

Soldadura industrial: clases y aplicaciones

Pere Molera Solà

Soldabilidad. Metales y aleaciones.
Humectabilidad. Difusión en estado sólido. Metalurgia de la soldadura.
Procedimientos de soldadura:
Autógena. A gas. Arco. Resistencia.
Electrólisis. Aluminotérmica.
Explosión. Ultrasónica. Fricción. Láser.
Haz de electrones. Forja. Inducción.
Soldadura dura. Soldadura blanda.
Recargue. HIP. Instalaciones, equipos y productos. Generadores. Fundentes.
Electrodos. Aleaciones. Soplete.
Mesa posicionadora. Máquinas de soldadura a tope. Soldadura transversal de tubos. Robots.
Soldadura guiada por palpadores.
Control programable. Aplicaciones.
Defectos en las soldaduras: grietas, cráteres, sobreespesor, cordón irregular, porosidades, inclusiones de escoria, etc.



P R O D U C T I C A

Soldadura industrial: clases y aplicaciones

Pere Molera Solà



marcombo
BOIXAREU EDITORES

PRODUCTICA

© MARCOMBO, S.A., 1992
Barcelona (España)

Impreso en España
Printed in Spain
Fotocomposición: FOINSA - Barcelona
Impresión: Vanguard Gràfic, S.A. - Barcelona

Índice

PRÓLOGO	7
FUNDAMENTOS	9
Introducción	9
Soldabilidad	9
Humectabilidad	10
Metalurgia de la soldadura	11
Características del cordón de soldadura	12
Zona afectada por el calor	13
PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA	17
Soldadura autógena	17
Soldadura a gas	17
Las llamas de soldar	19
Llama oxiacetilénica	20
Soldadura al arco	22
TIG	24
Soldadura por hidrógeno atómico	25
MIG	26
MAG	28
Soldadura al arco con electrodo revestido	29
Soldadura con arco sumergido	30
Intensidad de la corriente de soldadura	31
Fuerza electromotriz	32
Velocidad de avance de soldadura	33
Alambre electrodo	35
Soldadura bajo escoria electroconductora	37
Posiciones para la soldadura	38
Horizontal	38
Vertical	39
Techo	39
Debajo del agua	40
Soldadura con plasma	41
Soldadura por resistencia	41
Soldadura a tope	42
A tope con recalado	43
A tope con chisporroteo	43
Soldadura por puntos	44
Soldadura por protuberancias	46
Soldadura por roldanas	46
Soldadura por electrólisis	47
Soldadura aluminotérmica	48
Soldadura por explosión	48
Soldadura ultrasónica	50

Soldadura por fricción	55
Soldadura por láser	56
Soldadura por haz de electrones	57
Aplicaciones	61
Forja	61
Inducción	62
Soldadura dura	62
Inmersión	65
En baño de sales	65
Soplete	66
Bloque	67
Horno	67
Derrame	68
Resistencia eléctrica	68
Inducción	69
Soldadura blanda	70
Bloque	71
Derrame	71
Resistencia	71
Llama	72
Inmersión	72
Inducción	72
Propiedades de la soldadura blanda	72
Recargue	72
Propiedades del recargue	73
Técnica	75
Proyección y fusión	75
Proyección con plasma	77
Proyección por detonación	78
Transporte a la llama	79
Aplicación de la compresión isostática en caliente en la soldadura	79
Técnica	80
Aplicaciones de la soldadura por HIP	82
INSTALACIONES, EQUIPOS Y PRODUCTOS	85
Instalaciones para soldadura oxiacetilénica	85
Instalaciones móviles para soldadura oxiacetilénica	86
Instalaciones para la soldadura eléctrica	86
Generadores	87
Fundentes	87
Electrodos	88
Aleaciones	91
Soplete	92
Soplete oxiacetilénico de alta presión	93
Mesa posicionadora	93
Máquinas de soldadura a tope	94
Soldadura transversal de tubos	95
Robots para soldadura	97
Soldadura por arco guiada por palpadores	98
Controlador programable para soldadura por puntos y de costuras	101

APLICACIONES	103
Soldadura del acero	103
Soldadura de la fundición	104
Soldadura del cobre	106
Soldadura del latón	107
Soldadura del bronce	108
Soldadura del aluminio	109
Soldadura del titanio	110
Acero galvanizado	111
DEFECTOS DE LA SOLDADURA	113
Falta de penetración	114
Sobreespesor	115
Cordón irregular	115
Mordeduras	115
Grietas	116
Salpicaduras	117
Zonas duras	117
Cráteres	118
Inclusiones de tungsteno	118
Cebados de arco	119
Porosidades	119
Inclusiones de escoria	119
Soplado del arco	119
BIBLIOGRAFÍA	121

Prólogo

Desde antiguo se ha venido cumpliendo el aforismo que reza *soldar es bueno, pero no soldar es mejor*. Esta sentencia no es otra cosa que un fiel reflejo de la expresiva sabiduría existente de la antigua técnica de la soldadura, interpretada como una operación de ensamblaje, muy utilizada en el sector de la calderería, de la chapa hechurada y como operación de reparación de piezas rotas. La soldadura, a la par que solucionaba la unión de componentes metálicos, introducía en el metal base nuevos problemas derivados de la fragilidad del cordón de soldadura y de la zona afectada por el calor y problemas corrosivos originados por las heterogeneidades creadas en el proceso de unión.

Hacia la mitad del presente siglo la ciencia metalúrgica ha experimentado un notable incremento que ha servido de base a una tecnología desbordada. El conocimiento amplio y profundo del fenómeno de la solidificación del baño de soldadura, aparecido en los cordones y en los puntos, las investigaciones de las modificaciones microestructurales llevadas a cabo en la zona afectada por el calor de la soldadura y la posibilidad de crear, «in situ», atmósferas inertes y reductoras en el momento de la unión, han contribuido a diseñar sustanciales mejoras en los procedimientos convencionales de la soldadura. La incidencia de la nueva tecnología del automatismo en el ámbito de la soldadura también ha aportado revolucionarios resultados: los robots, con su sorprendente y perfeccionada técnica, implican rapidez, precisión y seguridad en su actuación.

Actualmente la soldadura, como procedimiento de unión entre partes de objetos metálicos, constituye el procedimiento de conformación metálica más versátil. Existe una gran variedad de aparatos, instalaciones, accesorios... metálicos de formas más o menos complejas, que se han fabricado gracias a la introducción del proceso de unión por soldadura en alguna de sus etapas del proceso productivo.

Las características técnicas y científicas del baño, de la zona afectada por el calor y del metal base son más conocidas cada día y, por ende, más controlables. De modo y manera que se ha alcanzado una cota de elaborada tecnología en la soldadura digna del mejor encomio.

El Autor

Fundamentos

INTRODUCCIÓN

La soldadura es un procedimiento de conformación metálica que se utiliza cuando los otros procedimientos son imposibles de aplicarse. Un ejemplo típico de la soldadura es el ensamblaje de partes de una pieza compleja o de una instalación: estructura metálica de un edificio, puente, etc. En el argot de la conformación metálica suele pronunciarse la frase «soldar es bueno, pero no soldar es mejor», lo cual en el fondo se cumple para cualquier metal o aleación. Este aforismo viene a decir que sólo se suelda cuando no existe más remedio. De lo contrario, se prefieren los otros procedimientos de conformación metálica. No obstante, la soldadura, como procedimiento de unión entre partes de objetos metálicos, constituye un procedimiento de conformación metálica muy versátil, aplicable, en general, a prototipos y pequeñas series.

SOLDABILIDAD

Se entiende por *soldabilidad* la facilidad con que un metal se puede conformar por soldadura de sus partes, así como la habilidad de la unión soldada para resistir las condiciones de servicio. En la práctica se distinguen varios tipos de soldabilidad. Existe la soldabilidad operatoria, la soldabilidad metalúrgica y la soldabilidad constructiva.

La soldabilidad *operatoria* es indispensable y determina el que un material pueda o no ser soldado. La madera, la piedra y el papel, por ejemplo, no tienen soldabilidad operatoria. La soldabilidad operativa está relacionada con el enlace de los átomos, de las moléculas o de los iones que forman el material. El enlace metálico tiene elevada soldabilidad operativa.

La soldabilidad *metalúrgica* determina hasta qué punto pueden soldarse dos metales sin que su composición represente inconvenientes graves por fusión, oxidación, tratamiento térmico, etc. La soldabilidad constructiva se refiere a la facilidad con que pueden unirse dos metales para lograr formas que resistan los esfuerzos a que van a estar sometidos, garantizando su duración. La soldabilidad metalúrgica puede mejorarse en aceros al cromo y aceros al aluminio, empleando fundentes o flujos que reaccionen con los óxidos de cromo y aluminio formando escorias. En algunos casos se sustituyen los flujos, combinando el calentamiento y una operación mecánica que facilita la eliminación de las escorias.

La soldabilidad *constructiva* depende de las transformaciones que ocurren en las piezas durante la soldadura, que pueden incluso afectar a sus características mecánicas y a sus propiedades. En la metalgrafía de la unión soldada se ven dos partes bien diferenciadas, el cordón de soldadura, y sus

alrededores, y el metal base. En ella se han sucedido un proceso de fusión, otro de tratamiento térmico y un tercero de enfriamiento, durante los cuales se operan los cambios y transformaciones que determinan la soldabilidad metalúrgica.

Para manejar el factor soldabilidad de cada metal al tratar de su soldadura, se designa con un número variable entre 0 y 10, llamado *coeficiente de soldabilidad*. Este coeficiente es el producto de multiplicar el coeficiente de compacidad por el grado de homogeneidad de la unión. En el caso de los aceros este coeficiente depende en gran parte del contenido de carbono de las piezas a soldar y aumenta con dicho contenido.

HUMECTABILIDAD

Al depositar una gota de metal líquido sobre una superficie metálica sólida aparece un determinado valor del radio de la gota (figura 1), que dependerá de las tensiones de las fases existentes.

R : radio de la gota.

γ_s : tensión superficial del sólido.

$\gamma_{L/V}$: tensión superficial de la interfase líquido-vapor.

$\gamma_{S/L}$: tensión superficial de la interfase sólido-líquido.

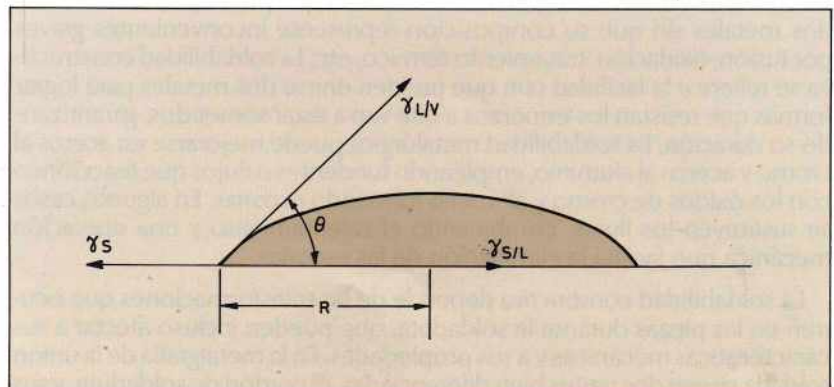
La tensión superficial de un líquido se define por el exceso de energía libre, por cada centímetro cuadrado, que poseen las moléculas de la superficie con respecto a las del interior. En el interior de un líquido la cohesión molecular es uniforme, pero en la superficie existe una resultante que las arrastra al interior, lo que produce una contracción superficial, tendiendo el área de la superficie al mínimo valor (para la relación área/volumen: la esfera).

La condición necesaria para que el líquido moje a la superficie sólida es que el ángulo de contacto se anule; es decir:

$$\gamma_s > \gamma_{S/L} + \gamma_{L/V}$$

La tensión superficial ($\gamma_{L/V}$) del metal en estado líquido disminuye por la presencia de grasas, líquidos, gases y partículas metálicas en la superficie. Decir que un metal líquido tiene menos tensión superficial equivale a

Figura 1. Fuerzas aplicadas en la humectabilidad de una superficie sólida metálica por una gota de metal líquido.



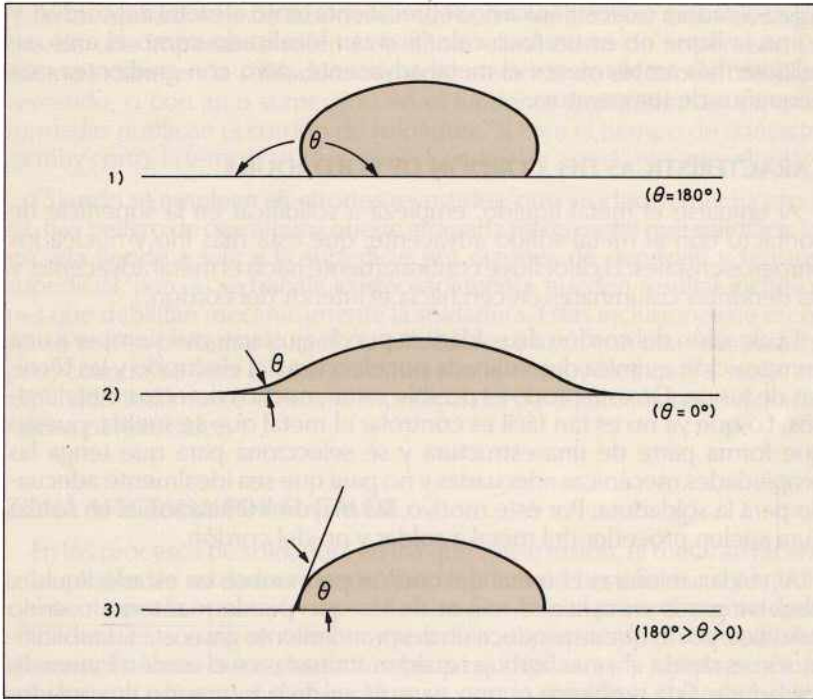


Figura 2. Condiciones para la humectabilidad de las superficies metálicas: 1) no moja; 2) humectabilidad total; 3) humectabilidad parcial.

facilitar el cumplimiento de la desigualdad anteriormente apuntada, lo que equivale a aumentar la humectabilidad.

En la figura 2 se han resumido las condiciones para la falta de humectabilidad (1), la humectabilidad total (2) y la humectabilidad parcial (3).

METALURGIA DE LA SOLDADURA

En la soldadura convencional, en que tiene lugar la fusión del metal, el calor del sistema de soldar se desarrolla en una zona muy localizada y crea un gradiente elevado de temperatura. Parte del metal a soldar se funde y origina el metal líquido que formará el cordón.

La soldadura por fusión crea ciclos de calentamiento y de enfriamiento en el metal base, adyacente al cordón, y los efectos dependerán de la naturaleza del metal soldado y de las condiciones de la operación. El metal del cordón se sobrecalienta siempre algo en todos los procesos; la cantidad de calor que cede al metal adyacente dependerá del proceso, velocidad de calentamiento y conductividad térmica del metal soldado. En la soldadura con arco de electrodo consumible (MIG) realizada con una velocidad menor de producción de calor, se puede alcanzar la misma temperatura en el metal del cordón, pero calentándose menos el metal adyacente. Al soldar con arco (tanto MIG como TIG) un metal de buena conductividad térmica, como el cobre, no se producirá un gradiente tan grande de temperatura como ocurre con el acero, que es menos conductor.

La soldadura oxiacetilénica no sobrecalienta tanto el metal del cordón, y como la llama no es un foco calorífico tan localizado como el arco, se calienta más ampliamente el metal adyacente, pero con gradientes más pequeños de temperatura.

CARACTERÍSTICAS DEL CORDÓN DE SOLDADURA

Al enfriarse el metal líquido, empieza a solidificar en la superficie de contacto con el metal sólido adyacente, que está más frío y nuclea los primeros cristales. El calor fluye continuamente hacia el metal adyacente, y las dendritas columnares crecen hacia el interior del cordón.

La aleación del cordón de soldadura puede ajustarse casi siempre a una composición química determinada por elección del electrodo y las técnicas de fusión. De este modo es posible evitar muchos defectos metalúrgicos. Lo que ya no es tan fácil es controlar el metal que se suelda, puesto que forma parte de una estructura y se selecciona para que tenga las propiedades mecánicas adecuadas y no para que sea idealmente adecuado para la soldadura. Por este motivo, las mayores limitaciones en soldadura suelen proceder del metal a soldar y no del cordón.

Al soldar, mientras el metal del cordón permanece en estado líquido, disuelve gases en cantidad mayor de los que puede mantener cuando solidifica, por lo que se produce un desprendimiento gaseoso. Si la solidificación es rápida, algunas burbujas quedan atrapadas en el cordón formando *sopladuras*. Este problema es muy parecido al de la formación de sopladuras en las piezas moldeadas, pero se diferencia de él en dos aspectos importantes:

a) El calentamiento y el enfriamiento son mucho más rápidos que en la fabricación de piezas moldeadas, ya que el metal a unir actúa de «molde» metálico y, por tanto, con gran velocidad de enfriamiento. El metal permanece fundido mucho menos tiempo, por lo que disminuye la cantidad de gas disuelto y no se formarán grandes sopladuras.

b) Se pueden controlar bastante bien la atmósfera de la región de la soldadura y la escoria que se forma sobre el cordón ajustando la naturaleza del revestimiento del electrodo. De este modo se evita que se disuelva una cantidad muy grande de gases.

Las velocidades de enfriamiento, relativamente rápidas, se traducen en granos relativamente pequeños en el cordón de soldadura y, en general, en una gran ductilidad de este metal o elevada tenacidad.

La segregación es la causa de la presencia de planos débiles en los lingotes donde las dendritas se ponen en contacto formando ángulos casi rectos, y pueden provocar igual debilidad en el cordón de soldadura. Sin embargo, este peligro no es importante, porque las dendritas del cordón crecen desde los lados y no hay facilidades para que queden atrapadas impurezas de punto de fusión más bajo en el plano central de la soldadura.

Si las aleaciones solidifican con relativa lentitud, se puede producir una segregación intergranular excesiva. No es peligrosa en los aceros al carbono, pero se manifiesta claramente, con resultados negativos, en los aceros inoxidables y en los metales no féreos.

En las operaciones de fabricación del acero las escorias están encargadas de una importante misión de afino: eliminación de impurezas. Lo mismo ocurre en la soldadura con arco eléctrico de electrodo metálico revestido, o con arco sumergido en el fundente granulado. Las escorias formadas purifican el cordón de soldadura. Si bien el tiempo de contacto es muy corto, la temperatura es muy elevada y las reacciones muy rápidas.

Cuando se emplean electrodos revestidos, que producen mucha escoria, hay peligro de que alguna quede atrapada por el metal que solidifica. La escoria tiende a salir a la superficie por razones de densidad y tensión superficial, pero si se trabaja inadecuadamente pueden resultar inclusiones que debilitan mecánicamente la soldadura. Estas inclusiones de escoria no suelen perturbar cuando la soldadura se hace con una sola pasada, pero cuando se lleva a cabo en varios pasos es muy fácil que, si no se ha eliminado totalmente la escoria superficial del paso anterior, queden inclusiones perjudiciales.

ZONA AFECTADA POR EL CALOR

En los procesos de soldadura en los que existe fusión, el metal adyacente al cordón de soldadura puede quedar afectado beneficiosa o perjudicialmente por la operación de soldadura. Durante el procedimiento de la soldadura, esta zona se calienta y se enfría: experimenta un tratamiento térmico. En unos casos puede templarse y fragilizarse, y agrietarse en el enfriamiento, mientras que en otros se puede recocer y ablandar. Tales efectos del tratamiento térmico son deseables o no, según las aplicaciones del objeto metálico soldado. El metal a soldar puede resultar deteriorado por la soldadura, o mejorado en sus propiedades mecánicas, o bien quedar prácticamente inalterado.

Un importante objetivo al proyectar las soldaduras es predecir el efecto de la operación sobre el metal adyacente y especificar los procedimientos de soldadura que puedan evitar dificultades y permitir soldaduras correctas.

En todas las soldaduras por fusión y en algunas donde no hay fusión, pero se calienta a temperatura elevada, se produce algún crecimiento de grano. El metal cercano al cordón, que se calienta a temperatura superior, está más sujeto a crecimiento de grano que el más alejado. El metal de grano grueso presenta menor ductilidad y tenacidad que el de grano fino, y, cuando se trata de un acero templable, posee mayor templabilidad: se dificulta la precipitación de la perlita. Es muy fácil que se produzca martensita dura y son más probables las grietas después de la soldadura, las cuales pueden conducir a la rotura.

Los efectos térmicos de la soldadura se rigen por los mismos principios del tratamiento térmico convencional: diagramas transformación-temperatura-tiempo (TTT). Pero en el tratamiento térmico del acero se desea obtener martensita dura, a la que se quita fragilidad con el revenido, mientras que en la soldadura lo que se pretende es que no se forme martensita y quede una microestructura de ferrita y perlita. Por este motivo, los aceros más fáciles de tratar térmicamente, por tener mucha templabilidad, suelen ser difícilmente soldables, porque la martensita se forma

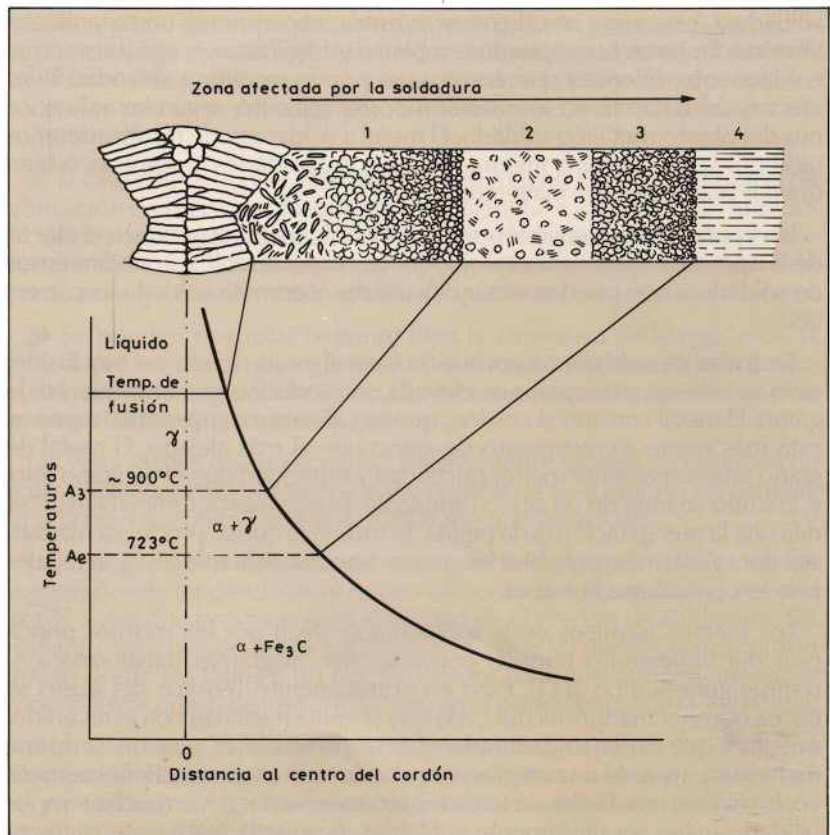
aun con enfriamientos lentos, aumentando la fragilidad del acero. Tomando precauciones especiales se evitan el agrietamiento y otros efectos perjudiciales en la soldadura.

La formación de martensita se puede prevenir con mayor aportación de calor, porque si el material se precalienta son menores los gradientes de temperatura entre el metal del cordón y el metal a soldar. El enfriamiento es más lento y puede darse tiempo para que se formen los constituyentes blandos ferrita y perlita (figura 3).

La mayoría de los elementos de aleación en el acero aumenta la templeabilidad y es más difícil evitar la formación de la martensita. En los aceros aleados el precalentamiento es imprescindible. El efecto de la soldadura en aceros se observa en la distribución de durezas con la distancia del cordón.

Los constituyentes frágiles producen grietas al soldar, mientras que los blandos pueden deformarse plásticamente y originan una mejor distribución de tensiones. Las microestructuras dúctiles sólo se agrietan con velocidades muy grandes de aplicación de las cargas, cuando la temperatura es muy baja y altera completamente las propiedades normales o

Figura 3. Esquema de las zonas existentes en la soldadura por fusión: 1) ferrita + perlita (microestructura de Widmanstätten); 2) martensita + ferrita; 3) microestructura de recocido; 4) metal base sin afectar.



cuando se producen concentraciones locales de tensiones excesivas. Se deduce que son muy improbables las grietas cuando el metal del cordón y el adyacente se mantienen dúctiles en todo el proceso de soldadura. Si se forma martensita, es de esperar el agrietamiento; si se evita su formación, no es probable que hayan grietas. La formación de martensita suele originar con frecuencia grietas microscópicas, que con el tiempo se agrandan.

Procedimientos de soldadura

Los procedimientos más utilizados para soldar son: soldadura al arco con electrodo de tungsteno protegido por gas inerte (TIG: «tungsten inert gas»), soldadura al arco con electrodo metálico consumible protegido por gas inerte (MIG: «metal inert gas»), soldadura al arco con electrodo revestido, soldadura de arco sumergido y soldadura al plasma. En la figura 4 se han esquematizado los principales procedimientos utilizados en la soldadura de los metales.

SOLDADURA AUTÓGENA

La distinción más específica de la denominada soldadura simple es que en la unión no se emplea un material de composición distinta de la del metal base, por cuya razón es frecuente denominarla como *soldadura autógena*.

En la soldadura autógena se utilizan dos procedimientos fundamentales: a) fusión únicamente del metal que se desea unir y b) adición de un metal de relleno, de composición química análoga a la del metal base, y que al enfriarse une las partes que hay que soldar. En el segundo caso hay que aplicar energía, en forma de presión, con el fin de facilitar la difusión de los átomos y la consiguiente ordenación del retículo, de modo que se unifiquen las dos partes.

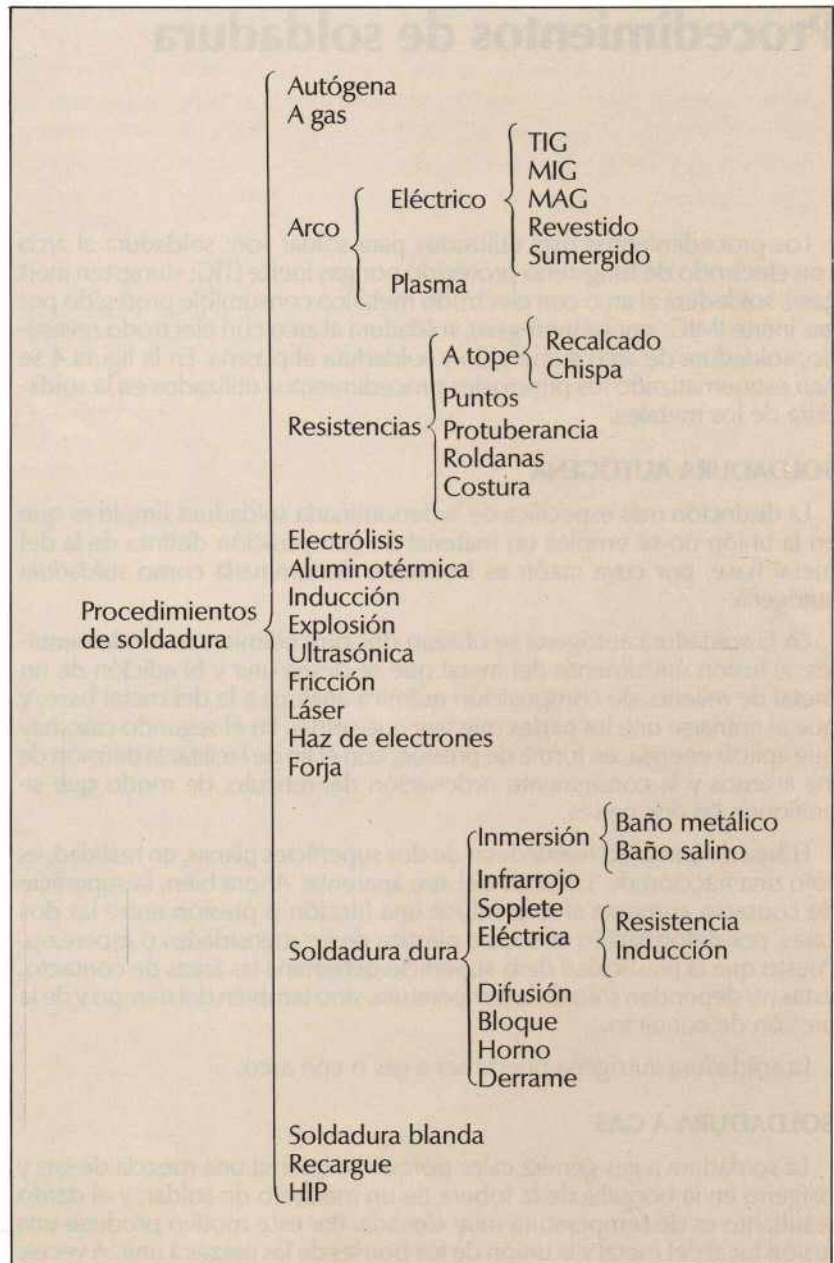
El área de contacto «verdadera» de dos superficies planas, en realidad, es sólo una fracción de 1:10.000 del aire aparente. Ahora bien, la superficie de contacto aumenta si se produce una fricción o presión entre las dos caras, por deformación elástica o plástica de las rugosidades o asperezas. Puesto que la plasticidad de la superficie determina las áreas de contacto, éstas no dependen sólo de la temperatura, sino también del tiempo y de la presión de contacto.

La soldadura autógena puede ser a gas o con arco.

SOLDADURA A GAS

La soldadura a gas genera calor porque se quema una mezcla de gas y oxígeno en la boquilla de la tobera de un mechero de soldar: y el dardo resultante es de temperatura muy elevada. Por este motivo produce una fusión local del metal y la unión de los bordes de las piezas a unir. A veces, en este tipo de soldadura, pueden emplearse un material adicional (alambre de soldar) y un fundente en forma de polvos o de pasta. Los polvos y las pastas neutralizan el efecto del óxido metálico (combinación del metal con el oxígeno, producida por la reacción química de un metal calentado en presencia del oxígeno del aire) que se forma siempre en la superficie de la soldadura. Con el óxido metálico el fundente forma escorias vítreas, fácilmente solubles, que protegen el lugar de la soldadura contra la adición

Figura 4. Tipos de soldadura.



del oxígeno del aire y que después de la soldadura pueden quitarse fácilmente con un martillo. Otros polvos se evaporan o volatilizan después del trabajo de soldadura. Si se emplea una llama normal (reductora), puede prescindirse de los polvos de soldar, ya que los óxidos metálicos se reducen en estas condiciones.

Las llamas de soldar

Mediante la combustión de una mezcla de un gas combustible con el oxígeno del aire se obtiene la *llama de soldar*. Se entiende por combustión (*oxidación*) la combinación de un cuerpo combustible con oxígeno.

En cuanto a la velocidad con que se efectúa el proceso de combustión, se distingue una combustión normal, como en el soplete de soldar y una violenta o rápida (explosión). La combustión puede ser incompleta o completa, según que la cantidad de oxígeno suministrada al gas combustible sea suficiente o insuficiente. En la combustión incompleta existen, en la llama de soldar, gases no quemados que tienden a combinarse con el oxígeno del aire que rodea la llama, es decir, que absorben el oxígeno del aire.

