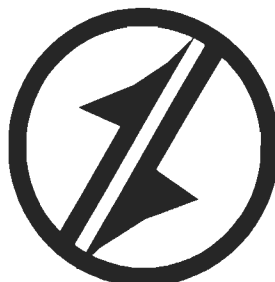


CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**MATERIALES DE APOORTE PARA LA RECUPERACIÓN DE COMPONENTES
DE SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL MEDIANTE EL PROCESO
BRAZING**

POR:

JULIO CESAR JASSO ZAVALA

**LIC. EN SISTEMAS COMPUTACIONALES ADMINISTRATIVOS
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE COAHUILA**

MONOGRAFÍA

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

Saltillo, Coahuila. Diciembre de 2006

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**MATERIALES DE APORTE PARA LA RECUPERACIÓN DE COMPONENTES
DE SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL MEDIANTE EL PROCESO
BRAZING**

POR:

JULIO CESAR JASSO ZAVALA

MONOGRAFÍA

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

Saltillo, Coahuila. Diciembre de 2006

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V.

Gerencia de Desarrollo del Factor Humano

División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la monografía "MATERIALES DE APOORTE PARA LA RECUPERACIÓN DE COMPONENTES DE SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL MEDIANTE EL PROCESO BRAZING", realizada por el alumno Julio César Jasso Zavala, Matrícula No. 05ES-026, sea aceptada para su defensa como Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial.

El Comité Tutorial



Tutor Académico

Dra. Ana María Arizmendi Morquecho



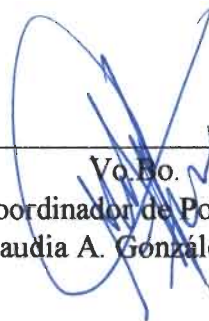
Tutor en Planta

Dr. Alejandro Garza Gómez



Asesor

M.C. Juan Francisco Reyna Valdez



Vc.Bo.

Coordinador de Posgrado

M.C. Claudia A. González Rodríguez

Agradecimientos

Derramo mi corazón a Dios, agradeciéndole todas las bendiciones que me ha dado y la capacidad que me ha inyectado para lograr aprender el lenguaje necesario para seguir desarrollándome en lo referente a esta especialidad que se que es una bendición para mi esposa y mis hijos y aquellos a los cuales sirvo.

Agradezco a cada uno de mis profesores que con paciencia se esforzaron por que elevara la visión que tenia de la soldadura y la llevara a planos de aplicación tecnológica y en especial al conocimiento y lenguaje metalúrgico.

Agradezco al Ing. Juan Francisco Mancinas Casas un hombre con un gran don de gentes, su apoyo y confianza para lograr el objetivo dado.

Agradezco al Ing. Indalecio Medina Hernández, un gran amigo y un gran líder todo el apoyo y en especial el empuje y confianza que me ha dado para ser mejor.

Me siento grandemente agradecido a mi esposa Lulú, por su amor y por que hace 20 años me ha acompañado y mostrado mis precariedades, mis insuficiencias, mis limitaciones, esas que, a primera vista parecen imperceptibles pero que creyó que día a día puliéndolas unas, inyectándome animo en otras con su confianza y amor podría llegar a ser de mi algo mejor de lo que era cuando me conoció, agradezco a mis hijos Abish, Limhi y Selem por su amor y por que muchos días se pasaron sin su padre, esforzándose por ser mejores hijos y mejores personas y así poder servir mas efectivamente a sus semejantes en lo que Dios les requiera, y por lo tanto su amor por mi y mi amor por ellos me compromete con la vida y con el deber de mostrarme como algo posible. El amor de Dios me rehace cada día en ellos.

Gracias a cada uno de las hermosas personas que tengo la alegría de conocer, porque gracias a ellas, soy una persona mejor.

ÍNDICE

Capítulos	Página
1. Síntesis.....	1
2. Introducción	2
3. Objetivo general.....	4
3.1. Objetivos específicos	4
4. Alcance	5
5. Justificación	6
6. Impacto.....	7
7. Revisión de la literatura.....	8
7.1. Descripción del proceso de soldadura por brazing.....	8
7.2. Procesos de unión por brazing	9
7.3. Ventajas y limitaciones de las uniones por brazing	11
7.4. Dimensiones del montaje en procesos brazing.....	17
7.5. Tipos de materiales a unir	19
7.6. El proceso brazing al vacío	20
7.6.1. Preparación superficial	21
7.6.2. Calentamiento	21
7.6.3. Metales de aporte	22
7.7. Brazing con metales de aporte base níquel.....	27
7.7.1. El rango entre el solidus y liquidus de los metales de aporte base níquel.....	27
7.7.1.1. Solidus	28
7.7.1.2. Liquidus	28
7.7.1.3. El Punto eutéctico	28
7.7.1.4. Rango de brazing	29
7.7.2. Metalurgia de metales de aporte Brazing base níquel.....	32
7.7.2.1. Boro (B).....	32

Capítulos

Página

7.7.2.2. Silicio (Si).....	33
7.7.2.3. Ni-B-Si.....	33
7.7.2.4. Fósforo (P)	33
7.7.2.5. Cromo (Cr)	34
7.7.2.6. Ni-B-Cr-Si.....	35
7.7.2.7. Carbono (C).....	35
7.7.2.8. Hierro (Fe), Cobre (Cu), Tungsteno (W) y Molibdeno (Mo).....	36
7.8. Los metales base.....	36
7.8.1. Resistencia contra temperatura.....	38
7.8.2. Composiciones químicas de los metales base	39
7.8.3. Microestructura y tratamiento térmico.....	44
7.8.4. Procesamiento.....	45
7.8.5. Descripción de algunos metales base de superaleaciones.....	46
7.8.5.1. Inconel 738.....	46
7.8.5.2. Inconel 601	47
7.8.5.3. Inconel 718	47
7.8.5.4. Waspalloy TM	49
7.8.5.5. Hastelloy X.....	49
7.8.5.6. Rene 41 TM	49
7.9. Las principales fallas en los componentes de las superaleaciones.....	50
7.10. Limpieza de componentes de superaleaciones previa a la reparación...	52
7.10.1. El papel de la condición de la superficie del metal base en el brazing.....	52
7.10.2. La limpieza de la superficie.....	53
7.10.3. El acabado de la superficie.....	55
7.10.4. Otros efectos en la superficie.....	56

Capítulos

Página

7.11. Metales de aporte específicos usados para la reparación de componentes de superaleaciones	58
7.11.1. AMDRY Polvos de superaleación	59
7.11.2. AMDRY® DF-3	59
7.11.3. AMDRY DF-4B.....	61
7.11.4. AMDRY TAPE	63
7.11.5. AMDRY BRB	66
7.11.6. AMDRY 103	66
7.11.7. AMDRY B-93	67
7.11.8. AMDRY DF-5.....	68
7.11.9. Microbraz 160	68
7.11.10. Microbraz 170	71
7.11.11. Microbraz 171	74
8. Conclusiones	76
9. Bibliografía	78
10. Listado de tablas	80
11. Listado de figuras	82
12. Resumen autobiográfico	84

1.

SÍNTESIS

Las superaleaciones base níquel son ampliamente usadas para la manufactura de componentes de turbinas de gas tales como alabes y toberas. Con frecuencia en éstos componentes se encuentran defectos resultantes de los procesos de vaciado o provocados por el desarrollo de fracturas durante el servicio. Aunque tales defectos pueden ser relativamente pequeños, la mayoría de las veces son razones suficientes para que el componente sea rechazado. En otras ocasiones, los defectos son de tal naturaleza que una reparación podría ser satisfactoria permitiendo volver a poner en operación el componente.

En un intento para rescatar tales partes, se ha optado por la utilización de varias técnicas de reparación entre las cuales se encuentran procesos de soldadura por fusión y procesos de soldadura por brazing. En este último proceso los materiales de aporte utilizados para la reparación de los componentes de superaleaciones existen en diversas formas. Por lo general éstos materiales son en forma de polvos o sus derivados. Sin embargo actualmente es posible encontrar en el mercado diferentes presentaciones dependiendo de la aplicación. En este trabajo se presentará una revisión de diferentes materiales de aporte empleados para la reparación de los componentes de superaleaciones base níquel mediante el proceso brazing y se determinará cual de éstos puede ser el más adecuado para dicha aplicación.

2.

INTRODUCCIÓN

Las superaleaciones se utilizan en la industria para aplicaciones en las que se requieren materiales que a elevadas temperaturas posean buenas propiedades mecánicas y buena resistencia a la corrosión y a la oxidación.

Una superaleación es una aleación metálica la cual puede ser usada a altas temperaturas, muchas veces en exceso de 0.7 de la temperatura de fusión absoluta. Los criterios de diseño primarios son la resistencia a la oxidación y a la fluencia. La composición química esta basada en hierro, cobalto o níquel, estas últimas la mayor aplicación son en el área de aeromotores.

Las superaleaciones base níquel son ampliamente usadas en la manufactura de componentes de turbinas industriales los cuales operan a altas temperaturas. Durante su operación, estos componentes están sujetos a condiciones extremadamente severas bajo las cuales pueden ocurrir varios tipos de deterioro. Por ejemplo los alabes de la turbina sufren fracturas que típicamente inician en irregularidades de la superficie y se propagan como un resultado de los altos esfuerzos ocasionados por los ciclos térmicos. Adicionalmente, éstas condiciones causan otros daños entre los cuales se encuentran: reducciones dimensionales de los componentes por erosión, oxidación, corrosión en caliente, daño por objetos extraños o una combinación de estos factores.

En el desarrollo de las superaleaciones y la diferente maquinaria diseñada para el uso principal de la aeronáutica y la industria, se encuentran las turbinas de gas. Estos equipos están compuestos por muchas partes y componentes de los cuales la mayoría se encuentran expuestos a fallas por la naturaleza de su función. Algunos de estos componentes son las toberas del 1° y 2° paso y los alabes. Derivado de los efectos de su trabajo y a las fallas constantes se da lugar a toma de decisiones sobre comprar nuevos componentes o recuperar los mismos por medio de procesos de soldadura. Algunos de los procesos para reparaciones son el proceso GTAW y el proceso brazing. En este último proceso está enfocado el presente trabajo.

El procedimiento de reparación por brazing representa una técnica alternativa y versátil para la reparación de los componentes de superaleaciones base níquel, dañados por efectos de operación; satisfaciendo los requerimientos de diseño e ingeniería de manufactura por la obtención de una reparación satisfactoria. Mediante este proceso de reparación una etapa importante es la selección del mejor metal de aporte de acuerdo a la composición química de las aleaciones del metal base con la cual se formará la unión metalúrgica.

Algunas de las características que se deben tomar en cuenta en la selección de los materiales de aporte son: las propiedades físicas, las propiedades mecánicas que se pueden obtener después de la aplicación, la estabilidad térmica, la mojabilidad y su dependencia en la atmósfera brazing y la preparación de la preforma. Además una de las principales características de los materiales de aporte es que deben de fundir casi instantáneamente. Esta propiedad puede facilitar un período de tiempo corto para la reparación por brazing.

Este es el tema central del presente trabajo. En este documento se presentará información técnica con respecto a los materiales de aporte usados en la reparación de componentes de superaleaciones base níquel a través del proceso brazing.

3.

OBJETIVO GENERAL

Analizar los diferentes materiales de aporte utilizados para la reparación de componentes de superaleaciones base níquel a través del proceso brazing. Dicho estudio estará basado en llevar a cabo una revisión de la literatura donde se expondrán las ventajas, desventajas, características y propiedades de diferentes materiales de aporte usados en la recuperación de componentes de superaleaciones base níquel mediante el proceso brazing.

3.1. Objetivos específicos

Dentro del objetivo general se considerarán los siguientes objetivos específicos los cuales están basados en la búsqueda de información con respecto a los siguientes temas:

- ✓ El proceso brazing.
- ✓ Los diferentes metales base de superaleaciones base níquel.
- ✓ Información sobre las principales fallas en los componentes de superaleaciones.
- ✓ Los diferentes materiales de aporte utilizados para la reparación de componentes de superaleaciones base níquel a través del proceso brazing.

4.

ALCANCE

El alcance de este trabajo es determinar de la literatura obtenida, el material de aporte que de acuerdo a sus características y propiedades sea el adecuado para la reparación de componentes de superaleaciones base níquel a través del proceso brazing.

5.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad existe una gran cantidad de turbinas industriales que se encuentran en funcionamiento, además algunas otras operan ineficientemente por los componentes que constantemente se dañan. Tan solo en la industria Nacional existen más de 100 turbinas de gas las cuales operan con componentes de superaleaciones. A estos equipos por lo general se les dan mantenimientos a largo plazo y debido a los paros y arranques a los que son sometidos, a menudo se detectan componentes con fisuras.

Además debido a la generación de más y mejores superaleaciones y a los diseños avanzados de componentes con diferentes especificaciones, se hace necesario investigar las características y propiedades de cada uno de los materiales de aporte a ser aplicados sobre las superaleaciones base níquel para la recuperación de los mismos, dirigido especialmente a la reparación de grietas amplias por medio del proceso brazing. Una ventaja de este proceso es que permite controlar mas efectivamente el calor sin afectar significativamente la microestructura, teniendo por resultado casi nulos agrietamientos y un mejor acabado en la superficie. Por lo tanto, con este trabajo se pretende contribuir con información específica con respecto a los materiales de aporte los cuales son necesarios para satisfacer las necesidades de reparación de componentes de turbinas que presentan las empresas nacionales.

6.

IMPACTO

Las superaleaciones base níquel son usadas en componentes de turbinas de gas las cuales operan a alta temperatura. Sin embargo debido a tales condiciones de operación pueden ocurrir fracturas u otro tipo de daños o deterioro debido a los ciclos térmicos. También durante la manufactura de estos componentes pueden ocurrir discontinuidades tales como porosidad e inclusiones. Debido al relativo alto costo de tales componentes es deseable reparar estos artículos más que reemplazarlos.

Actualmente las fracturas y defectos de estas aleaciones son reparadas por procesos como el de soldadura brazing. En este proceso las aleaciones de reparación para estos componentes existen en diversas formas, de las cuales cada una responde de manera diferente al llevar a cabo la reparación. Por lo tanto el impacto de este trabajo es evaluar el material de aporte que de acuerdo a sus características y propiedades sea el mas adecuado para la reparación de componentes de superaleaciones base níquel a través del proceso brazing.

7.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

7.1. Descripción del proceso de soldadura por brazing

Brazing es la unión de metales a través del uso de calor y un metal de aporte el cual tiene una temperatura de fusión mayor a 450 °C pero abajo del punto del fusión de los metales que se están uniendo.

Hoy en día el brazing es probablemente el método más versátil de unir metales por varias razones: las uniones soldadas de esta manera son fuertes. En metales ferrosos y aceros, la resistencia a la tensión de una unión realizada apropiadamente excederá de la de los metales que se están uniendo. En aceros inoxidables es posible desarrollar soldaduras con resistencias a la tensión de 130,000 lb/pulg² (896.3 MPa).

Las uniones realizadas por brazing son dúctiles, disponibles para resistir choques considerables y vibración. La técnica es fácil y rápida. El brazing es ideal para unir metales diferentes por ejemplo ferrosos con no ferrosos y metales con altos puntos de fusión. El brazing es esencialmente un proceso de un paso, rara vez se necesita granallar o darle un proceso de terminado a las piezas soldadas. El brazing se realiza a relativamente bajas temperaturas reduciendo la posibilidad de deformar, calentar o fundir los metales que se están uniendo.

Además el brazing es un proceso económico, el costo por unión es favorable con respecto a otros métodos de soldadura. Es altamente adaptable a métodos automatizados.

La flexibilidad del brazing habilita las técnicas de producción muy cerradamente a los requerimientos.

Con todas sus ventajas el brazing es el único método confiable para unir metales. Para llevar a cabo el brazing apropiadamente se debe entender su relación con las otras técnicas de unión y cuál método es el correcto para un determinado uso.

Algunas de las versatilidades del proceso brazing son:

- Se obtienen uniones fuertes
- Se obtienen uniones dúctiles
- Es fácil de operar
- Se adapta para unir metales diferentes
- Proceso de una operación
- Requiere baja temperatura
- Económico
- Altamente adaptable a la automatización

7.2. Procesos de unión por brazing

Una unión por brazing se hace de una manera completamente diferente de la unión soldada. La primera gran diferencia es en la temperatura. En el brazing no se funde el metal base. Así que las temperaturas del brazing son más bajas que las temperaturas de fusión de los metales base y por lo tanto siempre significativamente más abajo que las temperaturas de soldadura de los mismos metales base.

La unión se crea por un enlace metalúrgico entre el metal de aporte y las superficies de los dos metales que se están uniendo como se muestra en la Figura 1.

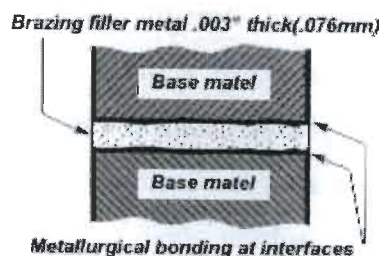


Figura 1. Unión de metales base por el proceso brazing.

El principio por el cual el metal de aporte es llevado a través de la unión para crear su enlace es la acción de capilaridad. En una operación de brazing se aplica calor ampliamente al metal base. El metal de aporte, el cual se colocó previamente entra en contacto con las partes calentadas, se funde instantáneamente por el calor en el metal base y es llevado por acción de capilaridad completamente a través de la unión como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.

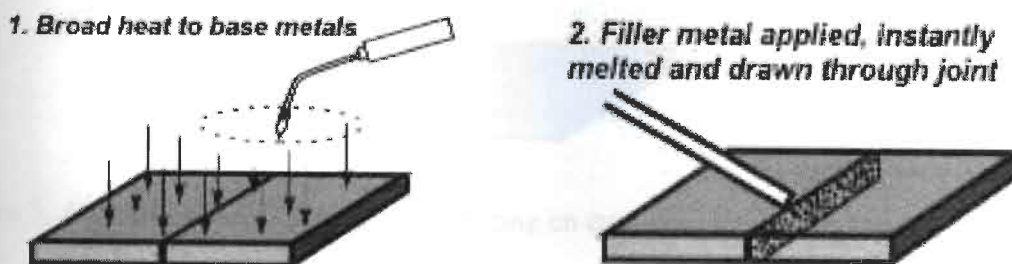


Figura 2. Principio de operación del Brazing.

7.3. Ventajas y limitaciones de las uniones por brazing

Primero una unión brazing es fuerte. Generalmente el rango de temperatura es entre 620 °C y 870 °C. Los metales base nunca se funden por lo tanto conservan la mayoría de sus propiedades físicas y esta integridad de los metales base es característica de las uniones brazing tanto delgadas como gruesas. También el calor más bajo minimiza cualquier daño de distorsión de metal o deformación (se considera también que temperaturas más bajas necesitan menos calor lo cual podría ser un factor de costo para ahorrar). Una ventaja importante es la facilidad para unir metales diferentes. Si no se tienen que fundir los metales base para unirlos entonces no importa si tienen temperaturas de fusión diferentes. Se puede unir acero al cobre tan fácil como acero a acero. La soldadura es otra historia. Si se trata de unir cobre (punto de fusión de 1083 °C) a acero (punto de fusión 1370 °C) se tienen que emplear técnicas de soldadura más caras y sofisticadas.

