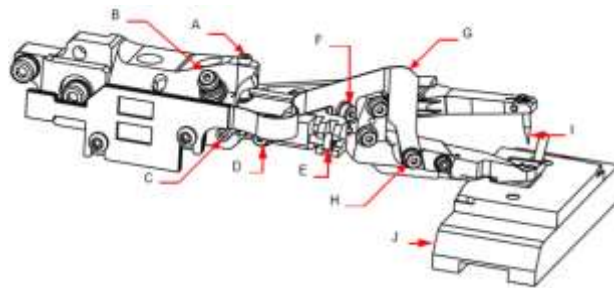


Figura 29. Instalador de Flowhead. [17]

En la figura 30 podemos observar la vista frontal del calibrador, para lograr un contacto plano del flowhead sobre el calibrador y posteriormente lograr que el transductor tenga un contacto plano sobre el flowhead. En la figura 30 observamos los puntos críticos de la calibración, las cuales son: A) la parte izquierda de abajo del flowhead tocando el calibrador; B) La parte derecha del calibrador tocando la flowhead; y C) el opresor de ajuste en eje Z.

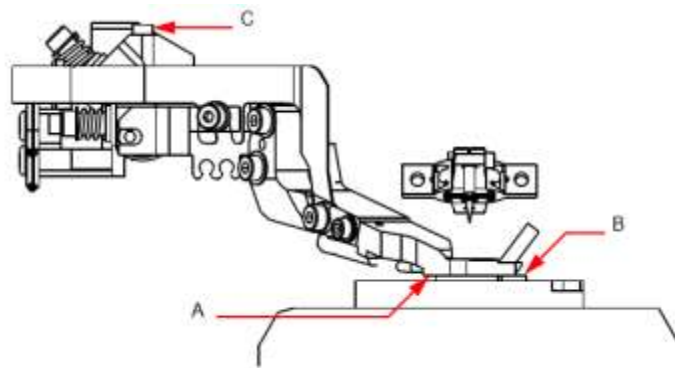


Figura 30. Instalador de Flowhead. [17]

3.8 Calibración de OBPF (On Bonder Personality Value)

Es una calibración que ajusta el comportamiento del sistema generador de ultrasónico, para obtener en diferentes equipos de soldado la misma vibración de capilar, esto para asegurarse que la misma corriente de USG dará una respuesta equivalente en un grupo de equipos.

Esta calibración se basa en la capacidad de compresión del equipo respecto al FAB sobre un lead frame a 200 °C y se da mediante un programa interno del equipo el cual varía la corriente USG. Al hacer esto, la bola (antes FAB) pierde altura o se comprime sobre el lead frame, esta compresión del FAB, se registra y se grafica contra la corriente USG aplicada, lo cual forma una pendiente y dependiendo tanto de la estabilidad de los valores obtenidos como de la pendiente esperada; el equipo desecha la calibración si los valores obtenidos no son estables o la acepta si la respuesta tiene bajo nivel de ruido proponiendo un nuevo multiplicador. Este valor es la compensación entre el equipo medido y un patrón de referencia, el valor obtenido básicamente es un multiplicador, conocido como factor de USG. Con esto el equipo logra una auto-compensación, logrando una similitud en términos de corriente USG con respecto al patrón de referencia.

3.9 Parámetros del proceso de Wirebond

3.9.1 Energía ultrasónica (USG)

Es uno de los parámetros del proceso de wirebond que determina la fuerza del punto de soldado y la confiabilidad. Durante el proceso de wirebond la aplicación de fuerza endurece el alambre, lo que pone en riesgo la integridad de la terminal, debido a los requerimientos de una alta fuerza de soldado, ya que el uso de ultrasónico disminuye la fuerza de unión suavizando el FAB. La energía ultrasónica incrementa el área de la distribución de fuerza reduciendo el flujo de estrés e incrementando la suavidad del cable sobre la terminal, es decir la aplicación de energía ultrasónica disminuye la deformación del alambre requerida para formar la unión.

La figura 31 muestra los diferentes modos de falla y los efectos producidos al pull test a un tiempo y fuerza constante (30 ms y 40 gr), e incrementando la corriente de USG. Se puede observar un comportamiento de bolas levantadas durante el proceso de soldado, para después pasar a bolas soldadas solo superficialmente, posteriormente pasa a estar demasiado adheridas que el alambre se rompe del cuello, y finalmente se quiebra la terminal por exceso de corriente USG.

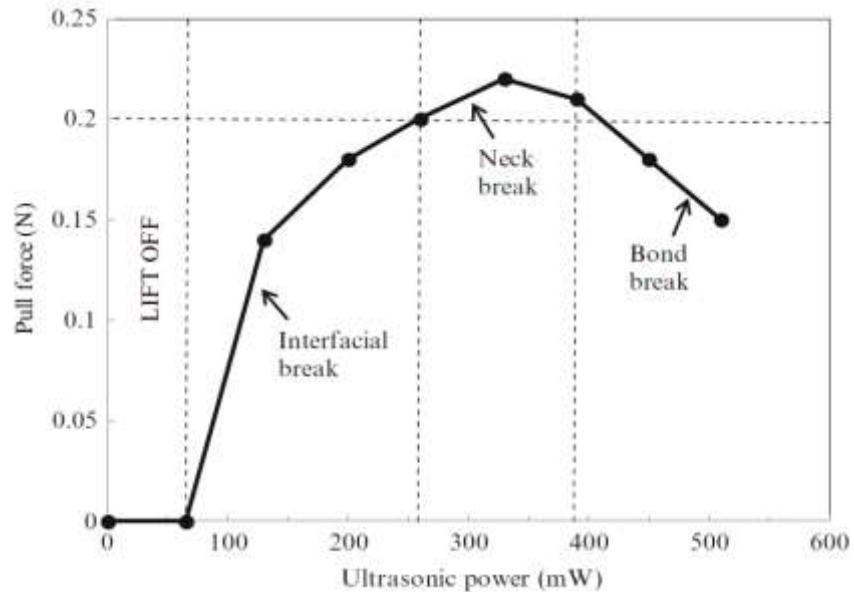


Figura 31. Cambios de modos de falla y fuerza de pull test en relación a la corriente de USG (mW). [3]

La figura 32 muestra el comportamiento físico al variar la energía USG y como pasamos de tener un pequeño residuo de cobre al utilizar baja corriente de USG, para después pasar a una cobertura total al incrementar la corriente y al final pelar la terminal sacando el material conductor de la terminal, de esta forma encontramos los límites de nuestro proceso.

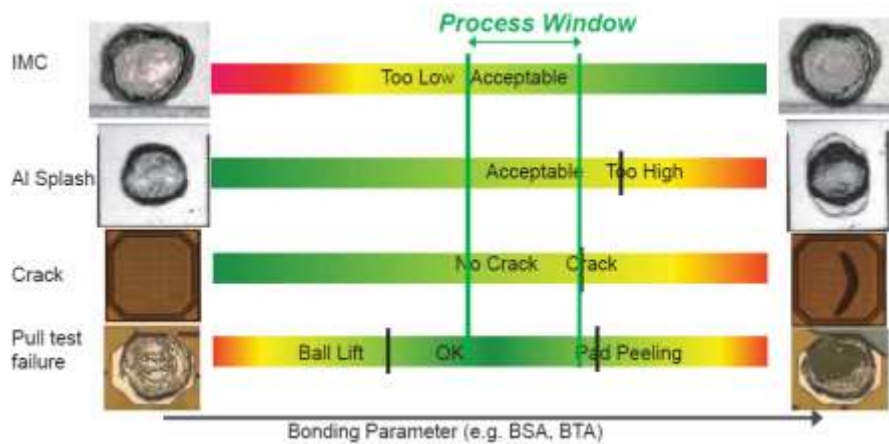


Figura 32. Cambios de modos de falla en relación a la corriente de USG. [6]

La corriente de USG deberá ser optimizada para lograr buenos puntos de soldado, en la optimización se mide el diámetro y altura de bola deformada, donde la corriente de USG tiene un impacto significativo en MBD (mashed ball diameter), y la reducción de altura de bola o BHR.

Es decir que la corriente de USG incrementa el diámetro de la bola soldada, la fuerza de ball shear por unidad de área y reduce la altura de bola, el incremento de fuerza de ball shear por unidad de área, representa lo bien que se formaron micro-soldaduras entre la bola de cobre y la terminal de aluminio en un circuito integrado. A medida que se aumenta la corriente de USG se llega a la saturación, teniendo como resultado la generación de cráteres en la terminal de aluminio, esto a su vez también se verá afectado por el espesor de la terminal y las capas o películas del circuito integrado, ya que a medida que se tenga más espesor de aluminio en la terminal y más capas se generará splash, los expertos sugieren 25 % de diámetro en el splash con respecto a la bola soldada es decir una bola por dado de silicio, por lo tanto para una terminal de 55 μm , medirá 40 μm con un splash aún aceptable de 52 μm . También existen parámetros de USG auxiliares que ayudan a formar una bola con mejor distribución, por ejemplo:

- **Setting USG**: es la vibración ultrasónica que se aplica después de que el equipo inicia la trayectoria al primer punto de soldado y se activa justo después que abre la grapa. La función principal es recoger el excedente de cobre que no fue requerido para formar el FAB, al igual que ayudar al FAB a colocarse dentro del perímetro circular del capilar formando una bola más circular.
- **PreBleed USG**: es la vibración ultrasónica que ayuda a limpiar la zona de soldado, activándose justo al terminar el setting USG y deja de funcionar cuando el equipo declara contacto en el punto de soldado. También ayuda con la mejor distribución de USG, logrando un contacto plano entre la terminal y la bola, reduciendo el riesgo de contacto cóncavo; lo que indicara un pobre contacto en el centro de la bola y sólo contacto en los límites de esta, debido a que inicialmente el aluminio del centro fue desplazado como splash.

3.9.2 Electronic Flame Off (EFO)

Es la corriente suministrada para formar el FAB durante el primer paso del ciclo de wirebond, así como se mencionó anteriormente, el HAZ es una porción del alambre afectada por la descarga eléctrica del EFO, en el cual los granos del cobre crecen y sus propiedades mecánicas cambian a un comportamiento más rígido que afectará las aplicaciones donde requieran realizar dobleces en el alambre muy cercanos a la bola; en la industria se le conoce como ULL (Ultra Low Loop). En experimentos se ha encontrado que la distancia del HAZ se reduce a medida que se reduce el tiempo y aumenta la cantidad de corriente; ya que no da tiempo para que el calor se transfiera a través del cable de cobre. Adicionalmente, se ha encontrado que al hacer estos ajustes en corriente y tiempo de FAB este tendrá una menor dureza que ayudará a generar un menor stress en la terminal, pero en su defecto al utilizar mucha corriente se incrementará la variación del FAB en tamaño y forma.

En general se deberá controlar los parámetros de EFO como EFO Current, EFO Fire Time, flujo de forming gas y EFO GAP, dependiendo del diseño del flowhead para lograr optimizar el proceso de cobre en wirebond. Se recomienda una relación entre el FAB y el diámetro de alambre de 1.6 a 3, dependiendo de la aplicación, más sin embargo la relación más utilizada esta entre 2 a 2.5 veces más grande que el alambre, donde se recomienda un flujo de gas inerte de 0.5 L/min.

3.9.3 Movimientos de scrub

Son parámetros de desplazamiento sobre el punto de soldado, donde el equipo emplea servomotores que trabajan a una frecuencia programable y en conjunto con la energía ultrasónica para lograr la unión del alambre de cobre sobre las superficies; la unidad de desplazamiento está dada en micrones y la frecuencia en Hertz. Esto nos permite tener una mejor distribución de la energía a la hora del contacto ya que la energía ultrasónica solo es ejercida sobre el eje Y. Los movimientos de scrub son ejercidos en los diferentes ejes X, Y, Z; por lo que dependiendo de la aplicación podemos hacer uso de los siguientes librerías de movimiento: In-line, perpendicular y circular.

3.9.4 Fuerza de soldado

Es la fuerza ejercida por el cabezal para unir los materiales y está dada en unidades de gramos. Además, trabaja en conjunto con la energía ultrasónica, permitiendo la metalización entre el alambre y la terminal de aluminio. Si se utiliza una fuerza alta podemos llegar a quebrar la terminal y si no se aplica la suficiente el alambre quedará levantado, por lo cual es necesario la optimización.

3.9.5 Temperatura y tiempo

La temperatura contribuye a la fiabilidad del punto de soldado, ablandando el alambre o el FAB para su deformación en el punto de soldado, sin embargo la utilización de altas temperaturas puede dar como resultado la pérdida de rigidez en los materiales y deterioro de plasma debido al surgimiento de óxido en el tablero por la alta temperatura.

Durante el tiempo de soldado estará activo el ultrasónico y la fuerza sobre el punto de soldado, si lo mantenemos por periodos largos, es una herramienta útil para lograr un punto de soldado, sin embargo se requerirá minimizar este tiempo para poder mantener un buen ritmo productivo.

3.9.6 Optimización de parámetros de soldado

En el caso de cobre, la ventana de operación es mucho más estrecha comparada con el oro, es decir los procesos se harán a la medida, tanto para el soldado de bolas como para el soldado de stitch. Por ejemplo para el soldado de bolas el objetivo será, no presentar quebraduras en la terminal por falta de energía ultrasónica; y hasta no presentar bolas levantadas por falta de la misma, se requerirá una evaluación del impacto del ultrasónico en la vida del capilar debido a que la relación cobre y ultrasónico pudieran deteriorar la integridad dimensional del mismo.

Con respecto a la cantidad de puntos de soldado realizados, se recomienda que se mantenga un comportamiento similar hasta el millón de golpes medido a lo largo de su vida, mediante la altura y diámetro de las bolas y el desgaste uniforme de la punta del capilar sin perder su forma física, esto con el fin de ofrecer altos volúmenes de manufactura. Otra parte del proceso es la optimización para obtener una cobertura IMC (Intermetallic) adecuada para el segundo punto de soldado, por lo que se requerirá un control del stitch. Esto requerirá un comportamiento similar del capilar en cualquier ángulo de soldado, usualmente en la optimización del proceso de stitch, las conexiones que están dirigidas en el eje Y de los equipos

presentan comportamiento más estrechos y alargados en la forma de stitch, este comportamiento es natural debido al movimiento ultrasónico pero se debe de controlar la utilización del USG para mantener una forma de stitch uniforme en todas las direcciones con el fin de evitar short tail en el eje Y. Otro punto importante es la limpieza de la superficie de soldado, pues es crítica y para eso se requerirá el uso de equipo de plasma, con el fin de remover partículas que se hayan agregado por el manejo o falta de control en los procesos previos.