Una llama que no recibe suficiente oxígeno y lo absorbe del aire es una *llama reductora*. Si, al contrario, recibe oxígeno en cantidad excesiva, es decir, que tiene un exceso de oxígeno, es una *llama oxidante*, puesto que durante la soldadura lleva oxígeno a la zona de soldadura, lo cual sólo puede ser perjudicial.

Los gases que actúan en las llamas de soldar como medios reductores son: hidrógeno y monóxido de carbono.

La luz de la llama tiene su origen, en general, en que en ella existen cuerpos que se ponen al rojo (incandescentes) debido al calor de la misma y que brillan tanto más cuanto más caliente es la llama. Recibe el nombre de *potencia lumínica* la claridad de la llama. Esta brillantez depende de la naturaleza de los combustibles, de su temperatura y de su densidad.

A las llamas con cuerpos sólidos separados del combustible, a los que se debe la potencia lumínica, pertenecen todos los gases que contienen carbono, como acetileno, gas natural, gas de alumbrado, metano, butano, etc.

En el esquema de una llama (figura 5), la combustión de la corriente de gas que sale por la boquilla tiene lugar únicamente en el punto en que el

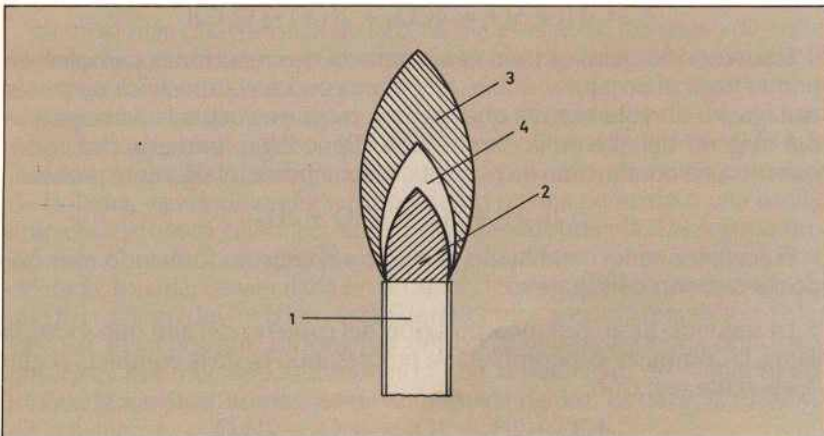


Figura 5. Aspecto de la llama:
1) boquilla; 2) zona fría (oscura) con gases sin arder;
3) combustión completa, llama oxidante; 4) zona luminosa formada por carbono incandescente.

combustible entra en contacto con el oxígeno del aire, o sea, en la periferia de la llama. En el núcleo se encuentran gases combustibles, sin arder. Este hecho puede demostrarse colocando allí una cerilla, cuanto más pequeña mejor, y se aprecia que le cuesta arder.

La longitud de la llama depende de la presión del gas, aumentando si ésta aumenta. Su forma está en función de la sección del orificio de salida del mechero. La forma cónica de la llama es condicionada por la acción del aire que entra alrededor de la misma; cuanto más tiempo penetra el aire en la corriente de gas, tanto más debe disminuir la sección de la llama.

Si un gas combustible contiene hidrocarburo, se obtiene carbono. Éste se produce en el núcleo, formado por gases sin arder, y la capa dentro de la cual se efectúa la combustión completa de los gases. Entre la capa y el núcleo hay, sin embargo, una zona intermedia luminosa, compuesta de carbono incandescente. La presencia de carbono sin quemar puede comprobarse introduciendo en sentido longitudinal, por poco tiempo, una placa de vidrio. Al sacar la placa se ve una mancha de hollín elíptica, que corresponde a la sección de esta zona.

Para aumentar la temperatura de una llama se utiliza el llamado mechero de aire, el cual recibe, según el fin a que se destine, los nombres de mechero de caldeo o de soldar. Se proveen de admisión de aire (mecheros Bunsen) o, para obtener las temperaturas máximas deseadas, de introducción de oxígeno (grifo Daniell). Este último caso es el soplete o mechero de soldar.

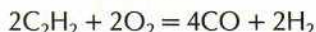
La coloración de la llama depende de los cuerpos gaseosos que existen en ella.

Llama oxiacetilénica

La molécula de acetileno (C_2H_2) consta de dos átomos de carbono y dos de hidrógeno. Para la combustión completa de 1 m^3 de acetileno se necesitan $2,5\text{ m}^3$ de oxígeno (o $1,25\text{ m}^3$ de aire). La proporción de mezclas, por tanto, 1:2,5. Este proceso de combustión se puede expresar por la siguiente reacción química:

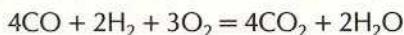


Esta reacción química total es la suma de dos reacciones parciales: en primer lugar el acetileno se une con el oxígeno en el mechero en partes casi iguales en volumen, ya que hay que tener en cuenta la participación del oxígeno del aire en la combustión. Tiene lugar, primero, por consiguiente, una combustión incompleta, efectuándose el siguiente proceso:



El acetileno se ha combinado, pues, con el oxígeno formando monóxido de carbono e hidrógeno.

En segundo lugar, por incorporación del oxígeno del aire que rodea la llama, la combustión incompleta va progresando hasta la completa según la siguiente reacción:



En resumen, el oxígeno del aire arde, por una parte, con el monóxido de carbono y produce dióxido de carbono (un gas ya no combustible) y, por otra parte, se combina con el hidrógeno libre y produce agua. El agua y el dióxido de carbono son, por consiguiente, los productos de la combustión. Para la combustión completa del acetileno se necesitan 2,5 partes en volumen de oxígeno por 1 parte en volumen de acetileno. El resultado, pues, de la combustión de 1 m³ de acetileno está constituido por 2 m³ de dióxido de carbono (CO₂) y 1 m³ de vapor de agua (H₂O).

En la llama oxiacetilénica (figura 6) se aprecian tres zonas claramente diferentes: la *zona fría*, donde únicamente hay una mezcla mecánica de oxígeno y acetileno, ambos en estado completamente íntegro, es decir, sin quemar, la *zona de soldar* y la *zona oxidante* o *de dispersión*.

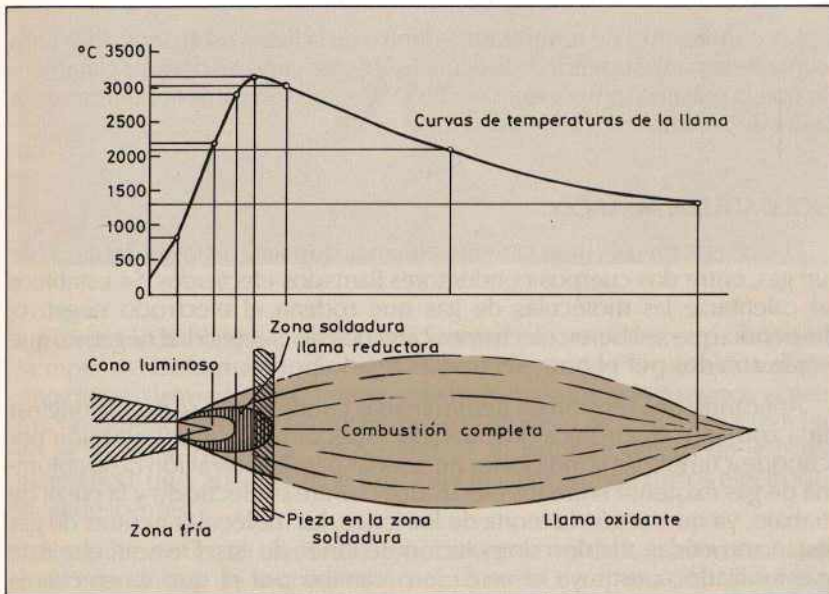


Figura 6. Zonas y temperaturas en una llama oxiacetilénica.

La señal más característica de la zona fría es el cono luminoso de color blanco deslumbrante, cuyo contorno netamente limitado se debe a la desintegración brusca del acetileno en sus dos componentes: carbono e hidrógeno. En las llamas pequeñas esta parte tiene el aspecto de un cono delgado (análogo al núcleo, que es siempre cónico) que, a medida que aumenta la presión del oxígeno o, mejor dicho, con el tamaño creciente de la llama, va adquiriendo la forma de un prisma parecido a una varilla, aproximadamente cilíndrico, con la cabeza redondeada. Las formas que difieren de esta forma cónica normal, o sea, una forma cónica corta, dentada, torcida, ensanchada en la punta o muy larga, son una prueba de que los orificios del mechero están deteriorados o que la regulación de las válvulas es deficiente. La longitud del cono depende de los orificios y presiones del mechero, aumentando con la velocidad de salida. Al aumentar la longitud, aumenta normalmente la rigidez, es decir, la «dureza» de la llama.

En la zona de la llama conocida como *zona de soldar* se encuentran los resultados de la primera combustión, la incompleta, o sea, monóxido de carbono e hidrógeno, ambos gases de acción reductora. Por esta razón, y porque en esta zona de la llama existe la máxima temperatura, es aquí donde se realiza la soldadura de la pieza. Es de importancia, por consiguiente, dejar entre la punta del cono y la superficie del baño de fusión una distancia, que depende del tamaño de la llama (del soplete) y varía entre 2 y 5 mm.

Los gases producidos en el producto intermedio por la entrada de oxígeno del aire (en la capa exterior de la llama) en el decurso de la combustión, es decir, el monóxido de carbono y el hidrógeno, son quemados y convertidos en su estado final, o sea, dióxido de carbono y agua (vapor de agua). Esta combustión completa se efectúa dentro de la tercera zona de la llama, la denominada *llama oxidante*.

Las condiciones de temperatura dentro de la llama están indicadas en la curva de la parte superior de la figura 6. De esta curva se deduce claramente que la máxima temperatura de 3100 °C existe únicamente dentro de la zona de soldar.

SOLDADURA AL ARCO

El arco eléctrico es una corriente eléctrica que salta, a través del aire o de un gas, entre dos cuerpos conductores llamados *electrodos*. Se establece al calentarse las moléculas de gas que rodean el electrodo negativo, haciendo que se liberen electrones cargados de electricidad negativa, que serán atraídos por el otro electrodo cargado positivamente.

Aplicando una tensión en determinadas condiciones, se puede originar una corriente electrónica que, debido especialmente a la ionización por choque, cumple las condiciones necesarias para la ionización de la columna de gas existente entre los electrodos o entre el electrodo y la pieza de trabajo, ya que, según la teoría de los iones, las moléculas neutras de gas están sometidas a la descomposición de iones de gas. De aquí que este gas ionizado constituya el verdadero camino por el que se efectúa la marcha o migración de la electricidad. En el interior de la columna gaseosa, los electrones (negativos) avanzan con enorme velocidad hacia el polo positivo. Este extraordinario y rápido movimiento de los electrones o de los iones se debe a su elevada energía cinética. Estas partículas aceleradas, al chocar con las moléculas neutras que contiene la corriente de gas, producen inmediatamente, como consecuencia, su descomposición en iones electropositivos y electronegativos, los cuales, por su parte, quedan igualmente a la disposición del transporte o a la migración de la electricidad. La columna de gas adquiere en este momento una media luminosidad, y entra una intensa radiación que produce arco eléctrico o voltaico. Los átomos cargados positivamente (cationes) son atraídos por el polo negativo (cátodo), que por el choque de los iones se calienta considerablemente. Este proceso de descomposición de los átomos en iones y electrones se denomina *ionización*.

El choque de los electrones con el polo positivo (ánodo) que ha tenido lugar en la distancia aérea con una velocidad muy elevada, se produce

con extraordinaria violencia y la energía cinética se transforma en calor en el lugar del choque.

Los elementos de un arco eléctrico para soldadura con electrodo desnudo son: el *núcleo* del arco, la *columna* de vapor (arco propiamente dicho), la *llama* y el *cráter* o parte de la pieza fundida por el arco (figura 7).

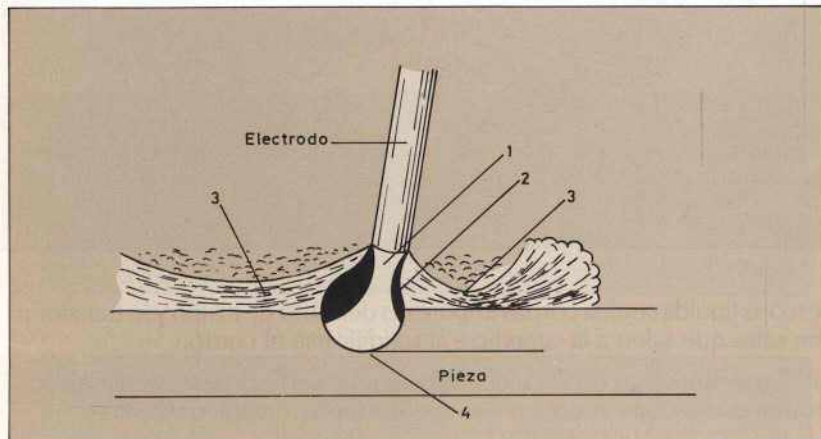


Figura 7. Arco eléctrico:
1) núcleo; 2) columna; 3) llama
y 4) cráter.

El arco eléctrico, que puede considerarse como un conductor móvil, no siempre sigue el camino más corto entre el electrodo y la pieza de trabajo, sino que es desviado lateralmente con movimientos más o menos violentos, fenómeno éste que estorba mucho el proceso de soldadura y muchas veces lo hace imposible, atribuyéndose al llamado efecto de soplado magnético, que, además, es la causa del mal encendido de los electrodos incandescentes.

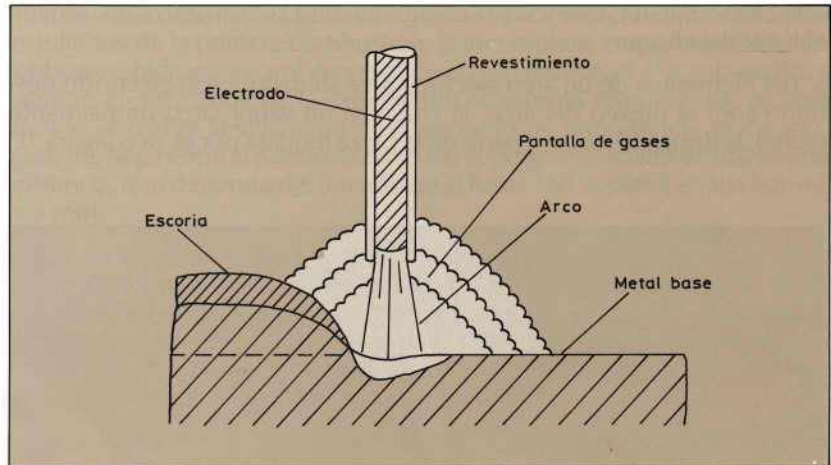
El electrodo es el elemento esencial en la soldadura eléctrica, sirve como conductor de la corriente y como metal de aportación. Puede ser desnudo o revestido.

Los electrodos desnudos son varillas de metal, de pequeño diámetro, muy poco empleados en soldadura normal por los inconvenientes que presentan, siendo los más destacados: dificultad en el encendido y mantenimiento del arco, cordón irregular de soldadura, imposibilidad de soldar en posiciones que no sean la horizontal, pérdida de elementos de aleación por oxidación y nitruración del acero base y malas cualidades mecánicas de la soldadura conseguida.

En los electrodos revestidos (figura 8) se distinguen: una parte metálica o *alma* y el revestimiento que la rodea. Este revestimiento tiene, entre otras, las misiones de facilitar el encendido y dar estabilidad al arco. Además protege el metal fundido de la oxidación y nitruración, protegiendo el baño hasta su total solidificación.

El revestimiento favorece también la formación del cordón y añade elementos necesarios al metal de aportación que no tiene el electrodo. La

Figura 8. Esquema de un electrodo revestido.



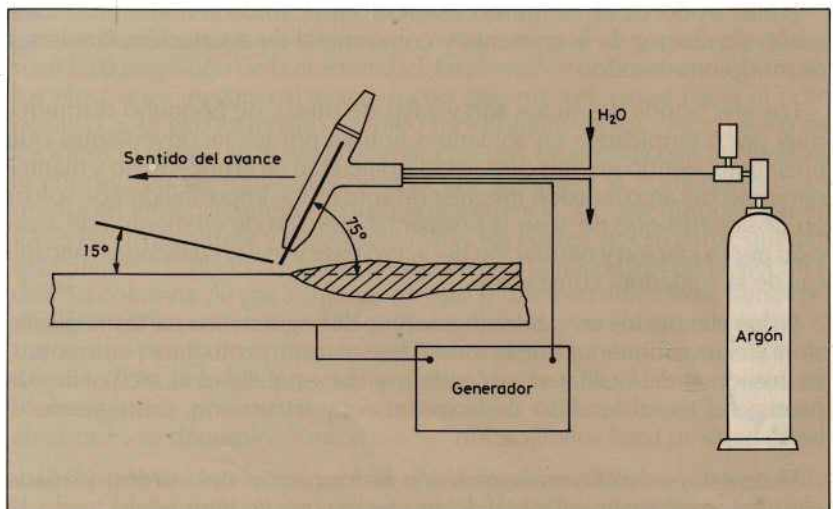
escoria líquida se alea con las impurezas del baño de fusión y lo transforma en sales que salen a la superficie al solidificarse el cordón.

El revestimiento de los electrodos puede ser: oxidante, ácido, neutro, rutilo, con escoria viscosa o con escoria fluida, orgánico y básico.

TIG

En el procedimiento TIG (figura 9) se emplea una corriente de gas inerte para proteger la soldadura. El arco se hace saltar entre un electrodo de tungsteno y el material base y, por una boquilla que rodea al electrodo, se hace llegar helio o argón, de modo que envuelva completamente al electrodo, al arco y a la masa fundida del metal y elimine toda atmósfera oxidante.

Figura 9. Esquema del procedimiento de soldadura TIG.



Como gas protector pueden emplearse también las siguientes mezclas: argón-6 % hidrógeno para níquel y sus aleaciones, argón-15 % hidrógeno, para aceros inoxidables y nitrógeno, que no presenta, según parece, contraindicaciones y rebaja considerablemente el coste de la soldadura.

Los valores de la corriente para esta soldadura son los reflejados en la figura 10, para soldar acero, cobre, níquel y titanio.

Para soldar aluminio, y sus aleaciones, los valores de la corriente, que ha de ser alterna, son los indicados en la figura 11.

diámetro electrodo mm	1	1,5	2,5	3,2	4
c.c.p.d.	20/80	70/150	150/150	250/400	400/500
c.c.p.i.	—	10/20	15/30	25/40	40/50

Figura 10. Condiciones para soldar acero, cobre, titanio y níquel: diámetro del electrodo, voltaje.

diámetro electrodo mm	1	1,5	2,5	3,2	4
corriente alterna A	20/50	50/100	100/120	160/250	200/300

Figura 11. Condiciones (diámetro del electrodo y voltaje) para soldar aluminio y sus aleaciones.

Soldadura por hidrógeno atómico

El arco salta entre dos electrodos de tungsteno que someten el gas a una temperatura de hasta 4000 °C a pocos milímetros del arco.

Se realiza por medio de una antorcha en la que se disponen los electrodos en V (figura 12). Por la boquilla llega un chorro de oxígeno que, al chocar con el arco, produce una llama al disociarse por elevada temperatura.

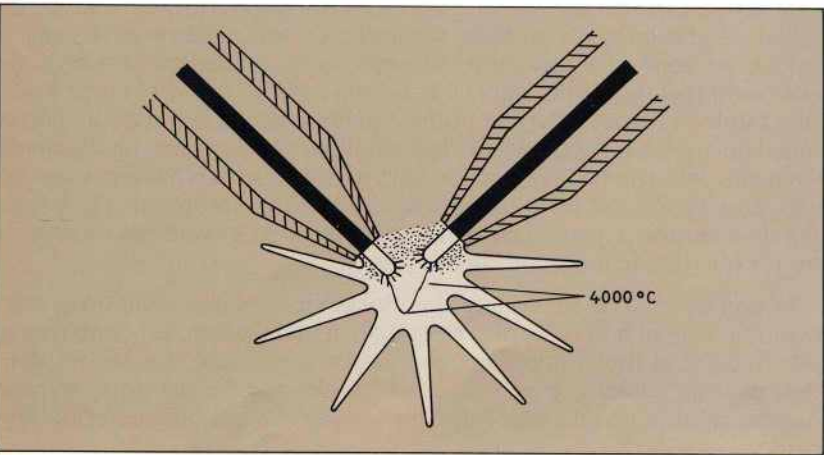


Figura 12. Fundamento de la soldadura por hidrógeno atómico.

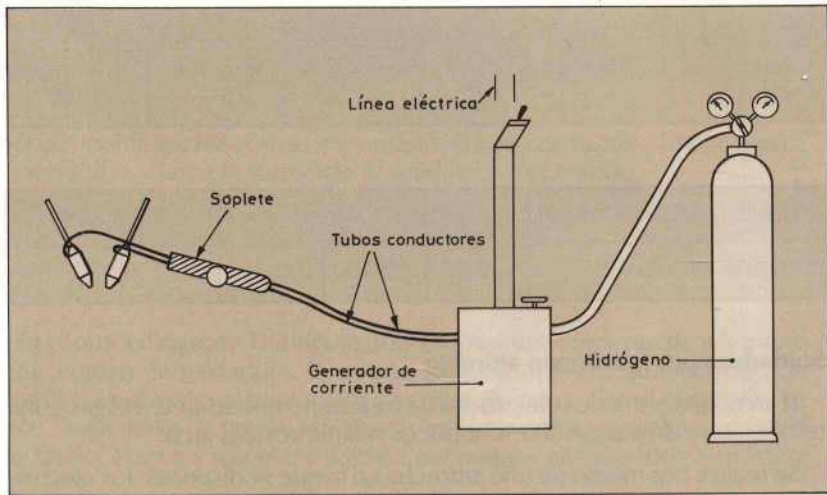
La corriente gaseosa, al tocar la pieza, pierde temperatura que luego recobra al mezclarse el hidrógeno con el metal base.

El empleo de electrodos desnudos facilita la fusión.

Se emplea corriente alterna, siendo las máquinas muy parecidas a las utilizadas para la soldadura por arco tradicional, si bien el voltaje es bastante más elevado, pudiendo llegar a los 300 V.

El hidrógeno se suministra en botellas, comprimido a 150 atmósferas. Desde las botellas pasa a una cámara de distribución situada en el generador de corriente. Desde éste y a través de tubos flexibles sale juntamente con la corriente de soldadura (figura 13).

Figura 13. Instalación para la soldadura por hidrógeno atómico.



MIG

Si se utilizan una atmósfera protectora de gas inerte y una varilla de metal de aportación, y se hace saltar el arco entre éste y el material a soldar, se tiene el muy conocido proceso de soldadura con arco de electrodo metálico: MIG (figura 14). El arco no sólo funde el metal a unir sino también el metal del electrodo, alimentando así la soldadura con el metal de aportación. Los electrodos metálicos se consumen rápidamente y hay que interrumpir la operación para reemplazarlos o alimentarlos con hilo. La tracción del hilo, cuando su diámetro es de menos de 1 mm, puede realizarse a mano; para diámetros mayores es necesario montar un motor que puede incorporarse a la pistola.

La corriente ha de ser continua, conectándose el electrodo en el polo positivo. Con el hilo o pistola conectado al hilo positivo (+) tiene mayor penetración el metal aportado, porque las gotas calientes se desprenden de este metal a gran velocidad, suministrando al mismo tiempo mucho calor al metal base. También es ejercida una buena acción limpiadora.

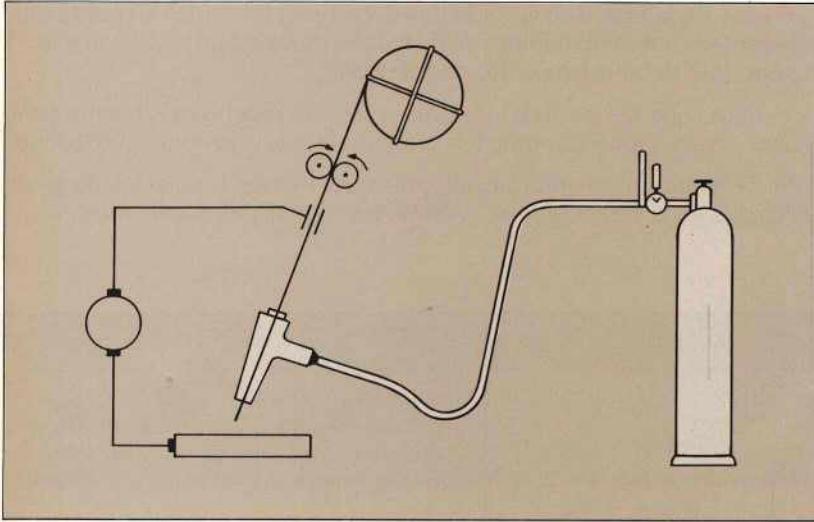


Figura 14. Instalación para la soldadura MIG.

Como generador se emplea una máquina de soldar de corriente continua y de tipo estático.

Como gases protectores se utilizan los siguientes: argón y helio, argón y cloro, y nitrógeno. Trabajando con una misma intensidad todos los gases, el helio es el que origina mayor tensión en el arco (figura 15).

MAG

Si el gas utilizado en la soldadura es activo, como el dióxido de carbono, el procedimiento de soldadura se denomina MAG.

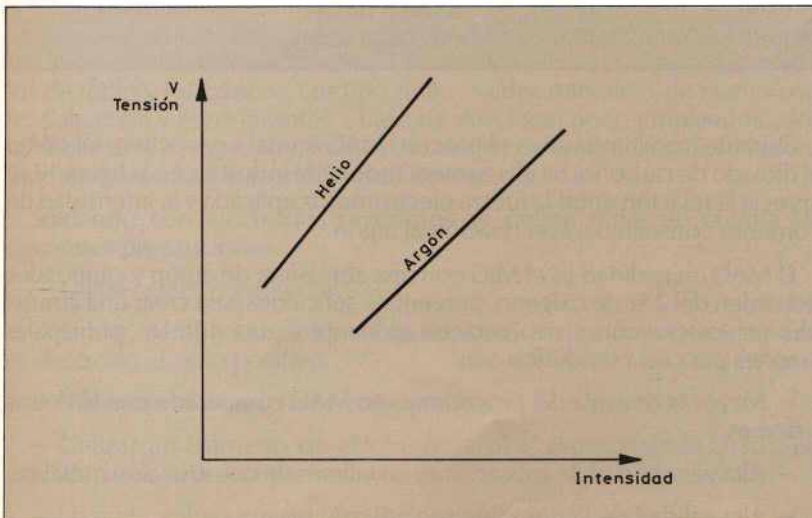


Figura 15. Relación entre la tensión y la intensidad de corriente en la soldadura MIG con helio y con argón.

El gas CO_2 utilizado en la soldadura debe tener un grado de pureza muy elevado: el contenido mínimo de CO_2 debe de ser de un 99,7 %, al mismo tiempo que debe estar exento de humedad.

Ventajas que tiene sobre los demás gases: es mucho más barato, tiene mayor penetración y la forma del cordón es buena y no tiene mordeduras.

En la figura 16 se aprecian los principales gases y mezclas de gases utilizados en la soldadura MIG y MAG y sus principales aplicaciones.

Figura 16. Principales gases y mezclas de gases utilizados en la soldadura MIG y MAG, así como sus principales aplicaciones en la soldadura de los distintos metales.

GASES	APLICACIONES
Argón	Aluminio y magnesio.
Helio	Aluminio, magnesio y cobre. Con este gas se disminuye el riesgo de porosidad.
Helio + argón (80 % + 20 %) hasta (50 % + 50 %)	Aluminio, magnesio y aleaciones de cobre.
Argón + 1 a 2 % de CO_2	Aceros inoxidables, aceros aleados y también para algunas aleaciones de cobre.
Argón + 3 a 5 % de CO_2	Aceros inoxidables, aceros aleados y aceros al carbono. Se requieren varillas desoxidantes.
Argón + 20 a 30 % de CO_2	Aceros, para obtener transferencia por cortocircuito.
Argón + 5 % O_2 + 15 % CO_2	Aceros al carbono. Se requiere varilla altamente desoxidante.
CO_2	Aceros al carbono y débilmente aleados, varilla desoxidante, es del todo esencial el uso de varilla especial.
CO_2 + 3 a 10 % O_2	El mismo campo de aplicación que el CO_2 .
CO_2 + 20 % O_2	El mismo campo de aplicación, sólo se utiliza en Japón.
Argón + 25 a 30 % N_2	Para soldar cobre.

Durante los últimos años el proceso MAG (metal y gas activo, tal como el dióxido de carbono) ha ido aumentando en la industria. En la figura 17 se aprecia la relación entre la fuerza electromotriz aplicada y la intensidad de corriente conseguida, con relación al argón.

El MAG en realidad es el MIG con una atmósfera de argón y cantidades del orden del 2 % de oxígeno, porcentaje suficiente para crear una atmósfera protectora con cierto carácter oxidante (figura 12). Las principales razones para esta tendencia son:

- Mayor economía del procedimiento MAG comparado con los otros sistemas.
- Alta versatilidad de aplicaciones en talleres de construcción metálica.
- Alta calidad de la unión de soldadura.

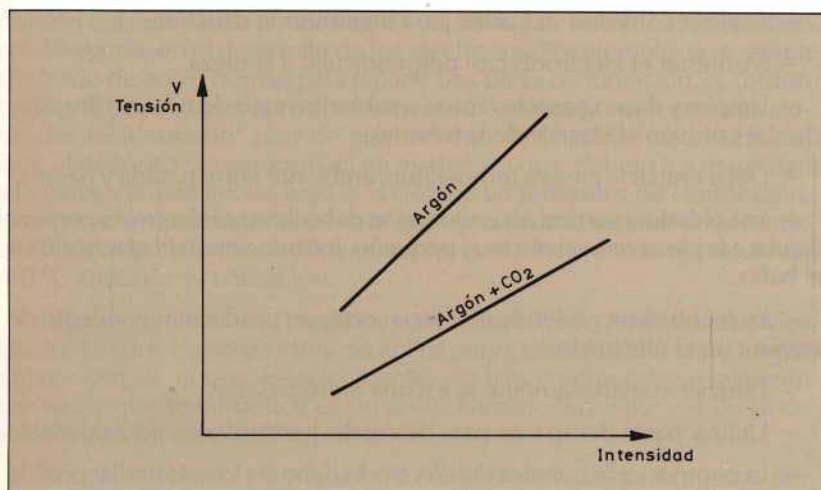


Figura 17. Relación entre la tensión y la intensidad de corriente eléctrica en la soldadura MAG con argón y dióxido de carbono.

En el mercado el proceso MAG compite con ventaja con la soldadura clásica al arco eléctrico con electrodo recubierto.

Con la soldadura MAG y totalmente mecanizada se reducen sensiblemente los tiempos muertos de limpieza y posicionado.

