

#### 4.3.4. OTROS PROCESOS DE SOLDADURA POR FUSIÓN

Algunos procesos de soldadura por fusión no pueden clasificarse como soldadura con arco eléctrico, por resistencia o con oxígeno y gas combustible. Todos estos procesos usan una tecnología singular con la que se desarrolla el calor para la fusión, y por lo regular las aplicaciones son únicas.

##### 4.3.4.1. Soldadura con haz de electrones

La *soldadura con haz de electrones*, SHE (en inglés *electron beam welding*, EBW), es un proceso de soldadura por fusión en el cual el calentamiento para el proceso se proporciona mediante una corriente muy concentrada de electrones de alta intensidad que chocan contra la superficie de trabajo. El equipo es similar al que se usa para el maquinado con haz de electrones. La pistola de haz electrones opera a alto voltaje para acelerar los electrones (por ejemplo, lo común es de 10 a 150 KV) y las corrientes del haz son bajas (medidas en miliamperes). La energía en la EBW no es excepcional, pero sí su densidad de energía. Una alta densidad de energía se obtiene concentrando el haz de electrones sobre un área muy pequeña de la superficie de trabajo, de modo que la densidad de energía PD se basa en:

$$PD = \frac{f_1 EI}{A} \quad 4.11$$

Donde:

$PD$  = densidad de energía, en W/ mm<sup>2</sup>;

$f_1$  = eficiencia de transferencia de calor -los valores normales para la soldadura con haz de electrones varían de 0.8 a 0.95

$E$  = voltaje de aceleración, en V;

$I$  = corriente del haz, en A;

$A$  = el área de la superficie de trabajo en la que se concentra el haz de electrones, en mm<sup>2</sup>.

Las áreas comunes para la soldadura con haz de electrones varían de  $13 \times 10^{-3}$  a  $2000 \times 10^{-3}$  mm<sup>2</sup>.

El proceso tiene sus orígenes en los años cincuenta en el campo de la energía atómica. La primera vez que se llevó a cabo tuvo que realizarse en una cámara de vacío para evitar que las moléculas de aire trastornaran el haz de electrones. Este requerimiento es todavía un serio inconveniente en la producción, debido al tiempo requerido para vaciar la cámara antes de la soldadura. El tiempo de bombeo, como se le denomina, puede requerir hasta una hora, dependiendo del tamaño de la cámara y del nivel de vacío requerido. Actualmente, la tecnología para EBW ha avanzado al punto que algunas operaciones se ejecutan sin vacío. Se distinguen tres categorías: 1) *soldadura al alto vacío*, SAV (en inglés *high vacuum welding*, EBW-HV), en la cual la soldadura se realiza en el mismo vacío que se usa para la generación del haz; 2) *soldadura al medio vacío*, SMV (en inglés *médium vacuum welding* EBW-MV), en el cual la operación se ejecuta en una cámara separada, en donde sólo se obtiene un vacío parcial; y 3) *soldadura sin vacío*, SSV (en inglés *non vacuum welding*, EBW-NV), en la cual la soldadura se realiza a una presión

atmosférica normal o casi normal. El tiempo de bombeo durante la carga y descarga de la parte de trabajo puede reducirse en la soldadura con haz de electrones al medio vacío y minimizarse en la soldadura con haz de electrones sin vacío, pero todavía se paga un precio por esta ventaja. En las dos últimas operaciones, el equipo debe incluir uno o más divisores de vacío (orificios muy pequeños que impiden el flujo del aire, pero permiten el paso de un haz de electrones) para separar el generador del haz, el cual requiere un alto vacío, de la cámara de trabajo. Asimismo, en la soldadura con haz de electrones sin vacío, el trabajo primero debe ubicarse cerca del orificio de la pistola de haz de electrones, aproximadamente a 13 mm o menos. Por último, en los procesos con un vacío menor no se puede obtener alta calidad en la soldadura, como tampoco la relación entre profundidad y anchura que se obtiene en la EBW-HV.

Cualquier metal que pueda soldarse por EBW también puede recibir soldadura con haz de electrones, al igual que ciertos metales refractarios difíciles de soldar que no son convenientes para la soldadura con arco eléctrico (AW). Los tamaños del trabajo de láminas metálicas varían de placa delgadas a gruesas. La soldadura con haz de electrones (EBW) se aplica principalmente en las industrias de automóviles, la aeronáutica, la aeroespacial y la nuclear. En la industria automotriz, el ensamble mediante EBW incluye colectores de aluminio, convertidores de torque de acero, convertidores catalíticos y componentes de la transmisión. En estas y otras aplicaciones son notables las siguientes ventajas de la soldadura con haz de electrones: soldaduras de alta calidad con perfiles profundos o estrechos o ambos, zonas afectadas por el calor bien delimitadas y baja distorsión térmica. Las velocidades de soldadura son altas en comparación con otras operaciones de soldadura continua. No se usa metal de relleno ni se necesitan fundentes ni gases protectores. Las desventajas de la EBW incluyen el equipo costoso, la necesidad de preparación y alineación precisas de la unión, y las limitaciones asociadas con la ejecución del proceso en el vacío, según hemos analizado. Además, existen cuestiones de seguridad, debido a que la EBW genera rayos X de los que deben protegerse las personas.

