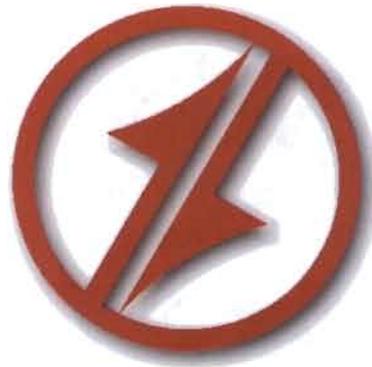


CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACION EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y PROPIEDADES MECÁNICAS
DE MATERIALES DE APORTE LIBRES DE CADMIO
EN PROCESOS DE SOLDADURA BRAZING**

POR

ING. MIGUEL ÁNGEL BANDA GUZMÁN

MONOGRAFÍA

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, OCTUBRE DE 2009

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y PROPIEDADES MECÁNICAS
DE MATERIALES DE APORTE LIBRES DE CADMIO
EN PROCESOS DE SOLDADURA BRAZING**

POR

ING. MIGUEL ÁNGEL BANDA GUZMÁN

MONOGRAFÍA

**EN OPCION COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA
DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO, OCTUBRE DE 2009

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Postgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía “ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES DE APORTE LIBRES DE CADMIO EN PROCESOS DE SOLDADURA BRAZING”, realizada por el alumno MIGUEL ÁNGEL BANDA GUZMÁN, con número de matrícula 08-ES062 sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

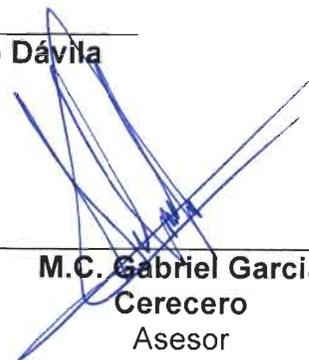
El Comité Tutorial



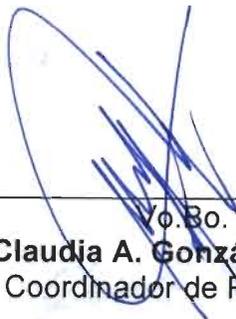
Ing. Fernando Macías Lopez
Tutor en Planta



Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila
Tutor Académico



M.C. Gabriel Garcia
Cerecero
Asesor



M.C. Claudia A. González Rodríguez
Coordinador de Posgrado

Dr. Jorge Leobardo Acevedo Dávila

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Postgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Especialización del alumno **MIGUEL ÁNGEL BANDA GUZMÁN**, una vez leída y revisada la Monografía titulada “**ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES DE APORTE LIBRES DE CADMIO EN PROCESOS DE SOLDADURA BRAZING**”, aceptamos que la referida Monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 9 días del mes de Octubre del año 2009.



**Dr. Dagoberto Vázquez
Obregón**
Presidente



Dr. Felipe García Vazquez
Secretario



**Dr. Jorge Leobardo Acevedo
Dávila**
Vocal

Agradecimientos.

Quiero agradecer a Dios, por haberme permitido seguir con vida para realizar este trabajo.

A mi esposa Mónica, por haberme apoyado durante el desarrollo de este proyecto, y por estar conmigo en todo momento.

A mi hija Layla, por hacerme sonreír en situaciones difíciles.

A mis padres y hermanos por apoyarme, en todo momento.

A la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, por darme la oportunidad de realizar esta especialidad.

A mi tutor y asesores por contestar todas mis dudas.

A mis compañeros Karla Silva, Martha Zamora, Pedro hernandez, Carlos Guevara, Francisco Cepeda, Alberto Tlapale y Mario Guerrero por la amistad que hicimos en tan poco tiempo.

INDICE

	Página
SÍNTESIS	1
CAPITULO 1 INTRODUCCION	3
1.1. Objetivos.	3
1.1.1. Objetivos específicos.	3
1.2. Justificación.	4
CAPITULO 2 ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Proceso brazing.	5
2.1.1 Ventajas del proceso brazing.	6
2.1.2 Limitaciones del proceso brazing.	6
2.1.3 Principio del proceso.	7
2.1.3.1 Fusión y fluidez de acuerdo al diagrama de equilibrio binario Ag-Cu.	7
2.1.3.2 Licuación.	9
2.1.3.3 Mojado y adhesión.	9
2.2 Diferentes procesos de brazing.	11
2.2.1 Brazing por antorcha.	11
2.2.1.1 Ventajas.	12
2.2.1.2 Limitaciones.	13
2.2.2 Brazing en horno (furnace brazing).	13
2.2.2.1 Ventajas del proceso.	16
2.2.2.2 Limitaciones.	16
2.2.3 Brazing por inducción (induction brazing).	17
2.2.3.1 Ventajas del proceso.	18
2.2.3.2 Limitaciones del proceso.	19
2.3 Especificaciones de metal base.	19
2.4 Características de los metales de aporte.	22
2.5 Cadmio.	26
2.5.1 Toxicidad del Cadmio.	27
2.5.2 Efectos en la salud.	27

	Página
2.5.3 Cadmio en las aleaciones.	28
2.5.4 Cadmio en el brazing.	30
2.5.5 Limites de exposición laboral.	31
2.5.6 Precauciones a la exposición al cadmio procedente de un proceso Soldadura.	31
2.6 Materiales de aporte libres de cadmio.	33
2.6.1 Elementos de aleación para substituir el cadmio.	34
2.6.2 Materiales de aporte con mayor contenido de plata.	39
2.6.3 Materiales de aporte eutécticos Ag-Cu.	54
2.6.4 Materiales de aporte base cobre.	55
CAPITULO 3 DISCUSION DE RESULTADOS	60
CAPITULO 4 CONCLUSIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	63
LISTA DE TABLAS	67
LISTA DE FIGURAS	68
RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO	70

SÍNTESIS

El proceso brazing es un método eficiente para unir materiales disímiles, ejemplo de esto son las uniones metal-cerámico. Así mismo, existen distintos procesos de brazing (Macias, 2006) como lo es el brazing por antorcha, por horno, de inmersión cada uno con sus diferentes aplicaciones, así como con ventajas y desventajas entre las que destacan que no hay fusión del metal de aporte solo del metal base.

Las aleaciones base plata son los metales de aporte los cuales contienen cadmio (Manual de soldadura Tomo II, 1996), que ayuda a disminuir el punto de fusión y aumenta la mojabilidad del aporte. El brazing utilizando un metal de aporte que contenga cadmio se realiza, en general, a una temperatura igual o superior a los 650 °C. El cadmio es un elemento nocivo para la salud, es un elemento cancerígeno, por lo que su uso debe estar controlado, o tratar de evitar utilizarlo como parte de los metales de aporte.

Por lo anterior, el trabajo es una revisión bibliográfica del empleo de materiales de aporte libres de cadmio aplicado en los procesos de brazing, así como los efectos que presenta sobre las propiedades microestructurales y mecánicas.

Existen 4 diferentes alternativas para substituir el cadmio en el metal de aporte, las cuales son:

- 1.- Utilizar elementos de aleación que substituyan el cadmio como lo son el germanio 8-12% e.p. (D'silva 1980), Galio 12-16% e.p. (Weise et al, 1996) (Weise et al, 2001) o Zinc 16% e.p. (Hiujie et al, 2002).
- 2.- Mediante la substitución del cadmio aumentando el contenido de plata en el metal de aporte en distintas concentraciones (Elrefaey et al, 2009; Elrefaey et

al, 2007; Hong et al, 2006; Li et al, 2007; Liaw et al, 2005; Morscher et al, 2006; Paiva et al, 2000; Yamazaki et al, 2006).

3.- Uso de eutécticos plata-cobre (Abdel et al, 2007), (Hiraoka et al, 2006), (Liu et al, 2002), (Shiue et al, 2004), (Stephens et al, 2006), logrando tener uniones con buenas propiedades.

4.- Uso de metales de aporte base cobre (Dev et al, 1992; Mohanty et al, 1994; Pashkov et al, 2006) debido a que la plata aumenta el precio del metal de aporte.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivos.

Determinar el estado del arte que implica el efecto del empleo de los materiales de aporte libres de cadmio aplicados en el proceso brazing, sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de las uniones generadas.

1.1.1. Objetivos específicos.

- 1) Revisar el estado del arte de investigaciones realizadas utilizando material de aporte libre de cadmio, así como evaluar el efecto de los materiales de aporte libres de cadmio en las propiedades mecánicas y microestructurales.
- 2) Proponer alternativas de materiales de aporte libres de cadmio para distintos materiales por proceso brazing.

1.2. Justificación.

El proceso de brazing es un método muy eficaz para unir metales disímiles, pero una de sus desventajas desde el punto de vista de la salud, es el uso de metales de aporte los cuales contienen cadmio, el cual es un elemento nocivo. Una alternativa para este problema es el uso de metales de aporte libres de cadmio, por lo que se tiene la necesidad de conocer las ventajas de usar materiales de aporte libres de cadmio. Por lo tanto en este trabajo se realizará una revisión bibliográfica y pruebas experimentales de los diferentes materiales de aporte empleadas en la unión de materiales mediante el proceso brazing.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Proceso brazing.

La soldadura brazing se utiliza para unir materiales aplicando un metal de aporte el cual presenta un cambio a fase líquida por encima de 450°C, pero por debajo del cambio a fase sólida del metal base.

El brazing crea una unión metalúrgica extremadamente fuerte. El principio por el cual el metal de aporte es atraído a través de la unión para crear el enlace es la acción de la capilaridad. En una operación de brazing el calor es aplicado a los metales base por completo. El metal de aporte entra en contacto con las partes calientes y se funde instantáneamente fluyendo por acción de la capilaridad a través de la unión.

Las uniones realizadas por brazing son dúctiles, susceptibles para resistir impactos considerables y vibración. La técnica es ideal para unir metales diferentes. El brazing es esencialmente un proceso de una sola etapa, rara vez se necesita granallar o darle un proceso de acabado a las piezas soldadas.

Por lo general, la apariencia superficial de las uniones mediante brazing es buena. Este proceso de unión se realiza a temperaturas relativamente bajas reduciendo la posibilidad de deformar, calentar o fundir los metales que se están uniendo. Además, es un proceso económico y el costo por unión es favorable con respecto a otros métodos de soldadura.

2.1.1 Ventajas del proceso brazing.

Las principales ventajas de la soldadura brazing son:

- 1.- Es económica para ensambles complejos
- 2.- Es sencilla para ensambles grandes
- 3.- La distribución térmica y de esfuerzos es excelente
- 4.- Conserva los recubrimientos y revestimientos
- 5.- Puede unir metales disímiles
- 6.- Permite unir metales y no metales
- 7.- Permite unir piezas de precisión
- 8.- Las uniones requieren poco acabado
- 9.- Se pueden unir muchas piezas al mismo tiempo.

2.1.2 Limitaciones del proceso brazing.

Las principales desventajas de la soldadura brazing son:

1. Posibilidad de interacciones desfavorables del metal líquido con la pieza.
2. Erosión del metal base.

3. Formación de fases intermetálicas frágiles las cuales reducen la ductilidad.
4. Formación de porosidad que disminuyen las propiedades finales.
5. Requiere personal altamente capacitado.

2.1.3 Principio del proceso.

El flujo capilar es el principio básico en donde el metal de aporte fundido moja ambas superficies del ensamble. La unión deberá controlar el espesor de modo que permita una acción capilar eficiente. La capilaridad es el resultado de la tensión superficial entre el metal base y el metal de aporte y ésta se relaciona directamente por el ángulo de contacto entre ambos.

En el flujo del metal de aporte influyen consideraciones dinámicas como la viscosidad, la presión de vapor, la gravedad y las reacciones metalúrgicas entre el metal base y el metal de aporte. En la aplicación de soldadura brazing las superficies que se van a unir se limpian para eliminar contaminantes y óxidos, luego se cubren con un fundente el cual es capaz de disolver los óxidos metálicos sólidos y evitar una oxidación posterior. Finalmente se calienta el área de la unión hasta que la temperatura del fundente alcanza el punto de fusión y limpia los metales base quedando protegidos contra la oxidación.

2.1.3.1 Fusión y fluidez de acuerdo al diagrama de equilibrio binario Ag-Cu (ASM Volumen 3, 1997).

Los metales puros se funden a una temperatura constante y generalmente son muy fluidos. Las composiciones binarias tienen diferentes características, dependiendo de las proporciones de los dos metales. La figura 2.1 muestra el diagrama de equilibrio del sistema binario Ag-Cu.

Durante el calentamiento la línea de cambio de fase sólida (solidus), ABCEB, indica la temperatura de comienzo de la fusión de las aleaciones, en tanto que la línea de cambio a fase líquida (liquidus) ACB, indica la temperatura a la que la aleación se vuelve completamente líquida. En el punto C las dos líneas se unen (Ag-28%Cu), lo que indica que esa aleación se funde a esa temperatura específica (la temperatura eutéctica). Esta aleación tiene la composición eutéctica; es tan fluida como un metal puro, en tanto que las demás composiciones de la aleación son pastosas entre sus temperaturas de solidus y liquidus. Entre mayor sea la separación entre estas dos temperaturas, más trabajo costará que la aleación fluya al interior de una unión capilar.

La región α es una solución sólida de cobre en plata, y la región β es una solución sólida de plata en cobre. La zona sólida central consiste en una mezcla homogénea de las soluciones sólidas α y β . Por encima de la línea de liquidus los átomos de plata y cobre están distribuidos en forma totalmente homogénea en una solución líquida.

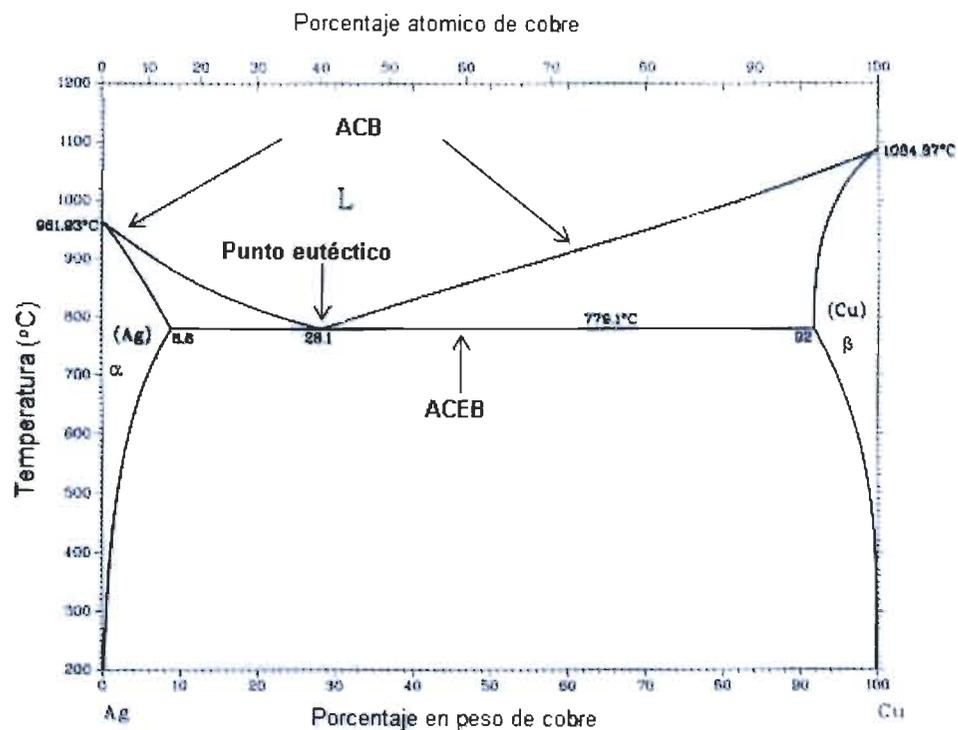


Figura 2.1. Diagrama de equilibrio Ag-Cu (ASM Volumen 3, 1997).

2.1.3.2 Licuación.

Como las fases de aleación sólida y líquida de un metal de aporte para soldadura brazing generalmente no son iguales, la composición del metal fundido cambiará gradualmente conforme se incremente la temperatura desde el solidus hasta el liquidus. En el caso en que la porción que se funde primero fluya hacia fuera de la pieza, es posible que el sólido restante no se funda y permanezca como un residuo que pueda afectar las propiedades mecánicas de la unión.

Los metales de aporte con intervalos de fusión estrechos no tienden a separarse, de modo que fluyen libremente al interior de uniones con separaciones extremadamente angostas. Los metales de aporte con intervalos de fusión amplios deben calentarse rápidamente o colocarse en la unión después de que el metal base haya alcanzado la temperatura de soldadura brazing, con el fin de minimizar la separación la cual se conoce como licuación. Los metales de aporte propensos a la licuación fluyen lentamente, sólo penetran en uniones bastante separadas y forman filetes grandes en las extremidades de las uniones.