Soldadura al arco con electrodo revestido

Este procedimiento es como el MIG pero sin gas protector (figura 6). La atmósfera protectora se genera «in situ» por fusión y evaporación del revestimiento del electrodo. Se suele utilizar rectificador de corriente conectado al metal con el electrodo positivo: así se asegura mejor penetración y fusión completa.

Dada la amplia variedad de aportaciones existentes y la economía del propio procedimiento, los electrodos revestidos se usan en gran variedad de uniones y diferentes espesores. Los revestimientos más empleados son los de rutilo y los básicos. Los tipo rutilo (óxidos minerales de titanio con ferroaleación y escorificantes a base de sílice) son poco empleados y los básicos puros (carbonato y fluoruro de calcio con ferroaleaciones y escorificantes) presentan mayor dificultad operatoria.

Soldando, con electrodos revestidos se deben tener en cuenta las siguientes precauciones:

- Utilizar electrodos secos.
- Soldar, siempre que sea posible, con corriente continua, conectando el electrodo al polo positivo.
- Mantener el arco lo más corto posible.
- Utilizar un diámetro de electrodo igual al espesor de la chapa, en soldaduras de una sola pasada.
- Usar el mínimo aporte térmico posible.

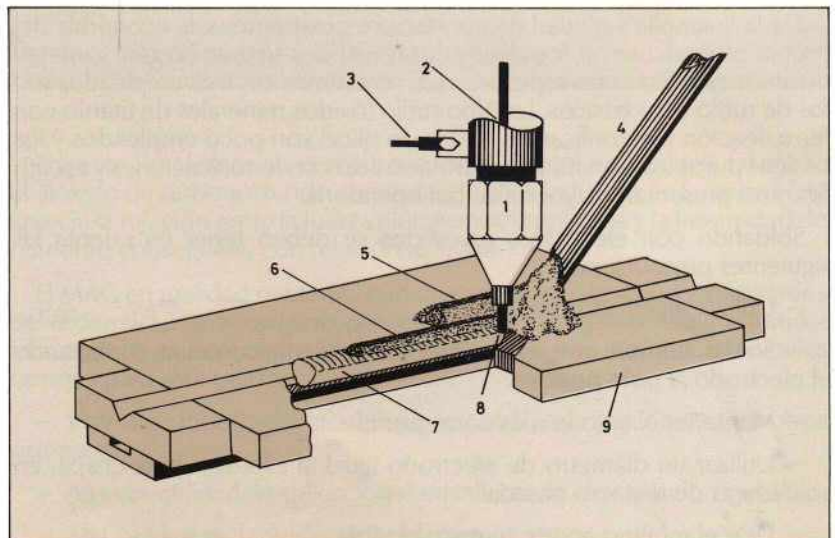
- Realizar cordones delgados para minimizar la dilución.
- Mantener el electrodo casi perpendicular a la pieza.
- Limpiar y desengrasar las zonas a soldar (en caso de tuberías limpiar y amolar también el interior de la tubería).
- Dejar enfriar la pieza a temperatura ambiente entre pasada y pasada.
- En soldadura vertical ascendente, se debe llevar el electrodo perpendicular a la pieza con vaivén muy pequeño, introduciendo el electrodo en el baño.
- En techo se recomienda usar arco corto, sin producir movimiento de vaivén con el electrodo.
- Eliminar cuidadosamente la escoria entre pasadas.
- Utilizar pasta decapante para desoxidar los cordones de soldadura.
- La composición química del electrodo debe ser lo más similar posible a la del metal base. Así se pueden conseguir características óptimas.

Soldadura con arco sumergido

El procedimiento de soldadura con arco sumergido (figura 18) utiliza el metal de aportación en forma de varillas o bobinas de alambre desnudos y el arco y el metal fundido permanecen debajo de una capa de fundente pulverizado, que protege de la corrosión. En una sola pasada se sueldan gruesas planchas.

La penetración o cantidad de metal base fundido es mucho mayor en la soldadura con electrodo revestido respecto a la oxiacetilénica, y el metal fundido se mezcla con el metal de aportación depositado con el electrodo. Según el tipo de electrodo y la intensidad empleada, la cantidad de

Figura 18. Soldadura por arco sumergido: 1) boquilla; 2) paso del alambre; 3) cable de alimentación de soldadura; 4) tubo de fundente; 5) fundente no fundido; 6) fundente fundido (escoria); 7) cordón de soldadura; 8) alambre electrodo; 9) material base o pieza de trabajo.



dilución del metal base puede llegar a un 30 %. Este hecho ha repercutido notablemente en el desarrollo de los electrodos. Por ejemplo, si se usa un electrodo de acero normal para reparar una pieza de fundición, el cordón resultante puede tener aproximadamente 1 % de carbono y, con las velocidades relativamente altas de enfriamiento de la soldadura eléctrica al arco, el depósito se transformará en martensita que, debido a su fragilidad inherente, causará grietas bajo la acción de las tensiones de contracción. Esta fisuración por temple es muy fácil que ocurra, incluso empleando electrodos tipo básicos que hayan sido presecados a una temperatura de 450 °C antes de su utilización.

Este procedimiento fue puesto a punto entre 1935 y 1940, tanto en los Estados Unidos como en Rusia. Se aplica principalmente al acero y, según su principio, el arco se establece entre un hilo continuo (generalmente cobreado) que se introduce en un polvo llamado fundente y la pieza de soldadura cubierta con este polvo.

El hilo va enrollado en una bobina llamada devanadera. Un poco por encima de la superficie de la pieza, pasa a través de un depósito conectado al generador de corriente (ni este dispositivo ni la devanadera están representados en la figura). El hilo se va desenrollando a medida que se va fundiendo, estando regulados, por regla general, el avance del portaelectrodo con relación a la pieza, así como la longitud del arco, por medio de dispositivos automáticos.

Los parámetros operacionales en orden de importancia son:

1. Intensidad de corriente eléctrica de soldadura.
2. Fuerza electromotriz de soldadura.
3. Tipos de fundentes.
4. Velocidad de soldadura.
5. Diámetro y tipo de alambre.
6. Fundentes (de un pase múltiple o de recubrimientos).

Durante la soldadura, el operador debe saber corregir, en la forma más rápida posible, alguna eventual imperfección que afecte la acción de la soldadura, porque el éxito del trabajo depende del control completo de los parámetros operacionales.

Intensidad de la corriente de soldadura

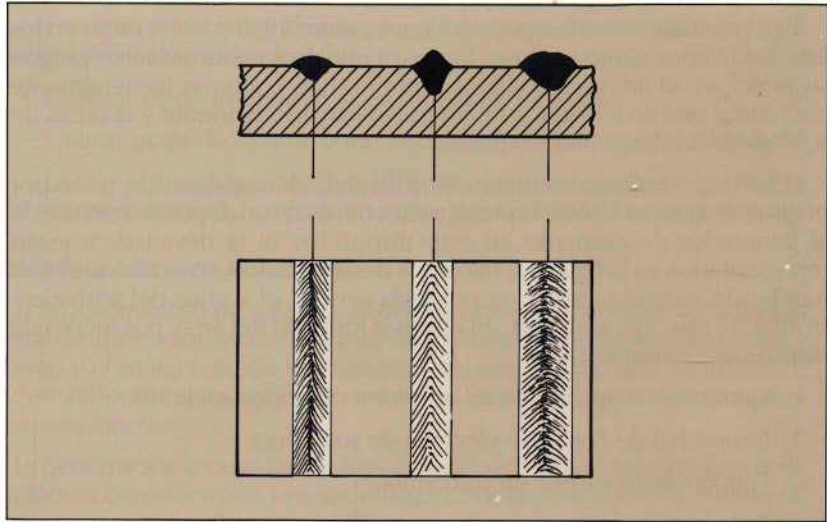
El amperaje es el parámetro que tiene mayor influencia en el proceso automático de soldadura con arco sumergido, porque alimenta la velocidad del alambre a la medida de su fusión y permite regular la penetración del depósito según la intensidad aplicada. El uso de excesivo amperaje, por ejemplo, provoca mucha penetración, demasiado refuerzo y, en consecuencia, una deformación de la pieza soldada. El uso de bajo amperaje produce falta de penetración e incompleta fusión.

En la aplicación de soldadura con el proceso de arco sumergido, es bueno recordar las siguientes medidas que conciernen a la utilización del amperaje:

- Al aumentar la intensidad de corriente se consigue una mayor fusión y aumento de penetración en la profundidad del metal base (figura 19).
- La intensidad de corriente excesiva produce demasiada fusión, excesiva penetración, socavación, cordones demasiado angostos y desfondamiento.

El empleo de intensidades de corriente demasiado bajas produce inestabilidad del arco, falta de fusión y falta de penetración.

Figura 19. Alambre 7/32 de diámetro. La velocidad de avance es de 30 pulgadas/minuto, 34 voltios. Profundidad de penetración del cordón de soldadura con tres diferentes amperajes, manteniendo invariado el voltaje, velocidad de avance y diámetro del electrodo.



Fuerza electromotriz

El objeto principal del voltaje en soldadura con arco sumergido es la variación de la longitud del arco entre el alambre electrodo y el metal de soldadura en fusión, determinando así la forma del cordón, su sección transversal y la apariencia externa (figura 20).

Los efectos de voltaje se pueden demostrar en esta forma:

- Al aumentar la fuerza electromotriz aplicada y, por lo tanto, la intensidad de corriente, se obtiene una mayor longitud del arco.
- Si, por el contrario, se aplica mayor intensidad, se obtiene menor longitud del arco.

En síntesis, se puede decir que, mediante la aplicación del voltaje adecuado, con un constante amperaje y correcta velocidad de avance de soldadura:

- Se consigue un cordón liso, extendido y sin socavones.
- Se tiene un consumo normal del fundente.
- Se reduce la porosidad, provocada por las escamas (o lámina) de fundición presentes en el arco.

- El metal de aporte capta los elementos aleantes presentes en el fundente.

Aplicando una fuerza electromotriz excesiva (demasiada longitud del arco):

- Se generan cordones de soldadura susceptibles de fragilización.
- Difícilmente se logra la eliminación de la escoria del cordón de la soldadura.
- Se tienen cordones de soldadura cóncavos, sujetos a rotura y socavación en los lados del cordón.
- El consumo del fundente aumenta considerablemente.

En cuanto al uso de bajo voltaje, produce baja longitud del arco, cordones abultados, inclusiones de escoria, dificultad en la eliminación de la misma, y menor consumo del fundente.

Velocidad de avance de soldadura

Cuando hay variación en la aplicación de la soldadura, por ejemplo, de un pase, de doble pase, etc., hay también variación en los parámetros operacionales. Intensidad y fuerza electromotriz están relacionados con la velocidad de avance de soldadura y, por supuesto, con el diámetro del alambre.

La *velocidad del avance* es el ajuste del ancho del cordón y el límite de penetración. Esto está relacionado con la intensidad y tensión de soldadura (amperaje-voltaje) y tipo de fundente.

En la figura 20 se aprecian tres tipos de cordones de soldadura obtenidos aplicando la misma intensidad de corriente, idéntica velocidad de avance y utilizando hilos de la misma composición y diámetro. Se deduce

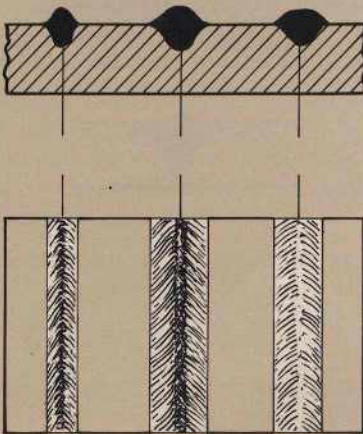


Figura 20. Alambre 7/32 de diámetro. Velocidad de avance de 30 pulgadas/minuto, 860 amperios. Efecto de los diferentes voltajes en la formación y penetración de los cordones de soldadura aplicados con el mismo amperaje y con la misma velocidad de avance, manteniendo invariado el diámetro del alambre y aumentando el voltaje.

Figura 21. Demasiada velocidad.

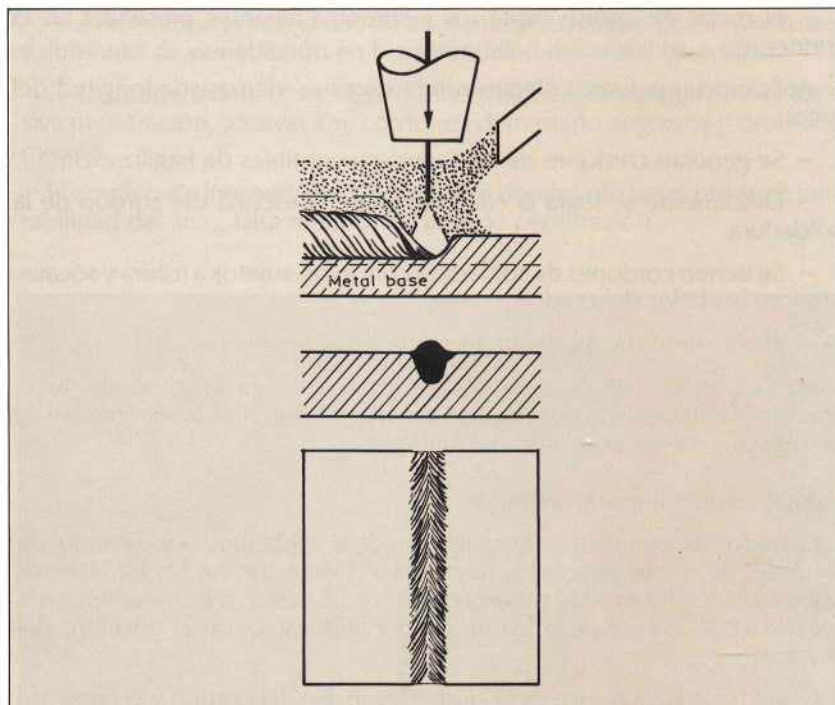
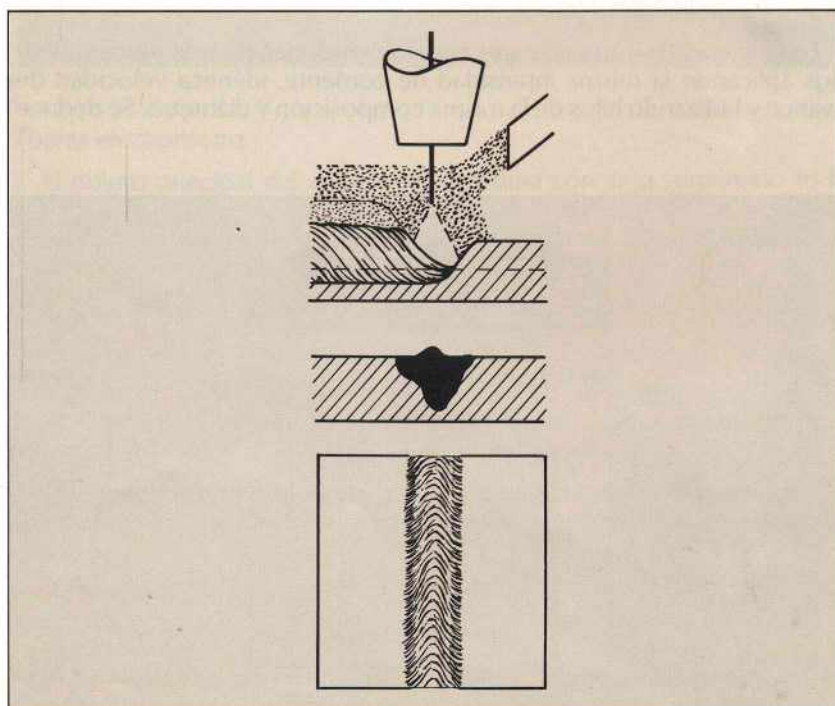


Figura 22. Velocidad demasiado baja.



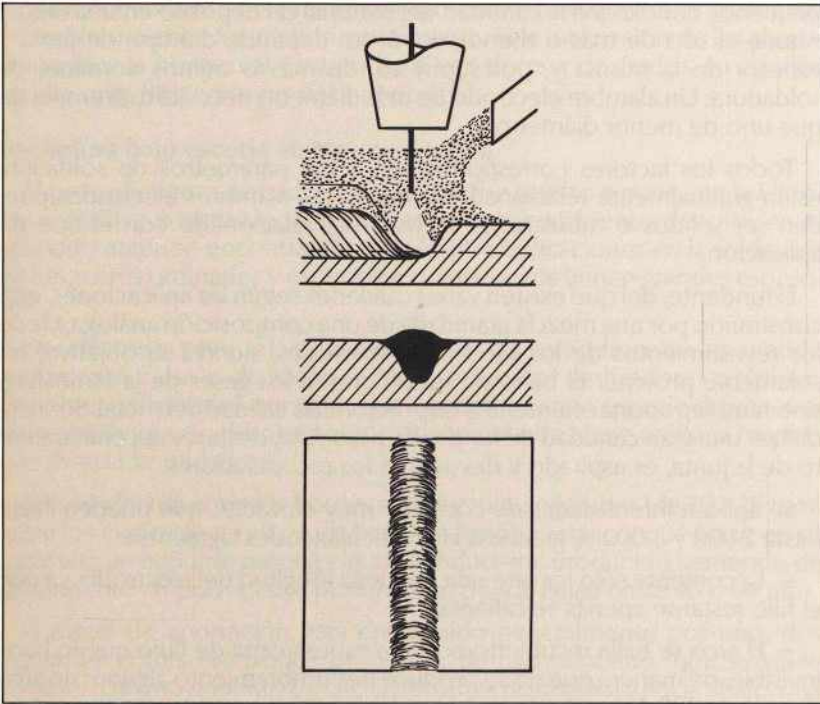


Figura 23. Velocidad normal.

que si en la aplicación de un cordón de soldadura se utilizan los cuatro factores correctos como son el diámetro del alambre, amperaje, voltaje y fundente, pero la velocidad de avance es demasiado rápida, se obtiene una soldadura poco uniforme, porque la velocidad del cordón impidió o no le dio al arco el tiempo de fusión necesario para fundir adecuadamente el metal base. Además, dicho impedimento no permite el desarrollo normal del cordón de soldadura (figura 21).

Si se mantienen sin variación los cuatro factores mencionados anteriormente y se aplica una velocidad de avance demasiado baja, el resultado será un cordón de forma convexa con tendencia a la rotura (figura 22).

La velocidad de avance demasiado baja expone excesivamente la unión a una intensidad del arco excesiva e impide la salida de los gases del metal en fusión, que quedan atrapados en el interior del cordón de soldadura; además puede producir desfondamiento por excesiva exposición al calor, socavaciones e inclusiones de escoria.

Desplazando el electrodo a velocidad normal se obtiene un cordón de soldadura simétrico (figura 23).

Alambre electrodo

El diámetro correcto del electrodo en el proceso de soldadura con arco sumergido es el elemento que, junto con el fundente, intensidad de corriente y velocidad adecuados, permite una profunda penetración del cordón de soldadura en una junta; además, según el diámetro (grande o

pequeño), condiciona la cantidad del material de depósito en una unión. Ahora, el uso de más o menos depósito, depende del tipo de junta y espesor de la misma y, por supuesto, de más o menos corriente de soldadura: Un alambre electrodo de más diámetro necesita más amperaje que uno de menor diámetro.

Todos los factores correspondientes a los parámetros de soldadura están gradualmente relacionados entre sí. Los alambres electrodos pueden ser sólidos o tubulares, y su uso está relacionado con el tipo de aplicación.

El fundente, del que existen varias calidades según las aplicaciones, está constituido por una mezcla granulada de una composición análoga a la de los revestimientos de los electrodos manuales, siendo su objetivo, no solamente proteger el baño de fusión contra los gases de la atmósfera, sino también aportar elementos que mejoren la calidad del metal. Se suele utilizar una gran cantidad de fundente, pero éste, después del enfriamiento de la junta, es aspirado y devuelto a los recuperadores.

Se aplican intensidades de corriente muy elevadas, que pueden llegar hasta 2.000 y 3.000 A, gracias a las particularidades siguientes:

- La corriente sólo recorre una pequeña longitud del electrodo, ya que el hilo restante apenas se calienta.
- El arco se halla recubierto por una espesa capa de flujo que lo hace invisible, de manera que no se produce deslumbramiento alguno; un arco de más de 300 A, que fuese visible, exigiría enormes precauciones a causa de la intensidad de la luz producida, especialmente en forma de rayos ultravioleta e infrarrojos.

Como el baño de fusión es invisible, todas las regulaciones —tensión del arco, intensidad, velocidad de desarrollo de hilo, velocidad de avance de la soldadura— deben efectuarse con toda precisión. Debemos añadir que se precisa un equipo eléctrico importante, así como dispositivos-guía perfeccionados. Es decir caros, y, en cada caso, una laboriosa puesta a punto previa de la máquina.

Gracias al desarrollo continuo del hilo, a la posibilidad de empleo de grandes diámetros (hasta 10 mm) e intensidades muy elevadas, y gracias también al rendimiento térmico, asimismo muy elevado —consecuencia de la posición del arco, en parte debajo de la superficie de la chapa—, así como a la supresión de los tiempos muertos, debido a los cambios de electrodos, se llegan a ejecutar soldaduras muy rápidas y con un coste de producción muy reducido.

El aspecto de las soldaduras realizadas es notable; aunque subsiste el fundente en estado vitrificado sobre el cordón, podrá ser desprendido fácilmente, apareciendo entonces una superficie limpia y regular, casi lisa.

Los materiales a los que se les ha aplicado hasta ahora este procedimiento son, sobre todo, el acero dulce o débilmente aleado. Sin embargo, se ha conseguido también soldar piezas de aleaciones de cobre, de aluminio o de titanio, naturalmente mediante el empleo de fundentes especiales.

Un inconveniente del procedimiento consiste en que no es fácilmente aplicable si no se efectúa horizontalmente. Si la inclinación de las chapas respecto a la horizontal es superior a una decena de grados, su empleo resulta muy difícil, por no decir imposible.

Soldadura bajo escoria electroconductora

El procedimiento llamado «Electroslag» fue puesto a punto en la URSS, hacia 1953 y constituye una variante del procedimiento descrito en el apartado anterior, encontrando interesantes aplicaciones en la soldadura de los aceros ordinarios y especiales cuando éstos tienen grandes espesores.

Se caracteriza porque la soldadura se efectúa verticalmente y en sentido ascendente. El baño de fusión se forma entre dos deslizadores o patines, de cobre, refrigerados por agua, que constituyen una especie de encofrado o molde que se desplaza automáticamente de abajo arriba, a medida que avanza la soldadura.

Esta se efectúa entre los bordes rectos y muy separados (de 20 a 25 mm) entre los cuales se produce un baño de fusión metálico, que tiene en su parte alta un baño de escoria electroconductora, producido partiendo de un fundente en polvo, cuya profundidad puede llegar hasta 40 o 60 mm.

El metal de aportación está constituido generalmente por uno, dos (figura 24) o tres electrodos desnudos, de hilo continuo, que se suele someter a un movimiento de oscilación en el plano axial y hacia abajo, una vez iniciado el proceso, utilizando el arco, en el baño de escoria electroconductora.

El procedimiento, que se aplica por medio de máquinas muy automatizadas, se utiliza para la soldadura de cuerpos cilíndricos, grandes prensas y

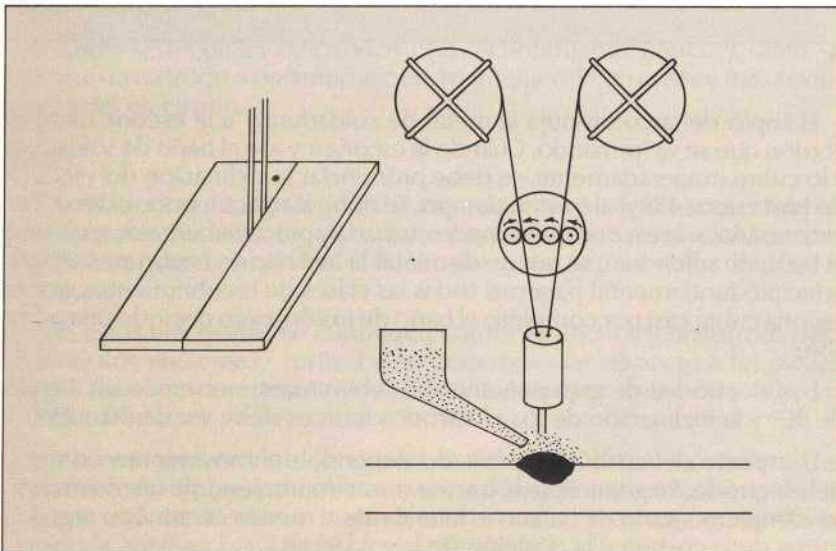


Figura 24. Soldadura por arco sumergido utilizando dos hilos.

otras grandes piezas de máquinas, como las laminadoras y las que se emplean en la construcción naval, así como para efectuar recargues muy importantes.

Los espesores considerados varían entre 35 y 150 mm. La velocidad de ejecución es dos veces superior a la que se alcanza en el procedimiento de soldadura con arco sumergido para un espesor de 40 mm, cuatro veces superior para 90 mm y ocho veces superior para 150 mm.

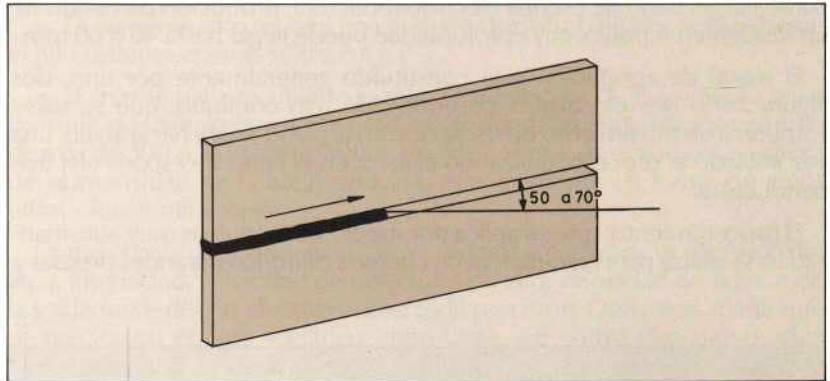
POSICIONES PARA LA SOLDADURA

La soldadura al arco se puede practicar en horizontal, en vertical y en techo.

Horizontal

Al soldar horizontalmente, el electrodo se mantiene en el plano de simetría de la soldadura y con una inclinación de 45 a 90° con relación a la superficie de la chapa y en el sentido del avance (figura 25).

Figura 25. Soldadura horizontal.



El soplo del arco empuja al metal de soldadura y a la escoria hacia el cordón que se va formando. Cuando la escoria invade el baño de soldadura y lo cubre exageradamente, se debe pronunciar la inclinación del electrodo hasta unos 45° y, al mismo tiempo, se debe alargar un poco el arco. Por el contrario, si la escoria queda muy retrasada y prácticamente descubierto el baño de soldadura, se puede disminuir la inclinación hasta unos 80°. Es principio fundamental para casi todas las clases de recubrimientos que la escoria cubra casi por completo el baño de fusión, pero dejando una parte libre.

Los electrodos de gran penetración deben mantenerse con un ángulo de 90° y la inclinación de los electrodos básicos debe ser de 80 a 85°.

El aspecto del cordón depositado depende del movimiento correcto del electrodo. En general, se le hace avanzar imprimiéndole un movimiento complementario de balanceo lateral más o menos acentuado según la forma de la costura y la posición de la soldadura.

Vertical

En la soldadura en posición vertical, se mantiene el electrodo perpendicular a las piezas y formando ángulo, en sentido del avance, de 90 a 110° si la marcha de la soldadura es ascendente. En cambio, si la marcha es descendente, el ángulo respecto al avance será de 100 a 130° (fig. 26).

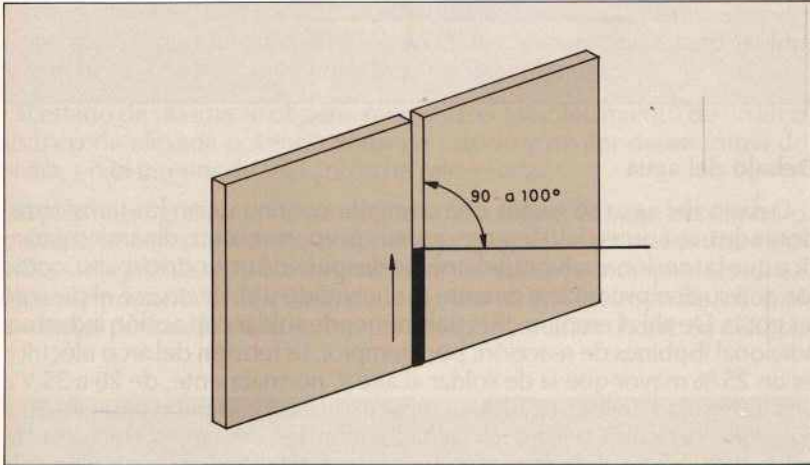


Figura 26. Soldadura vertical.

Ha de evitarse la soldadura vertical descendente, porque el metal fundido se cae y arrastra al que se va solidificando.

Con determinados tipos de electrodos, en especial con los de recubrimiento ácido, la escoria tarda en solidificarse, por lo que se ha de soldar en ascendente, separando intermitentemente la punta del electrodo para dar tiempo a que se enfríe.

Cuando se emplean electrodos con recubrimiento básico y rutilo se consigue un cordón más homogéneo, manteniendo un avance más continuado del electrodo.

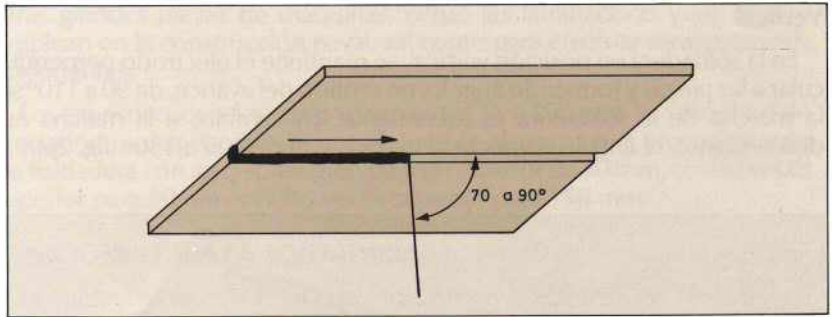
Techo

La soldadura del techo (figura 27) es una de las posiciones que más se practica y más cuidados requiere. Para obtener buenos resultados hay que elegir electrodos apropiados y éstos suelen ser los de rutilo, básicos y orgánicos.

Con estos electrodos se consiguen cordones anchos y uniformes desplazándolos en sentido vertical y en perpendicular respecto a las piezas que se sueldan, con las que han de formar ángulo entre 70 y 90° , en sentido del avance del electrodo.

Para conseguir un cordón estrecho no ha de darse movimiento al electrodo; en cambio, para obtener un cordón de 6 a 10 mm, se imprime a la punta del electrodo un movimiento circular o en zigzag rectilíneo cuando la anchura haya de ser mayor (figura 27).

Figura 27. Soldadura en techo.