#### **4.3.4.2. Soldadura con rayo láser**

La *soldadura con rayo láser*, SRL (en inglés *laser beam welding*, LBW) véase figura 4.35, es un proceso por fusión, en el cual se obtiene la coalescencia mediante la energía de un haz luminoso coherente altamente concentrado y enfocado a la unión que se va a soldar.



Figura 4.35 Soldadura con rayo láser

El término láser corresponde a las siglas en inglés de “amplificación luminosa mediante emisiones estimuladas de radiaciones” (*light amplification by stimulated emission of radiation*). Esta misma tecnología se usa para el maquinado con rayo láser. La soldadura con rayo láser normalmente se ejecuta con gases protectores (por ejemplo, helio, argón, nitrógeno y dióxido de carbono) para evitar la oxidación. Por lo regular no se agrega metal de aporte.

La soldadura con láser produce acabados de alta calidad, profunda penetración y una estrecha zona afectada por el calor. Estas características son similares a las que se obtienen en la soldadura con haz de electrones y con frecuencia los dos procesos son comparables. Las ventajas de la LBW sobre la EBW incluyen que no se requiere una cámara de vacío, no se emiten rayos X y los rayos láser pueden enfocarse y dirigirse mediante lentes ópticos y espejos. Por otra parte, la LBW no posee la capacidad para realizar soldaduras profundas, como tampoco la alta relación entre profundidad y anchura que posee la EBW. La profundidad máxima en la soldadura con láser es aproximadamente de 19 mm., mientras que la EBW puede usarse para profundidades de 50 mm o más; y la relación entre profundidad y anchura en la LBW normalmente está limitada alrededor de 5:1. Debido a la energía altamente concentrada en un área pequeña del rayo láser, con frecuencia el proceso se usa para unir partes pequeñas.

#### 4.3.4.3. Soldadura con electro escoria

La soldadura con electro escoria, SEE (en inglés *electroslag welding*, ESW), usa el mismo equipo básico de algunos procesos de soldadura con arco eléctrico y utiliza un arco para iniciar la operación de soldadura. Sin embargo, no es un proceso de soldadura con arco eléctrico (AW) porque durante la soldadura no se usa el arco eléctrico. La soldadura con electro escoria (ESW) es un proceso de soldadura por fusión en el cual se obtiene la coalescencia mediante escoria fundida caliente y altamente conductiva,

que actúa sobre las partes base y el metal de aporte. Como se aprecia en la figura 4.36, la configuración general de la soldadura con electroescoria es similar a la de la soldadura con electrogaseosa.

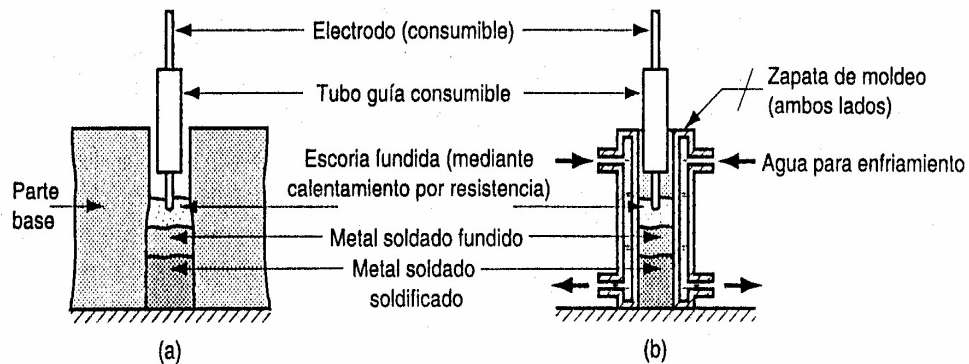


FIGURA 4.36 Soldadura con electro escoria (ESW): (a) vista frontal con zapatas de moldeo removidas para mayor claridad y (b) vista lateral que muestra una esquema de la zapata de moldeo. La preparación es similar a la de soldadura electro gaseosa (figura 4.41), excepto que se usa el calentamiento por resistencia de escoria fundida para derretir los metales base y de aporte.