2.1.3.3 Mojado y adhesión.

Para que un metal de aporte sea efectivo durante su interacción con el metal base, debe cumplir las siguientes consideraciones:

1. No difundir de manera indeseable al interior del metal base.
2. No diluir el metal base
3. No erosionar el metal base
4. Formación mínima de compuestos intermetálicos frágiles.

Los efectos 1, 2 y 3 dependen de la solubilidad entre el metal de aporte y el metal base, por lo tanto, la composición del metal de aporte, la temperatura y duración del ciclo de soldadura brazing son importantes para lograr una unión adecuada.

Algunos metales de aporte se difunden excesivamente y alteran las propiedades del metal base. Para controlar esta difusión se debe escoger un metal de aporte apropiado, aplicar la mínima cantidad posible y seguir el ciclo de soldadura brazing correcto. Si el metal de aporte moja el metal base, mejorará el flujo capilar. La Figura 2.2 muestra esquemáticamente los ángulos de mojabilidad capilar.

La erosión del metal base ocurre cuando existe solubilidad entre el metal base y el metal de aporte de soldadura brazing. En ocasiones se pueden producir compuestos intermetálicos frágiles los cuales son perjudiciales ya que reducen la ductilidad de la unión. La composición de los metales de aporte se ajusta con el fin de controlar los factores anteriores y conferir características deseables, como resistencia a la corrosión en medios específicos, temperaturas de soldadura brazing favorables o ahorro de materiales. Por ejemplo, en las aleaciones Ag-Cu que se usan para soldar en hierro y acero, los metales de aporte contienen zinc o cadmio, o ambos, los cuales se utilizan para disminuir las temperaturas de liquidus y solidus. Se puede añadir estaño en lugar de zinc o cadmio en los casos en que son indeseables los constituyentes con una presión de vapor alta.

De manera similar, se usa silicio para bajar las temperaturas de liquidus y solidus de los metales de aporte para soldadura de aluminio y aleaciones base níquel. Otros metales de aporte contienen elementos como litio, fósforo o boro, los cuales reducen los óxidos superficiales del metal base y forman compuestos con punto de fusión por debajo de la temperatura de soldadura brazing; esos óxidos fundidos pueden entonces fluir y salir de la unión dejando una superficie metálica limpia para la soldadura brazing. En esencia, estos metales de aporte son auto fundentes.

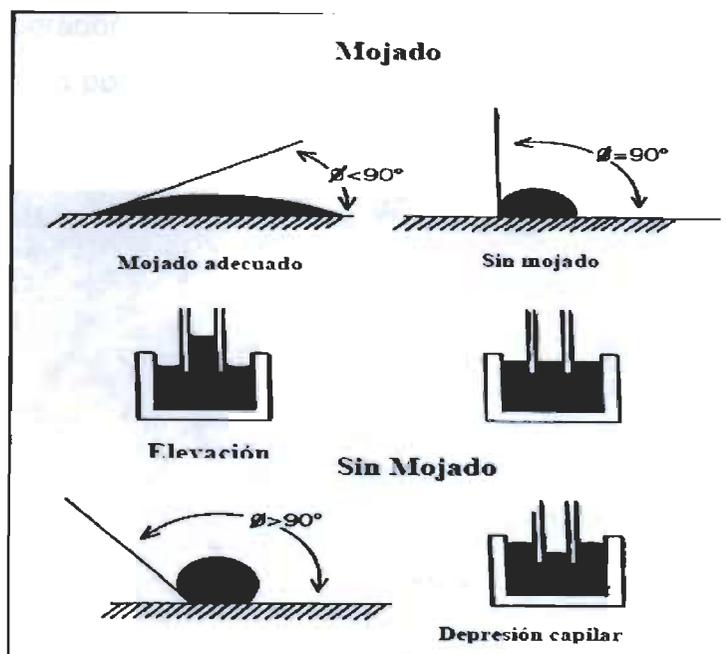


Figura 2.2. Efecto de la capilaridad en función de los ángulos de contacto (Macías, 2006).

2.2 Diferentes procesos de brazing.

2.2.1 Brazing por antorcha (ASM Volumen 6, 1993)

En este proceso la característica principal es que el calor suministrado para la fusión y flujo del metal de aporte proviene de una flama de un gas combustible (acetileno, hidrógeno o propano) la cual se aplica directamente en el ensamble para unirlo como se muestra en la figura 2.3. Esta flama se obtiene comúnmente de una antorcha de mano. Por lo general este proceso no requiere de un gas protector pero si de un fundente. Se utiliza en piezas que no se oxiden a temperatura de trabajo, y si esto sucede pueden ser protegidas por gas. Entre los metales de aporte más comunes se incluyen aleaciones de Al-Si, aleaciones base plata, aleaciones de cobre y aleaciones de zinc. Entre las características más importantes a controlar se encuentra el color de la llama ya que de esto depende la cantidad de calor suministrada al material y que esta se pueda oxidar. Sin embargo como el proceso es manual el resultado depende de

la habilidad del operador que realiza el proceso, la siguiente figura 2.3 muestra el proceso de brazing por antorcha automatizado.



Figura 2.3. Brazing por antorcha automatizado (ASM Volumen 6, 1993).

2.2.1.1 Ventajas.

El proceso de brazing por antorcha es usado con varios metales base y gran cantidad de tamaños de las uniones, por lo que el proceso ofrece ciertas ventajas entre las cuales están:

- Flexibilidad de utilizar una antorcha con dispositivos diferentes para unir una variedad de materiales.
- Bajo costo del equipo (brazing por antorcha manual)
- No se necesita calentar toda la unión.
- No se necesita calentar todo el ensamble, se calienta una pequeña unión localizada en el ensamble.
- En muchos casos es posible la automatización.

- La mayoría de los metales base o combinación de metales base pueden ser unidos si se tiene el flux adecuado.

2.2.1.2 Limitaciones.

Debido a que el proceso es muy versátil, y de bajo costo, tiene algunas limitaciones como lo son:

- Puede ocurrir una oxidación/descoloración en la parte del ensamble que no fue cubierta con flux, ya que el proceso es conducido en aire.
- Los residuos del flux necesitan ser removidos después del brazing.
- Los materiales altamente reactivos como el titanio y el zirconio, no pueden ser unidos mediante brazing por antorcha, debido a que no hay flux disponible.
- Grandes uniones pueden ser difíciles de calentar, por la naturaleza de la flama que es muy localizada.

2.2.2 Brazing en horno (furnace brazing).

En este proceso los componentes a ensamblar, preparados previamente con el metal de aporte, se colocan dentro de un horno para llevar a cabo el brazing (figura 2.4). Una vez que las piezas se encuentran en el interior el equipo se prepara para que tengan una presión parcial de aire adecuada; la cámara se calienta a la temperatura del liquidus del metal de aporte pero debajo de la temperatura de fusión de los sustratos. Posteriormente después de un tratamiento térmico las partes unidas son enfriadas por temple u otro medio de enfriamiento para minimizar distorsiones y así obtener las propiedades deseadas en la unión.

Este ciclo es diseñado para producir la fusión y solidificación requeridas por el metal de aporte para unión de los componentes sin fundirlos o dañar el metal base. Con la ayuda de este método es posible soldar piezas de secciones diversas y formas muy variadas, obteniendo partes constructivas de gran valor.

Los hornos utilizados en este tipo de proceso pueden ser de flama oxicomcombustible o mediante calentamiento eléctrico, ya sea que proporcione el calor directa o indirectamente. Todos los hornos deben tener una temperatura de trabajo uniforme, por ejemplo el brazing de aleaciones de níquel, es a una temperatura alta 1095°C (2000°F), por lo que se requiere una zona uniforme de $\pm 8^{\circ}\text{C}$ ($\pm 15^{\circ}\text{F}$). Cuando el brazing se realiza en aleaciones de aluminio, este se realiza a una temperatura más baja, por lo que la temperatura debe ser uniforme con una variación de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ($\pm 5^{\circ}\text{F}$), por lo tanto este tipo de equipos deben estar monitoreados con mínimo dos termopares colocados cerca de la zona de las partes a unir.

Existen tipos de hornos: continuos, semicontinuos y por lotes.

a) En el horno continuo, las condiciones del brazing son controladas regulando la velocidad de una banda transportadora, y de esta forma se ajusta la temperatura. Para iniciar el proceso se deben utilizar varios días para calentar y preparar el horno para la operación, estos parámetros deben mantenerse constantemente. Los hornos son apagados muy raras veces, el costo de operación del horno es muy alto si el equipo no es utilizado a toda su capacidad, este tipo de hornos son utilizados en operaciones en masa (miles de unidades por hora), típicamente un gas reductor es agregado en la cámara de brazing, cuando el horno se utiliza a toda su capacidad el costo por unidad es muy efectivo.

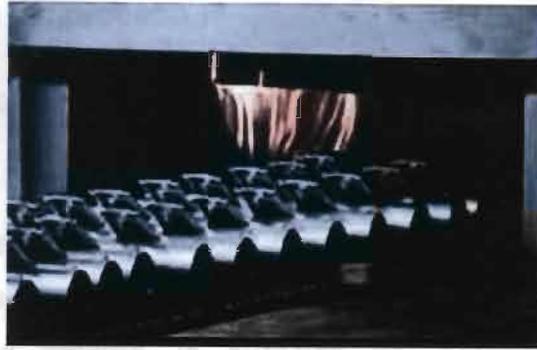


Figura 2.4. Brazing por horno (ASM Volumen 6, 1993).

b) Los hornos de retortas (tipo bandas) son hornos semicontinuos. En este tipo de hornos las piezas a unir son encapsuladas dentro de la retorta y se les introduce un gas especial, entonces la retorta es colocada en el horno para iniciar el proceso de brazing. En la operación semicontinua, dos o más retortas son utilizadas en el proceso de producción, cuando una retorta esta en el horno, realizándose el brazing, la otra retorta esta enfriándose, y puede haber otra retorta cargada de material, y otra lista para cargarse. Cada sistema del horno esta equipado con microprocesadores para mejor control de los ciclos.

c) Los hornos de vacío son típicamente usados en el brazing por lotes, el horno de vacío debe estar interconectado con microprocesadores, estos microprocesadores son programables para controlar todos los parámetros del brazing, como la velocidad de calentamiento, temperatura, tiempo de brazing y velocidad de enfriamiento. Debido al uso de microprocesadores, varios ciclos de brazing pueden ser guardados en la memoria del microprocesador, por lo que hacen al horno de vacío muy versátil, además se le puede instalar un sistema de alarma en el microprocesador para detectar cualquier anomalía en las operaciones, que puedan ocasionar que se detenga la operación de brazing.

2.2.2.1 Ventajas del proceso.

Las ventajas que presenta el proceso de brazing en horno son las siguientes:

- Es un proceso en el cual algunas variables pueden ser controladas fácilmente para garantizar la repetibilidad y alta calidad de las juntas. La temperatura de brazing, la duración del proceso, la velocidad de calentamiento y enfriamiento pueden ser controladas y monitoreadas, además la atmosfera puede ser regulada fácilmente.
- Cuando todos los procedimientos fueron establecidos, es relativamente que operadores no calificados pueden realizar este proceso.
- Debido a que se calienta toda la pieza a unir, la distorsión de las partes pueden ser reducidas o eliminadas, en algunos casos el tratamiento térmico puede ser incorporado dentro del ciclo del brazing.
- Más de una junta por pieza puede ser unidas en un solo ciclo de brazing, por lo que varias uniones diferentes que necesitan las mismas condiciones de trabajo pueden ser unidas en un solo proceso.

2.2.2.2 Limitaciones.

Este proceso tiene las siguientes limitaciones:

- El costo de inversión inicial es alto, además de que el mantenimiento del equipo es crítico y puede ser más caros que otros procesos, el costo de la atmósfera especial debe ser considerado.
- Ya que la pieza completa es calentada, el costo de este calentamiento excede a los otros procesos de brazing, además de que pueden ocurrir cambios microestructurales en el metal base, dependiendo del material utilizado y la temperatura de brazing utilizada.

- Debido a que el proceso es realizado dentro del horno, el diseño de la junta juega un papel muy importante, los fixtures para sostenimiento de la unión reciben un calentamiento extra, lo cual incrementa el costo de su manufactura, un diseño de la junta apropiado puede minimizar o inclusive eliminar la complejidad del fixture.

2.2.3 Brazing por inducción (induction brazing).

El calor para el proceso brazing es obtenido mediante una corriente eléctrica inducida en las partes a soldar, por tal motivo recibe el nombre de *inducción brazing* (Figura 2.5. y Figura 2.6)

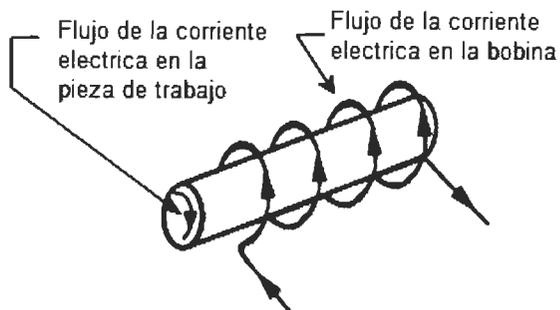
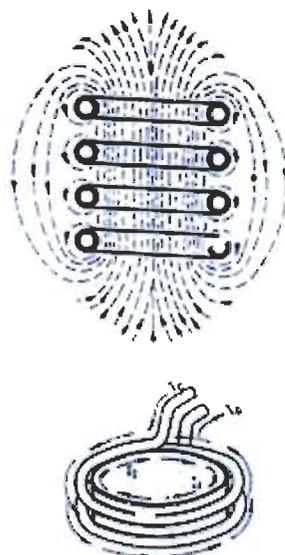


Figura 2.5. Esquema ilustrativo del brazing por inducción (ASM, Volumen 6, 1993).



Ic Corriente de la bobina
 II Corriente inducida en la pieza de trabajo (centro)

Figura 2.6. Esquema del brazing por inducción (ASM Volumen 6, 1993).

En el proceso de brazing por inducción las piezas son colocadas dentro o cerca de una bobina eléctrica enfriada por agua que conduce corriente alterna. Las piezas no forman parte del circuito eléctrico, estas se calientan por la acción del corto circuito de un transformador secundario conectado a la bobina, la cual se conecta a la fuente de poder. En piezas magnéticas o no magnéticas, el calor se obtiene de la resistencia de las piezas a la corriente inducida en ellas por la acción del transformador.

En este proceso el metal de aporte de brazing es precolocado, y se debe tener cuidado al diseñar la junta y al ajustar la bobina, ya que es necesario que las superficies de todos los miembros de la junta alcancen la temperatura de brazing al mismo tiempo. El fundente se utiliza frecuentemente, excepto cuando se utiliza una atmósfera protectora para realizar la misma función del fundente.

El brazing por inducción normalmente se utiliza cuando se requiere una rápida velocidad de calentamiento. Los tiempos del proceso normalmente varían en el rango de unos segundos para piezas grandes o ensambles que se manejan en forma automatizada. El brazing por inducción ha sido ampliamente utilizado en la industria en la fabricación de productos eléctricos y electrónicos, maquinaria, en la industria aeroespacial y militar.

2.2.3.1 Ventajas del proceso (Vázquez, 2008).

Las principales ventajas del proceso de brazing por inducción son las siguientes:

- Velocidad de calentamiento alta, por lo que los materiales a unir se calientan en segundos.
- Se pueden producir piezas uniformes y de buena calidad, con una superficie muy lisa, eliminando la necesidad de las operaciones finales.
- Se pueden realizar varias operaciones con solo una zona de calentamiento.

2.2.3.2 Limitaciones del proceso.

Las principales limitaciones de este tipo de proceso son:

- Dificultad para calentar piezas complejas.
- Necesidad de limpieza entre el espaciado uniforme (clearance) de las piezas a unir.
- Costo inicial del equipo alto.
- Necesidad de conocimiento especializado para el diseño de sistemas.

2.3 Especificaciones de metal base (ASM Vol 6, 1993).

Diferentes metales base pueden ser unidos mediante el proceso brazing, entre los cuales destacan los siguientes grupos:

- Hierros vaciados (maleable, dúctil y gris) y aceros al carbono.
- Aceros inoxidables.
- Aceros baja aleación y grado herramienta.
- Aluminio.
- Cobre y aleaciones base cobre.
- Metales preciosos.
- Aleaciones base níquel.
- Aleaciones base cobalto.
- Metales refractarios.

Hierros vaciados: Los hierros vaciados presentan mayor dificultad para unirse por brazing que los aceros al carbón, debido al alto contenido de carbón, silicio, y las inclusiones en forma de arena en la superficie. El carbono en forma de grafito inhibe la mojabilidad del metal de aporte en el metal base.