Para lograr estos niveles óptimos de producción se requerirá la comprensión de los fenómenos físicos y químicos presentes en el proceso. Los investigadores han adoptado varios métodos de optimización de procesos de cobre como método Taguchi, metodología Six Sigma DMAIC, por sus siglas en idioma ingles (“Define-Measure-Analyze-Improve-Control”), y diseño de experimentos por sus siglas en ingles DOE (Desing of Experiments).

La optimización del proceso de soldado es esencial para la estabilidad y la portabilidad de máquinas y materiales. La optimización de los experimentos conduce a determinar una relación matemática entre las variables y el centro del proceso. El centro del proceso también es conocido como la ventana del proceso, la cual requiere ser optimizada para obtener una excelente calidad en el primer y segundo punto de soldado.

El DOE, envuelve los métodos de planificación, diseño, recopilación de datos, análisis y la interpretación de experimentos que permiten construir de manera efectiva y eficiente el proceso de soldado, utilizando un modelo estadístico entre las respuestas experimentales y el control de los factores de entrada. Al igual un DOE ayuda a encontrar las variables críticas del proceso.

Usualmente para un proceso de wirebond los factores de entrada a medir son: i) velocidad constante (C/V), ii) USG, iii) fuerza, iv) tiempo de USG y v) temperatura. Por otra parte, las respuestas de salida serán: i) Pull test, ii) Ball shear, iii) alambres levantados, iv) terminales quebradas y v) splash.

La compañía K&S considera un proceso optimizado aquel que la cobertura IMC supera el 80 % con respecto al tamaño de bola. La industria utiliza la respuesta de la tabla 5 para entender lo estrecho de la ventana operacional para un proceso de cobre.

IMC coverage	Too low	Acceptable	Too high
Al splash	Acceptable		Too high
Crack	No crack		Crack
Pull test failure	Ball lift	OK	Pad peel



Narrow window

Tabla 5. Ventana operacional para proceso de cobre. [3]

Los requerimientos para lograr un buen punto de soldado son: i) procesos con parámetros optimizados, ii) ambiente de producción limpio y controlado (partículas humedad), iii) calidad y limpieza de los materiales, iv) respuesta inmediata del personal de procesos y v) mantenimiento; el cual se requiere para analizar los eventos y detener un proceso en caso de afectar la integridad del producto, esto con el fin de encontrar la causa raíz del problema.

4. Diseño de Experimentos

La principal parte de este trabajo de doctorado es experimental y está relacionado con interconexión del alambre de cobre sobre el tablero thin níquel, así como la comprensión y control de los fenómenos físicos y químicos involucrados para evitar la pérdida de producto terminado. El desarrollo de pruebas experimentales se realizó en una empresa de la región, así como parte de la caracterización en el Laboratorio de Semiconductores Microelectrónica y Nanotecnología (LSMN) del Instituto de ingeniería de la UABC.

4.1 Experimento de Bumps en el tablero.

Debido a la pérdida de rendimiento por la baja capacidad e fuerza del el tablero se realizaron experimentos con Bumps en el tablero., En la Figura 33, se muestra el proceso normal (a) y el proceso propuesto (b) empleando un Bump para conseguir mayor superficie de contacto en el tablero.

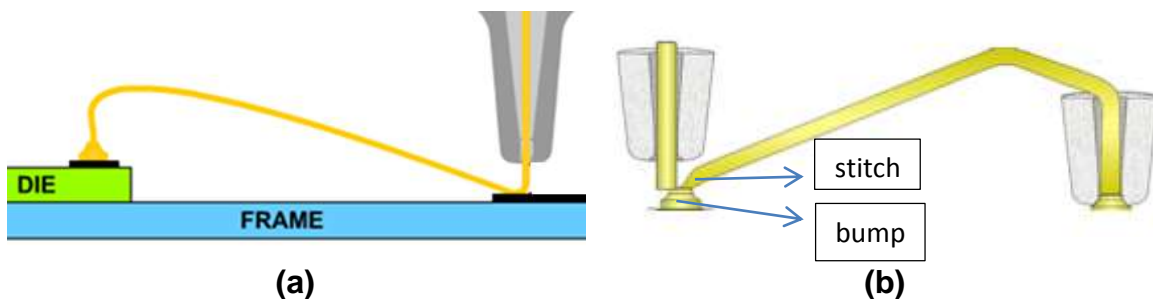


Figura 33. Representación comparativa del proceso actual Stitch en PCB (a) y el procedimiento propuesto Stitch en Bump (b). [2]

4.2 Experimento para analizar la afectación en la formación y corte del Bump con respecto a la energía aplicada al FAB.

Debido a la importancia de asegurar una excelente adherencia sobre el tablero, se diseñó un experimento para analizar el corte del Bump, con respecto a la energía aplicada sobre el FAB. El experimento se basó en la variación de la corriente ultrasónica aplicada, para esto se emplearon dos equipos, i) Procu Plus Modelo KNS y ii) Equipo de medición Nikon.

El proceso consistió en soldar a una corriente de 150mA y posteriormente 120mA. A ambas corrientes se realizaron las siguientes mediciones:

1. Altura de bola
2. Altura del Cone Angle
3. Altura del tail después del corte del Bump
4. Altura del hombro de bola

4.3 Experimento para evaluar el capilar de aluminio zirconio rubí

Después de varios intentos realizados para mejorar el rendimiento con el capilar actual, se decidió cambiar a una nueva tecnología de capilar de aluminio-zirconio-rubí, el cual representa una mejora aparente, dadas las propiedades de dicho material, tales como dureza y un menor tamaño de grano en comparación con el capilar anterior.

La Tabla 6, nos muestra el comparativo de dimensiones entre el capilar actual y el propuesto. Se trabajó con el nuevo proveedor de capilares, para realizar los ajustes pertinentes y poder trabajar con un capilar, en el que no fuera necesario realizar más ajustes.

Significant dimension comparison		
Capillary	KnS Mexican	SPT
Hole	1.0 mils	1 mils
Tip	3.6 mils	3.5 mils
CD	1.4 mils	1.4 mils
OR	0.5 mils	0.5 mils
FA	11 deg	11 deg
CA	20 deg	90 deg

Tabla 6. Comparativo de capilar Aluminio vs Rubí. [2]

Se llevaron a cabo pruebas en tres equipos y posteriormente se incrementó el número de equipos cargados, con el fin de incrementar el rendimiento de 99.55 % y la durabilidad del capilar a 1.2 millones de golpes.

4.4 Experimento para medir la estabilidad en diferentes cortes de Bump.

Este experimento se realizó para medir la estabilidad del corte de los Bump con respecto a la variación de USG en los equipos con el fin de encontrar una superficie de soldado estable, un tail recto en la punta del capilar y una ventana operacional más amplia en los parámetros de corte. El equipo empleado fue un Procu Plus Modelo KNS y un instrumento de medición Nikon. Se medirá la estabilidad en el corte del Bump al variar la cantidad de ultrasónico aplicada de 135 mA a 155 mA. A continuación se indican los tipos de corte de Bump a analizar:

4.4.1 Single Smooth

Es el tipo de corte más utilizado debido a su simplicidad y efectividad, consta de pocos parámetros del equipo, los cuales son: Bump Height, Separation Height y Smooth Distance. Se utilizó la receta actual de parámetros y se varió la corriente de ultrasónico de 135mA a 155mA con el fin de probar la estabilidad de corte.

4.4.2 Tail Tear

En esta opción sus parámetros principales son: Tail Tear Height, Tail Tear Length, Tail Tear Depth que los intercala realizando siete movimientos, los cuales se mantendrán sin cambios, solo se harán cambios en la corriente de ultrasónico de 135mA a 155mA con el fin de probar la estabilidad de corte.

4.4.3 Double Smooth

Otra alternativa nueva a probar, sus parámetros principales son: Bump Height 1, Separation Height 1 y Smooth Distance 1, Bump Height 2, Separation Height 2 y Smooth Distance 2, sin variar la receta de corte, al igual que los cortes anteriores solo se variara la corriente de ultrasónico de 135mA a 155mA con el fin de probar la estabilidad de corte.

4.4.4 Double Smooth en dirección del alambre

Con el fin de coincidir en la superficie de llegada del stitch sobre el Bump se evaluó el corte del Bump en dirección del alambre, sin modificar la receta del stitch sobre el Bump. En esta prueba no se modifica la receta del stitch sobre el Bump, sólo se corta el Bump en el sentido del alambre y se observa la estabilidad del corte del Bump y del stitch sobre el Bump.

4.4.5 Double Smooth en dirección del eje X

Con el objetivo de mejorar el rendimiento de 99.7%, se evaluó el corte del Bump en dirección del eje X, sin modificar la receta del stitch sobre el Bump y analizar la estabilidad tanto del corte como del tail, después del stitch sobre el Bump.

4.5 Experimento de tiempo de soldado de Bump.

Se realizó un estudio bajo las mismas condiciones de soldado, únicamente agregando un segmento de fuerza, con el fin de encontrar una mejor adherencia del Bump.

4.6 Experimento de temperatura de soldado.

Este experimento se realizó para analizar el comportamiento del tablero thin nickel a menor temperatura. Con el objetivo de reducir la formación de óxido sobre el tablero, se redujo la temperatura de 150°C a 130°C.

4.7 Experimento de aplicación de MTMV (por sus siglas en inglés machine to machine variation)

Mediante esta prueba, se evaluaron los siguientes puntos:

- Alineación del transductor (Posición CERO), el objetivo es encontrar una optimización para la alineación del transductor y que sea con el fin de encontrar un método repetible entre operadores.
- Calibración para reconocer el nuevo CERO.
- OBPF (On Bonder Personality Value).
- Validación de máquina.

4.8 Experimento para incrementar el factor de integración

Debido a la necesidad de incluir más funciones en los dispositivos en un menor espacio, los datos de nuevas tecnologías requieren menor espacio entre conexiones (pad pitch), y un área de soldado menor (pad opening), lo cual abre la necesidad de buscar herramientas que cumplan con los requerimientos de alta calidad para poder realizar las interconexiones de una manera confiable. Para esta nueva tecnología de pad pitch y pad opening, se buscar medir el nivel de splash generado por el capilar 1.4 CD y el nivel generado con el capilar de 1.2 CD.

4.9 Experimento por evento de Pad Peeling (Parámetros de soldado)

Durante el proceso para mejorar el rendimiento, se presentó un fenómeno conocido en la industria como pad peeling. Este fenómeno ocurre cuando se aplica una corriente USG alta sobre una área de contacto pequeña, a comparación con el diámetro de bola (masa), por lo que se concentra la corriente USG en el centro de la bola, desplazando el Al del pad y generando un alambre levantado. La figura 34 muestra el defecto reportado por el departamento de calidad, en el cual se observa que al realizar el intermetálico, la bola de cobre desplazó el aluminio del pad del dado de silicio en el eje Y, al tratar de formar el intermetálico, quedando solo el contacto en el eje X y provocando el desprendimiento del alambre.

Un BST(Ball Shear Test) arroja en promedio 16 g para una bola de 36 μm de diámetro (Ball size\Smile face), lo que equivale a una área de contacto de 1.578 mil² (milésimas cuadradas), esto dividido entre los 16 g, da como resultado un BST de 10.04 g/mil² y en la industria el estándar es de 11.04 g/mil² para el cobre. Este resultado es un indicativo de la posible falta de contacto entre la bola y la terminal de aluminio.

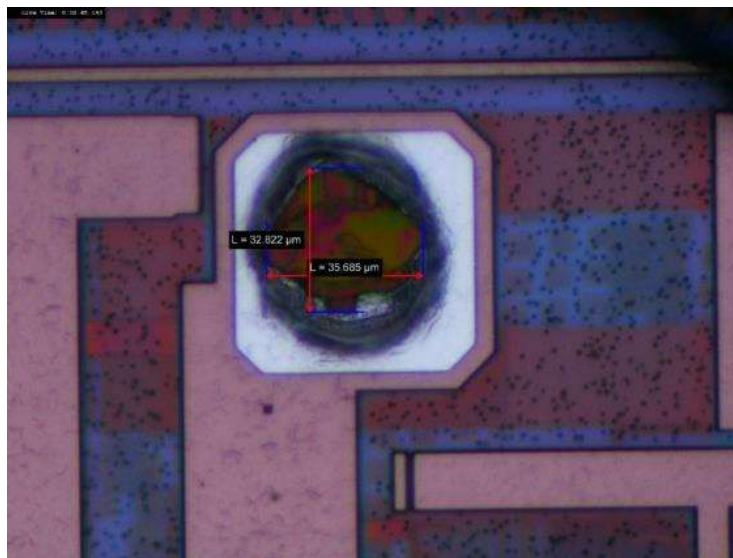
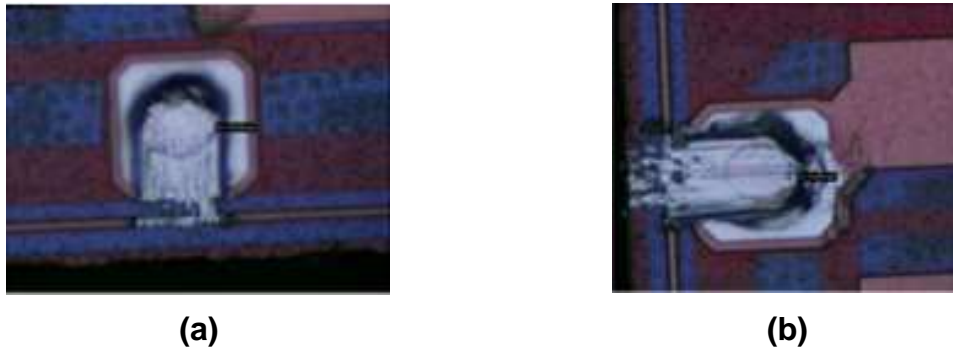


Figura 34. Imágenes de pad peeling en dados de silicio. [2]

En la figura 35 se puede observar el área de contacto entre el alambre de cobre y el pad de aluminio. El área del contacto es muy pequeña en comparación con el diámetro de la bola, formando un elipse en vez de tener un aspecto circular.



