ISMMM

INSTITUTO SUPERIOR
MINEROMETALÚRGICODEMOA
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE UNIONES SOLDADAS DISÍMILES MEDIANTE EXPLOSIÓN

En opción al título de

Ingeniero Metalúrgico y de Materiales

Luis Mario Feliú Torres

Curso 2016-2017

"Año 59 de la Revolución"

ISMMM

INSTITUTO SUPERIOR
MINEROMETALÚRGICODEMOA
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al título de

Ingeniero Metalúrgico y de Materiales

CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE UNIONES SOLDADAS DISÍMILES MEDIANTE EXPLOSIÓN

Autor: Luis Mario Feliú Torres

Tutor (es): Dr. C. Isnel Rodríguez González

Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié

Curso 2016-2017

"Año 59 de la Revolución"

RESUMEN

Esta investigación se estableció en la caracterización microestructural por el proceso de uniones soldadas por explosivo de materiales disimiles aluminio y cobre, para lo que fue preparada las muestras con los diferentes materiales. La soldadura por explosivos ha sido explotada, con éxito, en chapas metálicas, para la construcción de accesorios de la transmisión de energía eléctrica. En la realización de la investigación, se consideró una velocidad de detonación de 2 500 m/s, un radio de la carga de 1 437 kg y una velocidad de colisión de 7, todo ello con un volumen de explosión de 18 000 cm^3 y una densidad de 1,15 g/cm^3, los parámetros que aseguran el flujo plástico para lograr la unión metalúrgica de las aleaciones estudiadas. En la zona se ha generado una microestructura recristalizada con un tamaño de grano fino, compuesta por precipitados, así como por segregaciones dendríticas en ambas en la interfase. El comportamiento de la dureza en las muestras tratadas, donde se observa un incremento de la dureza en la interfase de 149,08 HV, para el aluminio y de 144,87 HV, para el cobre. El impacto económico para el proceso es 8,39 y 5,37 CUP+CUC de la TAZA.

ABSTRACT

In this research, the microstructural characterization, by the process of welded joints by explosive of dissimilar materials aluminum and copper, was established, for that, the samples with the different materials were prepared. Explosive soldering has been successfully used in sheet metal for the construction of accessories of transmission of electric power. The parameters employed were the detonation speed (2 500 m/s), the load radius of 1 437 kg and a collision speed of 7 m/s, explosion volume of 18 000 cm^3, the Density of 1,15 g/cm^3, parameters that ensure the plastic flow to achieve the metallurgical bond of the studied alloys. It was evidenced that the re-crystallized microstructure has a fine grain size, compound for precipitated, with dendritic segregations in both in the interface. The hardness behavior in the treated samples showed an increase of the mentioned hardness at the interface with value HV 149,08 for the aluminium and HV 144,87 for copper. The economic impact for the process is 8,39 and 5,37 CUP+CUC.

Declaración de autoridad

Yo: Luis Mario Feliú Torres

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Estudiante: Luis Mario Feliú Torres

Dr. C. Isnel Rodríguez Gonzáles

Dr. C. Tomas H. Fernandez Columbie.

Ms. C. Junior Correa Cala.

Agradecimientos:

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.

A mis tutores por confiar en mí en la realizacion de este trabajo, el Dr.C. Tomás Fernández Columbié y el Dr.C. Isnel Rodríguez Gonzales.

A mis padres, María del Carmen y Mario Feliú Rosado, por exhortarme todos los días a la realización de la tesis.

A mi hermana Luisa María Feliú Torres por ser mi guía inspiradora, mi luz, mi ejemplo.

A mis amistades que siempre creyeron en mi.

A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realizacion de este trabajo.

A la revolución, por darme la oportunidad de convertirme en profesional.

A todos "Muchas Gracias".

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN 4

Introducción 4

1.1. Procesos de transmisión de energía 4

1.1.1. Instalaciones eléctricas de baja tensión 5

1.1.2. Suministros en media tensión 6

1.2. Accesorios empleados para los procesos de transmisión de energía 7

1.3. Materiales empleados en la transmisión de energía eléctrica 8

1.4. Obtención de piezas por procesos de soldadura 9

1.5. Método de soldadura con el uso de explosivos 10

1.5.1. Proceso físico del proceso de soldadura por explosión 13

1.5.2. Velocidad de detonación 15

1.5.3. Mecanismos de la soldadura por explosivo 17

1.6. Aspectos metalúrgicos de la soldadura por explosión 18

1.7. Conclusiones del capítulo 21

CAPÍTULO 2. MÉTODOS, MATERIALES Y CONDICIONES DE OPERACIÓN 22

Introducción 22

2.1. Materiales explosivos empleados 22

2.2. Composición química de los materiales empleados 23

2.3. Parámetros de trabajo en los procesos de soldadura por explosivos 24

2.4. Determinación de los parámetros de soldadura por explosivos 26

2.4.1. Cálculo de la velocidad de impacto 27

2.4.2. Velocidad de detonación 28

2.4.3. Determinación del ángulo de colisión 28

2.4.4. Energía cinética del explosivo 29

2.4.5. Temperatura de separación 29

2.4.6. Determinación de la temperatura de separación 30

2.4.7. Separación o distancia entre placas 31

2.4.8. Velocidad de la placa volante 31

2.4.9. Diseño de experimentos 33

2.5. Preparación para la observación metalográfica 34

2.5.1. Montaje de la muestra 34

2.5.2. Desbaste 35

2.5.3. Pulido fino 36

2.5.4. Ataque químico 37

2.5.5. Examen metalográfico 38

2.6. Ensayo microestructural 39

2.7. Determinación de la microdureza 40

2.8. Conclusiones del capítulo 41

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS 42

Introducción 42

3.1. Determinación de los parámetros de soldadura por explosivos 42

3.2. Cálculo de la velocidad de impacto 43

3.3. Ángulo de colisión 44

3.4. Energía cinética del explosivo 44

3.5. Temperatura de separación 44

3.6. Carga explosiva, así como las dimensiones de la misma 45

3.7. Determinación del punto de colisión **46**

3.8. Análisis microestructural de las muestras **46**

3.9. Determinación de la dureza de las muestras **50**

3.10. Determinación de impacto económico **51**

3.10.1. Valoración de las dimensiones ambientales, sociales y económica **52**

3.10.2. Dimensiones ambientales y social **52**

3.11. Conclusiones del capítulo **53**

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la Organización Básica Eléctrica (OBE) ha tenido un rol importante en la economía del país, constituye uno de los renglones que más incide en la satisfacción de necesidades a la población de ahí su alto impacto social. Es una prioridad para los directivos de dicha entidad y del estado cubano, trabajar por el incremento de la eficiencia de los equipos e instalaciones que la integran.

Las empresas de generación y transmisión de energía se encuentran diseminadas en todo el país, lo que permite reducir los costos por las pérdidas que generan los procesos de transmisión de dicha energía eléctrica a grandes distancias. En la provincia de Holguín existe una empresa de generación eléctrica, que funciona, con más de 450 MW de capacidad instalada, sin embargo, en todos los municipios del país están presentes las subestaciones que garantizan transformar la tensión eléctrica desde los 30 kV hasta los 400 V, ello permite que sea utilizable, tanto en los procesos industriales y en el sector residencial.

La tecnología de materiales ha experimentado sensibles avances en los últimos años, especialmente en lo que se refiere a recubrimientos superficiales, por lo que se dispone en la actualidad de recubrimientos con propiedades específicas adecuadas a aplicaciones concretas, resistentes a diversos tipos de solicitaciones.

En la actualidad existen diferentes materiales que se emplean en la construcción; los diseñadores pueden escoger el que mejor se comporte de acuerdo a las necesidades particulares. Estos materiales difieren no solo en su composición sino también en la forma como han sido manufacturados; lo que los hace más o menos soldables creándose, la necesidad de evaluar a fondo las formas disponibles para su soldadura.

En la fabricación de equipos y máquinas destinados a la transformación de energía, es cada vez más frecuente las aplicaciones de soldaduras en aluminio y cobre disímiles. Esto lleva a que se tenga que investigar y ensayar cuidadosamente con el fin de descubrir las mejores condiciones bajo las cuales se deban efectuar dichas uniones. Independientemente de cuál sea el material, el proceso de soldadura empleado y el tratamiento térmico posterior, pueden producirse algunos cambios microestructurales en la interfase, como, por ejemplo, pequeños precipitados, aumento de tamaño de grano, que en consecuencia pueden originar cambios en sus propiedades metalúrgicas.

Las actuales exigencias tecnológicas ponen de manifiesto la necesidad de disponer de materiales metálicos con elevadas prestaciones bajo condiciones de servicio críticas, así, por ejemplo, las matrices metálicas empleadas en los procesos metalúrgicos en la fabricación en frío y en caliente de los materiales, necesitan alta tenacidad y elevada dureza superficial, especialmente a alta temperatura en algunos casos.

Como **Situación problémica:** La transmisión de energía eléctrica necesita de todo un entramado de postes, cables y accesorios para hacer llegar dicha energía hasta los puntos de consumo, dentro de los mencionados accesorios están las conexiones y presillas, fabricadas de aleaciones de aluminio y cobre, que garantizan la mencionada transmisión, esos dispositivos están expuestos a condiciones de intemperismo, lo que provoca, durante su régimen de trabajo, la formación de pares galvánicos que a su vez genera óxidos que dificultan el contacto de los elementos y la transmisión de dicha energía eléctrica, para los que no se ha desarrollado una caracterización microestructural, cuando son soldados con explosivos, generándose importantes pérdidas de potencia por ese concepto, debido al calentamiento que se produce en esos componentes, para restablecer su adecuado funcionamiento es necesario desarrollar acciones de sustitución o limpieza, de acuerdo al grado de deterioro, con una regularidad promedio de más de 10 intervenciones de este tipo por año, en cada kilómetro de línea, generando molestias en la población, por los cortes para restablecer las condiciones de trabajo de esos componentes, con importantes pérdidas económicas por concepto de materiales y operaciones de mantenimiento no programadas; así como por la reducción de la capacidad de transmisión de la energía.

Problema a investigar: Insuficientes estudios relacionados con la caracterización microestructural de uniones disímiles de aluminio y cobre soldadas con explosivos, empleadas en los procesos de transmisión y distribución de la energía eléctrica.

El objeto de la investigación para este trabajo se establece**:** unión disímil entre el aluminio y el cobre mediante soldadura por explosión.

El **campo de acción** lo constituye: microestructura de las aleaciones de aluminio y cobre soldadas por explosivos.

A partir del problema planteado se define como **objetivo:** Establecer el comportamiento microestructural y la dureza de la unión disímil entre el aluminio y el cobre obtenida por

proceso de soldadura por explosión para ser empleada en accesorios para la transmisión de energía eléctrica.

Se establece la siguiente **hipótesis:** Una carga de explosivos con una alta velocidad de impacto, provocará la difusión de los átomos del aluminio sobre el cobre y permitirá una unión metalúrgica en la zona fundida y la zona de influencia térmica donde la resistencia mecánica no sea afectada por la dureza.

Se definen los siguientes **objetivos específicos:** Desarrollar la tecnología de soldadura, por explosivos, de aleaciones disímiles de aluminio y cobre, empleadas en la fabricación de accesorios para los procesos de transmisión de energía eléctrica.

1. Determinar el comportamiento microestructural de la unión soldada disímil de aluminio y cobre utilizada en la elaboración de accesorios para la transmisión de energía eléctrica.
2. Fundamentar las variaciones microestructurales originadas en la zona fundida y la zona de influencia térmica, así como la dureza resultante obtenida después del proceso de explosión de las aleaciones.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas:**

1. Establecimiento del estado del arte sobre los accesorios y dispositivos de transmisión de energía eléctrica en condiciones de intemperismo.
2. Determinación de la frecuencia de rotura de las presillas y uniones empleadas en la transmisión de energía eléctrica.
3. Propuesta de la tecnología de soldadura disímil, por explosivos, de aluminio y cobre.
4. Determinación del comportamiento microestructural de la unión soldada disímil de aluminio y cobre.
5. Valoración de resultados y planteamiento de los impactos económicos y ambientales.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

Introducción

En la aplicación de soldadura en estado sólido, la coalescencia de la superficie de la parte se obtiene; primero, mediante presión solamente y segundo por calor y presión. Para algunos procesos de estado sólido, el tiempo también es a tener en consideración. Si se usa calor y presión, la cantidad de calor por sí misma no es para producir la fusión de la superficie de trabajo, en otras palabras, no ocurrirá la presión de las partes con el uso solamente del calor que se aplica en forma externa para estos procesos. En algunos casos, la combinación de calor y presión o el modo particular en el que se aplica la presión sola, generan suficiente energía para producir una fusión localizada en las superficies empalmadas. No se añade metal de relleno en la soldadura de estado sólido.

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar la búsqueda bibliográfica existente relacionada con la soldadura por explosivos en materiales disímiles.

1.1. Procesos de transmisión de energía

La red de transporte de energía eléctrica es la parte del sistema de suministro eléctrico constituida por los elementos necesarios para llevar hasta los puntos de consumo y a través de grandes distancias la energía eléctrica generada en las centrales eléctricas.

Para ello, los niveles de energía eléctrica producidos deben ser transformados, elevándose su nivel de tensión. Esto se hace considerando que, para un determinado nivel de potencia a transmitir, al elevar la tensión se reduce la corriente que circulará, reduciéndose las pérdidas por Efecto Joule. Con este fin se emplazan subestaciones elevadoras en las cuales dicha transformación se efectúa empleando transformadores, o bien autotransformadores. De esta manera, una red de transmisión emplea usualmente voltajes del orden de 220 kV y superiores, denominados alta tensión, de 400 o de 500 kV, (Arivazhagan *et al.,* 2008)

Una línea de transporte de energía eléctrica o línea de alta tensión es básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias. Está constituida tanto por el elemento conductor, usualmente cables de acero, cobre o aluminio, como por sus elementos de soporte, las torres de alta tensión. Generalmente se dice que los conductores "tienen vida propia" debido a que están sujetos a tracciones

causadas por la combinación de agentes como el viento, la temperatura del conductor, la temperatura del viento, entre otros (Metzger y Lison, 1976).

La capacidad de la línea de transmisión afecta al tamaño de estas estructuras principales. Por ejemplo, la estructura de la torre varía directamente según el voltaje requerido y la capacidad de la línea. Las torres pueden ser postes simples de madera para las líneas de transmisión pequeñas hasta 46 kilovoltios (kV). Se emplean estructuras de postes de madera en forma de H, para las líneas de 69 a 231 kV. Se utilizan estructuras de acero independientes, de circuito simple, para las líneas de 161 kV o más. Es posible tener líneas de transmisión de hasta 1 000 kV, (Arivazhagan *et al.,* 2008).

Al estar estas estructuras, los soportes, cables tensores y los accesorios que están hechas de perfiles de acero (ver figura 1.1), como medio de sustentación del conductor se emplean aisladores de disco o aisladores poliméricos y herrajes para soportarlos.