Hierro maleable: El hierro maleable puede ser unido más fácilmente mediante brazing que los hierros vaciados, debido a que tiene bajo contenido de carbón y silicio, además que mediante un tratamiento térmico el grafito cambia de una forma irregular a una forma de nódulos, los nódulos pueden ser retirados con facilidad con medios mecánicos, como disparos o chorros de arena.

Hierro dúctil: El carbón que se encuentra libre en el hierro dúctil, es en forma de nódulos, estos nódulos que son de forma esférica se forman cuando se agregan pequeñas cantidades de fósforo al metal fundido. La superficie se limpia mecánicamente para realizar el brazing.

Hierro gris: Este material presenta dificultades para ser unido por brazing, debido a que la forma de holuejas del grafito inhibe la mojabilidad del metal base, este material puede ser unido por brazing aplicando métodos especiales de limpieza de la superficie.

Aceros al carbón: Estos aceros pueden ser unidos mediante brazing en una amplia variedad de ciclos de calentamiento, pero dependiendo de esto será el tratamiento térmico seleccionado.

Aceros inoxidables: Estos aceros no tienen dificultades para ser unidos mediante el brazing, solamente se tiene que tener precauciones especiales si tienen titanio o aluminio, en donde se requerirá de precauciones adicionales para evitar la oxidación de estos elementos.

Aceros de baja aleación y grado herramienta: Estos tipos de aceros se pueden unir mediante el brazing, dependiendo del proceso de brazing a usar será del metal de aporte (base plata para inducción y flama, y base níquel y cobre para horno).

Aluminio: El aluminio es usado comúnmente en el brazing y es aplicado para los distintos procesos de brazing. Presenta dos características importantes: forma una capa que cubre la superficie de la oxidación, y el metal de aporte funde a una temperatura cercana al punto de fusión del metal base.

Cobre y aleaciones de cobre: El cobre es posiblemente el material más fácil a unir mediante brazing, un amplia variedad de metales de aporte se utilizan para unir el cobre y sus aleaciones dependiendo de la composición del material, su forma y dimensiones de las piezas a unir.

Metales preciosos: Los metales preciosos (oro, plata y platino), pueden ser unidos por brazing ya que tienen una alta resistencia a la oxidación a alta temperatura, utilizándose incluso como base para los metales de aporte.

Aleaciones base níquel: Este tipo de aleaciones presentan endurecimiento por precipitación, por lo que se debe considerar la temperatura del brazing.

Aleaciones base cobalto: Este tipo de aleaciones tienen el comportamiento similar a las base níquel por lo que se deben de tener las mismas consideraciones.

- Metales refractarios: Los metales refractarios son cuatro (molibdeno, tungsteno niobio y tantalio) el punto de fusión de estos metales es muy alto y sus características físicas, químicas y mecánicas son diferentes uno de otro, por lo que el proceso de brazing es muy complejo en este caso.

2.3 Características de los metales de aporte (Manual de soldadura Tomo II,1996).

- Aluminio-silicio: Este grupo se usa para unir aleaciones de aluminio de los grados 1060, 1100, 1350, 3003, 3004, 3005, 5005, 6053, 6061, 6951 y las

aleaciones coladas A712.0 y C711.0. Presentan facilidad a ser unidos mediante brazing en horno y por inmersión, y algunos de ellos también pueden soldarse en brazing con soplete empleando uniones traslapadas en lugar de uniones a tope.

Las laminas o tubos para soldadura brazing son fuentes útiles de metal de aporte de aluminio y un recubrimiento de metal de aporte con más bajo punto de fusión. Los recubrimientos son aleaciones Ag-Si, aplicadas en ambos lados de la lámina. Con frecuencia se utiliza lámina para soldadura brazing como uno de los miembros de un ensamble; el otro miembro se fabrica con una aleación soldable en brazing sin revestimiento. El recubrimiento de la lamina o tubo para la soldadura brazing se funde a la temperatura de soldadura brazing y fluye por atracción capilar y la acción de la gravedad hasta llenar las uniones.

-Magnesio: Se usa metal de aporte de magnesio ($MgBr_2$) para unir aleaciones de magnesio, como la AZK10A, K1A, y M1A empleando procesos de soldadura brazing con soplete, por inmersión o en horno. El calentamiento se debe controlar con precisión para evitar la fusión del metal base. La separación óptima de las uniones para la mayor parte de las aplicaciones está entre 0.10 y 0.25 mm (.004 y 0.010 pulgadas). La resistencia a la corrosión es buena si el fundente se elimina por completo después de la soldadura. Los ensambles soldados por brazing generalmente son apropiados para servicio continuo hasta 120°C (300°F), sujetos a las limitaciones usuales en el entorno de operación real.

-Cobre y Cobre-Zinc: Estos metales de aporte sirven para unir metales ferrosos y no ferrosos. En general, la resistencia a la corrosión de los metales de aporte de aleaciones Cu-Zn no es suficiente para unir cobre, bronce de silicio, aleaciones de cobre-níquel ni acero inoxidable. Los metales de aporte de cobre prácticamente puro se usan para unir metales ferrosos, aleaciones base níquel y aleaciones Cu-Ni. Estos metales de aporte fluyen libremente y a

menudo se usan para soldadura brazing en horno con una atmosfera de gas quemado, hidrógeno o amoniaco disociado y sin fundente. Los metales de aporte de cobre están disponibles en formas forjadas y pulverizadas.

Los metales de aporte Cu-Zn sirven para unir aceros, cobre, aleaciones de cobre, níquel, aleaciones base níquel y acero inoxidable en los casos en que no se requiere resistencia a la corrosión. Se emplean con los procesos de soldadura brazing con soplete en horno y por inducción. Se usa fundente, por lo regular de bórax con acido bórico.

-Cobre-fósforo: Estos metales de aporte sirven principalmente para unir cobre y aleaciones de cobre, y tienen aplicación limitada en la unión de plata, molibdeno y tungsteno, no deben usarse con aleaciones ferrosas o con base níquel, ni con aleaciones cobre-níquel que tengan más del 10% de níquel. Estos metales de aporte son apropiados para todos los procesos de soldadura brazing, y tienen propiedades auto fundentes cuando se usan para unir cobre, tienden a la licuación si se calientan con lentitud.

-Plata: Estos metales de aporte sirven para unir la mayor parte de los metales ferrosos y no ferrosos, con excepción del aluminio y magnesio, con todos los métodos de calentamiento. El metal de aporte puede colocarse previamente en la unión ya calentada.

Las aleaciones plata-cobre con alto contenido de plata no mojan bien el acero cuando la soldadura brazing se realiza en aire y con fundente. El cobre forma aleaciones con cobalto y níquel con mucha mayor facilidad que la plata. Por tal motivo el cobre logra una buena mojabilidad en estos metales y sus aleaciones satisfactoriamente, en tanto que la plata no lo hace. Cuando se realiza el brazing en ciertas atmosferas protectoras sin fundente, las aleaciones plata-cobre mojan la mayor parte de los aceros y fluyen libremente si la temperatura es la adecuada.

Se usan comúnmente zinc para bajar las temperaturas de fusión y de flujo de las aleaciones Ag-Cu. Es por mucho, el mejor agente para unir aleaciones con base de hierro, cobalto o níquel. El zinc o las combinaciones zinc con estaño o cadmio producen aleaciones que mojan los metales del grupo de hierro.

Se agrega cadmio a algunos metales de aporte de aleaciones plata-cobre-zinc a fin de bajar todavía más las temperaturas de fusión y de flujo, y de incrementar la fluidez y la acción de mojado sobre diversos metales base. Puesto que los vapores de óxido de cadmio son peligrosos para la salud, se debe tener mucho cuidado al usar metales de aporte que contengan cadmio.

El estaño presenta una baja presión de vapor a las temperaturas de soldadura brazing convencionales, por lo que sustituye al zinc o al cadmio en los metales de aporte para la soldadura brazing cuando los constituyentes volátiles presentan riesgos, como cuando la soldadura brazing se realiza sin fundente en hornos de atmósfera especial o de vacío a temperaturas elevadas.

Los metales de aporte Ag-Cu con adiciones de estaño tienen intervalos de fusión amplios. Los metales de aporte que contienen zinc mojan los metales ferrosos con mayor efectividad que los que contienen estaño, por lo que siempre se prefieren en los casos en que puede tolerarse el zinc.

Las estelitas, los carburos y otras aleaciones refractarias ricas en molibdeno y tungsteno se unen por brazing con metales de aporte a los que se ha agregado manganeso, níquel y, raras veces cobalto a fin de incrementar la acción de mojado. Cuando los aceros inoxidable y las aleaciones que forman óxidos refractarios se sueldan en atmósferas reductoras o inertes sin fundente, los metales de aporte de plata que contienen litio como agente mojado son muy efectivos. El calor de formación de Li_2O es muy alto, por lo que el litio metálico reduce los óxidos adheridos al metal base. El metal de aporte de soldadura brazing desplaza con facilidad el Li_2O que se produce.

-Oro: Los metales de aporte de oro sirven para unir piezas de ensambles en los que no pueden tolerarse componentes volátiles. Se usan para unir por brazing metales base hierro, de níquel y de cobalto en los que se requiere alta resistencia a la corrosión. Por lo general se usa en secciones delgadas en virtud de su reducida tasa de interacción con el metal base.

-Níquel: los metales de aporte de níquel para soldadura brazing generalmente se usan con aceros inoxidable de las series 300 y 400, aleaciones con base cobalto y de níquel e incluso acero al carbono, de baja aleación y cobre cuando se desean propiedades específicas. Estos metales de aporte presentan buenas propiedades de resistencia a la corrosión y al calor, normalmente se aplican en forma de láminas o cordones con aglomerantes plásticos.

Los metales de aporte de níquel tienen la característica de presentar una presión de vapor muy baja, la cuál se requiere en los sistemas al vacío y en aplicaciones de tubos al vacío a temperaturas elevadas. Los metales de aporte que contienen fósforo tienen baja ductilidad porque forman fosfuros de níquel. Los metales de aporte que contienen boro se deben controlar con cuidado cuando se usan para soldar en secciones delgadas a fin de prevenir la corrosión.

-Cobalto: Este metal de aporte se utiliza por sus propiedades a alta temperatura y por su compatibilidad con los metales base cobalto. La soldadura brazing en una atmósfera de alta calidad o por difusión produce óptimos resultados. Existen fundentes especiales de alta temperatura para soldar en brazing con soplete.

-Metales refractarios: La soldadura brazing es excelente para fabricar ensambles de metales refractarios, sobre todo aquellos en los que intervienen secciones delgadas. No obstante, son pocos los metales de aporte que se han

diseñado específicamente para aplicaciones a alta temperatura y alta resistencia a la corrosión.

Los metales de aporte de bajo punto de fusión como Ag-Cu-Zn, Cu-P y cobre sirven para unir tungsteno en aplicaciones de contacto eléctrico, pero estos metales de aporte no pueden dar servicio a temperaturas elevadas. En tales casos conviene usar metales raros de más alto punto de fusión como tantalio y colombio. Los metales de aporte base níquel y de metales preciosos también pueden servir para unir tungsteno.

Hay diversos metales de aporte para soldadura brazing que unen molibdeno, pero es preciso considerar el efecto de la temperatura de soldadura brazing sobre la recristalización del metal base. Si se une por brazing por encima de la temperatura de recristalización, el tiempo de brazing debe ser muy corto. Cuando no se requieren aplicaciones a alta temperatura, es factible usar metales de aporte con base de cobre y plata.

2.5 Cadmio.

Elemento químico relativamente raro, símbolo Cd, número atómico 48; tiene relación estrecha con el zinc, con el que se encuentra asociado en la naturaleza. Es un metal dúctil, de color blanco con un ligero matiz azulado, es más blando y maleable que el zinc, pero poco más duro que el estaño. Tiene un peso atómico de 112.40 y densidad relativa de 8.65 a 20°C (68°F), su punto de fusión de 320.9°C (610°F) y de ebullición de 765°C (1410°F) son inferiores a los del zinc. Existen ocho isótopos estables en la naturaleza y se han descrito 11 radioisótopos inestables de tipo artificial. El cadmio es miembro del grupo IIb (zinc, cadmio y mercurio) en la tabla periódica, y presenta propiedades químicas intermedias entre las del zinc metálico en soluciones ácidas de sulfato.

2.5.1 Toxicidad del Cadmio.

El Cadmio es un metal pesado que produce efectos tóxicos en los organismos vivos, aun en concentraciones muy pequeñas. Algunos órganos vitales son blancos de la toxicidad del cadmio. En organismos sobreexuestos, el cadmio ocasiona graves enfermedades al actuar sobre dichos órganos. Existen actualmente algunas descripciones de posibles mecanismos de toxicidad del cadmio. Sin embargo, la implicación real que este elemento tiene como agente tóxico ha sido poco estudiada, por lo que se considera que debe ser monitoreado. Es de gran importancia llevar a cabo estudios para profundizar en los factores de riesgo y así realizar medidas preventivas en la población.

El cadmio no se encuentra en cantidades preocupantes en el agua; sin embargo, puede contaminarla cuando está se conduce a través de las tuberías (que muchas veces están soldadas con materiales que lo contienen) o cuando entra en contacto con desechos químicos. Es importante tomar medidas preventivas para regular las descargas de cadmio al ambiente. Asimismo, se debe proteger a las personas que por una u otra causa se encuentren sobreexuestas a este metal. Debe también considerarse el aumentar la información acerca de los efectos nocivos del cadmio a la población en general.

El cadmio esta en la lista de sustancias peligrosas (Macías, 2006) (hazardous substance list), por lo que está reglamentado por la OSHA y ha sido citado por las normas: STPS, ACGIH, DOT, NIOSH, NTP, DEP, IARC, HHAG EPA.

2.5.2 Efectos en la salud.

El humo del tabaco transporta el cadmio a los pulmones (Taiyin et al; 2002). Esto puede incluso causar la muerte. Otros efectos sobre la salud que pueden ser causados por el cadmio son:

- Diarreas, dolor de estómago y vómitos severos
- Fractura de huesos
- Fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad
- Daño al sistema nervioso central
- Daño al sistema inmune
- Desordenes psicológicos

2.5.3 Cadmio en las aleaciones.

Debido a que el cadmio tiene limitado su uso como metal puro, es usado en forma de aleación binaria o aleaciones más complejas que tienen propiedades útiles para muchas aplicaciones comerciales. Las aleaciones más comerciales que contienen cadmio se dividen en dos grupos:

(a) La presencia del cadmio aumenta alguna característica de la aleación. Pequeñas cantidades de cadmio pueden aumentar la dureza, la resistencia al desgaste, resistencia mecánica, resistencia a la fatiga y propiedades electromecánicas de algunas de aleaciones.

(b) Obtener bajo punto de fusión.

Las aleaciones eutécticas funden a una sola temperatura la cual es más baja que cualquiera de los otros rangos de composición de la aleación. El punto de fusión más bajo de una aleación eutéctica de cadmio es de 46.81°C con pequeñas cantidades de bismuto, plomo, indio y estaño. Las características de fusión de esta aleación eutéctica son usadas en varias aplicaciones para temperatura. Las aleaciones no eutécticas funden arriba de un rango de temperaturas y tiene un rango pastoso el cual puede ser usado fácilmente en el trabajado y formado en soldaduras como metales de aporte.

Una clasificación más detallada de estos grupos es:

1.- Aleaciones con características especiales

a) Aleaciones cobre-cadmio: las cuales tienen cerca del doble de resistencia mecánica y resistencia al desgaste que el cobre puro conteniendo entre 0.08 a 1.2% de cadmio.

b) Aleaciones de zinc conteniendo el 0.1% de cadmio aumenta las propiedades mecánicas de rolado, trefilado o extruido. Las aleaciones de zinc que contienen cadmio en el rango 0.025 a 0.15 % son usados como ánodos de sacrificio en la protección de aceros estructurales inmersos en agua del mar.

c) Aleaciones de plomo con más del 0.075 % de cadmio son usadas en ocasiones como envoltura para cables sujetos a esfuerzos cíclicos.

2.- Unión y aleaciones fundibles.

Las aleaciones de estaño, bismuto, plomo y cadmio, las cuales funden aproximadamente a 700°C son usados en la unión de cerámicos metalizados y componentes de vidrios en marcos metálicos y chasis donde no es posible tener alta temperatura durante la aplicación de la soldadura, se clasifican de la siguiente manera:

a) Temperatura intermedia de aleaciones en soldering. El cadmio aleado con plata, zinc y/o hacen una excelente soldadura con una resistencia a la tensión dos o tres veces mayor que las soldaduras más comunes usadas en este rango de temperatura.

b) Aleaciones de plata para brazing. El cadmio es un componente importante en las aleaciones cuaternarias con plata, cobre y zinc en

el rango de temperaturas bajas del brazing. Estos se distinguen por la habilidad para producir alta resistencia en uniones a temperaturas de trabajo mayores a los 1000°C cercanos al punto de fusión de los metales de aporte de la aleación ternaria de Ag-Cu-Zn.