Se lleva a cabo en orientación vertical (la que se muestra aquí es la soldadura empalmada), usando zapatas de moldeo enfriadas por agua para contener la escoria fundida y el metal soldado. Al principio del proceso, se coloca en la cavidad un fundente conductivo granulado. La punta de electrodo consumible se coloca cerca de la parte inferior de la cavidad y se genera un arco eléctrico por un momento para iniciar la fusión del fundente. Una vez creado el pozo de escoria, se extingue el arco eléctrico y la corriente pasa del electrodo al metal base a través de la escoria conductiva, de modo que su resistencia eléctrica genera el calor necesario para mantener el proceso de soldadura. Dado que la densidad de la escoria es menor que la del metal fundido, ésta permanece en la parte superior para proteger el pozo de soldadura.

La solidificación ocurre desde la parte inferior, en tanto que el electrodo y los bordes de las partes base proporcionan metal fundido adicional. El proceso continúa gradualmente hasta que llega a la parte superior de la unión.

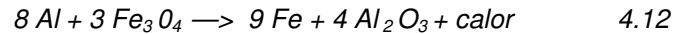
La desventaja de este proceso es que la alta cantidad de energía aplicada contribuye a que el proceso de enfriamiento se haga muy lento, lo que resulta en una poderosa alteración de la granulometría en la zona afectada de calor (HAZ).

#### 4.3.4.4. Soldadura con termita

El término termita es el nombre de una marca comercial para la termita, una mezcla de polvo de aluminio y óxido de hierro que produce una reacción exotérmica cuando se enciende. Es una sustancia usada en bombas incendiarias y para soldadura. Como un proceso de soldadura, el uso de termita data aproximadamente de 1900. La *soldadura con termita*, ST (en inglés *termit welding*, *TW*), es un proceso de

fusión en el cual el calor para la coalescencia se produce mediante el metal fundido súper calentado de la reacción química de la termita. El metal de aporte se obtiene, a partir del metal líquido y, aunque el proceso se usa para unir, es más común en el colado que en la soldadura.

Cuando los polvos de aluminio y óxido de hierro finamente mezclados se encienden a una temperatura aproximada a los 130 °C, en una proporción de 1:3, producen la siguiente reacción química:



La temperatura aproximada de la reacción es de 2500 °C, durante la cual se produce un hierro fundido súper calentado más óxido de aluminio, que flota en la parte superior como escoria y protege al hierro de la atmósfera. En la soldadura con termita el hierro súper calentado (o acero, si la mezcla de polvo se formula con tal propósito) se coloca en un crisol encima de la unión que se va a soldar, como se aprecia en el diagrama del proceso de TW de la figura 4.37.

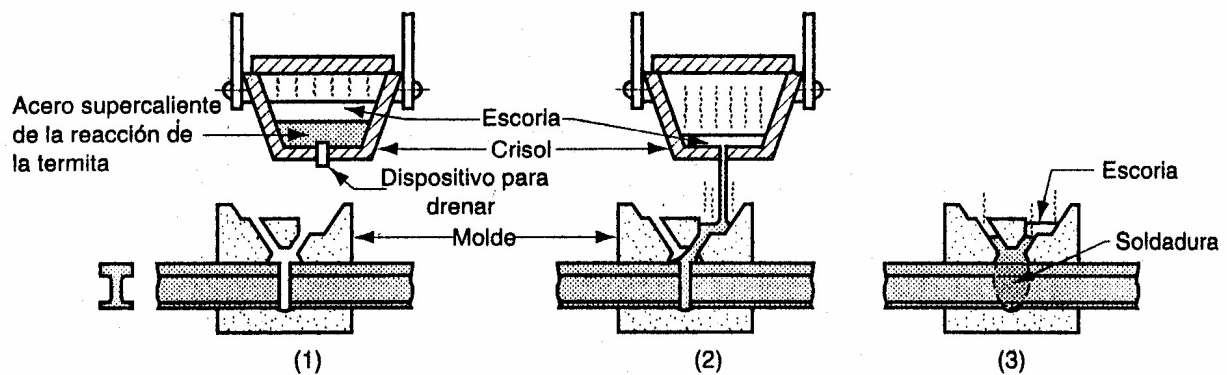


FIGURA 4.37 Soldadura de termita: (1) termita encendida; (2) metal súper calentado que se drena del crisol fluye dentro de un molde y (3) el metal se solidifica para producir una unión soldada.

Después de que termina la reacción (alrededor de 30 segundos, sin tomar en consideración la cantidad de termita que se use), el crisol se drena y el metal líquido fluye dentro de un molde construido especialmente para rodear la unión soldada. Debido a que la entrada del metal es tan caliente, funde los bordes de las partes bases, produciendo coalescencia tras la solidificación. Después de enfriarse se rompe el molde y se retiran las compuertas y tubos mediante soplete de oxiacetileno u otro método.