**Figura 35. Trazo que muestra una elipse después del ball shear.
(a) Ball shear en Y. (b) Ball shear en X. [2]**

Podemos notar que las imágenes de la figura 36 (recuadro rojo), tienen un aspecto similar a lo mostrado en la figura 35. Esto nos indica que la parte del splash de Al, se debe a un exceso de corriente USG.

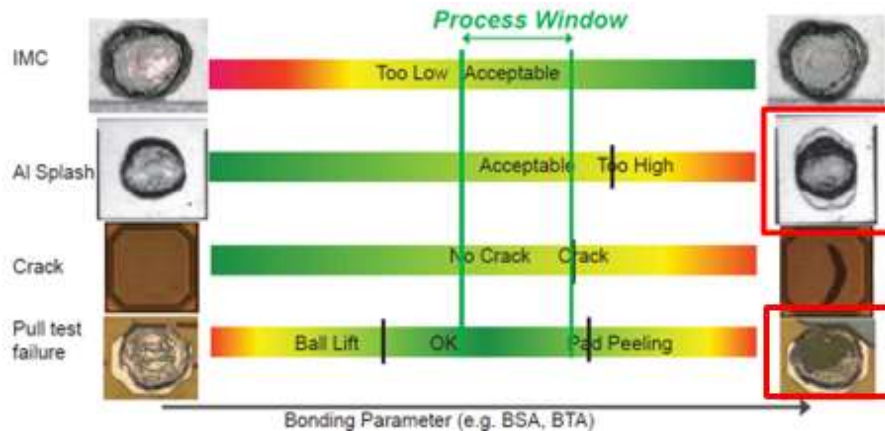


Figura 36. Ventana de operación aceptable en un proceso de wirebond de cobre. [13]

Por lo tanto, se diseñaron una serie de pruebas para encontrar la causa raíz del problema. Se emplearon los parámetros de producción para encontrar la ventana de operación del Pad Peeling y se hicieron corridas de acuerdo a la tabla 7 (Límites del proceso).

Bond Streng Adjust ▼	Ball (mA) ▼	Bump (mA) ▼
Parámetros de Producción	77	69
Corrida 1	85	75
Corrida 2	95	85
Corrida 3	105	95
Corrida 4	115	105

Tabla 7. Corridas de BSA para calcular la ventana de operación. [2]

4.10 Experimento de condición del alambre

La condición del alambre es un aspecto muy importante a cuidar, por lo que durante la investigación se observó una caída en términos de productividad y rendimiento, así como un incremento en el número de asistencias a los equipos por pérdida de tail. Principalmente en aquellos equipos que contaban con carretes de más de 6 días de exposición en el área de producción.

Hasta el año 2018 el nivel de utilización de los equipos fue muy alto, es decir casi al 100 %; sin embargo en 2019 el nivel bajó, debido a los requerimientos de producción, trayendo consigo que los carretes ganaran edad en producción. Debido a esto se evaluaron equipos que contenían carretes con diferentes días de exposición al medio ambiente con el objetivo de encontrar variaciones en la calidad del soldado y poder medir la respuesta del carrete en términos de productividad.

4.11 Experimento de condición del flowhead

De acuerdo a la experiencia previa con el proceso de cobre, uno de los ajustes más importantes es el del flowhead, debido a que dentro de esta pieza se forma el FAB. Durante el desarrollo del proyecto, se observó un mejor desempeño en los equipos nuevos y recién llegados a producción, en comparación con los equipos de 3 años o más de uso. Por lo tanto, se realizaron experimentos empleando bases nuevas y con un deterioro de 3 años para medir el nivel de impacto en la calidad y formación del FAB.

4.12 Experimento de condición del transductor

Se realizaron pruebas para demostrar el impacto que tienen los equipos con una antigüedad mayor a 6 años de operación, trabajando los 7 días de la semana las 24 horas, sobre los dados con tecnología de terminales menores a $55\mu\text{m}$. Para esto se midió el desgaste en términos de variación de posición del capilar al instalarlo dentro del transductor con las posiciones hacia dentro y fuera del transductor (figura 37). El equipo seleccionado para medir la variación en posicionamiento del capilar (offset) y con más de 6 años de edad, fue un 6KSPC275, con No. Serie: SP48258-1253349; Modelo: IConn ProCu Plus y con fecha de manufactura: 27 de mayo de 2014.

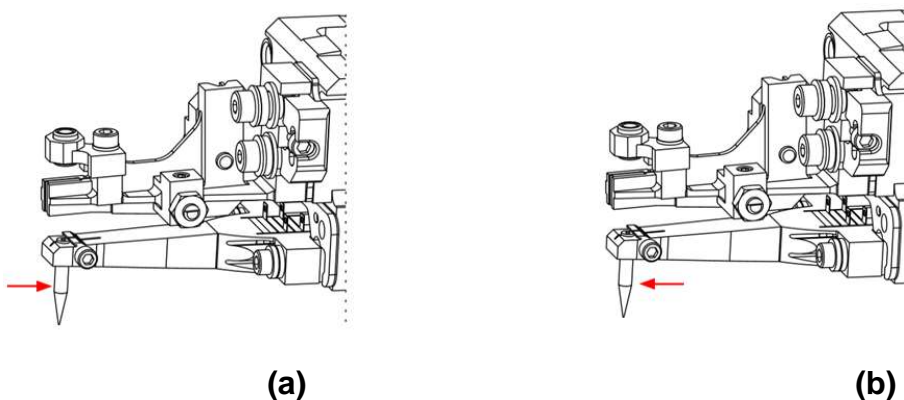


Figura 37. Medición del desgaste en transductor. (a) Capilar cargado hacia adentro. (b) Capilar cargado hacia afuera. [2]

5. Resultados y discusiones

5.1 Experimento de Bumps en el tablero.

En la figura 38 se muestra el proceso utilizando Bumps, donde observamos que el stitch descansa sobre el Bump, al igual observamos ninguna afectación sobre el tablero al realizar la conexión, obteniendo una ganancia de Yield de **99.45 % a 99.55 %**.

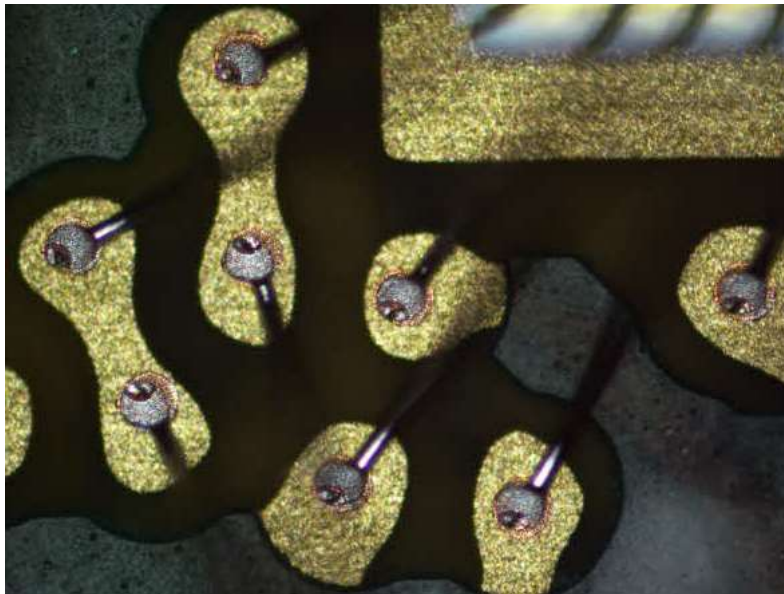


Figura 38. Proceso con Bumps. [2]

5.2 Experimento para analizar la afectación en la formación y corte del Bump con respecto a la energía aplicada al FAB.

Los resultados obtenidos para: i) Altura de bola, ii) Altura del Cone Angle, iii) Altura del Tail y iv) Altura del hombro de bola, empleando un USG de 150 mA y 120 mA, se muestran en la tabla 8, mientras que en la Fig. 39 se presentan las imágenes obtenidas con el microscopio óptico. Los resultados obtenidos muestran el efecto sobre la bola al incrementar la energía ultrasónica.

USG mA	Altura de Bola (μm)	Altura del Cone Angle (μm)	Altura del Tail (μm)	Altura de Hombro de Bola (μm)
120	9	12	3	4.69
150	6.5	14	8	6.73

Tabla 8. Respuesta del Bump al cambio de energía ultrasónica. [3]

El cambio en la altura de 6.5 a 9 μm, genera un cambio en la formación de la estructura del Bump, pues a mayor energía utilizada para soldar los Bumps en el tablero, la bola pierde altura y el cobre que antes formaba parte de la altura de la bola; se va introduciendo dentro del capilar para formar el hombro de bola. Debemos estar conscientes que la idea de formar una almohadilla metálica, es incrementar el área de contacto con el tablero y de esta forma reducir la pérdida de rendimiento por alambre levantado. Al incrementar la energía en los Bumps, se cambia la condición de corte del Bump, como se muestra en la figura 39, vemos que a medida que el Bump pierde altura, el hombro del Bump gana altura. Anteriormente, con el afán de evitar el levantamiento de los Bumps, anteriormente se comprimían con energía desmedida, pero esto a su vez generaba variación del loop, bolas de bastón y short tail. El controlar la compresión trajo un aumento de **Yield de 99.55 % a 99.6 %**

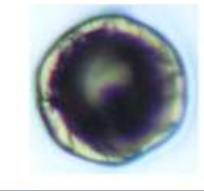
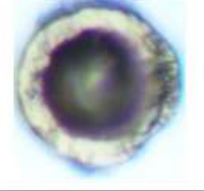
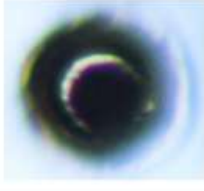
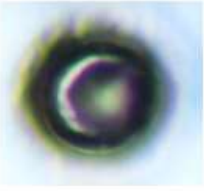
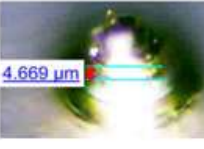
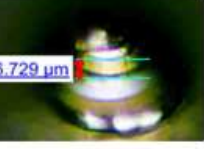
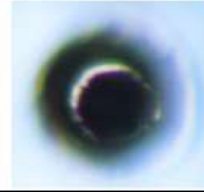
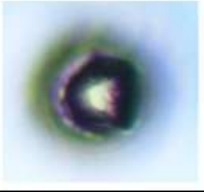
Posición	Corriente de USG 120mA	Altura (μm)	Corriente de USG 150mA	Altura (μm)
Bump		9		6.5
Cone Angle		12		14
Vista en ángulo de 45° grados		4.69		6.73
Tail después del corte del Bump		3		8

Figura 39. Efecto de la corriente de ultrasónico en el corte del Bump. [2]

5.3 Experimento para evaluar el capilar de aluminio zirconio rubí

Se trabajó en la implementación y calificación del uso de un capilar de aluminio-zirconio-rubí, dando buenos resultados en 3 equipos, mejorando la adherencia de los Bump y la durabilidad del capilar. Posteriormente, se incrementó a 20 equipos evaluados, mejorando el tiempo de vida de 1.2 millones de golpes a 1.8 millones de golpes y una mejora de rendimiento del 0.03 %. Finalmente, se realizó la implementación en 100 equipos; pero para sostener este volumen fue necesario el aumento de 5 veces el número de capilares consumidos, lo cual llevó al proveedor a tener variaciones en el proceso, afectando las características y propiedades del capilar, ya que empezó a deformarse desde los 0.8 Millones de golpes (figura 40).

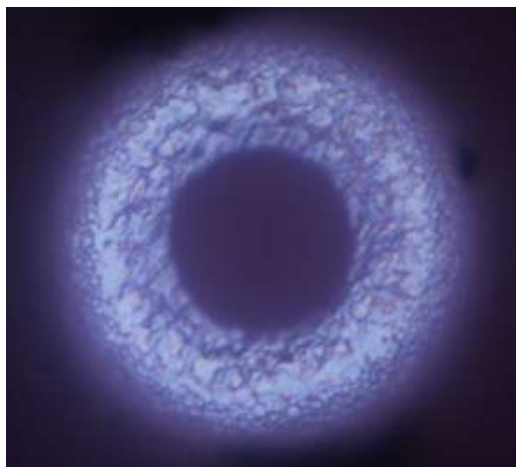


Figura 40. Capilar de aluminio zirconio rubí. [2]

La deformación generó defectos debido a obstrucciones en el flujo del alambre, como se muestra en la figura 41.

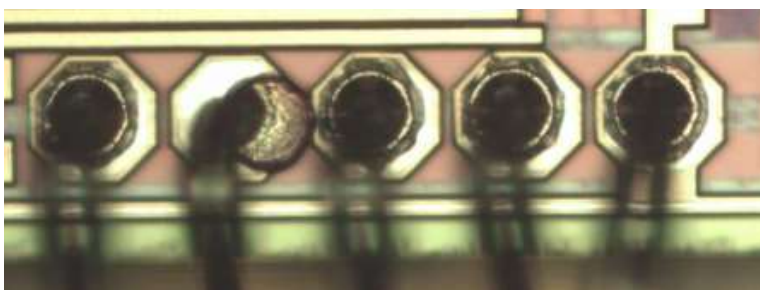


Figura 41. Atoramiento de tail en capilar. [2]

En la figura 42 se puede observar una caída de rendimiento en los meses de junio, julio y agosto del 2017 una caída de Yield de 99.60 % a 99.45 %, posteriormente se presenta una recuperación y mejora de septiembre hasta noviembre. La recuperación se debe a que se regresó al capilar anterior, pero con un nuevo enfoque, realizándose experimentos exitosos como: i) aumento de tiempo de soldado en los Bump con terminales de VIA, ii) la implementación de nuevos cortes de Bump y iii) la reducción de temperatura de soldado.



Figura 42. Caída de rendimiento de Junio a Agosto. [2]

5.4 Experimento en cortes de Bump

5.4.1 Single Smooth

Es el método actual y más utilizado dado su sencillez, pues consta de los siguientes movimientos: i) bump height, ii) separation height, iii) smooth speed/smooth USG. En la figura 43 (a), se muestra los movimientos que realiza el equipo para formar el Bump. Los resultados obtenidos, mostraron que los equipos tienen variación en el corte del bump, dejando la superficie poco uniforme en el corte, después de aumentar el ultrasónico como se muestra en la figura 43 (b).