Debajo del agua

Debajo del agua se suelda con corriente continua, con los transformadores de uso comercial, siempre que su comportamiento dinámico garantice que la tensión vuelve rápidamente después de un cortocircuito, como los que suelen producirse durante el encendido y al efectuarse el paso de las gotas. De ahí el empleo de instalaciones de soldar con acción inductora adicional (bobinas de reacción, por ejemplo). La tensión del arco eléctrico es un 25 % mayor que la de soldar al aire y, normalmente, de 28 a 35 V a una intensidad de 190 a 230 A. La tensión en vacío no debe pasar de 70 V para que no corra peligro el soldador con las descargas eléctricas. La soldadura debajo del agua exige una gran estabilidad del arco eléctrico, la cual sólo puede obtenerse utilizando determinadas clases de electrodos con cubierta gruesa. El recubrimiento debe ser absolutamente insensible al efecto disolvente del agua. Para conseguirlo se aplica un barniz no conductor y resistente a la acción del agua de mar (combinaciones de hidrocarburos). El diámetro del electrodo es de 5 mm para todas las soldaduras, y su longitud no debe ser superior a 350 mm. Del material del electrodo debe exigirse, a causa del intenso enfriamiento que sufre en el agua, una gran insensibilidad al agrietamiento debido a la contracción y endurecimiento por enfriamiento brusco. Los portaelectrodos deben estar perfectamente aislados por medio de una capa de caucho aplicada a presión.

Los rayos ultravioleta nocivos que parten del arco eléctrico (incluso los rayos visibles deslumbrantes) son ampliamente refractados y absorbidos por el agua, de modo que no hay necesidad de cristales de color para la protección de los ojos. El equipo del buzo puede ser el de uso corriente, pero conviene proteger las partes metálicas desnudas mediante cubiertas aisladoras para que el soldador no corra peligro al tocar fortuitamente los polos de la corriente de soldar.

Para soldar hay que conectar el electrodo al polo positivo, manteniéndolo inclinado en dirección de la soldadura formando un ángulo agudo de 30 a 40° con la pieza de trabajo, pues de lo contrario se producen fuertes muescas quemadas, y haciéndolo avanzar siempre en línea recta. Las soldaduras verticales se efectúan siempre de arriba abajo. Como forma de la costura soldada se ha elegido hasta ahora la costura canalada. Soldadura en X y en V no han podido ser ejecutadas hasta hoy de una manera perfecta, porque el arco eléctrico es desviado fuertemente en la base e

impide de este modo obtener una unión irreprochable del material. La resistencia a la tracción de las costuras acanaladas es buena; el endurecimiento del material a soldar no es especialmente alto, debido a que la soldadura no absorbe tanto nitrógeno como cuando se suelda al aire.

SOLDADURA CON PLASMA

Desde el punto de vista técnico, el término plasma significa la ionización o, eventualmente, la disociación de un gas convertido en conductor de electricidad. El plasma está considerado de hecho como un cuarto estado de la materia, totalmente diferenciado de los otros tres.

El estado de plasma se obtiene mediante el establecimiento de un arco eléctrico de elevada potencia entre un cátodo y un ánodo en forma de tobera, en el interior de una antorcha refrigerada.

El plasma se genera en la pistola de soldar (figura 28) y se concentra o constriñe por efecto térmico o por efecto magnético. Entre los dos electrodos de la pistola se aplica un generador de alta frecuencia y se introduce el gas plasmágeno. Un extremo de la cámara es un electrodo de material conductor perforado en su centro para proporcionar un chorro de plasma.

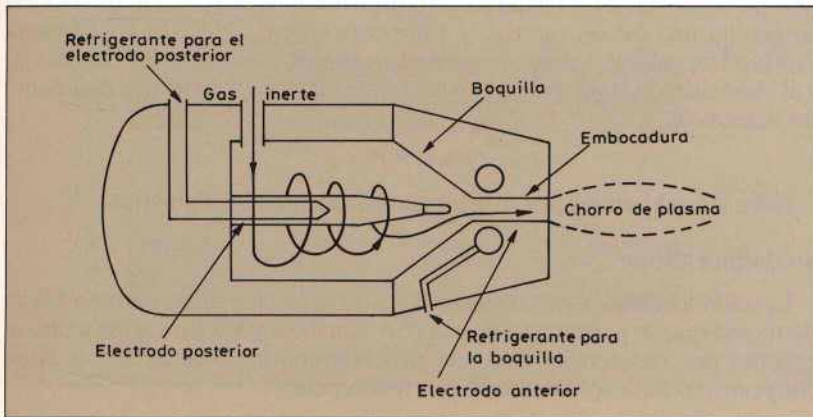


Figura 28. Esquema de una pistola de soldar con plasma.

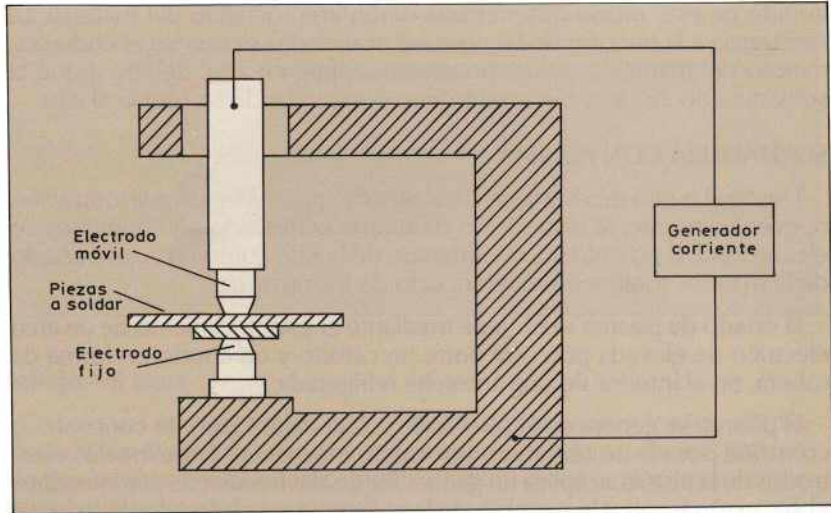
El arco de plasma puede ser, según los casos:

1. Transferido, es decir, que salta entre el electrodo y la pieza de soldadura, en cuyo caso esta última se encuentra en el circuito eléctrico; este sistema se adapta mejor a cualquiera de los casos conocidos, por lo cual es el que se usa más frecuentemente;
2. No transferido o soplado, es decir, que salta entre el electrodo y la tobera, por lo que la pieza de soldadura no se encuentra en el circuito eléctrico; este sistema se adapta mejor a espesores pequeños.

SOLDADURA POR RESISTENCIA

Soldar por resistencia consiste en unir varias piezas por medio de fusión, producida por la energía calorífica generada por el paso de corriente

Figura 29. Esquema general de la soldadura por resistencia.



eléctrica de alta intensidad durante un corto tiempo, sometiendo al mismo tiempo las piezas a un esfuerzo de compresión (figura 29). De este modo se genera una fusión puntual y muy concentrada, debido a una cierta cantidad de calor (Q), proporcional a la resistencia eléctrica del circuito (R) y al cuadrado de la intensidad de la corriente (I) que circula por él durante un tiempo (t):

$$Q = R \times I^2 \times t$$

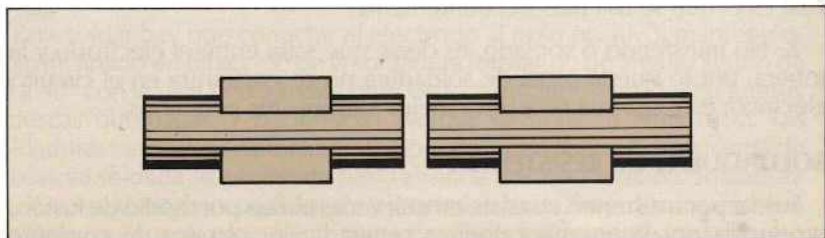
Entre las soldaduras por resistencia destacamos las siguientes:

Soldadura a tope

La soldadura *a tope por resistencia* consiste en alinear las partes a soldar de modo que se junten a tope una con otra (figura 30). Esta zona a unir se calienta por resistencia. Existe el procedimiento de *recalcado* y el de *chisporroteo* para soldar a tope por resistencia.

La soldadura a tope se distingue de los otros procedimientos clásicos de soldadura (por puntos y por roldanas) no solamente por su procedimiento operatorio sino, sobre todo, por el hecho de que la soldadura se realiza en toda la sección de las dos piezas unidas, formándose una pieza única perfectamente continua desde el punto de vista de sus dimensiones

Figura 30. Disposición de los electrodos para la soldadura a tope.



geométricas y sensiblemente homogénea desde el punto de vista metalúrgico y en cuanto a uniformidad de la resistencia mecánica.

Este procedimiento permite realizar la unión rectilínea de redondos, cuadrados, perfiles diversos, tubos, flejes, etc., o la unión de piezas que forman entre sí un cierto ángulo (generalmente 90°).

A tope con recalcado

La soldadura a tope con recalcado se lleva a cabo alineando convenientemente las piezas a soldar, aplicando una carga en dirección axial y aplicando una fuerza electromotriz elevada. En estas condiciones, por efecto Joule se calienta la zona de contacto entre piezas, disminuyendo, por lo tanto, su resistencia mecánica. Así se ejerce un efecto de *forja* en esta zona, aumentando las superficies de contacto de ambas piezas (figura 31).

Para conseguir buenas soldaduras a tope con recalcado es necesaria una buena preparación superficial: las superficies a unir deben estar exentas de óxidos y completamente paralelas.

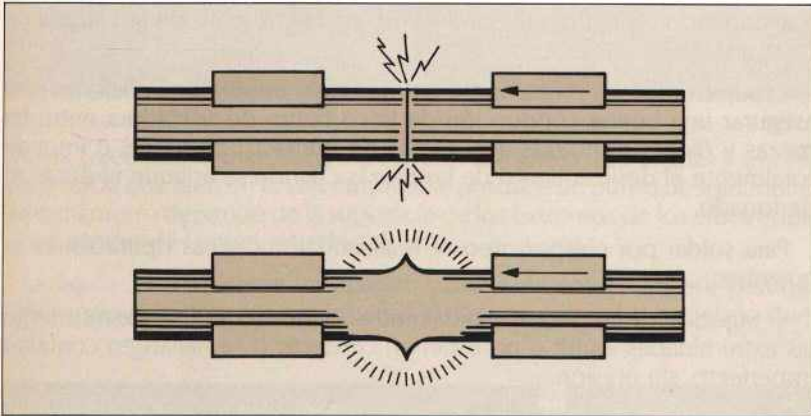


Figura 31. Disposición de los electrodos en soldadura a tope por recalcado.

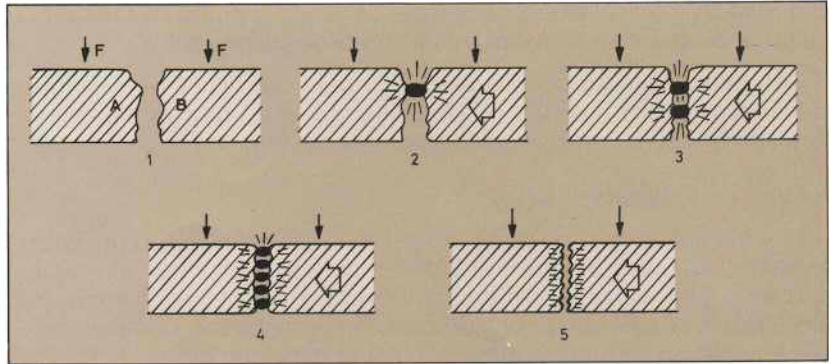
A tope con chisporroteo

En la técnica de la soldadura por resistencia a tope con chisporroteo no es necesaria una preparación superficial especial. El paralelismo de las superficies de las piezas a soldar no es una condición obligada para esta operación.

Las piezas a unir se llevan a un ligero contacto y la corriente circula a través de los puntos de contacto (figura 32). Si estas áreas de contacto son muy limitadas, la densidad de corriente que fluye es muy elevada y genera gran cantidad de calor, de modo que se funden estas zonas y se genera un puente líquido, que pronto hierve y se expulsa formando chispas y generando un cráter.

La posterior aproximación de las piezas a soldar genera, por cortocircuitos, otros puentes líquidos, otras chispas y más cráteres.

Figura 32. Disposición de los electrodos en la soldadura a tope por chisporroteo:
1) aproximación de las piezas a unir; 2) un puente líquido;
3) dos puentes líquidos;
4) cinco puentes líquidos;
5) superficies de contacto aplanadas.



Las chispas desaparecen cuando los puentes líquidos se han convertido en una película líquida que cubre uniformemente la superficie a unir. Los cráteres también se convierten con el tiempo en superficie plana.

Cada una de las piezas a soldar se sujeta en un dispositivo de mordazas. Estas mordazas, conectadas directamente a los bordes del secundario del transformador, aseguran la conducción de la corriente de soldadura en cada una de las piezas a soldar.

La sujeción de las piezas entre las mordazas deberá ser suficiente para asegurar una buena conducción de la corriente de soldadura entre las piezas y dichas mordazas (resistencia de contacto pequeña) e impedir totalmente el deslizamiento de las piezas cuando se aplique el esfuerzo de forjado.

Para soldar por chisporroteo se realizan las sucesivas operaciones siguientes:

- Sujeción de las piezas a soldar entre las mordazas. En este momento las extremidades a unir o no están en contacto o se hallan en contacto imperfecto, sin presión.
- Conexión del transformador y, como consecuencia, de las piezas a soldar.
- Comienzo del movimiento lento de la mesa móvil.
- Sutil forjado después de cierto desplazamiento.

Soldadura por puntos

Los dos electrodos se van aplicando en distintos puntos o, mejor, zonas de la chapa a soldar (figura 33). Se utiliza para unir chapas de espesores mínimos de 0,05 mm y espesores máximos de 6 mm cada chapa.

Se unen planchas superpuestas a cualquier distancia soldando por puntos, o sea, punteando la soldadura. El secundario de un transformador está conectado con los dos electrodos. La corriente pasa por el electrodo, vence la resistencia que le oponen las dos chapas superpuestas con lo cual este lugar (entre los dos electrodos) se calienta por efecto Joule y, por medio del electrodo, vuelve la corriente al transformador y a su fuente de

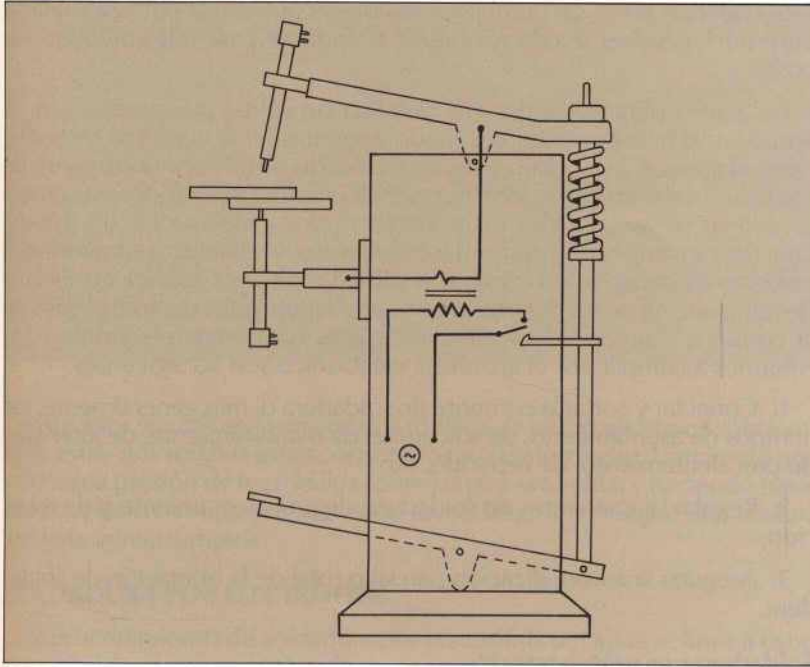


Figura 33. Esquema de la soldadura por puntos.

origen. En el mismo lugar donde la corriente atraviesa las planchas y gracias a la presión que ejercen los electrodos, se produce un punto de soldadura, cuyo diámetro depende de la superficie de los extremos de los electrodos y la duración de la corriente de soldar.

La figura 34 representa un aparato portátil de soldadura por puntos. Colocando estos puntos a pequeñas distancias entre sí, y haciendo que



Figura 34. Aparato portátil para la soldadura por puntos.

éstos queden libres de burbujas o «fallos» se obtiene la costura soldada, que muchas veces puede mejorarse cuando se pasa a la soldadura de costura.

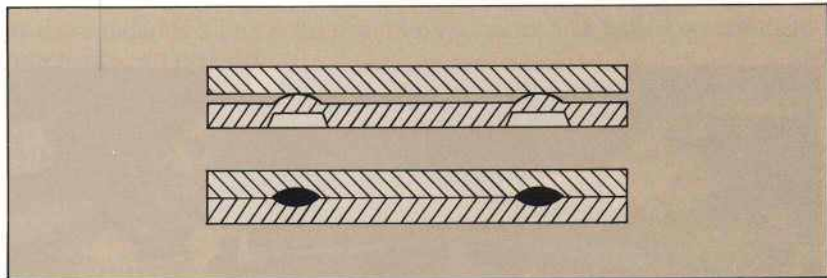
Las partes principales de una máquina de soldar por puntos son: el armazón, el transformador destinado a suministrar la corriente de soldadura, el circuito secundario exterior destinado a conducir la corriente de soldadura del transformador a los portaelectrodos y electrodos en contacto con las piezas a soldar, los portaelectrodos y electrodos, un sistema para dar movimiento y presión a los electrodos (destinado a suministrar el esfuerzo de compresión localizado sobre las piezas a soldar), un sistema de refrigeración de los órganos sujetos a calentamiento durante el paso de la corriente y un aparellaje eléctrico y, eventualmente, electrónico. Las misiones a cumplir por el aparellaje electrónico son las siguientes:

1. Conectar y cortar la corriente de soldadura o, más generalmente, los tiempos de asentamiento, de soldadura, de mantenimiento, de intervalo, de precalentamiento, de recocido, etc.;
2. Regular las corrientes de soldadura, de precalentamiento y de recocido;
3. Asegurar la automatización parcial o total de la operación de soldadura.

Soldadura por protuberancias

En las piezas a unir se diseña un abultamiento superficial (figura 35) de modo que represente la resistencia y en la etapa de fusión desaparece. Este tipo de soldadura tiene la misma aplicación que en el caso de por puntos, pero con una gama más estrecha, pues no abundan las soldaduras en espesores menores de 0,2 mm, ni mayores de 3 mm.

Figura 35. Protuberancia.



Soldadura por roldanas

Los dos electrodos son círculos de cobre que se desplazan a lo largo de la línea a soldar. En realidad representa un conjunto de soldaduras por puntos. Se aplica en láminas de acero bajo en carbono muy finas (0,05 mm), mientras que no suele utilizarse por encima de 2 mm.

Para la ejecución de costuras longitudinales en planchas delgadas, se utilizan generalmente los electrodos de rodillos. Los dos electrodos están

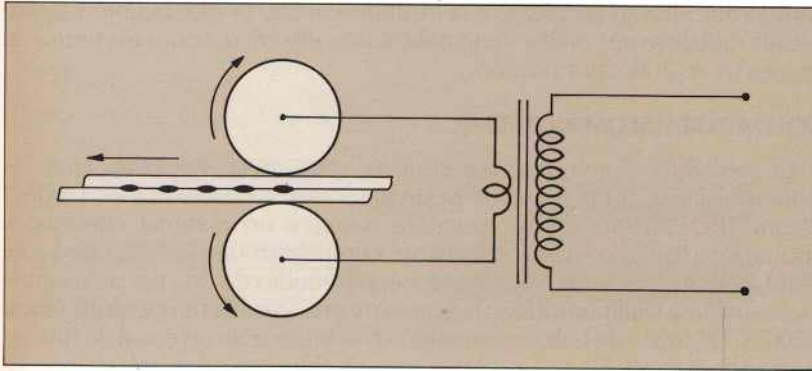


Figura 36. Soldadura por roldanas.

construidos (fig. 36) en forma de dos rodillos de cobre, giratorios sobre sus ejes. Estos dos rodillos están conectados al transformador. Ejerciendo una adecuada presión de los rodillos sobre las piezas a soldar y haciendo pasar las dos planchas superpuestas entre los rodillos, se consigue una costura soldada ininterrumpida.

SOLDADURA POR ELECTRÓLISIS

El procedimiento de soldadura por electrólisis del agua se lleva a cabo conectando el polo positivo de un generador de corriente continua a un recipiente (fig. 37), recubierto de plancha de plomo y bien aislado de la tierra. Este recipiente se llena con una disolución de sosa, cuya conductividad eléctrica aumenta por la adición de un poco de ácido sulfúrico. El polo negativo va conectado a la pieza a soldar, y de aquí al negativo del generador. Introduciendo esta pieza en el líquido se efectúa un proceso análogo al de la producción de hidrógeno en electrolizadores, es decir, el agua o la disolución se descomponen por el paso de la corriente eléctrica. En el polo negativo, o sea, en la pieza a soldar, se separa hidrógeno, que envuelve las piezas metálicas con una delgada capa de gas. Esta capa ofrece una resistencia tan grande que da lugar a la formación de una gran cantidad de pequeños arcos voltaicos entre el electrolito y el metal, que

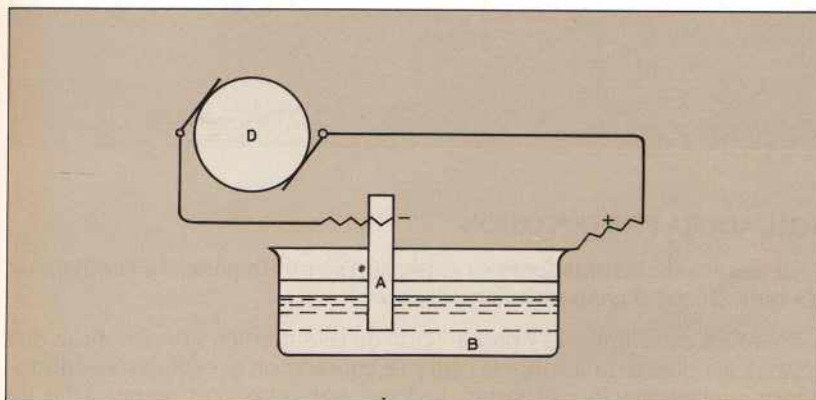
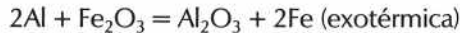


Figura 37. Soldadura por electrólisis.

muy pronto llevan las piezas a la incandescencia. La íntima unión de las piezas metálicas se verifica fuera del circuito eléctrico, sobre el yunque, a golpes de martillo, por presión.

SOLDADURA ALUMINOTÉRMICA

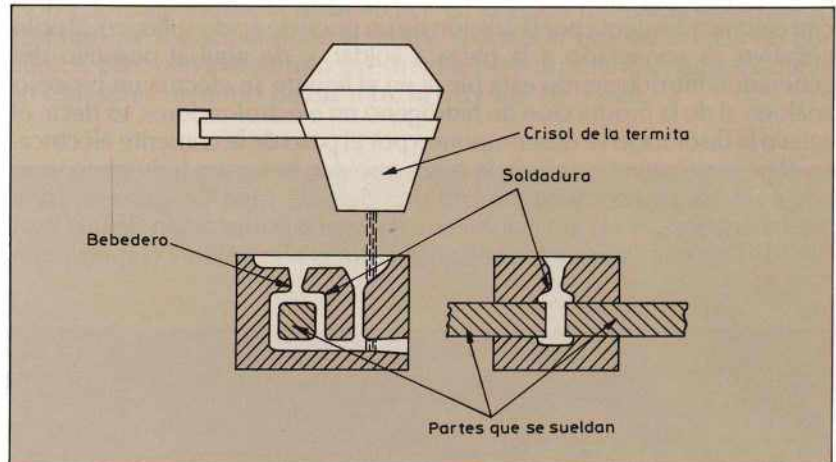
La soldadura aluminotérmica consiste en mezclar óxido de hierro y polvo de aluminio, encenderlo y dejar que entren en reacción a los 1200 °C (figura 38). Esta elevada temperatura requiere un material intermedio «portador», llamado masa de ignición, compuesto de peróxido de bario (BaO_2) y polvo de aluminio, cuya masa, por medio de una tira de magnesio, se inflama fácilmente. Bajo la acción de una elevada temperatura (unos 3000 °C) el óxido de hierro contenido en el interior de un crisol de fusión, se transforma en hierro, mientras que el aluminio se combina con el oxígeno liberado y forma óxido de aluminio (alúmina). Esta fuerte reacción (transformación) se produce según la siguiente fórmula:



La alúmina, de menos peso específico, flota en la superficie del recipiente en forma de escoria fluida y evita la combustión del acero líquido que se encuentra debajo. Esta reacción tan sencilla, que dura de 10 a 20 segundos, es posible por la gran afinidad del aluminio para el oxígeno.

Un kilogramo de compuesto aluminotérmico genera 476 g de escoria, 524 g de hierro y 188 calorías.

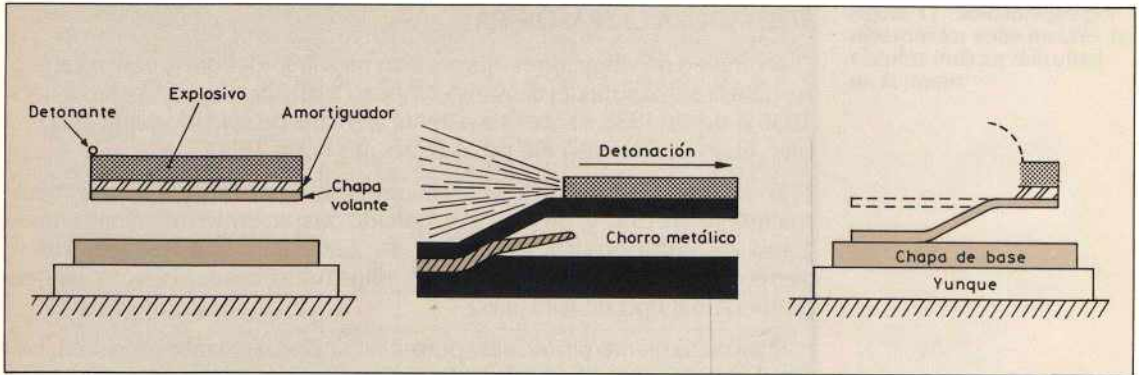
Figura 38. Soldadura por termita.



SOLDADURA POR EXPLOSIÓN

La técnica de la soldadura por explosión se utiliza para fabricar materiales bimetalicos o chapados (fig. 39).

Después de la limpieza y preparación de las superficies de unión, las dos chapas se colocan una sobre la otra y se cubren con el explosivo seleccionado; a continuación se cubre todo el conjunto con arena, a fin de



amortiguar la explosión y se hace detonar la carga. Las chapas bimetálicas consisten únicamente en el material básico y su capa de metal de revestimiento, unidas integralmente.

Esta unión, de extraordinaria resistencia, se forma por el fenómeno metalúrgico que ocurre cuando dos chapas metálicas entran en colisión a gran velocidad bajo los efectos de una gran carga explosiva. La detonación genera una alta presión en la superficie de contacto, dando lugar a la formación de un chorro metálico en el espacio anterior a la zona de impacto.

Este chorro, mediante el proceso de deformación por esfuerzo cortante, elimina las películas gaseosas adheridas en la superficie, creando así unas condiciones perfectas para la unión de metal con metal.

La onda explosiva se propaga de tal forma que el chorro metálico queda atrapado entre las chapas de colisión y se solidifica en charcos discretos.

De esta manera se consigue una unión de naturaleza atómica por la combinación de dos procesos metalúrgicos: aleación por fusión y deformación por esfuerzo cortante.

Con la técnica de la soldadura por explosión pueden producirse hoy placas de titanio y acero con juntas tan estables que ni siquiera una curva de 180° alrededor de una conformadora de radio de 2×1 de espesor provocaría una separación.

La tabla de la figura 40 recoge algunos pares de metales soldados por explosión.

Figura 39. Método de formación de la unión metálica por explosión.

Aluminio	sobre	Plata
Cobre	sobre	Acero inoxidable
Cobre	sobre	Inconel
Cobre	sobre	Titanio
Monel	sobre	Acero inoxidable
Inconel	sobre	Acero

Figura 40. Metales soldados por explosión.

SOLDADURA ULTRASÓNICA

El empleo de vibraciones ultrasónicas para la soldadura y, concretamente, para la soldadura del aluminio empezó a estudiarse en Alemania hacia 1936 y, desde 1938, existe una patente alemana de soldador ultrasónico, si bien el procedimiento fue poco conocido hasta 1950.

En los Estados Unidos los tratamientos se empezaron a aplicar industrialmente en 1952 y, desde 1955, han ido apareciendo máquinas comerciales de una potencia del orden de 2.000 vatios; estos aparatos se perfeccionan sin cesar y así se han construido modelos de soldadura continua del tipo de roldanas.

El procedimiento ultrasónico permite unir piezas metálicas no soldables por los métodos clásicos, eléctricos o al soplete; con él se obtienen uniones muy resistentes y juntas estancas a base de soldadura continua. En cierto modo se puede comparar este procedimiento a la soldadura eléctrica por puntos o a la soldadura continua por roldanas; pero su principio es muy diferente, puesto que en realidad se trata sólo de un efecto de presión.

La soldadura por ultrasonidos («ultrasonic welding»: USW) se lleva a cabo mediante la producción de vibraciones de alta frecuencia aplicadas en la zona de contacto de las dos piezas metálicas que se desean unir, sometidas a cierta presión. De este modo los átomos superficiales del metal disrumpen de los componentes y contribuyen a unir las dos partes separadas. Este procedimiento de soldadura se utiliza para enlazar partes metálicas de la misma y de distinta naturaleza, según indica la figura 41.

Entre las ventajas ofrecidas por este procedimiento de soldadura cabe citar que no implica un calentamiento significativo de las partes a enlazar, pues la temperatura alcanzada con esta técnica suele ser del orden del 30 al 50 % de la temperatura de fusión del metal a soldar, expresada en la escala absoluta. Esto significa que no sólo se elimina el riesgo de fragilidad del metal a soldar por la morfología microestructural de cordón o de los puntos de soldadura, sino que apenas existe zona afectada (fragilizada) por el calor. Además, es suficiente que la presión aplicada para soldar las partes sea del orden del 10 % de la necesaria para la deformación metálica.

Con este procedimiento se eliminan, pues, los tratamientos térmicos posteriores a la soldadura, la adición de fundentes y las operaciones de limpieza posteriores a la soldadura, mientras que la limpieza previa a la operación es mínima.

El principio de la soldadura por ultrasonidos consiste en convertir las vibraciones de ultrasonidos de alta frecuencia en vibraciones mecánicas de la misma frecuencia, corrientemente alrededor de los 15 kHz, mediante el concurso de un transductor magnetostrictivo, de aleación de base níquel, o piezoeléctrico, de titanio-circonato de plomo. De este modo, como se aprecia en el esquema de la figura 42, a las piezas a soldar se les aplica una presión estática perpendicular a su superficie y vibraciones laterales, esencialmente paralelas a las superficies a unir.