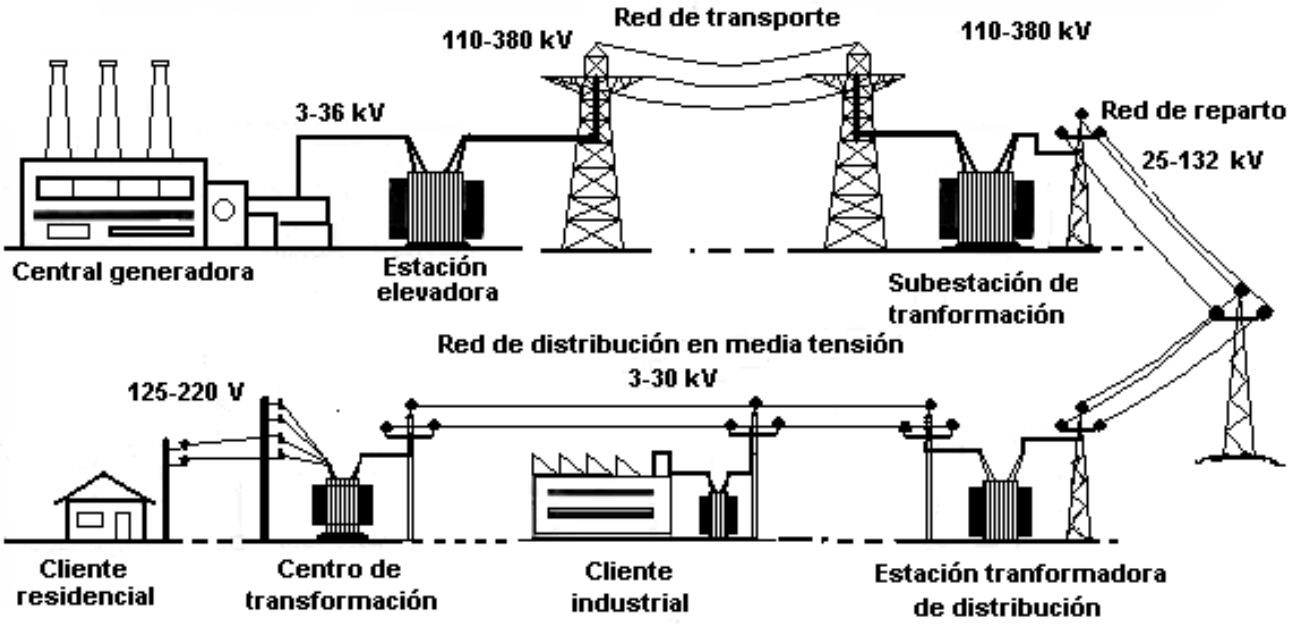


Figura 1.1. Sistema de suministro eléctrico.

1.1.1. Instalaciones eléctricas de baja tensión

Los tipos de suministros de energía eléctrica e instalaciones de enlace, en este tema se describen los distintos tipos de suministros de energía eléctrica que se pueden contratar, tanto en baja tensión como en media tensión, así como las principales características de las instalaciones de enlace con la Red de Distribución de UTE.

Los tipos de suministros de energía eléctrica, una vez definida la potencia a contratar, para conocer el tipo de suministro de energía eléctrica que entregará la empresa distribuidora. En baja tensión (tensión nominal ≤ 1 000 V), UTE tiene dos tipos de sistemas de distribución de energía eléctrica de alterna 50 Hz:

- Sistema trifásico de 220 V con neutro aislado, 3 conductores (3 fases).
- Sistema trifásico de 400 V con neutro aterrado, 4 conductores (3 fases y neutro).

Por lo tanto, en baja tensión, UTE puede suministrar energía eléctrica de alterna 50 Hz en las siguientes tensiones:

- Monofásica 220 V entre fases.
- Monofásica 230 V entre fase y neutro.
- Trifásica 220 V neutro aislado (3 conductores).
- Trifásica 400 V con neutro aterrado (4 conductores).

En la tabla 1.1 se indican las tensiones y potencias normalizadas actuales de los suministros de energía eléctrica en baja tensión 50 Hz.

Tabla 1.1. Tensiones y potencias normalizadas en baja tensión

Potencias normalizadas en baja tensión (kW)			Corriente Nominal (A) ICP
Monofásica 230 V (1)	Trifásica 230 V 3 conductores	Trifásica 400 V (2) 4 conductores	
1,32 (3)	-	-	6
2,2 (4)	3,8 (5)	6,6 (5)	10
3,3	5,7 (5)	9,9	15
4,4	7,6 (5)	13,2	20
5,5	9,5	16,5	25
6,6	11,4	19,8	30
8,8	15,2	26,3	40
11,0 (6)	19	32,9	50
13,9 (6)	23,9	41,5	63
16,0 (6)	-	-	73

1.1.2. Suministros en media tensión

Cuando la potencia a solicitar sea superior a los 300 kW en 400 V, el suministro de energía eléctrica será en media tensión. En algunos casos especiales y mediante previa consulta,

UTE podrá aceptar suministros en baja tensión para potencias superiores al límite anterior. También puede ser un requerimiento del cliente para disponer de un suministro más confiable, y/o una tarifa más económica de energía eléctrica. Este es el caso de importantes centros comerciales (shopping, supermercados, etc.), grandes edificios comerciales (edificios de oficinas, hospitales, hoteles, bancos, etc.) e industrias.

1.2. Accesorios empleados para los procesos de transmisión de energía

Los accesorios para cables de alta tensión *Raychem de TE Connectivity* (Feodorov y López 1980) en las terminaciones para exteriores son; terminaciones termocontraibles para cable poliméricos hasta 84 kV, terminaciones para exteriores hasta 345 kV, para exteriores secas autosoportadas para 145 kV, termocontraibles para cables de filtro hasta 150 kV, para Transformadores que son terminaciones secas y compactas. Los empalmes que son; termocontraibles para cables poliméricos hasta 84 kV, empalmes de una pieza para 245 kV y empalmes de tres piezas para 170 kV. Cajas de conexiones son gama completa de configuraciones de cables de puesta a tierra en cajas IP56 o IP68.

Líneas de transmisión de energía para los elementos conductores empleados:

- Se utilizan cables, no alambres.
- Pueden utilizarse conductores distintos para fases y apantallamiento (cables guardas).
- Pueden ser desnudos o aislados.
- Los materiales más utilizados son: aluminio (AA), cobre (CU), aceros galvanizados (SS) y aleaciones y combinaciones de estos como ACSR, *alumoweld* (AW), ACSR/AW, *copperweld*.
- Los cables aislados pueden tener o no un neutro concéntrico, y ser monopolares, bipolares, tripolares y armados o acorazados.
- Material aislante preferido: polietileno reticulado (XLPE).
- En los cables aislados siempre se utiliza una pantalla metálica exterior que se conecta a tierra para controlar el gradiente de potencial.

En las líneas se utilizan los conductores desnudos, en la selección de un conductor se basa la mayor relación conductividad sobre peso o fuerza sobre peso a un mínimo costo.

Los conductores estándar son:

- AAC (todo conductor de aluminio).
- ACSR (el acero del conductor de aluminio reforzado).
- AAAC (todo conductor de la aleación de aluminio).
- ACAR (la aleación de aluminio de conductor, de aluminio reforzada).

1.3. Materiales empleados en la transmisión de energía eléctrica

Los componentes de una línea aérea están constituidos tanto por el elemento conductor, usualmente cables de cobre o aluminio, como por sus elementos de soporte, las torres de alta tensión y los aisladores. En la construcción de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica, se utilizan casi exclusivamente conductores trenzados, los cuales son cables formados por alambres, en capas alternadas, enrolladas en sentidos opuestos. Esta disposición alternada de las capas evita el desenrollado y hace que el radio externo de una capa coincida con el interior de la siguiente. El trenzado proporciona flexibilidad con grandes secciones transversales (Metzger y Lison, 1976; Arivazhagan *et al.,* 2008).

El tipo de cobre que se utiliza en la fabricación de conductores es cobre electrolítico de alta pureza. Se obtiene electrolíticamente, por refinado: un electrodo de cobre hace de cátodo y un electrodo de cobre con impurezas hace de ánodo; el cobre electrolítico se deposita en el cátodo. Las características del cobre electrolítico coinciden, casi exactamente con las del cobre puro, ya que el contenido mínimo de cobre ha de ser de 99,9 %. Este tipo de cobre presenta un grado de dureza o temple (cobre recocido) llamado también cobre blando, tiene una resistencia a la rotura de 220 a 280 N/mm^2.

El cobre recocido a 20 ºC de temperatura ha sido adoptado como cobre - tipo para las transacciones comerciales en todo el mundo. Este cobre es dúctil, flexible y se utiliza, sobre todo, para la fabricación de conductores eléctricos que no hayan de estar sometidos a grandes esfuerzos mecánicos. El cobre semiduro tiene una resistencia a la rotura de 280 a 340 N/mm^2 y no es tan dúctil ni maleable como el cobre recocido, mientras el cobre duro trabajado en frio, adquiere dureza y resistencia mecánica, aunque a expensas de su ductilidad y maleabilidad. También tiene una resistencia a la rotura de 350 a 470 N/mm^2 y sus buenas propiedades mecánicas se emplea para conductores de líneas eléctricas

exteriores, donde han de estar sometidos a esfuerzos mecánicos elevados (Metzger y Lison, 1976; Arivazhagan *et al.,* 2008).

El aluminio es el material que se emplea como conductor de líneas aéreas, debido a su menor costo y ligereza con respecto a los de cobre para un mismo valor de resistencia. También es una ventaja el hecho de que el conductor de aluminio tenga un mayor diámetro que el de cobre con la misma resistencia. Con un diámetro mayor, las líneas de flujo eléctrico que se originan en el conductor, se encuentran más separadas en su superficie para el mismo voltaje. Esto significa que hay un menor gradiente de voltaje en la superficie del conductor y una menor tendencia a ionizar el aire que rodea al conductor. La ionización o descargas eléctricas debido a la ruptura del dieléctrico del aire producen un fenómeno indeseable llamado “efecto corona”.

Dentro de los materiales empleados en la transmisión de energía en elementos de estructuras están; auto soportadas o retenidas, postes de concreto, madera y acero y torres en acero galvanizado (celosía). Elementos aisladores presentes son; suspensión y retención, tipo pin, poste y cadenas conformadas por unidades de suspensión y en los materiales están la porcelana, vidrio y materiales sintéticos.

Los herrajes; grapas para sujetar cables de fases y guarda, amortiguadores, espaciadores para mantener separados los conductores de un haz, anillos para control de afecto corona, cuernos de arco, crucetas y demás elementos metálicos y cables para retención o anclaje.

Las obras civiles; líneas aéreas (cimentaciones y corredor o servidumbre), líneas subterráneas (bancos de ductos o zanjas y cajas de inspección, halado o tiro). Elementos de puesta a tierra; cables de cobre desnudos, conectores cobre-cobre o bimetálicos, varillas de puesta a tierra en cobre, contrapesos y mallas de puesta a tierra. Existen otros en líneas de transmisión; pararrayos de línea, empalmes y terminales monofásico y trifásicos para cables aislados, anclajes y balizas para señalización aeronáutica (Metzger y Lison, 1976; Arivazhagan *et al.,* 2008).

1.4. Obtención de piezas por procesos de soldadura

Según Reddy *et al., (*2008) y Madhusudan y Srinivasa (2009), es importante seleccionar la aleación correcta para estas aplicaciones con base en su funcionalidad, su efectividad y economía, por lo que se hace necesario producciones de uniones disímiles de alta calidad

para tomar las ventajas de ambos materiales. A pesar de la factibilidad de la fabricación de uniones soldadas disímiles con aplicación directa en diferentes sectores industriales estas han presentado defectos tanto de fabricación como metalúrgicos, con la promoción de fallas durante su aplicación en servicio, por lo tanto, el ingeniero de soldadura tiene que resolver el problema de cómo tratar el material y de cómo soldarlo correctamente.

Por las condiciones de operación que se puedan lograr en las uniones soldadas, la unión de materiales disímiles adquiere gran importancia lo cual da origen a diversos estudios dirigidos hacia la compresión de las fallas que se presentan durante el servicio y que han sido vinculadas a las uniones disímiles mediante el fenómeno de desunión, que se presenta en la zona de transición de las uniones disímiles (Nelson *et al.,* 1999; Lippold y Kotecki, 2005; Joseph *et al.,* 2005).

En el caso de la soldadura de dos metales diferentes en la soldadura por explosivos, hay que establecer una ventana de soldabilidad para cada metal y sobreponer una sobre la otra, lo que resulta de un área sobrepuesta dentro del cual se pueden obtener los parámetros con los que se soldará la combinación en cuestión.

1.5. Método de soldadura con el uso de explosivos

La soldadura por explosivos es un proceso de soldadura en estado sólido, qué usa una detonación explosiva controlada para forzar dos metales juntos debido a la alta presión. La unión resultante del sistema compuesto se une de forma durable por la unión metalúrgica. La soldadura explosiva bajo alto impacto de velocidad probablemente se le atribuye a (Garl en 1944). Este tipo de unión fue descubierta en 1957 en los Estados Unidos por Philipchuck durante un proceso de troquelado con explosivos, las hojas de metal, de forma ocasional, quedaban pegadas a los troqueles. Entre aquel inicio y ahora, el proceso ha sido desarrollado totalmente en aplicaciones industriales (Petushkof, 1976; Young, 2004*;* Mousavi y Sartangi, 2009).

Varios autores (Acarer *et al.* 2003); (Perkins *et al.,* 2005); (Durgutlu *et al.,* 2008), exponen que la soldadura por explosión es un proceso en el cual una coalescencia rápida, de dos superficies metálicas, es causada por la energía de un explosivo detonado, en el mismo no se usa metal de relleno, no se aplica calor externo, no ocurre difusión, el tiempo es demasiado corto, la unión es metalúrgica, combinada con un entrelazado mecánico que

resulta de un rizado (Ulaex, 2000). Comúnmente usado para unir dos metales disimiles, en particular para revestir un metal en la superficie de un metal base, sobre grandes áreas.

El proceso para revestir una placa de metal sobre otra con el empleo de una carga de detonación, como se observa en la figura 1.2. Las dos placas están en ubicadas de forma paralela y a una cierta distancia de separación, con la carga explosiva encima, la placa metálica superior se denominada la placa volante. Con frecuencia se usa una capa amortiguadora (hule o de plástico) entre el explosivo y la placa volante para proteger su superficie. La placa inferior, denominada placa base, descansa en un yunque para apoyo (Petushkov y Titov, 2001).

La figura 1.2 (a) es el proceso de instalación en configuración paralela y la figura 1.2 (b) es el desarrollo de la detonación de la carga explosiva, la deformación y aceleración de la placa volante y ocurre la unión de los metales disimiles.

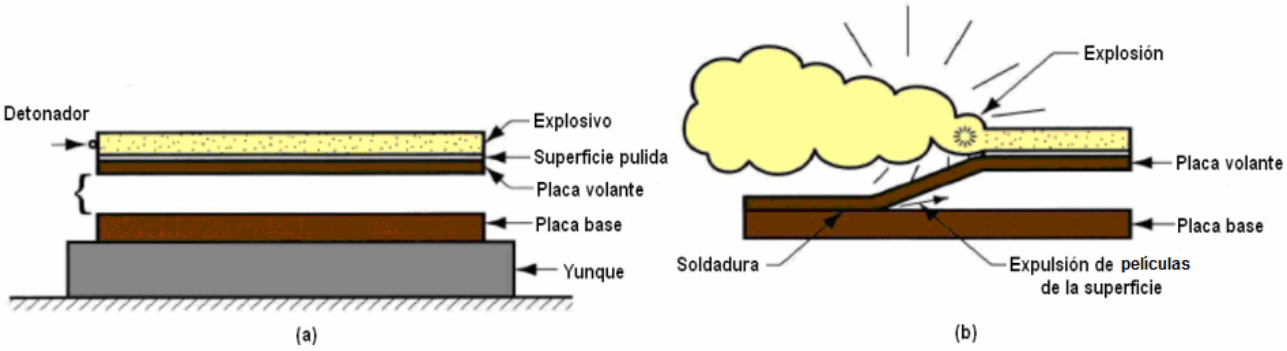


Figura 1.2 (a) y (b) Configuración y desarrollo del proceso de la soldadura por explosivo.

Al iniciarse la detonación, la carga explosiva se propaga de un extremo de la placa volante al otro, como se aprecia en la figura anterior. Una dificultad, en la comprensión de lo que sucede en la soldadura por explosivos, es el concepto erróneo común de que ocurre al instante una explosión; en realidad es una reacción progresiva, aunque ciertamente muy rápida, que se propaga a la velocidad de 2 500 m/s. La zona de alta presión resultante impulsa la placa volante para que choque con el metal de soporte en forma progresiva a alta velocidad, por lo que toma una forma angular conforme avanza la explosión, como se ilustra en la figura (Walsh *et al.,* 1953 y Durgutlu *et al.,* 2005).