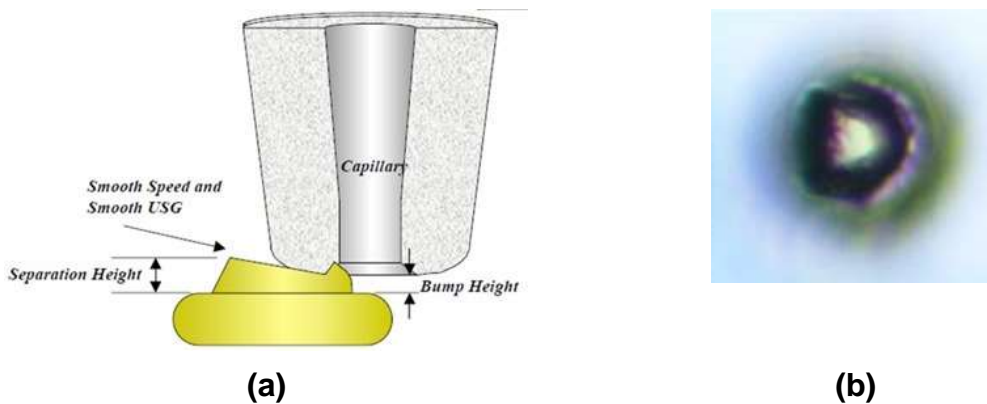


Figura 43. Corte de Bump en modo Single Smooth. (a) Movimientos del capilar. (b) Vista superior del corte. [21, 2]

5.4.2 Tail Tear

Se evaluó este nuevo método para controlar la superficie del Bump, el cual consta de 6 movimientos que el equipo debe realizar para poder formarlo: i) Tail-Tear Height, ii) Tail-Tear Length-1, iii) Tail-Tear Depth-1, iv) Tail-Tear Length-2, v) Tail-Tear Depth-2 y vi) Tail-Tear Height-2. La figura 44 indica el trazo que realizó el equipo para formar el Bump, así como la estabilidad del corte al variar el ultrasónico, obteniéndose poca afectación tanto en altura y posición del tail, como después del corte.

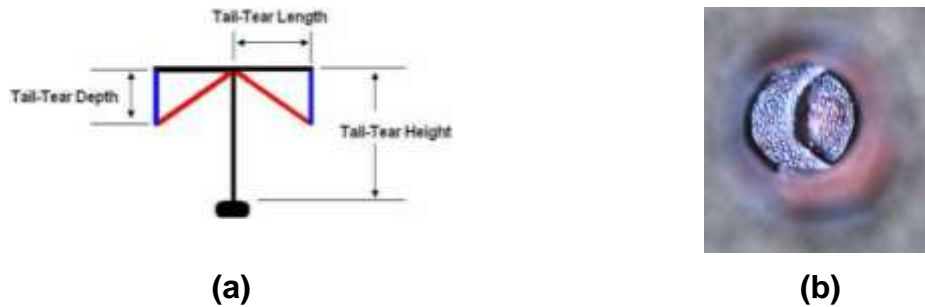


Figura 44 Corte de Bump Tail Tear. (a) Movimientos del capilar.
(b) Vista superior del corte. [21,2]

5.4.3 Double Smooth

Como se muestra en la figura 45, este tipo de corte de Bump consta de 4 movimientos del equipo para ser formado: i) Separation height, ii) bump height, iii) separation height-2 y iv) bump height-2.

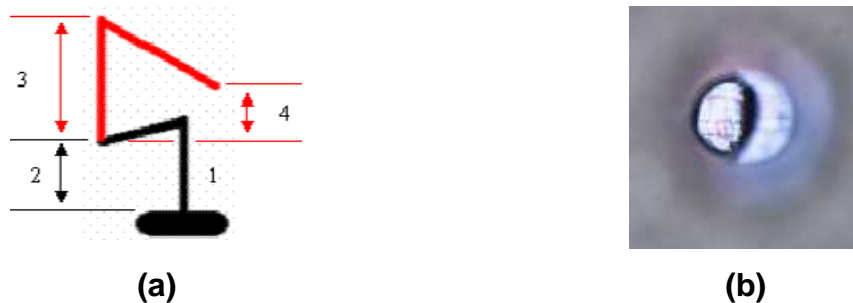


Figura 45 Corte de Bump en Double Smooth.
(a) Movimientos del capilar. (b) Vista superior del corte. [21,2]

Dada la estabilidad del corte del Bump observada con el Double Smooth, se realizaron pruebas de respuesta en corte a lo largo de la vida del capilar y se obtuvieron resultados aceptables, debido a que es un corte plano, sin variación durante la vida útil del capilar y asegura un tail recto para el siguiente punto de soldado. En la figura 46 se muestra el corte del bump utilizando el Double Smooth.

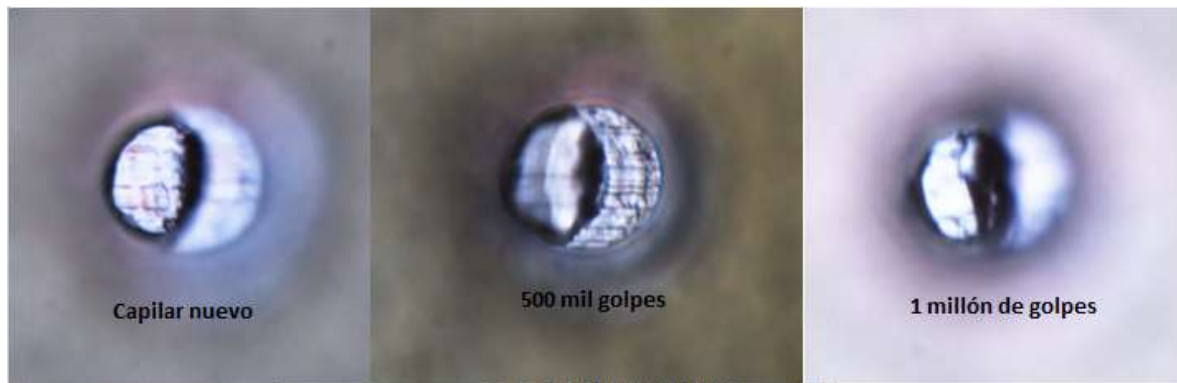


Figura 46. Corte de Bump Double Smooth, durante vida útil de capilar. [2]

5.4.4 Experimento Double Smooth en dirección del alambre

Los resultados obtenidos por el corte en dirección del alambre, se muestran en la figura 47, indicando que el stitch es aparentemente estable y que el equipo muestra una menor estabilidad al cortar el Bump, afectando la calidad del tail después del corte.



Figura 47. Stitch sobre Double Smooth, cortado en dirección del alambre. [2]

5.4.5 Experimento Double Smooth en dirección del alambre cortando el Bump solo en el eje X

De acuerdo con los resultados obtenidos (figura 48) se observa: i) una mayor estabilidad durante el corte del Bump cuando es cortado en dirección X, ii) mayor estabilidad al aumentar el número de equipos cargados con la receta y iii) una mejora de Yield a 99.75%.



Figura 48. Stitch sobre Double Smooth, cortando en X. [2]

Al realizar un corte en dirección del eje X, fue posible evaluar el desgaste del capilar. En la figura 49 se muestra el corte realizado y se puede observar el desgaste del capilar después de 1.2 millones de golpes. Los resultados obtenidos, indican que no se presentan afectaciones en las dimensiones del capilar en el eje X, lo que es un indicativo que el desgaste del capilar es en forma circular.

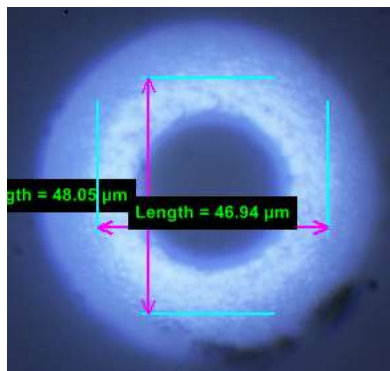


Figura 49. Desgaste de capilar con corte en el eje X. [2]

5.5 Experimento de tiempo de soldado de Bump

En la figura 50 se muestra que la receta original del Bump con un solo segmento de scrub (Seg-1), el cual acumula un tiempo de soldado de 10 milisegundos, mientras que en la figura 51 se muestra el segmento original de scrub con solo fuerza (Seg-2) y posteriormente un segmento de fuerza (Seg-3), lo cual incrementó el tiempo de soldado del Bump a 25 milisegundos y además presentó mejor adherencia en los Bumps sobre el tablero.

Parameter	Seg-1	Seg-2	Seg-3	Seg-4	Seg-5	Seg-6	Seg-7	Seg-8	Seg-9	Seg-10
Mode	Scrub	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
USG Current	130.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	115.0	0.0	0.0	0.0
Time	10.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	10.0	1.0	1.0	1.0
Force	25.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	25.0	3.0	3.0	3.0
USG Ramp Up	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Force Ramp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Scrub Cycles	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Scrub X Amplitude	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
Scrub Y Amplitude	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
Scrub Frequency	300	100	100	100	100	100	300	100	100	100

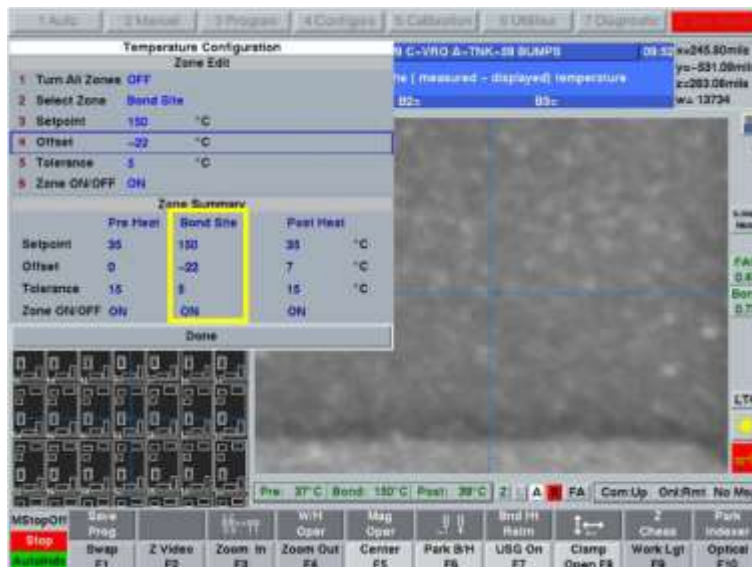
Figura 50. Tiempo de soldado de Bump correspondiente al rendimiento de 99.6 %. [2]

Parameter	Seg-1	Seg-2	Seg-3	Seg-4	Seg-5	Seg-6	Seg-7	Seg-8	Seg-9	Seg-10
Mode	Off	Scrub	Force	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
USG Current	135.0	0.0	140.0	0.0	0.0	0.0	115.0	0.0	0.0	0.0
Time	10.0	1.0	16.0	1.0	1.0	1.0	10.0	1.0	1.0	1.0
Force	25.0	25.0	30.0	3.0	3.0	3.0	25.0	3.0	3.0	3.0
USG Ramp Up	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Force Ramp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Scrub Cycles	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
Scrub X Amplitude	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
Scrub Y Amplitude	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
Scrub Frequency	100	350	100	100	100	100	300	100	100	100

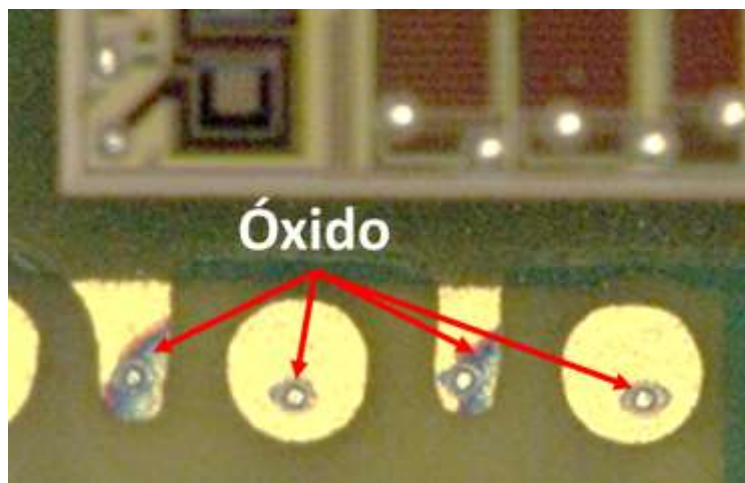
Figura 51. Tiempo de soldado de Bump correspondiente al rendimiento de 99.75 %. [2]

5.6 Experimento de temperatura de soldado

En la figura 52, se muestra la configuración de la temperatura inicial utilizada, la cual está ajustada a 150 °C (a), y se puede observar la formación de óxido en el tablero (b).



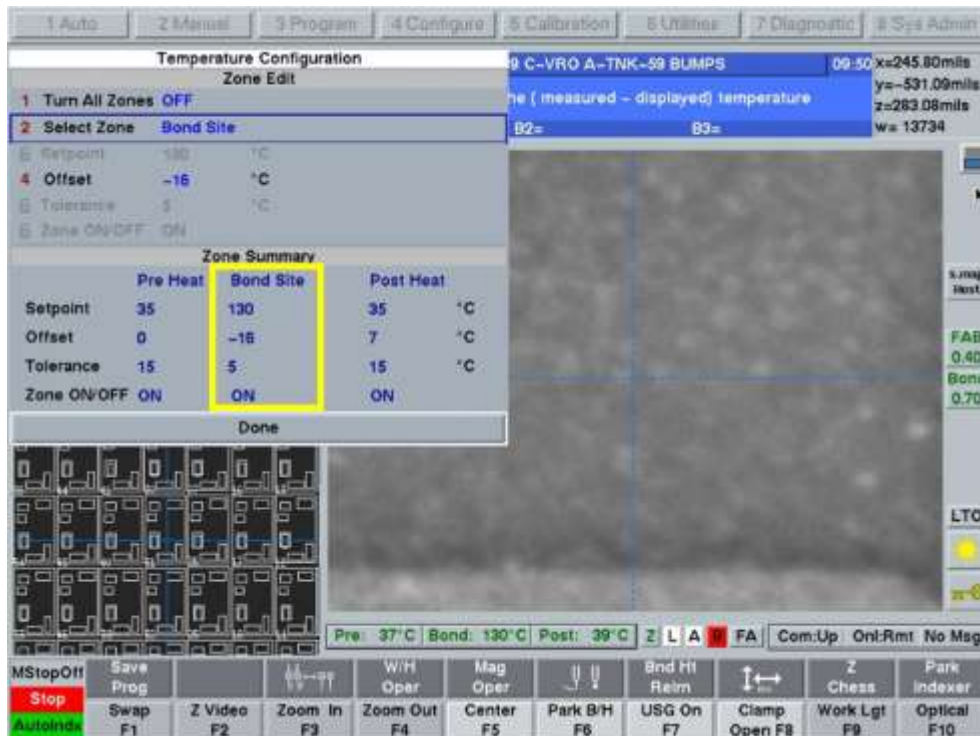
(a)



(b)

Figura 52. Temperatura de 150 °C correspondiente al rendimiento de 99.6% (a). Oxidación en el tablero debido al uso de esta temperatura (b). [2]

Por otro lado, en la figura 53 (a) se muestra que al reducir la temperatura a 130 °C, los tableros no presentaban formación de óxido (b). Los resultados obtenidos para este experimento indicaron que se obtuvo una pérdida de ball shear de ~2 g, lo cual nos ayuda a reducir la cantidad de alambre levantado por cada Bump soldado. Con este resultado se demuestra que el nivel de oxidación en los materiales está relacionado a la temperatura.