Otra ventaja de la unión por brazing es la buena apariencia. No se puede comparar lo liso del brazing con lo grueso e irregular de la soldadura (Figura 3).

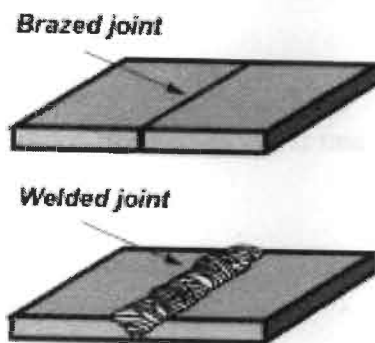


Figura 3. Apariencia de las uniones por brazing en comparación con dos piezas soldadas.

Esta característica es especialmente importante para uniones en productos del consumidor donde la apariencia es importante como en el caso de las reparaciones de componentes de turbinas. Una unión por brazing casi nunca necesita operaciones de acabado con lo cual también se ahorra dinero.

El brazing ofrece otra significativa ventaja sobre la soldadura y es que las habilidades del brazing pueden ser adquiridas más rápido que las de la soldadura. La razón es debido a que la unión soldada lineal ha sido trazada con precisa sincronización de la aplicación de calor y la depositación del metal de aporte. Por otra parte una unión por brazing tiende a hacerlo solo a través de la acción de capilaridad.

La rapidez comparativa con la cual el operador del brazing puede ser entrenado para un alto grado de habilidad es un importante factor a considerar.

Cuando se necesita hacer una unión metálica permanente, los factores clave son el tamaño de las partes a soldar, el espesor de las secciones del metal, la configuración de la unión, la naturaleza de los metales base, y el número de uniones a hacer.

Finalmente el brazing es fácil para automatizar. Las características el proceso brazing aplicaciones de calor amplios y fácil posicionamiento del metal de aporte ayudan a eliminar los problemas potenciales. Hay muchas maneras para que la aplicación de calor se automatice, así como muchas formas de metales de aporte y muchas maneras de depositarlos así que el brazing puede automatizarse para cualquier nivel de producción.

A continuación se enlistan las ventajas de hacer una unión por el proceso brazing.

- Resistencia de la unión
- Temperaturas más bajas/ Costo más bajo
- Mantiene la integridad del metal base
- Metales diferentes son fácilmente unidos
- Apariencia de la unión buena
- Habilidad de la operación fácilmente adquirida
- Proceso fácilmente automatizado

El brazing es acompañado por al menos 12 procesos que producen coalescencia en una unión por calentamiento del metal base para una temperatura adecuada más baja que el punto de fusión y aplicando un metal de aporte disimilar que es introducido dentro de la unión por atracción de capilaridad.

En este caso consideramos dos procesos de unión que son similares a la soldadura eléctrica en ciertos aspectos; la soldadura brazing y la soldadura soldering .

En el proceso brazing y en el proceso soldering se usan metales de aporte para juntar y unir dos (o más) partes metálicas con el fin de proporcionar una unión permanente. Es difícil, aunque no imposible, desensamblar las partes después de que se ha hecho una unión o soldadura brazing o soldering. En el espectro de procesos de unión la soldadura brazing y la soldadura soldering se encuentran entre la soldadura por fusión y la soldadura de estado sólido. En ambos se añade un metal de aporte, como en la mayoría de las operaciones de soldadura por fusión; sin embargo, no ocurre la fusión de los metales base, en la cual es similar a la soldadura de estado sólido. A pesar de estas incongruencias, la soldadura brazing y la soldadura soldering generalmente se consideran distintas a la soldadura por fusión. La soldadura brazing y la soldadura soldering son atractivas en comparación con la soldadura por fusión bajo circunstancias donde:

1. Los metales tienen poca soldabilidad.
2. Se unen metales distintos.
3. El intenso calor de la soldadura por fusión puede dañar los componentes que se van a unir.
4. La geometría de la unión no se presta para ninguno de los métodos de soldadura por fusión.
5. No se requiere de una gran resistencia.

El metal de aporte debe tener una temperatura de liquidus sobre 450°C pero más baja que la temperatura de solidus del metal base.

Ordinariamente la antorcha de oxiacetileno es usado como la fuente de calentamiento y esto permite tener un control cerrado de temperatura de superficie de metal base para evitar que se funda.

Las uniones por brazing usualmente involucran superficies traslapadas de relativamente área grande con pequeño espesor. Debido a que el metal de aporte es mas bajo en resistencia que el acero de metal base, se hace una evaluación para sostener la capa intermedia del metal de aporte en un mínimo con el fin de obtener resistencias de unión máximas.

Sí la unión se diseña en forma correcta y la operación de soldadura brazing se ejecuta adecuadamente, la unión con soldadura brazing será más resistente que el metal de aporte del que se formó tras la solidificación como se puede observar en la Figura 4. Este notable resultado se debe a los pequeños espacios libres entre las partes en la soldadura brazing, a la unión metalúrgica que ocurre entre los metales base y de aporte a las limitaciones geométricas que imponen a la unión las partes base.

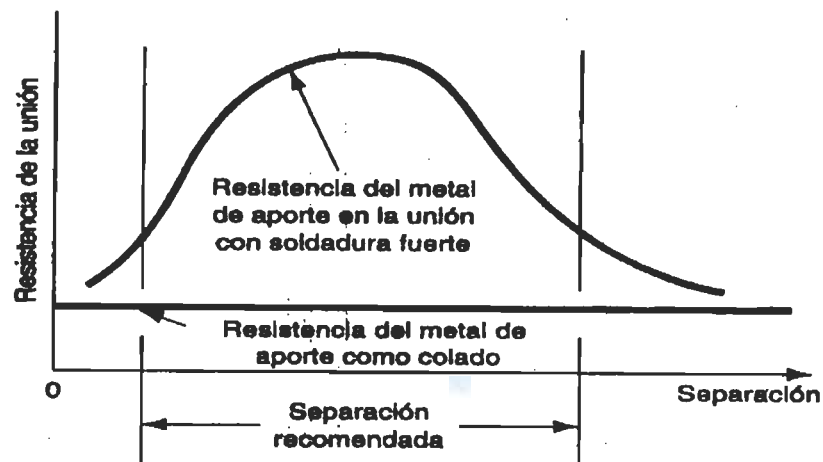


Figura 4. Resistencia de la unión como una función de la separación.

El brazing se diferencia del proceso de soldadura en que el metal de aporte en este proceso no fluye dentro de la unión por atracción de capilaridad. El metal de aporte es depositado en una unión abierta de un rodillo soldado o un electrodo consumible. El metal de aporte es calentado y fundido al hacer la adición y el metal base no es fundido.

El enlace que toma lugar entre el metal de aporte y el calentamiento el metal base aun sólido es el mismo que ocurre en el brazing. En el proceso de soldadura el arco es usado como fuente de calor y por lo tanto puede fundirse algo del metal base. Esta pequeña cantidad del metal fundido es asimilado por el metal soldado.

El claro entre las uniones, es decir el espaciado para permitir el flujo por capilaridad, podría ser en el rango de 0.05 a 0.25 mm dependiendo de la aleación que se esté usando. En una operación de brazing típica las superficies a ser unidas son limpiadas para remover los contaminantes y los óxidos que son recubiertos con el flux. Cuando el flux se funde se pretende disolver los óxidos de la superficie. El área de unión es calentada hasta que el flux funde así que el metal base limpiado es protegido contra la oxidación por una capa de flux líquido. La aleación del brazing es fundida hasta el mismo punto en la superficie del área unida. La atracción por capilaridad entre el metal y la aleación de aporte es más alta que aquella entre el metal base y el flux. El flux líquido en la unión es desplazado por el líquido de la aleación de aporte. La unión después el enfriamiento a temperatura ambiente será llenada con aleación brazing sólida, y el flujo ahora también solidificado se encontrara en el exterior de la unión.

Las uniones por el proceso brazing usualmente son hechas con relativamente pequeños claros. La viscosidad de la aleación de aporte, es por lo tanto tan importante como la tensión superficial y la habilidad del mojado. La baja viscosidad es una característica deseable de las aleaciones brazing ya que un metal de aporte viscoso no tiene suficiente atracción de capilaridad para penetrar a las grietas muy cerradas.

Al seleccionar los materiales para los productos, primero se consideran sus propiedades mecánicas, resistencia, tenacidad, ductilidad, dureza, elasticidad, fatiga. Las relaciones entre resistencia y peso y entre rigidez y peso también son importantes, particularmente en aplicaciones aeroespaciales y automotrices. El aluminio, el titanio y los plásticos reforzados, por ejemplo, tienen relaciones de este tipo más elevadas que los aceros y los hierros fundidos. Las propiedades mecánicas deben valorarse considerando las condiciones específicas en las que el producto deberá funcionar.

A continuación deben tenerse en cuenta las propiedades físicas de los materiales: calor específico, dilatación y conductividad térmica, punto de fusión y propiedades eléctricas y magnéticas. Las propiedades químicas también desempeñan un papel significativo, tanto en entornos hostiles como normales. La oxidación, la corrosión, la degradación general de las propiedades, toxicidad están entre los factores que deben considerarse.

Por último, las propiedades de manufactura de los materiales determinan si pueden ser fundidos, formados, maquinados, soldados o sujetos a tratamiento térmico con relativa facilidad.

La soldadura por brazing tiene varias ventajas en comparación con la soldadura por fusión como se describe a continuación:

1. Puede unirse cualquier metal, inclusive los que son distintos.
2. Ciertos métodos para soldadura brazing pueden realizarse en forma rápida y consistente, lo que permite altas velocidades de los ciclos y la producción automatizada.
3. Algunos métodos permiten la soldadura simultánea de varias uniones.
4. La soldadura brazing se aplica para unir partes de paredes delgadas que no pueden soldarse con arco eléctrico.
5. En general, se requiere menos calor y energía que en la soldadura por fusión.

6. Se reducen los problemas en la zona afectada por el calor en el metal base cerca de la unión.
7. Es posible soldar áreas de unión inaccesibles para muchos procesos de soldadura por fusión, dado que la acción capilar atrae el metal de aporte fundido dentro de la unión.

Las desventajas y limitaciones de la soldadura brazing son que:

1. La resistencia de la unión por lo general es menor que una unión por fusión.
2. Aunque la resistencia de una buena unión con soldadura brazing es mayor que la del metal de aporte, es posible que sea menor que la de los metales base.
3. Las altas temperaturas de servicio pueden debilitar una unión con soldadura brazing.

La soldadura brazing es un proceso de producción de amplio uso en diversas industrias, incluyendo la automotriz (por ejemplo, para unir tubos y conductos). El proceso se usa extensamente para reparación y trabajos de mantenimiento en casi todas las industrias.

7.4. Dimensiones del montaje en procesos brazing

La soldadura es comúnmente más satisfactoria para la unión de montajes grandes que el brazing. Debido a que en el brazing el calor debe ser aplicado a un área amplia, muchas veces del montaje completo. Y si el montaje es muy grande es difícil calentar bien para permitir el punto de flujo del metal de aporte cuando el calor tienda a disipar más rápido del tiempo que tarda en calentarlo. El calor localizado intenso de la soldadura, algunas veces una desventaja, llega a ser una ventaja de la unión ya que se puede usar en montajes grandes. Así que el tamaño del montaje determina si debe ser soldado o se puede llevar a cabo la soldadura por brazing el cual se utiliza generalmente para montajes de tamaños pequeños.

El espesor de las secciones del metal base es una importante consideración en la selección del método de unión. Si las dos secciones son relativamente gruesas (por ejemplo 12.7 mm) el brazing o la soldadura pueden producir una unión fuerte.

Sin embargo si se requiere hacer una unión "T" de una sección de metal de 0.127 mm de espesor en una base de 12.7 mm el brazing es el mejor método como se muestra en la Figura 5. El calor intenso de la soldadura es capaz de quemar o envolver la sección delgada. El calor más amplio y la temperatura más baja permite unir secciones sin involucrar distorsión del metal.

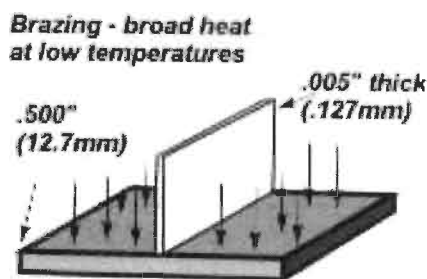


Figura 5. Ejemplo de los espesores de las secciones a unir por brazing.

La configuración de la unión es un "punto" o una "línea". La unión de un punto se puede hacer fácilmente con soldadura autógena o con brazing. Pero una unión lineal, en igualdad de circunstancias se suelda más fácilmente con brazing. El brazing necesita ser un trazo manual. El metal de aporte es llevado a través del área de unión por la acción de capilaridad la cual trabaja con facilidad en cualquier configuración común. En la Figura 6 se muestran varias configuraciones de unión por el proceso brazing.

Brazing joins all these configurations with equal ease.

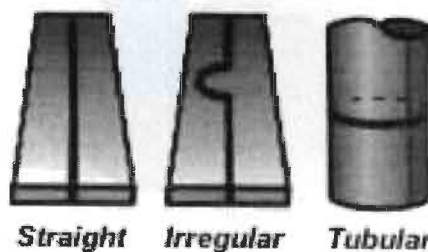


Figura 6. Configuraciones de unión por el proceso brazing.

7.5. Tipos de materiales a unir

Se supone que se está planeando montar dos secciones de metal. Se necesita alta conductividad eléctrica en una sección, alta resistencia y resistencia a la corrosión en la otra. Se requiere cobre por conductor y acero inoxidable por resistencia. Unir estos metales puede presentar problemas. Se necesita fundir ambos metales, pero el acero inoxidable funde a una temperatura mucho mayor que el cobre, el cobre se fundirá primero y fluirá antes que el acero inoxidable. Con el brazing esta no es una limitación. Todo lo que se necesita hacer es seleccionar un metal de aporte que sea metalúrgicamente compatible con los dos metales base y que tenga un punto de fusión más bajo que los otros dos, se presentan en Tabla 7 temperaturas de fundición de los metales. Se obtendrá una unión fuerte con mínima alteración de las propiedades de los metales. Lo que se tiene que recordar es que en el brazing no se funden los metales base, pero metalúrgicamente se unen sus interfaces. La integridad y propiedades de cada metal en el montaje brazing se conservan con un cambio mínimo. Si se quiere unir metales diferentes el mejor método es a través del proceso brazing.

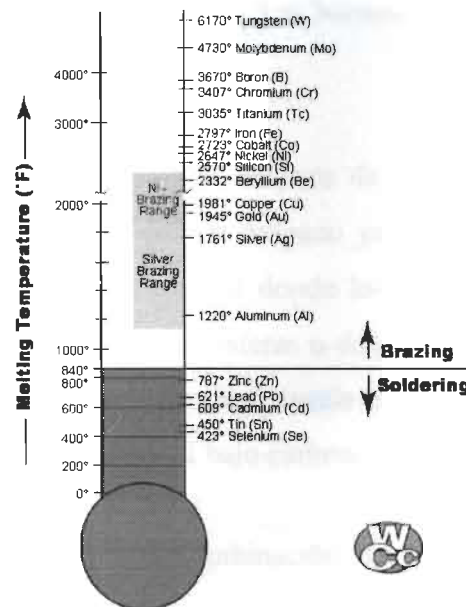


Figura 7. Temperaturas de Fundición Brazing en materiales.

7.6. El proceso brazing al vacío

El brazing es definido como un grupo de procesos de unión que ocurren sobre 450°C y abajo del punto de fusión del metal base. Adicionalmente la unión ocurre por acción de la capilaridad del metal de aporte y la subsecuente solidificación de este material sobre las fracturas o las superficies a ser unidas. Las aleaciones de aporte deben tener bajo punto de fusión en comparación del metal a ser unido, debido a que en el brazing el metal base no se funde. En el brazing convencional el metal de aporte es distribuido entre superficies cerradas de la unión con el metal base siempre contra la gravedad. Muchos de los metales comunes pueden ser unidos pero no necesariamente con el mismo metal de aporte, método o procedimiento.

El brazing al vacío es un término utilizado para varias uniones metálicas que toman lugar en una cámara bajo presión atmosférica conocida como horno al vacío. El horno al vacío es un horno el cual usa una atmósfera al vacío con baja presión atmosférica en vez de una atmósfera de gas protectora como los hornos de tratamientos térmicos. Los hornos se caracterizan como pared fría o caliente dependiendo de la localización de los componentes aislantes o de calentamiento. Los hornos de pared fría son los usados para el brazing al vacío.

Las piezas son brillantes y limpias después de ser sometidas al brazing al vacío debido a la extremada baja cantidad de oxígeno ya que se previene la oxidación. El brazing al vacío es particularmente usual donde los metales base son procesados que adversamente reaccionan con otras atmósferas o donde los flujos atrapados o gases son intolerables. Este proceso es ampliamente usado para soldar metales base de acero inoxidable, superaleaciones y aceros al bajo carbono.

El brazing al vacío ofrece la combinación de alta limpieza y calentamiento o enfriamiento uniforme o rápido enfriamiento. El brazing al vacío es ideal para materiales sensibles a la oxidación tales como aquellos utilizados en la industria aeroespacial.

Una gran variedad de técnicas pueden ser empleadas en el proceso brazing, pero cada técnica incluye tres pasos principales: (1) preparación de la superficie, (2) aplicación de calor y (3) La introducción del metal de aporte.

7.6.1. Preparación superficial

Es importante debido a que la superficie debe estar limpia y libre de películas de óxido que pudieran afectar el mojado por la aleación brazing fundida. La presencia de otros compuestos estables como los carburos, sulfuros y nitruros en la superficie también pueden afectar el mojado aunque en menos grado.

El grado necesario de limpieza superficial usualmente es logrado por una de cuatro prácticas comunes: (1) aplicación de un flujo antes o durante el calentamiento, (2) uso de una atmósfera gaseosa que activamente reduzca los óxidos superficiales, (3) uso de una atmósfera protectora o un vacío que prevenga oxidación subsecuente y dependa del flux para remover cualquier óxido ya presente y (4) empleo de un metal de aporte brazing conteniendo adiciones de aleación que impartan una capacidad de autofundente (por ejemplo boro, litio y fósforo).

7.6.2. Calentamiento

Puede ser acompañado por una antorcha en un horno, por métodos de resistencia eléctrica, por un arco eléctrico, lámparas de cuarzo radiante y láser. La selección de un método de calentamiento es determinada por muchos factores, incluyendo la naturaleza de las piezas de trabajo, las aleaciones brazing que se están aplicando, el número de ensamblados para brazing y el costo involucrado. Los hornos de calentamiento son los más usados para operaciones de alta producción. El calentamiento por inducción es excelente para operaciones repetitivas y es favorecida cuando se desea un calentamiento rápido.