En este proceso (Byers y Braithwaite, 1993) especifican que la placa superior permanece en su posición en la región donde el explosivo todavía no ha detonado. Debido a que la

colisión ocurre a alta velocidad en una forma progresiva y angular, provoca que se vuelvan inestables las superficies en el punto de contacto y son expelidas hacia delante desde el vértice del ángulo. Por tanto, las superficies que chocan estarán químicamente limpias y el comportamiento del fluido del metal, que implica una cierta fusión interfacial, proporciona un contacto íntimo entre las superficies y conduce a la unión metalúrgica.

Las variaciones en la velocidad de choque y en ángulo de impacto durante el proceso pueden provocar una interfase ondulada o rizada entre los dos metales. Este tipo de interfase fortalece la unión, debido a que aumenta el área de contacto y tiende a entrelazar mecánicamente las dos superficies (Al-Hassani *et al.,* 1984).

En las características de la explosión, el proceso es consecuencia de dos elementos: la deflagración y detonación, lo cual según Casals (1997), Otaño (1998); Caraballo (2004) y Almira (2015), la detonación de materiales energéticos son reacciones exotérmicas de óxido – reducción, reacciones que son autosostenidas después de que cierta energía inicial de activación ha sido aplicada, donde la base de masa, la cantidad de energía liberada por propelentes y explosivos es similar, esta energía es considerablemente menor que la producida por combustibles comunes, tales como el carbono quemado en aire. Los propelentes sufren deflagración, que es una combustión muy rápida resultado de tener un combustible y un oxidante en íntimo contacto.

La deflagración como proceso según (Mariño, 2000 y Almira, 2015), se lleva a cabo de la misma manera que un quemado normal cuya reacción se inicia en la superficie y prosigue al interior de la partícula. Los factores que gobiernan la deflagración son la velocidad de transferencia de calor dentro de la partícula del propelente y la velocidad de descomposición del mismo. La velocidad de transferencia de calor depende de la presión de los productos de la combustión y la velocidad de quemado se define como la velocidad a la cual la superficie de quemado consume un grano propelente en la dirección normal a la superficie.

En estudios realizados por diferentes autores (Staudhammer y Murr, 2001), coinciden en plantear que los explosivos tienden a detonar y se produce un frente casi discontinuo o un cambio abrupto de presión, conocido como onda de choque, se desplaza a velocidades supersónicas a través del explosivo, que causa su descomposición. La velocidad de reacción es determinada, en este caso, por la velocidad de la onda de choque y no por la

velocidad de transferencia de calor, esta velocidad de onda de choque es también llamada velocidad de detonación. Idealmente, en estado estacionario, la onda de detonación puede considerarse como una discontinuidad que viaja a través del explosivo con velocidad.

1.5.1. Proceso físico del proceso de soldadura por explosión

La explosión se define como “la transformación física o química rápida de la sustancia, acompañada del paso de la energía potencial de esa sustancia o los productos de su transformación a energía cinética”. Uno de los signos de la explosión es el brusco aumento de la presión en el medio circundante, a consecuencia de lo cual surge una onda de choque y un campo de tensiones Aguilar (1978), Pernia (1988) y Almira (2014).

Según Akbari *et al.,* (2004), en la soldadura por explosión (EXW), la unión se establece a través de la deformación intensa de la interfase. Una esterilla explosiva se coloca encima de la lámina o placa de revestimiento (la placa móvil), mantenida a una distancia crítica de la superficie de la placa base.

Al ser detonado el explosivo (Akbari, 2001) este se desplaza desde un extremo al otro, como se muestra en la figura 1.3, la presión desarrollada acelera la placa móvil en un ángulo respecto a la superficie. Bajo la intensa presión, se forma un chorro fluido que expulsa los contaminantes superficiales.

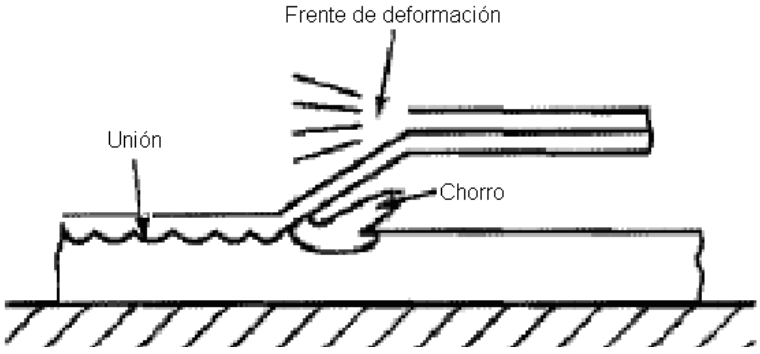


Figura 1.3. Desarrollo del proceso de soldadura por explosión.

En muchos casos no hay fusión, pero la combinación de la adhesión y del entrelazado mecánico asegura una unión fuerte. La técnica se utiliza para revestir placas grandes para la industria química, aunque el proceso se ha generalizado a otras industrias. Comúnmente usado para unir dos metales disímiles, en particular para revestir un metal en la superficie de una placa base, sobre grandes áreas Crossland (1982) y Amit *(2008*).

En las características generales de los explosivos, se le llaman explosivos o sustancias explosivas, a las combinaciones químicas o mezclas mecánicas, que bajo la acción de determinados factores externos tienen la propiedad de hacer la explosión; es decir que son capaces de transmitir rápidamente la transformación química, formando gases recalentados y a considerable presión que al dilatarse producen un trabajo mecánico.

Algunos compuestos químicos son sustancias explosivas si son capaces de reaccionar fácilmente, los productos finales de la reacción deben ser gases que alcancen un volumen que puede ser unas 10 000 veces mayor que el volumen de los productos iníciales. La reacción debe ocurrir tan rápido que la energía liberada en la explosión no se difunda, y sea realmente concentrada en el volumen que inicialmente ocupa la sustancia explosiva. Se diferencian las siguientes formas de transformación química de las sustancias explosivas (Otaño, 1998):

- Detonación.
- Combustión explosiva.
- Deflagración.

La selección de la sustancia explosiva para producir el endurecimiento reviste gran importancia y los criterios fundamentales para su elección son: la velocidad de detonación y la energía específica del explosivo Drury (1980). En este sentido, pudieran ser utilizados varios tipos de sustancia explosiva, en particular las combinaciones o mezclas sólidas (exógeno, salitre amoniacal + totril) y las mezclas de sustancias sólidas y líquidas (salitre amoniacal + líquido combustible, nitroéteres + salitre, hidrógeno líquido + combustible sólido). En todo caso si las propiedades no están totalmente definidas por el fabricante, estas pueden ser determinadas de forma experimental.

Explosivos, propelentes y pirotécnicos son compuestos o mezclas de compuestos químicos, que forman el grupo de los materiales energéticos. Los explosivos y los propelentes, cuando se inician adecuadamente, producen grandes volúmenes de gas caliente en muy corto tiempo. La diferencia básica entre estos dos tipos de materiales es la velocidad de reacción. En los explosivos, una reacción rápida da lugar a una muy alta presión de choque en los alrededores.

Este choque es capaz de impulsar o destruir objetos. En los propelentes, una reacción más lenta que la de los explosivos produce presiones menores en un periodo de tiempo mayor. Esta presión baja y sostenida es comúnmente utilizada para impulsar o propeler objetos. Por otro lado, los pirotécnicos desarrollan una mayor cantidad de calor, pero menos gas que los propelentes.

Según Pernia (1988), en los explosivos detonantes la velocidad de las primeras moléculas gasificadas es tan grande que no ceden su calor, por conductividad, a la zona inalterada de la carga, sino que lo transmiten por choque deformándola y produciendo su calentamiento y explosión adiabática con generación de nuevos gases. El proceso se repite con un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva y se denomina onda de choque.

Según el mismo autor, en los explosivos comerciales se producen reacciones químicas importantes por detrás del plano C-J (plano de Chapmant-Jouguet) que marca el paso del frente de detonación. Son particularmente reacciones de los ingredientes en forma de partículas de gran tamaño y de los combustibles metálicos. Estas reacciones secundarias pueden afectar el rendimiento del explosivo, pero no influyen en la estabilidad o velocidad de detonación.

El empleo industrial en Cuba, de procedimientos tecnológicos para el uso de explosivos, es exclusivamente referido en un reporte de aplicación de investigadores del CENIC (Meriño, 1977), trabajos preliminares llevados a cabo por el coordinador del grupo de trabajo de los metales con explosivos del ISMM Moa (Casals, 1997); e investigaciones realizadas por Caraballo (1997 y 2004). También se reportan trabajos en este campo realizadas por De la Cruz (2003), Parodi (1991), relacionado con el endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos.

1.5.2. Velocidad de detonación

Es la velocidad expresada en metros por segundo, con la cual la onda de detonación recorre una columna de explosivo. La velocidad puede ser afectada por el tipo de producto, su diámetro, el confinamiento, la temperatura y el cebado.

Las velocidades de detonación de los explosivos comerciales fluctúan desde cerca de 152 hasta más de 670 m/s. Durante el proceso las primeras capas de material tienen características de plasma debido a la alta velocidad de impacto de 200 a 500 m/s. Mientras

mayor sea la rapidez de la explosión, mayor suele ser el efecto de fragmentación. La presión en el punto de colisión, que puede ser entre 700 a 4 200 MPa, los cuales son suficientes para mantener el metal con aspecto de fluido viscoso.

La velocidad de colisión y la velocidad de la plancha volante deben ser menores que la velocidad del sonido en cada uno de los componentes a soldar. Esta condición se establece como una explicación de la condición necesaria para que la onda de tensión reflejada no interfiera con la onda incidente en el punto de colisión. Como la velocidad de colisión está relacionada con la velocidad de detonación y el ángulo β (ángulo de la placa volante), ésta puede ser ajustada por la reducción de la velocidad D (velocidad de detonación) o por la introducción de un ángulo de oblicuidad.

Cuando $\beta < 10^{o}$ se puede utilizar una aproximación, β y V_p. son los dos parámetros más importantes en la soldadura por explosión. La formación de una reacción es esencial. En la figura 1.4 se muestra la variación del ángulo.

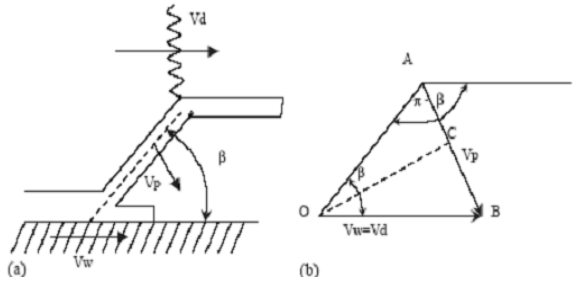


Figura 1.4. Variación del ángulo β.

Del análisis de los parámetros físicos más importantes, la interacción entre la geometría y los parámetros de la colisión dinámica por un lado y las características del material por el otro, hace muy difícil separar completamente sus respectivos papeles. Consecuentemente algunos autores han intentado estimar la energía total requerida y de ésta, la cantidad de carga explosiva en preferencia a una aproximación teórica basada en el mecanismo de este proceso de soldadura.

Wittman y Deribas desarrollaron un gráfico (figura 1.5) en el que se relaciona el ángulo β con la velocidad de soldadura. Estudiaron la formación de la propulsión, la presión de impacto crítica, la máxima velocidad de impacto y la transición de velocidad ondular suave.

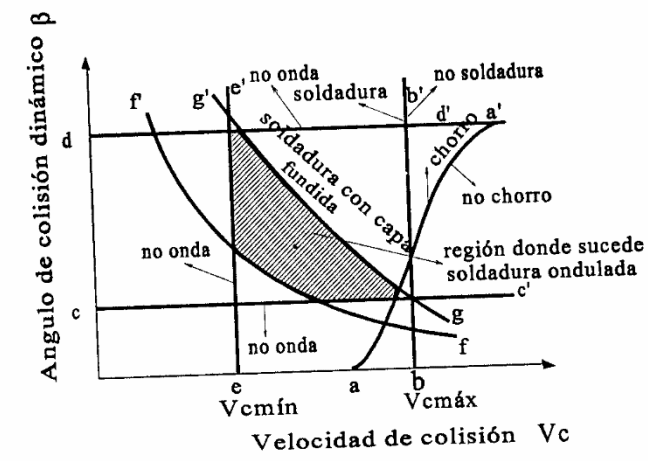


Figura 1.5. Relación del ángulo *β* con la velocidad de soldadura.

El área rayada de la figura representa el lugar geométrico dentro del cual se puede tomar un punto cuyos parámetros determinen una soldadura aceptable.

La presión de impacto mínima debe ser excedida (y por supuesto la mínima velocidad de la plancha) para que la energía de impacto sea suficiente y ocurra la soldadura. Esto sugiere que la energía de impacto requerida está en relación con la energía de deformación y con la resistencia a la fluencia dinámica de la plancha volante. Un límite superior para el valor de la energía tiene que ser observado para evitar exceso de calor y posiblemente fundiciones por disipación viscosa y por lo tanto la formación de capas de compuestos frágiles. Tal límite superior sería buscado en términos de energía de fusión o del más bajo punto de fusión de los metales a soldar.

Una suficiente separación entre las planchas tiene que ser prevista de tal manera que la plancha volante sea acelerada con una velocidad de impacto requerida. Esa separación satisfactoria puede tomar valores comprendidos entre la mitad del espesor de la plancha y su valor completo. Algunos autores dan diferentes valores de este espacio en función de la gravedad específica del material de la plancha volante. Estos son múltiplos del espesor de la plancha en: (1/2 - 2/3), (1/2 - l), (2/3 - 2) para gravedad específica menor que 5, entre 5 y 10 y mayor que 10 respectivamente.

1.5.3. Mecanismos de la soldadura por explosivo

Numerosos investigadores han atribuido el mecanismo de la soldadura por explosión a la acción de un chorro metálico de alta velocidad que se produce por el impacto oblicuo de la

placa metálica a ser soldadas. Este impacto provoca presiones y tensiones de corte muy elevadas de manera tal que la resistencia al corte de los metales involucrados en el proceso resulta despreciable. Se puede considerar que bajo tales condiciones estos metales se comportan como fluidos de muy baja viscosidad, durante un pequeño intervalo de tiempo, y su comportamiento puede ser tratado mediante las leyes de la mecánica de los fluidos. De esta forma se produce un chorro (jet) metálico que limpia la superficie de óxidos o contaminantes, dando origen a la condición necesaria para una soldadura.

1.6. Aspectos metalúrgicos de la soldadura por explosión

Los problemas metalúrgicos en la soldadura por explosión no son tan severos como los asociados con los métodos convencionales de soldadura por fusión, excepto aquellos problemas relacionados con la soldadura de material muy disimilares, los cuales no pueden ser soldados por medios convencionales. Sin embargo, hay algunos aspectos que están relacionados solamente con la soldadura por explosión, como el efecto de las ondas de choque. En la figura 1.6 se muestra el aspecto típico de la intercara ondulada de una soldadura por explosión.

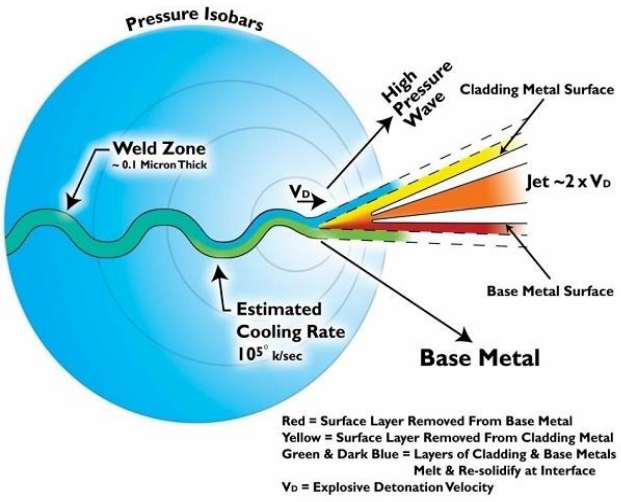


Figura 1.6. Aspecto típico de la intercara de la soldadura por explosivos.