2.5.4 Cadmio en el brazing.

El cadmio es un metal que se funde a 321°C y al calentarse en una atmosfera de aire por encima de esta temperatura, se forma óxido de cadmio. Por lo general, los metales de aporte con cadmio contienen entre 16 y 25% en peso de este elemento. El proceso de soldadura brazing utilizando un metal de aporte que contenga cadmio se realiza, en general, a una temperatura igual o superior a los 650°C. Por consiguiente, durante dicho proceso siempre se liberar a una cierta cantidad de humos de óxido de cadmio. Sin embargo, el cadmio hierve a 767°C y, por encima de esta temperatura, se producirán humos tóxicos en cantidades más elevadas.

No es difícil entender, por lo tanto, como un sobrecalentamiento durante la operación del proceso de soldadura brazing o la aplicación de una técnica inadecuada puede ocasionar que en el lugar de trabajo se exceda el límite legal de exposición al cadmio. El proceso de soldadura brazing con soplete de mano constituye el proceso más arriesgado en lo que al potencial de sobrecalentamiento respecta, dado que los combustibles normales producen llamas de elevadas temperaturas. Por ejemplo, la temperatura de una llama de oxiacetileno alcanza los 3,200°C, la de gas natural y aire comprimido los 1950°C y la de propano y aire comprimido aproximadamente los 1700°C.

Un metal de aporte con contenido de cadmio en brazing se vaporizará instantáneamente si se funde directamente bajo una llama producida por una cualquiera de estas fuentes de calor. Esto liberará humos de óxido de cadmio a la atmósfera del entorno, creándose una situación peligrosa. El óxido de cadmio

es un polvo amarillo que a veces puede verse sobre un banco de trabajo o en la zona circundante del mismo, después de una emanación de humos.

2.5.5 Límites de exposición laboral.

Según la OSHA (Occupational Safety and Health Administration) el límite legal de exposición permitido en el aire (PEL) es de 0.005 mg/m^3 de cadmio en forma de polvo o humo, como promedio durante un turno laboral de 8 horas. La OSHA ha reconocido la posibilidad de que algunos procesos en ciertas industrias no pueden lograr el límite de 0.005 mg/m^3 por medio de medidas de ingeniería y prácticas laborales. Estas industrias deben cumplir con los límites SECAL (límites en el aire por medidas separadas de control de ingeniería) 0.015 o 0.05 mg/m^3 .

NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health): Se recomienda que la exposición a cancerígenos ocupacionales se limita a la más baja concentración factible.

ACGIH (American Conference of Industrial Hygienist): el límite recomendado de exposición en el aire es de 0.01 mg/m^3 en forma de compuestos de cadmio (fracción respirable). Como promedio durante un turno laboral de 8 Hrs.

2.5.6 Precauciones a la exposición al cadmio procedente de un proceso de soldadura (Macías, 2006).

Las precauciones que se deberán tomar en cuenta durante la exposición del cadmio son:

- Encierre las operaciones y use ventilación por extracción localizada en el lugar de las emisiones químicas.

- En caso contrario debe establecer una área regulada y marcada donde se usa, manipula o almacena el cadmio, según exige la norma de la OSHA: 29 CFR 1910.1027.
- Verificar las áreas peligrosas conforme al procedimiento NOM-STPS 071: Determinación de Cadmio en el aire método espectrofotométrico de absorción atómica con flama.

Debido a lo mencionado anteriormente se puede observar que el cadmio es un metal muy nocivo para la salud, en el proceso de soldadura algunos metales de aporte contienen este elemento por lo que se deben tomar ciertas precauciones a la exposición al cadmio.

2.6 Materiales de aporte libres de cadmio.

El cadmio está presente en los metales de aporte base plata, debido a que aumenta la fluidez y disminuye la tensión interfacial, pero el principal problema que presenta son los riesgos de la salud. Por lo tanto se han realizado diferentes investigaciones para sustituir este elemento y analizar su influencia en los diferentes parámetros como propiedades mecánicas y microestructura, siempre hay que tener en cuenta que, al eliminar el cadmio de la composición de las aleaciones, aumenta la temperatura de trabajo y disminuye la fluidez. Por esta razón, cuando se escoge una aleación sin cadmio, hay que considerar que, si queremos mantener las mismas propiedades de la unión.

Las tablas 2.1 y 2.2 muestran una relación entre los materiales de aporte conteniendo cadmio y metales de aporte sin cadmio de uso comercial (www.jm-metaljoining.com).

Tabla 2.1. Materiales de aporte conteniendo cadmio (www.jm-metaljoining.com).

Nombre comercial	Composición química (%) e.p.					Zona de fusión °C
	Ag	Cu	Zn	Cd	Ni (%)	
Easy-flo™	50	15	16	19		620-630
Easy-flo™ No.3	50	15.5	15.5	16	3	634-656
Easy-flo™ No.2	42	17	16	25		608-617
DIN Argo-flo™	40	19	21	20		595-630
Argo-flo™	38	20	22	20		608-655
Mattibraz e™ 35	35	26	21	18		610-700
Argo-swift™	30	28	21	21		607-685
Argo-bond™	23	35	27	15		616-735

Tabla 2.2. Materiales de aporte libres de cadmio (www.jm-metaljoining.com).

Nombre comercial	Composición química (%) e.p.					Zona de fusión °C
	Ag	Cu	Zn	Sn	Si (%)	
Silver-flo™ 60	60	26	14			695-730
Silver-flo™ 56	56	22	17	5		618-652
Silver-flo™ 55	55	21	22	2		630-660
Silver-flo™ 452	45	27	25.5	2.5		640-680
Silver-flo™ 40	40	30	28	2		650-710
Silver-flo™ 38	38	31	29	2		660-720
Silver-flo™ 302	30	36	32	2		665-755
Silver-flo™ 20	20	44	35.85		0.15	776-815

Se puede observar que al no utilizar cadmio, se aumenta el punto de fusión de la aleación, en algunos casos se debe de aumentar el contenido de plata y cobre para lograr una disminución de la temperatura por lo que el costo de la aleación aumenta considerablemente.

2.6.1. Elementos de aleación para sustituir el cadmio.

Existen diferentes alternativas para sustituir el cadmio en los metales de aporte, una de las alternativas es agregando elementos de aleación como lo es

el germanio (D'silva 1980), galio (Weise et al, 1996) (Weise et al, 2001) o Zinc (Hiujie et al, 2002).

D'Silva (D'Silva 1980) substituyó el cadmio con germanio, debido a que este elemento reduce la tensión interfacial, el germanio se utilizó en cantidades de 8-12%, además de un contenido de zinc de 9-15%, cobre de 15-25% y la plata como base, para unir un acero inoxidable 304, variando el porcentaje de las aleaciones de los aportes, encontró que con una composición de 56.5% de plata, 20% de cobre, 13.5% de zinc y 10% de germanio se obtuvo una temperatura de solidus de 530°C y una temperatura de liquidus de 705°C.

Weise (Weise et al, 1996) por otro lado substituyó el cadmio con galio con el fin de bajar aun más el punto de fusión y disminuir la tensión superficial de la aleación. Debido a que para algunos materiales y aplicaciones de temperaturas arriba de 700°C, son temperaturas de trabajo altas, el galio se agregó en cantidades de 12-15%, el porcentaje de plata fue de 58-68%, cobre de 14-20%, zinc de 3-7% y estaño de 0-1%, las temperaturas que se obtuvieron se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Variación de la composición química y su punto de fusión (Weise 1996).

Composicion de la aleación (%) e.p.					
Ag	Cu	Ga	Zn	Sn	Temp de fusión °C
68	14	12	6	----	590
58	20	15	7	----	620
62	16	15	7	----	610
64	16	16	4	----	610
65	16	15	3	1	600

Se observa que uno de los factores que influye sobre la temperatura de fusión de los metales de aporte fue el contenido de plata, incrementando el contenido de plata, disminuye la temperatura de fusión, la menor temperatura

se obtuvo cuando el contenido de plata aumentó a un 68%. La diferencia de temperaturas entre la aleación con menor y mayor temperaturas fue de 30°C, pero el contenido de plata es de 10%, por lo que el costo es mucho mayor.

Weise (Weise et al, 2001) también realizó experimentos variando los contenidos de plata, cobre, zinc, estaño, indio y galio para disminuir el punto de fusión de los materiales de aporte, los resultados se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Variación de la composición química respecto a su punto de fusión (Weise 2001).

Composición química (%) e.p.						
Ag	Cu	Zn	Sn	Ga	In	Temperatura de fusión °C
56	19	17	5	3	0	610
56	19	17	6	2	0	605
55	15	22	2	6	0	610
63	15	15	2	5	0	615
63	15	15	5	2	0	620
60	15	17	1	5	2	610

La temperatura de fusión de los metales de aporte es menor que las de uso comercial, debido al contenido de galio presente. Por otro lado la cantidad de plata es menor a la que utilizo Weise, y además, se tienen temperaturas más altas. Por otra parte el contenido de galio fue menor que el indicado en la tabla 2.3, además de que se aumentó considerablemente el contenido de estaño.

Por otro lado Hiujie (Hiujie et al, 2002), substituyó el porcentaje de cadmio agregando mayor porcentaje de Zn, esto con el fin de aumentar la mojabilidad en una aleación base TiAl con un acero 40Cr. El material de aporte utilizado fue con una composición de 34% Cu, 16%Zn y el resto Ag. La figura 2.7 muestra la imagen de la microestructura de la sección unida a 1173°K por 20 minutos, la microestructura se dividió en 4 zonas correspondientes a las letras D, E, F y G respectivamente.

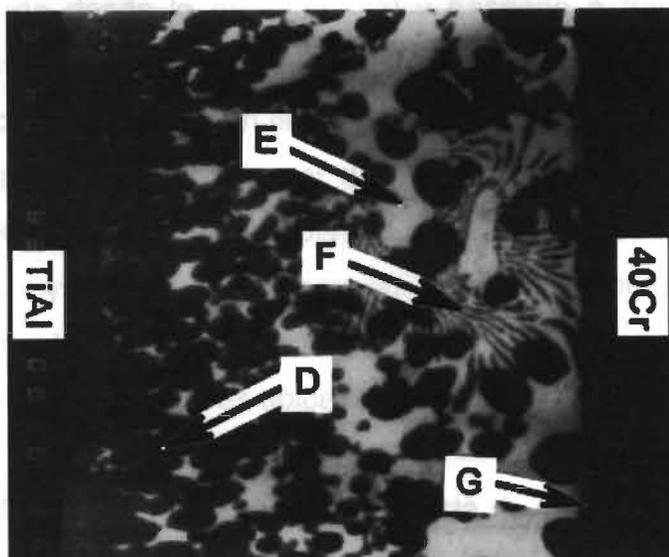


Figura 2.7 Imagen de la microestructura en una unión por brazing a 1173°K durante 20 minutos (Hiujie et al, 2002).

La tabla 2.5 muestra los resultados cuantitativos del EPMA (microanalizador de imágenes de rayos X) de las composiciones químicas de cada fase.

Tabla 2.5. Resultados del EPMA de las distintas zonas de reacción (Hiujey et al, 2002).

Zona	Composición química (% e.p.)						
	Ag	Cu	Ti	Al	Fe	C	Zn
D	1.5	57.6	24.3	13.4	0.6	1.9	0.7
E	85.3	9.1	1.5	1.6	0.2	1.1	1.2
F	58.8	36.8	0.7	0.8	1.2	1.5	0.2
G	0.6	3.7	41.3	2.1	4.9	46.6	0.8

Como se puede apreciar, existe una pequeña cantidad de Zn en todas las zonas, los mayores elementos en la zona G son el titanio y el carbono, los cuales están en una relación aproximada de 1:1 por lo que se atribuye a que la fase de la zona G corresponde a TiC, la formación de este carburo de TiC, es atribuida a la reacción entre el carbono difundiendo desde el acero 40Cr y el

titanio que difunde desde la aleación TiAl y pasando a través del metal de aporte Ag-Cu-Zn.

Los mayores elementos en la zona E corresponden a la plata y el cobre, la cantidad de plata es mucho mayor que la cantidad de cobre por lo que la zona E es una solución sólida base plata. La zona F está compuesta de mayor cantidad de plata y cobre y su proporción de Plata y Cobre es similar a la composición del eutéctico Ag-Cu, por lo que se puede observar en la figura 4.7 que la morfología de la zona F es típica de un eutéctico.

La zona D esta principalmente compuesta de cobre, titanio y aluminio, y los contenidos de estos elementos están en una cierta proporción, por lo que la zona D está compuesta de una fase ternaria Cu-Ti-Al. La formación de esta fase es atribuida a la reacción entre el cobre en el metal de aporte Ag-Cu-Zn y el titanio y aluminio que difundieron del metal base TiAl.

La figura 2.8 muestra los esfuerzos de corte a temperatura ambiente de las uniones de TiAl/40Cr realizado a 1173°K en diferentes tiempos. Cuando el tiempo de brazing se encuentra en el rango de 2-20 minutos, la resistencia de la unión se incrementa a medida que se incrementa el tiempo llegando a un valor máximo de 190 Mpa. Cuando el tiempo de brazing es mayor a 20 minutos la resistencia de la unión disminuye a medida que aumenta el tiempo del brazing, la microestructura de la unión se muestra en la figura 2.9.

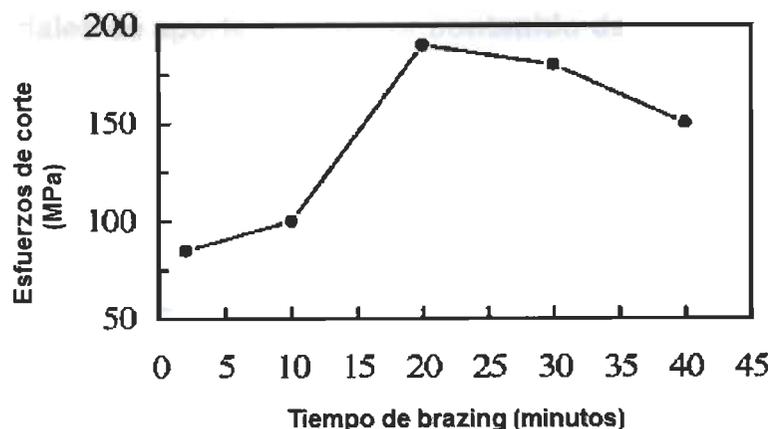


Figura 2.8. Esfuerzos de corte del brazing realizado a 1173°K a diferentes tiempos (Hujie et al, 2002).

Desde un punto de vista microestructural, el cambio de la resistencia de la unión con el tiempo de brazing depende en gran medida de la microestructura de la unión. Cuando es un tiempo corto, por ejemplo 2 minutos, la zona de reacción TiC no existe o es muy delgada para poderse observar. Además como se puede observar en la figura 2.9 no existe una zona de reacción del acero con el metal de aporte o es muy delgada para poder apreciarse en este caso el valor del esfuerzo de corte fue bajo.

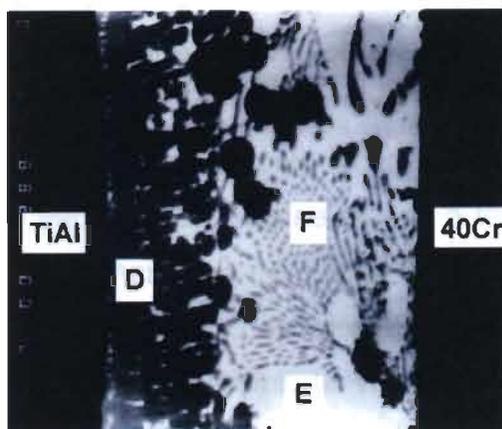


Figura 2.9. Brazing realizado a 1173°K por 2 minutos (Hujie et al, 2002).

2.6.2. Materiales de aporte con mayor contenido de plata.

Otra alternativa de metal de aporte libre de cadmio es el aumento del contenido de plata, (Elrefaey et al, 2009), (Elrefaey et al, 2007) (Hong et al, 2006), (Li et al, 2007), (Liaw et al, 2005), (Morscher et al, 2006), (Paiva et al, 2000), (Yamazaki et al, 2006) en distintas cantidades, llegando a utilizar metal de aporte con contenido de plata de hasta 100% (Chan et al, 2003), logrando obtener buenas propiedades de la unión. Destacando las investigaciones realizadas por Elrefaey (Elrefaey et al, 2009) quien evaluó los efectos de los parámetros del brazing en las propiedades mecánicas y microestructurales de uniones de titanio, utilizando en este caso indio para disminuir el punto de fusión en sustitución del cadmio.