El horno de calentamiento se favorece cuando: (1) Las partes que van a ser ensambladas pueden ser sostenidas en una posición propia, (2) El metal de aporte brazing puede ser precolocado o (3) Cuando se requiere un control exacto de la atmósfera durante el calentamiento y el brazing.

El brazing en una atmósfera de un horno especial o en una cámara al vacío es ampliamente usada. Las atmósferas activas tipo hidrógeno seco que no requiere un flux suplementario son particularmente populares para masa de producción de alta calidad. Esta técnica mantiene las piezas de trabajo en condiciones limpias sin oxidar. El argón es un gas popular para uso como atmósfera en un horno brazing, el cual puede ser secado para un bajo punto de rocío y proveerá excelente protección contra la oxidación. Sin embargo no puede reducir los óxidos que ya están presentes en las superficies de las piezas de trabajo, así que un metal de aporte autofundente o un flux suplementario debe ser usado.

Otros gases que pueden usarse bajo ciertas circunstancias en atmósferas de horno brazing incluyen monóxido de carbón, dióxido de carbón, nitrógeno y metano. El horno brazing al vacío es desarrollado a presiones en el rango debajo de 0.5 a 10^{-4} torr dependiendo de la cantidad de protección necesaria contra la oxidación. Las condiciones de vacío no podrían eliminar completamente los óxidos en la superficie del acero pero podrían grandemente facilitar el brazing por una aleación de metal de aporte.

7.6.3. Metales de aporte

Pueden ser introducidos en una variedad de formas y por un número de diferentes técnicas. La especificación AWS A5.8 de metales de aporte para brazing clasifica un gran número de composiciones populares dentro de seis grupos que representan aleaciones de aluminio, plata, oro, cobre, níquel, cobalto y magnesio. Los requerimientos son proveídos por composición química, formas, tamaños, pruebas y certificación.

Los metales de aporte comunes en la soldadura brazing de manera general se enlistan en la Tabla 1 junto con los metales base principales en los que se usan normalmente. Para que un metal califique para soldadura brazing se requieren las siguientes características:

1. La temperatura de fusión debe ser compatible con la del metal base.
2. Una baja tensión superficial en la fase líquida para una buena humidificación.
3. Una alta fluidez para penetración en la interfase.
4. La capacidad de usar soldadura brazing en una unión de resistencia adecuada para la aplicación.
5. No deben existir interacciones químicas ni físicas con el metal base (por ejemplo, una reacción galvánica).

Metal de Aporte	Composición Típica	Temperatura aproximada para soldadura brazing (°C)	Metales base
Aluminio y silicio	90 Al, 10 Si	600	Aluminio
Cobre	99.9 Cu	1120	Níquel Cobre
Cobre y Fósforo	95 Cu, 5 P	850	Cobre
Cobre y Zinc	60 Cu, 40 Zn	926	Aceros hierros colados níquel
Oro y Plata	80 Au, 20 Cu	950	Acero inoxidable, Aleaciones de níquel
Aleaciones de níquel	Ni, Cr, Otros	1120	Acero inoxidable Aleaciones de níquel
Aleaciones de plata	Ni, Cr, Zn, Cd	730	Titanio, monel, inconel, acero para Herramientas, Níquel.

Tabla 1. Metales de aporte comunes usados en la soldadura brazing y metales base sobre los que se usan.

Hay una guía para asistir en la selección de los mejores metales de aporte para aplicaciones particulares, la cual es una tabla que muestra los rangos de temperatura de solidus y liquidus para brazing. Algunas veces una aleación para brazing puede ser seleccionada por el hecho de que tiene una temperatura usual la cual corresponde con temperaturas favorables para los tratamientos de recocido y normalizado para el acero en las piezas de trabajo. Entonces las dos operaciones: brazing y tratamiento térmico pueden llevarse a cabo simultáneamente.

La examinación metalográfica del enlace entre el metal de aporte y el metal base usualmente mostrarán que una cierta cantidad de difusión mutua ha tomado lugar para producir zonas de composición de aleación intermedia. La rapidez de difusión es determinada por la composición del metal de aporte y la temperatura del proceso brazing. Manteniendo el ensamblado brazing a elevada temperatura por un largo período de tiempo, es posible promover la completa desaparición del metal de aporte de la junta por difusión. La presencia de Sn, Zn, Cd y B en el metal de aporte pueden acelerar el mojado. Los elementos de pequeño tamaño atómico como el B pueden difundir mas rápido dentro del metal base.

El B es más usado en aleaciones base níquel que son diseñadas para operaciones sobre 1050°C. Las aleaciones brazing reactivas contiene adiciones de elementos para bajar el punto de fusión y de alguna manera eliminados o grandemente reducidos en cantidad en las últimas etapas del brazing para alcanzar la temperatura de fusión del metal de aporte en la junta. Los elementos que sirven para bajar el punto de fusión pueden ser eliminados por difusión dentro del metal base, por volatilización o por reacción química con los otros constituyentes en el metal de aporte.

Los metales de aporte se aplican a la operación de soldadura brazing en diversas formas, entre las que incluyen alambres, varillas, láminas y tiras, polvos, pastas, partes preformadas hechas de metal diseñado para adaptarse a una configuración de unión particular y al revestimiento en una de las superficies a las que se va a aplicar el brazing.

Varias de estas técnicas se ilustran en las Figuras 8 y 9. Las pastas metálicas para soldadura brazing, que se muestran en la figura 8, consisten en polvos metálicos de aporte mezclados con fundentes fluidos y aglutinantes.

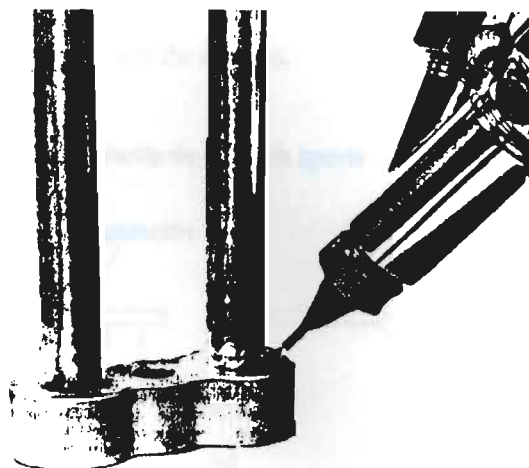


Figura 8. Aplicación de pasta para soldadura brazing a una unión mediante un aplicador.

Los fundentes para soldadura brazing tienen el mismo propósito que en la soldadura por fusión; se disuelven, combinan e inhiben de alguna forma la formación de óxidos y otros subproductos no deseados en el proceso. El uso de un fundente no sustituye los pasos de limpieza descritos antes.

Las características de un buen fundente son:

1. Una temperatura de fusión baja.
2. Baja viscosidad para que pueda ser desplazado por el metal de aporte.
3. Facilita la humidificación.
4. Protege la unión hasta la solidificación del metal de aporte.
5. El fundente también debe ser fácil de remover después de la soldadura brazing.

Los ingredientes comunes de fundentes para soldadura brazing son el bórax, los boratos, los fluoruros y los cloruros. Las distintas formas incluyen los polvos, las pastas y las pastas fluidas. En la mezcla también se utilizan agentes de humidificación para reducir la tensión de la superficie del metal de aporte fundido y facilitar la humidificación. Una alternativa para el uso de un fundente es ejecutar la en vacío o en una atmósfera que inhiba la formación de óxidos.

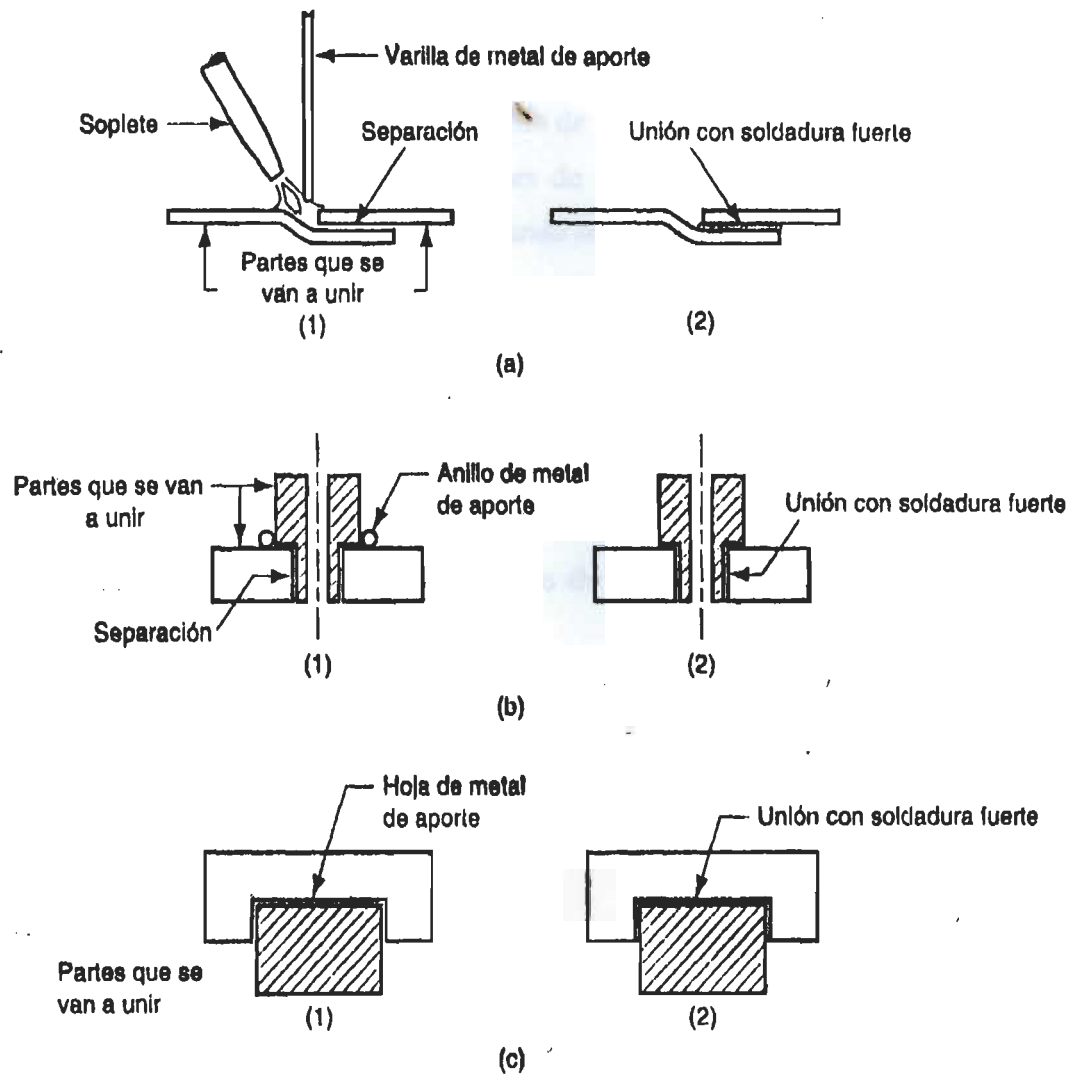


Figura 9. Varias técnicas para aplicar metal de aporte en la soldadura por brazing: (a) soplete y varilla de aporte, (b) anillo de metal de aporte en la entrada de la separación y (c) hoja de metal de aporte entre las superficies de partes planas. Secuencia: (1) antes y (2) después.

7.7. Brazing con metales de aporte base níquel

Los metales de aporte de níquel se usan para brazing de metales base, ferrosos y no ferrosos de alta temperatura. Estos metales de aporte son generalmente usados por su resistencia, propiedades a alta temperatura y resistencia a la corrosión. Algunos metales de aporte pueden usarse a temperaturas arriba de los 980 °C para servicio continuo y 1205 °C para servicio de tiempo corto. Los metales de aporte base níquel funden en el rango de 890 a 1205 °C pero pueden usarse a temperaturas más altas a consecuencia de la difusión de los elementos que bajan el punto de fusión en el metal de aporte dentro del metal base. Las uniones hechas con metales de aporte base níquel tienden a ser más frágiles que otros. Se debe tener cuidado cuando se usan metales de aporte que contienen boro en secciones delgadas debido a la naturaleza erosiva del metal de aporte y la inhabilidad de este material para alearse con el metal base. El tiempo y la temperatura deben ser monitoreados muy cuidadosamente para prevenir que el metal de aporte líquido perfore el metal base.

7.7.1. El rango entre solidus y liquidus de metales de aporte brazing.

¿Siempre es maravilloso que los terminos comunmente usados solidus, liquidus, punto de fusión y brazing realmente tengan un rango de significado, la diferencia entre ellos y por qué estas diferencias son importantes? Aquí, explicaremos estos terminos y su relevancia en los metales de aporte brazing.

El Punto de Fusión vs. el Rango de Fusión. El término punto de fusión, usado por metalúrgicos, normalmente aplica a metales puros que funden a una sola temperatura. Sin embargo, a veces las personas que aplican brazing usan el punto de fusión para referirse a la temperatura de liquidus de un metal de aporte brazing. Esto no es técnicamente correcto.

La mayoría de los metales de aporte brazing son aleaciones, o combinaciones de elementos puros o materiales. Estas aleaciones tienen muy diferentes características de fusión comparadas a sus formas puras. La mayoría de las aleaciones no tiene una sola temperatura de fusión o un punto de fusión; en cambio ellas tienen un rango de fusión. El superior y mas bajo límite de este rango son llamados temperatura de liquidus y solidus. Por consiguiente, la mayoría de los metalúrgicos dirá que un metal puro tiene un punto de fusión, mientras una aleación (metal de aporte brazing) tiene un rango de fusión.

7.7.1.1. Solidus

Durante el calentamiento, el solidus es la temperatura a que una aleación empieza a fundir. Entre el solidus y temperaturas del liquidus, la aleación será una mezcla de sólido y fases líquidas. Justo arriba de la temperatura del solidus, la mezcla será principalmente sólida con algunas fases líquidas (como la consistencia de la nieve, pero caliente!). Sólo debajo de la temperatura de liquidus, la mezcla será en su mayor parte líquida con algunas fases sólidas (como la aguanieve).

7.7.1.2. Liquidus

Liquidus es la temperatura sobre la que una aleación es completamente fundida. En otros términos, cuando una aleación excede la temperatura del liquidus, no hay ninguna fase sólida presente. La aleación esta completamente fundida y fluyendo.

7.7.1.3. El punto eutéctico

Algunos compuestos de aleaciones especiales tienen un punto de fusión específico así de un metal puro, en otras palabras el solidus y liquidus tienen la misma temperatura. Aleaciones de este tipo son llamadas "composiciones eutécticas" y el punto de fusión es conocido como un punto eutéctico. Un ejemplo de una composición eutéctica de metal de aporte es Nicrobraz10 (BNi-6). Como la tabla de la página 30 muestra, el níquel-fósforo del metal de aporte tiene un solidus y liquidus ambos a 1610° F (875° C). Otros ejemplos de composiciones eutécticas son Nicrobraz 50 (BNi-7) y Nicrobraz 150 (BNi-9).

7.7.1.4. Rango de brazing

Es en la mayoría de los casos, para que un metal de aporte brazing fluya apropiadamente en una junta con acción capilar, el metal de aporte debe estar completamente fundido. Así, el liquidus es la temperatura más baja que debe usarse para el brazing, y usualmente temperaturas arriba del liquidus se necesitan para un apropiado brazing. El rango de brazing exacto, sin embargo, dependerá de las propiedades del metal de aporte brazing y metales base que se unen, el proceso brazing, y el diseño de la junta.

Al utilizar el brazing en juntas con huecos anchos, es ventajoso soldar con un metal de aporte brazing lento que no fluirá sobre la junta. Como lo mostrado en tabla 2, el rango bajo del brazing para ciertos metales de aporte brazing con toda seguridad está debajo del liquidus. Por ejemplo, Nicrobraz130 (BNi-3) tiene un solidus a 1800° F (980° C) y un liquidus a 1900°F (1040° C), pero un rango de brazing de 1850-2150° F (1010-1175° C). El rango de brazing realmente empieza 50° F debajo del liquidus. El rango bajo del brazing en Nicrobraz 130 sera suficientemente fluido para penetrar dentro de una junta con huecos anchos, pero no tan fluido que fluya fuera de control. Otros metales de aporte brazing con las características similares incluyen Nicrobraz LC(BNi-1a) y Nicrobraz 160.

Con esto comprendemos la diferencia entre el solidus y liquidus, punto de fusión y rango de fusión, y cómo estan relacionados con el proceso brazing, al analizar la tabla entenderemos el significado de la misma. Básicamente, un metal de aporte brazing empezará a fundir en solidus y continuara fundiendo hasta que alcance el liquidus dónde estara completamente fundido. En la mayoría de los casos, ésta es la temperatura mínima a que el brazing se hace. Para obtener un buen flujo del metal de aporte brazing y la accion de capilaridad, la temperatura debe mantenerse dentro del rango brazing para un período dado de tiempo (tiempo de temperatura).

50

Brazing Filler Metal Temperature Ranges

NICROBRAZ	AWS A5.8	Nominal Composition (%)			Solidus °F (°C)	Liquidus °F (°C)	Brazing Range °F (°C)
LC/LCP	BNi-1a	Ni Bal. Cr 14	Si 4.5 Fe 4.5	B 3 C 0.03	1780 (970)	1970 (1075)	1950-2200 (1065-1205)
LM	BNi-2	Ni Bal. Cr 7	Si 4.5 B 3.1	Fe 3 C 0.03	1780 (970)	1830 (1000)	1850-2150 (1010-1175)
10	BNi-6	Ni Bal. P 11	C 0.03		1610 (875)	1610 (875)	1700-2000 (925-1095)
30	BNi-5	Ni Bal. Cr 10	Si 10.2 C 0.03		1975 (1080)	2075 (1135)	2100-2200 (1150-1205)
50 U.S. Patent 3,188,207	BNi-7	Ni Bal. Cr 14	P 10 C 0.03		1630 (890)	1630 (890)	1800-2000 (980-1095)
51		Ni Bal. Cr 25	P 10 C 0.03		1620 (880)	1740 (950)	1800-2000 (980-1095)
110 U.S. Patent 5,165,836		Ni Bal. Cr 7.9 Si 4.2	B 3.2 Cu 2.5 Mo 2	Nb 2 C 0.02	1775 (970)	1980 (1080)	2000-2150 (1090-1175)
125	BNi-1	Ni Bal. Cr 14	Si 4.5 Fe 4.5	B 3 C 0.7	1780 (970)	1900 (1040)	1950-2200 (1065-1205)
130	BNi-3	Ni Bal. Si 4.5	B 3.1 C 0.03		1800 (980)	1900 (1040)	1850-2150 (1010-1175)
135	BNi-4	Ni Bal. Si 3.5	B 1.9 C 0.03		1810 (990)	1935 (1055)	1950-2150 (1065-1175)
150	BNi-8	Ni Bal. Cr 15	B 3.5 C 0.03		1930 (1055)	1930 (1055)	1950-2200 (1065-1205)
160		Ni Bal. Cr 11	Si 3.5 Fe 3.5	B 2.3 C 0.5	1780 (970)	2120 (1160)	2100-2200 (1150-1205)
170	BNi-10	Ni Bal. W 16 Cr 12	Si 3.5 Fe 3.5	B 2.5 C 0.5	1780 (970)	2020 (1105)	2120-2200 (1150-1205)
171	BNi-11	Ni Bal. W 12 Cr 10	Si 3.5 Fe 3.5	B 2.5 C 0.4	1780 (970)	2000 (1095)	2100-2200 (1150-1205)
200 U.S. Patent 2,880,639		Ni Bal. Cr 7 W 6	Si 4.5 Fe 3	B 3.2 C 0.03	1790 (975)	1900 (1040)	1950-2150 (1065-1175)
210	BCo-1	Co Bal. Cr 19 Ni 17	Si 8 W 4	B 0.8 C 0.4	1920 (1045)	2090 (1140)	2100-2250 (1150-1230)
3002		Ni Bal. Cr 15	Si 8		1975 (1080)	2075 (1135)	2150-2200 (1175-1205)
3003		Ni Bal. Cr 17	Si 9 B 0.1		1980 (1080)	2080 (1135)	2100-2150 (1150-1175)

Tabla 2. Rango de temperatura en metales de aporte base níquel.