La soldadura con termita tiene aplicaciones en la unión de rieles de ferrocarril (como se aprecia en el ejemplo), y en la reparación de grietas en colados y forjas de acero grandes tales como moldes de lingotes, ejes diámetro grande, armazones para maquinaria y timones de embarcaciones. La superficie de la soldadura en estas aplicaciones con frecuencia es lo bastante lisa para que no se requiera un acabado posterior.

### 4.3.5. SOLDADURA DE ESTADO SÓLIDO

En la soldadura de estado sólido, la coalescencia de la superficies de la parte se obtiene: 1) mediante presión solamente o 2) por calor y presión. Para algunos procesos de estado sólido, el tiempo también es un factor. Si se usan 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 usando solamente el 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 de las superficies empalmantes. No se añade metal de relleno en la soldadura de estado sólido.

#### 4.3.5.1. Consideraciones generales en la soldadura de estado sólido

En la mayoría de los procesos de soldadura de estado sólido se crea una unión metalúrgica con muy poca o ninguna fusión de los metales base. Para unir metalúrgicamente dos metales similares o diferentes, debe establecerse un contacto íntimo entre los dos metales para que sus fuerzas atómicas cohesivas se atraigan una a la otra. En el contacto físico normal entre dos superficies, la presencia de películas químicas, gases, aceites y similares prohíbe tal proximidad. Para que tenga éxito la unión atómica, deben removerse estas películas y demás sustancias. En la soldadura por fusión (al igual que en otros procesos de unión, tales como la soldadura fuerte y la soldadura blanda), las películas se disuelven o se queman mediante altas temperaturas para establecer una unión atómica mediante la fusión y solidificación de los metales en estos procesos. Pero en la soldadura de estado sólido, deben removerse las películas y otros contaminantes mediante otros métodos para permitir que ocurra la unión metalúrgica. En algunos casos, se hace una completa limpieza de las superficies justo antes del proceso de soldadura; en otros casos, la acción de limpieza se realiza como un parte integral del acercamiento de las superficies de las partes. En resumen, los ingredientes esenciales para una soldadura de estado sólido exitosa son que las dos superficies deben: 1) estar muy limpias y 2) ponerse en contacto estrecho una con la otra para permitir la unión atómica.

Los procesos de soldadura que no implican una fusión tiene varias ventajas sobre los procesos de soldadura por fusión. Si no ocurre la fusión, no hay una zona afectada por el calor, por lo que el metal que rodea la unión conserva sus propiedades originales. Muchos de estos procesos producen uniones soldadas que incluyen toda la interfase de contacto entre en las dos partes, y no solo en puntos o engargolados señalados, como en la mayoría de las operaciones de soldadura por fusión. Asimismo, algunos de estos procesos son aplicables para unir metales distintos, sin tomar en consideración las expansiones térmicas relativas, las conductividades y los problemas que surgen normalmente durante la fundición y solidificación de distintos metales.

#### 4.3.5.2. Procesos de soldadura de estado sólido

El grupo de soldadura de estado sólido incluye el proceso de unión más antiguo, al igual que algunos de los más modernos. Todos los procesos en este grupo tienen una forma singular de crear la unión en las superficies empalmantes. El análisis empieza con el soldado por forja, el primer proceso de soldado.

**Soldado por forja** El soldado por forja tiene importancia histórica en el desarrollo de la tecnología de manufactura. El proceso data de alrededor del año 1000 a.c, cuando los herreros del mundo antiguo aprendieron a unir dos piezas de metal (véase nota histórica). El *soldado por forja* es un proceso en el cual los componentes que se van a unir se calientan a altas temperaturas de trabajo y después se forjan juntos por medio de un martillo u otro medio. Se requiere bastante habilidad del artesano que lo realiza para obtener una buena soldadura bajo las normas actuales. El proceso tiene interés histórico; sin embargo, actualmente posee una importancia comercial menor, excepto por algunas de sus variantes que se analizan en los párrafos siguientes.

**Soldadura en frío** La soldadura *en frío*, SF (en inglés *cold welding. CW*), es un proceso en estado sólido que se realiza aplicando alta presión entre superficies en contacto limpias a temperatura ambiente. Las superficies empalmantes deben estar excepcionalmente limpias para que funcione la (CW), y generalmente esta limpieza se hace mediante un desengrasado y pulido con cepillo de alambre inmediatamente antes de la unión. Asimismo, al menos uno de los metales que se van a soldar, y de preferencia ambos, deben de ser muy dúctiles y libres de endurecimiento por trabajo. Los metales como el aluminio suave y el cobre pueden soldarse en frío con facilidad. Las fuerzas de *compresión* aplicadas en el proceso producen el trabajo en frío de las partes *metálicas* y reducen el grosor hasta en un 50%, pero también producen deformación plástica localizada en las superficies que hacen contacto, produciendo coalescencia. Para partes pequeñas, las fuerzas se aplican mediante herramientas sencillas operadas en forma manual. Para trabajo más pesado se requieren prensas poderosas para ejercer la fuerza necesaria. En la CW no se aplica calor de fuentes externas, pero el proceso de deformación eleva de alguna forma la temperatura del trabajo. La aplicación de la soldadura en frío incluye la fabricación de conexiones eléctricas.