Para ángulos de oblicuidad grandes 15 grados, el chorro escapa completamente de la intercala y esto conduce a una soldadura en fase sólida. Cuando el ángulo de impacto es menor de cinco grados, el chorro queda total o parcialmente atrapado. En este caso, la energía cinética que posee se convierte en energía térmica, produciendo fusión en cierta zona y observándose (bolsitas) del metal fundido por delante y por detrás de las crestas de

las ondas. Bajo condiciones extrema, es posible producir una intercara de soldadura que consiste totalmente en unión por fusión.

Debido a que la duración del proceso de soldadura en el punto de unión es corta, la zona de calor es reducida, así como los efectos del calentamiento en los materiales. Estas zonas fundidas sufren los problemas metalúrgicos normalmente asociados a la fusión, tales como cavidades de enfriamiento y producción de compuestos íntermetálico.

En la zona fundida asociada a los torbellinos de la intercara se alcanzan velocidades de enfriamiento muy rápidas, el tipo de solidificación de una capa de hierro fundida es de un espesor aproximado de $30\,\mu m$, en una soldadura por explosión. La relativa delgadez de estas capas interfaciales en este tipo de soldadura se debe a las altas velocidades de calentamiento y enfriamiento y, por consiguiente, al intervalo de tiempo extremadamente pequeño en que esta intercara permanece a alta temperatura.

La deformación del grano interfacial y la formación de una onda sugieren que el mecanismo de soldadura debe ser asociado con un proceso de flujo. Se ha establecido experimentalmente el hecho de la existencia de un cortante interfacial durante la soldadura y se atribuye ésta al efecto del calor generado por dicho cortante en la intercara. Este podría causar suficiente calor en las capas límites como para propiciar la unión y podría también estar relacionado con la formación de la onda.

Una aplicación importante de la soldadura de explosión es la unión de metales disimilares que usualmente forman compuestos intermetálicos por los medios convencionales de soldadura. No obstante, hay que tener cuidado en la elección de los parámetros de soldadura, pues también se puede formar compuestos intermetálicos en las pequeñas zonas fundidas cuando se suelda por explosión. Una solución a este problema que han encontrado algunos investigadores consiste en hacer un eletrodepóstico en uno de los componentes a ser soldadas como medio de evitar la formación de compuestos intermetálicos frágiles (como son el que se forma entre el aluminio y el acero inoxidable).

Las velocidades de deformación extremadamente altas en la zona de la intercara pueden conducir a altas concentraciones de defectos puntuales y dislocaciones. La recuperación y recristalización indican que se ha producido un reacondicionamiento de átomos y

dislocaciones durante e inmediatamente después de la soldadura y no es irracional suponer que se puede producir difusión interfacial en la soldadura de materiales disimilares.

Debido a la detonación de la carga explosiva, la placa volante se encuentra sometida a una onda de choque de alta presión, la cual reverbera dentro de la misma. La componente de compresión de la detonación normal de la superficie de la placa se refleja en la superficie inferior de la misma como una onda de extracción. Como consecuencia la placa es acelerada hacia abajo en una serie de pasos. Se ha demostrado que el 90 % de la velocidad terminal de la placa volante se alcanza después de que tres ondas de compresión han atravesado la misma.

Cuando la placa volante choca contra la placa base, se generan nuevamente ondas de choque de alta presión en ambas placas. Estas ondas de choques de alta presión provocan un endurecimiento por choque, pero cerca de la intercara de soldadura, donde la liberan de calor que es significativa, puede producirse una relajación de tensiones, dando lugar a la reducción de la dureza.

En la soldadura por explosión se observa frecuentemente maclado, no solo en las estructuras cc, sino también en las estructuras ccc de baja energía de apilamiento. Otro efecto de las ondas de choque es el resquebrajamiento, que es causado por la onda de tracción reflejada en la superficie inferior de la placa volante. En general, en condiciones normales de soldadura, este efecto no se produce, pues se usa una cantidad moderada de explosivo. Además, este efecto tiene lugar cuando se usan explosivos de alta velocidad de detonación.

1.7. Conclusiones del capítulo

- En la literatura consultada muestra gran variedad bibliografía relacionada con el tema de soldadura por explosivos en materiales disímiles.
- La soldadura por explosivos ha sido explotada, con éxito, en chapas metálicas, para la construcción de recipientes a presión, uniones de tubo a placa y obturación de intercambiadores de calor, tanto para la industria convencional como nuclear pero poco utilizada en accesorios de la transmisión de energía eléctrica.
- A diferencia de las uniones soldadas disímiles con el empleo de electrodos para realizar la unión metalúrgica, en la soldadura por explosivos, la fusión metalúrgica se realiza a través de la introducción de los átomos de los materiales de uno dentro en el otro.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS, MATERIALES Y CONDICIONES DE OPERACIÓN

CAPÍTULO 2. MÉTODOS, MATERIALES Y CONDICIONES DE OPERACIÓN

Introducción

Al pensar en los efectos térmicos que acompañan a las reacciones químicas es conveniente imaginar que cada compuesto posee un contenido calorífico (o "entalpía") definido. El calor de formación en condiciones normales es una medida de este contenido calorífico, expresándose su valor con respecto a un cero arbitrario correspondiente a los elementos constituyentes, la cuestión de si durante una reacción se desprenderá calor o será absorbido queda determinada por el conjunto o suma de los contenidos caloríficos de los productos de la reacción, en comparación con la suma correspondiente a los reactivos.

El segundo capítulo tiene como objetivo establecer el procedimiento metodológico del proceso de la unión soldada por explosivos de aluminio y cobre.

2.1. Materiales explosivos empleados

Para la realización de la investigación se utilizó, como sustancia explosiva industrial TECTRON 100, emulsión encartuchada en mangas de polietileno de diferentes diámetros, única sustancia explosiva que se comercializa en la actualidad en Cuba, la cual cumple con todos los requerimientos exigidos para la realización de la soldadura por explosivos de las aleaciones en objeto de estudio.

Los parámetros de detonación del TECTRON 100 se relacionan a continuación Ulaex, (2000):

- Densidad (ρ); (1150 kg/m^3).
- Energía específica (E_e); (3 098 232 kJ/kg).
- Velocidad de detonación (V_d); se establece en función del diámetro de la carga.
- Presión de detonación (P_d); se establece en función del diámetro de la carga.

La presión de detonación también puede obtenerse con el empleo de gráfico establecido, se prefiere realizar el cálculo de esta presión considerando como información primaria la velocidad de detonación de la sustancia explosiva y su densidad. Con esto se establece la presión de detonación cualquiera sea la configuración de la carga explosiva a emplear.

Para el desarrollo del plan experimental se prepararon las muestras de las aleaciones objeto de estudio. La unión se realizó en configuración paralela, como se muestra en la figura 2.1, se realizó primeramente la limpieza de la superficie de las probetas.

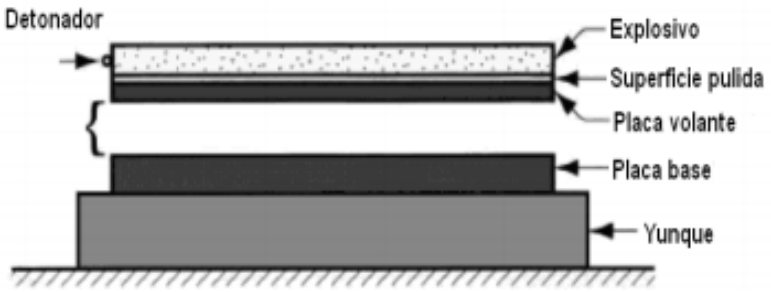


Figura 2.1. Preparación de la unión para la soldadura.

Se prepararon dos probetas de aleaciones disimiles. La unión se realizó según lo expuesta anteriormente. En la tabla 2.1 se muestran los parámetros considerados según la forma de realizar la unión por soldadura.

Tabla 2.1. Parámetros para la soldadura de las probetas.

No.	Aleación	velocidad de detonación; V_d (m/s)	ángulo de colisión; (β)	desviación del explosivo; (φ)	espesor; δ (cm)
1	Aluminio	2 500	7	0,8	1,5
2	Cobre	2 500	7	0,8	1,5

La influencia de los parámetros del proceso para la soldadura explosiva ha sido estudiada por Robinson (1975), Drury y Westmaas (1980) y Davis (1987), los que coinciden en plantear que, con el aumento de la placa móvil, el impacto transforma la interfase de la vinculación de liso a ondulado, explican que la comprensión radica en que, con el aumento de la proporción de la masa explosivas, les aumenta la presión que la explosión ejerce en la placa volante, produce una aceleración superior.

2.2. Composición química de los materiales empleados

La composición química estándar de la aleación de aluminio según Alloy Casting Institute (ACI), muestra la designación adoptada por la ASTM, de la American Society for testing Materials – ASTM y la SAE, se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Composición química del aluminio, en %

Si	Fe	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Al
0,1 - 0,2	<0,6	<0,005	0,3 - 0,50	<0,002	<0,002	<0,015	98,76

Los elementos que se adicionan a las aleaciones de aluminio en pequeños porcentajes son el B, Cr, Ti, V y Zr, los cuales tienen un efecto sobre el refinamiento de grano, por las características de formar compuestos intermetálicos de elevado punto de fusión. La composición química es el factor fundamental en la fisuración en caliente, puesto que, dependiendo de esta, así serán los compuestos intermetálicos formados y las temperaturas de fusión, de ella depende la formación de compuestos eutécticos. La tabla 2.3 muestra la composición química estándar de la aleación de cobre.

Tabla 2.3. Composición química del cobre, en %

Cr	Si	Mn	Pb	Ni	Fe	Zn	Cu
<0,002	0,1- 0,3	<0,001	0,01 - 0,20	<0,001	<0,3	0,69	97,46

La clasificación del cobre por esta norma, es del tipo Cu-DHP, cobre de la más alta conductividad, dentro de sus elementos, el fósforo, afecta la conductividad eléctrica.

2.3. Parámetros de trabajo en los procesos de soldadura por explosivos

Los parámetros específicos para la ejecución del proceso de soldadura por explosivos lo constituyen (Cowan *et al.,* 1971): el yunque, el cual sirve de apoyo a las dos placas a soldar y el cual debe estar seguro y rígido para evitar distorsiones y alabeos durante la explosión, que a su vez garantiza la fuerza del rendimiento y la dureza de la parte interna. Puede ser un centro sólido o un tubo con un mandril.

La proporción de la masa explosiva con relación a la proporción de placa móvil, se considera que, en relación a la cantidad de explosivos en la parte superior, existirá mayor poder en la explosión. Este parámetro influirá en la fuerza del campo magnético. En la figura 2.2 se relacionan los parámetros de la soldadura por explosivos.

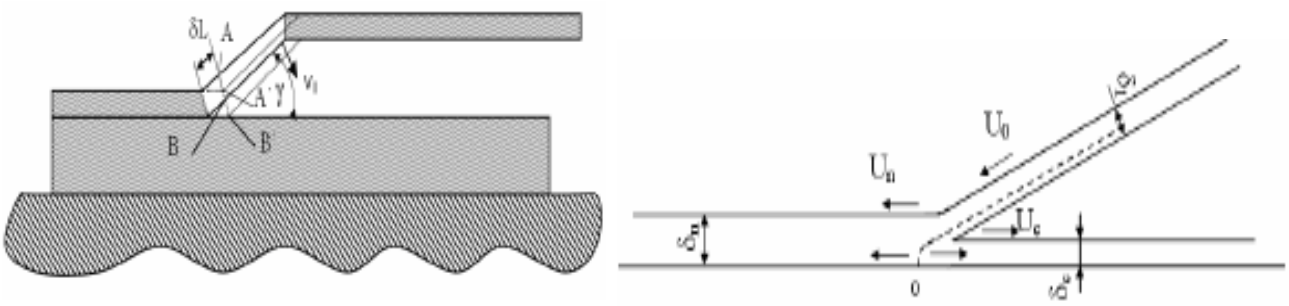


Figura 2.2. Parámetros de formación del chorro de reacción.

Donde:

U_0 - es la velocidad y espesor del chorro de reacción,

U_c - es la velocidad y espesor cumulativo del chorro de reacción, con movimiento a la derecha (marcha atrás),

U_n - es la velocidad y espesor del chorro de reacción, con movimiento a la izquierda.

Para obtener una explosión que logre la soldadura, es necesario tener en cuenta las condiciones siguientes:

$D < C_0$

Con:

C_0 - es la velocidad real en los materiales soldados

D - es la velocidad de detonación para una presión de $P \geq P_{KP}$

P - es una presión para $\gamma < \gamma_{KP}$

Donde: γ es un ángulo de colisión y γ_{KP}, es un ángulo crítico de colisión.

Según los resultados de experimentos sobre el método es necesario enfatizar en dos puntos (Holtzman y Cowan, 1965):

a) Que la distancia entre la placa móvil no cambie a lo largo del llenado de la superficie.

b) Que la placa móvil coincida con las proyecciones de la placa fija.

Según Holtzman y Cowan (1965), con el aumento de la distancia y la amplitud, surgen las siguientes interfases: olas pequeñas, olas más grandes, olas con los vórtices, olas con

solidificación de bolsas de fusión y las capas continuas fundidas. En la figura 2.3 se muestra la variación en la ola, según la velocidad de detonación del explosivo.

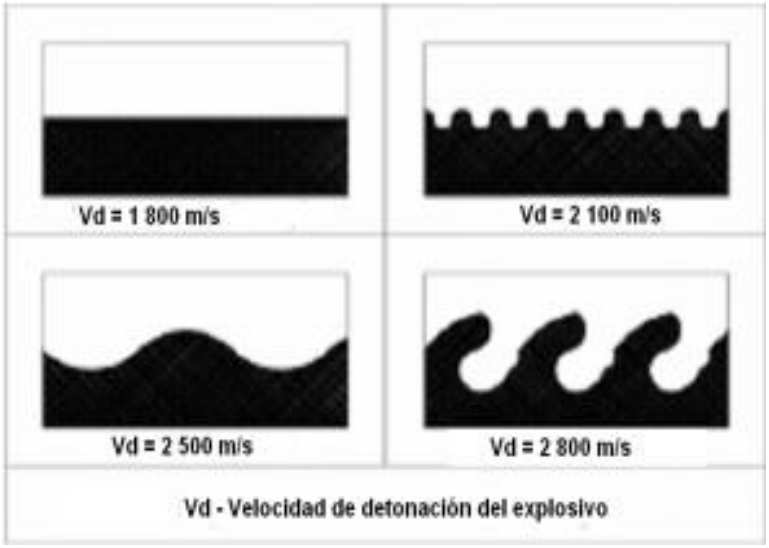


Figura 2.3. Morfología de la ola en dependencia de la velocidad de detonación del explosivo.

De todas ellas, la interfase más deseable, es el enlace ondulado de la transición sin ninguna capa intermetálica a la velocidad de detonación de 2 500 m/s. Un cambio continuo en la forma de onda (la amplitud y período), el estado detallado de la geometría de la ola puede atribuirse a las variaciones en la velocidad de la placa volante y al del ángulo de impacto.

Con la formación de capa intermetálica, baja la ductilidad y sea la causa de carácter quebradizo (Frenkel y Smit, 2002). Los beneficios de la formación de la ola son: una superficie del contacto superior, superior movilidad de átomos y dislocaciones y levantamiento eficaz de contaminaciones. Algunos investigadores, en los que se destaca Nordlund (2006) plantea que los puntos fuera de la ondulación de las interfases, no tienen un efecto en la fuerza de cohesión.