En la Tabla 3 se muestran algunos metales de aporte base níquel de acuerdo a la clasificación AWS A5.8 y los materiales base para los cuales son recomendados. La atmósfera recomendada para el uso de los metales de aporte mostrados en la tabla es hidrógeno seco, gas inerte y vacío.

Metales de Aporte	Clasificación AWS A5.8	Solidus (°C)	Liquidus (°C)	Comentarios
Alta Temp. 720	BNi-1	977	1038	Recomendado para partes sujetas a leves esfuerzos a altas temperaturas. Características de flujo y buena corrosión
Alta Temp. 721	Bni-1A	977	1077	Similar a la anterior pero de particular interés donde el alto contenido de carbón no es permitido, flujo mas lento que el anterior
Alta Temp. 820	BNi-2	971	999	Ampliamente usado para metales de aporte de bajo punto de fusión para brazing de componentes de turbinas, dispositivos médicos y de alimentos, buen flujo, penetración baja del metal base son características de este metal de aporte.
Alta Temp. 910	BNi-3	877	1066	Fluye libremente y es menos sensible a la resequedad de la atmósfera que otros metales de aporte. Mejor para uniones estrechas
Alta Temp. 930	BNi-4	982	1066	Para acero inoxidable y aleaciones base Ni con secciones delgadas. Componentes de turbinas y equipo químico. Más lento y es mejor para aplicaciones de amplios claros
Alta Temp. 932	BNi-6	877	877	Para acero inoxidable y aleaciones base Ni con secciones delgadas. Componentes de turbinas y equipo químico. Para usos que demandan propiedades a alta temperatura y resistencia a la corrosión a temperaturas de procesamiento bajas
Alta Temp. 933	BNi-7	888	888	Utilizado a menudo para soldar las estructuras tipo panal de abeja, los montajes de tubo de paredes delgadas, y para los usos nucleares donde el boro no puede ser utilizado. La adición del cromo le da características mejores a alta temperatura y de corrosión

Tabla 3. Metales de aporte base níquel.

7.7.2. Metalurgia de metales de aporte brazing base-níquel.

Se desarrollaron los metales de aporte brazing base-níquel en 1947 para proporcionar la capacidad de altas temperaturas y mejorar las propiedades mecánicas comparadas a los metales de aporte base-cobre y plata. La base metalúrgica para muchos metales de aporte brazing se derivó de la fase dura de las aleaciones base-níquel. Mientras hay un poco de similitudes en las composiciones, los elementos de las aleaciones en metales de aporte base-níquel han servido para varios propósitos y son optimizados, ~~de~~ ^{de} diferentes maneras. A continuación examinaremos algunos de estos importantes elementos, para la recuperación de superaleaciones por el proceso brazing.

7.7.2.1. Boro (B)

El punto de fusión del níquel puro es 2651°F(1455°C). Esta temperatura es muy superior a los puntos de fusión de la mayoría de los metales base. Todavía, según la definición del brazing, deben unirse los metales base a una temperatura brazing debajo de sus puntos de fusión. Por consiguiente, para soldar con metales de aporte de níquel, deben alearse elementos como el boro con el níquel para disminuir su punto de fusión debajo de la mayoría de los metales base. El más bajo punto de fusión nos permite usar metales de aporte níquel-boro para brazing en una gran variedad de metales quedando significativamente las temperaturas debajo de sus puntos de fusión.

Aunque el boro sirve teniendo una función importante para bajar el punto de fusión de los metales de aporte brazing, cuando se lleva cabo aleaciones exclusivamente con níquel, el boro tiene algunas desventajas. A 2.5-3.5% de peso del boro (las cantidades normalmente usadas en metales de aporte brazing), la aleación binaria del níquel-boro tendrá deficiencias en lo siguiente:

- 1.- Baja tensión al esfuerzo, alta dureza
- 2.- Baja resistencia a la corrosión
- 3.- Excesiva fluidez en el fundido

No hay ningún metal de aporte brazing comercialmente disponible en la aleación binaria níquel-boro. Todos los metales de aporte base-níquel que contienen boro deben tener elementos adicionales para reforzar sus propiedades físicas.

7.7.2.2. Silicio (Si)

Otro elemento que baja el punto de fusión del níquel es el silicio. Aproximadamente 11.8% de peso del silicio aleado con níquel puro bajará el punto de fusión por 594° F (330° C). Pero, cuando es aleado exclusivamente con níquel, el silicio como el boro no hará un metal de aporte brazing satisfactorio. Una aleación binaria de níquel-silicio tendrá baja fuerza a la tensión, pobre ductilidad y fluidez excesiva.

7.7.2.3. Ni-B-Si

Aunque el boro y silicio son muy buenos ambos para disminuir el punto de fusión, ni uno ni otro en aleación exclusivamente con níquel producirá un metal de aporte satisfactorio. Sin embargo, cuando se lleva a cabo la aleación juntos en el níquel con 1.5-3.5% boro y 2.75-4.0% silicio, pueden formarse los metales de aporte brazing convenientes. Ejemplos son Nicrobraz 130 (BNi-3) con un punto de fusión bajo de 1900° F (1040° C) y Nicrobraz 135 (BNi-4) a 1935° F (1055° C). La adición de silicio también reforzará la resistencia a la corrosión en ambos casos.

7.7.2.4. Fósforo (P)

Similar al boro y silicio, el fósforo también reduce el punto de fusión del níquel, en hecho quizá dramáticamente. Cuando se lleva a cabo la aleación con 11% de peso del fósforo, el punto de fusión del níquel es reducido por 1035° F hasta 1616° F (880° C).

Diferente al boro y al silicio, el fósforo produce un satisfactorio metal de aporte brazing cuando se lleva la aleación exclusivamente con níquel. El fósforo con 11% de peso en el níquel da Nicrobraz 10 esto es (BNi-6). Sin embargo, aunque este metal de aporte tiene algunas características brazing satisfactorias y un punto de fusión extremadamente bajo, la incompatibilidad con algunos elementos le da baja fuerza y ductilidad, y gran fluidez en el fundido.

7.7.2.5. Cromo (Cr)

Para disminuir las limitaciones asociadas con los sistemas binarios nosotros hemos examinado desde lejos (el níquel-boro, níquel-silicio y níquel-fósforo), el cromo puede ser aleado con cualquiera de estos elementos para agregar fuerza y resistencia a la corrosión al metal de aporte brazing. Un ejemplo es Nicrobraz 150 (BNi-9) con 3.5 % en peso de boro, 15% en peso del cromo y el balance de níquel.

Para aumentar al máximo los beneficios de la adición de cromo, el tiempo de temperatura del brazing puede extenderse (típicamente 40-60 minutos) para permitir al boro difundir fuera de la junta en el brazing y en los metales base llevarse a cabo la union (difusión del brazing). La pérdida del boro resultará en una fuerte, resistensia a la corrosión en el brazing de la junta con un alto punto de fusión que el original metal de aporte (arriba de 2500° F o 1370° C).

Otro ejemplo con cromo es Nicrobraz 30 (BNi-5), cual es aleacion níquel-silicio con 19% de peso de cromo. Esta fuerte (64 ksi brazing en las uniones no es raro) resistencia a la corrosión en un metal de aporte brazing se usa para soldar con un amplio rango en aplicaciones de altas temperaturas.

Para mejorar el metal de aporte de níquel-fósforo binario, 14% de peso del cromo es agregado para formar Nicrobraz 50 (BNi-7). Esta adición proporciona tres mayores ventajas:

- 1.- Incrementa viscosidad en la fusión.
- 2.- Más fuerza y ductilidad.
- 3.- Resistencia a la corrosión.

Estas ventajas son mejor realizadas cuando la temperatura brazing se sostiene a 1950° F (1065° C) durante 60 minutos. Esto permitirá al fósforo (después de hacer su trabajo para bajar el punto de fusión del metal de aporte) difundir dentro de los materiales base y una pequeña cantidad del fósforo oxidara y llenara el níquel más dúctil.

7.7.2.6. Ni-B-Cr-Si

Hasta este punto, nosotros habíamos examinado sólo aleaciones de dos elementos con níquel. ¿Qué pasa si nosotros combinamos níquel, boro, silicio y cromo? Tenga presente que boro y silicio substancialmente baja el punto de fusión del níquel puro.

Ligando todos los tres elementos con níquel, nosotros formamos NicrobrazLM (BNi-2) con un punto de fusión a 1830° F (1000° C). Esto es particularmente notable porque nosotros empezamos con níquel puro que funde a 2651° F (1455° C). Aleandolo con aproximadamente 3.1% de peso del boro, 7% de peso del cromo, 4.5% de peso del silicio y también 3% de peso del hierro, un metal de aporte es formado con un muy bajo punto de fusión.

Además, si el tiempo de temperatura del brazing se alarga, la mayoría del boro difundirá fuera de la junta soldada y no dentro de los metales base. Esto resultará en un acabado en la junta del brazing de Ni-Cr-Si-Fe con alta fuerza, mejorada resistencia a la corrosión y, debido a la difusión del boro, un alto punto de fusión (sobre 2300° F o 1260° C) que el metal de aporte brazing original.

7.7.2.7. Carbono (C)

El carbono es un elemento indeseable en la mayoría de los metales de aporte brazing. El carbono reacciona con el cromo para formar carburos de cromo que son cristales quebradizos, angulares, elevando la tensión en las juntas. Al observarse las juntas brazing por Radiografía (SEM) ha mostrado que los carburos de cromo son comunes en juntas que no se difunden totalmente o tienen anchos huecos. Estos carburos también pueden atar al valioso cromo, mientras bajan la resistencia a la corrosión en la junta brazing. Por consiguiente, los metales de aporte brazing base-níquel tienen menos de 0.1% de contenido de carbono.

La demanda es que aunque el carbono puede disminuir el punto de fusión ligeramente, incrementa la fluidez y disminuye la fuerza del metal del aporte, en general, el carbono en pequeñas cantidades tiene el mínimo efecto (positivo o negativo) en los metales de aporte brazing base-níquel.

7.7.2.8. Hierro (Fe), Cobre (Cu), Tungsteno (W) y Molibdeno (Mo)

Aquí nosotros discutiremos unos elementos adicionales que son brevemente menos comunes, que los examinaremos a distancia, y que tienen merito de mencionarse. Hierro generalmente es un elemento neutro que se agrega inadvertidamente a los metales de aporte brazing con la adición de boro y/o silicio (ferro-silicio y baja calidad de níquel-boro). Sin embargo, el hierro imparte alguna ductilidad en los metales de aporte brazing. El Cobre, cuando es aleado con níquel y cromo, refuerza la resistencia a la corrosión en los ambientes de agua salada y otros medios conteniendo agua. El tungsteno eleva el punto de fusión de metales de aporte brazing y reduce la viscosidad durante el brazing. En procesos brazing de difusión, la presencia de tungsteno incrementa la fuerza a alta temperatura en la junta soldada. El molibdeno aumenta la viscosidad de los metales de aporte brazing, agrega fuerza a altas temperaturas y refuerza la resistencia a la corrosión en medios acuosos, sobre todo cuando hay aleación con el cromo y el cobre.

Durante esta examinación de los elementos aleados con níquel para hacer los muchos metales de aporte base-níquel, nosotros descubrimos que ese punto de fusión, fuerza, ductilidad, viscosidad y resistencia a la corrosión son las consideraciones mas importantes. Hemos analizado cómo el boro, silicio y fósforo substancialmente reducen el punto de fusión del níquel puro. El cromo, cuando tiene aleación con el níquel-boro, el níquel-silicio, níquel-fósforo o combinaciones de estos elementos, mejorarán la fuerza, ductilidad y resistencia a la corrosión de los metales de aporte brazing. Generalmente, el carbono e hierro son los elementos neutros controlados en metales de aporte brazing base níquel, el tungsteno aumenta el punto de fusión y reduce la viscosidad, mientras cobre y molibdeno son adiciones beneficas que aumentarán la resistencia a la corrosión de los metales de aporte brazing.

7.8. Los metales base

Una superaleación es una aleación metálica la cual puede ser usada a altas temperaturas, muchas veces en exceso de 0.7 de la temperatura de fusión absoluta. Los criterios de diseño primarios son la resistencia a la oxidación y a la fluencia. La

composición química esta basada en hierro, cobalto o níquel, estas últimas la mayor aplicación son en componentes de turbinas de gas.

Las superaleaciones base níquel son una clase especial de materiales tratados térmicamente cuyas propiedades derivan de la precipitación de partículas coherentes o semi coherentes. Las partículas precipitadas pueden crecer durante el tratamiento térmico inicial y es muy importante poder predecir la cinética de crecimiento de γ' y su posterior comportamiento a altas temperaturas.

Los solutos esenciales en las superaleaciones base níquel son el aluminio y/o titanio, con una concentración total la cual es típicamente menor del 6% e.p., lo cual genera una microestructura en equilibrio de dos fases, consistiendo de gama (γ) y gama prima (γ'). La fase γ' es largamente responsable de la resistencia del material a elevada temperatura y su increíble resistencia a la deformación. La cantidad de γ' depende de la composición química.

Para una composición química dada, la fracción de γ' disminuye con el incremento en la temperatura. Este fenómeno se usa con el objetivo de disolver la fase γ' suficientemente a alta temperatura (un tratamiento de solución) seguido por un envejecido a baja temperatura con la finalidad de generar una dispersión fina y uniforme de los resistentes precipitados.

Obtener una estructura totalmente solubilizada conteniendo del 65 al 68% en volumen de γ' reprecipitada fina, coherente y con un tamaño promedio de 45 μm o menos depende exclusivamente del rango de solubilizado del tratamiento térmico de la aleación (diferencia entre la temperatura de solvus de γ' y la temperatura de fusión), la velocidad de enfriamiento desde la temperatura de solubilizado y también la respuesta al tratamiento térmico de envejecimiento.

7.8.1. Resistencia contra temperatura

La resistencia de muchos materiales disminuye con el incremento en la temperatura como se puede observar en la Figura 10, simplemente debido a la asistencia de la activación térmica que facilita que las dislocaciones superen obstáculos. Sin embargo, las superaleaciones base níquel contienen fase γ' , la cual esencialmente es un compuesto intermetálico basado en la fórmula $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, los cuales son particularmente resistentes a altas temperaturas.

La resistencia depende de los planos de deslizamiento de cada fase presente en la aleación. Si el deslizamiento fue limitado a estos planos a todas las temperaturas entonces la resistencia debería disminuir cuanto se incremente la temperatura. Si una dislocación llega a ser bloqueada conduce a un incremento en la resistencia. La resistencia solamente disminuye cerca de los 600 °C donde la activación térmica es suficientemente violenta para permitir a las dislocaciones sobrepasar los obstáculos. Para resumir, la presencia de γ' es responsable del hecho de que la resistencia de las superaleaciones base níquel es relativamente insensible a la temperatura.

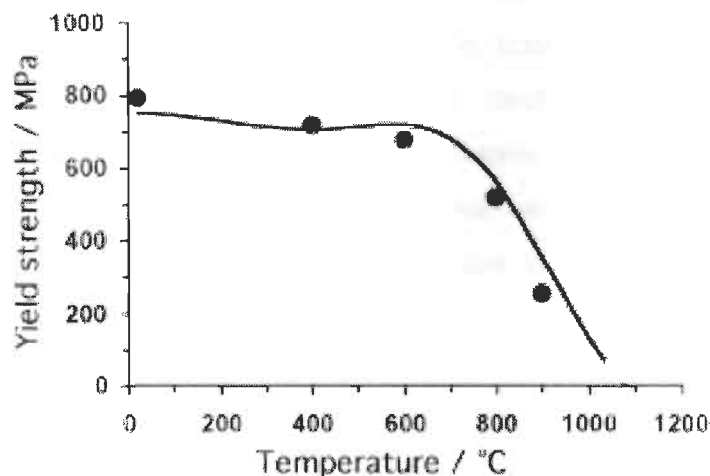


Figura 10. La resistencia a la cedencia de una aleación particular conteniendo solamente 20 % de γ' . Notar como la resistencia es al inicio insensible a la temperatura.

7.8.2. Composiciones químicas de los metales base

Las aleaciones Inconel son superaleaciones base níquel-cromo, que cubren un amplio espectro de composiciones y de propiedades. La combinación de níquel y cromo en estas aleaciones proporciona resistencia tanto a soluciones corrosivas reductoras como oxidantes. El níquel y el cromo actúan también en conjunto para resistir oxidación, carburización y otras formas de deterioro a altas temperaturas. Estas aleaciones poseen buena resistencia a la tracción y a la fatiga a temperaturas moderadas, y presentan excelentes propiedades de resistencia a fluencia a altas temperaturas.

En la mayoría de las aleaciones Inconel las características básicas del sistema níquel-cromo se aumentan mediante la adición de otros elementos. Algunas de las aleaciones aumentan su resistencia mediante la adición de aluminio, titanio y niobio. Otras contienen cobalto, cobre, molibdeno o tungsteno para mejorar atributos específicos de resistencia mecánica o a la corrosión. Las aleaciones Inconel también contienen hierro en cantidades que varían desde 1% a más del 20%. En la mayoría de los casos los efectos dominantes en las propiedades se deben a los aleantes, salvo el hierro.

Las superaleaciones comerciales contienen más elementos que solo Ni, Al y Ti. El cromo y el aluminio son esenciales para la resistencia a la oxidación, pequeñas cantidades de ytria ayudan a la escala de óxidos a adherirse al sustrato. Las superaleaciones policristalinas contienen elementos endurecedores del límite de grano tales como boro y zirconio los cuales segregan hacia estos lugares. La reducción en energía de límite de grano resultante es asociada con mejor resistencia a la fractura y ductilidad cuando el mecanismo de falla involucra decohesión de granos.