Las piezas a soldar se comprimen muy fuertemente entre un dedo metálico móvil, animado de un movimiento vibratorio ultrasónico de gran

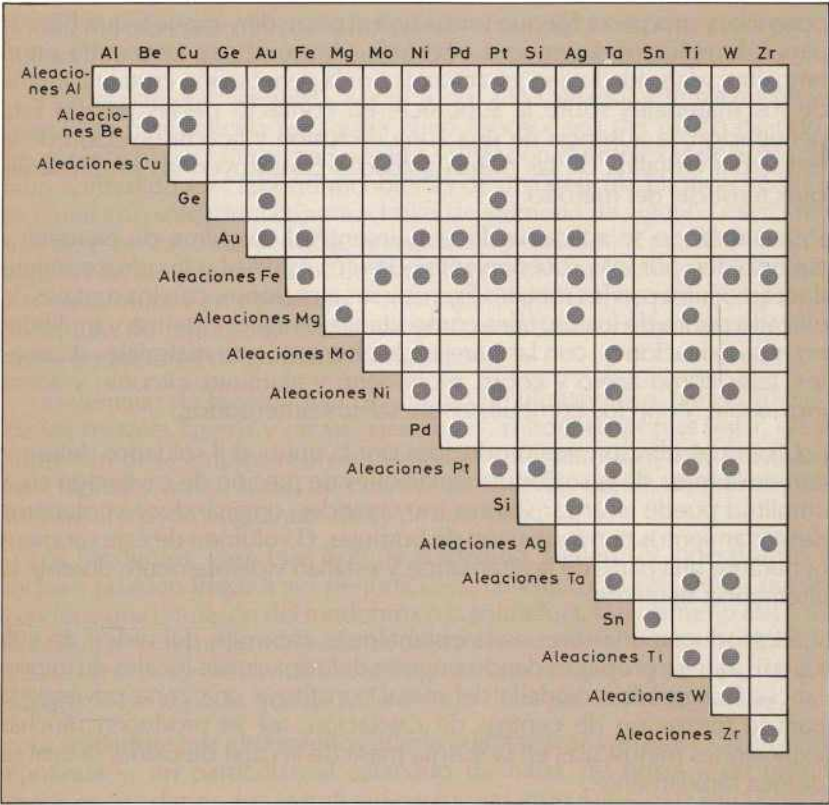


Figura 41. Soldabilidad por ultrasonidos entre metales. Los círculos indican dificultad en la unión.

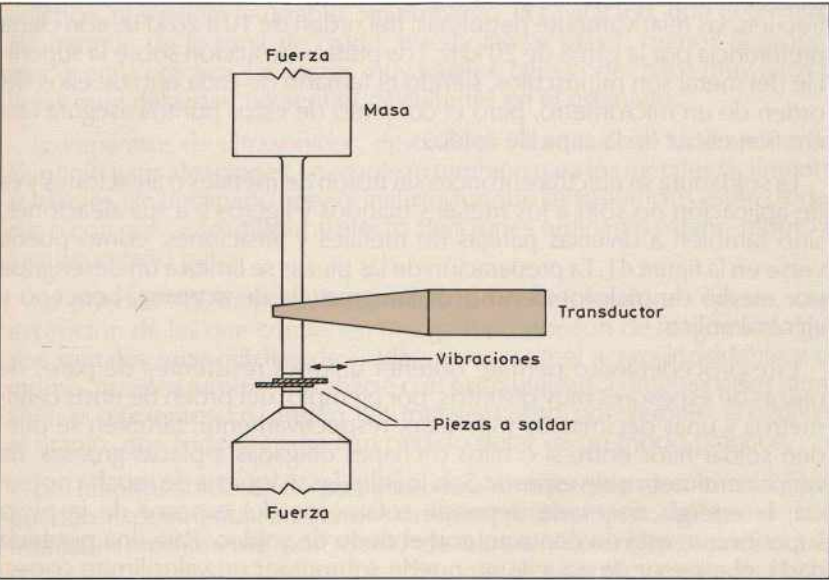


Figura 42. Soldador ultrasónico.

potencia, y una pieza fija que forma una especie de yunque y que hace el papel de reflector. La energía vibratoria ultrasónica se concentra en el empalme y la soldadura es garantizada por la penetración cristalina íntima de los materiales sobre la superficie en contacto de las piezas. Esta penetración, la ausencia de una zona de fusión y la conservación de la estructura cristalina de las piezas soldadas constituyen las propiedades características del método.

Este método se aplica fundamentalmente al empalme de elementos cuyo soldeo por los procedimientos clásicos es difícil o no ofrece seguridad; así ocurre con los metales ligeros y sus aleaciones, con los metales de elevado punto de fusión, tales como titanio, tantalio, circonio y molibdeno, y sus aleaciones, con las parejas de elementos de materiales diferentes, tales como acero y cobre, molibdeno y aluminio, circonio y acero inoxidable, y con los compuestos metálicos sinterizados.

Las ondas ultrasonoras producidas por la punta del soldador determinan en la masa de la soldadura variaciones de presión de cavitación cuya amplitud puede alcanzar valores muy grandes, originándose verdaderos desgarramientos con formación de burbujas. El volumen de éstas aumenta durante una parte de la alternancia y estallan violentamente durante la alternancia siguiente.

Se producen unas presiones instantáneas enormes, del orden de 600 kg/cm^2 , que se propagan dando origen a deformaciones locales de importancia. La superficie oxidada del metal constituye una zona privilegiada para la formación de centros de cavitación; así se producen muchas explosiones minúsculas en la misma masa de la capa de óxido, la cual se disloca rápidamente.

Para asegurar la eficacia de la operación es preciso producir una cierta concentración de energía y vibraciones a una frecuencia adecuada para provocar la cavitación. Por lo general se considera necesario adoptar frecuencias relativamente pequeñas, del orden de 10 a 20 kHz, con cierta preferencia por la gama de 20 kHz. Los puntos de acción sobre la superficie del metal son minúsculos, siendo el tamaño de cada uno de ellos del orden de un micrómetro, pero el conjunto de estos puntos asegura una erosión eficaz de la capa de óxido.

La soldadura se efectúa entonces sin fusión de metales o aleaciones y es de aplicación no sólo a los metales blandos y ligeros y a sus aleaciones, sino también a diversas parejas de metales y aleaciones, como puede verse en la figura 41. La preparación de las piezas se limita a un desengrase por medio de tricloroetileno o de una mezcla de acetona, benceno y alcohol etílico.

Este procedimiento permite obtener uniones resistentes de pares de piezas de espesores muy distintos, por ejemplo, del orden de unos centímetros y unas décimas de milímetro, respectivamente; también se pueden soldar hilos entre sí o hilos o chapas delgadas a placas gruesas, de varios centímetros de espesor. Son inútiles las máquinas de mucha potencia; la energía necesaria depende solamente del espesor de la pieza superior que está en contacto con el dedo de soldeo. Para una potencia dada, el espesor de aquélla no puede sobrepasar un valor límite corres-

pondiente a la capacidad de la máquina; en cambio, el espesor de la pieza inferior no tiene importancia, pudiendo ser de varios centímetros.

El procedimiento se aplica, sobre todo, a la soldadura de piezas recubiertas de una película refractaria cuyo espesor sea del orden de unos micrómetros; también se han podido soldar con éxito piezas de acero de bajo contenido en carbono recubiertas de una película plástica. Se pueden unir con soldadura continua hojas de aluminio de algunos micrómetros de espesor, obteniéndose una gran estanqueidad. Con máquinas de algunos centenares de vatios de potencia se realiza el soldeo de elementos electrónicos en miniatura y microminiatura como, por ejemplo, la soldadura de hilo de aluminio, de platino o de oro sobre bastoncillos semiconductores de germanio o de silicio.

Las ventajas de la soldadura por medio de ultrasonidos, para el trabajo de los metales ligeros y de sus aleaciones, reside, en primer lugar, en la supresión de la limpieza con cepillo; el procedimiento es más práctico y más rápido y, sobre todo, más eficaz. Las uniones tienen una resistencia mecánica mayor y aguantan mejor la corrosión.

Los fundentes, para este tipo de soldadura, suelen ser innecesarios e incluso pueden llegar a ser perjudiciales. En efecto, la cavitación puede producir una emulsión del fundente en la soldadura. El fenómeno físico de la cavitación reemplaza a la acción del fundente y se obtiene un estañado eficaz en la zona de cavitación activa, correspondiente en la práctica a la superficie de la pieza que se halla debajo de la punta del soldador.

La soldadura por ultrasonidos puede adaptarse a la producción en serie continua y, en particular, al estañado de hilos, de hojas y de piezas metálicas de dimensiones reducidas y formas irregulares, para las cuales se emplea un aparato de baño de soldadura.

Para piezas muy pequeñas y frágiles, el decapado con cepillo no es ni práctico, ni siquiera realizable. Sin embargo, la cavitación, que determina el arranque de la capa de óxido, puede atacar más o menos al propio metal; en la práctica, las piezas muy frágiles, tales como hilos muy finos u hojas muy delgadas, presentan dificultades en el estañado.

Los aparatos de ultrasonidos, destinados sobre todo al tratamiento de aluminio y sus aleaciones, se emplean también para los metales fácilmente soldables, sin decapado previo, incluso aunque las superficies estén oxidadas o con polvo; se utilizan al efecto aleaciones ordinarias estaño-plomo e incluso estaño puro.

Se pueden soldar por ultrasonidos todas las aleaciones ligeras, con excepción de las que contienen una gran proporción de magnesio; algunos metales muy difíciles de soldar, como son el acero inoxidable y el cromo, pueden también estañarse con éxito utilizando intensidades ultrasónicas suficientes. En cambio, hay metales como, por ejemplo, el berilio y el titanio, que todavía no se han podido tratar de un modo práctico.

Las uniones soldadas de las piezas de aluminio o de aleaciones ligeras pueden experimentar una corrosión intercristalina; pero las que se han estañado previamente por medio de ultrasonidos resisten mejor a la corrosión. Algunas soldaduras blandas pueden sufrir efectos electrolíticos

que producen una corrosión rápida de la soldadura o de la base metálica; una medida general de protección consiste en pintar la superficie o en darle un revestimiento que la defienda contra la humedad.

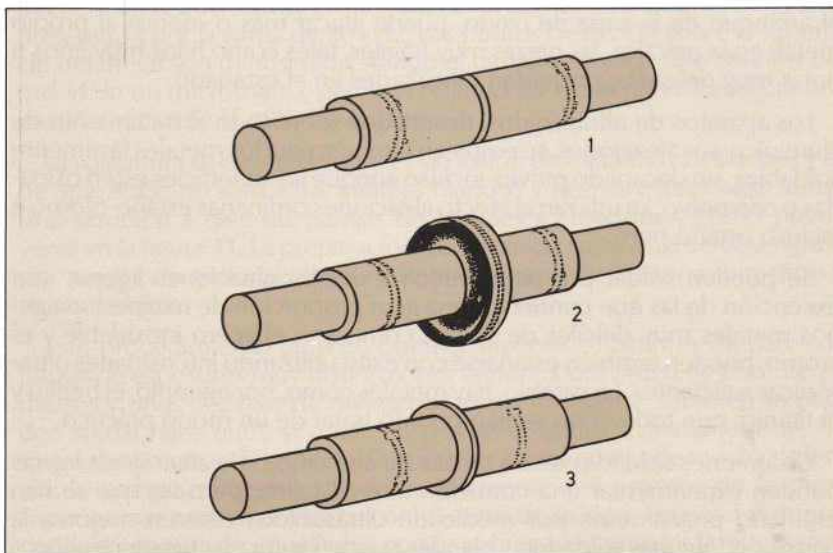
La torsión mecánica también ha de ser tenida en cuenta. En efecto, cuando se realizan soldaduras con estaño sobre superficies que soportan un esfuerzo mecánico, pueden producirse penetraciones intergranulares del aluminio y sus aleaciones y el fenómeno es más molesto aún si el estañado se efectúa después del montaje. Así, el estañado de un tablero de instrumentos de un automóvil, realizado antes del montaje, puede presentar grietas a lo largo de las líneas de torsión.

Estos inconvenientes pueden evitarse eligiendo racionalmente la soldadura y la clase de aleación a utilizar. Una soldadura estaño-cinc mejora las cualidades mecánicas; pero por mantenerse en estado pastoso a lo largo de una amplia gama de temperaturas, no es fácil obtener uniones permanentemente limpias. Por otra parte, esta soldadura no fluye con facilidad y ello también constituye un inconveniente cuando se trata de cubrir superficies bastante grandes sin tratamiento ulterior.

El aluminio y sus aleaciones son cada vez más utilizados para un gran número de aplicaciones diversas y la soldadura por ultrasonidos puede hacerlos aún más interesantes. Desde el punto de vista eléctrico, el aluminio posee una resistencia específica más elevada que el cobre y, por tanto, para obtener en iguales condiciones una misma conductancia, hace falta un volumen mayor del primero que del segundo; pero el uso del aluminio representa, con respecto al cobre, una relación en peso del orden del 60 por 100. Esta economía es particularmente importante en la aviación y en el automóvil.

La sustitución del cobre por el aluminio también podría ser de interés en el bobinado de motores y en canalizaciones eléctricas de todas clases.

Figura 43. Soldadura por fricción del bronce: 1) antes de soldar; 2) después de soldar; 3) después de mecanizar la soldadura.



Uno de los principales obstáculos para esta adopción ha sido la insuficiencia de las conexiones eléctricas soldadas y de los contactos por presión, debida a la plasticidad del metal cuando se someten a compresión. En muchos casos, el estañado previo del aluminio hace posible utilizar soldadores ordinarios y para los cables de muchos hilos, el estañado de éstos puede efectuarse de una manera continua. El cable puede cortarse en todos los puntos que se desee; es posible utilizar procedimientos de producción continua y los soldadores ultrasónicos sumergidos permiten emplear los baños de soldadura habituales sin ninguna modificación importante.

Los condensadores tubulares de láminas de aluminio llevan en cada extremo un empalme, realizado por presión, entre la hoja metálica y un casquete exterior de conexión; de dicho empalme pueden resultar contactos irregulares o conexiones eléctricas defectuosas. Pero con un soldador ultrasónico o un baño de soldadura por ultrasonidos puede estañarse completamente la extremidad de la hoja metálica bobinada, lo que asegura un contacto eficaz; este método es utilizable en una fabricación continua con cinta transportadora.

SOLDADURA POR FRICCIÓN

La soldadura por fricción utiliza el roce como sistema de calentamiento (figura 43), pues, aparte de ser una fuente eficaz de calor, la fricción proporciona una limpieza efectiva, eliminando la contaminación superficial. Una máquina de soldadura por fricción contiene una estructura robusta, capaz de resistir elevadas velocidades y cargas axiales necesarias para la técnica de soldadura por fricción. Dentro de la estructura se monta un portapiezas adecuado para el componente giratorio, el cual se mueve mediante un motor eléctrico a través de un embrague o bien mediante un motor hidráulico. El componente fijo puede avanzar por impulsos hidráulicos hacia el portapiezas giratorio, con una fuerza axial apropiada que puede incrementarse rápidamente hasta conseguir la fuerza de forja adecuada.

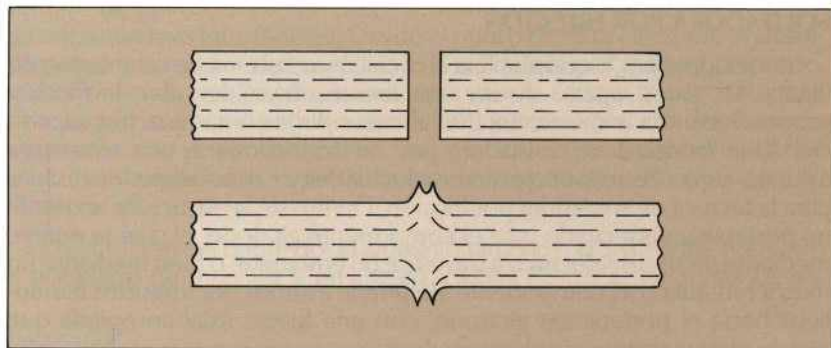
Al principio del ciclo de soldadura se hace girar el componente rotatorio. Se puede utilizar una amplia gama de velocidades para conseguir una calidad razonable de soldadura, pero normalmente se utiliza una velocidad periférica de unos 70 a 100 metros/minuto. El componente fijo se hace avanzar hacia el giratorio con una fuerza de fricción apropiada. Para un acero, esta presión es de unos 1240 kg/cm². Al entrar en contacto las dos superficies a soldar, hay una acción de roce o desgaste, que elimina la contaminación superficial, dejando el material limpio. En este momento del contacto se requiere un alto par, que gradualmente se reduce a medida que las superficies son más suaves y la temperatura se eleva al valor óptimo, un poco por debajo del punto de fusión del material a soldar.

Cuando las superficies a soldar alcanzan una condición plástica, el material calentado empieza a evacuar la intersuperficie, formándose un collar o anillo de material base alrededor de la periferia de la intersuperficie del componente. Al final del tiempo de fricción cesa rápidamente la rotación, bien desembragando el motor o aplicando un freno de disco al

eje del portapiezas, o bien bloqueando la salida de líquido del motor hidráulico. En el momento de parar, la fuerza de fricción alcanza el valor de la fuerza de forja y éste es el momento en que se produce la unión (figura 44). Para un acero al carbono, la fuerza de forja es aproximadamente cuatro veces la de fricción, es decir, 5000 kg/cm^2 . Al menos el 75 % de la pérdida total de longitud entre los dos componentes ocurre durante la fase de forja. El anillo de material es, por supuesto, material base y puede en muchas circunstancias dejarse in situ, para la obtención del componente final. En otras aplicaciones donde debe extraerse podría actuar como un generador de esfuerzos, pudiendo eliminarlo la misma máquina de soldar, o bien, con otra operación de mecanizado postsoldadura.

Los tiempos de los ciclos de soldadura son obviamente variables y dependen del tamaño y tipo de materiales a soldar. Para citar un ejemplo típico, cuando se sueldan barras de acero dulce de 25 mm de diámetro, se requiere un tiempo de fricción de 5 a 7 segundos, con un tiempo de frenado de hasta medio segundo y un tiempo de forja de unos 2 segundos, dando así un tiempo total del ciclo de 7,5 a 10 segundos más el tiempo de carga y descarga.

Figura 44. Textura después de la soldadura por forja.



SOLDADURA POR LÁSER

El láser es un sistema óptico capaz de producir un haz de luz coherente monocromático. Actualmente existen cuatro tipos de láser: a) cristal, b) gas, c) líquido y d) transistores.

El rayo láser se utiliza en microelectrónica y en la soldadura de metales raros y de metales preciosos. No obstante, donde el láser tiene mayor aplicación es en el corte de metales y de sustancias no metálicas.

El rayo de luz coherente se forma por excitación de fotones a otros de la misma longitud de onda y fase.

Un generador láser necesita tres elementos: el medio que debe suministrar los átomos o moléculas para el soporte de la luz amplificada, una fuente exterior de energía para excitar el medio y el resonador óptico para la eliminación de la luz amplificada (figura 45).

El resonador óptico está formado por un tubo de vidrio resistente al calor, con dos espejos en sus extremos. Uno de los espejos es totalmente

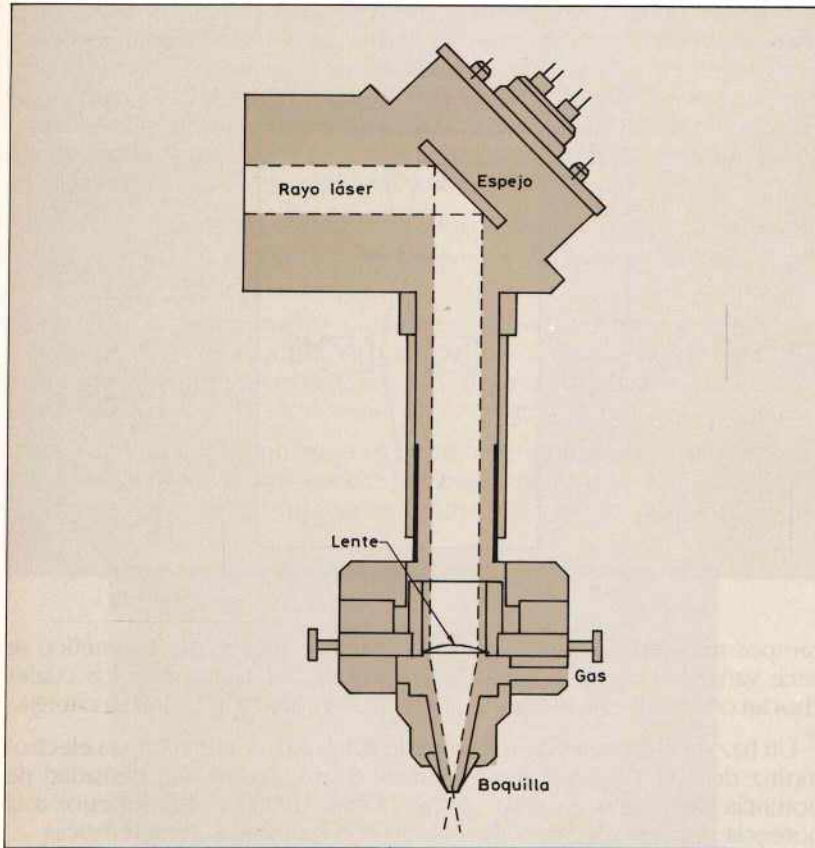


Figura 45. Esquema básico de un láser.

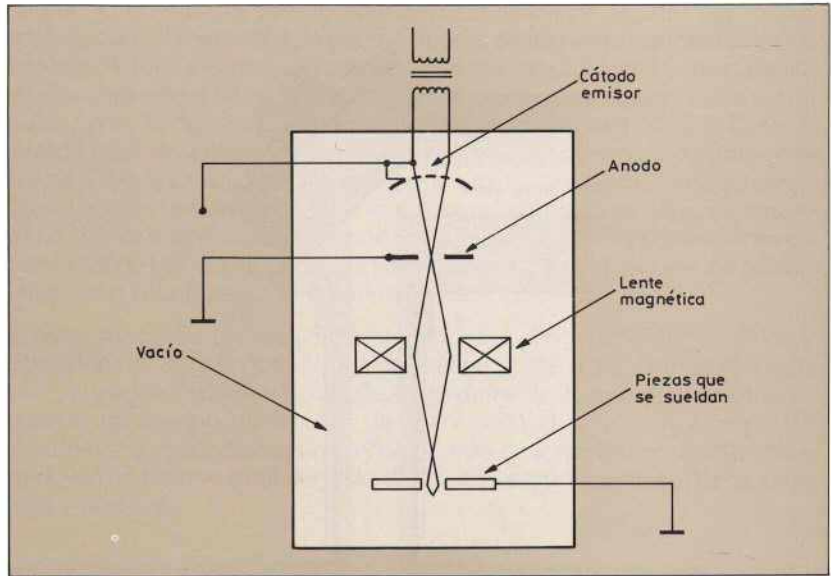
reflexivo mientras que el otro refleja sólo el 85 % de la luz incidente. Cuando se aplica la alta tensión en algunos de los átomos o moléculas que estaban en su estado normal, se excitan sus electrones a niveles superiores de energía, emitiendo fotones al descender desde este nivel superior de energía al inferior o estable. Estos fotones emitidos chocan con otras moléculas excitadas que emiten fotones de la misma longitud de onda que los anteriores. De este modo se ha producido un rayo de luz coherente o láser.

Los fotones viajan entre los espejos produciendo nuevos fotones. Por este espejo parcialmente reflexivo suben hacia el exterior un 15 % de los fotones. Este rayo convenientemente dirigido es el que puede aplicarse a las piezas a soldar.

SOLDADURA POR HAZ DE ELECTRONES

Los electrones se producen en un filamento en espiral (fig. 46) incandescente que actúa de cátodo. Los electrones que abandonan el cátodo son acelerados por un campo eléctrico y se dirigen al segundo ánodo, que es la pieza a soldar. La focalización de los electrones se realiza mediante

Figura 46. Principio del haz de electrones.



campos magnéticos. Modificando los campos eléctrico y magnético se hace variar la energía y la concentración de los electrones, los cuales chocan con la superficie metálica a soldar o a cortar y le ceden su energía.

Un haz de electrones de 0,05 mm de diámetro, con una fuerza electromotriz de 100 kV y una intensidad de 8 mA, posee una densidad de potencia del orden de $4 \cdot 10^{11}$ W/m². Unas 10.000 veces superior a la potencia del arco eléctrico alimentado con las mismas características.

En este procedimiento, de desarrollo relativamente reciente, el proceso de la fusión es similar al de la soldadura con plasma, ya descrito. Sin embargo, el calor ya no se origina por medio de un gas llevado al estado de plasma, sino utilizando la energía cinética de electrones.

Éstos se producen en un dispositivo especial llamado «cañón», a la salida de un cátodo calentado, siendo sucesivamente acelerados por la aplicación de una tensión muy elevada (de 40 a 125 kV) entre el cátodo y el ánodo, y luego enfocados, es decir, dirigido y concentrado el haz por una acción magnética, de manera que adquiera una forma más o menos prismática de sección muy reducida (una pequeña fracción de milímetro) y por otra parte regulable. Proyectando sobre la pieza que se desea soldar, este haz provoca su fusión en una superficie muy poco tensa, pero a una profundidad igualmente regulable, que puede ser considerable. La fusión está muy concentrada (figura 47).

Característica muy importante de la soldadura por bombardeo electrónico es que se aplica generalmente en el interior de un recinto herméticamente cerrado, el cual se ha sometido a un vacío muy elevado. Éste permite que los electrones cedan toda su energía, mientras que, por otra parte, evita la contaminación del metal por la acción de los gases atmosféricos.

Desde hace algunos años se ha logrado reducir la dependencia y el coste resultantes de la obligación de obtener un vacío muy elevado en todo el interior del recinto, manteniendo solamente el cañón de electrones en un recinto de muy pequeño volumen, en el cual sí se mantiene un vacío elevadísimo, mientras que las piezas que se van a soldar son encerradas en otro recinto, en el que se mantiene un vacío menos elevado y, por consiguiente, mucho más rápido de obtener.

Los dos recintos van conectados entre sí por un conducto estrecho, obturado por una compuerta especial, que se abre solamente en el momento de soldar.

Este sistema, denominado «soldadura en vacío parcial», se acompaña en algunos casos de una protección gaseosa, pero no permite alcanzar, por regla general, la pureza tan extraordinaria del metal fundido que caracteriza al procedimiento cuando se usa un vacío muy elevado.

La soldadura por bombardeo electrónico se realiza exclusivamente en forma automática, lo que quiere decir que el avance de la pieza por delante del cañón, siguiendo recorridos rectos o circulares, queda asegu-

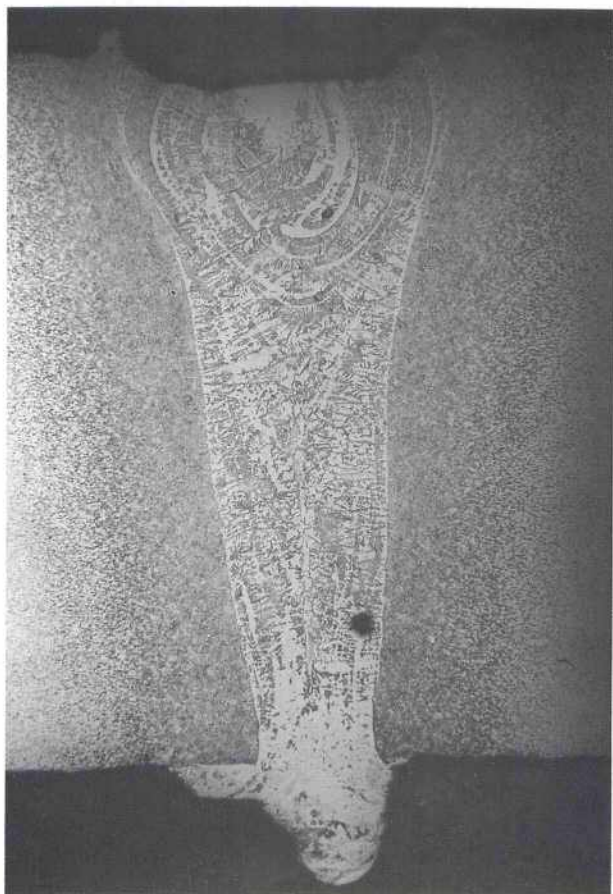


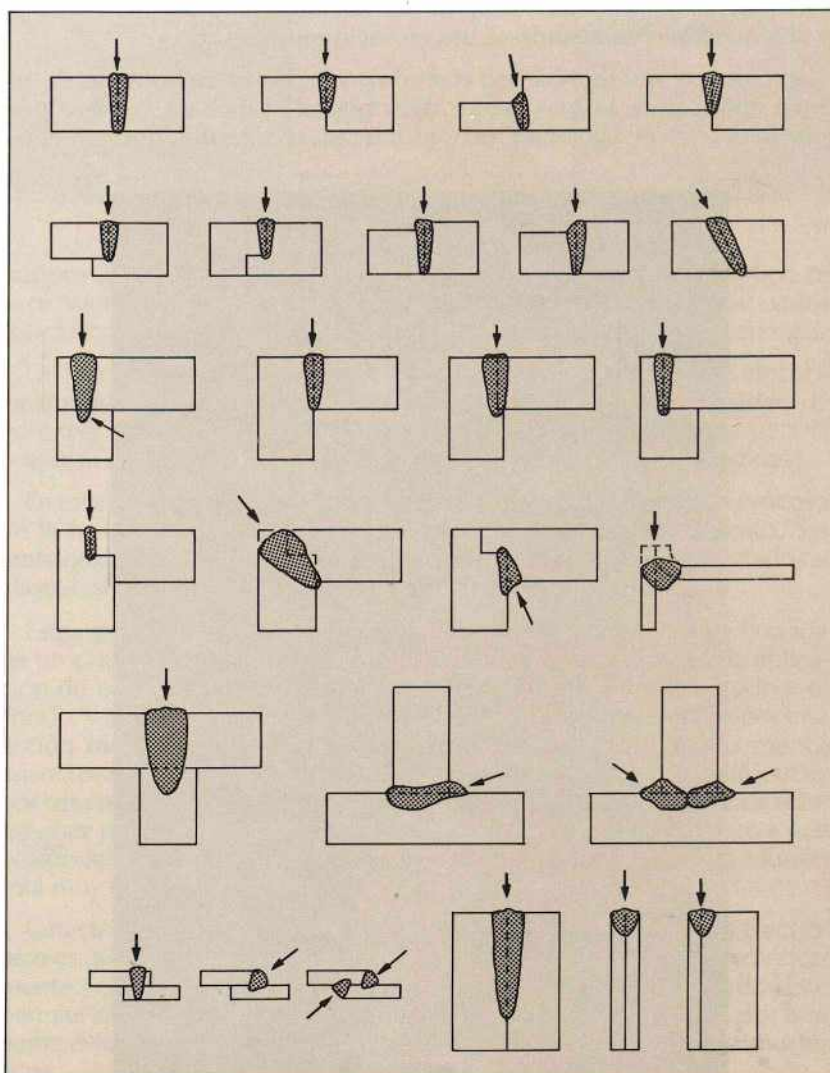
Figura 47. Soldadura de chapas de acero al carbono mediante haz de electrones. (x20).

rado por medio de combinaciones de mecanismos, cuyos movimientos son dirigidos desde el exterior de la cámara de vacío. El control de este avance se efectúa por examen visual, a través de una ventanilla apropiada.