(a)



(b)

Figura 53. Temperatura de soldado ajustada a 130°C (a).
Tablero sin presencia de óxido (b). [2]

5.7 Experimento de aplicación de MTMV

El método de alineación del transductor está basado en lograr que el capilar impacte de forma plana la superficie donde ejecutara el soldado. El capilar es un tubo que impacta el tablero y solda las conexiones en diferentes ángulos, de esta forma, estando perpendicular a la superficie logramos que se ejerza la misma presión en cualquier ángulo que sea necesario soldar el alambre. Esta calibración es conocida como calibración cero, y es crítica ya que de esta se generan la mayoría de los ajustes del equipo. Por lo tanto se implementó un método que logra reducir al mínimo el error del personal de mantenimiento que lo esté ejecutando.

Anteriormente solo se tenía la referencia del manual de usuario del equipo, el cual menciona que se debe tomar como referencia las áreas del transductor (de lado a lado, de enfrente y atrás). Empleando un calibrador, se mide de lado a lado del transductor y la diferencia debe ser menor a 1 milésima de pulgada entre el punto 1 y 2 en el eje Z del equipo y cuando se logra, se asigna el valor. En la figura 54 se muestra el ajuste y se indica: A) Calibrador, B) Transductor y C) Heater Block de 250 milésimas de pulgada en espesor.

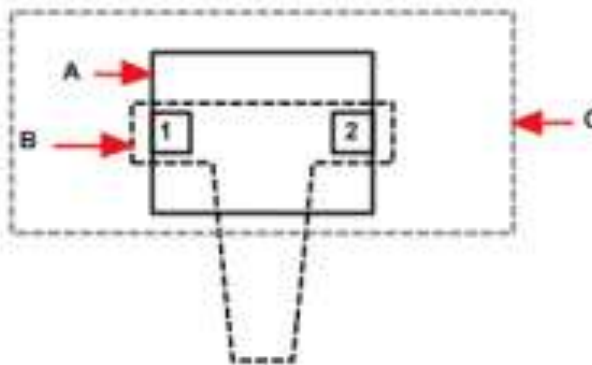


Figura 54. Ajuste de lado a lado del transductor. [2]

Para realizar el ajuste frontal y trasero del transductor, se coloca el calibrador en el centro del transductor y se varía la posición del heater block hacia arriba y abajo, hasta encontrar una diferencia entre el punto 1 y el punto 2 del transductor, menor a una milésima de pulgada, una vez encontrada la posición, se asigna el valor de la calibración como el punto cero. En la figura 55 se observan los componentes de la calibración A: Transductor, B: calibrador de alineación de transductor, C: Heater Block de 250 milésimas de pulgada, D: Cristales del transductor.

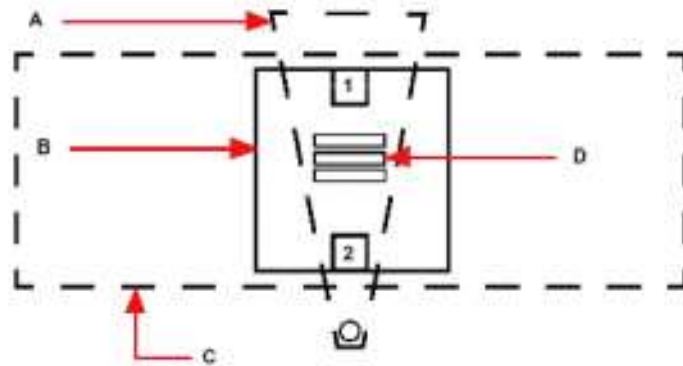


Figura 55. Ajuste de enfrente y atrás del transductor. [2]

Con el paso del tiempo y al hacer varias alineaciones en el mismo equipo y el mismo operador, se encontró que el método estaba lejos de ser reproducible, ya que la variación del operario por la falta de información acerca de la forma curva del transductor hace que 1 milésima de diferencia al tomar los puntos, modifique los datos obtenidos anteriormente por el mismo operador y por lo tanto, se modifique la posición cero. Es por esto que se desarrollo un método que obtenga el mínimo error del personal de mantenimiento que ejecuta.

El método desarrollado e implementado consiste en realizar los ajustes por coordenadas y de esta forma se logra eliminar el error visual entre el personal que ejecuta la calibración donde asignamos el punto cero del equipo. La ventaja de utilizar este método es que se puede llegar al mismo punto siempre gracias al uso de las coordenadas. La única variante en este caso sería la variación de lectura de los lectores de posición del equipo (“encoders”, scale and readers).

El proceso, consiste en realizar el cálculo de los siguientes puntos utilizando un calibrador digital vernier:

1. Centro del transductor.
2. Frente del transductor. Aproximadamente 950 milésimas de pulgada, medidos desde la punta del transductor, que es la coordenada que coincide con el calibrador perpendicularidad para asignar el valor.
3. Atrás del transductor. Aproximadamente 1320 milésimas de pulgada.

En la fig. 56 se muestra la diferencia entre realizar el método de la forma original y la nueva desarrollada, con el fin de eliminar la variación en la colocación del calibrador y poder calcular el centro del transductor para evitar el error y de esta forma encontrar un cero repetible.

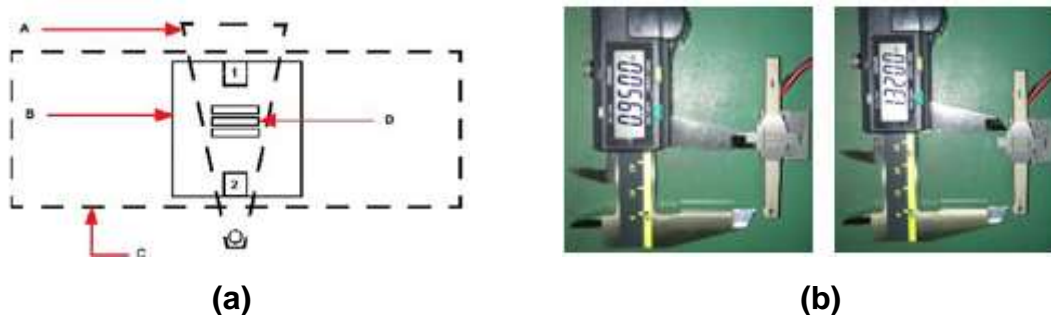


Figura 56. Cambio de método de alineación del transductor 100% reproducible. (a) Manual de mantenimiento. (b) Posiciones definidas. [21,2]

Al término de la alineación del transductor se requiere realizar los siguientes ajustes para lograr una respuesta óptima en los equipos:

- XYZ Servo motor
- MHS Clamp calibration
- Calibration de fuerza
- Wire Clamp adjustment
- EFO Wand Position Adjustment
- On Bonder Personality Factor

Las calibraciones de servomotores, MHS Clamp y fuerza son ajustes que el equipo realiza con ayuda de calibradores y apoyado por el operario, después de una exhaustiva investigación no se encontraron áreas de oportunidad que ayudaran a estas tres calibraciones, por lo que solamente se profundizo en las calibraciones: a) Wire Clamp, b) EFO Wand Position y c) OBPF.

- a) **Wire Clamp**: básicamente se entrena al personal para comprender el funcionamiento de este mecanismo, ya que es encargado de la disposición del alambre hacia el capilar y es un ajuste que no cuenta con un gauge establecido, es completamente visual y únicamente se puede entrenar al personal y certificarlo para realizar el ajuste correcto (figura 57).

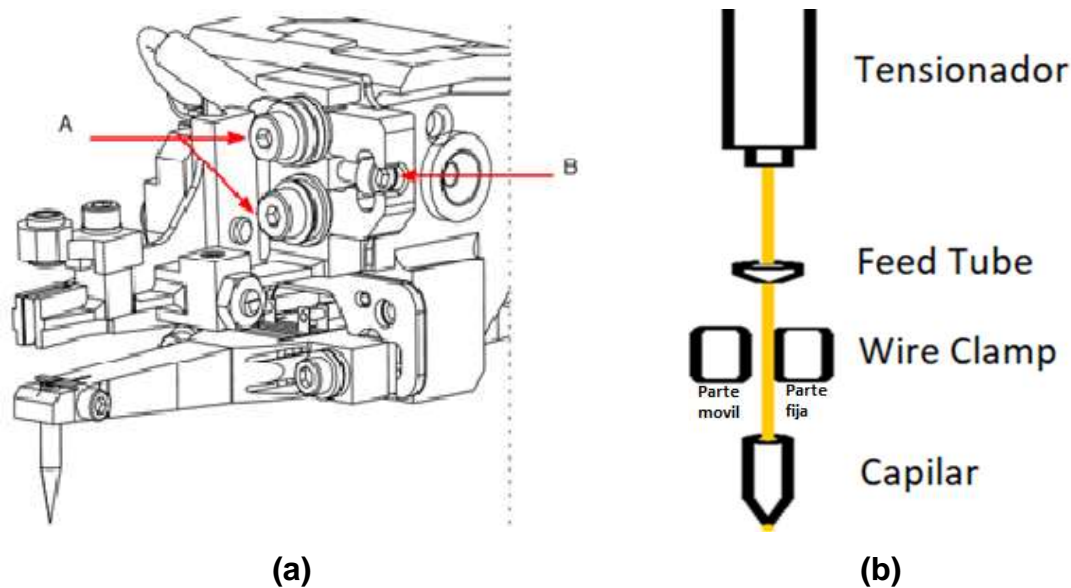


Figura 57. Ajuste de Wire Clamp. (a) Manual de mantenimiento A) tornillos para fijar el Wire Clamp y B) tornillo para mover la posición del Wire Clamp en el eje X. (b) Ajuste fino óptico. [21,2]

Básicamente el ajuste del wire clamp consiste en que por medio de la pieza llamada feed tube (Fig 57 (b)), se guía el alambre a la parte fija del Wire Clamp, y la parte móvil deberá ser ajustada con una apertura del doble del diámetro del alambre. Sin el feed tube no es posible lograr esta separación cuando el alambre está presente y por lo tanto el ajuste de la apertura del Wire Clamp se debe realizar de forma mecánica. Es importante mencionar que el alambre debe presentar una posición vertical en operación normal del equipo como se ilustra en la figura 57 (b).

Finalmente, algunas condiciones que se encontraron para identificar el mal funcionamiento del mecanismo en operación son las siguientes:

- Si el alambre forma curvaturas entre el wire clamp y el capilar, indica un problema en los cortes del alambre, usualmente en los stitch.
- Si el alambre forma curvaturas entre el tensionador y el feed tube, indica que el tensionador esta algo mal en sus componentes internos (normalmente 4) ya sea que requieran limpieza, estén mal orientados o necesiten reemplazo.

b) EFO Wand Position Adjustment: Se capacitó al personal para llevar a cabo la instalación correcta del flowhead y también para detectar cuando está fuera de especificación, lo cual pone en riesgo al Yield, debido a la variabilidad de respuesta.

c) OBPF (Portabilidad de USG): Debido a los nuevos retos de rendimiento que requieren equipos con menor variación entre ellos, se implementó el método OBPF (On Bonder Personality Factor), el cual es una nueva forma para controlar el desplazamiento en forma de vibración ultrasónica, la cual se basa en la integridad del FAB y el generador ultrasónico, para tener la misma vibración del capilar en diferentes equipos de wirebond, ya sean de cobre u oro. La portabilidad depende de la formación del FAB para obtener una respuesta USG similar y controlar las variables que generan el fenómeno de oxidación, para tener una respuesta estable.

En la figura 57, el eje X representa la corriente que se le aplica al transductor y el eje Y representa la capacidad de respuesta a la compresión. Con esta relación entre corriente de USG y compresión, se traza la recta que representa la pendiente ideal para un equipo de wire bond ProCu Plus. Donde los puntos representan la respuesta del equipo al que se le está realizando el ajuste.