Hay también formadores de carburos como por ejemplo C, Cr, Mo, W, Nb, Ta, y Ti. Los carburos tienden a precipitar en los límites de grano y por lo tanto reducen la tendencia de deslizamiento del límite de grano.

Los elementos tales como el cobalto, hierro, cromo, niobio, tantalio, molibdeno, tungsteno, vanadio, titanio y aluminio son también endurecedores por solución sólida en las fases γ y γ' .

Hay, naturalmente, límites en las concentraciones que pueden ser adicionadas sin inducir precipitación. Es particularmente importante evitar ciertas fases que causan fragilidad tal como la fase sigma. No hay reglas simples gobernando las concentraciones críticas, es mejor calcular o medir la parte apropiada del diagrama de fases.

El alto contenido en Cr garantiza la elevada resistencia a la corrosión y a la oxidación a altas temperatura y así mismo su buen comportamiento frente a gases sulfurantes que pueden dar lugar al fenómeno de corrosión catastrófica o por sales fundidas.

La presencia del Al y del Ti da lugar a una alta resistencia mecánica a elevadas temperaturas ya que motivan que al ser tratadas térmicamente estas aleaciones se produzca la precipitación, coherente con la matriz austenítica de fase gamma γ , de un compuesto intermetálico que responde a la fórmula $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ conocido como fase γ' . Que es la causa de un aumento muy importante de la resistencia.

En la Figura 11 se presentan los efectos de los elementos aleantes en las superaleaciones base níquel. En la Tabla 4 se muestran las principales superaleaciones del metal base y las diferentes presentaciones por las cuales se pueden obtener. En la Tabla 5 se muestran las composiciones químicas de las principales superaleaciones base níquel.

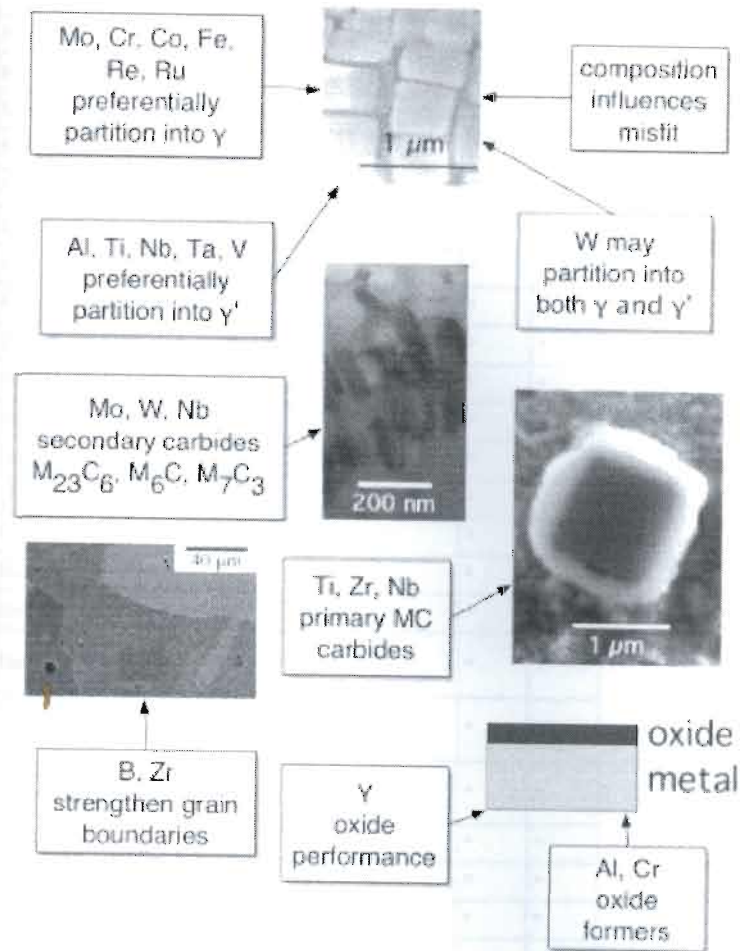


Figura 11. Efectos de los elementos de aleación de las superaleaciones base níquel. La “M” en la fase $M_{23}C_6$ corresponde a una mezcla de átomos metálicos.

UNS	Nombre	Alambre	Barra	Lámina	Placa	Tubo	Lingote	Parte suelta	Brida	Forja	Rodillo
N02200	Nickel 200	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
N02201	Nickel 201	*		*	*		*	*	*	*	*
N04400	Monel 400®	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
N04405	Monel R405®	*	*								
N05500	Monel K500®	*	*						*	*	*
N06600	Inconel 600®	*	*	*	*		*	*	*	*	*
N06601	Inconel 601®	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
N06617	Inconel 617®	*		*	*					*	*
N06625	Inconel 625®	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
N07718	Inconel 718®	*	*	*	*	*				*	*
N07750	Inconel X-750®	*	*	*	*	*				*	*
N08810	Incoloy 800/H/HT®	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
N08825	Incoloy 825®	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
N06022	Hastelloy C22®	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
N10276	Hastelloy C276®	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
N10665	Hastelloy B-2®	*	*	*	*				*	*	*
N06002	Hastelloy X®	*	*	*	*	*				*	*
K92890	Maraging C250/Vascomax 250®	*	*	*	*	*				*	
K93120	Maraging C300/Vascomax 300®	*	*	*	*	*				*	
N07041	Rene 41®	*	*	*	*	*				*	*
R30155	Multimet N155®	*	*	*	*	*				*	*
R30605	Haynes 25®	*	*	*	*	*				*	*
R30188	Haynes 188®										
N07001	Waspalloy®	*	*	*	*	*				*	*
R30035	MP35N®	*	*							*	*
R30159	MP159®	*	*							*	*
R30006	Cobalt Alloy 6B	*	*							*	*
K93600	Invar 36®	*	*	*	*	*				*	*
K94200	Invar 42®	*	*	*	*	*				*	*
K94610	Kovar®	*	*	*	*	*				*	*
N08367	AL6XN®	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
N09902	Ni-Span® C902	*	*								
S64152	Jethete® M152		*							*	
S66286	Alloy A286	*	*	*						*	
N08330	Alloy 330	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tabla 4. Principales superaleaciones del metal base y las diferentes presentaciones por las cuales se pueden obtener.

Aleación	Composición química estándar (% en peso)															
	C	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ta	Ti	Al	B	Zr	Hf	Fe	Re	Otros
B 1900	0.10	8	Bal	10	6	-	-	4.25	1	6	0.015	0.07	-			-
B 1900 +HF	0.10	8	Bal	10	6	-	-	4.25	1	6	0.015	0.1	1.1			-
B 1910	0.15	10	Bal	10	3	-	-	7.25	1.25	6	0.015	0.1	-			-
CM 681 LC®	.1	5.5	Bal	9	-	8.5	-	6	.15	-	-	.01	1.5	5.75	3	-
NI-X	.10	21.75	Bal	1.5	9	0.6	-	-	-	-	-	-	-	18.5		1.0Mn 1.0 Si
IN 100	0.16	10	Bal	15	3	-	-	-	4.75	5.5	0.015	0.04	-			.8V
IN 625	0.20	21.6	Bal	-	8.7	-	3.9	-	0.2	0.2	-	-	-			-
IN 713 C	0.10	13.5	Bal	-	4.5	-	2	-	0.8	6	0.010	0.06	-			-
IN 713 LC	0.06	12	Bal	-	4.3	-	2	-	0.7	5.8	0.007	0.06	-			-
IN 718	0.05	19	52.5	-	3	-	5	-	0.9	0.55	0.005	-	-			-
IN 738 LC	0.09	16	Bal	8.5	1.7	2.5	0.8	1.7	3.5	3.5	0.010	0.05	-			-
IN 738 C	0.17	16	Bal	8.5	1.7	2.5	0.8	1.7	3.5	3.5	0.010	0.1	-			-
IN 792	0.12	12.4	Bal	9	1.9	3.8	-	3.9	4.5	3.1	0.020	0.1	-			-
IN 792+Hf	0.11	12.2	Bal	9	2	3.8	-	4	4	3.5	0.015	0.1	.50 - .85			-
IN 939	0.15	22.4	Bal	19	-	1.6	1	1.4	3.7	1.9	0.010	0.1	-			-
Mar M 002	0.15	9	Bal	10	-	10	-	2.5	1.5	5.5	0.015	0.05	1.5			-
Mar M 004	0.05	12	Bal	-	4.5	-	2	-	0.6	5.9	0.015	0.05	1.3			-
Mar M 200	0.15	9	Bal	10	-	12.5	1.8	-	2	5	0.015	0.05	-	-	-	-
Mar M 246	0.15	9	Bal	10	2.5	10	-	1.5	1.5	5.5	0.015	0.05	-			-
Mar M 247	0.16	8.2	Bal	10	0.6	10	-	3	1	5.5	0.015	0.05	1.5			-
Mar M 421	0.15	15.5	Bal	9.5	2	3.8	2	-	1.8	4.3	0.015	0.05	-			-
CM 247 LC	0.07	8	Bal	9	0.5	10	-	3.2	0.7	5.6	0.015	0.01	1.4			-
Rene' 41	0.09	19	Bal	11	9.75	-	-	-	3.15	1.65	0.005	-	-			-
Rene' 77	0.07	14.6	Bal	15	4.2	-	-	-	3.3	4.3	0.015	0.04	-			-
Rene' 80	0.16	14	Bal	9.5	4	4	-	-	5	3	0.015	0.03	-			-
Rene' 95	0.15	14	Bal	8	3.5	3.5	3.5	-	2.5	3.5	0.010	0.05	-			-
Rene' 125	0.11	9	Bal	10	2	7	-	3.8	2.5	1.4	0.017	0.05	-			-
Rene' 220	0.02	18	Bal	12	3	-	5	3	1	0.5	0.010	-	-			-
U 500	0.07	19	Bal	18	4	-	-	-	3	3	0.007	-	-			-
U 700	0.07	15	Bal	18.5	5	-	-	-	3.5	4.4	0.025	-	-			-
Waspalloy	0.07	19.5	Bal	13.5	4.25	-	-	-	3	1.35	0.005	-	-			-
C263	0.06	20	Bal	20	5.9	-	-	-	2.15	0.45	0.001	-	-			-
C 1023	0.16	15.5	Bal	10	8.5	-	-	-	3.6	4.2	0.006	-	-			-
GMR 235	0.15	15.5	Bal	-	5.3	-	-	-	2	3	0.060	-	-	10		.3Mn, .6 Si
GTD 111	0.10	14	Bal	9.5	1.6	3.8	-	2.8	4.9	3	0.012	0.02	-			-
GTD 222	0.10	22.5	Bal	19	-	2	0.8	1	2.3	1.2	0.005	0.012	-			-

Tabla 5. Composiciones químicas estándar de las superaleaciones base níquel.

7.8.3. Microestructura y tratamiento térmico

La optimización de las propiedades de las superaleaciones base níquel se logra cuando después del tratamiento de solución son tratadas térmicamente a dos diferentes temperaturas en el campo de fases γ/γ' . El tratamiento térmico a más alta temperatura conduce a una precipitación de partículas gruesas de γ' . El segundo tratamiento térmico a más baja temperatura fomenta una precipitación adicional como es esperado de acuerdo al diagrama de fases. Esta última precipitación conduce a una fina dispersión secundaria de fase γ' . El resultado es una distribución de dos modos de γ' como es ilustrado en la Figura 12.

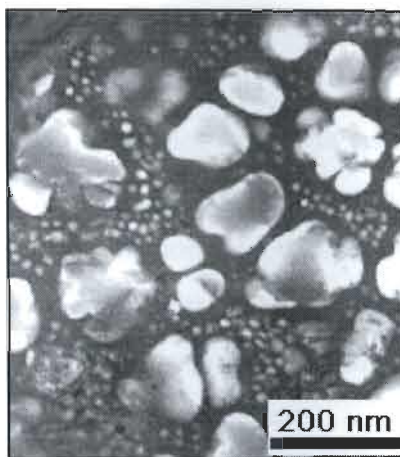


Figura 12. Distribución de fases γ' con los tratamientos térmicos.

El tratamiento térmico de solución determina no solamente la cantidad de fase γ' que se disuelve, sino también el tamaño de grano de la fase γ . El tamaño de grano llega a ser grueso si γ' se disuelve ya que no hay un efecto de sujetar las partículas de precipitados en el movimiento de los límites de grano. La Figura 13(a) muestra una microestructura de una aleación que ha sido tratada a una temperatura un poco mas abajo que la temperatura de solidus y la microestructura de la Figura 13(b) a una temperatura más arriba que la temperatura de solidus.

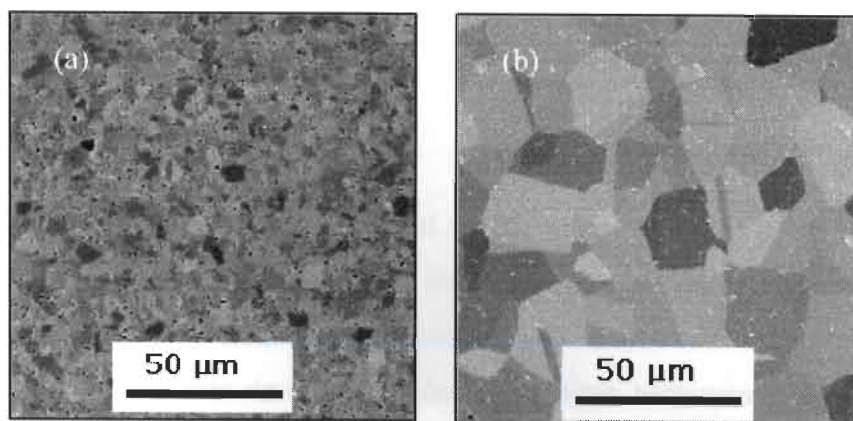


Figura 13. Microestructuras de aleaciones que han sido tratadas térmicamente.

7.8.4. Procesamiento

La superaleaciones contienen elementos reactivos tales como el Al y el Ti por lo tanto generalmente se funden al vacío con la ventaja adicional que los elementos de trazas perjudiciales se eliminan por evaporación. Comúnmente es usada la fusión por inducción al vacío debido a que la agitación por inducción asegura la homogeneización y ayuda a tener más líquido por debajo de la interfase metal / vacío lo cual optimiza la remoción de gases indeseables e impurezas volátiles.

7.8.5. Descripción de algunos metales base de superaleaciones

7.8.5.1. Inconel 738

Es una aleación base níquel fundida al vacío, endurecible por precipitación. Esta aleación posee excelente resistencia a la fractura a alta temperatura combinada con superior resistencia a la corrosión en caliente debido al alto contenido de cromo que contiene. Para el maquinado de esta aleación se necesitan herramientas robustos. Los aceros para herramientas pueden usarse para ciertas operaciones pero solamente las herramientas de carburo son satisfactorias para taladrar.

Esta aleación tiene buena resistencia a la oxidación a temperaturas sobre los 1000 °C y su resistencia a la sulfuración es superior en mezclas de sales fundidas. La aleación también tiene buena resistencia a atmósferas conteniendo sulfuro de hidrógeno y dióxido de azufre en cámaras de combustión a 980 °C. Su alta resistencia a la corrosión y sus buenas propiedades mecánicas la hacen atractiva para la industria de las turbinas donde el ambiente de operación es muy corrosivo. Algunas de las propiedades de esta aleación se presenta en la Tabla 6.

Propiedades de la aleación IN738	
Densidad lb/pulg ³	0.293
Gravedad específica	8.11
Rango de fusión °C	1232 - 1315
Coefficiente de expansión térmica/°F	8.85×10^{-6}
Resistencia a la tensión a 982 °C (psi)	66000
Resistencia a la cedencia a 982 °C (psi)	50000
Elongación a 982 °C (%)	10

Tabla 6. Algunas propiedades de la aleación IN738.

7.8.5.2. Inconel 601

La aleación 601 es una aleación del níquel-cromo con una adición de aluminio para una resistencia excepcional a la oxidación y otras formas de corrosión de alta temperatura. También tiene altas características mecánicas a elevadas temperaturas. Se utiliza extensamente en los hornos industriales, cestas de equipo para tratamientos térmicos, resortes, y otros equipos para productos petroquímico y para componentes de turbinas de gas. En la Tabla 7 se muestran algunas propiedades de esta aleación.

Propiedades de la aleación IN601	
Densidad g/cm ³	8.1
Calor específico J/kg K	461
Resistividad eléctrica micro ohms cm	119
Rango de fusión °C	1320-1370
Coef. de expansión térmica 20-300 °C	14.9 x 10 ⁻⁶
Resistencia a la tensión N/mm ²	550
Resistencia a la cedencia a 300 °C N/mm ²	170
Elongación (%)	30

Tabla 7. Algunas propiedades de la aleación IN601.

7.8.5.3. Inconel 718

El Inconel 718 es una aleación relativamente reciente ya que su invención data de 1959 y su uso industrial empieza alrededor de 1965. Es una aleación endurecible por precipitación, que contiene una cantidad significativa de hierro, niobio y molibdeno y menores cantidades de aluminio y titanio.

Combina resistencia a la corrosión y alta resistencia mecánica junto con una excelente soldabilidad y resistencia post-soldadura. Tiene también un buen comportamiento al forjado.

Esta aleación además tiene muy buena resistencia a la rotura a temperaturas hasta 700°C y su límite elástico es elevado y se mantiene hasta esta temperatura. Su resistencia a los choques (incluso a -40° C) y su tenacidad son bastante buenas así como su resistencia a la corrosión en caliente.

El Inconel 718 es una aleación endurecida por precipitación, aleación base níquel diseñada para desplegar un alto rendimiento excepcional, tensión y a temperaturas arriba de 704°C. El envejecido en la Aleación 718 y al soldar permite un endurecimiento espontáneo al calentar y enfriar. El Inconel 718 tiene excelente soldabilidad en aleaciones base níquel endurecidas por aluminio y titanio. Inconel 718 se usa en los artefactos y partes de avión y partes de gran velocidad como las ruedas, cubos, tornillos y pernos de alta temperatura y en turbinas de gas, motores de cohetes, aeronaves, bombas y herramiental, en la fabricación de componentes de turborreactores (discos de turbinas y ejes : piezas obtenidas por forja y después, a menudo soldadas). La aleación Inconel 718 se emplea para matrices de extrusión y contenedores en aquellos casos en los que los aceros no presentan la necesaria resistencia a la temperatura de trabajo. En la Tabla 8 se muestran algunas propiedades de esta aleación.

Propiedades de la aleación IN718	
Densidad g/cm ³	8.19
Calor específico J/kg K	435
Rango de fusión °C	1260-1336
Resistencia a la tracción MPa	800-1360
Dureza Brinell	250-410
Elongación (%)	< 15

Tabla 8. Algunas propiedades de la aleación IN718.