2.4. Determinación de los parámetros de soldadura por explosivos

El proceso de soldadura con explosivos, puede ser dividido en tres etapas básicas, la detonación de la carga explosiva, la deformación y aceleración de la placa volante y la colisión entre ambas placas, entre los parámetros que se considera en el proceso de soldadura por explosivos se tienen:

- velocidad de impacto,

- ángulo de colisión,
- velocidad del punto de colisión,
- energía cinética del explosivo y,
- temperatura de separación, *K*.

2.4.1. Cálculo de la velocidad de impacto

Variable cuantitativa que define la velocidad del punto de colisión paralela a la placa base, controlada por la velocidad de detonación y la velocidad delantera de la capa del explosivo, va a depender del tipo de explosivo usado. Para este proceso la velocidad de la colisión está en el orden de 1 500 a 3 000 m/s. La velocidad de la colisión debe permanecer más baja que la velocidad del sonido de la placa volante (Ben-Artzy, 2010).

La velocidad de impacto se calcula, según Tabbataee (2014) y Almira (2015), como:

$$V_p = \sqrt{(2E_K)}\left[\frac{\frac{5}{3R^2}}{R^2+5R+\frac{5}{4}}\right]^{\frac{1}{2}} V_p = 1{,}2V_d\left[\frac{\left(1+\frac{32}{27R}\right)^{\frac{1}{2}}-1}{\left(1+\frac{32}{27R}\right)^{\frac{1}{2}}+1}\right] \quad (2.1)$$

Siendo:

V_p - velocidad de impacto, m/s

V_d - velocidad de detonación, se toma según el tipo de geometría que se forma en el proceso, m/s

R - radio de carga, m

E_K - energía cinética del explosivo, *J*

La velocidad de impacto, está expresada en metros por segundo, con la cual la onda de detonación recorre una columna de explosivo. La velocidad puede ser afectada por el tipo de producto, su diámetro, el confinamiento, la temperatura y el cebado.

Durante el desarrollo del proceso de explosión, considera (Broeckhove, 2010) que, como condición, la velocidad de colisión y la velocidad de la placa volante deben ser menores que la velocidad del sonido en cada uno de los componentes a soldar. Esta condición se establece como una explicación de la condición necesaria para que la onda de tensión reflejada no interfiera con la onda incidente en el punto de colisión. Como la velocidad de

colisión está relacionada con la velocidad de detonación y el ángulo β (ángulo de la placa volante), ésta puede ser ajustada por la reducción de la velocidad V_d (velocidad de detonación) o por la introducción de un ángulo de oblicuidad.

Consideran Tabbataee y Mahmoudi (2014) que los parámetros más importantes en la soldadura por explosión son atributos al ángulo de oblicuidad y a la velocidad de detonación (β y V_p) y si $\beta < 10^o$, se puede utilizar la aproximación para realizar la unión debido a que la formación de una reacción es esencial.

2.4.2. Velocidad de detonación

Es una variable cuantitativa, se puede repetir cuantas veces sean necesarias (se obtiene un nuevo resultado en cada impacto) y se ajusta a las características que poseen las aleaciones objeto de estudio para variar sus propiedades mecánicas por impactos repetidos. Al tener en cuenta cada valor de (V_d), se podrá conocer el valor total de la velocidad de deformación acumulada, considerada la misma como el producto de la magnitud (energía específica en relación a masa de sustancia explosiva) que recibe la probeta. En la investigación se empleará una velocidad de detonación de 2 500 m/s.

2.4.3. Determinación del ángulo de colisión

Variable cuantitativa, es el ángulo formado por la placa base y la placa volante para formar el impacto o colisión, para la soldadura por explosivos se encuentra normalmente entre 0 y 10^o (Broeckhove, 2010).

La magnitud de la longitud de onda como la altura de la onda del dibujo ondulado formado en el interfaz de la unión después del recubrimiento explosivo incrementa proporcionalmente a la velocidad de colisión y el ángulo de colisión entre el material de recubrimiento y el material de base y la forma de la ondulación, es decir, la proporción de la altura de la onda con respecto a la longitud de onda es determinada por la proporción relativa de densidad entre el material de recubrimiento y el material de base.

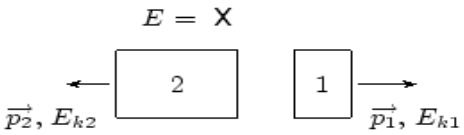
Como se requiere de un chorro en la región de choque, el valor mínimo del ángulo de colisión (β) debe ser excedido. Para un metal dado, el valor del ángulo es una función de la velocidad de colisión, se calcula este valor crítico como una función de la velocidad de colisión y de la ecuación dinámica, se calcula según Zlobin (2002).

$$\beta = tan^{-1}\left[\frac{V_P cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{V_c - V_P sen\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right] \quad (2.2)$$

2.4.4. Energía cinética del explosivo

La energía cinética, es la energía que surge en el fenómeno del movimiento. Está definida como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa dada desde su posición de equilibrio hasta una velocidad dada. Una vez conseguida esta energía durante la aceleración, el cuerpo mantiene su energía cinética sin importar el cambio de la rapidez.

Un trabajo negativo de la misma magnitud podría requerirse para que el cuerpo regrese a su estado de equilibrio, se determina según Petushkov (2000) como:



$$E_{Ktotal} = E_{K1} + E_{K2}$$

$$E_{Ktotal} = \frac{1}{2}m_1 \cdot V_1^2 + \frac{1}{2}m_2 \cdot V_2^2 \quad (2.3)$$

Para lo que:

E_{Ktotal} - energía cinética total, *J*

m_1 y m_2 - masas de las placas (fija y volante), kg

V_1 y V_2 - velocidad de las placas, m/s

El cálculo de la energía cinética a partir de la ecuación 2.3 está basada en la consideración de Gurney (1943) que considera que; toda la energía de los gases es liberada instantáneamente y uniformemente dentro de las placas y esto considera la energía cinética de los productos explosivos y el cuerpo sólido parte a ser propulsado durante la expansión de los gases en el proceso de unión.

2.4.5. Temperatura de separación

La temperatura de separación es un valor teórico calculado a volumen y presión constantes donde los altos valores de temperatura favorecen los fines de la explosión, porque contribuyen a dilatar los gases. Por la ecuación de Boltzmann's se determinó la velocidad de colisión y luego la temperatura de separación de las placas (Hirsch, 1996).

$$V = \sqrt{\frac{3kT}{\mu}} \quad (2.4)$$

$$T = \frac{V^2 \cdot \mu}{3 \cdot k} \quad (2.5)$$

En la que:

k - constante universal de los gases; 8,31 J/mol·K

μ - masa molar del aire, *J*/mol

V - velocidad de colisión, m/s

T - temperatura de separación, *J*

2.4.6. Determinación de la temperatura de separación

Las juntas de materiales disímiles realizadas por soldadura requieren una fusión simultánea de los metales base. Si las temperaturas de fusión son próximas, con una diferencia menor de 100 °C, los procedimientos y técnicas de soldadura serán normales, pero cuando esta diferencia es mayor la soldadura es más compleja. En realidad, para poder unir estos metales disímiles es necesario usar soldadura ***Brazing*** o soldadura al estado sólido (explosión, fricción o ultrasónica). La tabla 2.4 muestra las temperaturas de fusión y las propiedades físicas del aluminio y cobre.

Tabla 2.4. Propiedades físicas del aluminio y cobre.

Propiedades	Cobre	Aluminio
Coeficiente de expansión térmica.	1,5 $°C^{-1}$	2,1 $°C^{-1}$
Conductividad térmica.	5,9 J/(m·s·K)	3,1 J/(m·s·K)
Densidad.	1,1 kg/m^3	0,3 kg/m^3
Temperatura de fusión	0,7 °C	0,4 °C

Una diferencia significativa en la temperatura de fusión de los metales base o del metal de soldadura y el metal base, puede resultar en la rotura del metal que tenga menor temperatura de fusión debido a que la solidificación y contracción del metal con alta temperatura de fusión induce tensiones en el otro metal, que aún está dilatado y con menor resistencia por encontrarse parcialmente solidificado.

Este problema puede ser resuelto si se deposita una o más pasadas de un metal de aporte con una temperatura de fusión intermedia sobre la cara del chaflán del metal base de mayor temperatura de fusión.

2.4.7. Separación o distancia entre placas

La separación o distancia entre placas es una variable cuantitativa, que define la distancia o separación entre la placa base y la placa volante, generalmente se considera el espesor de la placa volante y está entre 0,5 y 3 veces el espesor (Durgutlu, 2008).

2.4.8. Velocidad de la placa volante

Es necesario determinar la velocidad de la placa volante, la que posee una correlación proporcional entre el ángulo de impacto y la velocidad de esta placa volante, está entre 250 a 500 m/s y se calcula según Ben-Artzy (2010) como:

$$V_f = V_P \cdot sen(\propto) \tag{2.6}$$

Para este trabajo se escogió como velocidad de la placa volante 400 m/s y el ángulo α se encuentra normalmente entre 3 y 10° (Mousavi y Sartangi, 2009).

El volumen del explosivo se calcula de acuerdo a las dimensiones y el espesor del explosivo (Almira, 2015).

$$V = a \cdot b \cdot c \tag{2.7}$$

Donde:

V - volumen del explosivo, cm^3

a - largo de la plancha, cm

b - ancho de la placa, cm

c - espesor del explosivo, cm.

El radio de la carga se determina en adecuación a la ecuación 2.8 según Almira (2015):

$$R_c = \frac{m}{2} \tag{2.8}$$

Siendo:

R_c - radio de la carga, kg

m - masa del explosivo, kg

La masa del explosivo se calcula en adecuación a la ecuación 2.9.

$$m = V \cdot \rho \quad (2.9)$$

Para lo que:

V - volumen del explosivo, cm^3

ρ - densidad del explosivo, g/cm^3

El ángulo de la desviación del explosivo se determina según Hirsch (1995) como:

$$\varphi = \left(-1 - \frac{V_G}{2E_K}\right)^{\frac{1}{2}} = 0{,}7 \; a \; 0{,}83 \quad (2.10)$$

Con:

φ - el ángulo de la desviación del material explosivo (φ = 0,8)

V_G - velocidad de detonación de la partícula detrás del frente de detonación de los gases

E_K - energía cinética, *J*

Para el cálculo Hirsch (1995) sugirió tomar el ángulo de desviación en el rango de: 0,7 a 0,83.

Si se tiene en cuenta que la velocidad de la partícula es un cuarto de la velocidad de detonación, entonces se obtiene según (Caraballo, 2004) como:

$$U_P = \frac{V_d}{4} \quad (2.11)$$

U_P - velocidad de la partícula, m/s

La componente de la presión de la detonación normal de la superficie de la placa se refleja en la superficie inferior de la misma como una onda de extracción. Como consecuencia la placa es acelerada hacia abajo en una serie de pasos. Se ha demostrado que el 90 % de la velocidad terminal de la placa volante se alcanza después de que tres ondas de compresión han atravesado la misma. Se calcula según (Akbari *et al.,* 2004) como:

$$P_D = 432 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_e \cdot \frac{V_d}{1+0{,}8 \cdot \rho_e} \quad (2.12)$$

Donde:

P_D - presión de detonación, MPa

ρ_e - densidad del explosivo, g/cm^3

V_d - velocidad de detonación, m/s

2.4.9. Diseño de experimentos

Una vez definidas las variables y sus niveles, se procedió a la realización de los experimentos de aplicación de carga explosiva en las probetas, se utilizó un diseño factorial (Juran, 1993). Este diseño es muy apropiado cuando han de ser investigados varios factores a dos o más niveles y la interacción entre ellos puede ser importante. En este caso se investigan dos factores, cada uno a dos niveles y se ensayan todas las combinaciones entre los mismos. Se pretende que:

1. Estimar y comparar los efectos de los factores seleccionados.
2. Estimar los posibles efectos de la interacción.
3. Estimar la varianza.

El número de experimentos a realizar se determina acorde a la siguiente expresión:

$N= n^x$

Donde:

N - número de experimentos a realizar,
x - variables o factores considerados,
n - niveles de cada factor.

El número de experimentos *(N)* resultó igual a 12. La matriz de este diseño de experimentos se muestra en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Matriz de planificación de experimentos

No	X_1	X_2	P_D	Vp	HV
1	1	1	P_D1	Vp_1	HV_1
2	-1	1	P_D2	Vp_2	HV_2
3	1	-1	P_D3	Vp_3	HV_3
4	-1	-1	P_D4	Vp_4	HV_4

En cada experimento se realizaron tres réplicas, por lo que el total de experimentos fue de 12.

La realización de ensayos y experimentos en la rama de los materiales requiere de la disponibilidad del equipamiento necesario en óptimo estado de explotación, con todas las garantías de confiabilidad que exigen los resultados y un volumen suficiente de información acerca de las normas y procedimientos para el desarrollo de los mismos. Esto exige el empleo de laboratorios acreditados con sus equipos verificados.

2.5. Preparación para la observación metalográfica

El corte por sierra (arco de sierra (figura 2.4), Dubox (1974), produce severas condiciones de trabajo en frío y no es ventajoso.

Figura 2.4. Arco de sierra.

El corte mediante este método ocasiona superficies irregulares con valles excesivamente altos, dando como efecto más tiempo de aplicación de las técnicas de preparación de las muestras. Generalmente este tipo de corte es utilizado para extraer probetas de piezas muy grandes, para poder luego proceder con el corte abrasivo y adecuar la probeta a los requerimientos necesarios. A pesar de los inconvenientes de este método, se emplea por ser las muestras a cortar de pequeñas dimensiones.

2.5.1. Montaje de la muestra

Con frecuencia, la muestra a preparar, por sus dimensiones o por su forma, no permite ser pulida directamente, sino que es preciso montarla o embutirla en una pastilla. El material del que se componen estas puede ser Lucita (resina termoplástica) o Bakelita (resina termoendurecible). En la figura 2.5 se muestra el proceso de encapsulado de las muestras.

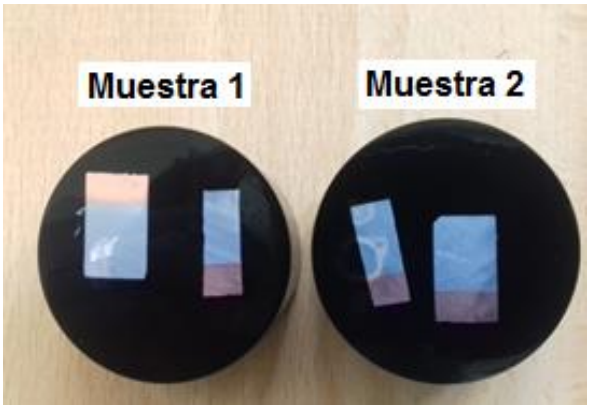


Figura 2.5. Muestras encapsuladas de las aleaciones.

Para el encapsulado se empleó un equipo de compresión del tipo EchoLAB, modelo MP350A, ubicado en la empresa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche.

2.5.2. Desbaste

Después de montada la probeta, se inicia el proceso de desbaste sobre una serie de hojas de esmeril o lija con abrasivos más finos, como se observa en la figura 2.6.

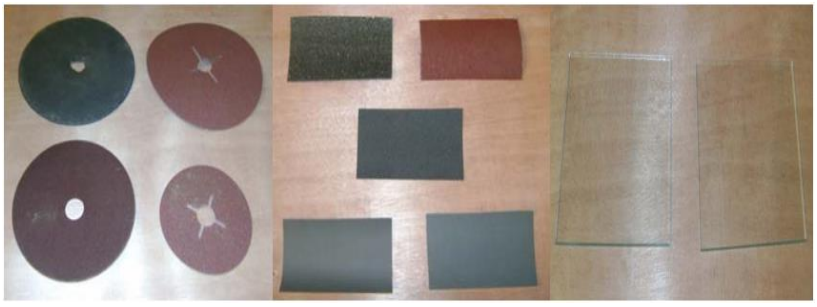


Figura 2.6. Discos abrasivos, papeles abrasivos y planchas de vidrio.