Mediante soldadura por haz de electrones se sueldan perfiles de formas muy variadas (figura 48).

La instalación es, evidentemente, tanto más cara cuanto mayor es el volumen de las piezas que se quieren soldar, ya que así lo serán también las dimensiones de las cámaras de vacío. Por este motivo, muchos talleres, incluso algunos muy importantes, que no desarrollan un trabajo continuado, sino eventual, suelen ejecutar sus trabajos por intermedio de subcon-

Figura 48. Principales aplicaciones de la soldadura por haz de electrones en distintos perfiles.



trastistas especializados, que se han equipado bien y trabajan para una serie de clientes, llegando a mantener sus instalaciones con un coeficiente de utilización elevado. Procediendo así, los talleres que necesitan efectuar una soldadura por bombardeo electrónico reducen de un solo golpe, en gran medida, el período de puesta a punto de una junta particular —del que dispone ya, probablemente, su subcontratista especializado— o del que ha encontrado ejemplos análogos.

Aplicaciones

A causa de las particularidades expuestas anteriormente, este procedimiento se aplica sobre todo en los trabajos en serie en piezas de muy alta calidad, constituidas por cobre desoxidado, aceros inoxidable, algunos aceros autotemplables, así como para montajes en pequeña escala, e incluso en aleaciones caras a base de titanio, tantalio, molibdeno, circonio, etc., muy alterables en caliente por la acción del oxígeno y del nitrógeno atmosféricos, siendo cada vez más utilizados en las industrias aeronáuticas, espaciales y nucleares. La soldadura por bombardeo electrónico suele aplicarse a piezas cuya configuración no permite su unión por otro procedimiento. Es prácticamente la única capaz de soldar entre sí metales muy distintos.

Los espesores que pueden ser soldados varían entre 0,05 y 25 mm, pudiéndose llegar hasta los 100 mm utilizando instalaciones muy especializadas.

Finalmente, a causa del vacío, que actúa sobre las piezas durante la operación de soldadura, las aleaciones que contengan metales volátiles, como, por ejemplo, los latones, que contienen cinc, no pueden ser soldadas por bombardeo electrónico.

FORJA

La soldadura por forja se lleva a cabo calentando las partes metálicas a unir hasta temperaturas cercanas a la fusión del metal y juntándolas aplicando, al mismo tiempo, una presión. De este modo las zonas calientes se *forjan*: se deforman en caliente.

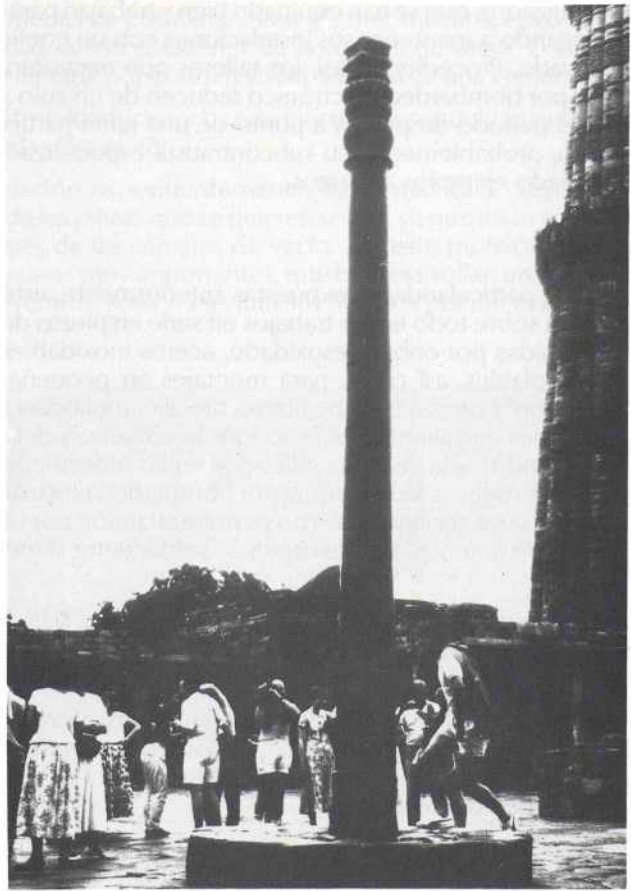
El calentamiento puede ser eléctrico, por gas, mediante horno... y la presión se puede conseguir en prensa, con martillo, etc.

Para el éxito de esta soldadura es de gran importancia la limpieza de las superficies a unir. De todos modos, se puede paliar esta operación introduciendo un fundente adecuado entre las superficies a unir, de modo que se produzca escoria y por martilleo («elbowing effect») se elimina. Esta escoria se genera con los óxidos superficiales del metal.

Este procedimiento de soldadura, en su forma más primitiva, fue el principal método de conformación metálica para fabricar piezas de acero, en los albores de la historia, a partir de nódulos de hierro obtenidos en pequeños hornos alimentados con carbón vegetal.

La famosa columna de Delhi (figura 49), construida 300 años a. J.C., que pesa unas 6 TM, se manufacturó a base de soldar por forja.

Figura 49. Columna de Delhi.
(Foto Jordi Blavia.)



Actualmente se ha perfeccionado el procedimiento de calentamiento y el de aplicación de la presión. La perfecta unión alcanzada mediante la soldadura por forja se debe a la recristalización del metal caliente y deformado. La formación de esta nueva microestructura cristalina genera uniones entre cristales pertenecientes a ambas partes a unir.

INDUCCIÓN

La soldadura por inducción se realiza haciendo circular una corriente eléctrica (inductor) alrededor de la pieza a soldar (inducido). En el inducido las corrientes de Foucault generadas aumentan la temperatura, llegando a la fusión de parte del inducido. Esta técnica se aplica para fabricar tubos a partir de chapas metálicas (figura 50).

SOLDADURA DURA

En la soldadura dura, que es análoga a la soldadura blanda, si bien se utilizan aleaciones que funden a temperaturas más elevadas y es más fuerte la unión, la soldadura funde y fluye por las fuerzas capilares entre las

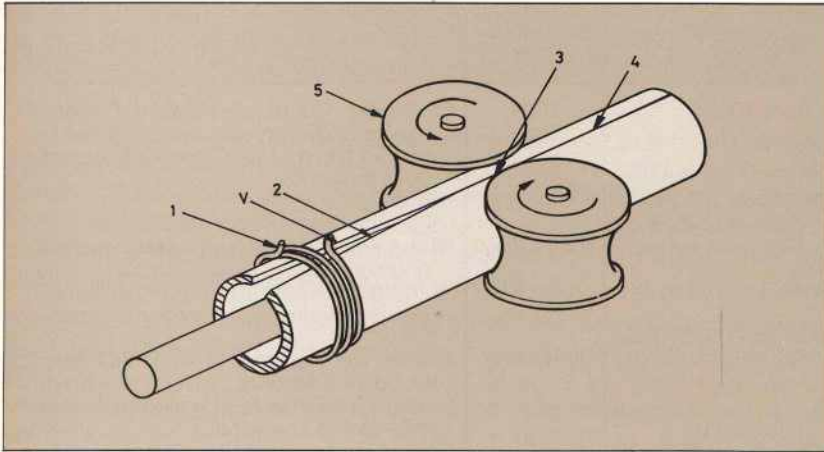


Figura 50. Fabricación de tubos por soldadura mediante inducción de la chapa de acero bajo en carbono: 1) cable inductor; 2) corriente eléctrica; 3) punto de soldadura; 4) línea de soldadura; 5) laminadores; v) fuerza electromotriz.

superficies contiguas o superpuestas de las partes que se desean unir, que se han calentado, aunque sin llegar a fundir (figura 51).

Los materiales de soldadura más corrientes empleados son plata (pura o aleada), latón, cobre y bronce (figura 52). Estos metales tienen distintos puntos de fusión y producen uniones de resistencia de tracción variable. La elección de la mejor aleación de soldadura depende de muy distintos factores. Estas soldaduras se clasifican en tres grupos:

1. Aleaciones de plata o plata pura, con puntos de fusión de 650 a 870 °C.
2. Latones y aleaciones de níquel-plata, que funden de 870 a 930 °C.
3. Cobre y aleaciones de cobre, cuyos puntos de fusión se encuentran entre 870 y 1120 °C.

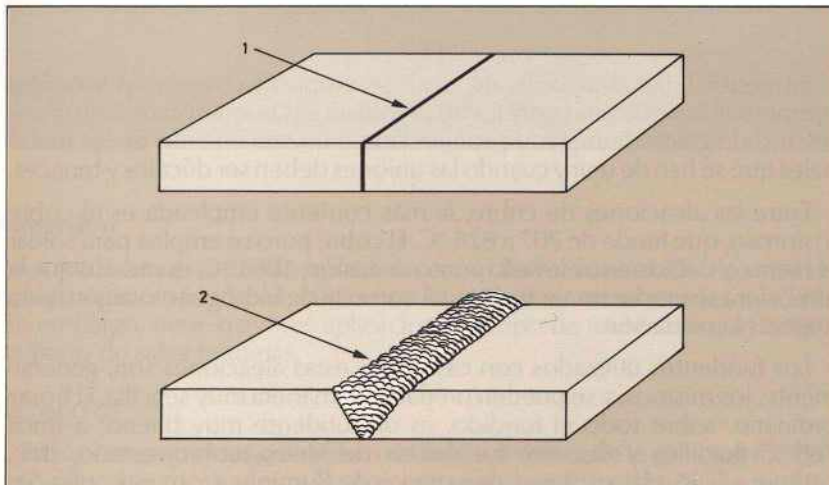


Figura 51. Unión mediante soldadura dura comparada con la soldadura por fusión: 1) soldadura dura; 2) cordón de soldadura por fusión.

Figura 52. Materiales para la soldadura dura.

Composición aproximada	Intervalo de fusión en °C	Empleos
Cobre 100 %	1083	Se emplea para metales féreos. Generalmente en horno con atmósfera reductora a 1100 o 1150 °C. No suele necesitarse fundente.
0 a 4 % de Si, 0 a 10 % de Sn, 0 a 1,25 % de Mn, resto cobre	1020 a 1060	Para soldar con arco el acero y soldar cobre a acero.
95 % de Cu y 5 % de P	700 a 830	Autofundente para el cobre. No debe emplearse para acero o aleaciones féreas.
60 % de Cu, 0,75 % de Sn, 39,25 % de Zn	890 a 900	Empleo general para la soldadura dura. Util para soldadura capilar o relleno de uniones abiertas. Se aplica normalmente calentando con soplete.
15 % de Ag, 80 % de Cu, 5 % de P	650 a 700	Autofundente sobre cobre limpio. No debe emplearse para aleaciones féreas.
35 % de Ag, 26 % de Cu, 21 % de Zn, 18 % de Cd	600 a 700	Empleo general.
50 % de Ag, 15,5 % de Cu, 15,5 % de Zn, 16 % de Cd, 3 % de Ni	630 a 690	Empleo general. Buena para unir carburo de wolframio. Se encuentra en todas las formas.
95 % de Al, 5 % de Si	570 a 630	Soldadura dura de aleaciones de aluminio, tipos 2S y 3S americanos.
92,5 % de Al, 7,5 % de Si	580 a 610	Aleación que se emplea para soldar chapas de aluminio. La soldadura se hace en horno.
87,5 % de Al, 12,5 % de Si	580 a 590	Se emplea para soldar aleaciones de aluminio tales como los tipos americanos 53S, 61S y 63S.

En general, las aleaciones de plata se emplean cuando las elevadas temperaturas necesarias para las otras soldaduras pueden causar un crecimiento de grano demasiado pronunciado o un crecimiento de los materiales que se han de unir y cuando las uniones deben ser dúctiles y tenaces.

Entre las aleaciones de cobre, la más corriente empleada es el cobre fosforoso, que funde de 707 a 828 °C. El cobre puro se emplea para soldar el hierro, y debido a su elevado punto de fusión, 1083 °C, es preciso que la atmósfera sea reductora o neutra, tal como la de hidrógeno o argón, para impedir la oxidación.

Los fundentes utilizados con casi todas estas aleaciones son, generalmente, los mismos, y se pueden preparar de manera muy sencilla. El bórax ordinario, sobre todo el fundido, es un fundente muy bueno; a unos 760 °C fluidifica y disuelve los óxidos de hierro, cobre, estaño, cinc, cadmio, silicio, plata y níquel, pero no los de aluminio, cromo y berilio. Sin

embargo, más corrientemente se utilizan unas preparaciones comerciales, en forma de pasta, obtenidas mezclando bórax con alcohol. Las mezclas de bórax y ácido bórico se usan mucho en las soldaduras a temperaturas superiores a 825 °C.

Para unir dos metales cuyos óxidos son refractarios, tal como el óxido de cromo en los aceros inoxidable, el óxido de aluminio en los bronce de aluminio y aleaciones de dicho metal y el óxido de berilio en el cobre-berilio, se utilizan, como fundentes, los difluoruros alcalinos mezclados con bórax y ácido bórico. Con cobre fosforoso no se necesita fundente, porque el fósforo del material actúa como tal.

El enlace entre el metal de soldar y el metal base, limpio, se obtiene por una ligera difusión del metal de soldar hacia el interior del metal base, sólido y caliente, o por aleación superficial entre los metales. El metal fundido se extiende con facilidad, bien por acción propia o por la del fundente sobre él o sobre el de la base, y por acción capilar llena las ranuras entre las partes que hay que unir. Si la ranura que se ha de unir es demasiado grande, la resistencia a los esfuerzos es sólo la del material de relleno en estado moldeado, pero si es demasiado pequeña, el metal puede no penetrar. El éxito de la unión depende de la elección del fundente apropiado, de la obtención del máximo beneficio de la capilaridad y del cuidadoso control de la calefacción y enfriamiento para así conseguir las mejores condiciones del metal de relleno.

Las técnicas de soldadura dura más utilizadas comprenden el arco, el soplete, el horno, la calefacción por inducción y el baño salino y el baño metálico (figura 53).

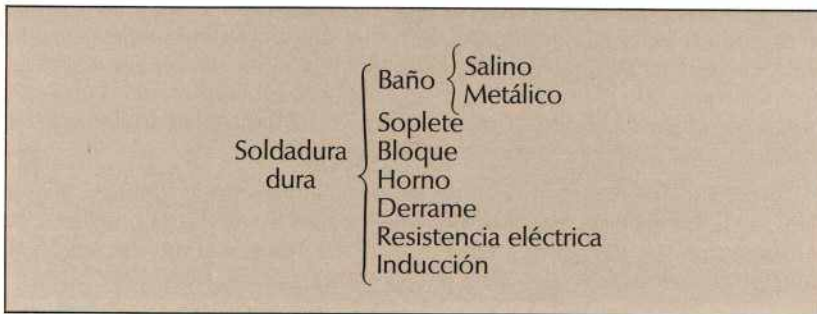


Figura 53. Procedimientos empleados para la soldadura dura.

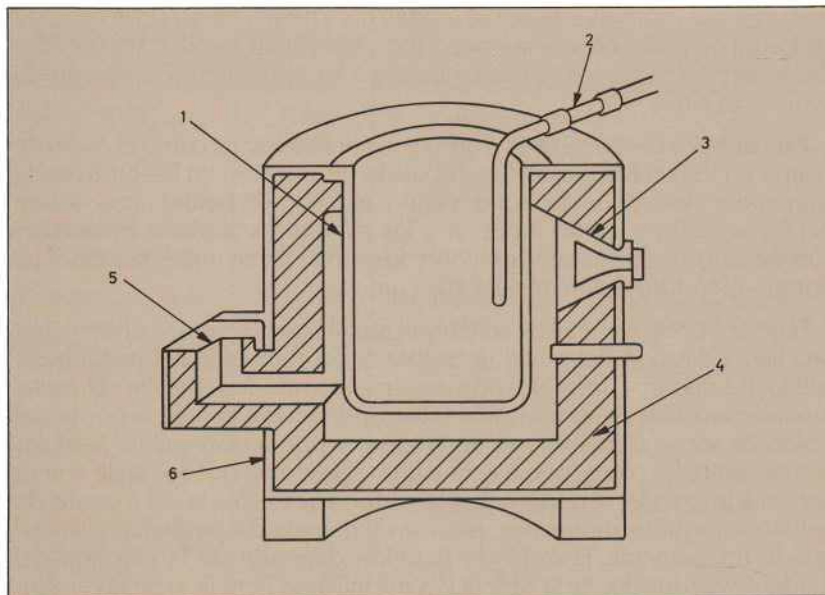
Inmersión

La soldadura por simple inmersión en un baño de aleación de relleno cubierta con un fundente, para evitar la oxidación, no se emplea mucho. Sin embargo, tiene mayores aplicaciones el tipo de inmersión que utiliza un baño de sales fundidas.

En baño de sales

En los componentes que se han de soldar se intercala la aleación fuerte, en posiciones adecuadas, y el conjunto se sumerge en el baño (figura 54),

Figura 54. Esquema del baño de sales para la soldadura dura:
1) crisol metálico; 2) termopar;
3) quemador; 4) material refractario; 5) combustible;
6) acero moldeado.



mantenido a la temperatura de soldar. Una vez que la soldadura ha fundido y fluido hacia el interior de todas las uniones, que generalmente es cuestión de segundos, el conjunto se extrae del baño y se enfría, y entonces aquélla solidifica inmediatamente. Por este método se suelda todo el material férreo o no férreo, apto para esta operación, y, asimismo, se puede emplear cualquier tipo de metal de aportación, incluyendo la plata, cobre, latón y aleaciones de aluminio. Los baños de sales empleados en soldaduras con plata, cobre y latón consisten en unas mezclas eutécticas de los cloruros bórico, sódico y potásico. El baño para soldadura del aluminio es un baño fundente especial del fluoruro.

Las principales características de las operaciones de los baños salinos son que la calefacción es uniforme y que se puede mantener constante la temperatura dentro de unas diferencias de tres grados o menos, según el método de control.

Para las uniones de piezas de acero se recomienda cobre, pues el latón puede descincificarse y resultar, así, porosa la unión. Con el baño de sales se elimina este inconveniente, por el corto tiempo de inmersión, y así se aprovecha la ventaja de realizar la soldadura a 925 °C, en vez de a 1083 °C, con lo cual el acero está menos expuesto al crecimiento de grano, distorsión y decarburación que producen las elevadas temperaturas.

Soplete

Un método muy corriente de soldadura dura, aplicable a casi todos los metales, es el del soplete de acetileno o hidrógeno, con oxígeno (figura 55). Entre las ventajas de este soplete cabe destacar que el calor es fácilmente localizable y que el aparato necesario es económico. La regula-

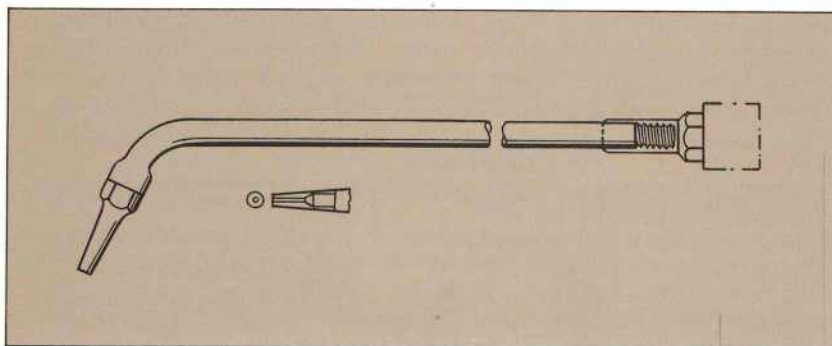


Figura 55. Soplete de oxiacetileno utilizado en la soldadura dura.

ción exacta de la temperatura es difícil y puede producirse alguna distorsión y oxidación del metal.

Bloque

La soldadura con bloques consiste en aplicar una masa de metales calientes (figura 56) a las partes que se quiere unir. El metal de relleno es no férreo y penetra por acción capilar entre las partes que se han de soldar.

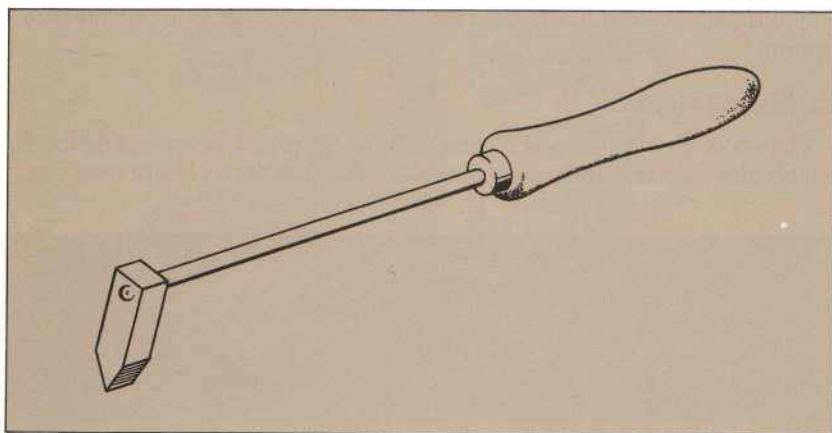


Figura 56. Ejecución de la soldadura dura por bloque.

Horno

En la soldadura realizada en horno, la atmósfera en general es reductora (figura 57) y el material de aportación se aplica en forma de lámina, alambre, pasta o polvo. Es un método que permite la producción en masa, con un buen control de temperatura, así como de la carburación y descarburación de los aceros, y el material queda libre de tensiones residuales. Si se regula bien la atmósfera, se pueden obtener superficies brillantes, y si la calefacción es uniforme, no se produce distorsión alguna. Si se han de soldar pocas piezas, el método es algo caro, pues no es posible localizar el calor y es preciso fijar las piezas que hay que soldar.

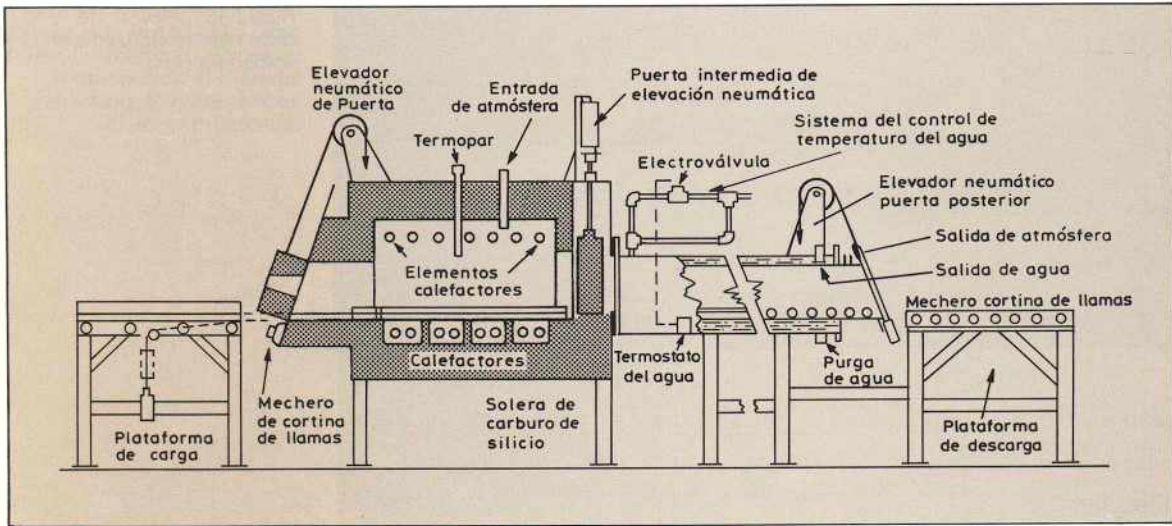


Figura 57. Horno de atmósfera controlada utilizado para la soldadura dura.

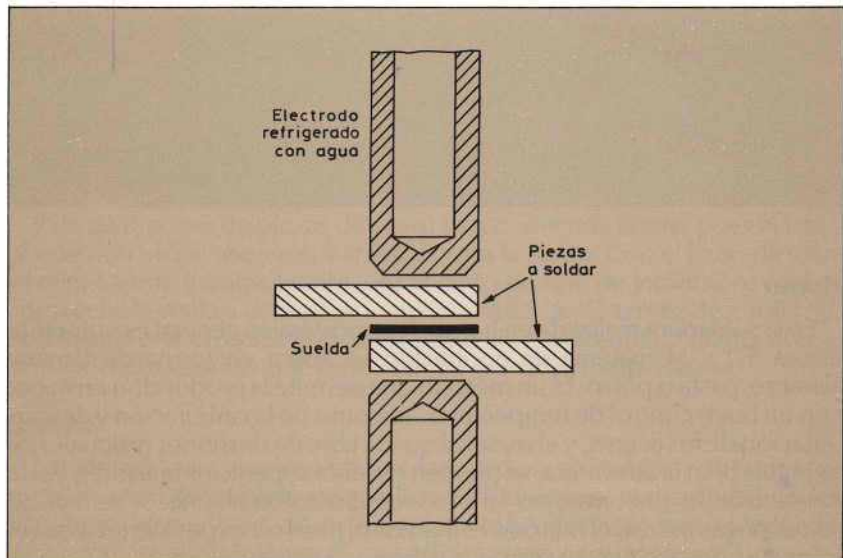
Derrame

Para realizar la soldadura por derrame, el metal fundido se esparce junto a las partes que se han de unir, que deben estar calientes, para evitar que el metal de aportación fundido se enfríe antes de llenar por capilaridad la ranura.

Resistencia eléctrica

El método por resistencia eléctrica (figura 58) posee la ventaja de localizar el calor y hacer el trabajo rápidamente. Para producir el calor necesario,

Figura 58. Soldadura dura calentada por resistencia.



se emplea una corriente de gran amperaje; el enfriamiento es también bastante rápido. Con frecuencia, la parte principal del calor procede de los electrodos de carbono, que están en contacto con el material que se quiere soldar. El método se adapta bien a la aplicación de presión, cuando ésta es necesaria.

Inducción

La calefacción por inducción (figura 59) ha adquirido un gran desarrollo, debido a su aptitud para calentar rápidamente las porciones elegidas de las piezas metálicas, prácticamente a cualquier temperatura. También cabe destacar como ventajas su limpieza y ausencia de combustión y la facilidad con que se puede aplicar. Las partes a ensamblar se rodean por una bobina, a través de la cual se hace pasar una corriente de alta frecuencia, y la resistencia del material, en esas partes, a las corrientes inducidas produce una rápida elevación de temperatura. Por ser los intervalos de corta duración, aunque las temperaturas son elevadas, se produce muy poca oxidación y alabeado.

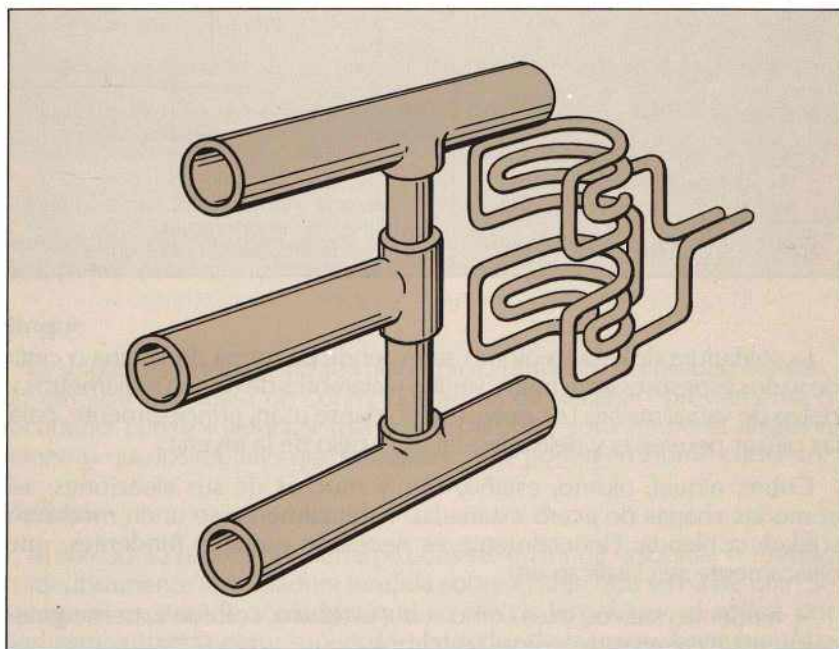


Figura 59. Calentamiento por inducción utilizado para la soldadura dura.

Este método es particularmente apto para la producción en serie y para el trabajo intermitente, porque el equipo se pone en funcionamiento con rapidez, y se aplica, especialmente, para soldar piezas de acero con aleaciones de plata y cobre fosforoso. Asimismo tiene un particular interés para soldar las piezas, previamente templadas y revenidas, sin afectar al tratamiento térmico, y, por otra parte, es lo suficientemente flexible para permitir, en determinadas aplicaciones, simultáneamente, la soldadura y el endurecimiento.

SOLDADURA BLANDA

La soldadura blanda consiste, principalmente, en la aportación de aleaciones (sueldas) de estaño y plomo, cuyo punto de fusión depende de las proporciones relativas de estos dos metales en aleación (figura 60). Con la proporción de un 62 % de estaño se obtiene una «soldadura fina», que se emplea cuando las exigencias son críticas con respecto a la temperatura. Por el contrario, la amplia zona de solidificación de la aleación, que contiene un 35 %, permite dejar «limpia» la unión. La soldadura blanda requiere una limpieza previa de las superficies a soldar para eliminar la capa de óxido, que dificulta la unión suelda-metal (figura 61).

Figura 60. Aleaciones para la soldadura blanda.

Composición aproximada	Intervalo de fusión, °C	Observaciones y usos
70 % de Sn, 30 % de Pb, 62 % de Sn, 38 % de Pb,	180 a 200 180	Soldadura alta en estaño. Soldadura estaño-plomo con el punto de fusión más bajo. Funde a temperatura constante.
50 % de Sn, 50 % de Pb,	180 a 220	Es el metal de soldar más empleado. Usos generales.
40 % de Sn, 60 % de Pb,	180 a 240	Para soldar tubos o envueltas de cables de plomo.
20 % de Sn, 80 % de Pb,	180 a 270	Soldadura de empleo general baja en estaño. Reparación de carrocerías de automóvil.
12,5 % de Sn, 25 % de Pb, 50 % de Bi, 12,5 % de Cd	70	Es el llamado metal Wood. Aleación para soldar a baja temperatura.
40 % de Zn, 60 % de Sn	330	Para la soldadura blanda del aluminio.

La soldadura de estaño-plomo se expende en forma de lámina o cinta de varios espesores y anchuras, varillas o alambres de distintos diámetros y polvo de varias mallas. Los polvos de soldar se usan, principalmente, para las piezas pequeñas y delicadas; tal es el caso de la joyería.

Cobre, níquel, plomo, estaño, cinc y muchas de sus aleaciones, así como las chapas de acero estañadas, habitualmente se unen mediante soldadura blanda. Generalmente es necesario emplear fundentes, que básicamente se clasifican en:

- fundentes suaves, tales como sebo, estearina, colofonia, trementina-colofonia y mezclas de resinas y alcohol,

- fundentes fuertes o ácidos, basados en cloruro de cinc, que son corrosivos, lo que es un inconveniente en ciertas aplicaciones. El cloruro de cinc con o sin adición de cloruro amónico impide la oxidación. La adición de cloruro amónico mejora la eficacia de este tipo de fundente.