**Soldadura con rodillos** La soldadura con rodillos es una variación de la soldadura por forja o de la soldadura en frío, dependiendo de si se obtiene o no el calentamiento externo de las partes del trabajo antes del proceso. La *soldadura con rodillos*, SR (en inglés *roll welding, ROW*), es un proceso en estado sólido en el cual se aplica una presión suficiente para producir coalescencia mediante rodillos, ya sea con o sin aplicación externa del calor. El proceso se ilustra en la figura 4.38.

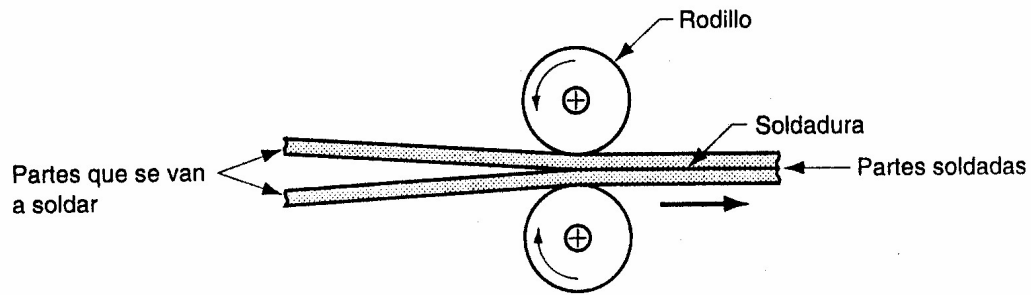


FIGURA 4.38 Soldadura con rodillos (ROW).

Si no se proporciona calor externo, el proceso se denomina soldadura en frío con rodillos si se proporciona calor, se usa el término soldadura en caliente con rodillos. Las aplicaciones de la soldadura con rodillos incluyen el revestimiento con acero inoxidable para aleaciones medias o bajas para conseguir resistencia a la corrosión, la fabricación de tiras bimetálicas para medir la temperatura y la producción de monedas acuñadas para la Casa de Moneda de Estados Unidos.

**Soldadura en caliente con presión** La soldadura en caliente con *presión*, SCP (en inglés *hot pressure welding, HPW*), es otra variable de la soldadura por forja, en el cual ocurre la coalescencia por la aplicación de calor y presión suficientes para producir una deformación considerable de los metales base. La deformación rompe la película de óxido de la superficie y deja limpio el metal para restablecer una buena unión entre las dos partes. Debe permitirse que pase un tiempo para que ocurra la difusión a través de las superficies empalmantes. Por lo general, la operación se realiza en una cámara de vacío o en la presencia de un medio protector. Las aplicaciones principales de la HPW están en la industria de la aeronáutica y el espacio.

**Soldadura por difusión** La soldadura por *difusión*, SD (en inglés *diffusion welding, DFW*), es un proceso en estado sólido resultado de la aplicación de calor y presión, por lo general en una atmósfera controlada, el tiempo suficiente para que ocurra la difusión y la coalescencia. Las temperaturas están bastante abajo de los puntos de fusión de los metales (el máximo está en alrededor de  $0.5 T_m$ ) y la deformación plástica en la superficie es mínima. El mecanismo principal de coalescencia se lleva a cabo mediante la difusión en estado sólido, que implica la migración de átomos a través de la interfase entre las superficies que hacen contacto. Las aplicaciones de la DFW incluyen la unión de metales refractarios y de alta resistencia en las industrias de la aeronáutica, la aeroespacial y la nuclear. El proceso se usa para unir metales similares y diferentes y, en este último caso, con frecuencia se introduce entre los metales distintos una capa de relleno para promover la difusión de los dos metales base. Una limitación del proceso puede ser el tiempo requerido para que ocurra la difusión entre las superficies empalmantes; este tiempo puede variar de segundos a horas.