El proceso de desbaste se dividió en 3 fases:

- Desbaste grosero.
- Desbaste intermedio.
- Desbaste final.

Cada etapa de preparación de las probetas metalográficas debe realizarse muy cuidadosamente para obtener al final una superficie exenta de rayas.

El desbaste grosero, es el desbaste inicial, que tiene como objetivo planear la probeta, lo cual puede hacerse a mano y aun mejor con ayuda de una lijadora de banda giratoria. El

disco de lija utilizado es de carburo de silicio con granos de 240 o disco de esmeril No. 1. En cualquier caso, la presión de la probeta sobre la lija o disco de esmeril debe ser suave, para evitar la distorsión y rayado excesivo del metal.

El desbaste intermedio, se realiza apoyando la probeta sobre el disco de lija o de esmeril, colocado sobre una mesa plana o esmeriladora de banda giratoria. En esta fase se utilizan los discos de lija número 320/340 y 400.

El desbaste final, se realiza de la misma forma que los anteriores, con el disco de lija número 600. En todo caso, en cada fase del desbaste se tuvo en cuenta el sistema refrigerante. Cada vez que se cambió de disco, se giró 90 grados, en dirección perpendicular a la que se seguía con el disco de lija anterior, hasta que no se observó la presencia de rayas en la superficie.

2.5.3. Pulido fino

La última aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño cargado con partículas abrasivas seleccionadas en su tamaño, en éste sentido, existen muchos abrasivos, se prefiere a gamma del óxido de aluminio para pulir metales ferrosos, los basados en cobre u óxido de cerio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. Otros abrasivos son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio. La selección del paño para pulir depende del material que se va a pulir y el propósito del estudio metalográfico. Pulido mecánico de una probeta destinada a la observación microscópica tiene por objeto eliminar las rayas e irregularidades producidas en el desbaste.

La forma de realizar el pulido es apoyando la cara desbastada de la probeta sobre un paño embebido con una suspensión de abrasivo y fijando a un disco que gira accionado por un motor. Puede emplearse como paños, el paño de billar, el raso de seda natural o el tercio pelo. Como abrasivo puede usarse una suspensión acuosa de alúmina, de óxido de cromo, de óxido de hierro, de óxido de magnesio o también, para materiales muy duros, una suspensión de polvo de diamante en aceite mineral. El tamaño de la partícula abrasiva en suspensión puede regularse mediante sedimentaciones y decantaciones adecuadas. En general, oscila entre poco más de 100 μ y algunas décimas de micrón. Los discos pueden ser hechos de bronce, aluminio o acero inoxidable, con la cara superior perfectamente pulida

Dubox, (1974).

En la técnica operatoria, cubrir el paño del disco con la suspensión de abrasivo y poner en marcha la pulidora. Tomar finalmente la probeta y apoyar la cara ya desbastada sobre el paño, cuidando de que la cara a pulir esté perfectamente paralela al disco, con el objeto de evitar que la probeta se escape de la mano o que los bordes se redondeen.

La presión deberá ser tal que se logre hacer desaparecer en unos pocos minutos las rayas del último papel, cuidando de no excederse en la presión por el peligro de desgarramiento del paño. Durante la operación de pulido la probeta deberá desplazarse en la dirección del radio, desde el borde hasta el centro del disco. La presión ejercida deberá ser ligeramente inferior aplicada durante la operación de desbaste.

Lavar la probeta en un chorro de agua caliente, secarla con la ayuda de un repasador sin tocar la cara pulida, enjuagar ésta con alcohol, secarla en corriente de aire seco o caliente, terminando el secado con algodón. Observar en el microscopio a 100X (se observa a esta distancia para poder visualizar si la cara de la probeta aun contiene rayas). Si persisten las rayas provenientes del desbaste en el último papel, continuar con el pulido de la forma ya descripta todo el tiempo que sea necesario para que éstas desaparezcan.

Las rayas más finas producidas por el paño durante el pulido y que se caracterizan porque su dirección está desplazada 90 grados respecto de las rayas provenientes del desbaste, así como también las “colas de cometa” generadas por las inclusiones dispersas en la matriz, deberán ser eliminadas prolongando pulido tanto como sea necesario, el control se realiza microscópicamente (Dubox, (1974).

Desbastada, lavada y secada la muestra debe sumergirse en el baño a la temperatura indicada por el tiempo indicado. Extraer del recipiente la muestra, lavarla con abundante agua y secarla.

2.5.4. Ataque químico

Antes de atacar las muestras se le realizó una limpieza química y eliminar todo vestigio de grasas y suciedades en la superficie de la misma. En la tabla 2.6 se muestran los reactivos químicos empleados.

Tabla 2.6. Reactivos para el ataque químico

Metal	Composición del reactivo	Condiciones operativas
Aluminio	45 cc de ácido clorhidrico. 15 cc de ácido fluorhidrico. 15 cc de ácido nitrico (H_2NO_3). 25 cc de H_2O.	Temperatura: 85 – 110 °C de acuerdo con la composición química.
Cobre	Hidróxido de amonio: 5 partes. Peróxido de hidrógeno: 2 - 5 partes. Persulfato de amonio: 10 mg. Agua 90 mg.	Temperatura: 55 – 80 °C Desbaste fino. Pocos segundos de ataque.

El ataque químico se realizó sumergiendo la muestra con la cara pulida en el reactivo, luego se lavó la probeta con agua, se enjuagó con alcohol y se secó en corriente de aire. El fundamento se basa en que el constituyente metalográfico de mayor velocidad de reacción se ataca más rápido y se verá más oscuro al microscopio y el menos atacable permanecerá más brillante, reflejará más luz y se verá más brillante en el microscopio.

2.5.5. Examen metalográfico

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleará para la comparación de las micrografías obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular marca EchoLAB, modelo NIM – 100 como se muestra en la figura 2.7.

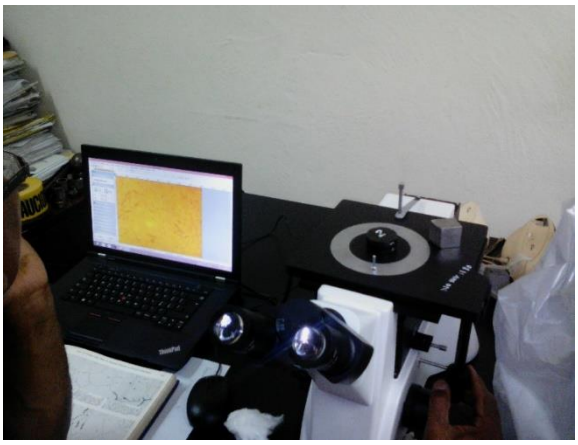


Figura 2.7. Ensayo de la fotomicrografía para la muestra atacada.

El equipo está ubicado en el Laboratorio de Materiales de la empresa “Gustavo Machín Hoed de Beche” de Moa, dotado de una cámara instalada el hardware IMI. VIDEOCAPTURE, que refleja la micrografía en el computador. Para observar las probetas, se nivelaron en un dispositivo con plastilina (ASTM E 3-95; NC 10-55: 86 y NC 04 - 77: 86).

2.6. Ensayo microestructural

El examen de la microestructura es muy útil para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos mecánicos, tratamientos térmicos y composición general. La microestructura es un instrumento para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales. Las figuras 2.8 (a) y 2.8 (b) se corresponden con las muestras patrón de las aleaciones de aluminio y cobre respectivamente.

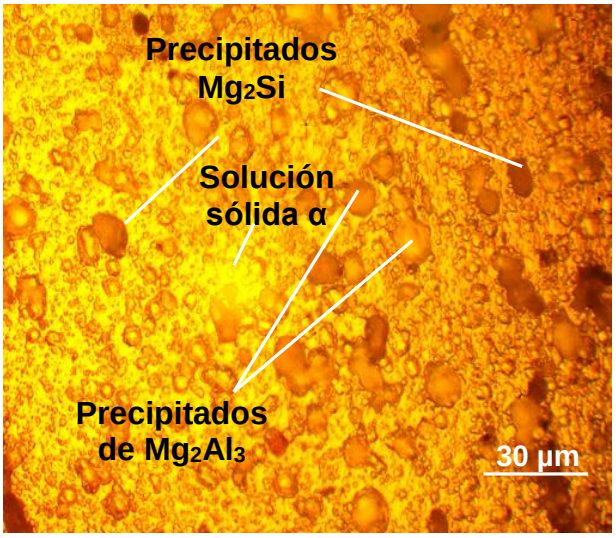


Figura 2.8 (a). Microestructura de la aleación de aluminio.

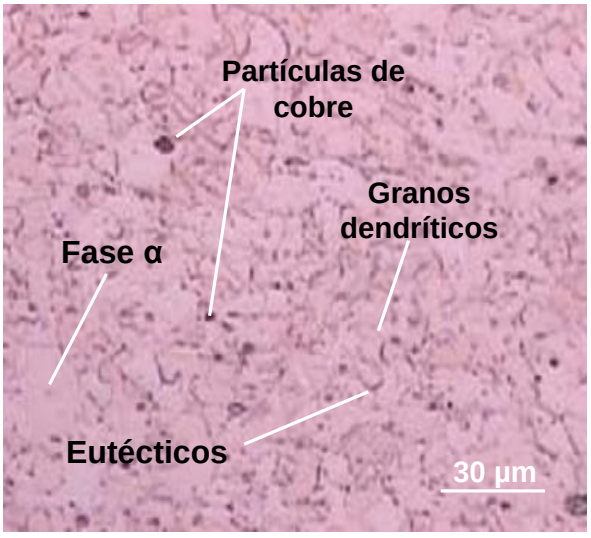


Figura 2.8 (b). Microestructura de la aleación de cobre.

La microestructura de la aleación de aluminio presenta granos pequeños y una red continúa de partículas finas del compuesto intermetálico Mg_2Al_3 llamada fase β en los límites de grano. Se observan granos equiaxiales de aluminio, predominantemente. Ocurre la precipitación en el interior de los granos. En los límites de granos se llegan a formar largos precipitados de Mg_2Al_3.

La aleación de cobre está precedida por granos dendríticos y por la formación de eutéctico, orientados en el sentido del enfriamiento, así como por partículas de cobre. La fase α es muy maleable en frío, permitiendo grandes deformaciones por laminado, repujado, estirado y forja en frío. Tanto la resistencia a la tracción (tensión máxima) como la tensión de fluencia

y la deformación a la ruptura aumentan con el contenido de Zn.

2.7. Determinación de la microdureza

El ensayo de microdureza se aplicó para la determinación de la dureza de los volúmenes microscópicamente pequeños de la aleación. Para el ensayo se utilizó un microscopio modelo: PMT-3 No 168, ubicado en el laboratorio de microscopia de minas del ISMM Moa. La superficie de la probeta se preparó de la misma manera que para el análisis microestructural (desbaste y pulido).

En seis mediciones de dureza se determinó por el tamaño de las huellas. Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de análisis, se realizó el ensayo para una carga de 20 g, donde se midió los diámetros de la huella de la punta de diamante con 136 grados, con una penetración en un tiempo de 15 segundos, las medidas se tomaron para los puntos de prueba seleccionados aleatoriamente en la superficie.

La microdureza (VHN) se calculó por la ecuación siguiente:

$$VHN = 1{,}58 \cdot \frac{P}{\bar{d}^2} \tag{2.15}$$

Donde:

VHN - número de dureza Vickers; kgf/mm^2

1,58 - constante

P - peso; kgf

Diámetro medio = $\bar{d}^2$ (mm) $\bar{d} = \dfrac{(d_1 + d_2) + (d_3 - d_4)}{2}$ (2.16)

Microdureza promedio: $\overline{VHN} = \dfrac{\sum VHN_1 + VHN_2}{2}$ (2.17)

2.8. Conclusiones del capítulo

- Se caracterizaron los parámetros en el proceso de soldadura por explosión y se determinó que el proceso puede estar dividido en tres etapas básicas, la detonación de la carga explosiva, la deformación y aceleración de la placa volante y la colisión entre ambas placas, lo cual permite lograr una unión satisfactoria.
- Quedó planteado el comportamiento microestructural de las aleaciones a soldar, a través de las cuales se podrá predecir el comportamiento de la unión soldada disímil en la zona fundida y la zona de influencia térmica.
- Se escogió el explosivo industrial TECTRON 100, emulsión encartuchada en mangas de polietileno de diferentes diámetros, única sustancia explosiva que se comercializa en la actualidad en Cuba.

CAPÍTULO 3

ANALISIS Y VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

Introducción

Se exponen los resultados derivados del trabajo experimental y a partir de los mismos, las expresiones matemáticas estadísticas que describen las regularidades del comportamiento deformación del proceso de soldadura por explosivos de aleaciones disímiles sometidas a la acción de las cargas por explosivos.

El objetivo de este capítulo es establecer el procedimiento para el proceso de uniones soldadas por explosivos de las aleaciones disímiles de aluminio y cobre, así como el análisis de las microestructuras obtenidas.

3.1. Determinación de los parámetros de soldadura por explosivos

El proceso de unión de materiales diferentes mediante soldadura por explosión comienza por la limpieza de las superficies a unir. Aunque el barrido de la onda explosiva ejerce una limpieza de las superficies.

Para determinar la velocidad de colisión y la velocidad de la placa volante por la ecuación 2.1 se consideró una velocidad de detonación de 2 500 m/s, un radio de la carga calculado por la ecuación 2.8 con un valor de 1 437 kg, por lo que esta velocidad de colisión es de:

V_c = 1 065 m/s.

La velocidad de colisión lograda es suficiente para mantener el metal con aspecto de fluido viscoso y lograr la unión metalúrgica entre ellos, ya que este mecanismo está basado en que bajo la acción de grandes cargas de choque que impactan la pieza a alta velocidad pueden precipitar fases secundarias, sobre todo del tipo carburo, en la matriz austenítica, lo que fue planteado por Zuidema *et al.* (1987), Lalonde (1998) y Xiaoyan y Yujiao (2001) y Caraballo (2004).

Según Sudarshan (1983), la velocidad de colisión (m/s), con la cual la onda de detonación recorre una columna de explosivo, puede ser afectada por el tipo de producto, por su diámetro, por el confinamiento, la temperatura y el cebado. En los explosivos comerciales fluctúan desde cerca de 152 hasta más de 670 m/s. Durante el proceso las primeras capas de material tienen características de plasma debido a la alta velocidad de impacto de 200 a 500 m/s. Mientras mayor sea la rapidez de la explosión, mayor suele ser el efecto de

fragmentación. La presión en el punto de colisión, que puede ser entre 700 a 4 200 MPa, los cuales son suficientes para mantener el metal con aspecto de fluido viscoso.

El volumen del explosivo necesario para realizar la unión fue calculado por la ecuación 2.7 para un largo de la placa de 100 cm, un ancho de 120 cm y un espesor del explosivo de 1,5 cm, este volumen es suficiente para unir aluminio y cobre. El volumen obtenido fue de:

$V = 18\ 000\ cm^3$.

Se considera este volumen de explosivos ya que las cargas explosivas planas tienen un comportamiento diferente a otros tipos de cargas explosivas como las cilíndricas, en particular en lo que respecta a la velocidad de detonación.

La forma más efectiva de reacción explosiva, para el endurecimiento de metales es la detonación, definida como: difusión de la reacción por la masa de sustancia explosiva con una velocidad supersónica, constante para cada sustancia y altura límite de la carga, condicionada por el paso de una onda de detonación.