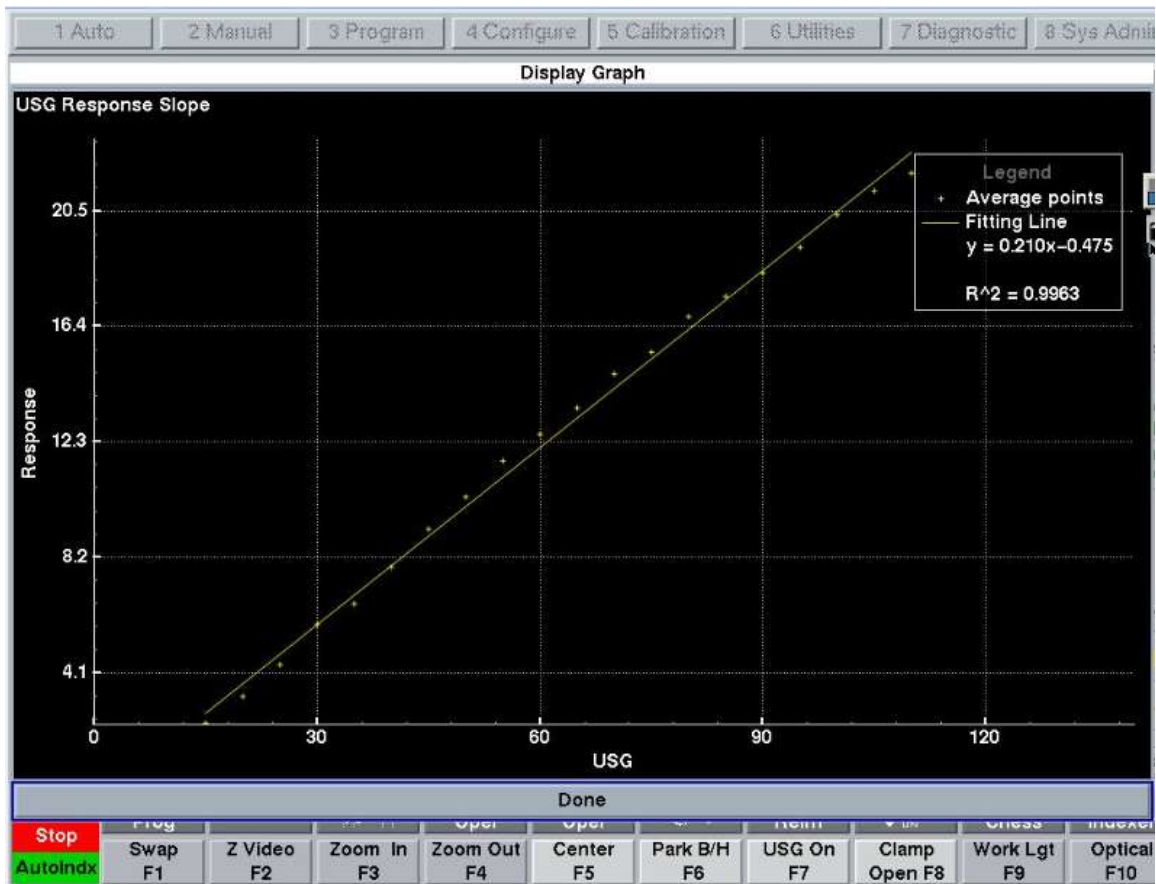


Figura 57. Respuesta de compresión al variar USG. [13]

El funcionamiento del equipo consiste en formar FAB's constantes y al aplicar una fuerza constante, lo único que varía es la corriente ultrasónica, de esta forma el equipo detectará un incremento en la corriente de ultrasónico para comprimir el FAB y obtener la bola, la cual se irá comprimiendo con un error de USG controlado con respecto a la línea continua (ideal), donde posteriormente el equipo calculará el error y si es mayor que lo esperado cambiará el factor de OBPF para cumplir con la recta. Esto lo realiza en 5 repeticiones y de no poder controlar el error, el equipo sugerirá algún tipo de ajuste como:

- Corregir la posición del flowhead si es cobre, o EFO height para alambre de oro
- Calibración de servo Z y fuerza
- Alineación de transductor
- Cambio de sensor de fuerza

Una vez completada la calibración del OBPF, se requiere una validación para asegurarse que los ajustes realizados son efectivos para la respuesta final del equipo. Se realiza una validación de los resultados con una respuesta conocida, utilizando un capilar SPT dorado, alambre de heraeus de 0.8 milésimas de pulgada y soldando en un dado de silicio.

En la figura 58, se muestra un equipo IConn ProCu Plus de la marca Kulicke and Soffa, el cual presenta un comportamiento esperado de acuerdo al proceso controlado y en óptimas condiciones. El equipo reduce el diámetro de bola de 47 a 43 μm , con un CPK de 1.33, lo cual indica que se encuentra dentro de los límites de control, el proceso está centrado y es posible trabajar con un rendimiento mayor a 99.7 %.

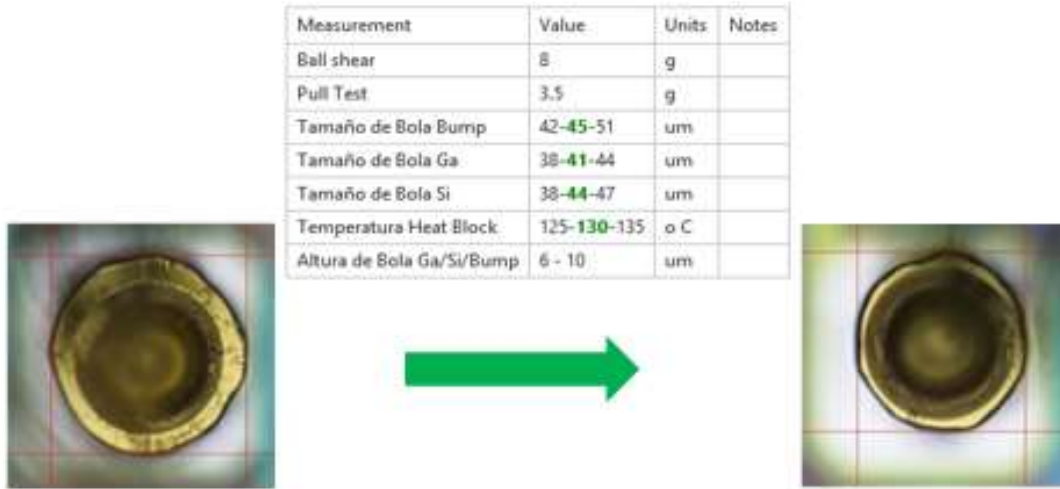
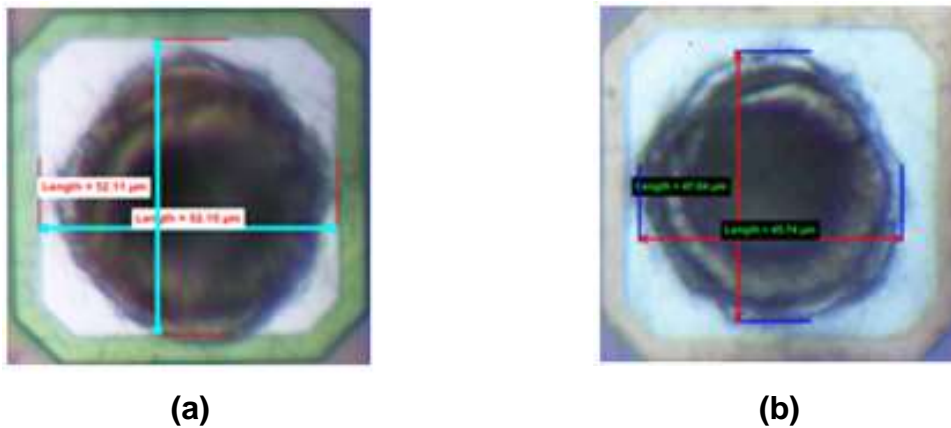


Figura 58. Confirmación de MTMV. [2]

5.8 Experimento para incrementar el factor de integración

El cambio de herramienta de 1.4 a 1.2 CD (Chamfer Diameter) se muestra en la figura 59, se puede observar una ganancia en la disminución de splash, lo que permite una ventana operacional más grande en términos de posicionamiento de bola, dentro del marco de la terminal.



**Figura 59 Comparativo de splash.
(a) Splash capilar 1.4 CD. (b) Splash capilar 1.2 CD. [2]**

Se observó que para el capilar de 1.4 CD obtenemos un Splash optimizado de 52 μm y para el capilar de 1.2 CD un Splash optimizado de 48 μm . Esto nos da una ventaja en el capilar de 1.2 CD, en cuanto a variación del punto de soldado ya que para un pad de 55 μm solo podríamos permitir una variación de 3 μm para tocar el marco de la terminal, para lo cual en el capilar de 1.2 CD podríamos permitir una variación del punto de soldado de 7 μm . Esto ayudará a producción con una ventana adecuada para la variación natural del punto de soldado, la cual está dentro de lo recomendado en la industria semiconductora.

Al igual se observó que la ventana de parámetros de soldado es más estrecha para el capilar de 1.2 CD comparándola con la del capilar de 1.4 CD, debido a la menor área de contacto del alambre con la terminal, lo cual sería una desventaja.

5.9 Experimento por evento de Pad Peeling (Parámetros de soldado)

Se realizaron las pruebas mostradas en la tabla 9 para poder encontrar la causa raíz del problema del pad peeling, seleccionando tres equipos reportados con este problema. Sin embargo, no se pudo replicar la falla en ninguno de los equipos con los parámetros de producción ni con las corridas.

Bond Streng Adjust <input type="button" value="v"/>	Ball (mA) <input type="button" value="v"/>	Bump (mA) <input type="button" value="v"/>	Pad Peeling <input type="button" value="v"/>
Parámetros de Producción	77	69	No
Corrida 1	85	75	No
Corrida 2	95	85	No
Corrida 3	105	95	No
Corrida 4	115	105	No

Tabla 9. Muestra las corridas de BSA para calcular la ventana de operación. [2]

Posteriormente se decidió cargar un cuarto equipo y se realizaron pruebas de pull test después de 500 mil golpes, y finalmente fue posible replicar la falla, ya que apareció el pad peeling en 2 de los 4 equipos. En la figura 62 (a) se visualiza la punta de un capilar nuevo y en la figura 62 (b) se visualiza la punta del capilar con 500 mil golpes con desgaste.

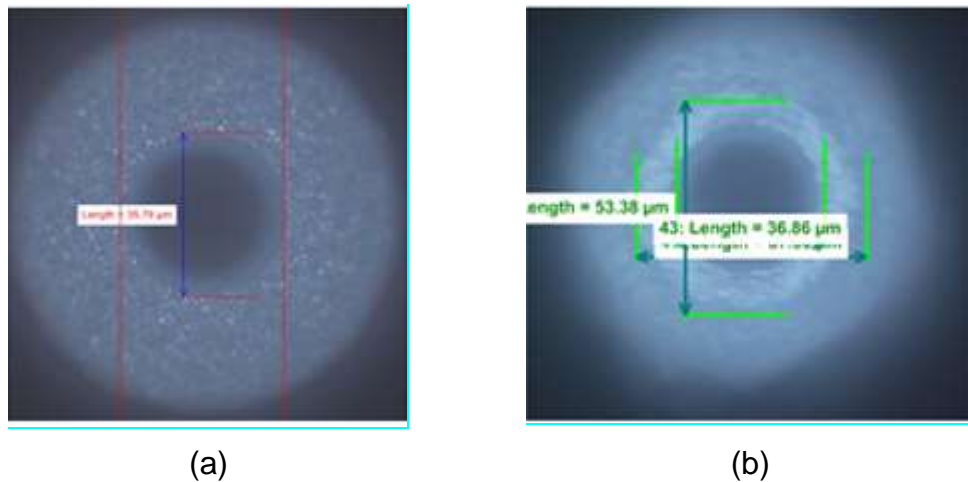


Figura 60. Muestra el desgaste interno del capilar después de los 500 mil golpes. (a) Capilar nuevo. (b) Capilar con 500 mil golpes. [2]

Después de fallar 2 equipos de los 4 cargados, se realizaron experimentos en uno de los equipos que falló intentando corregir el problema con las siguientes acciones:

- Material sin plasma.
- Drenado de forming gas por más de una hora.
- Calibración de los flowheads.
- Incremento de tiempo del EFO (Electronic Flame Off) de 210 a 215 μ sec. Al aumentar el tiempo de la corriente aplicada, también es una forma de incrementar el FAB.
- Reducción del USG de 85 mA a 70 mA

Desafortunadamente, no se corrigió el problema con las acciones mencionadas y únicamente se corrige con el cambio de capilar. De acuerdo con el desgaste en el capilar mostrado en la figura 62 (b) observamos que se está estresando la parte interna del capilar modificando el CD de 1.4 milésimas de pulgada, por lo cual se necesita incrementar el volumen de bola para poder soldar con la parte externa del capilar, para de esta forma aumentar su durabilidad.

5.9.1 Optimización de receta para incrementar el FAB

Se realizaron las siguientes actividades con el fin de buscar una receta adecuada para el tamaño del capilar, haciendo uso de una guía proporcionada por el proveedor mostrado en la tabla 10.

Wire	0.8 mil			
Pad Thickness	≤ 1.0 μm	> 1.0 μm ≤ 2.0 μm	> 2.0 μm	
BPO	45 ~ 49	48 ~ 52	51 ~ 55	
TBD	BPO-6	BPO-9	BPO-12	
Level 1 Parameters	HA	0 (-5 to 5)		
	BSA	% for K&S Cupra caps, (± 20% from nominal)		
	BFA	0 (-2 to 2)	1 (0 to 3)	2 (0 to 4)
	DA2	5 (2 to 13)		
	STA	ProCu5: 2 (0 to 8); ProCu4: 4 (0 to 10)		
	YSR	0 (-4 to 4)		
	SFA	-10 (-14 to 0)	-5 (-10 to 3)	0 (-3 to 10)
	.prm	08_thin	08_med	08_thick

Wire	TBD (um)	Actual ball dia	Capillary PN	H (um)	CD (um)
0.6 mil	26 ~ 30	27 ~ 32	To be assigned	18	22
0.7 mil	30 ~ 36	31 ~ 39		21	26
0.7 mil	32 ~ 38	33 ~ 41		23	27
0.8 mil	34 ~ 42	35 ~ 46		24	28
0.8 mil	38 ~ 44	39 ~ 48		24	29
0.9 mil	40 ~ 50	42 ~ 54		28	32

Tabla 10. Optimización de parámetros de first bond recomendada por proveedor. [13]

Se inició con la optimización siguiendo la tabla 10, recomendada por el proveedor y la cual ayuda a asignar una receta predeterminada de acuerdo con las características de alambre, capilar y la terminal del dado. En nuestro caso se utilizó un alambre de 0.8 milésimas de pulgada, con una terminal de espesor de Al de 2.8 μm , y una terminal de BPO (Bond Pad Opening) de 55 μm . Notamos que 1.4 CD equivale a 35 μm , lo que está fuera de las dimensiones del capilar recomendado de acuerdo a la tabla 10.

Se busca capilar alterno en ese momento pero no fue posible debido a los volúmenes de producción requeridos, no habría los suficientes, para lo cual se diseñó receta para trabajar en los límites del BPO con el capilar de 1.4 CD, a continuación se enumeran los pasos que se siguieron para la optimización:

1. Para un TDB (Target Ball Diameter) de 43 μm tenemos un Al splash cercano a 55 μm que es nuestro BPO.
2. Reducir TBD a 40 μm . Esto brinda un Al splash de 50-51 μm .
3. Incrementar EFO time al 25 % para tener margen al aplastar la bola. Ball Height/Ball Size de 10 μm /41 μm .
4. Ajustar DA2 (Diameter Adjust 2) de 5 a 0. Un valor alto en DA2 muestra más Al splash reduciendo el remanente de Al debajo de la bola.
5. Ajustar YSR (Y Splash Reduction) de 4 a 2. Esto es para balancear el Al splash X,Y y obtener un soldado circular alrededor de la bola.
6. Ajustar el rango de prueba de BSA a 65, 75, 85 mA; debido a que el Al splash se sale de control después de 95 mA.