**Soldadura explosiva** La soldadura *explosiva*, SE (en inglés *explosion welding, EW*), es un proceso de estado sólido en el cual se produce una rápida coalescencia de dos superficies metálicas



mediante la energía de un explosivo detonado. Por lo general se usa para unir dos metales distintos, en particular para revestir un metal sobre una base metálica en áreas grandes. Las aplicaciones incluyen la producción de materias primas de láminas y placas resistentes a la corrosión destinadas a la fabricación de equipo de procesamiento en las industrias química y del petróleo. En este contexto se emplea el término revestimiento *por explosión*. En la EW no se usa un metal de relleno ni se aplica calor externo. Asimismo, durante el proceso no ocurre difusión (el tiempo es *muy* corto). La naturaleza de la unión es metalúrgica, en muchos casos combinada con, un entrelazado mecánico producido por otra interfase ondulada o rizada entre los metales.

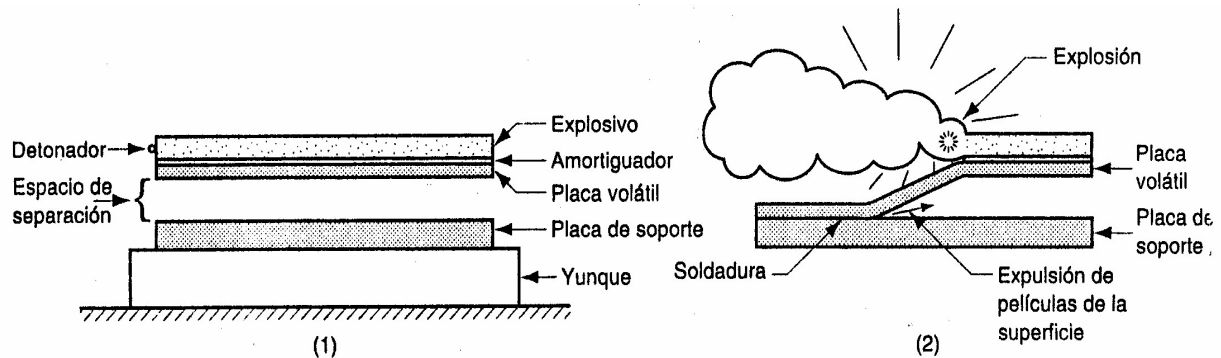


FIGURA 4.38 Soldadura explosiva (EXW): (1) disposición en la configuración paralela y 2) durante la detonación de la carga explosiva.

EL proceso para revestir una placa de metal sobre otra puede describirse con la figura 4.38. En esta distribución, las dos placas están en la configuración paralela y a una cierta distancia de separación, con la carga explosiva encima de la parte superior, denominada la placa *volátil*. Con frecuencia se usa una capa amortiguadora (por ejemplo, de hule o de plástico) entre el explosivo y la placa volátil para proteger su superficie. La placa inferior, denominada *metal de soporte*, descansa en un yunque para apoyo. Cuando se inicia la detonación, la carga explosiva se propaga de un extremo de la placa volátil al otro, como se aprecia en la vista de acción interrumpirla que se muestra en la parte (2) de la figura.

Una dificultad en la comprensión de lo que sucede en la EW 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 velocidades hasta de 8500 m/seg. La zona de alta presión resultante impulsa la placa volátil 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 el diagrama.

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 las películas de superficie son expelidas hacia delante desde el vértice del ángulo. Por tanto, las superficies que chocan están 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 por esta razón es muy utilizada.

**Soldadura por fricción** La soldadura por fricción es un proceso comercial muy difundido y es conveniente para los métodos de producción automatizada. El proceso fue desarrollado en la ex Unión Soviética, e introducido en Estados Unidos alrededor de 1960. La *soldadura por fricción*, SFR\* (en inglés *friction welding*, FRW), es un proceso en estado sólido en el cual se obtiene la coalescencia mediante una combinación de calor por fricción y presión. La *fricción* se induce mediante el *frotamiento* mecánico entre las dos superficies, generalmente por la *rotación* de una parte con respecto a la otra, a fin de elevar la temperatura en la interfase de unión hasta un rango de trabajo caliente para los metales involucrados. Enseguida, las partes se dirigen una hacia la otra con suficiente fuerza para formar una unión metalúrgica. La secuencia se ilustra en a figura 4.39 para soldar dos partes cilíndricas, una aplicación común del proceso. Como muestra la ilustración, la fuerza de compresión axial recalca las partes y se produce un reborde por el material desplazado.