3.2. Cálculo de la velocidad de impacto

Por las ecuaciones 2.4 y 2.5 se determinó la velocidad de colisión y la temperatura de separación de las placas *(T)*, para la variable de temperatura se consideró una velocidad de 2 500 m/s, la masa molar del aire que es de 0,029 J/mol y la constante universal de los gases que es de 8,31 J/mol·K, al sustituir los valores se obtiene que la temperatura necesaria para la unión de la placa volante y la velocidad de colisión por la ecuación 2.4 es de:

V = 4 320 m/s

La velocidad de la detonación es dependiente del espesor de capa explosiva. La presión de detonación de los explosivos comerciales alcanza valores entre 2 y 10 GPa. Estos valores proporcionan un criterio muy importante cuando se precisan unir materiales con dureza aluminio y cobre, compactos y complementan la información que brinda la curva de potencia. La presión de detonación es una propiedad que refleja bien el poder rompedor o brisancia de los explosivos criterio que ha sido expuesto por (Verstraete *et al.* 2011).

3.3. Ángulo de colisión

Para la determinación del ángulo de desviación del explosivo se tuvo en cuenta la ecuación 2.10, se tomó para este trabajo el valor de 0,8, de igual manera se consideró el ángulo de colisión *β*, considerando la ecuación 2.2, parámetros también considerados por Almira (2015), se obtiene:

$\beta = 7$

3.4. Energía cinética del explosivo

La energía cinética para poner en movimiento ambas placas y lograr la colisión entre ellas fue calculada por la ecuación 2.3, en este caso la masa de la placa volante es de 9,42 kg y una velocidad de 500 m/s, calculado por la ecuación 2.6, permite establecer que la energía cinética para lograr la unión de los materiales es de:

$E_c = 15\ 750\ J$

El resultado de la energía cinética, establece la dinámica de vuelo para la energía mínima de fragmentación, necesaria para la realización del conjunto soldado con diferentes masas, debido a la influencia de ley arrastre del fragmento y a la zona del contacto de las placas, lo que ha sido reportado por Gold (2007).

3.5. Temperatura de separación

Para la determinación de la velocidad de colisión y la temperatura de separación de las placas *(T)*, donde la variable temperatura se consideró con, una velocidad de 2 500 m/s, la masa molar del aire que es de 0,029 J/mol y la constante universal de los gases que es de 8,31 J/mol·K, la velocidad de colisión por la ecuación 2.4 es de 1 430 m/s, al sustituir los valores se obtiene que la temperatura necesaria para la unión de la placa volante es de:

$T = 7\ 270\ K$

La temperatura se considera como una condición para la formación del chorro de reacción en el punto de la colisión, esencial para la soldadura. De igual manera es necesario considerar, para realizar el barrido de las capas del óxido delante de la superficie de los metales y garantizar la limpieza de las caras y formar la unión metalúrgicamente los átomos

de los materiales a una distancia interatómica y formar las olas de presión producidas por el explosivo.

3.6. Carga explosiva, así como las dimensiones de la misma

Las cargas explosivas planas tienen un comportamiento diferente al de las cargas explosivas cilíndricas, en particular en lo que respecta a la velocidad de detonación.

El volumen del explosivo, permite el proceso de soldadura por presión, que provoca la aparición de la deformación plástica en la interfase, así como la limpieza de la superficie para facilitar el proceso de difusión sólida que tiene lugar. Para un volumen de explosivo de 18 000 cm^3 y una densidad de 1,15 g/cm^3, por la ecuación 2.9 se calculó la masa del explosivo, la cual es de:

m= 20 700 g

La velocidad de la partícula se calculó por la ecuación 2.11 donde se tuvo en cuenta una velocidad de detonación de 2 500 m/s, la cual fue dividida por cuatro y se obtuvo un valor de:

U_p= 625 m/s.

La presión y la velocidad involucradas en el proceso, son dictadas por las propiedades y características de los polvos a ser compactados, ya que, durante la compactación dinámica, la onda de choque induce altas presiones que permiten la unión entre partículas y formación de compacto con altas densidades, sin inducir difusión de largo alcance o transformación de fase alguna. El efecto de frotación cortante, que se supone tiene lugar durante la compactación dinámica, produce una fuerte unión entre las partículas lo que ha sido reportado por (Kulawiak, 2004 y Karosich, 2006).

La presión de detonación considerada para la unión de los materiales disímiles donde se tuvo en cuenta la velocidad de detonación de 2 500 m/s y la densidad de los materiales más tenaz, en este caso para el de aluminio es de 0,3 kg/m^3 y el cobre es de 1,1 kg/m^3, fue calculada por la ecuación 2.12 donde la misma es de:

P_D= 2 911 MPa.

La velocidad del sonido de la placa volante depende de las características del medio en que se realiza dicha propagación y no de las características de la onda o de la fuerza que la genera. La velocidad del sonido varía también ante los cambios de temperatura del medio. Esto se debe a que un aumento de la temperatura se traduce en un aumento de la frecuencia con que se producen las interacciones entre las partículas que transportan la vibración y este aumento de actividad hace aumentar la velocidad, criterio expuesto por (Moga y Kisielewski, 1979).

3.7. Determinación del punto de colisión

La magnitud de la longitud de onda como la altura de la onda del dibujo ondulado formado en el interfaz de la unión después del recubrimiento explosivo incrementa proporcionalmente a la velocidad de colisión y el ángulo de colisión entre el material de recubrimiento y el material de base y la forma de la ondulación, es decir, la proporción de la altura de la onda con respecto a la longitud de onda es determinada por la proporción relativa de densidad entre el material de recubrimiento y el material de base.

En el caso de que la densidad del material de recubrimiento y el material de base sean aproximadamente iguales, en cuanto al metal de recubrimiento, en que la porción de densidad de ambos es aproximadamente igual, como en este caso que se tiene aluminio-cobre, la ondulación está constituida en la interfase de la unión muestra una forma similar a la de una ondulación senoidal.

3.8. Análisis microestructural de las muestras

Para realizar el análisis microestructural de las muestras, se tuvo en cuenta las diferentes cargas a la que fueron sometidas cada una de ellas. En la figura 3.1 se muestra la microestructura tomada a 5 mm del inicio de la explosión.

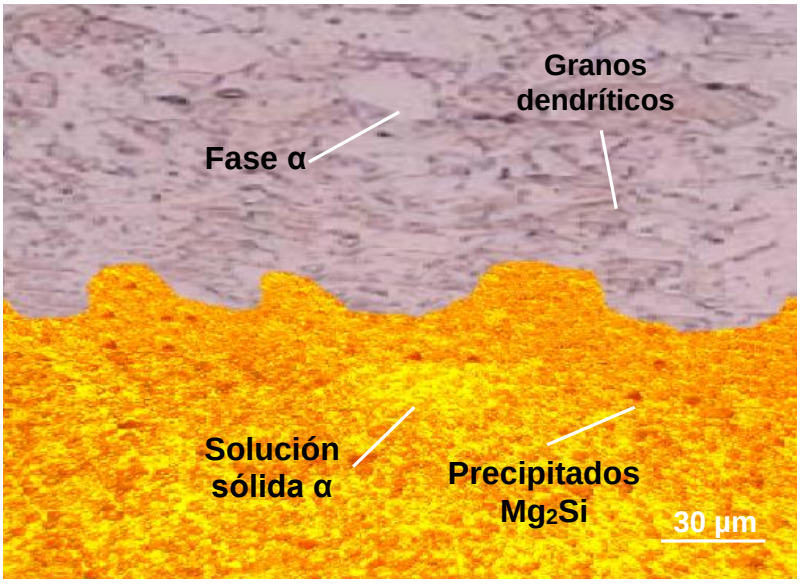


Figura 3.1. Zona a 5 mm del inicio de la explosión. 400X

La microestructura analizada en la figura 3.1 muestra diferentes orientaciones cristalinas del grano, las que contribuyen a la activación de un conjunto de sistemas de deslizamiento y se convierten en un sistema activo que determina los niveles de deformación y tensiones locales del grano y consecuentemente con la deformación a nivel macroscópico.

Se observa en la parte superior que se corresponde con la aleación de cobre, que mantiene la misma estructura de granos dendríticos, pero alineados en la dirección que ocurrió el proceso de explosión y por este mismo efecto, las partículas de cobre se alinean en esa misma dirección. En la aleación de aluminio, lejos de la interfase, se mantienen los mismos microconstituyentes determinados en la muestra patrón.

Como se observa en la interfase del cordón se presenta una modificación de la microestructura en la línea de fusión con refinamiento de grano, mientras que en la ZAT existe un crecimiento de grano marcado, por los límites de grano y en el interior de los granos existen pequeños subgranos, en cuanto al cordón de soldadura presenta una morfología en forma de ola, se observa que estas olas tienen un comportamiento ondulado no profundo, lo cual puede estar asociado a la presión al inicio de la detonación.

En la figura 3.2 se realiza el análisis microestructural, pero a 15 mm del inicio de la detonación.

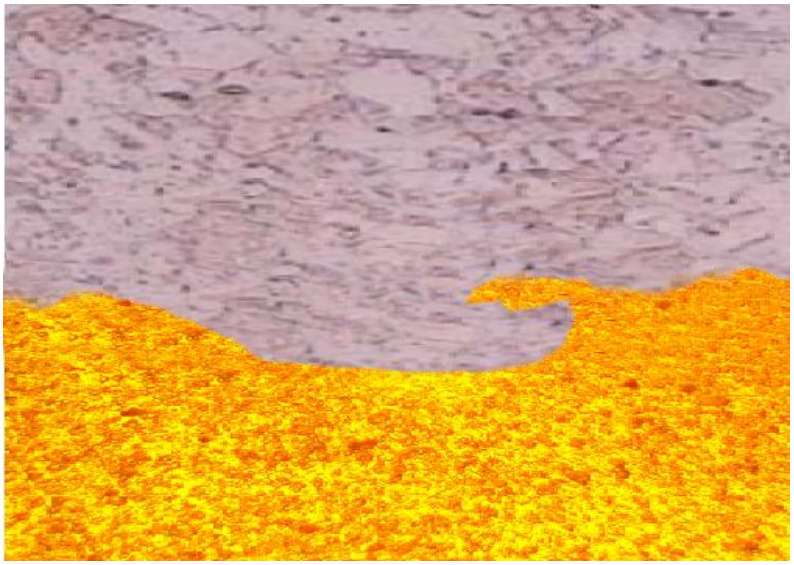


Figura 3.2. Zona a 15 mm del inicio de la explosión. 400X.

En la figura 3.2, obtenida a una distancia de 15 mm del inicio de la explosión, la formación de las olas es en forma de cresta, con mayor deformación de la estructura, lo que demuestra que en la medida que el chorro de reacción interactúa entre los dos materiales, se logra un compactamiento metalúrgico más sólido. En la interfase de la unión existe la disminución del tamaño de los granos por la compactación dinámica cerca de la línea de fusión, mientras que, en el centro del cordón de soldadura, la microestructura es equiaxial debido a la solidificación constitucional del cordón después de realizado el proceso de soldadura.

Se siguen manteniendo las mismas estructuras en ambas aleaciones, aquí se puede observar el comportamiento descrito por las olas obtenidas en la zona de fusión del material, donde el material de menor dureza, la aleación de aluminio, se introduce por efecto de la difusión en el cobre, ya que el primero es más dúctil y tenaz y permite que por los átomos del mismo se difunda las estructuras de los átomos del material de mayor dureza.

Por la propiedad mecánica que presenta el cobre con respecto al aluminio, no se garantiza una formación de olas con características continua y no se logra un ensanchamiento en las bandas de ambas interfase del cordón, pero si se pone de manifiesto el fenómeno de la acritud.

En la figura 3.3 se muestra el comportamiento microestructural obtenido al final del proceso de explosión entre ambas placas.

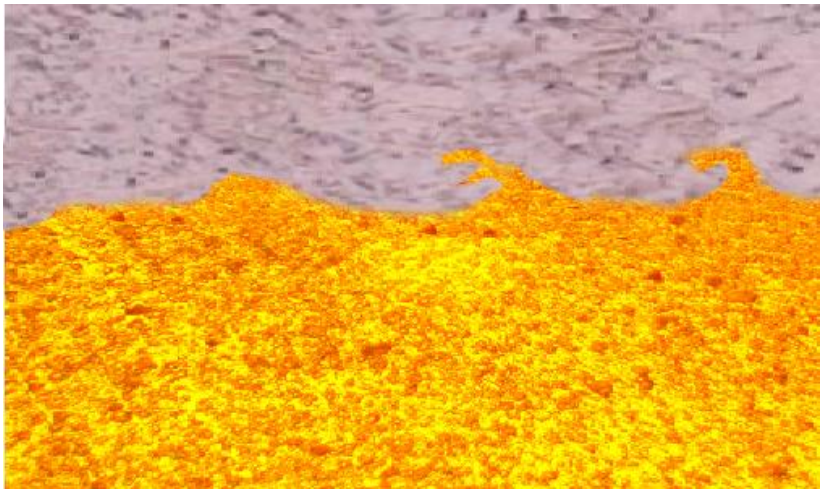


Figura 3.3. Zona final del proceso de explosión (400X).

En la zona final de la unión se observa que las olas obtenidas presentan una formación en forma de crestas, pero con una ondulación menos prolongado lo que demuestra que al final del proceso existe una estabilidad en la explosión, donde por efecto del chorro que ha garantizado la limpieza, se logra que entre ambos materiales la penetración sea más uniforme.

Se siguen manteniendo las mismas microestructuras de ambos materiales, pero las olas han disminuido en tamaño y penetración, se incrementan en la medida que se acercan a la zona de fusión del cobre, luego de ser sometida a proceso de soldadura ha existido una disminución de los granos, la soldadura por explosivos actúa como un tratamiento térmico de alivio de tensiones, disminuyendo las tensiones internas del ciclo térmico de soldadura.

El apilamiento o aplastamiento de los granos es resultado de una integración causada por el deslizamiento intracristalino, por la migración de dislocaciones, acompañada de endurecimiento por deformación, lo que consolida progresivamente el cristal.

Por otra parte, el estado de tensiones en el grano, presumiblemente activan otros sistemas de deslizamiento, los que interactúan con él o los sistemas ya existentes, este mecanismo dificulta aún más la movilidad de los átomos y origina el fenómeno conocido como endurecimiento latente.

3.9. Determinación de la dureza de las muestras

Para la evaluación de la dureza se realizó seis mediciones de dureza como mínimo en bordes, centro e interfase de las aleaciones, por la ecuación 2.15, las que luego fueron promediadas, en la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.1. Resultados de análisis de la dureza.

Zona de medición	Materiales	
	Aluminio (HV)	Cobre (HV)
Borde	110,35	111,76
Centro	144,41	122,04
Interfase	149,08	144,87

Se puede observar que las zonas evaluadas presentan variaciones en cada una de las mediciones a lo largo del ensayo. Se denota que hay diferencia en las mismas para ambos materiales. Las durezas, reportadas en todos los ensayos, son consecuentes con los tamaños de granos obtenidos en las diferentes microestructuras.

Las durezas obtenidas anteriormente son por efecto de la acritud, al reducir el tamaño promedio de los granos y permitir el compactamiento de los mismos. Cuando la presión ejercida excede el límite de fluencia de las aleaciones, la superficie es plásticamente deformada en frío y el material fluye debajo de la capa deformada, entonces como resultado se obtiene una superficie muy pulida y densamente compactada.

El apilamiento o aplastamiento de los granos es resultado de una integración causada por el deslizamiento intracristalino, por la migración de dislocaciones, acompañada de endurecimiento por deformación, lo que consolida progresivamente el cristal.

La causa del incremento de la dureza en las muestras soldadas por explosivos, se debe a dos factores. El primero es que, al disminuir el tamaño, aumenta el número de fronteras de grano en una misma área, esto provoca una elevación de las tensiones a nivel cristalino. El otro es que en los metales y aleaciones policristalinas, los bordes de los cristales constituyen un obstáculo ante el que se acumulan las dislocaciones.

Para incremento de la velocidad de detonación y velocidad de colisión entre las aleaciones, se puede observar que en la medida que se incrementan estas dos variables, aumenta la dureza. Lo que demuestra que las mismas son directamente proporcionales, ya que las

líneas obtenidas mantienen una tendencia lineal a incrementarse en la medida que se incrementan estos valores, lo que trae consigo el incremento de la dureza.