El metal de aporte que se utilizó en este estudio para este tipo de pruebas fue el metal de aporte base plata conocido como Incusil-ABA, este metal de aporte tiene una composición de 59.05% plata, 27.2%Cu, 12.5%In y 1.25%Ti. Este material tiene una temperatura de solidus de 605°C y una temperatura del liquidus de 715°C, la cual es significativamente más baja que los metales de aporte base plata tradicionales. El uso de la plata y el indio es la principal razón para la disminución de la temperatura de fusión del metal de aporte, el titanio es añadido para darle una mayor resistencia a la corrosión.

Las muestras fueron sujetadas con acero inoxidable, y después colocadas en un horno de vacío. El brazing se realizó a temperaturas de 710, 750 y 800°C con tiempos de permanencia de 5, 30 y 90 min con un vacío de 2×10^{-5} Pa, se sostuvo la temperatura 100°C debajo de la temperatura de brazing para minimizar el gradiente de temperatura, la velocidad de calentamiento y enfriamiento fue ajustada a 15°C/min. Las microestructuras obtenidas de las muestras unidas a 750°C en tiempos de 5, 30 y 90 min se muestran en la figura 2.10.

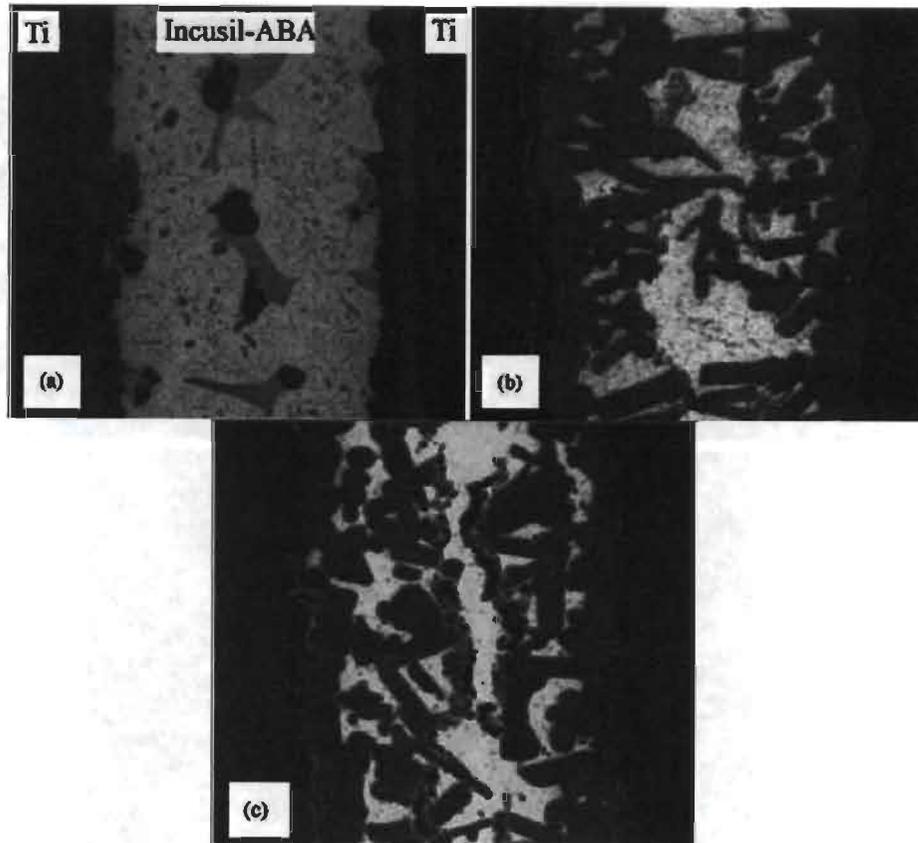


Figura 2.10. Microestructuras de las muestras unidas por brazing a 750°C en diferentes tiempos (a) 5, (b) 30 y (c) 90 min (Elrefaey et al, 2009).

Se puede observar que la microestructura de las uniones cambia conforme se le aumenta el tiempo de brazing especialmente cuando el tiempo se prolonga por más de 5 minutos, al aumentar el tiempo hay reacciones entre las capas de la aleación y el substrato de titanio cuyo espesor aumenta cuando el tiempo del brazing se prolonga.

El crecimiento en la zona de reacción de la capa interfacial resulta en la pérdida de elementos de la aleación. Se realizó una caracterización de los capas de las uniones que reaccionaron en la interface titanio/metal de aporte en el microscopio electrónico de barrido (MEB) y se muestran la figura 2.11, además se obtuvo un análisis químico cuantitativo de los puntos indicados en la figura y los resultados se muestran en la tabla 2.6.

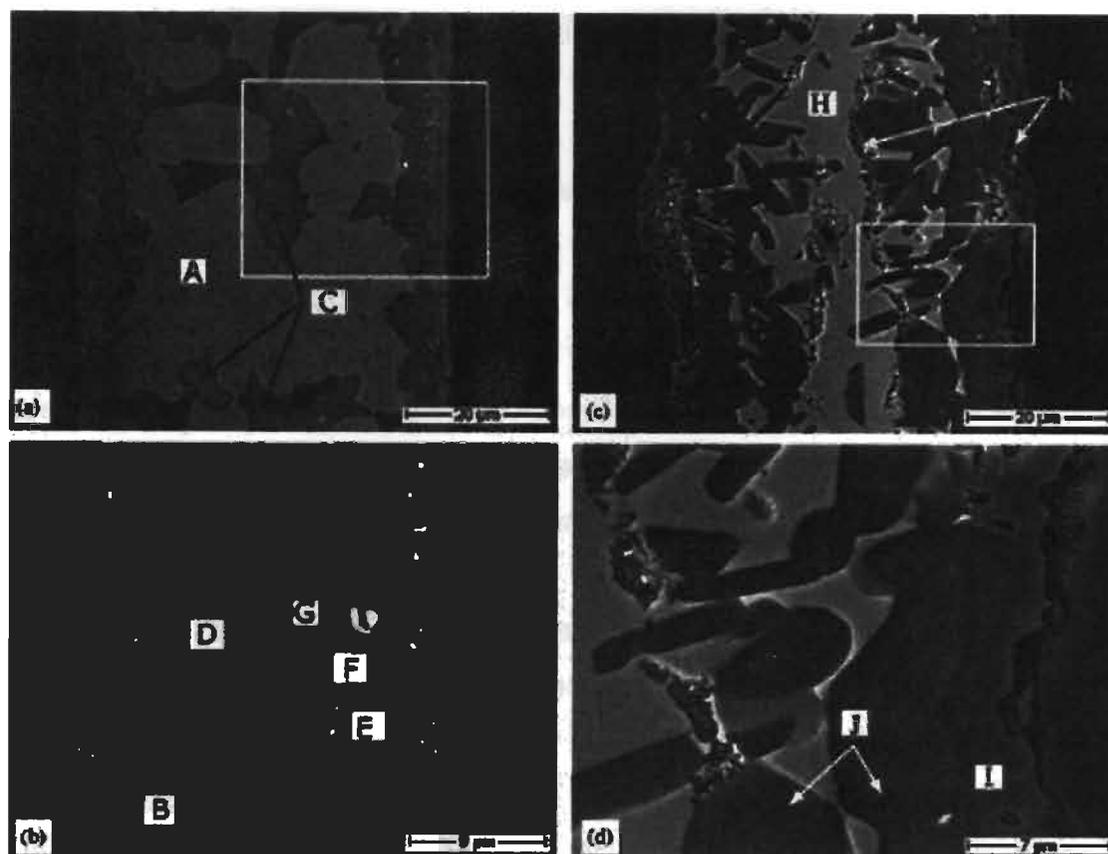


Figura 2.11. (a) Uniones a 750°C por 5 min, (b) vista ampliada de la zona indicada, (c) imagen de la unión a 750°C por 90 min y (d) vista ampliada de la zona indicada en (c) (Elrafey et al, 2009).

Tabla 2.6 Microanálisis EDS de las regiones observadas en la figura 2.11 (Elrafey et al, 2009).

Símbolo	Composición química (% e.p.)			
	Ti	Cu	Ag	In
A	0.52	11.06	80.94	7.48
B	0.45	92.43	6.32	0.80
C	20.86	66.09	0.00	13.05
D	2.00	94.19	2.39	1.42
E	65.56	32.44	1.04	0.96
F	47.90	51.20	0.90	0.00
G	17.92	75.84	0.00	6.24
H	0.25	2.43	95.28	2.04
I	64.56	30.83	3.54	1.08
J	47.86	48.76	3.38	0.00
K	62.09	7.05	10.84	20.02

Como se puede apreciar en tiempos cortos de permanencia (5 min), se puede observar con la ayuda del MEB la presencia de fases distintas que se observan en la figura 2.11 (a) la región A es una matriz de solución sólida de plata rica en indio y cobre presente a través de la unión

Los precipitados de estaño están distribuidos aleatoriamente en la matriz de la solución sólida de plata. Estos precipitados (región B) se muestran claramente en la figura 2.11 (b) la composición de estos precipitados son difícil de detectar mediante el análisis de rayos x por dispersión de energía (EDS), sin embargo, los ensayos sugieren que es una solución rica en cobre.

Una de las fases principales presentes en la unión por brazing es la región C de la figura 2.11 (a) la cual es una fase intermetálica rica en cobre conteniendo altos porcentajes de indio y titanio con una composición cercana al Cu_2TiIn . En la interface titanio/metal de aporte se distinguen fácilmente estructuras de capas intermetálicas, de acuerdo a los análisis químicos de la tabla 2.6 y de acuerdo al diagrama de equilibrio Cu-Ti, se presenta Ti_2Cu , TiCu y $\beta\text{Cu}_4\text{Ti}$ correspondiente a la letra E, F y G respectivamente de la figura 2.10.

La difusión del titanio hacia la unión y el metal de aporte fundido es el principal factor de control para la formación de esas fases intermetálicas.

La figura 2.11 (c) muestra la imagen de la unión del brazing con un tiempo de sostenimiento alto (90 min), la matriz de solución sólida de plata (región H), fue contraída debido a que hubo un desprendimiento del indio y cobre para formar más fases intermetálicas con el indio. El análisis químico de esta región fue más bajo en indio y cobre comparado con la región con tiempo de sostenimiento de 5 min (región A), por lo tanto se forma Ti_2Cu y TiCu en tiempos de brazing altos.

Las áreas I y J respectivamente representan esos compuestos intermetálicos los cuales se muestran en la figura 2.11 (d) se pueden observar

cambios en los precipitados ricos en titanio (región K) en la matriz de plata y una región interfacial entre el substrato de titanio y Ti_2Cu , esta región es muy fina para analizarla con precisión por medio de EDS, pero mediante análisis químico se sugiere que puede ser Ti_3In . Los precipitados de Ti_3In son fácilmente mas observados en tiempos de permanencia largos que en tiempos de permanencia cortos. Al inicio el indio se disuelve en el titanio a alta temperatura y cuando la temperatura se disminuye durante el enfriamiento, el titanio se sobresatura de indio y empieza a precipitar la fase Ti_3In en dos áreas, un área es localizada en la región interfacial y la otra se localiza en el centro del área del brazing.

La microestructura de las uniones por brazing cambia significativamente cuando disminuye la temperatura de brazing a $710^{\circ}C$, con un tiempo de sostenimiento de 5 min, la fusión de la aleación tiene lugar solamente en la interface por que la temperatura coincide exactamente con la temperatura de fusión y el tiempo de sostenimiento es muy bajo.

La figura 2.12 muestra la microestructura del brazing realizado a alta temperatura ($800^{\circ}C$) y la tabla 2.7 muestra el análisis químico de los puntos indicados en la figura.

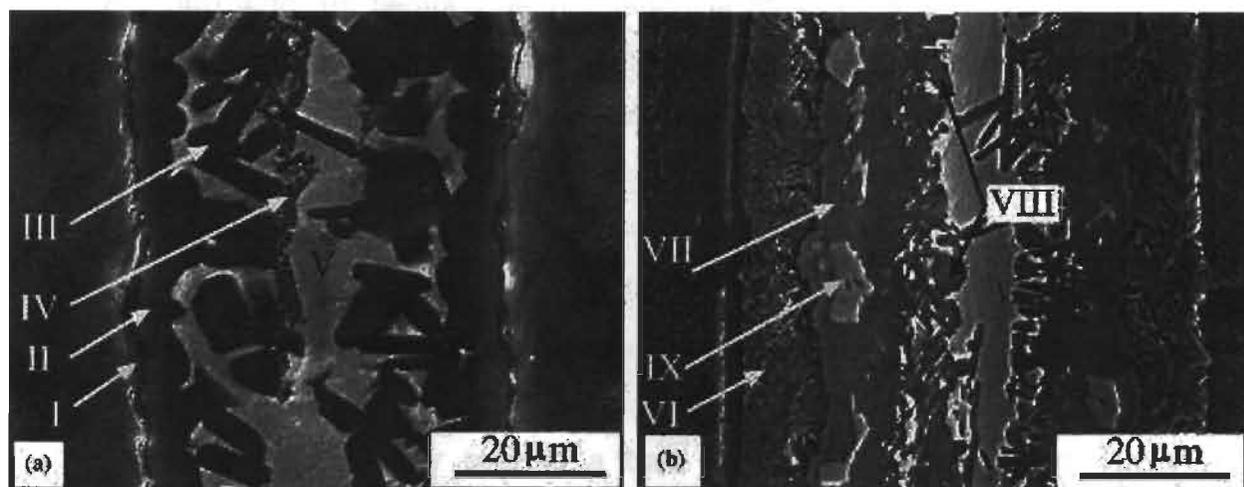


Figura 2.12. Imagen del MEB realizado en las uniones de brazing a $800^{\circ}C$ (a) 5 y (b) 90 minutos (Elrefaey et al, 2009).

Tabla 2.7 Análisis químico de las regiones mostradas en la figura 2.11 (Elrefaey et al, 2009).

Símbolo	Composición química (% e.p.)			
	Ti	Cu	Ag	In
I	63.54	33.32	0.00	3.14
II	50.29	45.36	3.66	0.69
III	41.26	46.54	11.29	0.91
IV	65.14	3.44	8.68	22.74
V	1.23	5.04	85.68	8.05
VI	82.92	8.05	3.66	5.37
VII	46.16	46.02	7.82	0.00
VIII	39.97	45.88	12.51	1.64
IX	45.75	4.73	44.99	4.53

En tiempos de permanencia de 5 min (figura 2.12a) y considerando el análisis químico de las diferentes fases, las reacciones de la interface consiste, en una capa delgada de Ti_2Cu seguido por una capa de $TiCu$ correspondientes a las áreas I y II, respectivamente.

La fase III es también $TiCu$ pero enriquecido con un alto porcentaje de plata, por otra parte en las fases anteriores el Ti_3In está presente en forma de cadenas de finos precipitados correspondiente a la región IV y la matriz de solución sólida de plata correspondiente a la región V.

Por otro lado, en tiempos de permanencia mayores que 5 min (figura 2.12b), la microestructura es compleja. No importa que la difusión del cobre al substrato de titanio y baje la transformación de la temperatura eutéctica del titanio, ya que se forma una fase nueva ($\alpha-\beta Ti$) por la descomposición de la fase $\beta-Ti$ durante el enfriamiento. La fase $\alpha-\beta Ti$ es la indicada en la región VI de la figura 2.9 b la fase $\beta-Ti$ presenta una morfología en forma de agujas, mientras que la fase $\alpha-Ti$ es la zona oscura entre las agujas del $\beta-Ti$.

Similar a la unión por brazing a bajo tiempo de sostenimiento, las uniones con un tiempo de permanencia de 90 min muestran la presencia de la fase $TiCu$ pero esta es más densa y ocupa más área de la unión como se

muestra en la región VII de la figura 2.12. Además la fase TiCu enriquecida con altos porcentajes de plata está presente en la región VIII. Se observan también islas de la fase Ag-Ti la cual esta uniformemente distribuida en la fase Ti-Cu, donde la plata deja de reaccionar con el titanio difundido para formar las islas de Ag-Ti.

Elrefaey (Elrefaey et al, 2007) realizó el brazing de Titanio con un acero de bajo carbón, utilizando un metal de aporte base plata de la composición Ag-45.5Cu-3.5Ti, el cual tiene un punto de fusión de 780 – 850°C, se analizó el efecto de cambiar el espesor del traslape, realizando el brazing a una temperatura de 850 – 930°C por 15 minutos. En la figura 2.13 se observa la microestructura del brazing realizado a una temperatura de 850°C por 15 minutos.