7.8.5.4. Waspalloy™

Waspalloy™ es una aleación base- níquel con resistencia a la temperatura alta y una excelente resistencia a la oxidación a una temperatura a 650 °C. Waspalloy™ puede ser tratado térmicamente en tres pasos: tratamiento térmico de solución, tratamiento térmico de estabilización y Envejecido.

7.8.5.5. Hastelloy X

Inconel HX, también conocido como Hastelloy X es una aleación del níquel-cromo- hierro- molibdeno con gran resistencia a la oxidación. Inconel HX se utiliza para los componentes tales como cámaras de combustión, motores de turbina de gas, ventiladores y rodillos en hornos industriales.

Inconel HX está disponible como barra, placa, hoja, alambre, y tubo. La resistencia de la oxidación de la aleación es excepcional hasta 1200° C. Para el conformado en caliente, la aleación se debe calentar a una temperatura que comienza de 1175°C. Inconel HX se puede soldar con soldadura autógena con arco.

7.8.5.6. Rene 41™

Rene 41 es una aleación níquel-cromo que contiene cobalto, molibdeno y un poco de aluminio y titanio. Rene 41 tiene una alta resistencia a la corrosión, se usa en los componentes del motor del avión tales como alabes de turbina, ruedas, trazadores de líneas de la cámara de combustión y estructura. Las formas disponibles son tubo, tubo soldado con autógena, barra, alambre, hoja, placa, forja.

7.9. Las principales fallas en los componentes de las superaleaciones

Los principales daños ocasionados por las condiciones extremas de operación a las cuales están expuestos los componentes de superaleaciones se mencionan a continuación:

- Corrosión en caliente
- Oxidación
- Sulfuración
- Erosión
- Grietas
- Reducciones en el espesor
- Daños por objetos extraños
- Degradación microestructural
- Fracturas
- Fatiga termomecánica

La Figura 14 muestra algunas fotografías de las principales fallas en los componentes de superaleaciones, una de estas fotografías muestra una degradación y daño extremos. Sin embargo, con el simple hecho de que los componentes de las superaleaciones sufran fracturas microestructurales debido a la alta presión y temperatura a las que están expuestos, son razones suficientes para que ese componente deba ser reemplazado, ya que estará limitado durante su funcionamiento.

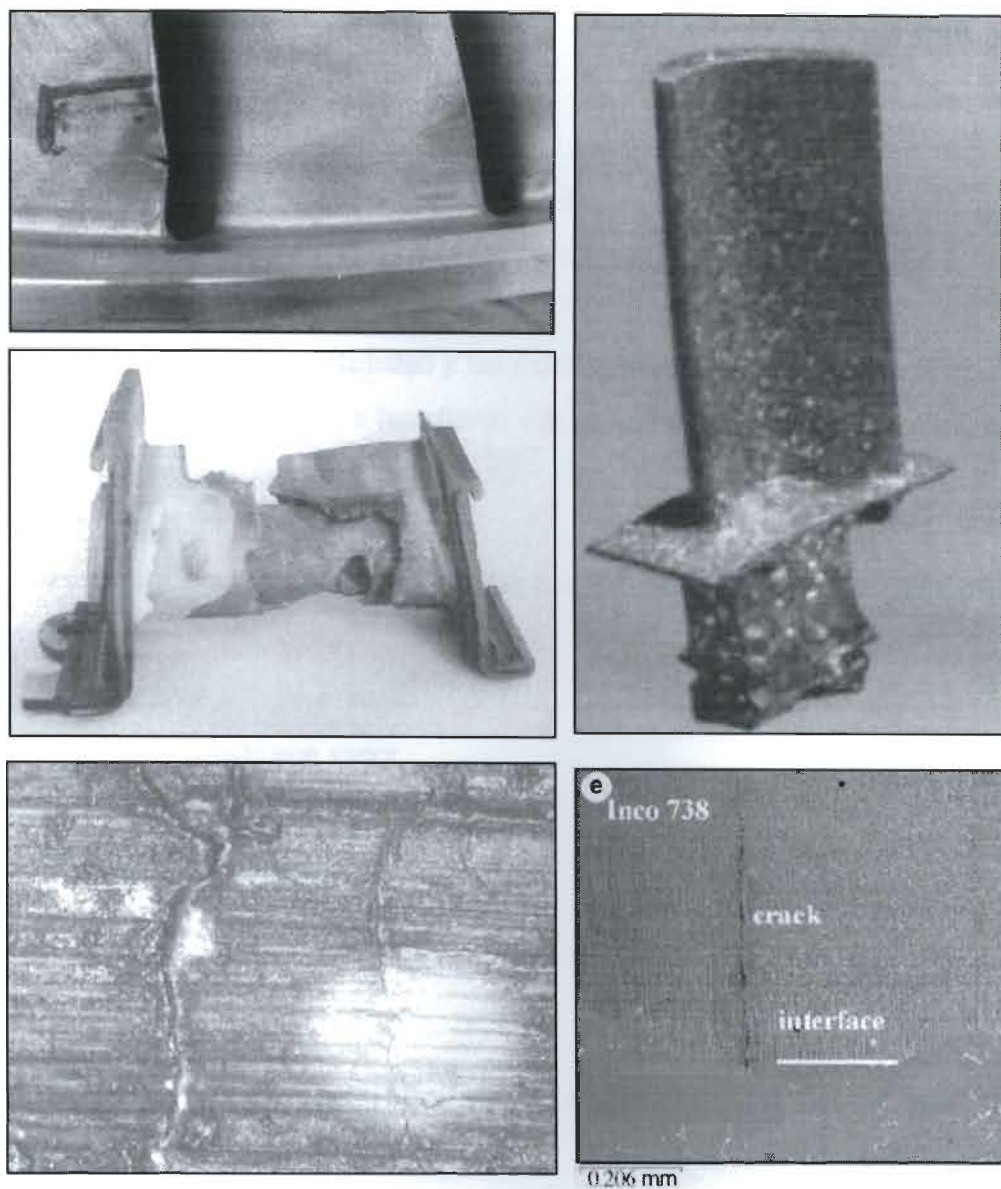


Figura 14. Daños ocasionados por las condiciones extremas de operación de los componentes.

7.10. Limpieza de componentes de superaleaciones previa a la reparación

Es indispensable que las superficies estén limpias y libres de óxidos para asegurar uniones soldadas fuertes, íntegras y de calidad uniforme.

Las grasas, los aceites, la suciedad y los óxidos evitan que el metal de aporte fluya y se adhiera de manera uniforme, e interfieren con la acción del fundente y son causantes de la formación de huecos e inclusiones.

El desengrasado generalmente se efectúa primero. Los métodos que siguen son los más comunes:

- Limpieza con disolventes.
- Desengrasado con vapor
- Limpieza alcalina
- Limpieza con emulsión
- Limpieza electrolítica

7.10.1 El papel de la condición de la superficie del metal base en el brazing

La habilidad de producir una junta brazing apropiada con la resistencia adecuada (es decir, para fallar en el metal base en lugar del metal de aporte brazing), es dependiente en muchos factores. Algunos de los parámetros bien conocidos incluyen ataque-a (limpieza de juntas), temperaturas brazing y atmósfera en el horno. A menudo ignorado es la naturaleza y calidad de las superficies de los metales base. Esto incluye la aspereza de la superficie, limpieza y la presencia de elementos como el nitrógeno, aluminio, el titanio, etc. en la superficie. Estos factores son sumamente importantes debido al efecto del flujo del brazing en el metal base y en la soldabilidad.

7.10.2 La limpieza de la superficie

Uno de los requisitos básicos para que la superficie tenga una buena condición es que la superficie debe estar libre de aceite, grasa, suciedad y otros contaminantes indeseables. Muchos de estos contaminantes pueden eliminarse con una limpieza apropiada y el proceso de desengrasado. Tricloroetileno ó fosfato de trisodium son buenos agentes quimicos conocidos para la limpieza de grasa y aceites. Sin embargo si la superficie esta oxidada, las capas del óxido no pueden quitarse fácilmente por los procesos de limpieza de solvente. En estos casos, un proceso mecánico o de limpieza químico, como el decapado con ácido, es muy deseable.

Los métodos mecánicos para la preparación de la superficie incluyen: maquinado, limado, cepillado con alambre, limpieza en tonel agitador, pulido oscilatorio y soplado. Estos métodos también pueden quitar las capas del óxido en la superficie del metal base; sin embargo, si se usan los refrigerantes durante cualquiera de estos procesos, estos deben estar libres de contaminantes. Un problema común es la presencia de silicones en los refrigerantes que dejan un residuo en la superficie del metal base. Este residuo debera ser removido dentro de las ocho horas de formación, por otra parte será muy difícil de quitar incluso con altas temperaturas de soluciones cáusticas. El residuo puede oxidar como consecuencia y forma el óxido de silicio durante el brazing en el horno, causando problemas con el flujo de metal de aporte y la humectabilidad.

Aun usando métodos mecánicos para limpieza y remoción de óxido, el soplado con óxidos como el óxido de aluminio no se recomienda. Esto causará que las partículas del óxido no metálicas se incrusten en la superficie de metal base y resultar en perdida de resistencia en la junta. Afilando, grano fino y sobreponiendo también es ejemplo de preparación de la superficie; sin embargo, éstos no pueden producir la aspereza adecuada en la superficie para la suficiente resistencia de la unión del brazing en la junta. En estos casos, deben ser empleados métodos para obtener adicional aspereza. También se usan a veces métodos de preparación de superficie como pulido oscilatorio y

procesos mecánicos de limpieza; sin embargo, éstos no proporcionan la aspereza de la superficie adecuada y son muy dependientes en el tipo de medios usado. Cerámico y medias piedras quizá también pueden dejar atrás residuos que afectan el flujo de metal de aporte, resultando pérdida de resistencia en la unión.

Al escoger los materiales de soplado, algunos expertos prefieren usar materiales fragmentados angulares comparados a los materiales esféricos. La demanda es que materiales fragmentados refuerzan la aspereza de la superficie considerando que los materiales esféricos tienden a martillar la superficie. Sin embargo varios experimentos realizados por Bob Peaslee y otros indican que ambos tipos de materiales refuerzan los esfuerzos de tensión de la superficie. Los experimentos también han mostrado que el esfuerzo de compresión en la superficie juegan un gran papel en la aspereza mejorando el flujo de metal de aporte.

Los materiales de soplado no deben ser contaminados del uso anterior. Por ejemplo, no es aconsejable usar un medio de soplado sobre superficies de aluminio antes de usar en las partes de un brazing. La intensidad del soplado también debe controlarse para que no tuerce las partes de metal delicadas o delgadas. Aun cuando mecánicamente el soplado se ha realizado seco, en algún caso el soplado se hace bajo condiciones mojadas. El soplado mojado generalmente no se recomienda; sin embargo, si se usa, subsecuentemente la limpieza y secado se requiere.

Al seleccionar un medio de soplado con arenisca, un medio similar al metal base debe usarse. Por ejemplo, el uso enfriado de arenisca de hierro colado o fragmentos de acero al carbono; templado o acero inoxidable / tiro / arenisca en aceros inoxidable; arenisca base-níquel en las aleaciones de níquel; etc. Una posible desventaja con usar el arenisca férrico en los aceros inoxidables es su tendencia a oxidar cuando está expuesto a las condiciones atmosféricas, el uso de materiales de aleación de níquel es el método más preferido en más procesos de soplado. En algunos casos, se usan medios de carburo de silicio; sin embargo, el cuidado especial debe tenerse para evitar problemas de incrustación.

7.10.3 El acabado de la superficie

Los metales de aporte brazing fluyen por el efecto capilar y este flujo capilar puede influenciarse fuertemente por el acabado de superficie del metal base en las juntas del brazing. Ni las superficies muy lisas ni muy ásperas no son buenas para la union. Un acabado de la superficie óptimo debe estar en alguna de las partes entre los dos extremos. Con las superficies pulidas muy lisas no hay bastante espacio entre las superficies de la junta ya que esta muy ajustado para que el metal de aporte fluya adecuadamente. El resultado podría ser una pérdida de resistencia en la junta. En la mayoría de los casos, un mínimo de 0.75 micras (30 micropulgadas) en el acabado de la superficie es requerido.

En los casos de horno de atmósfera protegida en brazing en aceros al carbono con cobre brazing en metales de aporte, hay aspereza de la superficie adecuada en la mayoría de las partes tubulares, superficies mecanizadas o partes de estampado. Los juntas muy ajustadas con 0.002 " (0.05 mm) los claros en el diámetro debe ser adecuado. Sin embargo, cuando usamos metales de aporte brazing en aleaciones base níquel que no son muy fluidas, juntas muy ajustadas o cero claros necesitarán alguna rugosidad, preferentemente con arenisca metálica. De hecho, los metales de aporte brazing base níquel requieren un claro específico ó adecuada rugosidad para fluir a través de la junta.

Numerosos estudios han mostrado los efectos dañinos de aspereza excesiva causados por molienda, maquinado, troquelado, el limado áspero, etc. En las superficies con un perfil muy áspero, sólo los puntos máximos están en contacto durante el brazing, causando débiles e impredecibles juntas. Propiamente para el brazing en la mayoría de los materiales, debe tener una aspereza de la superficie en 0.75 a 3.75 micras (30 a 150 micropulgadas).

7.10.4 Otros efectos en la superficie

La composición química y la historia termica de los metales base también pueden influir en las características de la superficie durante el brazing. Por ejemplo, 321 y 409 aceros inoxidable típicamente contienen el titanio para los propósitos de la estabilización. La adición de titanio previene la formación de carburos de cromo a lo largo de los límites de grano. La cantidad de titanio agregada puede variar de un calor a otro y a veces el titanio del exceso puede oxidar durante el brazing en el horno. Esto forma una capa delgada de óxido del titanio, el color que puede ir del castaño a gris a azulado. El color exacto y cantidad de capa del óxido dependen de varios factores, pero lo más importante de estas películas es que previenen el mojado y así inhiben en el brazing el flujo del metal de aporte.

Similar al titanio, otros elementos como el cromo, aluminio y circonio también tienen el potencial para formar películas de óxido en las superficies del metal base presentándose como un elemento de aleación. La formación de estas películas del óxido ocurren entre 1000 y 1700° F (535-927° C). Mientras la formación de estos óxidos no puede ser completamente eliminado, ellos que dependen de la calidad de la atmósfera del horno pueden minimizarse (el punto del rocío). También, la disociación subsecuente de estas películas del óxido dependen de la calidad de la atmósfera y la temperatura máxima del horno.

Pueden minimizarse los efectos del óxido formado por los elementos como el cromo y titanio de varias maneras. En metales base que contienen sensibles elementos como el cromo y titanio, los elementos están generalmente presentes en las capas más altas de mecanizado y en las superficies del rolado en frío, y alterara el color rápidamente en las atmósferas del horno. Las atmosferas al vacio oxidarán estos elementos menos que las atmósferas de puro hidrógeno seco, y más rápidamente las proporciones del calor tenderán a causar menos descoloramiento. Al contrario, rolado en caliente y el metal en plancha encurtido tendrá el cromo y el titanio lixiviado de la superficie, y por

consiguiente surgirá luminoso y limpio después del brazing. Las pequeñas cargas en el horno también minimizarán los problemas.

Si ninguno de las opciones anteriores por minimizar los efectos de cromo y titanio es práctico, entonces considere los metales base alternados. Por ejemplo, 304L acero inoxidable contiene el más bajo carbono, así no necesita el titanio para la estabilización. En algunos otros casos, 347 o 409 Cb que pueden usarse con los aceros inoxidable en donde el columbium es el agente estabilizador. En algunos aceros el nitrógeno puede estar presente aproximadamente 0.30%. La galvanoplastia con níquel también es un método muy eficaz de soldar metales base que contienen elementos sensibles a la oxidación como aluminio y titanio. La capa del niquelado actúa como una barrera entre el metal del aporte y el óxido que forma los elementos, habilitando el flujo de metal líquido dentro de la junta.

En conjunto, la condición de la superficie de los metales base juega un papel muy importante en la producción exitosa, de altas propiedades mecánicas en las juntas. Como mínimo, las superficies deben estar limpias y deben tener el acabado de la superficie óptimo para el flujo capilar del mojado. También, debe tenerse cuidado y prevenir la formación de películas en la superficie, o del metal base u otro componente soplado con materiales de aleación de níquel como el Arenisca de NicroBlast en una manera eficaz de preparar las superficies para un buen flujo de metal de aporte y una junta resistente.

7.11. Metales de aporte específicos usados para la reparación de componentes de superaleaciones

Algunas de las características que se deben tomar en cuenta en la selección de los mejores materiales de aporte para una aplicación específica como lo es la reparación de grietas o fracturas en la reparación de componentes de superaleaciones son: las propiedades físicas, las propiedades mecánicas que se pueden obtener después de la aplicación, la estabilidad térmica, la mojabilidad y su dependencia en la atmósfera brazing y la preparación de la preforma. Además una de las principales características de los materiales de aporte es que deben de fundir casi instantáneamente. Esta propiedad puede facilitar un período de tiempo corto para la reparación por brazing.

Muchos de las aleaciones de los metales de aporte usados en el brazing a altas temperaturas son composiciones eutécticas formadas por metales de transición tales como níquel, hierro, cromo, etc. en combinación con metaloides, tales como Si, boro y fósforo. Los materiales de aporte son por lo general en forma de polvos o sus derivados. Sin embargo actualmente es posible encontrar en el mercado diferentes presentaciones dependiendo de la aplicación.

De acuerdo a información proporcionada por algunos proveedores de metales de aporte, estos se pueden adquirir en varias presentaciones como lo son: polvos y mezclas de polvos los cuales se pueden mezclar a su vez con un aglomerante o cementos, pasta, cintas, alambres, laminas y preformas. Estas presentaciones de los materiales de aporte se diferencian entre otros aspectos en: la facilidad de aplicación, el acabado final que se desea obtener y el costo.

La revisión de la literatura y de varios proveedores recomienda el uso de materiales de aporte en pasta para un cierto tamaño de fractura o claro entre las piezas a unir. Sin embargo esta presentación del material de aporte es un poco más costoso que si se utiliza en forma de polvo con un aglomerante adicional. Por lo tanto la selección de la presentación depende de la facilidad de aplicación tanto como el costo del material.

A continuación se describen algunos de los materiales de aporte más recomendados para reparación de superaleaciones base níquel. Esta información fue proporcionada por los respectivos proveedores.

7.11.1. AMDRY Polvos de superaleación

Son polvos de superaleación base níquel o cobalto para la reparación y restauración de superficies. Están disponibles en una amplia selección de tamaños de partículas en el rango de -106 a $5\text{ }\mu\text{m}$. Estos polvos son producidos por un proceso de atomización en seco para asegurar consistencia, pureza y conformidad a especificaciones militares, aeroespaciales e industriales. Los polvos pueden mezclarse en varias relaciones con otros materiales de aporte en polvo para formar metales de aporte para rellenar amplios claros. Estas relaciones pueden ser 50/50, 60/40 y 40/60 con el otro polvo de superaleación.