Una pasta fundente muy popular contiene, aproximadamente, 75 % de «petrolato», 20 % de cloruro de cinc y 5 % de cloruro amónico, y una pequeña cantidad de agua como agente emulsionante.

Una vez realizada la soldadura, es conveniente eliminar la escoria y el

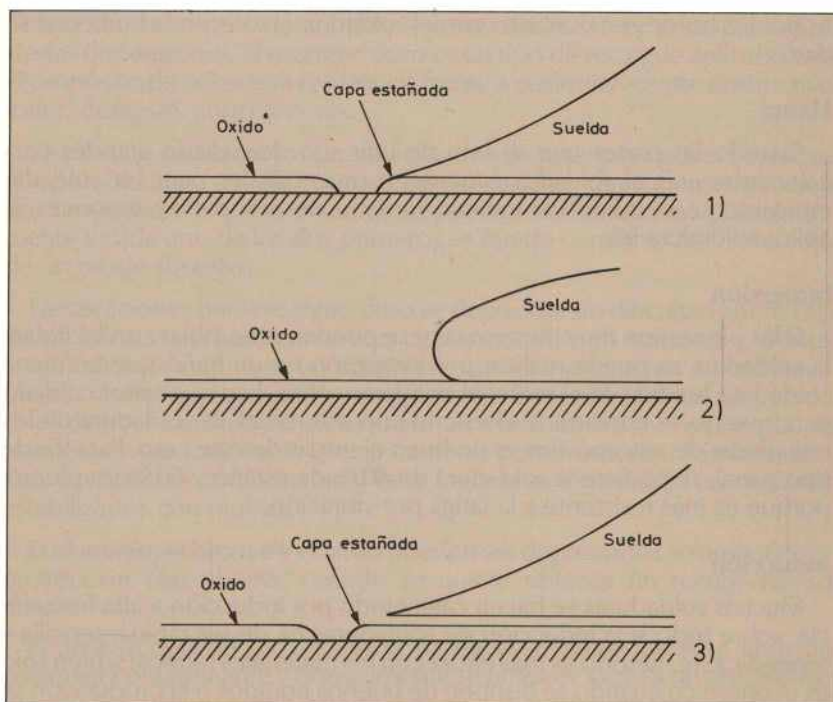


Figura 61. Esquema de la soldadura blanda encima de una superficie metálica:
 1) buenas propiedades mecánicas; 2) malas propiedades mecánicas; 3) sin adherencia.

exceso de fundente que pueda quedar, pues, si hay absorción de humedad, puede producirse corrosión.

Bloque

La soldadura blanda realizada por el procedimiento del bloque consiste en emplear una masa de cobre, que se ha de «estañar» previamente o recubrirlo con soldadura y mantenerlo limpio; sólo funde la aleación mientras que los metales que se desea unir se ponen en íntimo contacto.

Derrame

La soldadura blanda por derrame consiste en fundir la suelta, vertiendo cuidadosamente la soldadura fundida sobre el área que se ha de unir. Se recoge el exceso de soldadura que se cae de la unión y se aplica, por deslizamiento, a la parte superior y alrededor de la unión, hasta que ésta adquiere una temperatura superior a la del «sólido» del material de aportación y queda completamente cerrada. Para hacer la unión por deslizamiento, sobre tubos o fundas de cables, se emplea un metal de aportación que contiene alrededor de un 2 % de antimonio.

Resistencia

En la soldadura de las conexiones de aparatos eléctricos se emplea, casi exclusivamente, el soldador calentado eléctricamente. La rápida fusión del metal de aportación, unido a la temperatura adquirida momentáneamen-

te por los bordes en contacto con el soldador, favorecen la humectabilidad.

Llama

Cuando las partes que se han de unir son demasiado grandes para calentarlas con el soldador o tienen formas difíciles para ser soldadas rápidamente, se calientan moviendo la llama de un soplete y, entonces, se aplica soldadura fría.

Inmersión

Si las piezas son muy numerosas y se pueden ensamblar con facilidad, la soldadura se puede realizar por inmersión en un baño que contiene soldadura fundida. Si el material contiene cobre, hay que tener cuidado para que no se contamine el estaño con ese metal. La soldadura de los radiadores de automóviles es un buen ejemplo de este caso. Para los de tipo panal, se prefiere la soldadura de 40 % de estaño y 60 % de plomo, porque es más resistente a la fatiga por vibración.

Inducción

Muchas soldaduras se hacen calentando por inducción a alta frecuencia, sobre todo si la inducción de soldaduras ha de ser rápida, sencilla y repetida. Este método es más eficaz con los materiales férreos, si bien sólo es económico cuando se dispone de buenos equipos o la producción se realiza a gran escala.

Propiedades de la soldadura blanda

La resistencia de estas uniones a esfuerzos cortantes o de cizalla, a temperatura ambiente, depende de:

- a) La distancia entre los metales que se han de unir.
- b) La temperatura de la soldadura.
- c) El tiempo de calefacción.
- d) La composición de los metales que se desea soldar.

Las propiedades de la unión varían si la aleación de aportación se alea o no con los metales base. La distancia entre los metales que se desea unir puede variar bastante, si bien 0,01 milímetro parece ser la distancia más conveniente; las superficies deben ser planas.

Normalmente no se recomienda la soldadura blanda para unir el aluminio, pues para ello se prefiere la soldadura fuerte y la simple soldadura. Para soldar cinc o hierro galvanizado no debe estar presente antimonio en el metal de aportación, porque el cinc y aquel elemento forman una combinación difícilmente fusible.

RECARGUE

Recibe el nombre de recargue la deposición de un metal en una superficie metálica por soldadura o bien por metalización por proyección, con

objeto de conseguir ciertas propiedades deseadas o, principalmente, ciertas dimensiones. El recargue duro es un tipo de recargue aplicado con el propósito de conseguir resistencia frente a cualquier agente destructivo (calor, desgaste, corrosión, etc.).

Se pueden combinar los procedimientos de recargue siguientes: recargue por soldadura directa, recargue por soldadura indirecta y metalización por proyección. Los dos primeros se pueden dar simultánea o sucesivamente y cada uno de los dos primeros se puede combinar con el tercero de un modo sucesivo.

Las aleaciones para recargue duro se depositan sin dificultad sobre casi todos los aceros. Los aceros con alto contenido en carbono y ciertos aceros aleados requieren un tratamiento previo, ya que por su endurecimiento al aire son susceptibles de agrietarse. El metal base más apropiado es el de acero dulce y, si se requiere un acero de mayor resistencia, se puede escoger uno del 0,4 % en carbono como máximo. También son muy apropiados como material base los aceros inoxidables austeníticos estabilizados con niobio.

El aluminio, el bronce y el latón pueden ser depositados solamente por proyección con plasma, cuando se quiere obtener un recubrimiento duro.

El área que debe ser recargada ha de estar perfectamente libre de cualquier contaminante y normalmente se procede tanto a un precalentamiento del sustrato como a un calentamiento posterior al recargue y a un tratamiento de enfriamiento cuidadoso.

Los materiales usados para recargue duro se pueden clasificar a grandes trazos de la forma siguiente:

1. Aleaciones férreas débilmente aleadas o fuertemente aleadas.
2. Aleaciones base níquel o base cobalto.
3. Carburos o boruros de metales refractarios (W, Cr, etc.).

Todos los materiales indicados se presentan en la industria en forma de electrodos para soldadura y algunos también en forma de varilla, alambre o en polvo. En forma de polvo sólo se presentan las aleaciones base níquel y base cobalto, así como los carburos y boruros de ciertos metales refractarios como los carburos de wolframio, los carburos de cromo y los boruros de cromo.

Propiedades del recargue

Las aleaciones base níquel son resistentes al desgaste y a la corrosión; las aleaciones base cobalto mantienen esta resistencia incluso a elevadas temperaturas, mientras que las aleaciones base hierro son resistentes al desgaste a temperatura ambiente. Estas aleaciones se conforman por moldeo y también se suministran en forma de varilla, electrodos y polvos para recargue duro.

Normalmente el recargue duro se realiza con aleaciones base hierro relativamente baratas, siendo sus principales elementos de aleación cromo

y carbono. El cromo aumenta la resistencia al desgaste de los aceros templados e incrementa la dureza de los carburos en la fundición. Cuando está presente suficiente cromo aparecen cristales masivos de carburo de cromo, los cuales confieren una excelente resistencia a la abrasión. Adiciones de wolframio y de molibdeno incrementan la resistencia a las temperaturas elevadas y a la abrasión por parte de la aleación. Cuando el níquel sustituye al hierro, la resistencia a la corrosión y al calor aumentan, y el cromo, el tungsteno y el molibdeno cumplen funciones similares a las de aleaciones base hierro. La adición de boro y carbono, no solamente endurece la matriz sino que conduce al desarrollo masivo de boruros y carburos, principalmente de cromo, elevando considerablemente la resistencia al desgaste. La presencia de boro y silicio, confiere a las aleaciones características autofundentes, y reduce la temperatura de fusión de la aleación. Sin embargo, tiene lugar alguna limitación en la temperatura superior a la cual las aleaciones pueden usarse.

El uso de cobalto como metal base incrementa la máxima temperatura a la cual la aleación puede utilizarse, y ésta presenta una elevada dureza a alta temperatura y una buena resistencia a la oxidación. El cromo, el molibdeno y el wolframio realizan las mismas funciones que antes y el carbono, a partir de cierta proporción, tiene un efecto endurecedor similar al de las aleaciones base hierro. La dureza y los microconstituyentes de varias aleaciones se dan en la figura 62.

En las aleaciones de cobalto-cromo-tungsteno, el cobalto proporciona una matriz de disolución sólida estable. En las aleaciones de bajo contenido en carbono (menos del 1,8 %) hay un sistema binario que contiene un eutéctico, el cual en la soldadura por fusión muestra dendritas con segregaciones de disolución sólida. En las aleaciones hipereutécticas aparecen cristales ideomórficos de carburo de cromo. Parte de este cromo

Figura 62. Dureza de los microconstituyentes de varias aleaciones utilizadas para recargue duro.

	Aleación	Macro-dureza	Microconstituyente	Micro-dureza
	Fundición martensítica	792	Martensita Cementita	390-640 1052-1600
	Fundición martensítica	500-750	Martensita Cementita	400-700 1200-1400
		—	Carburo de cromo	1960
	Níquel cromo boro	650-750	Disolución sólida Carburo de cromo Boruro de cromo	481 2500 4000
	Níquel cromo boro	—	Boruro de cromo	2668
	Cobalto cromo wolframio carbono	400	Disolución sólida Eutéctico	400 750
	Cobalto cromo wolframio carbono	600	Disolución sólida Eutéctico Carburo de cromo	500-600 900 1800
	Cobalto cromo wolframio carbono	—	Carburo de cromo	1672-2520
	Carburo de wolframio	—	Granos	2500

puede ser reemplazado por cobalto y/o tungsteno. Debido al pequeño intervalo de solidificación, existe una pequeña tendencia a la fragilización.

El boro actúa como endurecedor y autofundente, disminuyendo el punto de fusión, la temperatura del eutéctico y ensanchando el intervalo de solidificación. El contenido en boro de las aleaciones base níquel y base cobalto es limitado.

Las aleaciones base níquel muestran una estructura que consta de una disolución sólida compuesta principalmente de níquel, cromo, boro y silicio, con cantidades variables de eutéctico según la composición.

La disolución sólida contiene cristales de boruro y carburo de cromo. Este sistema de multifase tiene un intervalo plástico amplio, el cual permite la deposición de las aleaciones en contornos redondeados y además que el depósito sea hechurado en caliente y trefilado. El tungsteno y el molibdeno mejoran normalmente las propiedades mecánicas del recubrimiento, particularmente por encima de los 500 °C, y la resistencia al desgaste puede aumentarse incorporando carburo de wolframio sinterizado.

Técnica

Para la obtención de recargues duros en el contexto de la metalización por proyección, se aplican los procedimientos siguientes:

1. Proyección y fusión.
2. Proyección con plasma.
3. Transporte a la llama.
4. Proyección por detonación.

Proyección y fusión

Este procedimiento comprende la proyección convencional y la posterior fusión de aleaciones sobre el sustrato. Se caracteriza por producir un enlace químico entre el metal base y el recubrimiento.

Para asegurar una buena unión, la superficie del metal debe limpiarse a fondo, lo cual se realiza con un disolvente como el tetracloruro de carbono. Luego se chorrea la superficie con óxido de aluminio (24 mesh) o con granalla angular de acero, teniendo la precaución de no tocar la superficie chorreada con las manos, puesto que las huellas pueden contaminar la superficie e impedir, así, la buena adherencia del recubrimiento.

Aunque las aleaciones para recargue duro se presentan en forma de polvo, estos polvos se pueden manejar en forma de cordón, colocándolos en el interior de un tubo de material polimérico; no hay riesgo de contaminación del recubrimiento ya que el material polimérico se vaporiza completamente en la llama.

Las composiciones típicas y durezas de las aleaciones utilizadas en la proyección y fusión se dan en la figura 63. Estas aleaciones son autofundentes, empleando silicio y boro para dispersar los óxidos formados en la proyección y fusión. El boro en estas aleaciones también forma compuestos de cromo y níquel, los cuales son extremadamente duros. Cuando los

Aleación	Composición en %											dureza HRC
	Ni	Co	Cr	W	Mo	Cu	B	Si	Fe	C	Mn	
1	93	—	—	—	—	—	1,9	3,5	—	—	—	35 a 44
2	82	—	10	—	—	—	2,5	2,5	2,5	0,2	—	30 a 40
3	76	—	13	—	—	—	3	Si + Fe + C = 9 máx.			—	45 a 50
4	70	—	17	—	—	—	3,5	4	4	1	—	56 a 64(*)
5	67	—	16	—	3	3	4	4	2,5	0,5	—	59 a 62
6	66	—	13	16	—	—	4	Si + Fe + C = 10 máx.			—	50 a 55
7	27	40	19	—	6	—	3	4	1	—	—	48 a 52
8	13	52	20	7	—	—	1,9	2,3	4	0,7	1 máx.	50 a 61(*)
9	—	70	21	4,5	—	—	2,4	1,6	—	0,1	—	48
10	—	62	28	5	—	—	—	2 máx.	3 máx.	1	—	42 a 45
11	—	43	33	18	—	—	—	2 máx.	3 máx.	2,5	—	60 a 65
12	—	—	30	—	—	—	—	1 máx.	66	2,5 máx.	1 máx.	60(*)

Figura 63. Materiales refractarios utilizados en la proyección.

(*) La dureza puede pasar de 62 RC a 66 RC por adición de CW

boruros se dispersan a través de la matriz, el recubrimiento presenta un incremento en su dureza efectiva y un bajo coeficiente de rozamiento. Algunas aleaciones llevan carbono, con lo que se forma carburo de cromo de elevada dureza, y otras contienen carburo de tungsteno, lo que incrementa la resistencia a la abrasión del recubrimiento. Las aleaciones de la figura 63 funden entre los 900 y los 1300 °C, siendo la número doce la que funde a temperatura mayor.

Los recubrimientos de base níquel o cobalto tienen menor ductilidad y coeficientes de dilatación mucho más elevados que los recubrimientos de base hierro.

En general, un precalentamiento del sustrato, previo a la deposición, minimiza la tendencia del recubrimiento a la rotura, la cual se debe a la diferencia entre los coeficientes de dilatación del sustrato y del recubrimiento.

Las aplicaciones típicas del procedimiento de proyección y fusión se dan en el campo de los componentes mecánicos, como, por ejemplo, asientos de válvulas, guías de alambre, levas, moldes en la industria del vidrio, pistones, etc. Los recubrimientos por proyección y fusión del aluminio se aplican normalmente con la pistola de alambre, como protección frente a la corrosión a alta temperatura.

La fusión del recubrimiento proyectado se puede llevar a cabo de las maneras siguientes: con la llama de la pistola de proyección, mediante un soplete auxiliar (con llama suave ligeramente reductora), calentando en un horno con atmósfera reductora o bien, por último, calentando por inducción eléctrica.

Es muy conveniente fundir el depósito metálico inmediatamente después de haber sido proyectado para poder evitar que se enfríe la pieza.

Un tiempo excesivo de fusión da lugar a la disminución de la dureza y de la resistencia a la corrosión por parte del recubrimiento. Cuando se trata de fundir un recubrimiento con alto porcentaje en carburo de tungsteno, éste puede quedar, por su densidad, debajo de los otros carburos que se forman. Para evitar la acumulación de las partículas de carburo de wolframio en la parte inferior del recubrimiento, previamente a la fusión, se proyecta una capa de material autofundente.

La aleación proyectada funde alrededor de los 1000 °C y refleja la llama del soplete de fusión a consecuencia de la reacción entre el boro y los óxidos básicos. El control de la fusión se lleva a cabo mediante la observación de los destellos de la superficie líquida del recubrimiento. Estos destellos dependen de la tensión superficial y del intervalo de fusión de la aleación. Las normales formaciones de óxidos deben ser suprimidas de modo que no interfieran en el reconocimiento de los destellos.

Existen tres factores muy importantes a tener en cuenta en el procedimiento de proyección y fusión: la dilución del metal base, el efecto térmico en la estructura del metal base y las tensiones residuales. La dilución del metal base es despreciable. En consecuencia, es posible depositar aleaciones duras sin dificultad en materiales como acero inoxidable 18/8 estabilizado con titanio, aceros nitruados y aceros de corte. La fácil aplicación, en estos materiales, de recargues duros por proyección y fusión contrasta con los problemas que aparecen en el recargue por soldadura.

En el procedimiento de proyección y fusión, la intensidad de calor comunicado es mucho menor que por otros procedimientos de recargue duro.

Las tensiones inducidas en el sustrato por la técnica de proyección y fusión son también muy bajas. Esto se debe no solamente a la menor temperatura y más rápida fusión del recubrimiento sino también a que el calor es comunicado de un modo más uniforme, especialmente en los casos de piezas cilíndricas, las cuales pueden girar durante la fusión.

Proyección con plasma

Debido a las temperaturas tan elevadas que se consiguen en los equipos de proyección, éstos normalmente se usan para proyectar materiales altamente refractarios (figura 63).

Se puede depositar un recubrimiento resistente al desgaste de partículas duras de carburos de tungsteno, proyectándolos en el metal base (por ejemplo, un acero dulce). Normalmente estos carburos de tungsteno están formados por las especies WC y W_2C cuyas partículas tienen una microdureza de 1730 a 2490 kp/mm². Sin embargo, en este caso el grado de adherencia entre el recubrimiento y el sustrato es relativamente bajo. Con el fin de aumentar la adherencia, se procede a un recargue capilar por soldadura indirecta que consiste en recubrir el recubrimiento proyectado con una aleación soldante líquida que moje bien, tanto las partículas proyectadas como el metal base. Como aleación soldante se puede utilizar el cobre. El recargue por soldadura indirecta mediante cobre se realiza en vacío de $1,5$ a 2×10^{-2} mm de Hg para sublimar y disociar térmicamente los óxidos de tungsteno de la superficie de las partículas de carburo.

ros. El procedimiento de soldadura indirecta se realiza a temperatura de 1150 °C y se termina en menos de un minuto. Este procedimiento para obtener un recubrimiento duro es una combinación de dos procedimientos de recargue: uno por proyección y otro por soldadura indirecta.

También se depositan por plasma aleaciones base cobalto, base níquel y base hierro, aceros inoxidable, cobre y aleaciones de cobre. Todos estos materiales dan lugar por proyección a recubrimientos resistentes al calor, al desgaste y a la corrosión. Otras veces se aplican para obtener recubrimientos conductores de calor y de la electricidad, barreras térmicas y recubrimientos dieléctricos.

Proyección por detonación

En la figura 64 se presentan las propiedades de ciertos recubrimientos obtenidos por detonación. Los recubrimientos por detonación tienen las aplicaciones siguientes: cuchillería, instrumentos quirúrgicos, producción industrial de equipos y productos usados en la industria aeronáutica y de misiles. Los recubrimientos proyectados por detonación tienen resistencia al desgaste y pueden soportar elevadas temperaturas y productos químicos altamente corrosivos. Los materiales más usados son los siguientes: carburo de wolframio con cobalto como ligante en distintas proporciones, mezclas de carburos de cromo y wolframio, carburo de cromo y tungsteno, carburo de cromo con cromo-níquel actuando como ligante y cerámica como óxido de cromo.

Cada detonación produce un espesor de aproximadamente 6 μm . Es característico de los depósitos obtenidos por detonación su baja porosidad (0,5 %), su fuerte adherencia (700 kp/cm²) y su elevada dureza (1300 Vickers). Esos datos corresponden a recubrimientos de carburo de tungsteno sinterizados con cobalto.

Figura 64. Propiedades de recubrimientos obtenidos por detonación.

Recubrimiento	Dureza (Vickers)	Temperatura máx. (°C)	Resistente a
Oxido de aluminio	1000-1200	650-980	Desgaste, oxidación y reactivos químicos
Carburo de wolframio + 6-8 % de cobalto	1200-1450	540	Desgaste extremado
Carburo de wolframio + 13-15 % de cobalto	1100-1250	540	Desgaste, impacto y temperaturas elevadas
Carburo de wolframio + 15-17 % de cobalto	1050-1200	540	Desgaste rápido, impacto y temperaturas elevadas
25 % carburo de wolframio + 7 % de níquel + una mezcla de carburos de W y Cr	1000-1200	760	Desgaste, temperaturas elevadas y corrosión
85 % carburos de cromo + 15 % de cromo-níquel	1000-1200	980	Desgaste a temperaturas elevadas o en medios corrosivos

Transporte a la llama

Estos equipos de transporte a la llama se caracterizan por poseer bajas velocidades de transferencia en comparación con los equipos de proyección a la llama. Algunos de estos equipos parecen sopletes normales de soldadura y no son apropiados para depositar metales como el aluminio o el cinc. Estos sopletes especiales se sitúan muy próximos a la pieza, produciéndose el transporte y la fusión simultáneamente.

En algunos equipos no se usa gas atomizador y el polvo es introducido con el chorro de oxígeno; esto permite alcanzar una mayor temperatura de llama y, a su vez, la ausencia de gas atomizador reduce las pérdidas de calor.

Estos últimos equipos se sitúan a cierta distancia de la pieza de trabajo, y, una vez transportado el polvo, se procede a una fusión posterior.

Con estos equipos de transporte a la llama se suelen depositar aleaciones para recargue duro.

APLICACIÓN DE LA COMPRESIÓN ISOSTÁTICA EN CALIENTE EN LA SOLDADURA

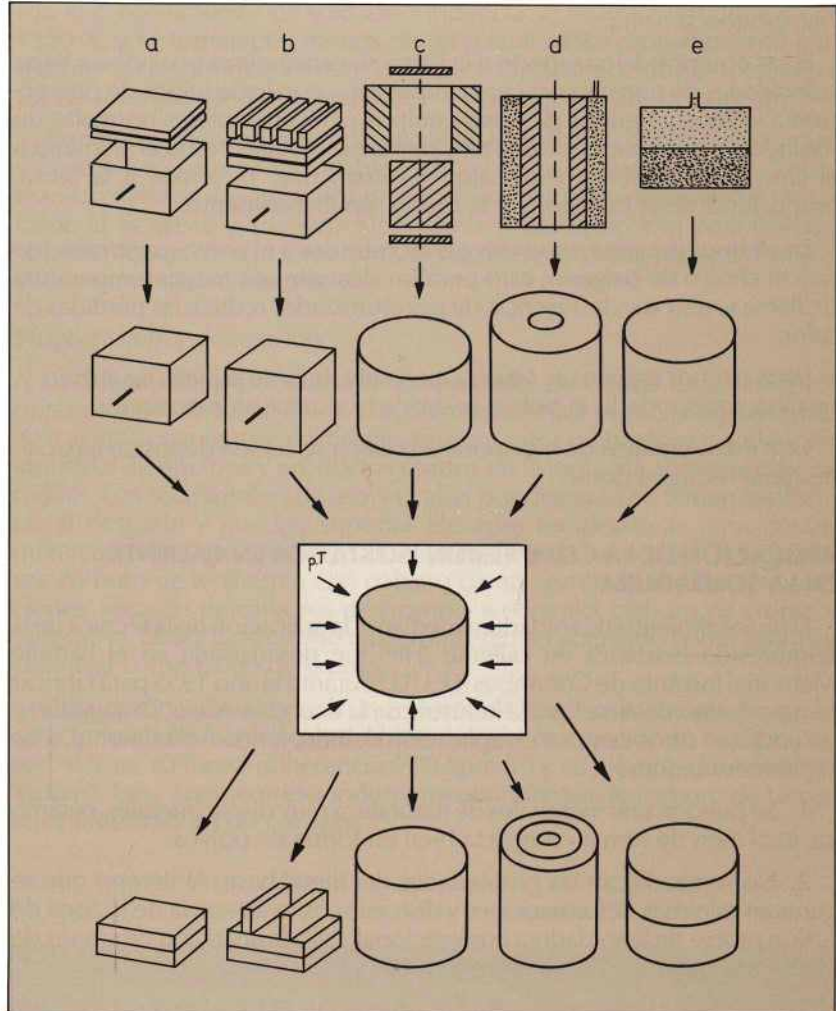
El procedimiento de soldadura mediante la aplicación de la técnica de la compresión isostática en caliente (HIP) fue desarrollada en el Battelle Memorial Institute de Columbus (EE.UU.) durante el año 1955 para fabricar componentes destinados a la industria de la energía nuclear. En seguida se extendió en otros campos de aplicación debido, fundamentalmente, a las siguientes razones:

1. Se pueden unir materiales de naturaleza muy dispar (metales, cerámica, etc.) bien de forma compacta bien en forma de polvos.
2. No se modifican las propiedades del metal base. Al tiempo que se generan mínimas deformaciones y distorsiones, la ausencia de la zona de fusión propia de la soldadura convencional, evita la aparición de granos de distinto tamaño, así como segregaciones y porosidad.
3. Los materiales frágiles o de baja ductilidad se pueden unir mediante esta técnica sin causar roturas.
4. La preparación superficial es mínima puesto que la termofluencia aplanas las superficies de contacto.
5. La termofluencia también elimina la porosidad, de las zonas vecinas a la superficie de unión, debida al efecto Kirkendall: distinta velocidad de difusión de los metales a unir.
6. Es posible unir metales de altas temperaturas de fusión y unir metales de gran reactividad, que con las soldaduras convencionales forman fases intermetálicas frágiles.

Por estos motivos no es de extrañar que el HIP se haya introducido en la soldadura. En la figura 65 se han esquematizado las principales aplicaciones de la soldadura mediante el HIP.

En realidad este procedimiento de soldadura se puede considerar como

Figura 65. Tecnologías de fabricación mediante la soldadura por HIP:
a) contrachapado; b) estructuras complejas; c) acabados; d) enlace por difusión sólido-polvo; e) densificación de polvos.



un perfeccionamiento muy depurado de la antigua técnica de la soldadura por forja, donde también se aplicaba simultáneamente presión y temperatura en las zonas de las piezas a unir.

Técnica

La soldadura por HIP requiere aplicar simultáneamente presión y temperatura en las zonas de contacto de los componentes a soldar en un espacio, más o menos grande, completamente hermético. Esta condición de trabajo se consigue, como se indica en la figura 66, cerrando herméticamente una delgada superficie distribuida a lo largo de la circunferencia de la zona de contacto, aplicando un manguito a lo largo de la citada circunferencia o bien encapsulando todos los componentes a soldar. En los tres

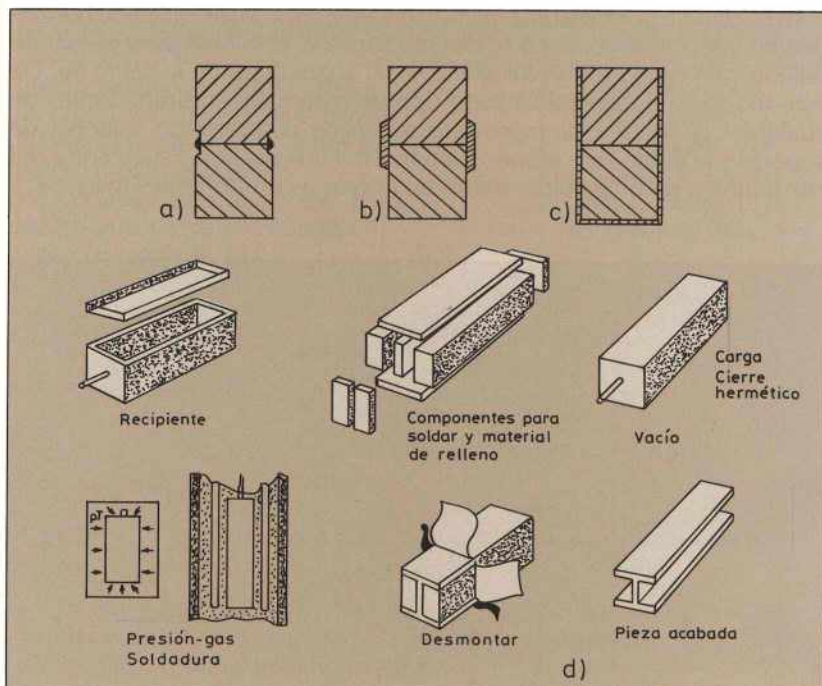


Figura 66. Procedimientos de soldadura por compresión isostática en caliente: a) unión a lo largo de la circunferencia de contacto; b) unión en forma de manguito alrededor de la zona de contacto; c) encapsulación hermética de los componentes a soldar; d) esquema del procedimiento c).

casos, una vez conseguida la hermeticidad, se aplican simultáneamente presión y temperatura.

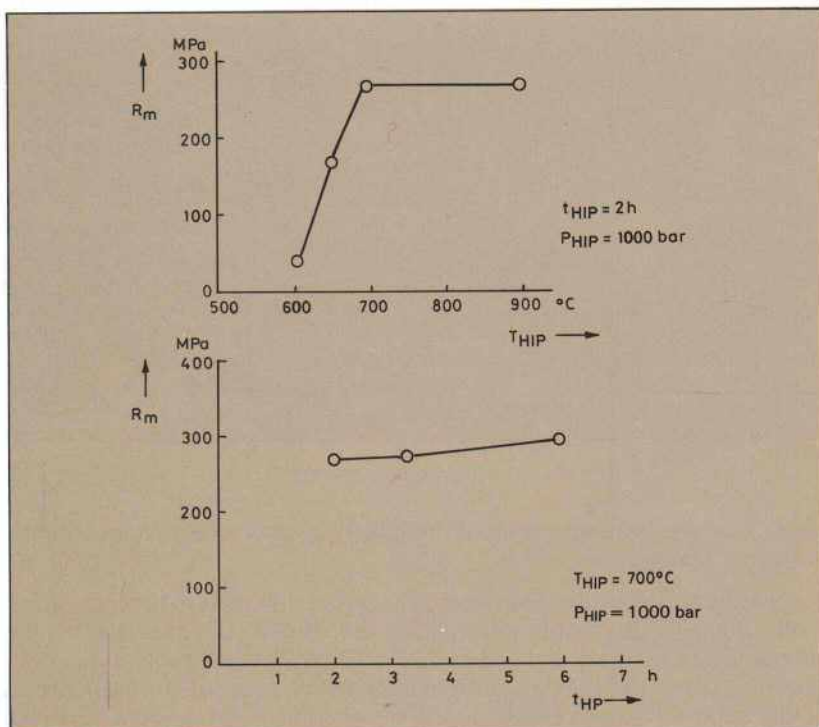
Los valores de presión y temperatura son función de la naturaleza de los materiales a soldar. Como información aproximada diremos que la presión aplicada suele ser del orden de los 100 MPa y la temperatura comprendida entre 0,5 y 0,8 de la temperatura de fusión de los componentes a soldar expresada en la escala de valores absolutos. En la figura 67 se ha representado la influencia de la temperatura y del tiempo en la resistencia a la tracción de un material contrachapado formado por láminas de TiAl_6V_4 y $\text{NiCr}_{15}\text{Fe}$. En este ejemplo hay que tener en cuenta que el vanadio y el hierro, en las condiciones térmicas de la soldadura, forman fase sigma muy frágil y quebradiza.