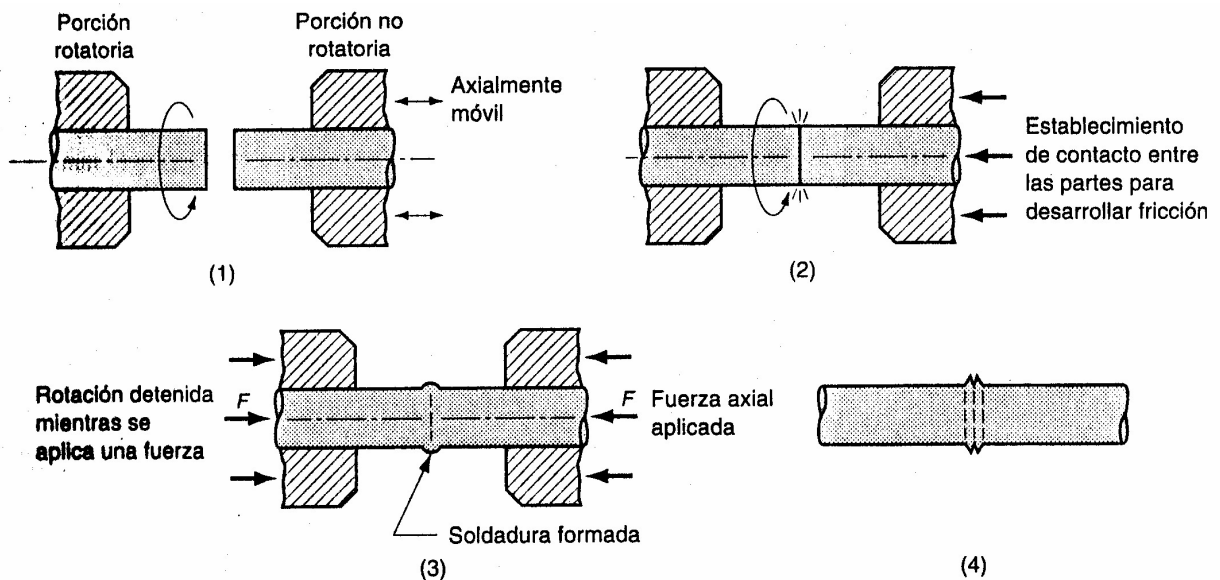


FIGURA 4.39 Soldadura por fricción (FRW) parte rotatoria, sin contacto; (2) establecimiento de contacto entre las partes para generar calor por fricción; (3) rotación detenida y presión axial aplicada; y (4) soldadura creada.

Las películas que se encuentran sobre las superficies de contacto son expulsadas durante el proceso. Después deben emparejarse el reborde (por ejemplo, por rotación) para proporcionar una superficie lisa en la legión soldada. Cuando se realiza en forma correcta, no ocurre una fusión en las superficies empalmantes. Normalmente no se usa metal de relleno, como tampoco fundentes o gases protectores.

Casi todas las operaciones de FRW usan la rotación para desarrollar el calor necesario para el proceso. Hay dos sistemas de conducción *principales* que distinguen dos tipos de FRW: (1) soldadura por fricción de conducción continua y 2) soldadura por fricción con inercia.

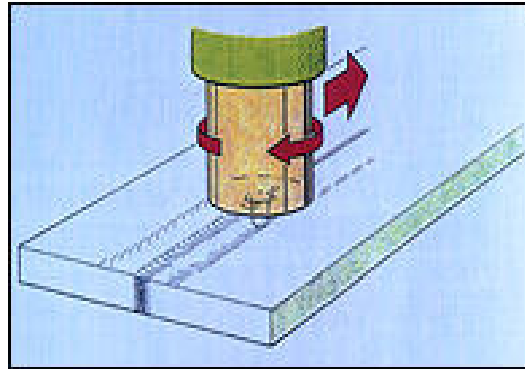


Figura 4.40 En la soldadura por fricción, un cilindro de sección plana y un rotor perfilado, son suavemente aproximados a las áreas a juntar las cuales son enfrentadas de tope (www.geocyties.com).

En la *soldadura por fricción de conducción continua* se dirige una parte a una velocidad de rotación constante y se impone un contacto con la parte estacionaria a cierto nivel de fuerza, para que se genere calor por fricción en la interfase. Cuando se alcanza la temperatura de trabajo correcta, se frena la rotación en forma abrupta y al mismo tiempo se juntan las partes a presiones de forja. En la *soldadura por fricción con inercia*, la parte rotatoria se conecta a un volante, el cual se acelera a una velocidad predeterminada. Después, se desconecta el volante del motor de conducción y se aprietan las partes. La energía cinética almacenada en el volante se disipa en la forma de calor por fricción para producir la coalescencia en las superficies empalmantes. El ciclo total para estas operaciones dura alrededor de 20 segundos.

Las máquinas usadas para la soldadura por fricción tienen el aspecto de un torno de motor. Requieren que un mandril con corriente haga girar una parte a alta velocidad y un medio para aplicar una fuerza axial entre la parte rotatoria y la no-rotatoria. Con sus ciclos breves, el proceso se presta para la producción masiva. Se aplica en la soldadura de diversos ejes y partes tubulares en las industrias automotriz, aeronáutica, de equipo agrícola, de petróleo y del gas natural. El proceso produce una estrecha zona afectada por el calor y puede usarse para unir metales distintos. Una de sus limitaciones es que al menos una parte debe estar en rotación, otras desventajas son que por lo general deben moverse las rebabas y que el recalado reduce la longitud de las partes (lo cual debe tomarse en consideración para el diseño de productos).