Los polvos de superaleación deben mezclarse con un aglomerante, cemento o gel. Estas mezclas pueden ser convertidas en pasta o en un tipo cinta para un método de aplicación más precisa y a un costo efectivo. La composición química de estos polvos puede ser de la misma composición de la superaleación que se desea reparar por ejemplo hay polvos de aleación IN738, Rene 80, MAR-M, IN625, IN713, X-40 etc.

7.11.2. AMDRY® DF-3

AMDRY DF-3 es un polvo esférico metálico, inerte atomizado, que por medio de difusión del níquel se lleva a cabo la aleación. Fue desarrollado por Sulzer Metco para la reparación y la restauración de motores de turbina. Esta aleación tiene buen resultado en materiales base níquel y cobalto. La adición del cromo proporciona fuerza junto con resistencia a la corrosión. El desarrollo de los usos de AMDRY DF-3 comenzó con las superaleaciones usados en motores de turbina. La reparación de estos componentes requieren aleaciones brazing que estén tan cerca como sea posible a la composición de los materiales originales.

AMDRY DF-3 se puede usar para aleaciones IN939, C-263, U-500 y 754. Cuando AMDRY DF-3 se utiliza para grietas angostas, la metalurgia que resulta del componente reparado se compara favorable a la parte original.

La restauración de superficies gastadas, del reemplazo de secciones dañadas y de la reparación de grietas se puede también hacer con Rene 80, IN738 y MM 247 con resultados metalúrgicos similares. AMDRY DF-3 se puede mezclar con los polvos de la superaleación de la malla -140 + 325 para requerimientos de la grieta de 1.25 - 1.5 mm.

La Tabla 9 muestra la composición química y en la Tabla 10 se presentan algunas propiedades de este material de aporte.

Composición química (% en peso)					
Ni	Cr	Co	B	Ta	La
Bal	19.0 - 21.0	19.0 - 21.0	2.8 - 3.2	2.5 - 3.5	0.01 - 0.10

Tabla 9. Composición química típica del material de aporte AMDRY DF-3.

Propiedades	Valores
Rango nominal de tamaño	-140 + 325 malla (-105 + 45 μ m) Recomendado malla -325
Rango de fundición	Sólido: 1050° C Líquido: 1122° C
Rango de Soldadura	Típico: 1191 - 1218° C Óptimo: 1191 - 1218° C
Típico rango de abertura	0.12 - 0.1 mm (.0005 - .004")
Presentaciones	Polvo, polvo con aglomerante, mezclado con un cemento para aplicarse con una brocha o una jeringa, pasta y cinta.

Tabla 10. Propiedades de trabajo del material de aporte AMDRY DF-3.

7.11.3. AMDRY DF-4B

AMDRY DF-4B es un polvo esférico, inerte atomizado. Se desarrolló por Sulzer Metco para la reparación y restauración de artefactos de turbina. La adicción de aluminio a este metal de aporte proporciona la gamma prima fortaleciendo mientras el tantalio da el endurecimiento de la solución sólida. AMDRY DF-4B tiene cualidades no encontradas en aleaciones estándar en brazing a altas temperaturas.

La reparación de superaleaciones en componentes de turbina requiere llevar a cabo el proceso brazing con aleaciones que sean similares químicamente en composición y después en la metalurgia del brazing. AMDRY DF-4B es ideal para reparación o restauración de superaleaciones tales como René 80, René 95, IN738, IN792 y otras superaleaciones.

La adición de aluminio en aleaciones AMDRY DF-4B resulta en una aleación fluida pero más lenta, y por consiguiente conveniente para rellenar fracturas anchas o superficiales en la restauración de áreas dañadas. El mezclado de polvos de la malla -140 + 325 o -325 se usa para espesores de aberturas o claros de 1.25 - 1.5 mm (0.050" - 0.060") pero en fracturas más anchas la reparación también es posible.

La metalurgia que es el resultado del brazing al mezclar los polvos en la reparación de los componentes produce reparaciones que son competitivas en el servicio. El tratamiento térmico de difusión de este material de aporte causa migración del boro en el metal base produciendo uniones fuertes, tenaces y conveniente para cualquiera componente por brazing.

El enlace alcanzado soldando con AMDRY DF-4B excede lo posible con rociado en capas. La Tabla 11 muestra la composición química y en la Tabla 12 se presentan algunas propiedades de este material de aporte.

Composición química (% en peso)						
Ni	Cr	Co	B	Ta	Al	Y
Bal	13.0 - 15.0	9.0 - 11.0	2.5 - 3.0	2.25 - 2.75	3.25 - 3.75	0.01 - 0.1

Tabla 11. Composición química típica del material de aporte AMDRY DF-4B.

Propiedades	Valores
Rango nominal de tamaño	-140 + 325 malla (-105 + 45 μ m) Recomendado malla -325
Rango de fundición	Sólido: 1064° C Líquido: 1122° C
Rango de Brazing	Típico: 1149 - 1191° C Óptimo: 1163 - 1177° C
Típico rango de abertura	1.25 - 1.5 mm (.0005 - .004")
Presentaciones	Polvo, polvo con aglomerante, mezclado con un cemento para aplicarse con una brocha o una jeringa, pasta y cinta.

Tabla 12. Propiedades de trabajo del material de aporte AMDRY DF-4B.

Los parámetros recomendados son que el brazing requiere tiempos y temperaturas dependiendo del espesor de los componentes, la cantidad de la aleación puesta, la erosión que puede tolerarse y cualquier requerimiento sobre la temperatura de fusión. El rango de temperatura recomendado para brazing con AMDRY DF-4B es 1149 - 1191 °C. Un ciclo de difusión con un mínimo de 2 - 4 horas, a 1066 - 1122 °C se recomienda para reducir cualquier formación de cadena frágiles de los compuestos boruros. Si se requiere un tratamiento térmico adicional, se recomienda que sea por debajo de la temperatura de solidus del nuevo material.

En cuanto a las atmósferas recomendadas, el vacío es el método más común para utilizar AMDRY DF-4B. Otras atmósferas de argón o hidrógeno puro seco puede usarse,

pero no se recomienda para lograr mejores resultados en los componentes de las superaleaciones.

No se recomienda soldar con AMDRY DF-4B en una atmósfera de nitrógeno donde el boro puede reaccionar con el nitrógeno para formar el nitruro de boro, dificultando el brazing. La facilidad de mojado y difusión de la aleación, en otras atmósferas aparte de vacío, el punto del rocío debe ser -52°C o mejor. Ningún flujo se requiere con cualquiera de las atmósferas protegidas listadas anteriormente.

7.11.4. AMDRY TAPE

Es una cinta de alta temperatura para brazing, la cual fue desarrollada por Sulzer. Está compuesta de cobalto, níquel o aleaciones de cobre. Las aleaciones son mezcladas con un aglomerante y uniformemente aplicadas con un espesor específico con un plástico.

El porcentaje del aglomerante es aproximadamente 6% cediendo depósitos de cerca de 55% del espesor original. Por ejemplo, la colocación de 0.2 mm (.008") de espesor de cinta producirá aproximadamente 0.1 mm (.004") de material brazing.

Por lo tanto todas las aleaciones para brazing marca AMDRY pueden proporcionarse en forma de cinta. Sin embargo, algunas de las aleaciones más exóticas, conteniendo altos porcentajes de aluminio o titanio, el brazing no pueden llevarse a cabo con cinta.

Las principales aplicaciones en ensamblados complejos. Esta cinta puede colocarse en las uniones y se usa a menudo en otras aplicaciones como láminas grandes, tubos ensamblados y componentes como son los sellos tipo panal de abeja.

El uso de cinta brazing en esta última aplicación ha ganado considerable aceptación debido al control de peso, facilidad de colocación de la aleación y aseguramiento de que

la aleación es uniforme en el rango de aplicación. La restauración de la superficie, aumento dimensional y reparación de fracturas de los componentes del partes de avión se ha vuelto una grande aplicación para brazing con cinta.

AMDRY en cinta tiene una superficie lisa, es dúctil y en forma de rollos para facilidad de manejo. El tamaño de la cinta es especifica para la aplicación del cliente y tamaño de partes, pero debe entrar en el rango siguiente

- El espesor de la cinta debe estar entre 0.075 - 3.75 mm (0.0003" - 0.150")
- El ancho de la cinta debe estar entre 5 - 280 mm (0.200" - 11.0")

La longitud máxima de la cinta es de 60 m (200 pies) la longitud del rollo puede ser impactado por el espesor y el ancho de la cinta. No hay longitud mínima. Por ejemplo: para anchos de 0.12 x 25 mm (0.005" x 1") la cinta puede ser 30 m (100 pies) en largos rollos. 0.12 x 200 mm (0.005" x 8") la cinta tiene una longitud del rollo máxima de 15 m (50 pies), los rollos más largos también son pesados para manejarse. 0.5 x 50 mm (0.020" x .2") la cinta tiene una longitud máxima de 15 m (50 pies), los rollos largos no son estables, haciendo difícil el manejo del rollo.

El adhesivo puede aplicarse a un o ambos lados de la cinta, o puede especificarse ningún adhesivo. El mínimo espesor de la cinta con un adhesivo de respaldo es de 0.1 mm (.004"), mientras el espesor máximo es de 1.5 mm (0.060").

Algunas de las ventajas del uso de la Cinta AMDRY es una manera fácil, precisa y económica de aplicar el metal de aporte para el brazing. La tolerancia en las dimensiones de la cinta se controla cerradamente durante la fabricación para asegurar la cantidad de la aleación puesta en la unión sea consistente. La cinta se provee al tamaño exacto requerido, se elimina desperdicio y costo.

Usar AMDRY Brazing en Cinta puede acortar horas de labor asociada con costos cuando se compara a otras aplicaciones intensivas más laboriosas.

Los requisitos del almacenamiento son que la cinta tiene 12 meses de vida de la fecha de fabricación cuando se almacena apropiadamente. La cinta debe guardarse bajo condiciones controladas en un paquete sellado para prevenir el secado prematuro.

Las temperaturas de almacenaje deben conservarse entre 7 y 24° C. El envejecimiento prematuro de la cinta puede ocurrir si se expone a temperaturas elevadas durante el almacenamiento, causando que la cinta pueda ser frágil o el adhesivo perder su pegajosidad.

En cuanto a la vaporización, se fija un tiempo de sostenimiento durante el ciclo de brazing para ayudar a volatilizar los solventes y orgánicos. Se sugiere sostener la temperatura entre 426 - 537° C . La longitud promedio de tiempo del sostenimiento debe ser 15 - 20 minutos, sin embargo, el tiempo del sostenimiento puede variar basado en la cantidad del brazing en los materiales en la carga del horno. El nivel del vacío deseado para el ciclo brazing debe recobrase después del desgasificado y sostener de a 5 - 10 minutos para asegurar la remoción de los orgánicos.

Como ya se mencionó cualquier material de aporte de superaleación puede suministrarse en forma de cinta. Estos materiales de aporte pueden ser disponibles en preformas, la cual es diseñada de acuerdo al área donde se requiera llevar a cabo el brazing. De esta manera se reduce la labor y el desperdicio. Las preformas son fáciles para aplicar y pueden ser de un espesor de 1.0 mm o sin adhesivo de 2.5 mm. También el usuario puede requerir preformas específicas.

7.11.5. AMDRY BRB

El enlace alcanzado soldando con AMDRY BRB excede lo posible con rociado en capas. La Tabla 13 muestra la composición química de este material de aporte. La temperatura de este material es de solidus 1055 °C y liquidus 1120 °C y el rango de temperatura para el brazing es de 1175 a 1230 °C.

Composición química (% en peso)				
Ni	Cr	Co	B	Al
70	14	9	2.5	4

Tabla 13. Composición química típica del material de aporte AMDRY BRB.

Algunas propiedades y aplicaciones de este material de aporte son que se usan para llenado de grietas y restauración superficial en elementos de superaleaciones en componentes de turbina. BRB se puede mezclar con superaleaciones en polvo para llenar boquetes o amplias grietas. Aunque una relación de 50/50 es bastante estándar para la difusión activada por brazing en el material y el polvo de superaleación, la relación real dependerá de la aplicación de temperatura brazing y requerimientos del servicio. Este material de aporte para brazing también puede suministrarse en forma de pasta.

7.11.6. AMDRY 103

La Tabla 14 muestra la composición química de este material de aporte. Este material de aporte es en forma de polvo con tamaño de partícula de $-125 + 45 \mu\text{m}$ es decir de la malla $-100 + 325$, la morfología es esferoidal. La temperatura de este material es de solidus 1080°C y liquidus 1135°C y el rango de temperatura para el brazing es de 1165 a 1205°C . El tamaño de abertura recomendado para este material es de 0.1 mm a 0.25 mm . La resistencia y ductilidad de la unión son buenas y la viscosidad es lenta.

Composición química (% en peso)			
Ni	Cr	Si	B
Bal	17	9.2	0.1

Tabla 14. Composición química típica del material de aporte AMDRY 103.

Algunas propiedades y aplicaciones de este material de aporte son que se usan para llenado de grietas de amplio claro diseñado para claros de unión de $0.10 - 0.255 \text{ mm}$ por

lado. Diseñado para uso en superaleaciones y aceros inoxidables en temperaturas de servicio de 1038 °C. Tiene buena resistencia a la oxidación y corrosión y es adecuado para componentes de pared delgada y aplicaciones para sellos tipo panal de abeja donde no se tolera la erosión.

7.11.7. AMDRY B-93

La Tabla 15 muestra la composición química de este material de aporte. Este material de aporte es en forma de polvo con tamaño de partícula de $-125 + 45 \mu\text{m}$ es decir de la malla $-120 + 325$, la morfología es esferoidal. La temperatura de este material es de solidus 1095 °C y liquidus 1210 °C y el rango de temperatura para el brazing es de 1190 a 1225 °C. El tamaño de abertura recomendado para este material es de 0.0125 mm a 0.1 mm. La resistencia y ductilidad de la unión son excelentes y la viscosidad es estándar.

Composición química (% en peso)							
Ni	Cr	Co	Ti	W	Mo	Si	B
Bal	14	9.5	4.9	4	4	4.5	0.7

Tabla 15. Composición química típica del material de aporte AMDRY B-93

Algunas propiedades y aplicaciones de este material de aporte son que las temperaturas de servicio son arriba de 982 °C. Es adecuado para el brazing al vacío de superaleaciones tales como Hastelloy donde la ductilidad de la unión no es un problema.

Los claros de unión son entre 0.0127 – 0.050 mm. La forma es en polvo pero se puede adquirir en pasta.

7.11.8. AMDRY DF-5

La Tabla 16 muestra la composición química de este material de aporte. Este material de aporte es en forma de polvo con tamaño de partícula de $-105 + 45 \mu\text{m}$ es decir de malla $-140 + 325$, la morfología es esferoidal. La temperatura de este material

es de solidus 1080 °C y liquidus 1155 °C y el rango de temperatura para el brazing es de 1175 a 1220 °C. El tamaño de abertura recomendado para este material es de 0.25 mm a 1 mm. La resistencia de la unión es excelente y la ductilidad es buena. La viscosidad es lenta.

Composición química (% en peso)					
Ni	Cr	Al	Ta	B	Y
Bal	13.5	4	3	2.8	0.02

Tabla 16. Composición química típica del material de aporte AMDRY DF-5

Algunas propiedades y aplicaciones de este material de aporte son que en el rango de temperatura media, este material es excelente para reparación y restauración de aleaciones endurecidas por precipitación tales como IN713 e IN718. El aluminio se adiciona para endurecer por la precipitación de la fase γ' . Este material se puede adquirir en forma de polvo o pasta.

7.11.9. Nicobraz 160

Nicobraz 160 es un metal de aporte desarrollado por Wallcolmonoy con un propósito especial designado a proveer ductilidad, maquinabilidad y relativa baja dureza. Trabaja muy bien en claros de .010 (.25 mm) y es ideal para aplicaciones donde se requiere buena maquinabilidad.

Nicrobraz 160 provee buenas y fuertes uniones en situaciones donde el uso es indicado. Uniones fuertes son inversamente proporcionales a los claros de las uniones. La Tabla 17 muestra la composición química de este material de aporte. Las temperaturas de este material son de: solidus 970°C y liquidus 1160°C.

Composición química (% en peso)					
Ni	Cr	B	Si	Fe	C
Bal	11.0	2.25	3.5	3.5	.5

Tabla 17. Composición química típica del material de aporte Nicrobraz 160.

La dureza en la junta de brazing es siempre menor que la dureza del metal de aporte. Esta propiedad en la unión dependerá sobre la composición del metal base, separación de la unión, temperatura del brazing, y tiempo de exposición al calor, estando entre una microdureza de 150 a 400.

Las características de la capilaridad del flujo son un buen flujo a través de uniones cortas las cuales están dadas por separaciones de .005" a .010" (.12 mm to .25 mm).

Temperatura de fusión en la unión: La solución y la difusión de la fase sólida entre el brazing del metal de aporte y el metal base produce una nueva aleación con un alto punto de fusión mas que el original metal de aporte por el brazing. La actual temperatura de fusión depende sobre ambos el ciclo del brazing y el claro de la unión.

La ductilidad y la fuerza de la unión: Una propiedad del brazing en aceros inoxidables auténticos y metales base no endurecibles, la fuerza de la unión será alta mas que el rendimiento del metal base en el cuarto a elevada temperatura. Se requiere el diseño de los datos, la fuerza de la unión deberá figurar desde el metal base y metal de aporte en el diseño. Si el dato a temperatura elevada o criogénica es requerido, deberá figurar en temperatura de prueba. La mas fiable prueba para un propósito general son la tensión a la ruptura o simulada por una prueba de servicio.

El procedimiento para evaluar pruebas de fuerza o uniones por brazing de acuerdo a la American Welding Society (AWS C3.2) es recomendada para control y evaluación de calidad de parámetros de brazing.

La resistencia a la oxidación es buena a temperaturas de 925°C para mejores aplicaciones; sobre este rango la vida de servicio se acorta. La hoja técnica esta basada en la prueba de brazing en inconel expuesto al aire por 500 horas.

La resistencia a la corrosión en la junta es buena dependiendo del ciclo de brazing sobre el metal base. Pruebas específicas deberán ser conducidas en críticas aplicaciones.

El proceso brazing con este material: el metal de aporte es usualmente proporcionado en forma de polvo. Para facilitar la aplicación el polvo es normalmente mezclado, por el usuario, con uno o dos tipos de aglomerantes o vehículos disponibles desde la pared. El metal de aporte es aplicado en la superficie con una brocha, cono, o jeringa. Y puede ser mezclado con cemento de Nicobraz, cual es un líquido base plástico. En otros casos el metal de aporte podría aplicarse con una pistola de aire. El polvo puede mezclarse también con Cemento S, que es un material en gel base agua. En todos los casos, el vehículo o aglomerante deberá permitir secar con calor antes de su aplicación.

Para el brazing en horno se debe considerar la temperatura en un rango de 1150 a 1205 °C. Si se requiere máximo fluido, esfuerzo y ductilidad en la junta, el brazing deberá realizarse en el rango alto. Para una mínima difusión y erosión, el brazing deberá realizarse en el rango bajo, calentando y enfriando el ensamble rápidamente es posible sin producir distorsión.