3.10. Determinación de impacto económico

Para la estimación de los costos que se desean determinar se parte de la metodología del cálculo del costo de fabricación conocida como “Ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles” que en formato de hoja de cálculo se utiliza como norma empresarial en la empresa Mecánica del Níquel Comandante” Gustavo Machín Hoed de Beche” de Moa.

Una vez considerados los tiempos para la elaboración de las uniones por explosivos y teniendo en cuenta la incidencia de máquinas, operarios, energía eléctrica, el costo estimado de fabricación por concepto de explosión se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Costo por concepto de tiempo y consumo

Elementos	CUP	CUC
Materias primas y materiales	**1,60**	**1,60**
Combustibles y lubricanes	0,01	0,01
Energía eléctrica	0,28	0,28
Agua	0,32	0,32
Útiles y herramientas	0,28	0,71
Sub total gastos de elaboración	**10,14**	**3,61**
Otros gastos directos	**1,37**	**0,17**
Gastos de fuerza de trabajo	3,53	0,57
Salarios	1,95	0,00
Otros gastos de fuerza de trabajo	0,83	0,00
Estimulación	0,57	0,57
Gastos indirectos de producción	**3,42**	**2,40**
Depreciación	0,05	0,00
Materiales	0,67	1,21
Mantenimiento y reparación	2,70	1,19
Gastos generales y de administración	**0,78**	**0,19**
Depreciación	0,03	0,00
Combustible y lubricantes	0,02	0,00
Energía eléctrica	0,01	0,01
Gastos bancarios	**1,04**	**0,28**
Gastos Totales o Costo de Producción (1+2)	11,74	5,21
Margen utilidad S/ base autorizada 20 %	2,03	0,10
% sobre el gasto en divisas (hasta un 10 %)	-	0,16
Componente en pesos convertibles	**8,39**	**5,37**

Como se aprecia en la tabla 3.2, el gasto en el que se trabaja en el laboratorio en preparación de la probeta y observación de las muestras luego del proceso de soldadura con explosivos es de 8,39 CUP y 5,37 CUC; por lo que se puede considerar un costo relativamente pequeño al tener en cuenta la importancia que reviste la unión disímil, como alternativa de utilizar bimetálico en las empresas eléctricas y mitigar el efecto de la corrosión galvánica.

3.10.1. Valoración de las dimensiones ambientales, sociales y económica

Las explosiones resultan de la descomposición de sustancias puras. Cualquier reacción química puede provocar una explosión si se emiten productos gaseosos, si se evaporizan sustancias ajenas por el calor liberado en la reacción o si se eleva la temperatura de gases presentes, por la energía liberada. La reacción química más conocida que produce gases a alta presión por medio de otros gases o vapores, en la combustión de gases en el aire. Sin embargo, otros gases oxidantes cómo el oxígeno, cloro, flúor, pueden ser sustituidos por algo, lo que produce con frecuencia procesos de combustión muchos más intensos.

Los polvos y nebulizadores (líquidos en estado pulverizado) pueden generar, al quemarse en el aire o en otro medio gaseoso reactivo, gases a elevada presión. La combustión puede producirse con cualquier partícula, pero en la práctica de mayores riesgos se encuentran en las de 840 micras o menos. A medida que disminuye el tamaño más fácil se produce la dispersión y más estable y duradera resulta. Las partículas más finamente definidas implican mayor riesgo al facilitar la formación de dispersiones, mantenerlas durante más tiempo y quemarse más rápidamente las partículas de mayor tamaño.

3.10.2. Dimensiones ambientales y social

La reducción de la concentración de oxidantes, las explosiones se pueden evitar manteniendo la concentración de oxígeno u otros oxidantes en el local por debajo de la necesaria para que se produzca la combustión a la temperatura y presión del proceso. El método más común de reducir dicha concentración es el purgado o inertizado del espacio con un gas poco oxidante. El riesgo de incendio y explosiones de muchos materiales se puede evitar, su almacenaje y procesos se utiliza un gas inerte adecuado. Esto se puede hacer porque la combustión de la mayoría de los materiales no se produce si hay poco oxígeno en la atmósfera o si su concentración se reduce por debajo de un límite dado.

Las explosiones generan afectaciones auditivas cuando se desarrollan a pocas distancias de los seres humanos, también ejercen influencia sobre la fauna eliminándola, por el efecto de la onda expansiva que se genera.

Cuando se utiliza un gas inerte como medio de controlar los fuegos y explosiones, su principal función es evitar las mezclas explosivas de vapor y aire, generalmente en espacios cerrados. Algunos ejemplos son la inertización de los depósitos antes de repararlos o el vaciado de los mismos donde ha habido líquidos inflamables mediante aire a presión.

3.11. Conclusiones del capítulo

- Las microestructuras obtenidas han permitido observar y analizar los importantes cambios a la que están sujetas las aleaciones soldadas por el proceso de explosión, lo cual permite plantear que se ha logrado una unión metalúrgica deseable.
- Se determinó a través de la observación microscópica que las uniones disímiles logradas luego del proceso de soldadura no es producto del cambio de fase, sino a una cohesión entre los átomos de los materiales base.
- Se caracterizó la incidencia medioambiental del proceso de soldadura por explosivos, donde se plantea que entre los gases que se generan se encuentran el bióxido de carbono, el nitrógeno y el vapor de agua, los cuales no son tóxicos en el sentido clásico de la palabra, pero afectan el cuerpo humano.

CONCLUSIONES GENERALES

- Para realizar las uniones disimiles de aluminio y cobre por el proceso de explosión se calculó un volumen de explosivo que es de 18 000 cm^3 y una densidad de 1,15 g/cm^3 con lo que se determina una velocidad de 2 500 m/s que permitió el flujo plástico de las aleaciones y lograr la unión metalúrgica.
- Las microestructuras obtenidas en forma de ola del proceso de detonación, justifican el comportamiento morfológico obtenido, de un aluminio microaleado, así como estructura silicio/magnesio, normalmente contiene un mayor contenido de magnesio de 0,50 %, el cobre una microestructura plomo/cinc, normalmente contiene un mayor contenido de cinc de 0,69 %.
- En los perfiles de dureza realizados en las uniones disimiles se determinó un incremento de dureza de HV 149,08 para el aluminio hasta HV 144,87, para el cobre.
- Al realizar la valoración económica del proceso de soldadura por explosivos de materiales disímiles de las aleaciones, donde se consideró la incidencia del consumo de la energía eléctrica de los equipos, materia prima y mano de obra indirecta tiene un costo estimado de 8,39 CUP y 5,37 CUC, por lo que se considera un proceso económico para la unión metalúrgica de aluminio y cobre.

RECOMENDACINES

- Realizar en próxima investigación proceso de soldadura por arco eléctrico en materiales disímiles y luego unirlos por proceso de soldadura por explosivos para determinar el efecto de este proceso en el alivio de tensiones de la unión soldada.
- Someter a ensayos de desgastes con el empleo de un tribómetro los materiales aluminio-cobre para evaluar la resistencia de las mismas luego de ser sometidas a soldadura por explosivos.
- Considerar someter a ensayos de tensión muestras de soldaduras realizadas por explosivos para determinar la resistencia de las misma luego de aplicado este proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acarer, M., Gulenc, B.; F. Findik, Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength. Materials & Design, 24 (8), 2003, p.659 - 664.
2. Aguilar, F. Los explosivos y sus aplicaciones. Editorial Labor, S.A. 1978.
3. Akbari, M. The mechanics of explosive welding. University of Manchester Institute of Science and Technology UMIST PhD thesis; 2001.
4. Akbari, M. A.-H., S.; Burley, S.; Byers, B. Simulation of explosive welding with ANFO mixture, J Prop Exp Pyro 29 (3). 2004, p. 188 - 181 196.
5. Al-Hassani, S. Salem, S.; Lazari, G. Explosive welding of flat plates in free flight, Int J Imp Eng 1 (2). 1984, p. 85 - 81 01.
6. Almira, N. Microestructuras de uniones disímiles obtenidas mediante el proceso de soldadura por explosivos. Tesis en opción al título de ingeniero mecánico ISMMMoa, Tutor: Dr. C. Tomás Fernández Columbié, 2015.
7. Amit, J. Introduction to Explosive Welding. Metal Web News. 4 (28). 2008.
8. Arivazhagan, N.; Singh, S.; Prakash, S.; Reddy, G., An assessment of hardness, impact strength, and hot corrosion behaviour of friction-welded dissimilar weldments between AISI 41 40 and AISI 304, International Journal of Advance Manufacturing Technology, 2008, Vol 39 N0 1 5, p. 679 - 689.
9. Avner, S. H., J. L. E. Haen and G. B. Mejía. Introducción a la metalurgia física, McGraw-Hill. 1966.
10. AWS. The metallurgy, welding and qualification of microalloyed (HSLA) steel weldments, AWS international conference. Houston, Texas: s.n, 1996.
11. AESTU, Asociación Española de Soldadura y Tecnología de Unión, Curso de Formación de Ingenieros Europeos de Soldadura, Pontificia Universidad Católica, España. 2002.
12. Ben-Artzy, A. Wave formation mechanism in magnetic pulse welding. International. Journal of Impact Engineering, 37 (4). 2010, p. 397 - 404.

13. Broeckhove, J. Experimental research on magnetic pulse welding of dissimilar metals.2010, UGent.

14. Burgos, S. Procesos metalúrgicos durante la soldadura por fusión, UCLV. 1986.

15. Byers, B. Braithwaite, M. Williamsburg equation of state for detonation product fluid. Shock Comp Cond Matt, Colorado; 1993.

16. Caraballo, M. A. Recuperación de equipos y piezas por la tecnología de conformación y soldadura por explosivos. Revista Minera y Geologia. XIV (2), 1997.

17. Caraballo, M. A. Comportamiento de piezas de acero Hadfield endurecidas mediante explosivos. Revista Minera y Geologia. XX (1) 2004.

18. Casals, B. Soldadura y embutición por explosión del titanio con el acero 20K para la fabricación de recipientes a presión.Tesis en opción al grado de Doctos en Ciencias Técnicas. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1997.

19. Cowan, G. Bergman, O.; Holtzman, A. Mechanics of bond wave formation in explosive cladding of metals, Met Tran 2, 1971, p. 3145.

20. Crossland, B. Explosive welding of metals and its application, Oxford University Press, New York. 1882.

21. Davis, W. The detonation of explosives, Sci Am 256 (5), 1987. pp. 98 - 106.

22. Dick, R. Explosives and Blasting Procedures Manual. U.S. Bureau of Mines. 1983.

23. Dubox, E. J. Prácticas de metalografía, Ediciones Marymar. 1974.

24. Durgutlu, A. O., H.; Gulenc, B. Investigation of effect of the stand-off distance on interfaz characteristics of explosively welded copper and stainless steel. Materials & Design, 29 (7). 2008.

25. Durgutlu, A., B. Gulenc, and F. Findik, Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding. Materials & Design, 26 (6), 2005. p. 497 - 507.

26. Drury, F. C. Westmaas, D.J. Considerations Affecting the selection and use of moders chemical explosives. SEE. 1980.

27. Feodorov, A. and E. R. López. Suministro eléctrico de empresas industriales, La Habana: Editorial Pueblo y Educación. 1980.

28. Frenkel, D.; Smit, B. Understanding Molecular Simulation: From Algorithms to Applications, Vol. 1 of Computational Science Series, 2 Edn., Academic Press, San Diego, 2002.

29. García, A., Gómez, C., Oria, V. Valoración del desempeño de un dispositivo de autoalimentación diseñado para la evaluación operativa de electrodos revestidos. Soldagem & Inspeção. 14 (1), 2009, p. 15 - 21.

30. Grella, C. y A. Miguel. Selección de los parámetros de pulso en la soldadura de aleaciones al-si y Al-Mg con el proceso GMAW-P. Trabajo especial de grado. Facultad de ingeniería. Universidad Central de Venezuela. 2001.

31. Gold, V. Engineering model for design of explosive fragmentation munitions, US Army ARDEC, AETC, Picatinny Arsenal, NJ, February 2007.

32. Guy, A. G. Metalurgia física para ingenieros. 1965.

33. Gurney, R. Fatigue of Welded Srtuctures, Cambridge at the University Press 1968.

34. Hicks, John (1999). Welded Joint Design . New York: Industrial Press. ISBN 0- 8311 - 3130-6.

35. Holtzman, A. Cowan, G. Bonding of metals with explosives. WRC Bulletin No. 104, New York, N. Y. Welding Research Council. 1965.

36. Kulawiak, M. Strong Detonation Effects on Shaped Charges Jetting. Master's thesis, NPS, June 2004.

37. Madhusudan, G.; Srinivasa, R., Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar stainless steel electron beam and friction welds, International Journal of Advance Manufacturing Technology, 2009, Vol 45, Nº 5, p. 875 – 888. ISSN: 1433-3015.

38. Mariño, M. Estudio del deterioro por abrasión e impacto de los martillos de las trituradoras de mandíbula, fabricados de acero hadfield. Tesis en opción al titulo de Master. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2000.

39. Martín, O., M. López y F. Martín. Redes neuronales artificiales para la predicción de la calidad en soldadura por resistencia por puntos. Revista de Metalurgia 42(5); 2006, pp. 345-353.

40. Meriño, G. Conformación, soldadura y endurecimiento de metales con explosivos. Reporte de aplicación. Cenic. La Habana. 1977.

41. Metzger, G. y Lison, R., Electron beam welding of dissimilar metals, Welding Journal, V.55, N.8, p. 230s - 240s, 1976.

42. Mur, F; Manero, J.; Rodríguez, J., Aleaciones ligeras. Ediciones UPC. 2001.

43. Nelson, D.; Baeslack, W.; Lippold, J. Characterization of the weld structure in a duplex stainless steel using colour metallography, Metallography, 18 (4): 215-225, 1985.

44. Otaño, N. J. Fragmentación de rocas con explosivos.1998.

45. Parody, G. Investigación sobre el endurecimiento del acero Hadfield por el método de explosivos. ISMMMoa. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 1991.

46. Perkins, J. Akin, K.; Nylund, Z. Explosive Welding of a 12" x 12" x 0,125" ASTM B152 Copper Plate to a 12" x 12" x 0,5" ASTM A516 Gr70 Normalized Steel Plate. 2005.

47. Pernia, J. Manual de perforación y voladura de rocas. IGME. Madrid. 1988.

48. Petushkof, G. Kudinof, B.; Trufiakof, B. Parámetros de cargas de sustancias explosivas para eliminación de tensiones residuales soldadas a tope, Avtomatichescaia Esvarca, No 1. 1976.

49. Petushkov, V. Titov, V. Parameters of shockwave loading used to relieve residual welding stresses by explosion treatment, Paton Welding Journal, No.4, pp 57. 2001.

50. Robinson, J. A fluid model of impact welding. In: Proc 5th int conf high ener rate form phil mag, vol. 31(1);1975, p. 587.

51. Rodriguez, P. Manual de soldadura. 2013.

52. Santiago, D., G. Lombera, A. Cassanelli, S. Urquiza and L. de Vedia. Analisis térmico en soldadura por fricción. Mecánica Computacional 24: pp. 2781-2793. 2005.

53. Tabbataee, S.; Honarvar, F. A comparative evaluation of ultrasonic testing of AISI 316L welds made by shielded metal arc welding and gas tungsten arc welding processes. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 210, pp. 1043-1050. 2010.

54. Zuidema, B. The effect of Aluminium on the work Hardening and Wear Resistance of Hadfield Manganese Steel. Metallurgical and Materials Transaction. A. Volume 18 A. September, 1987. p 1629

55. Xiaoyan, Z. Y., L. (Enero del 2001). Effect of chromium on phase structure of austenite maganese steel. 2001.

56. Zúñiga, C.; Valverde, Q.; Fosca, C Modelización del ciclo térmico de la soldadura multipase por arco. Departamento de ingeniería: Universidad Católica de Perú, 2005.