**Soldadura ultrasónica** La soldadura ultrasónica, SU (en inglés ultrasonic welding, USW), es un proceso en estado sólido en el cual se integran dos componentes bajo fuerzas de sujeción modestas y se aplican intensas presiones oscilatorias de frecuencia ultrasónica a la interfase para producir la coalescencia. La operación se ilustra en la figura 4.41, para la soldadura sobrepuesta, que es una aplicación típica.

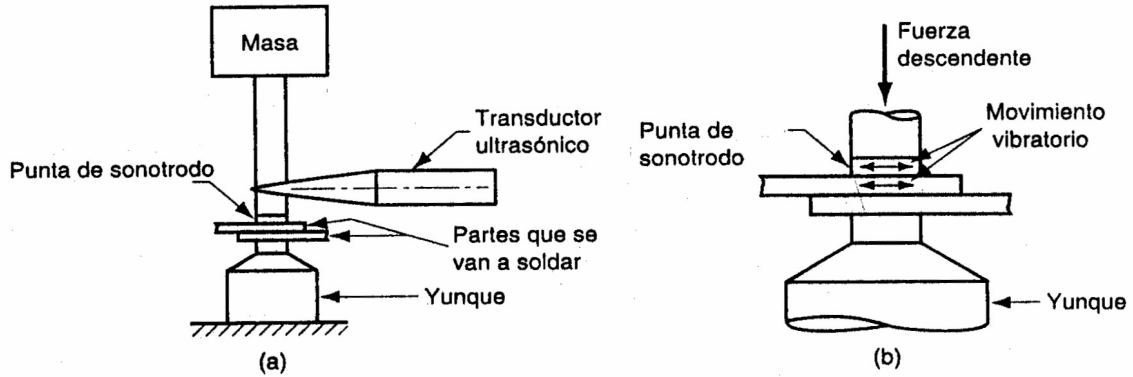


FIGURA 4.41 Soldadura ultrasónica (USW): (a) disposición general para una unión sobrepuesta y (b) acercamiento del área soldada.

El movimiento oscilatorio entre las dos partes deshace las películas de superficie para permitir un contacto íntimo y una fuerte unión metalúrgica entre las superficies. Aunque ocurre un calentamiento de las superficies que hacen contacto debido a la fricción interfacial y la deformación plástica, las temperaturas resultantes están bastante abajo del punto de fusión. En la USW no se requieren metales de relleno, fundentes ni gases protectores.

El movimiento oscilatorio se transmite a la parte de trabajo superior mediante un *sonotrodo* que está acoplado a un transductor ultrasónico. Este dispositivo convierte la energía eléctrica en un movimiento vibratorio de alta frecuencia. Las frecuencias comunes usadas en la USW son de 15 a 75 KHz, y las amplitudes varían de 0.18 a 0.13 mm. Las presiones de sujeción son mucho menores de las que se usan en soldadura al frío y coproducen una deformación plástica importante entre las superficies. Bajo estas condiciones, los tiempos de soldadura son menores a 1 segundo.

Por lo general, las operaciones de USW se limitan a uniones superpuestas sobre materiales suaves, tales como el aluminio y el cobre. La soldadura de materiales más duros provoca un rápido desgaste del sonotrodo que hace que hace contacto con la parte de trabajo superior. Las partes de trabajo deben ser relativamente pequeñas y la soldadura de grosores menores a 3mm es el caso común. Aunque el mecanismo de la soldadura ultrasónica no está aun completamente esclarecido, se sabe que tiene similitudes con la soldadura por fricción.

Las aplicaciones incluyen terminación y empalmado de cables en las industrias eléctrica y electrónica (lo cual elimina la necesidad de soldadura blanda), el ensamble de paneles de lamina metálica de aluminio, la soldadura de tubos para chapas en paneles solares, así como diversas tareas de ensamble de otras pequeñas partes en la industria automotriz.

**Aparatos para la soldadura ultrasónica** Las puntas de sonotrodo se hacen generalmente, de acero rápido templado o de aleación Nimonic, materiales que muestran una baja tendencia a la soldadura por presión, posiblemente debido a su gran resistencia mecánica a elevadas temperaturas. Las puntas tienen una forma tal que presentan sobre la pieza una superficie esférica de aproximadamente 75 mm de radio. Pueden estar soldadas o unidas con soldadura blanda al vibrador que suministra la energía para la soldadura.