En la figura 63, se ilustran los pasos del número 1 al 6 donde se logró una receta con ventana operacional aceptable, en base a la respuesta recomendada por el proveedor (figura 37), que ilustra los límites y la ventana operacional aceptable de wirebond para cobre, así como también se tomaron en cuenta pruebas de pull test, ball shear y los trazos que ilustran el área de contacto entre la bola y la terminal después de ball shear con el objetivo de encontrar un trazo circular y una penetración plana en la terminal.

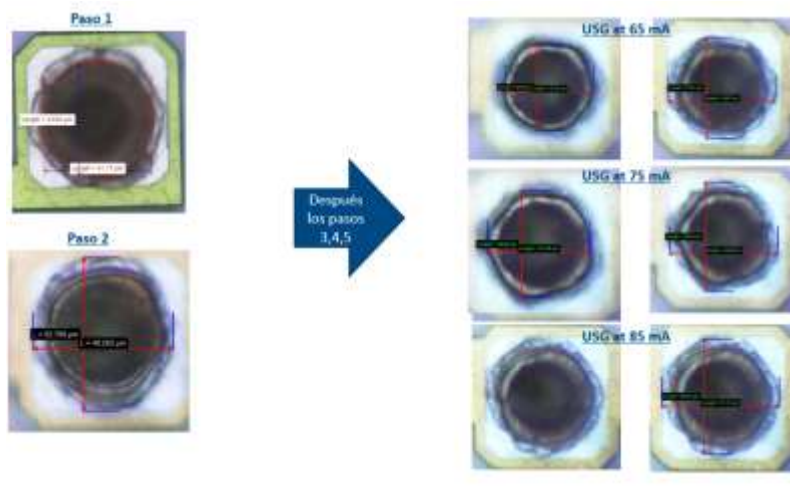


Figura 61. Ventana optimizada siguiendo las tablas y guías del proveedor. [2]

7. Realizar prueba de pull test a todos los alambres de 7 componentes para cada corrida: 65, 75, 85 mA.
8. Soldar con capilar más de 500 mil golpes para asegurarse de que NO exista Pad Peeling y que no exista desgaste del capilar.

En la figura 64 observamos la respuesta entre el capilar nuevo y después de 500 mil golpes operando en el rango operacional encontrado como óptimo. No se encontró pad peeling con capilar nuevo ni durante su vida útil a más de 500K golpes.

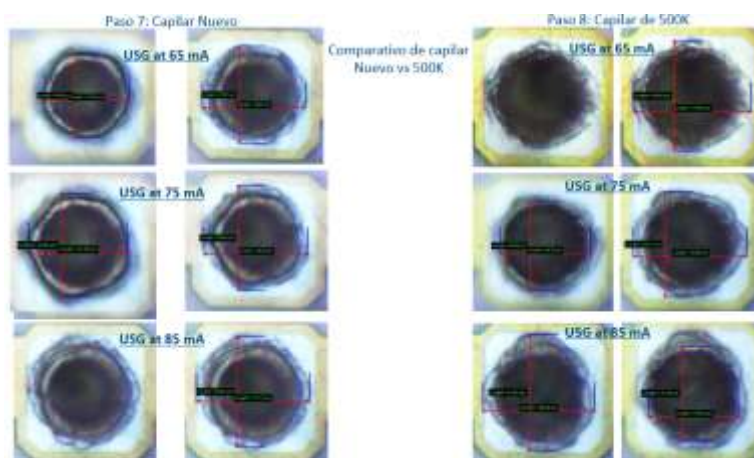


Figura 62. Respuesta comparativa en vida útil de capilar con la nueva receta. [2]

5.10 Experimento de condición del alambre

En la figura 63, se observa una gráfica del comportamiento del alambre de cobre con respecto a los días de exposición en el área de producción. Se puede observar una caída de OEE y un aumento de los errores después de los 6 días de exposición y posteriormente observamos que se incrementa de nuevo el OEE, para después caer a menos del 50 %. El incremento que se observa en los carretes de 7-9 días de exposición corresponden a un volumen bajo de carretes medidos, y a su vez los carretes con problemas y días de exposición, habían sido removidos previamente. Los resultados obtenidos demuestran que a partir del día 6 impactan la métrica del Yield, el controlar los carretes nos posiciona con un **Yield de 99.76 %**.

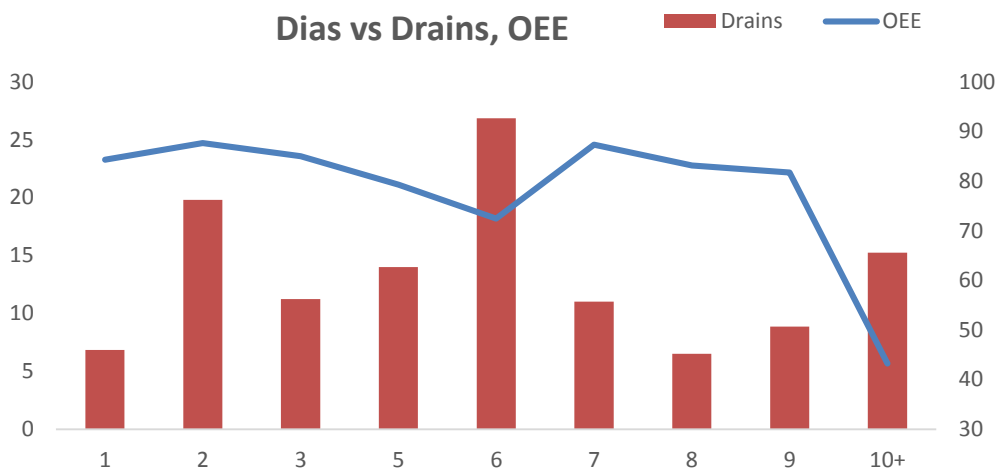


Figura 63. Gráfico de comportamiento del equipo con días de exposición de carrete. [2]

5.11 Experimento de condición del flowhead

De acuerdo con los resultados obtenidos en los experimentos realizados, se observó que la distancia del arco para generar el FAB se ve afectada por el deterioro del flowhead, generando consigo un FAB de baja calidad debido a que el área donde se funde el cobre para formar el FAB se aumentó debido al deterioro del orificio.

En la fig. 65 se observa que la distancia del arco de un flowhead nuevo es de 0.3 (b) y de 0.45 milésimas de pulgada (a) con 3 años de uso. Es por esta razón que el personal encargado de realizar la instalación y el ajuste del electrodo pierde mucha precisión. Además, se observó que los equipos presentan bajo rendimiento con flowheads deterioradas.

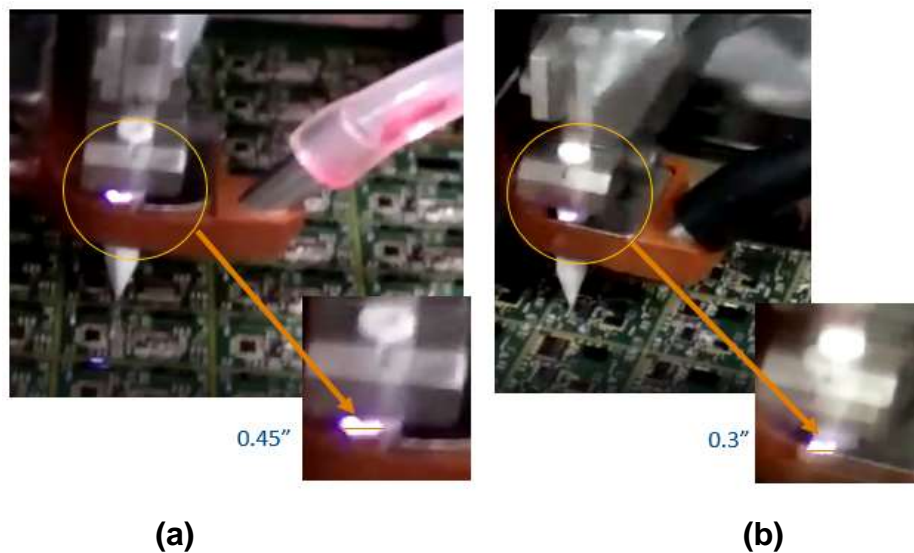


Figura 65. Arco de corriente entre un flowhead desgastado (a). Arco con flowhead nuevo (b). [2]

Lo que se observó es que el orificio del flowhead presentaba deterioro, y deformación con respecto a los recientes. Se analizaron las posibles causas, y de acuerdo al análisis realizado, se hacen las siguientes recomendaciones.

- Seguir los pasos de instalación de la pieza con calibradores.
- Asegurarse que el capilar cruce centrado el orificio de flowhead.
- Mantener la integridad de los tornillos de montaje.
- Se deberá limpiar en ultrasónico, NO utilizar lijas o cepillos abrasivos, que modifiquen dimensionalmente la pieza.
- Se recomienda no utilizar bases alternas al proveedor y de ser así que cumplan dimensionalmente con las especificaciones de la pieza original.

Finalmente, se evaluaron las flowheads alternativas dando como resultado que algunas de sus dimensiones no coincidían con las originales del proveedor, modificando el método de calibración y afectando la distancia del arco para formar el FAB y con esto se incrementaron el número de fallas por inconsistencias del Bump.

5.12 Experimento de condición del transductor

Debido a que observamos un comportamiento inestable en producción en termino de control de tamaño y altura de bola aún después de realizar las calibraciones correspondientes al MTMV, se decidió medir el desgaste y el impacto en el valor obtenido de portabilidad utilizando tres diferentes posiciones “eje Y” y cargándolo hacia dentro y fuera como se ilustra en la figura 66, con el fin de medir el desgaste ocasionado por la vibración ultrasónica.

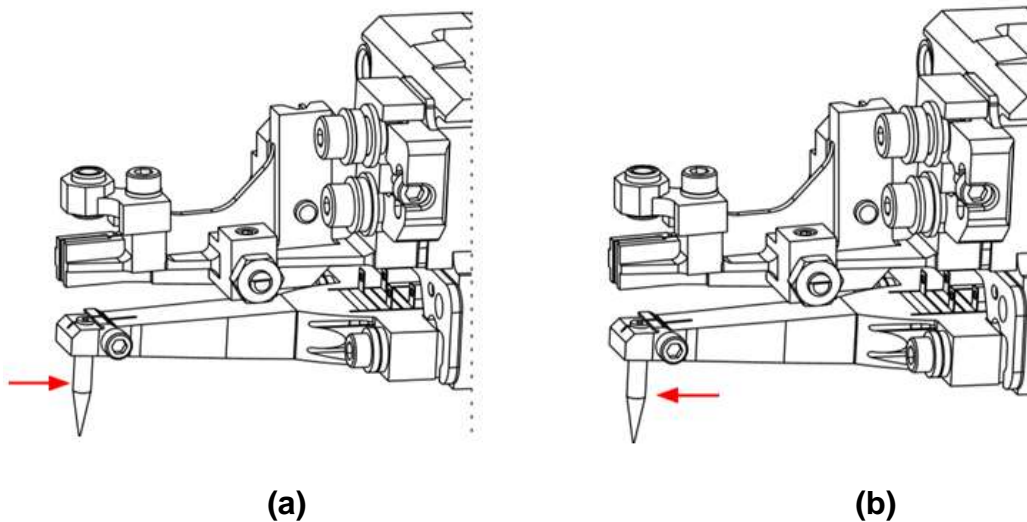


Figura 66. Medición del desgaste en transductor.

(a) Capilar cargado hacia adentro. (b) Capilar cargado hacia afuera. [2]

En la figura 67 se muestra la distancia (offset) para el transductor de 7 años, entre ajustar la punta hacia dentro o hacia fuera del cuerpo del transductor fue de 7.89 milésimas de pulgada, y ofreciendo una impedancia de 36Ω , la cual sigue siendo aceptable de acuerdo con lo recomendado por el proveedor ya que solo se consideraba como factor de remplazo de transductor la impedancia. Sin embargo, muestra un comportamiento inestable para producción en términos de control de tamaño y altura de bola aún después de las calibraciones.

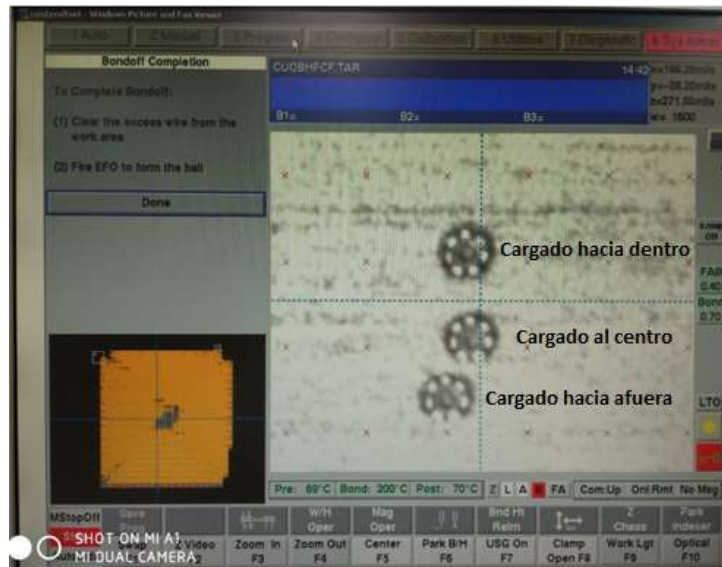


Figura 67. Muestra la variación de offset de un transductor con 7 años de uso. [2]

Se realizó el siguiente experimento utilizando la calibración OBPF, al transductor de 7 años para observar la variación de respuesta con respecto a la posición del capilar:

- Con la punta hacia adentro, arrojó un valor de 1.013, que representa la marca o golpe del capilar en la superior.
- Con la punta hacia el centro, indicó un valor de 0.991, que representa la posición del golpe del capilar.
- Punta hacia afuera, se obtuvo un valor de 0.792, lo que representa la posición de abajo.

Se encontró que el desgaste representa un desplazamiento en el factor de 1.013 a 0.792 esto da como resultado 0.22 de diferencia. Posteriormente, se realizó una comprobación para observar la respuesta del equipo usando el valor obtenido en la posición del centro y utilizando un dado crítico de tecnología GaAs; donde por diseño no se deben tocar los marcos de las terminales. Las dimensiones de bola obtenidas son 42.97 x 44.88 μm y una altura de 3.3 μm (figura 68).