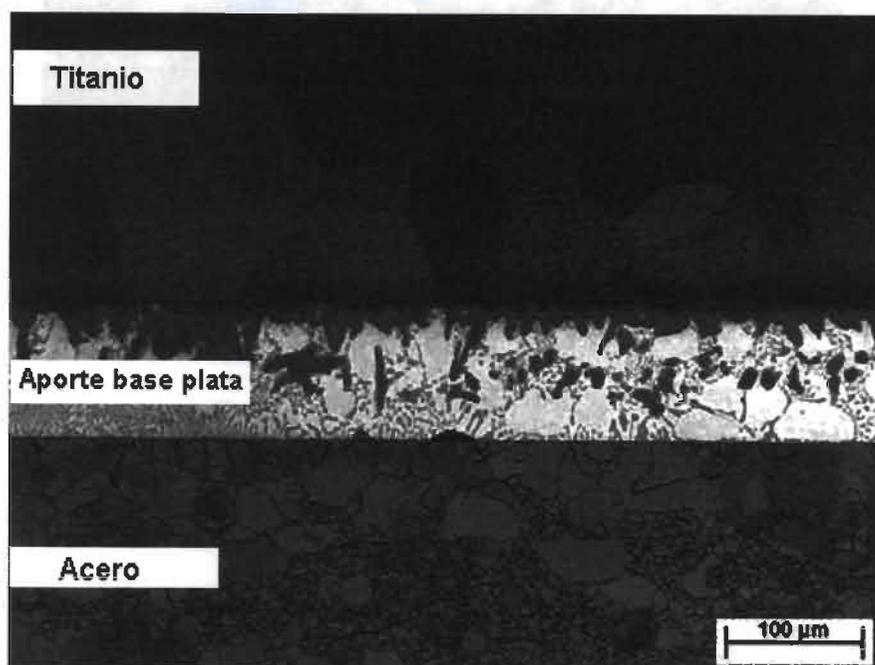


Figura 2.13. Microestructura del brazing realizado a 850°C por 15 minutos (Elrefaey et al, 2007).

Se puede observar una mayor zona de reacción en la interfase titanio/metal de aporte en contraste con la zona de reacción correspondiente a la interfase del acero, en el cual no se observa una capa de reacción con el metal de aporte. Se observa una estructura de grano formada en el acero, la formación de esta estructura de granos gruesos es resultado de la difusión acompañada por la recristalización del substrato de acero a alta temperatura.

Las microestructuras del brazing realizado a 880° C y 930°C se observan en las figuras 2.14 y 2.15.

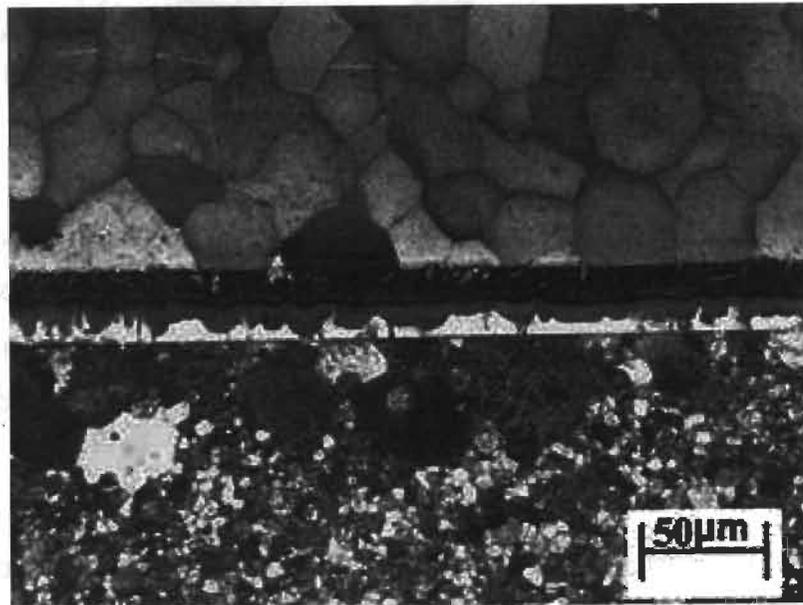


Figura 2.14. Microestructura del brazing realizado a 880°C por 15 minutos (Elrefaey et al, 2007).

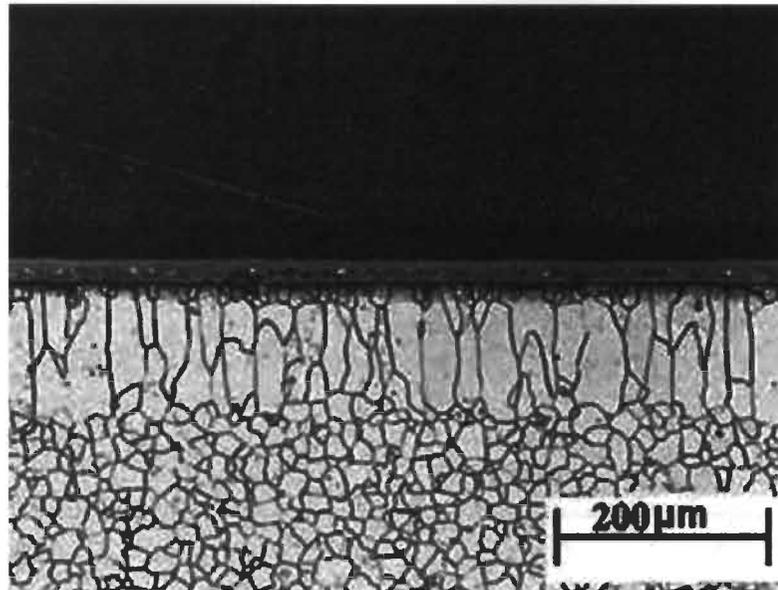


Figura 2.15. Microestructura del brazing realizado a 930°C por 15 minutos (Elrefaey et al, 2007).

Se puede observar que la microestructura de grano grueso que se forma en la interface del acero a 850°C cambia a una estructura columnar cuando el brazing se realiza a 930°C, esto es atribuido a la generación de una fase ferrítica cerca de la interface por la difusión de la ferrita estabilizada por el titanio.

Como se observa en la figura 2.14 en el substrato de Titanio no se observa recristalización y transformación de fase a la temperatura de 880°C. Sin embargo a 930° C en los granos de titanio se observa un crecimiento de después de la recristalización (figura 2.15). Los esfuerzos de corte obtenidos en estos experimentos se muestran en la figura 2.16.

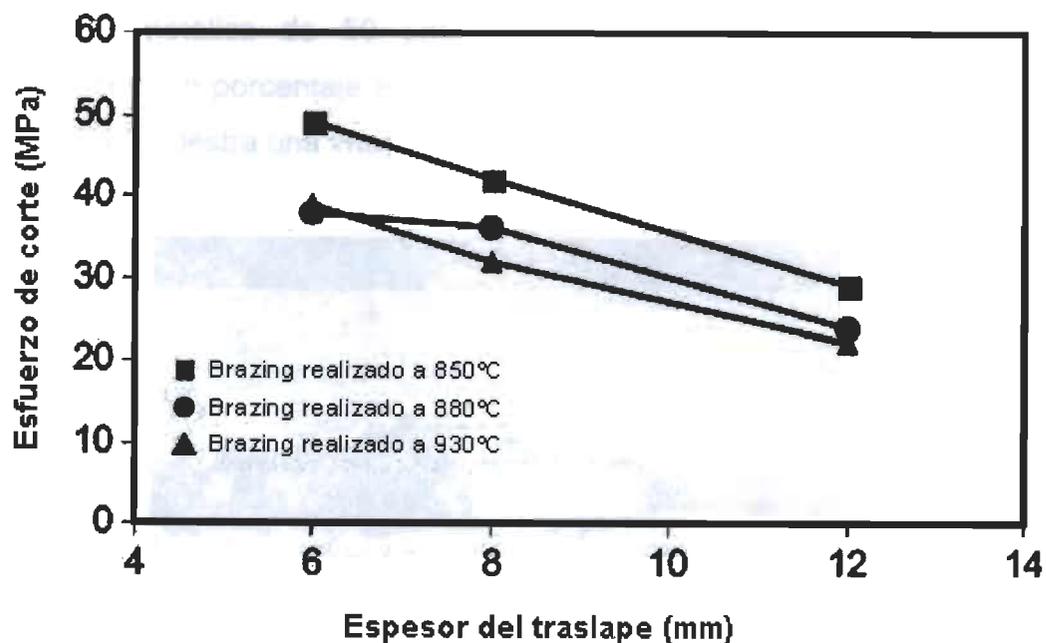


Figura 2.16. Relación entre el esfuerzo de corte de la unión, espesor del traslape y la temperatura de brazing (Elrefaey et al, 2007).

En la figura 2.16 se puede apreciar que a medida que se aumenta el ancho del traslape disminuye el esfuerzo de corte, por otro lado también se muestra el efecto de la temperatura sobre el esfuerzo de corte, a medida que se aumenta la temperatura hay una disminución de los esfuerzos de las uniones, esto debido a la formación de compuestos intermetálicos.

Li (Li et al, 2007) por su parte realizó una investigación donde estudió la estructura de la interface y propiedades mecánicas del TiAl unido por brazing a un acero 42CrMo utilizando como metal de aporte multicapas de Ag-Cu/Ti/Ag, en este caso el uso del cadmio fue sustituido por una mayor cantidad de plata.

Los materiales utilizados en este experimento fue la aleación TiAl forjado y una barra de acero rolado de 42CrMo la composición química fue la siguiente Ti (50%), Al (46.5%), V (2.5%) y Cr (1%) en fracción molar. La composición del acero por su parte fue de C (0.42), Cr (1), Mn (0.7), Si (0.3), Mo (0.5), y el resto de Fe (esto en porcentaje en masa), el metal de aporte utilizado fue una

multicapa metálica de 50 μm de espesor de Ag-Cu/Ti/Ag-Cu con una composición en porcentaje en peso de Cu (33), Ti (4.5) y el resto de plata, la figura 2.17 muestra una imagen del MEB del metal de aporte.

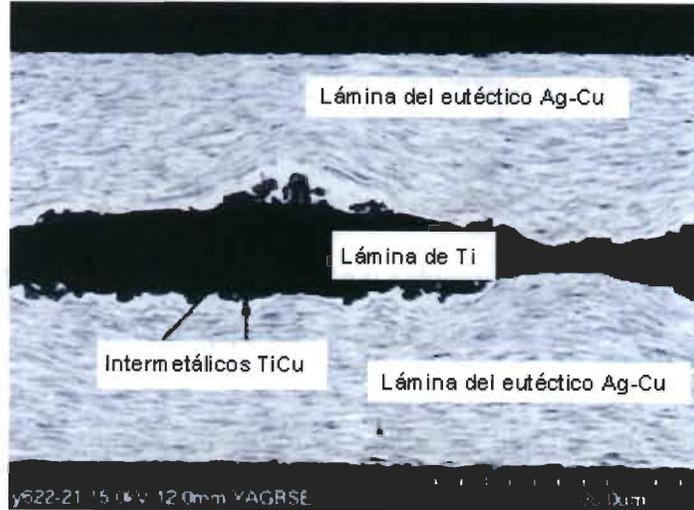


Figura 2.17. Imagen del metal de aporte multicapa de Ag-Cu/Ti/Ag-Cu (Li et al, 2007).

Los resultados de los diferentes ensayos de tensión se muestran en las figuras 2.18 y 2.19.

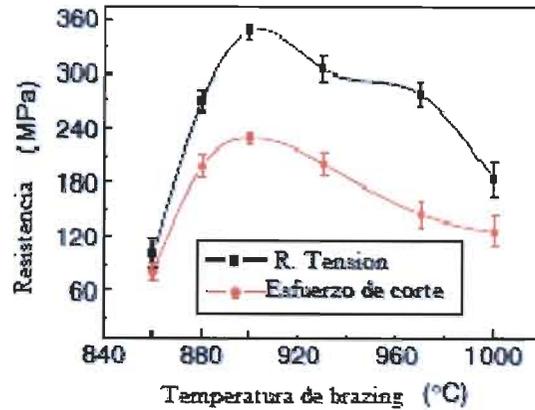


Figura 2.18. Resistencia a la tensión y esfuerzos de corte a diferentes temperaturas en tiempo de 5 min (Li et al, 2007).

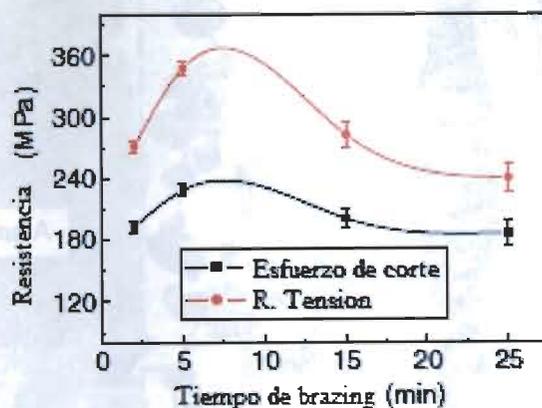


Figura 2.19. Resistencia a la tensión y esfuerzos de corte a 900°C en diferentes tiempos de brazing (Li et al, 2007).

Como se puede observar a medida que se aumenta la temperatura, aumenta la resistencia a la tensión y los esfuerzos de corte hasta alcanzar un punto máximo que es a la temperatura de 900°C. Después de este punto las propiedades de la unión disminuyen considerablemente a medida que se incrementa la temperatura de brazing.

Por otro lado, los mejores resultados de resistencia a la tensión y esfuerzos de corte se lograron a un tiempo de 5 minutos, a medida que se aumenta el tiempo disminuyen las propiedades mecánicas de la unión.

La microestructura de las uniones fueron examinadas mediante microscopía óptica, microanálisis de rayos X y MEB (figuras 2.20, 2.21 y 2.22).

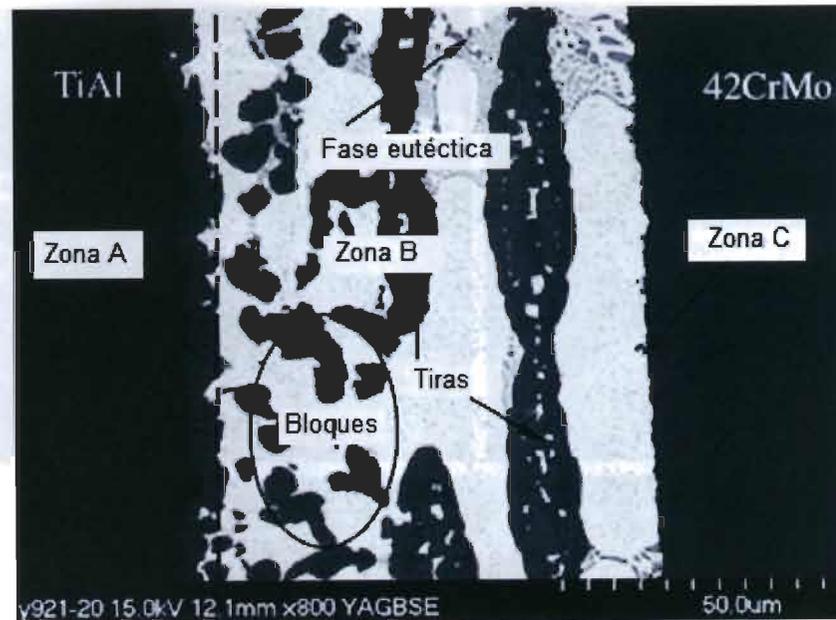


Figura 2.20. Imagen de electrones retrodispersados en la unión por brazing realizado a 900°C por 5 min (Li et al, 2007).

En la figura 2.20 se puede observar el MEB realizado a las muestras unidas a 900°C por 5 min, se puede observar que la zona de reacción tiene tres distintas regiones marcadas como A, B y C. Se observa que la zona A esta compuesta de al menos dos capas de reacción.

La zona B está compuesta por tres fases, la fase blanca es la matriz en la cual están dispersas algunas fases eutécticas y bloques irregulares grises, la zona C es una delgada capa de reacción adyacente al acero.

Las figuras 2.21 y 2.22 muestran imágenes obtenidas con la ayuda del MEB de las uniones por brazing a diferentes temperaturas. Se puede observar que la microestructura de la unión cambia gradualmente cuando se incrementa la temperatura de brazing o el tiempo. Cuando se le adiciona el metal de aporte este reacciona con ambos metales base y forma unas capas de reacción severas entre el metal de aporte y los substratos cuyo espesor se incrementa a medida que se aumenta la temperatura o el tiempo de brazing.