Este material de aporte puede trabajar en atmósferas de hidrogeno puro seco, gases inertes con punto de rocío de -51°C y es altamente recomendado usarse en vacío. Esta protección de atmósferas promete excelente mojado y buena difusión del brazing del metal de aporte sobre el metal base.

El uso de este material en brazing con antorcha, calor por inducción, o métodos de calentamiento por flama requiere el uso de flux. Wallcolmonoy proporciona Nicrobraz Flux para protección contra formación de óxido para estas aplicaciones.

Recomendaciones de uso:

1. Para operación de servicio a altas temperaturas y para juntas que requieran buena resistencia a la oxidación y a la corrosión.

2. Para usa en ensambles de brazing donde las juntas requieren ser maquinadas.
3. Produce fuertes filets, y juntas en T en metales base de largas secciones.
4. Efectivos filets en juntas con claros desde .005" a .010" (0.13 mm a 0.25 mm) son posibles por el extenso rango de fusión del material.

7.11.10. Nicobraz 170

Nicobraz 170 es un metal de aporte para brazing de varilla de tungsteno al níquel-cromo-boro ideal para satisfacer el uso con cobalto, el tungsteno y varillas de molibdeno metal base. Provee juntas con buena ductilidad y muy alta fuerza, ambos en temperatura al vacío y elevadas temperaturas. Las juntas producidas son ideales para usarse en temperaturas arriba de 1095 °C. En resumen, las juntas son capaces de resistir aún mas altas temperaturas, arriba de 1205 °C, con tal de que el proceso sea más intermitente que continuo.

Las formas disponibles en stock son polvo de la malla -140, el cual es mezclado con Cemento Nicobraz al aplicar.

Disponible en Orden: Polvo en suspensión para usar en aplicación de Nicobraz, láminas, cinta y en pasta. El rango de temperatura de este material es de: solidus 970°C y liquidus 1105°C. La temperatura recomendada para el brazing es de 1150 °C a 1205 °C. En la Tabla 18 se muestra la composición química estándar de esta aleación.

Composición química (% en peso)						
Ni	Cr	B	Si	Fe	W	C
Bal	12.0	2.25	3.5	3.5	16.0	0.5

Tabla 18. Composición química típica del material de aporte Nicobraz 170.

La dureza en la junta de brazing es siempre menor que la dureza del metal de aporte. Esta propiedad dependerá de la composición del metal base, separación de la unión,

temperatura del brazing, y tiempo de exposición al calor, estando entre una microdureza de 190 a 550 kn.

Características de la capilaridad del flujo: Fluirá libremente a través de empalmes arriba de 0.25" (6.35 mm) con claros largos de .0004" a 0.010" (0.10 a 0.25 mm).

Temperatura de Fusión en la junta: La solución y difusión de la fase sólida entre el brazing del metal de aporte y metal base produce una nueva aleación con un alto punto de fusión mas que el original brazing del metal de aporte. La actual fusión de temperatura depende sobre ambos el ciclo de brazing y los claros de la junta.

La ductilidad y la fuerza de la unión: Una propiedad del brazing en aceros inoxidable auténticos y metales base no endurecibles, la fuerza de la unión será alta mas que el rendimiento del metal base en el horno a elevada temperatura. También la fuerza y ductilidad de la junta deberá ser suficiente a resistir la fatiga térmica y mecánica al esfuerzo.

La dureza del metal base en la fuerza de la junta es ampliamente variable dependiendo de la composición del metal base, diseño de la junta y operación del brazing. En algunos casos las pruebas son necesarias.

Resistencia a la oxidación: Para muchas aplicaciones es buena por encima de 1205°C. Aún superior donde el servicio de vida requerido es corto. Estos datos son basados en pruebas de inconel expuestos en aire por 500 horas.

La resistencia a la oxidación de la unión es buena en muchos medios, dependiendo del metal base y el ciclo de brazing. Sin embargo se deben realizar pruebas específicas para aplicaciones críticas.

El brazing se lleva a cabo con este material de aporte en forma de polvo, el cual normalmente es mezclado con Cemento Microbraz, con un aglomerante base polímeros líquido, y es aplicado con una brocha, cono y otros medios apropiados.

Todos los metales de aporte Nicrobraz son disponibles en suspensión y sustancias de gel para usarse con aplicadores tipo pistola.

Para el brazing en horno considerar la temperatura de brazing en un ciclo de 1150 a 1205°C. Para máximo fluido, esfuerzo y ductilidad en la junta, el brazing deberá realizarse en el rango alto. Para mínima difusión y erosión, el brazing deberá realizarse en el rango bajo, y calentando y enfriando en el ensamble rápidamente es posible sin producir distorsión.

Este material de aporte se puede utilizar en atmósferas de hidrogeno puro seco, gases inertes, pero es recomendado para usarse en vacío. Esta protección de atmósferas promete excelente mojado y buena difusión del brazing del metal de aporte sobre el metal base.

Algunas recomendaciones de uso: es un metal de aporte ideal para misiles, cohetes, y componentes de motores a reacción hechos de cobalto, tungsteno y molibdeno de metales base. Provee juntas de muy alta esfuerzo para altas temperaturas de servicio. Es también excelente para aplicaciones donde se requieran juntas con superior resistencia a la oxidación a altas temperaturas.

Algunos ejemplos de uso son en cohetes de la primera fase, rotores, turbinas y acero inoxidable.

7.11.11. Nicrobraz 171

Es un metal de aporte diseñado para proveer uniones de superior resistencia, especialmente para aplicaciones donde el claro muy cerrado no es posible. Es un metal de aporte base níquel, cromo y boro idealmente adecuado para usar con metales base de cobalto, tungsteno y molibdeno. Resulta en uniones con buena ductilidad y muy alta resistencia a temperatura ambiente y a elevada temperatura. Las uniones producidas

son ideales para usarse en temperaturas continuas arriba de 1093 °C y para estar en servicio a temperaturas por encima de 1204 °C. Se producen buenas uniones con claros de 0.10 a 0.25 mm (0.004 a 0.10 pulg.) por lado.

Las formas disponibles de este material de aporte es en polvo donde para la aplicación es necesario mezclarlo con un cemento. Otra forma disponible es en pasta, cinta, láminas (polvo unido a un plástico) y polvo suspendido en un aglomerante. La Tabla 19 muestra la composición química de este material de aporte.

Composición química (% en peso)						
Ni	Cr	C	B	Si	Fe	W
Bal	10	0.4	2.5	3.5	3.5	12.0

Tabla 19. Composición química típica del material de aporte Nicrobraz 171.

La temperatura de solidus de este material es 970 °C y la de liquidus 1093 °C. El rango de temperatura para brazing es de 1121 a 1205 °C.

Algunas propiedades físicas es la microdureza knoop que se adquiere en la unión es de 190 a 550. Las características de flujo por capilaridad son buenas en empalmes de 6.35 mm donde los claros son de 0.10 a 2.0 mm. Este material de aporte es especialmente formulado para proveer grandes ensamblados y aleaciones gruesas.

En cuanto a la resistencia de la unión y ductilidad es apropiado para el brazing de acero inoxidable austenítico y metales base no endurecibles. La resistencia de la unión podría ser más alta que la cedencia del metal base a temperatura ambiente y elevada. En metales base endurecibles, la resistencia de la unión es ampliamente variables dependiendo de la composición, el diseño y la operación del brazing. En muchos casos se requieren realizar pruebas preliminares.

La resistencia a la oxidación de este material de aporte es excelente a 1093 °C para muchas aplicaciones y más alta donde la vida de servicio es más corta. Estos datos

fueron de pruebas realizadas a probetas de Hastelloy X expuestas en aire a 500 horas. La resistencia de la unión es satisfactoria en NaK y agua a alta temperatura.

La manera de llevar a cabo el brazing con este material de aporte es que la temperatura se considera en el rango de 1121 a 1204 °C. Para un flujo máximo, resistencia y ductilidad de la unión el brazing se debe llevar a cabo a la temperatura del límite superior. En contraste para el mínimo de difusión y erosión llevar el brazing a la temperatura del límite inferior. El calentamiento y enfriamiento deben llevarse a cabo tan rápido como sea posible para no producir distorsión.

Las atmósferas recomendadas son las mismas que el material de aporte microbraz 170 descrito anteriormente. Al igual que las diferentes presentaciones del material.

8.

CONCLUSIONES

La selección del mejor material de aporte para una aplicación específica, como lo es la reparación de grietas o fracturas en la reparación de componentes de superaleaciones, depende en gran medida de las propiedades físicas y mecánicas que se desean obtener después de la aplicación. Adicionalmente también se deben tomar en cuenta la estabilidad térmica y la mojabilidad durante el proceso brazing así como el acabado final que se obtendrá al término del proceso. Un parámetro muy importante que debe ser considerado es el tamaño de abertura o claro para el cual es recomendado un cierto material de aporte, ya que de eso dependerá que se lleve a cabo bien la reparación.

Los componentes de superaleaciones base níquel por lo general presentan tamaños de grietas de tamaño superior que los tamaños de aberturas para los cuales los proveedores recomiendan un cierto material de aporte y el cual puede ser proveído en varias presentaciones. Sin embargo, de la literatura obtenida en este documento se puede concluir que la reparación de este tipo de fracturas en los componentes, los materiales de aporte que pueden dar los mejores resultados son en forma de mezclas de polvos en varias relaciones de dos superaleaciones los cuales pueden también ser mezclados a su vez con un agente aglomerante. La presentación de un material de aporte en forma de pasta da muy buenos resultados y es fácil de aplicar, sin embargo se tiene que considerar que la utilización del material de aporte en esta presentación es más costosa que usar la presentación de polvo. Esta última aplicación se dificulta más durante el brazing.

Independientemente de la presentación, muchos de las aleaciones de los metales de aporte usados en el brazing a altas temperaturas son composiciones eutécticas formadas por metales de transición tales como níquel, hierro, cromo, etc. en combinación con metaloides, tales como silicio y boro. Durante el ciclo térmico de brazing estos elementos formarán compuestos intermetálicos en la unión los cuales dependiendo de la cantidad y la distribución después de la solidificación podrían afectar las propiedades mecánicas en la reparación final. Por lo tanto para la selección del mejor material de aporte tiene que considerarse tanto la composición química del material de aporte como también la composición química del metal base.

Finalmente la información proporcionada en este documento es meramente de la literatura. Para poder tener una estimación cuantitativa de que material de aporte es mejor se recomienda en un futuro poder llevar acabo experimentación de varios materiales de aporte en la reparación de componentes de superaleaciones a través del proceso brazing.

9.

BIBLIOGRAFÍA

1. David LeRoy Olson et. al. ASM Handbook Vol. 6. Welding, Brazing and Soldering. 1993.
2. H. D. Solomon, R. E. Delair, and J. Thyssen. The High-Temperature Wetting Balance and the Influence of Grit Blasting on Brazing of IN718.
3. N.P. Wikstrom, O.A. Ojo, M.C. Chaturvedi. Influence of process parameters on microstructure of transient liquid phase bonded Inconel 738LC superalloy with Amdry DF-3 interlayer. Materials Science and Engineering. A Vol. 417. 2006. 299-306.
4. AMDRY® DF-3 Nickel Activated Diffusion Alloy Powder Technical Bulletin #10-617 by Sulzer Metco.
5. AMDRY® DF-4B Nickel Activated Diffusion Alloy Powder Technical Bulletin #10-618 by Sulzer Metco.
6. AMDRY® Superalloy Powders Technical Bulletin #10-605 by Sulzer Metco.
7. AMDRY® Tape High Temperature Braze Tape Technical Bulletin #10-622 by Sulzer Metco.
8. NICROBRAZ Technical Data Sheets by Wallcolmonoy industries.
9. C. Barbosa. et al. Microstructural aspects of the failure analysis of nickel base superalloys components. Engineering failure analysis 12. 2005. 348-361.

10. F. Tancrét, H.K.D.H. Bhadeshia and D.J.C. MacKay. "Design of a creep resistant nickel base superalloy for power plant applications". Artículo en extenso. Universidad de Cambridge
11. M.H. van de Voorde; W. Betteridge. "High-temperature materials and industrial applications". Commision of the European Communities. Luxemburgo. 1983.
12. W. Betteridge "Iron,Nickel and Cobalt based superalloys and Heat Resistant Alloys" en "Constitution and Properties of Steels". F.B.Pickering(Ed). VCH.Weinheim.1992, 641- 692.
13. E. Otero; A.Pardo; F.J.Pérez; J.F.Alvarez."Advances in Hot Corrosion Research of Ni-Base Superalloys". Trends in Corrosion Research. Vol I. National Research Council India. 1993, 123-143.
14. G.Y . LAI "High Temperature Corrosion of Engineering Alloys". ASM International. EEUU. 1990.
15. W. Z. Friend. "Corrosion of Nickel and Nickel-Base Alloys". Capítulo 2. John Wiley&Sons. 1980.
16. G.F. Van Der Voort. " Metallography: principles and practice". Mc Graw-Hill. N.Y .1984. p. 242.
17. E. Gmelin; ST.M. Sarge. Pure & Appl. Chem. 67. 1995, 1789-1800.
18. AWS, Brazing Manual, 3rd ed. (Miami:AWS, 1976), p. 15.
19. AWS, Brazing Handbook, 4th ed. (Miami:AWS, 1991), p. 35.
20. Elements of Physical Metallurgy, 2nd ed. (MA:Addison-Wesley, 1959), p. 135.

10.

LISTADO DE TABLAS

No. de Tabla	Título	Página
Tabla 1.	Metales de aporte comunes usados en la soldadura brazing y metales base sobre los que se usan.....	23
Tabla 2.	Rango de temperatura en metales de aporte base níquel.....	30
Tabla 3.	Metales de aporte base níquel.....	31
Tabla 4.	Principales superaleaciones del metal base y las diferentes presentaciones por las cuales se pueden obtener.....	42
Tabla 5.	Composiciones químicas estándar de las superaleaciones base níquel.....	43
Tabla 6.	Algunas propiedades de la aleación IN738.....	46
Tabla 7.	Algunas propiedades de la aleación IN601.....	47
Tabla 8.	Algunas propiedades de la aleación IN718.....	48
Tabla 9.	Composición química típica del material de aporte AMDRY DF-3.	60
Tabla 10.	Propiedades de trabajo del material de aporte AMDRY DF-3.....	60
Tabla 11.	Composición química típica del material de aporte AMDRY DF-4B.....	62
Tabla 12.	Propiedades de trabajo del material de aporte AMDRY DF-4B.....	62

No. de Tabla	Título	Página
Tabla 13.	Composición química típica del material de aporte AMDRY BRB.	66
Tabla 14.	Composición química típica del material de aporte AMDRY 103...	66
Tabla 15.	Composición química típica del material de aporte AMDRY B-93.	67
Tabla 16.	Composición química típica del material de aporte AMDRY DF-5	68
Tabla 17.	Composición química típica del material de aporte Microbraz 160..	69
Tabla 18.	Composición química típica del material de aporte Microbraz 170..	71
Tabla 19.	Composición química típica del material de aporte Microbraz 171..	74

11.

LISTADO DE FIGURAS

No. de Figura	Título	Página
Figura 1	Unión de metales base por el proceso brazing.....	10
Figura 2.	Principio de operación del Brazing.....	10
Figura 3.	Apariencia de las uniones por brazing en comparación con dos piezas soldadas.....	11
Figura 4.	Resistencia de la unión como una función de la separación....	14
Figura 5.	Ejemplo de los espesores de las secciones a unir por brazing...	18
Figura 6.	Configuraciones de unión por el proceso brazing.....	18
Figura 7.	Temperaturas de Fundición Brazing en materiales.....	19
Figura 8.	Aplicación de pasta para soldadura brazing a una unión mediante un aplicador.....	25

No. de Figura	Título	Página
Figura 9.	Varias técnicas para aplicar metal de aporte en la soldadura por brazing: (a) soplete y varilla de aporte, (b) anillo de metal de aporte en la entrada de la separación y (c) hoja de metal de aporte entre las superficies de partes planas. Secuencia: (1) antes y (2) después.....	26
Figura 10.	La resistencia a la cedencia de una aleación particular conteniendo solamente 20 % de γ' . Notar como la resistencia es al inicio insensible a la temperatura.....	38
Figura 11.	Efectos de los elementos de aleación de las superaleaciones base níquel. La "M" en la fase $M_{23}C_6$ corresponde a una mezcla de átomos metálicos.....	41
Figura 12.	Distribución de fases γ' con los tratamientos térmicos.....	44
Figura 13.	Microestructuras de aleaciones que han sido tratadas térmicamente.....	45
Figura 14.	Daños ocasionados por las condiciones extremas de operación de los componentes.....	51

12.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Autor de la monografía: Julio Cesar Jasso Zavala

Lic. En Sistemas Computacionales Administrativos
Universidad Autónoma de Coahuila

Lugar y fecha de nacimiento: 27 de Abril de 1963, San Luis Potosí S.L.P.

Monografía: Materiales de aporte para la recuperación de componentes de superaleaciones base níquel mediante el proceso brazing.

En opción como: Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial

Escolaridad: Lic. En Sistemas Computacionales Administrativos

Diplomado en Elaboración de Planes y Programas de Estudio Basados en Competencias Profesionales. Coordinación Universidades Politécnicas Cd. México

Diplomado en Actualización Docente. ITESM

Diplomado en Modelos Educativos Centrados en el Aprendizaje. UPN

Diplomado en Habilidades Gerenciales. ITESM

Diplomado en Ingeniería de la Soldadura. COMIMSA

Certificado de Competencia Laboral en Impartición de Cursos de Capacitación.
CONOCER

Formación de Instructores UTA

Certificación de la Universidad de Ricks en Norma ANSI/AWS D1.1

Curso para Calificación de Soldadores COMIMSA

Soldadura Especializada. Universidad de Ricks College / Benemérito de las Américas

Soldadura Especializada Centro de Capacitación para el Trabajo No. 1 Cd. México

Experiencia Profesional:

Universidad Tecnológica de Torreón

Septiembre 2003 a la fecha

Profesor de Tiempo Completo, tutor de grupo, administrador del taller de soldadura, vinculación con las empresas y organismos (convenios, donaciones).

Impartiendo las materias de Estructura y Propiedades de los Materiales, Informática I, II, Formación Sociocultural Empresarial I, II, Autocad, Diplomados y Cursos de Soldadura.

Jefe de Departamento de Prácticas y Estadía

Universidad Tecnológica de Torreón

Dic 2000 / Ago 2003

Coordinador de Vinculación de Prácticas y Estadía
Universidad Tecnológica de Torreón
Sep 1999 / Dic 2000

Gerente de Informática
Informática Aplicada

Carpintero
Negocio Propio

Operador de Transmisiones
Comercializadora Plus

Responsable del Sistema de Liquidaciones
Pepsi Cola Agral de la Laguna

Administrador del Sistema de Computo
I.N.E.G.I. SLP
Sep 1986 / Jul 1989