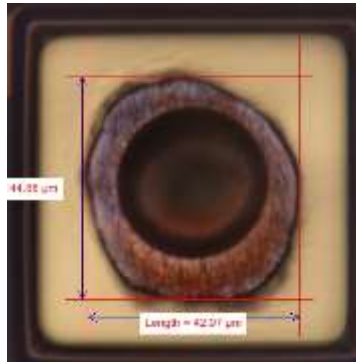


Figura 68. Muestra la bola obtenida después de la calibración OBPF con transductor de 7 años. [2]

Posteriormente y en forma comparativa, se instaló un transductor nuevo y se realizó la calibración del OBPF. La figura 69 ilustra la variación encontrada en el transductor nuevo, cargando el capilar hacia dentro y fuera como lo hicimos en la figura 67 al transductor de 7 años, el resultado encontrado es una distancia (offset) de 1.59 milésimas de pulgada con una impedancia de 27 Ω .

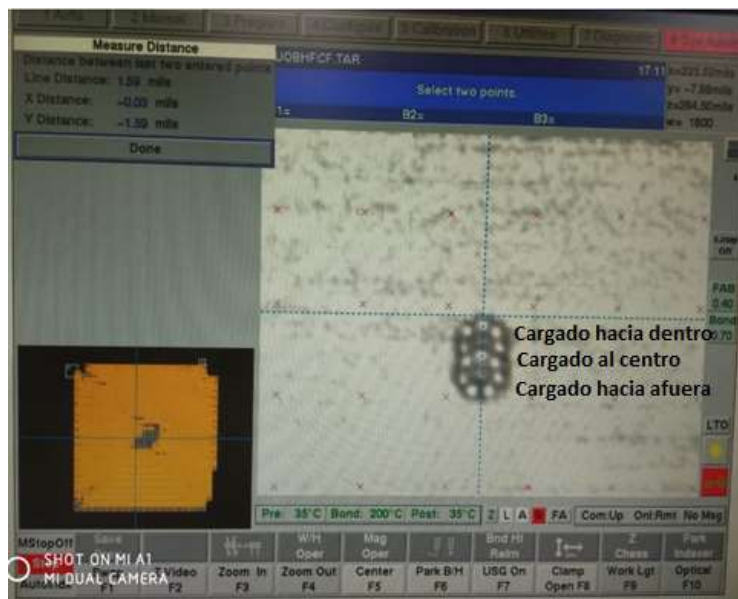


Figura 69. Muestra la variación de offset que ofrece un transductor nuevo. [2]

Se realizó nuevamente la calibración del OBPF del transductor nuevo de acuerdo con las posiciones de la figura 69:

- La punta hacia adentro, arrojando un valor de 1.532.
- La punta hacia el centro, arrojando un valor de 1.432.
- La punta hacia afuera, arrojando un valor de 1.374.

Los resultados obtenidos indican que el desgaste representa un desplazamiento en el factor de 1.532 a 1.374, dando como resultado una diferencia de 0.15 en el factor. Se realizó la prueba en el equipo con el valor obtenido, posicionando el capilar en el transductor en el centro y se utilizó la terminal de AsGa utilizada para el transductor de 7 años, obteniéndose como resultado final la bola mostrada en la figura 70, con un diámetro de $40\mu\text{m}$ y una altura de $7.7\mu\text{m}$. Este cambio trajo una mejora de **Yield de 99.81 %**.

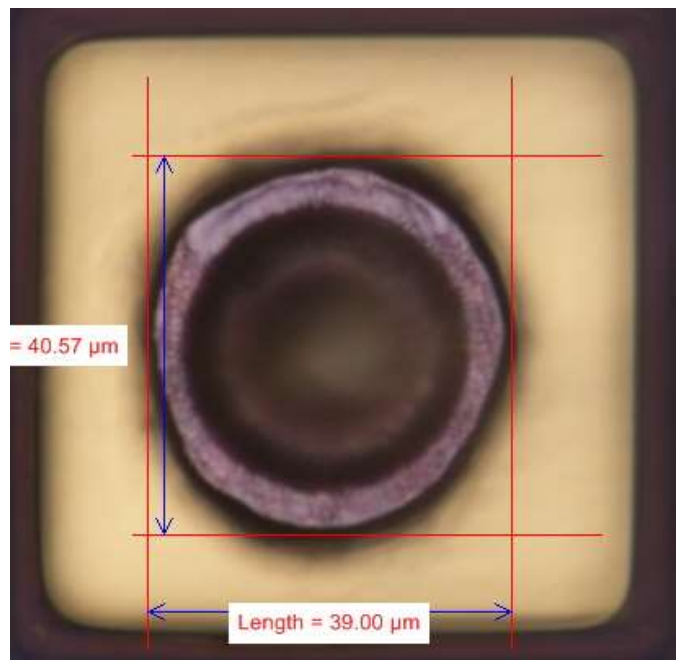


Figura 70. Muestra la bola despues de la calibración OBPF con transductorrr nuevo. [2]

5.13 Resultados de Yield hasta diciembre del 2019

En la figura 71, se muestra la introducción del thin nickel y el impacto negativo del rendimiento (Yield) del 2015 al 2016 (línea azul), y posteriormente iniciamos el proyecto en el 2016, obteniendo un impacto positivo desde enero del 2016 hasta diciembre del 2019. La línea roja representa el Yield óptimo que se pretendía alcanzar con este proyecto y el histograma representa las millones de unidades verificadas. Claramente se puede observar que en el período 2018-1 se alcanzó el objetivo principal del Yield y en los períodos posteriores se incrementó el Yield hasta alcanzar un rendimiento final de 99.8 % para 2019-2.

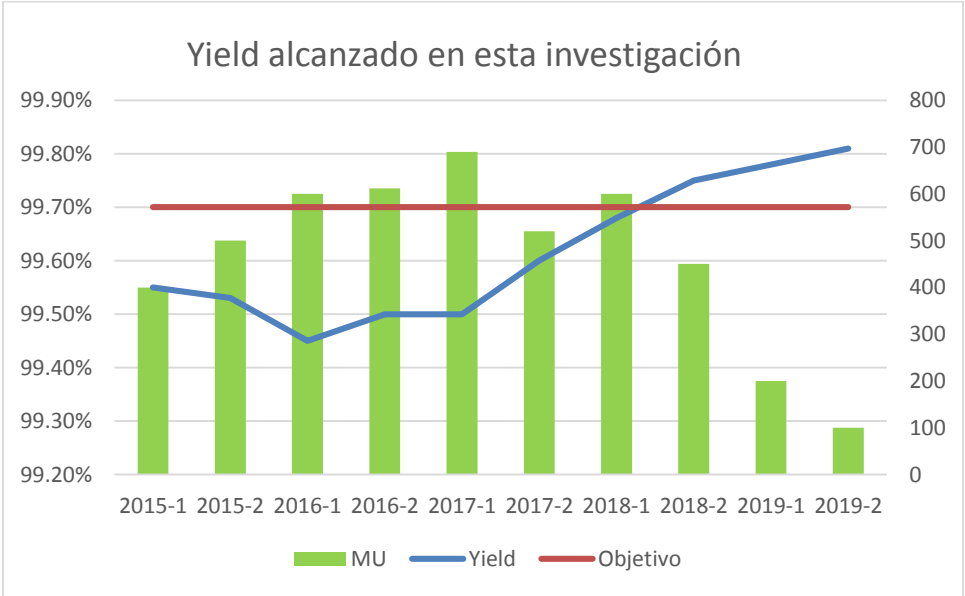


Figura 71. Rendimiento de wirebond semestral. [2]

6. Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

- Se logró reducir el estrés del contacto sobre el tablero usando Bumps, debido a que se incrementó el área de contacto entre el alambre y el tablero a 40 μm , obteniendo una mejor distribución de la energía sobre el tablero. Esto reduce ampliamente la pérdida por alambre levantado debido al daño generado en el tablero por formar el stitch.
- En el período 2018-1 se alcanzó el objetivo principal del Yield de 99.7 %, sin embargo en los períodos posteriores y gracias a las mejoras realizadas, se logró el incremento del Yield hasta alcanzar un rendimiento final de **99.8 %** para **2019-2**.
- La formación del Bump debe llevarse a cabo con los parámetros obtenidos en este trabajo, para no perder estabilidad en la superficie. De igual forma, el método ideal para cortar el Bump es Double Smooth en dirección del eje-X, ya que ofrece un corte estable y sin afectación a la variación del equipo, la corriente ultrasónica y la punta del capilar.
- El problema de pad peeling se debe al uso excesivo del capilar, el cual está diseñado para formar bolas de 40-45 μm . Por lo que al utilizar el capilar para formar bolas de 36 μm , se genera un orificio dentro del capilar ocasionando pérdida de energía en el USG. De esta forma, se remueve Al en el eje-Y y se forma una adherencia de Cu-Al, mayormente en el eje-X; formando una aleación en forma de elipse conocida como “smile face” (falla de distribución de IMC). Debido a que el área de contacto se redujo a una elipse, la conexión se levanta fácilmente, sacando el aluminio del centro del PAD y provocando la falla de Pad Peeling.
- El aumento del tiempo de soldado del Bump a 24.5 ms, nos permite un proceso estable, un aumento del Yield y menor asistencia del equipo. Por lo tanto, es preferible ganar estabilidad en los equipos y perder capacidad en unidades por hora.

- La disminución de la temperatura de 150 a 130°C para el soldado de Cu, reduce significativamente la generación de óxido en el tablero y además, se obtuvo una pérdida de 2gr de ball shear, logrando un incremento de rendimiento de 1.5 piezas por lote.
- Se requiere un control del tiempo de vida para los carretes, ya que después de 6 días en el área de producción presentan formación de óxido. Por lo que se recomienda removerlos del área de producción y guardarlos en áreas protegidas con nitrógeno para prevenir la oxidación del alambre de Cu.
- Un punto crítico que se encontró en esta investigación, fue la variación de 4 milésimas en el desplazamiento del arco del flowhead, el cual nos colocaba fuera de la meta del Yield. Este desplazamiento, se debe al desgaste y al cambio de proveedor. Por lo tanto, se recomienda capacitar al personal en la instalación del flowhead, haciendo énfasis en los puntos críticos y en la importancia del ajuste. También se recomienda la instalación de tornillería nueva, con el fin de reducir los riesgos de contacto entre el flowhead y el capilar. Finalmente, evaluar la calidad de los flowhead al realizar cambios de proveedores.
- Finalmente, la integridad de las calibraciones del equipo y la medición de la variación de los transductores deben registrarse, con el fin de evaluar su reemplazo cuando presente +5 milésimas de variación. Se recomienda medirse después de 3 años en producción de alambre de cobre, al igual cada que se realice un ajuste o calibración deberá de haber una validación con un patrón de respuesta conocido.

6.2 Trabajo futuro

En base a la metodología desarrollada y los resultados obtenidos en este proyecto de investigación, se proponen las siguientes acciones para este proyecto.

- Establecer un límite para variar la posición del capilar, poniendo mayor atención en las tecnologías de dados que contienen terminales menores a 55 μm , aquí será prioritario realizar una inversión en la compra de nuevos transductores que aseguren que su respuesta no pondrá en riesgo la permanencia del rendimiento por variación de diámetro de bola.
- Cuidar la integridad de los flowhead y si se requiere, utilizar proveedores alternos para mantener un control de calidad de lo recibimos. Si es confiable en términos de dimensiones y de calidad del producto, ya que la experiencia adquirida fue realizar un gasto y los flowheads alternos hicieron perder Yield, además de que su durabilidad no representaba ni el 50% del original.
- Evaluar nuevos capilares, lo cual será prioritario para las nuevas aplicaciones, así como controlar y evaluar de manera rigurosa los resultados obtenidos. El propósito final es tener evidencia sólida de que se está proponiendo la mejor solución y darle seguimiento a las metodologías diseñadas.
- Es altamente recomendable monitorear la integridad del capilar, con el fin de medir el desgaste generado en la punta después de 200 mil golpes. De esta manera podemos saber con precisión si es necesario realizar alguna adecuación a la receta en función del capilar utilizado. De igual forma igual explorar capilares con factor de integración mayor, donde sean capaces de soldar más alambres en menor espacio dado el rumbo normal de la tecnología.

7. Referencias Bibliográficas

1. <http://www.elfinanciero.com.mx/empresas/10-gigantes-tecnologicos-que-impulsan-la-industria-de-electronicos-en-mexico.html>
2. Assembly process
3. Copper wire bonding (2014). Preeti S. Chauhan, Anupam choubey, ZhaoWei Zhong, Michael G. Pecht.
4. Introduction to Microelectronic Fabrication Second Edition. Richard C. Jaenger
5. <http://www.nasdaq.com/markets/>
6. Kulicke And Soffa. (2005). Wire Bond in Microelectronic Industry.
7. WIRE BONDING IN MICROELECTRONICS MATERIALS George C. Hartman
8. <http://www.kns.com/>
9. http://www.techiedo.com/intermetallic_formation.htm
10. Preliminary failure Analysis Reports for 77330
11. Devaney, "Thermalsonic Ball Bond Evaluation by a Bond Pluck Test", Proceedings of ISTFA IRPS, 1984.
12. <http://www.epectec.com/pcb/enepig-boards.html>
13. Customer copper process reference
14. Recrystallization Effect and Electric Flame-Off Characteristic of Thin Copper Wire Fei-Yi Hung*, Yuan-Tin Wang, Li-Hui Chen and Truan-Sheng Lui
15. Kulicke & Soffa ProCu Plus User Manual (98890-11SA-EDD-03L)

16. https://www.researchgate.net/figure/Bond-wire-liftoff-due-to-crack-growth-a-Crack-propagation-causing-bond-wire-liftoff_fig5_224135529
17. Manual de equipo K&S Modelo ProCu Plus.
18. https://compoundsemiconductor.net/video/35/Gallium_arsenide
19. https://www.topline.tv/Tanaka.html?gclid=Cj0KCQjwzN71BRCOARIsAF8pjfj4n4lolPEFU8cKZarFmy0B_Mp5j1dQh_Bd4fivJ3FCktMGY_V66v4aAu_4EALw_wcB#Cu_Wire
20. <http://www.smallprecisiontools.com/products-and-solutions/chip-bonding-tools/bonding-capillaries/technical-guide/basics-of-ball-bonding-process/copper-wire-bonding-process/?oid=1260&lang=en>
21. file:///C:/manuales/Power%20Series%20Looping%20Guide%20-%20Rev%20(AKS).pdf