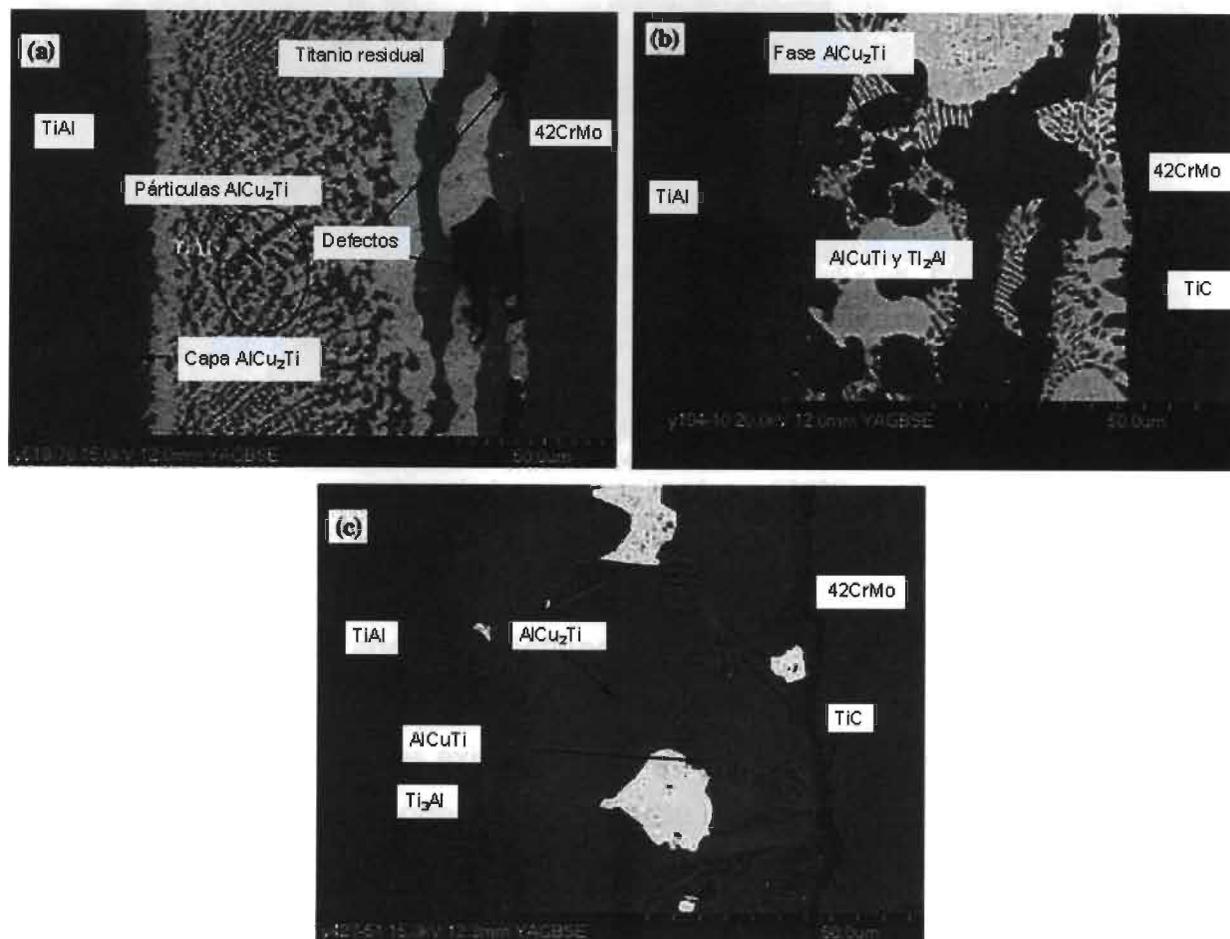


Figura 2.21. Imágenes de electrones retrodispersados de las uniones de brazing realizadas a diferentes temperaturas por 5 min (a) 860 C (b) 930 C (c) 1000 C (Li et al, 2007).

Cuando la temperatura de brazing fue baja (860 C/5min) o el tiempo de brazing fue corto (900 C/2min, figura 2.22) la capa de reacción de la interface TiAl es muy delgada.

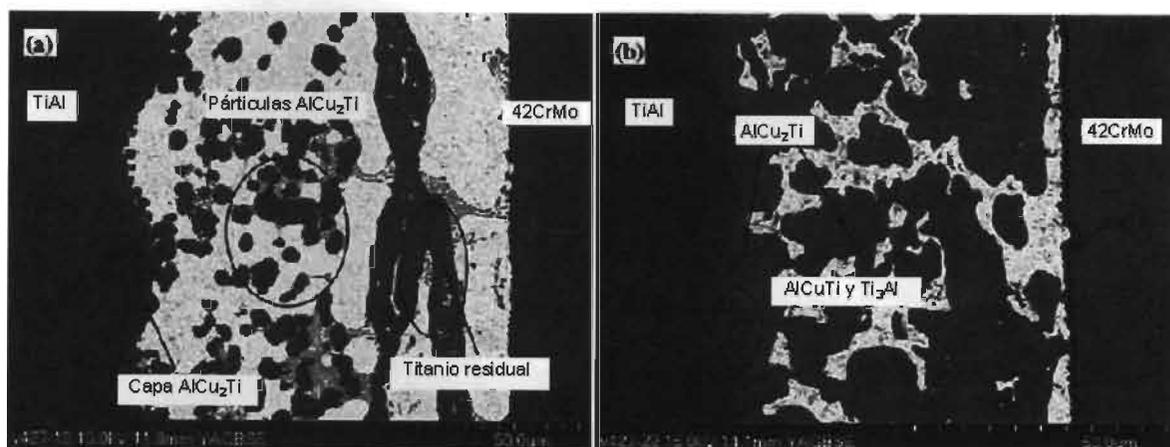


Figura 2.22. MEB de las pruebas de brazing realizadas a 900°C a diferentes tiempos (a) 2 (b) 25 minutos (Li et al, 2007).

2.6.3 Materiales de aporte eutécticos Ag-Cu.

Otra de las alternativas existentes de metales de aporte libres de cadmio, es el uso de un metal de aporte eutéctico Ag-Cu (Abdel et al, 2007), (Hiraoka et al, 2006), (Liu et al, 2002), (Shiue et al, 2004), (Stephens et al, 2006), logrando tener uniones con buenas propiedades. Destacando lo realizado por Abdel, (Abdel et al, 2007) quien utilizó este tipo de materiales de aporte para unir un acero de bajo carbón con titanio, la composición del metal de aporte fue la siguiente (Ag-34Cu-2Ti).

Los resultados de las microestructuras realizadas se observan en la figura 2.23, la composición de las diferentes zonas de reacción se observan en la tabla 2.8.

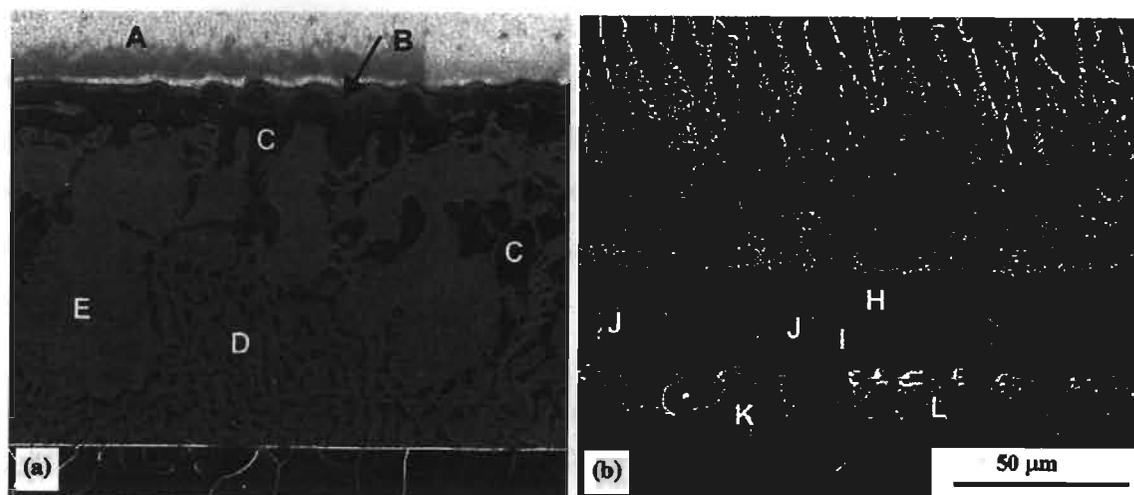


Figura 2.23. Imagen de las microestructuras del brazing realizado (a) 850°C, (b) 930°C (Abdel et al, 2007).

Tabla 2.8 Análisis químico de los puntos mostrados en la figura 2.23 (Abdel et al, 2007).

Símbolo	Promedio de análisis químico (% e.p.)			
	Ti	Fe	Cu	Ag
A	100	-	-	-
B	45.07	-	53.43	1.50
C	28.41	-	69.87	1.72
D	-	-	39.12	60.88
E	-	-	16.12	83.88
F	89.21	-	9.21	1.58
G	62.70	0.50	34.77	5.88
H	44.97	-	52.59	2.44
I	27.91	11.85	58.24	2.00
J	1.56	-	5.49	92.95
K	43.24	17.85	37.20	1.71
L	5.52	94.48	-	-

Como se puede observar en la figura 2.23 hay unas capas de interacción severa las cuales son formadas en el área donde se realizó el brazing con diferentes análisis químicos (tabla 2.8). A una temperatura de brazing de 850°C el substrato de titanio no muestra evidencia de difusión de los elementos de la aleación de acuerdo a los análisis de la región A de la figura 2.23 (a) se observa solo titanio puro.

La relación entre el titanio y el cobre en las capas es parecido a las fases CuTi y Cu₂Ti respectivamente. La región D representa el eutéctico Ag-Cu, sin embargo el consumo del cobre por las fases CuTi y Cu₂Ti, resulta en una fase rica en plata como se observa en la región E de la figura 2.23 (a).

2.6.4 Materiales de aporte base cobre.

Otra alternativa de aleaciones libres de cadmio es aumentar el contenido de cobre (Dev et al, 1992) (Mohanty et al, 1994) (Pashkov et al, 2006) alternativa al uso de plata, debido a que la plata aumenta el precio del metal de aporte.

Las aleaciones base cobre llegan a tener un precio de 3-5 veces más baratas que las aleaciones que contienen 40-50% de plata.

Destacando lo realizado por Dev (Dev et al, 1992), quien realizó el brazing de cobre utilizando como material de aporte base cobre la composición de los metales de aportes utilizados se observa en la Tabla 2.9, se puede observar que la temperatura de solidus y liquidus de los dos materiales son similares. Las microestructuras obtenidas se observan en la figura 2.24

Tabla 2.9. Composición química (% e.p.) y propiedades de los metales de aporte (Dev et al, 1992).

Descripción de la aleación	Ag	Si	Sn	Cu	Solidus (°C)	Liquidus (°C)
Base Cobre	36.20	3.10	0.15	Base	770	790
Base Plata	72	-	-	28	780	780

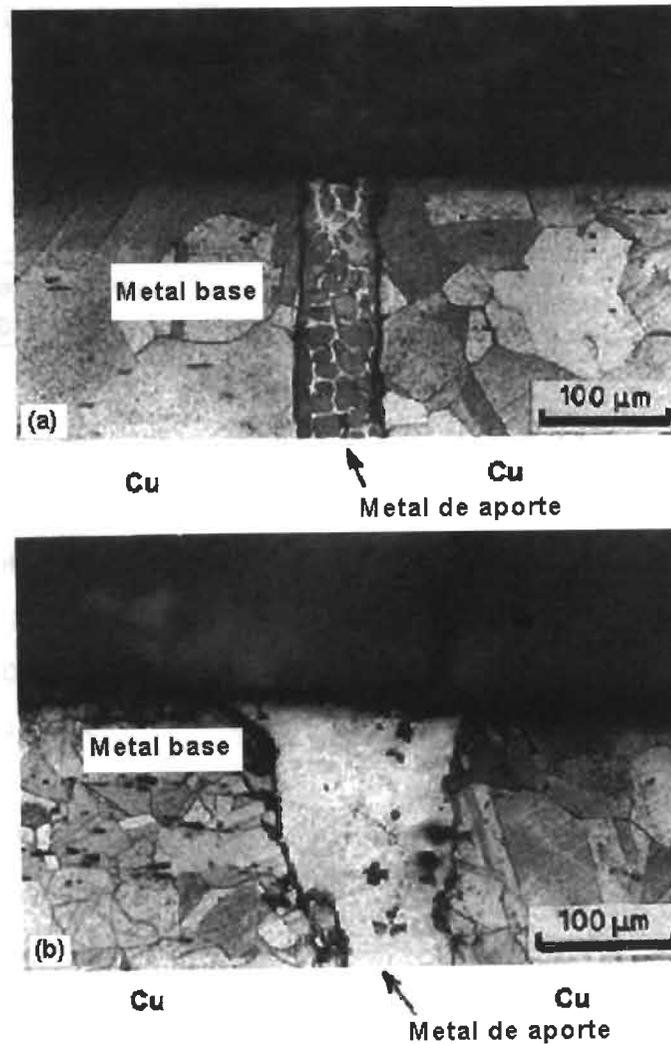


Figura 2.24. Microestructuras de las uniones realizadas con diferente material de aporte (a) metal de aporte base cobre, (b) metal de aporte base plata (Dev et al, 1992).

De las microestructuras obtenidas, se puede observar en la figura 2.24 (a), dendritas ricas en cobre con los eutécticos Ag-Cu, y algunas áreas globulares ricas en plata. La microestructura de la figura 2.24 (b). Por otro lado se observan dendritas finas ricas en cobre con eutéctico en la región interdendrítica

Las propiedades mecánicas de la unión se observan en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Propiedades mecánicas de las uniones realizadas (Dev et al, 1992).

Aleación	Resistencia a la tensión (Kg/mm ²)	Resistencia al impacto		Esfuerzo de corte (kg/mm ²)
		(kg/m)	(ft/lb)	
Base Cobre	17.00	1.40	10	12.00
Base Plata	15.76	1.30	9.3	10.25

De acuerdo con los resultados de la tabla 2.10, se puede observar que la aleación base cobre presentan unas propiedades mecánicas mayores a los valores obtenidos del metal de aporte base plata, por lo que esta aleación es una opción muy viable para substituir no solo al cadmio de los metales de aporte, si no también puede disminuir el costo de la aleación al disminuir el contenido de plata

Por otro lado Pashkov (Pashkov et al, 2006) realizó el brazing de cobre y acero con distintos materiales de aporte base cobre, comparándolos con metales de aporte base plata conteniendo cadmio, evaluando sus propiedades mecánicas, los distintos materiales de aporte base cobre utilizados para este trabajo se muestran en la tabla 2.11.

Tabla 2.11 Características de los metales de aporte (Pashkov et al, 2006).

Identificación	Metal de aporte	Metal base a unir	Temperatura de fusión °C (°F)	Temperatura de brazing °C (°F)
P14	Cu-6P-4Sn	cobre	640-680 (1184-1256)	720-800 (1328-1470)
P81	Cu-Zn-6P-6Ni	cobre, acero	630-660 (1166-1220)	680-800 (1256-1470)
P21	Cu-Zn-Sn-Ni		780-830 (1436-1526)	850-900 (1562-1652)
P47	Cu-Zn-Mn-Ni	cobre, acero, carburos cementados	765-815 (1410-1500)	830-900 (1526-1652)

Los resultados de las pruebas mecánicas del brazing realizado en cobre como metal base, se observan en la figura 2.25.

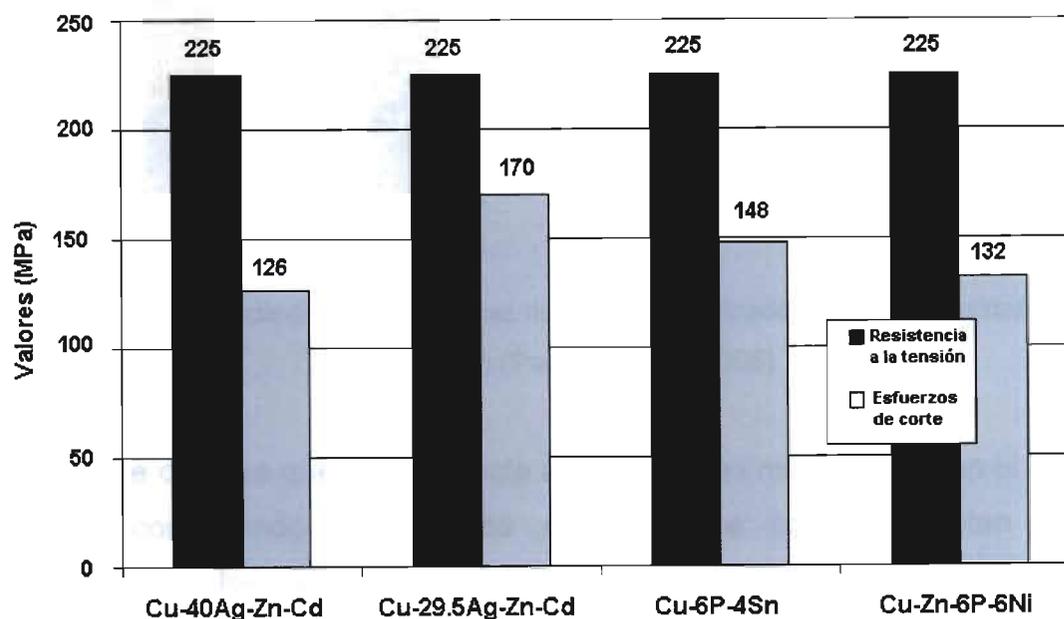


Figura 2.25 Comparación de las propiedades mecánicas del brazing realizado a materiales base cobre (Pashkov et al, 2006).

Se puede observar que los metales de aporte base cobre, presentan una resistencia a la tensión similar al metal de aporte conteniendo cadmio, pero los

esfuerzos de corte son mayores, para las aleaciones identificadas como P14 y P81 por lo que es una buena alternativa este material de aporte para substituir el cadmio.

Los resultados obtenidos para el brazing realizado en el acero, se muestran en la figura 2.26.

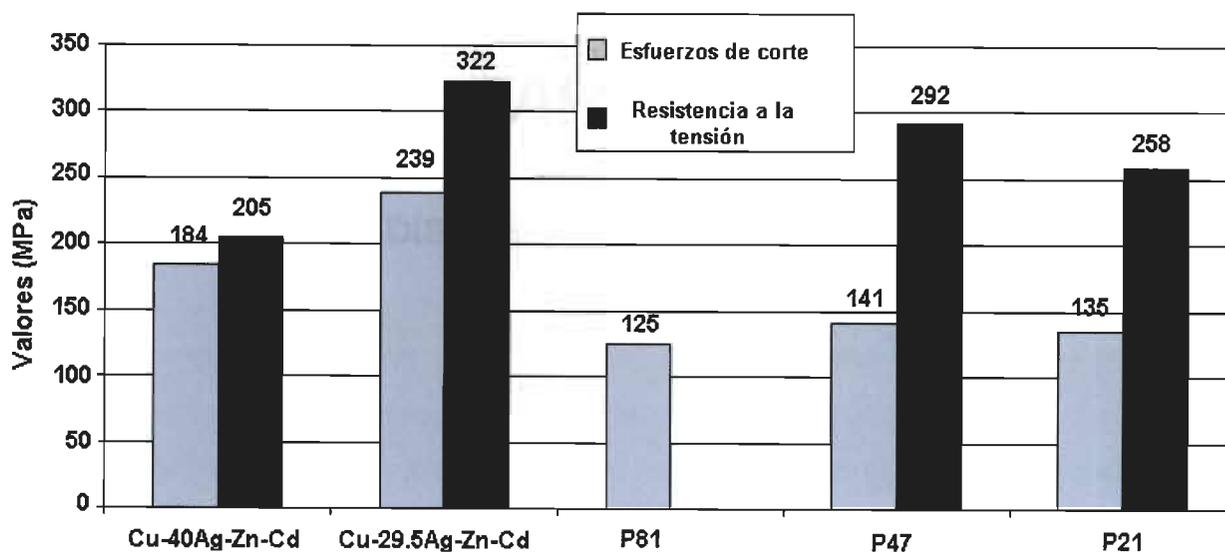


Figura 2.26. Propiedades mecánicas del brazing realizado a Aceros inoxidables y al Carbono (Pashkov et al, 2006).

Se observa que la resistencia a la tensión es más elevada en el metal de aporte conteniendo cadmio, los esfuerzos de corte presentan mejores resultados en los metales de aporte conteniendo cadmio, por lo que no es una alternativa muy viable el uso de metal de aporte base cobre para el brazing de aceros inoxidables y al carbono.

CAPÍTULO 3

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se ha visto en este trabajo de investigación, el cadmio es un elemento que le confiere muchas ventajas a los metales de aporte base plata, disminuye el punto de fusión del material de aporte y disminuye el ángulo de mojabilidad (Macías; 2006). Pero su principal desventaja son sus efectos nocivos para la salud (Taiyin et al; 2002), por lo cual se han realizado varios trabajos con el fin de tener alternativas de metales de aporte libres de cadmio, con el fin de tener un metal de aporte con propiedades similares a la aleación que contiene cadmio.

Una de las alternativas para disminuir el punto de fusión es substituir el cadmio, con elementos como el germanio (D'Silva; 1980) con el cual el punto de fusión de la aleación es 705°C temperatura aun elevada comparada con los metales de aporte libres de Cadmio, por lo que no es una alternativa muy viable. Utilizando el galio (Weise et al, 1996; Weise et al, 2001) se puede lograr

una disminución de la temperatura a 590°C, con lo cual se pueden tener metales de aporte libres de cadmio, con un punto de fusión bajo, siendo una buena alternativa.

En lo que respecta al uso del Zn (Hiujie et al; 2002), al aumentar su contenido en los metales de aporte se logra tener una unión con buenas propiedades mecánicas registrando valores de esfuerzo de corte de 190 MPa, cuando el brazing se realiza en un tiempo de 20 minutos, esto es debido a que se forma una capa de reacción que favorece la unión.

Otra de las alternativas es el aumentar el contenido de plata en los metales de aporte en distintas concentraciones para distintos materiales las cuales son de 54% (Elrefaey et al; 2007), 59% (Hong et al, 2006; Elrefaey et al, 2009), 60% (Paiva et al, 2000; Yamazaki et al, 2006), 62% (Li et al, 2007), 68% (Morscher et al; 2006), 70% (Liaw et al, 2005), llegando a utilizar metal de aporte con contenido de plata de hasta 100% (Chan et al, 2003), logrando obtener buenas propiedades mecánicas de la unión con valores de hasta 50 Mpa,.

Una alternativa es el uso de metales de aporte con el eutéctico Ag-Cu (Abdel et al, 2007; Hiraoka et al, 2006; Liu et al, 2002; Shiue et al, 2004), (Stephens et al; 2006), logrando no solo substituir los elementos de aleación (germanio, galio, zinc) sino también teniendo unas uniones con muy buenas propiedades mecánicas.

Dentro de las alternativas más viables para substituir el cadmio por sus efectos en la salud y la plata por su costo elevado, es la disminución del contenido de plata del metal de aporte y aumentar el contenido de cobre, es decir, utilizar metales de aporte base cobre en porcentaje de hasta 72% (Dev et al 1992; Mohanty et al 1994; Pashkov et al, 2006), logrando tener una unión con buenas propiedades mecánicas iguales o mayores a los metales de aporte que contienen cadmio.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES.

De acuerdo con lo realizado en este trabajo de investigación se puede concluir lo siguiente:

- Las alternativas existentes para utilizar materiales de aporte libres de cadmio, son muy viables, logrando tener materiales de aporte libres de cadmio con buenas propiedades.
- Existen materiales de aporte los cuales tienen un punto de fusión más bajo que los metales de aporte que contienen cadmio.
- Una de las mejores alternativas es el uso de metales de aporte base cobre, debido a que este material tiene un costo menor que los metales de aporte base plata y genera buenas propiedades mecánicas.

BIBLIOGRAFÍA

Abdel A., Elrefaey M. and Tillmann W.; (2007); Microstructure and mechanical properties of brazed titanium/steel joints; *Journal of Materials Science*; 42; 9953-9958.

American Welding Society (1991); *Brazing Handbook*; USA.

ASM HandBook Volumen 6; (1993); *Brazing, Welding and Soldering*; 8va Edicion; ASM International USA.

ASM Handbook Volumen 3; (1997); "Alloy Phase Diagramas"; USA.

Chan H and Shiue R; (2003); Study of brazing Ti-6Al-4V and TZM alloy using pure silver; *Journal of Materials Science Letters*; 22; 1659 - 1663.

D'Silva (1980); Cadmiun-free silver based brazing alloy; United States Patent Num 4,242,134;

Dev C., Basak P., Singhi, Dubey R and Mohanty N.; (1992); A copper-base brazing alloy for electronics industries; *Journal of Materials Science*; 27; 6646 - 6652.

Elrefaey A. and Tillman W., (2009); Effect of brazing parameters on microstructure and mechanical properties of titanium joints; *Journal of Materials Processing Technology*; articulo en revisión.

Elrefaey A. and Tillman W.; (2007); Interface characteristics and mechanical propierties of the vacuum-brazed joint of titanium-steel having a silver-based brazing alloy; *The Minerals, Metals & Materials society and ASM International*; 38A; 2956 - 2962.

Hiraoka Y., Hanado H. and Inoue T; (2006); Fracture characteristics of the brazed W-19volCu% composite using BAg-8; Proceedings of the 3rd International Brazing and Soldering Conference; 252 - 256.

Hong S. and Glaeser A; (2006); Reduced-temperature transient-liquid-phase bonding of alumina using a Ag-Cu-based brazing alloy; Proceedings of the 3rd International Brazing and Soldering Conference; 181 - 188.

Huijie L. and Jicai F. I; (2002); Vacuum brazing TiAl-based alloy to 40Cr steel using Ag-Cu-Zn filler metal; Journal of Materials Science Letters; 21; 9 -10.

<http://www.jm-metaljoining.com>

Li Y., He P. and Feng J.; (2007); Interface structure and mechanical properties of the TiAl/42CrMo steel joint vacuum Brazed with Ag-Cu/Ti/Ag-Cu filler metal; Scripta Materialia; 55; 171 - 174.

Liaw D. and Shiue R; Brazing of Ti-6Al-4V and Niobium using three Silver-base braze alloys; Metallurgical and Materials Transactions A; 36A; 2415 – 2427.

Liu C, Ou C and Shiue K; (2002);The microstructural observation and wettability study of brazing Ti-6Al-4V and 304 stainless steel using three braze alloys; Journal of Materials Science; 37; 2225 - 2235.

Macias F.; (2006); Alternativas de materiales de aporte libres de Cadmio en procesos de soldadura brazing; Saltillo, Coahuila, México.

Mohanty O. and Dev S.; (1994); Rapidly solidified low-silver brazing filler alloy foils; Journal of Materials Science; 29; 6329 - 6334.

Morscher G., Singh M. and Shpargel T.; (2006); Comparison of Different Braze and Solder Materials for Joining Titanium to High-Conductivity C/C Composites; Proceedings of the 3rd International Brazing and Soldering Conference; 257-261.

O'Brien, R. (1996); Manual de soldadura Tomo II; Prentice-Hall Hispanoamerica, S.A.

Paiva C and Barbosa M; (2000); Brazing parameters determine the degradation and mechanical behaviour of Alumina/Titanium brazed joints; Journal of Materials Science; 35; 1165 - 1175.

Pashkov I., Lina I. and Shapiro A.; (2006); Properties and applications of Cu-based silver free brazing filler metals made by solidification technique; Proceedings of the 3rd International Brazing and Soldering Conference; 157-166.

Shiue R., Wu S. and Chan C.;(2004); The interfacial reactions of infrared brazing Cu and Ti with two silver-based braze alloys; Journal of Alloys and Compounds; 372; 148 – 157.

Stephens J., Hosking F., Walker C. and Dudley E.; (2006); The evolution of a ternary Ag-Cu-Zr active braze filler metal for KovarTM/alumina braze joints; Proceedings of the 3rd International Brazing and Soldering Conference; 207-213.

Taiyin J., Nordberg M., Frech W., Dumont X., Bernard A., Ye T., Kong Q, Wang Z., Li P., Lundström N, Li Y. and Nordberg F; (2002); Cadmium biomonitoring and renal dysfunction among a population environmentally exposed to cadmium from smelting in China (ChinaCad); Kluwer Academic Publishers; 15; 397–410.

Vázquez R.; (2008); Tesis de especialidad: Proceso de soldadura brazing en uniones cerámico-metal; COMIMSA, Saltillo, Coahuila, México.

Weise W., Voelcker A., Dieter K., Malikowski W. and Krappitz H.; (1996); Cadmium-free silver alloy brazing solder, method of using said solder, and metal articles brazed with said solder; United States Patent Num 5,531,962.

Weise W., Malikowski W., Kaufmann. and Krappitz H.; (2001); Cadmium-free silver alloy as low melting brazing filler material; United States Patent Num 6,299,835

Yamazaki T. and Suzumura; (2006); Reaction products interface between Ag-Cu-V filler metal and diamond (111); Journal Materials Science ; 41; 6409-6416.

LISTA DE TABLAS

Número	Tabla	Página
2.1	Materiales de aporte conteniendo cadmio.	33
2.2	Materiales de aporte libres de cadmio.	33
2.3	Variación de la composición química y su punto de fusión.	34
2.4	Variación de la composición química respecto a su punto de fusión.	35
2.5	Resultados del EPMA de las distintas zonas de reacción.	36
2.6	Microanálisis EDS de las regiones observadas en la figura 4.7.	41
2.7	Análisis químico de las regiones mostradas en la figura 4.11.	44
2.8	Análisis químico de los puntos mostrados en la figura 4.23.	54
2.9	Composición y propiedades de los metales de aporte.	56
2.10	Propiedades mecánicas de las uniones realizadas.	57
2.11	Características de los metales de aporte.	58

LISTA DE FIGURAS

Número	Figura	Página
2.1	Diagrama de equilibrio Ag-CU.	8
2.2	Efecto de la capilaridad en función de los ángulos de contacto.	11
2.3	Brazing por antorcha automatizado.	12
2.4	Brazing por horno.	15
2.5	Esquema ilustrativo del brazing por inducción.	17
2.6	Esquema del brazing por inducción.	17
2.7	Imagen de la microestructura de una unión por brazing a 1173°K durante 20 minutos.	36
2.8	Esfuerzos de corte del brazing realizado a 1173°K a diferentes tiempos.	38
2.9	Brazing realizado a 1173°K por 2 minutos.	38
2.10	Microestructuras de las muestras unidas por brazing a 750°C en diferentes tiempos (a) 5, (b) 30 y (c) 90 minutos.	40
2.11	(a) Uniones a 750°C por 5 min, (b) vista ampliada de la zona indicada (a), (c) imagen de la unión a 750°C por 90 min y (d) vista ampliada de la zona marcada en (c).	41
2.12	Imagen del MEB realizado a las uniones de brazing a 800°C (a) 5 y (b) 90 minutos.	43
2.13	Microestructura del brazing realizado a 850°C por 15 minutos.	45
2.14	Microestructura del brazing realizado a 880°C por 15 minutos.	46
2.15	Microestructura del brazing realizado a 930°C por 15 minutos.	47
2.16	Relación entre el esfuerzo de corte de la unión, espesor del traslape y la temperatura de brazing.	48
2.17	Imagen del metal de aporte multicapa de Ag-Cu/Ti/Ag-Cu.	49

Número	Figura	Página
2.18	Resistencia a la tensión y esfuerzos de corte a diferentes temperaturas en tiempo de 5 minutos.	49
2.19	Resistencia a la tensión y esfuerzos de corte a 900°C en diferentes tiempos de brazing.	50
2.20	Imagen de electrones retrodispersados en la unión por brazing realizado a 900°C por 5 minutos.	51
2.21	Imágenes de electrones retrodispersados de las uniones de brazing realizadas a diferentes temperaturas por 5 min (a) 860°C (b) 930°C (c) 1000°C.	52
2.22	MEB de las pruebas de brazing realizadas a 900°C a diferentes tiempos (a) 2 (b) 25 minutos.	53
2.23	Imagen de las microestructuras del brazing realizado (a) 850°C, (b) 930°C.	54
2.24	Microestructuras de las uniones realizadas con diferente material de aporte (a) metal de aporte base Cobre, (b) metal de aporte base Plata.	56
2.25	Comparación de las propiedades mecánicas del brazing realizado a materiales base cobre.	58
2.26	Propiedades mecánicas del brazing realizado a Aceros inoxidables y al Carbono.	59

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Ing. Miguel Ángel Banda Guzmán

Grado a Obtener: Especialista en soldadura Industrial

Campo Profesional: Producción y Calidad

Lugar de Nacimiento: Saltillo, Coahuila, 06 de Septiembre de 1982

Nombre de Padres: José Francisco Banda Medina
Francisca Guzmán López

Universidad: Instituto Tecnológico de Saltillo

Título Obtenido: Ingeniero en Materiales.

Experiencia Profesional:

Fundicion J.V. S.A. de C.V.
Supervisor de Producción

Sealed Power Autopartes S.A de CV.
Técnico de Calidad en Fundición

Duroplast S. A. de C.V.
Residente de Calidad

Linamar de México S.A de CV
Inspector de Calidad Laboratorio Metalúrgico