Referente a las tres técnicas empleadas para conseguir cierres herméticos en las superficies de contacto de los componentes a unir, cabe añadir que la esquematizada por a) en la figura 66, si bien es una técnica sencilla para lograr la hermeticidad, requiere que la forma de los componentes a unir sea muy simple, pues de lo contrario se complicaría la posibilidad de conseguir el vacío previo en la zona de contacto.

La simplicidad de las formas también es una condición necesaria para soldar mediante la aplicación de manguitos, puesto que el manguito tiene que estar perfectamente unido a las paredes de los componentes para evitar la entrada del fluido, que transmite la presión, en la zona de contacto de las superficies a soldar.

La soldadura por HIP suele realizarse mediante la encapsulación hermética de los componentes a soldar mediante el concurso de material de relleno, tal como indican los gráficos del apartado d) de la figura 66. De este modo se puede soldar todo tipo de materiales y componentes de cualquier geometría, siempre que se utilice el adecuado material de soporte y el fluido más idóneo para transmitir la presión. Esta técnica del HIP también permite soldar masas de polvos a componentes macizos.

Figura 67. Influencia de los parámetros del HIP en la resistencia a la tracción de un material contrachapado formado por $TiA_{16}V_4NiCr_{15}Fe$.



En la encapsulación hay que tomar la precaución más adecuada para evitar la soldadura de los componentes con las paredes del recipiente utilizado en esta técnica. También hay que tener en cuenta que la etapa final de este procedimiento es la eliminación de la cápsula y del material de relleno; por este motivo se deben seleccionar materiales que sean fáciles de separar. Para ello se suelen emplear procedimientos mecánicos para despegar al material auxiliar, aunque a veces se utiliza la lixiviación o disolución con reactivos químicos, que no ataquen a la pieza soldada.

Aplicaciones de la soldadura por HIP

En la industria de la aviación en particular y en la aeroespacial en general, encuentra gran aplicación la soldadura por HIP además de la ya mencionada industria de la energía nuclear. Se aplica con preferencia cuando las otras técnicas de soldadura no satisfacen al usuario.

Buena soldadura	Soldadura deficiente
Acero inoxidable 304-Acero inox. 304	W-Níquel TD
Acero inoxidable 304-Hastelloy X	Mo-Hastelloy X
Acero inoxidable 304-Níquel TD	Mo-Ni/20Cr/Ti
Acero inoxidable 304-W	Nb/Zr-Ni/20Cr/Ti
Acero inoxidable 304-Acero 1018	Nb/Zr-Acero 1018
Acero inoxidable 304-Ni/20Cr/Ti	Nb/Zr-Acero inox. 304
Acero inoxidable 304-V	
Acero 1018-Hastelloy X	
Acero 1018-Níquel TD	
Acero 1018-Mo	
Ti-V	
Ti-Nb/Zr	
W-Ni ₃₀ Cr	

Figura 68. Materiales soldados mediante el HIP.

En la figura 68 se han anotado las soldaduras investigadas en el Battelle y los resultados cualitativos conseguidos.

Donde la soldadura por HIP suele encontrar mayor número de aplicaciones, a nivel de materiales a unir, es en la fabricación de contrachapados o materiales compuestos («composites»). En la soldadura por HIP de chapas de «nimonic 75» (Ni/20Cr/Ti) se puede conseguir una resistencia a la tracción exactamente igual a la del metal base, aplicando 1150 °C y 1050 bar durante un tiempo de 3 horas, como se aprecia en la figura 69.

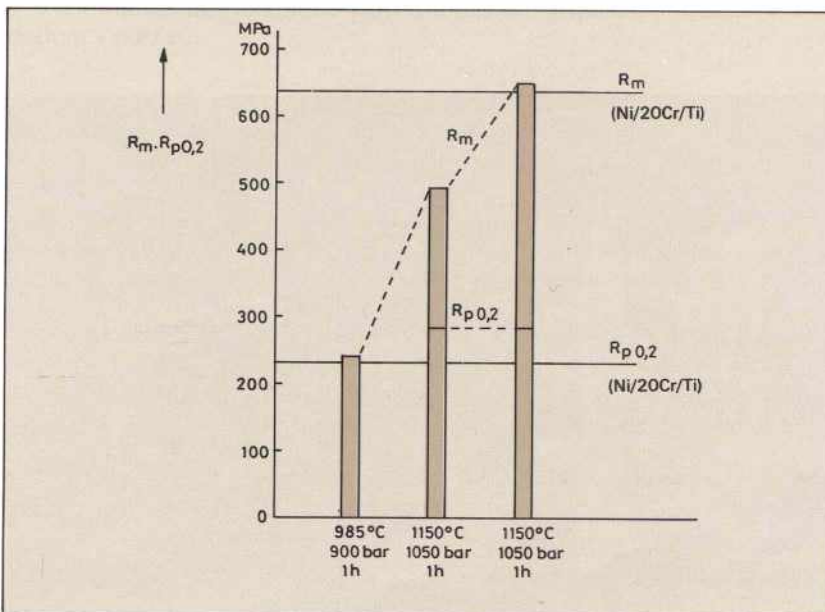


Figura 69. Relación entre propiedades mecánicas y parámetros del HIP para la soldadura de láminas de Ni/20Cr/Ti.

Si se unen por HIP láminas de distinta naturaleza, en los ensayos de resistencia a la tracción se observa que la rotura tiene lugar a través del metal o de la aleación de menor resistencia a la tracción. En las soldaduras por HIP de láminas de cobre y níquel y de láminas de acero y estelitas fallan por fractura del cobre y del acero respectivamente.

En el campo de los recubrimientos también encuentra gran aplicación la soldadura por HIP. La pieza se fabrica convencionalmente a partir de acero al carbono y de baja aleación y luego se recubre con polvos de materiales resistentes al calor y a la corrosión. El polvo se suele aplicar a las piezas mediante metalización por proyección con arco de plasma. Después se densifica, la capa de polvo depositada, mediante el HIP.

Instalaciones, equipos y productos

Las instalaciones para llevar a cabo la soldadura de los metales se pueden clasificar según el tipo de soldadura a realizar. Por este motivo se habla de instalaciones para *soldadura oxiacetilénica*, instalaciones para *soldadura eléctrica*, etc.

INSTALACIONES PARA SOLDADURA OXIACETILÉNICA

Para realizar la soldadura oxiacetilénica en instalaciones fijas se requieren al menos los elementos representados en la figura 70, entre los que destacan:

- El generador de acetileno y el depurador correspondiente.
- La conducción de gases hasta el taller de soldadura.
- Mangueras para el acetileno y el oxígeno.
- Botella de oxígeno.
- Mesa de soldar y taburete.
- Juego de sopletes y boquillas de acuerdo con los trabajos a realizar en el puesto de forma habitual.
- Aparatos de medida y control de los gases.
- Herramientas necesarias para cambio de boquillas, limpieza de soldadura y piezas.

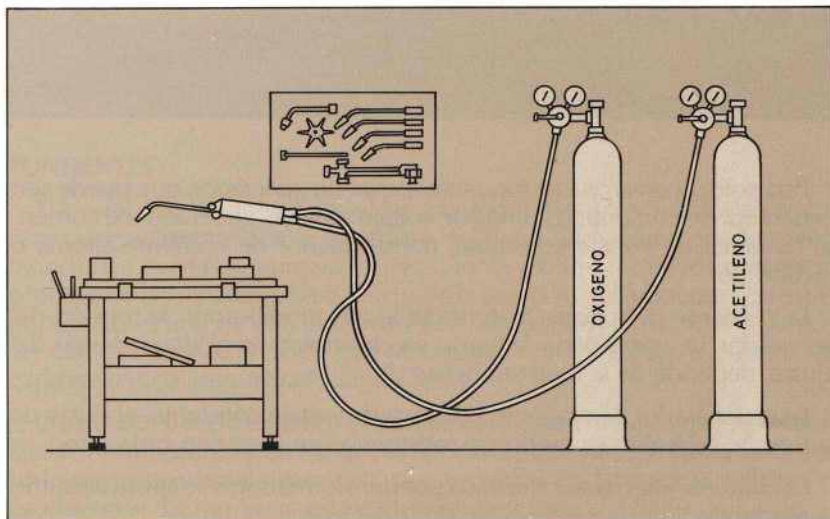


Figura 70. Esquema de los principales elementos para la soldadura oxiacetilénica.

No deben descuidarse los elementos de protección que aseguran al operario, por razones obvias de humanidad y economía.

INSTALACIONES MÓVILES PARA SOLDADURA OXIACETILÉNICA

Si, en vez de producir el acetileno en las propias instalaciones, se utiliza acetileno embotellado, el generador y los elementos que comporta se suprimen.

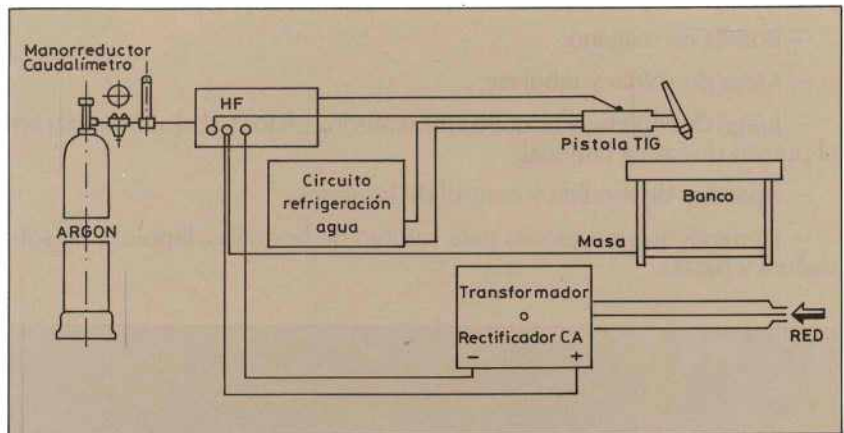
Basta entonces disponer de una botella de acetileno, otra de oxígeno y las mangueras que desde ellas conduzcan el gas al soplete.

Al sustituir el generador por la botella, la instalación se convierte en móvil, ya que las botellas son transportables, cosa que se hace más fácil y con mayor seguridad empleando carros.

INSTALACIÓN PARA LA SOLDADURA ELÉCTRICA

Por el interés que para el soldador tiene y por lo que su conocimiento influye en la correcta ejecución de la soldadura, describiremos seguidamente los principales elementos de la instalación de soldadura eléctrica con arco protegido (figura 71).

Figura 71. Esquema de una instalación de soldadura TIG.



Para soldar con arco eléctrico se necesita un *generador*, que puede ser: generador de corriente continua de voltaje variable, generador de corriente continua de voltaje constante, transformador de corriente alterna o rectificador.

La corriente del primer material se ajusta modificando la tensión del generador. La intensidad y la fuerza electromotriz en el arco, además del ajuste, depende de la longitud del arco.

En el generador de corriente continua de voltaje constante, el ajuste de la tensión se realiza ya mediante resistencias en serie con cada arco.

La corriente alterna suministrada por transformadores se ajusta variando la reactancia.

GENERADORES

En soldadura se utilizan tanto la corriente continua como la corriente alterna (fig. 71). La primera se genera mediante las *dinamos* y los *rectificadores* y la segunda mediante los *alternadores* o se puede obtener de la red general de suministro ajustando el valor de la fuerza electromotriz en los *transformadores* de la corriente eléctrica.

Las dinamos se fundamentan en la inducción electromagnética. Constan de un *inductor* y de un *inducido*. El inductor es la parte estática de la máquina y suele consistir en un hilo metálico, conductor, arrollado en torno a dos núcleos de acero bajo en carbono. Estos núcleos se convierten en electroimanes al circular corriente por el hilo del inductor. El inducido puede estar formado por un conjunto de espiras metálicas, cuyos extremos rozan con dos bornes semicirculares conectados con la máquina de soldar. Al girar 180° el conjunto de las espiras móviles, pasan, por ejemplo, de un núcleo al otro núcleo del inductor. De este modo se genera en el inducido fuerza electromotriz, de un determinado signo, debido a la inducción electromagnética del inductor. Al continuar girando las espiras del inducido se vuelve a generar fuerza electromotriz, pero de signo contrario. La conexión del inducido con la máquina de soldar es tal que los bornes semicirculares siempre están en contacto con el conjunto de espiras del inducido que le suministra corriente de un solo signo.

El alternador es como la dinamo pero con varios pares de núcleos y los bornes son circulares en lugar de semicirculares, de modo que la corriente va variando continuamente de signo.

El transformador consiste en un núcleo de acero bajo en carbono que tiene forma de anillo cuadrado. Por un lado de este anillo existe un conductor eléctrico arrollado mediante un número determinado de espiras: es el inductor o *primario*. Este conductor se conecta con la red e induce una corriente en el anillo de hierro que, en el lado opuesto a las espiras del citado conductor, actúa como inductor (*secundario*) de otro conductor unido al aparato de soldar.

La fuerza electromotriz que suministra el transformador es función de la fuerza electromotriz de la red y del número de espiras del inductor y del inducido.

FUNDENTES

El fundente o los polvos de soldar son unos productos que disuelven las impurezas existentes en la superficie del baño de fusión y que también reaccionan con las impurezas (generalmente óxidos) formados durante el proceso de la soldadura. El producto de la reacción del fundente con estas impurezas es una escoria fácil de fundir. En realidad los fundentes suelen ser óxidos de carácter ácido que reaccionan con los óxidos metálicos de carácter básico (impurezas), dando sales.

Estos fundentes son necesarios únicamente para metales que se oxidan fácil e intensamente y en los que la acción reductora de la llama soldante no alcanza por sí sola para reducir los óxidos en la medida suficiente; producen al mismo tiempo la conveniente fluidez del baño de fusión.

El fundente más sencillo es el bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ [tetraborato sódico]) una vez eliminada el agua de cristalización, pero que desgraciadamente sólo sirve para trabajos de soldadura fuerte y no para la soldadura autógena. El bórax que contiene agua (hidratado) se hincha al calentarlo, despidiendo vapores y es mucho menos eficaz que el deshidratado.

El empleo del bórax en la soldadura de las fundiciones es muy perjudicial, porque suele dar lugar a puntos duros y difíciles de elaborar. En forma de pasta puede emplearse, tal vez, para la soldadura de latón. Además, se encuentra como componente de muchas mezclas fundentes constituidas sobre base ácida, como ácido bórico (B_2O_3), vidrio soluble (silicato soluble de potasa), polvos de vidrio y otras materias que constan, en gran parte, de óxido silíceo (SiO_2) y forman escorias espesas vítreas, a menudo difíciles de eliminar e insolubles en agua. Además del ortofosfato ácido de disodio (Na_2HPO_4) y el fosfato sodicoamónico ($\text{NaNH}_4\text{HPO}_4$) que desempeña un papel de mucha importancia para la soldadura del cobre y sus aleaciones. Una mezcla, en partes iguales, de vidrio soluble (silicato soluble de potasa), ácido bórico y bórax constituye un buen fundente para aceros inoxidable, o sea, aceros que contienen cromo y níquel.

Fundentes constituidos por una sustancia básica se emplean especialmente para la soldadura de la fundición. Debido a la gran afinidad del silicio para el oxígeno se forma especialmente dióxido de silicio que reacciona con los óxidos de manganeso, del hierro y fósforo por un exceso de sodio y carbonato de potasio en el fundente, formándose, además de silicatos de sodio y de potasio, manganita y fosfato. La sosa calcinada (óxido sódico, Na_2O) puede ser considerada como el fundente más sencillo para la soldadura de la fundición. La presencia de cloruro de manganeso (MnCl_2) y cloruro férrico (FeCl_3) es, en cambio, perjudicial, porque puede dar lugar a una oxidación extraordinariamente intensa al penetrar la humedad. A estos fundentes se les suele añadir ferrosilicio (FeSi) y grafito.

ELECTRODOS

Los electrodos de soldar (varillas o alambre), llamados brevemente *electrodos*, sirven, al contrario que el alambre para la soldadura autógena, no sólo de material de relleno, sino que deben cumplir una serie de requisitos de importancia. Pasó ya el tiempo en que era poco lo que se exigía para una buena soldadura. En lugar del «alambre de colchón» que se empleaba entonces y hoy es considerado como material de calidad inferior, se emplean electrodos desarrollados en virtud de experimentos realizados desde diferentes puntos de vista y hechos de los mejores materiales conocidos y sancionados por la experiencia, constituyendo elementos que reúnen todas las condiciones que puede exigir la soldadura desde el punto de vista tecnológico. Al desarrollo empírico de los electrodos ha sucedido una investigación científica, sistemática, a la que se debe el alto grado de desarrollo de los electrodos empleados en la actualidad, sin poder prescindir por ello, ni hoy ni en el futuro, de la experimentación práctica por medio de ensayos de fusión. Como solamente se han normalizado las clases más importantes de electrodos, difícil es muchas veces que el operario menos entendido en la materia pueda elegir el electrodo

que más le conviene, ya que no solamente procede desde el punto de vista de la conveniencia, sino según las denominaciones más o menos importantes que se dan a los electrodos puestos a la venta. Además, muchos fabricantes creen que deben presentar la elaboración de sus electrodos como un «procedimiento de soldadura especial», lo cual, por una parte, carece de fundamento, y, por otra, da lugar a confusiones entre los consumidores. En vista de la extraordinaria importancia que tiene la cuestión referente a los electrodos en general, es necesario dedicarle especial atención teniendo presente que constituye un factor de decisiva importancia para el resultado de la soldadura eléctrica al arco. Se comprende, por la misma razón, que los esfuerzos del fabricante tiendan forzosamente a fabricar electrodos que, refundidos en el arco, den un producto soldado que no difiera notablemente del material de construcción en cuanto a la estructura y a los valores de calidad mecánico-tecnológicos. Esto no se ha logrado aún completamente, por lo menos no sin un tratamiento posterior de la soldadura, pero las diferencias son a menudo muy pequeñas.

Desde el punto de vista de los materiales, los electrodos para la soldadura por arco pueden clasificarse en:

1. Electrodos de carbón.
2. Electrodos metálicos.

De entre estos dos, los últimos son mucho más importantes.

La clase más antigua, empleada aún en casos especiales, es el electrodo de carbón, a saber: amorfo, grafitico y electrografítico. El material básico es el carbón de retorta (residuos de la destilación en las retortas de las fábricas de gas) y también se emplea el grafito, coque, antracita y hollín. Estos materiales se pulverizan finamente, se mezclan íntimamente con alquitrán caliente o breá como aglutinantes, se someten en seguida a una presión en prensas especiales y, después de convertidos en barras, se cuecen o calcinan en hornos de cámara o crisoles, tal como se hace con los objetos cerámicos. Las varillas amorfas reciben el nombre de *carbones homogéneos* para diferenciarlos del carbón con mecha, cuyo núcleo central consta de una materia extraña (vidrio soluble, carbón y ácido bórico) que ha de hacer que el arco arda de una manera uniforme, sin necesidad de un campo magnético de soplado. En la práctica sólo podrá omitirse este campo en contados casos, especialmente cuando se emplean electrodos de pequeño diámetro, prefiriendo el empleo del electroimán soplador para dirigir y estabilizar el arco, colocándolo sobre el carbón. Éste se hace exclusivamente de grafito y se recuecen en hornos eléctricos al abrigo del aire. Así se obtiene un carbón mucho más denso, el llamado *carbón grafitico*. Este carbón, que se obtiene grafitándolo eléctricamente a temperaturas muy elevadas, es mucho más caro debido al procedimiento posterior de fabricación.

Estos electrodos son capaces de absorber intensidades de corriente muy altas, es decir, a pesar de la poca pérdida al fuego, pueden soportar una carga más grande. La diferencia principal en las clases de electrodos de carbón consiste, en primer lugar, en el grado de conductividad eléctrica, que es 1:3:5 en la serie de los tres grupos indicados anteriormente. De

Figura 72. Intensidad de corriente en función del diámetro de electrodo para distintos carbonos.

Diámetro de la varilla en milímetros	Carga de las clases de electrodos de carbón, amperios		
	Amorfo	Grafítico	Electrografitado
6	40 a 50	50 a 75	75 a 100
8	50 a 75	75 a 100	100 a 150
10	75 a 100	100 a 150	150 a 200
12	100 a 125	150 a 200	200 a 250
14	125 a 150	200 a 250	250 a 300
16	150 a 200	250 a 300	300 a 400
18	200 a 250	300 a 350	400 a 500
20	250 a 300	350 a 400	500 a 600

esto depende la capacidad de carga, la cual corresponde aproximadamente a la cantidad de amperios indicados en la figura 72. La tensión del arco es desde 30 a 55 V (intensidad de corriente de 40 a 150 A) hasta 45 a 75 V o más (en intensidades de 300 a 600 A).

Según el fin a que han de destinarse, los electrodos se clasifican de la manera siguiente:

1. Electrodos para soldadura de unión.
2. Electrodos para usar como material de aportación.
3. Electrodos para separar y cortar.

En los electrodos de los grupos 1 y 2 se admiten, en cuanto a su aplicación práctica, grandes diferencias en los valores de calidad que exige la soldadura. Siempre que se trate de electrodos normales de acero, éstos quedan comprendidos en la normalización (DIN), de modo que ni siquiera en este sentido reina cierta claridad.

En cuanto a la clase de metal, hay que distinguir entre:

1. Electrodos de acero bajo en carbono (simplemente electrodos de acero).
2. Electrodos de aceros especiales (incluso aceros aleados, metales duros, etc.).
3. Electrodos de fundición, para soldaduras en caliente. Hay, por tanto, tres clases del grupo de hierro.
4. Electrodos de metales no férricos: para metales ligeros (aluminio y aleaciones); para metales pesados (cobre, bronce, metal Monel, níquel, etc.).

Los electrodos de acero, debido a su gran aplicación, son de importancia excepcional.

Según su fabricación y aspecto exterior, pueden distinguirse dos grupos principales, a saber:

- Electrodos desnudos.
- Electrodos recubiertos.

Los electrodos desnudos, a su vez, se subdividen en:

- Varillas moldeadas para fundición y también para metal fundido.
 - Alambres laminados para materiales duros.
 - Electrodos tubulares; tubitos metálicos con relleno de una aleación.
- Por ejemplo, para metales duros se utilizan tubos llenos de estelita y otros metales.

— Alambres estirados. Estos alambres trefilados, por su parte, pueden ser:

- Alambres que quedan «pulimentados» o que se recuecen para darles un color negro brillante o pardo.
- Alambres con superficies tratadas, cobreadas, niqueladas, etc.
- Alambres con alma; con núcleo no metálico y con núcleo metálico.

Los electrodos recubiertos, a su vez, se subdividen en: electrodos por inmersión o por compresión:

- Cubierta delgada (ligera y débil) obtenida por una sola inmersión en la pasta.
- Cubierta de espesor medio, de inmersión de dos o más veces también por compresión.
- Cubierta de gran espesor. Electrodos recubiertos o con cubierta de fusión, hechos mediante varias inmersiones o por compresión (electrodos cubiertos a presión).

ALEACIONES

Los metales empleados para aportación en la soldadura dura son aleaciones de cobre, de plata, de aluminio y algunas otras. La figura 52 es una selección de las más importantes. Todas las empleadas deben tener la suficiente resistencia y ductilidad para el fin a que se destinan, fundir a temperatura más baja que el material que han de unir y mojarlo.

El cobre es excelente para soldar aceros y muchas aleaciones no férreas. Moja muy bien al acero y se forman en la junta aleaciones hierro-cobre que proporcionan una excelente unión. Sin embargo, el cobre funde a temperatura excesivamente alta, por lo que se recurre a aleaciones suyas de más bajo punto de fusión, tales como los latones, que se emplean para muchos metales férreos y no férreos. Tienen buena resistencia y ductilidad, funden a temperatura más baja que el cobre puro y producen uniones resistentes.

Aún pueden conseguirse temperaturas más bajas con algunas aleaciones de plata, que cabe considerar como latones con adiciones de plata. Varias de ellas son capaces de fluir en las más pequeñas hendiduras, formando filetes muy estrechos, mientras que otras no pueden pasar por aberturas estrechas y sólo forman soldaduras relativamente gruesas. Todas tienen buena conductividad eléctrica y se pueden modificar para obtener un color que coincida con el del metal que ha de soldarse.

Las aleaciones con fósforo son útiles para soldar el cobre, porque son autofundentes. No pueden emplearse para soldar metales féreos por la fragilidad que produce el fósforo o los fosfuros de hierro.

El aluminio y algunas de sus aleaciones se pueden soldar con otras aleaciones de aluminio de más bajo punto de fusión. Como las diferencias en los puntos de fusión no llegan a ser tan grandes como al soldar con aleaciones de cobre, la técnica es algo más difícil y hay que controlar mejor la temperatura, aunque está bien conseguida y se emplea mucho este tipo de soldadura dura. Las aleaciones para soldar se encuentran en el comercio en muchas formas diferentes.

De muchas aleaciones de posible empleo para la soldadura blanda las principales son las de plomo y estaño. Cuanto más estaño haya, mejor se moja el metal de las partes a soldar y mejor es el enlace; pero como el estaño es bastante más caro que el plomo, no interesa una proporción excesiva por razones de economía. Las adiciones pequeñas de antimonio tienen un efecto endurecedor de las aleaciones de soldar estaño-plomo, y las de bismuto disminuyen el punto de fusión.

La aleación con 50 % de plomo y 50 % de estaño es la que más corrientemente se emplea. Para algunos fines (como la soldadura de tubos de plomo o envueltas de cables de plomo) es necesaria una aleación con un intervalo de fusión más amplio, mientras que en otros casos hacen falta aleaciones que solidifiquen con mayor rapidez. Lo primero se consigue con más plomo y lo segundo con una aleación eutéctica.

Para la soldadura blanda del aluminio o el magnesio, no pueden utilizarse las aleaciones estaño-plomo y se recurre a otras especiales.

SOPLETE

El combustible (acetileno, hidrógeno...) se mezcla con el oxígeno en una pistola-soplete.

Sabido es que el soplete sirve para la mezcla y combustión de los gases de soldadura, de forma que, regulándolos, se logre la temperatura adecuada, que puede llegar a los 3000 °C.

Además, permite dirigir la llama y focalizar el calor, manteniendo separados el combustible y el comburente hasta el momento de la combustión.

Aunque puedan variar algunos detalles en su construcción, el funcionamiento y partes esenciales de un soplete oxiacetilénico son: el mango, el mezclador, el tubo o lanza y la boquilla.

Los gases llegan al mango por sus respectivos tubos. El mezclador es un recipiente en que los gases se mezclan perfectamente en la proporción deseada. Por la lanza sale la mezcla y en su extremo lleva acoplada una boquilla. En la boquilla se produce la llama.

Los sopletes oxiacetilénicos se clasifican en dos grandes grupos: de baja presión y de alta presión. En el mercado se encuentran tipos y modelos variadísimos en cuanto a detalles constructivos, si bien el principio de funcionamiento es en todos ellos el mismo.

Soplete oxiacetilénico de alta presión

El soplete oxiacetilénico de alta presión se alimenta con acetileno procedente de botellas a una presión de unos 20 kg/cm² y que sale, después del manorreductor, a unos 0,5 kg/cm², y oxígeno de botella que sale a una presión que oscila entre 3 y 5 kg/cm². En el interior del cuerpo del soplete va una pieza llamada difusor, a la cual llegan el oxígeno por el tubo central y el acetileno por los pequeños orificios que rodean al central.

Desde el difusor los gases pasan a la cámara de mezcla, de forma cónica y luego a la boquilla.

La cantidad de gases, o caudal, depende en estos sopletes del diámetro de los orificios y de la presión a que llega cada gas.

Para variar el caudal, porque lo exija el tipo de soldadura, se cambia la boquilla por una de mayor o menor tamaño, según se quiera aumentar o disminuir.

La regulación de salida de gases se hace accionando los dos grifos que están situados en el mango del soplete, uno para el oxígeno y otro para acetileno.

El cambio de boquilla es fácil gracias a que se encuentran en el mercado juegos muy completos acoplables al mango universal.

Estos gases se suministran en botellas de acero. El oxígeno se encuentra a una presión de 150 kg/cm². El acetileno, normalmente mezclado con acetona, se halla a unos 20 kg/cm².

Los *manorreductores* regulan el paso de la gran presión de los gases de las botellas a una presión ligeramente superior a la atmosférica.

MESA POSICIONADORA

La mesa posicionadora (figura 73) constituye un equipo auxiliar indispensable para desarrollar racionalmente un trabajo en soldadura, ya que facilita la rápida colocación, orientación y posicionamiento de una pieza, realizada por un solo operario, sin necesidad de recurrir a la asistencia de ayudantes y operarios auxiliares.

Consiste en una construcción robusta a base de perfiles y chapas de acero laminadas con un tratamiento posterior de estabilizado, para normalizar tensiones. El plato se construye de forma circular o cuadrado; está sometido a dos movimientos de giro, es decir, rotación y basculación, siendo su accionamiento independiente o simultáneo.

La rotación del plato se realiza a velocidad variable (0-4 r.p.m.) y la basculación a velocidad constante (hasta un ángulo de 120°). Ambos movimientos se consiguen por medio de un motorreductor de corriente continua y otro motor freno de corriente alterna, respectivamente, que transmiten con unos mecanismos de sin fin y corona dentada.

El mando se realiza por medio de una botonera instalada en el mismo armario eléctrico o bien a distancia con un pedal o manipulador colgante que lleva el mismo operario.

Figura 73. Mesa posicionadora utilizada en soldadura.



MÁQUINAS DE SOLDADURA A TOPE

Las máquinas de soldadura a tope pueden clasificarse en dos grandes categorías: manuales y automáticas, utilizando una fuente de energía exterior (neumática, hidráulica, eléctrica, etc.).

También se suelen diferenciar por el tipo de soldadura que pueden realizar:

- Resistencia.
- Chisporroteo.
- Máquinas de soldadura a tope.

Su principio de funcionamiento y su modo de construcción varían según los tipos de soldadura.

Las máquinas de soldar pueden también diferenciarse, además, por el dispositivo de sujeción con que van equipadas. Los dispositivos de sujeción están condicionados a la forma y sección de las piezas a soldar.

Las partes principales de una máquina de soldadura a tope (figura 74) son las siguientes:

- el armazón, generalmente de chapa y perfiles de acero soldado al arco;

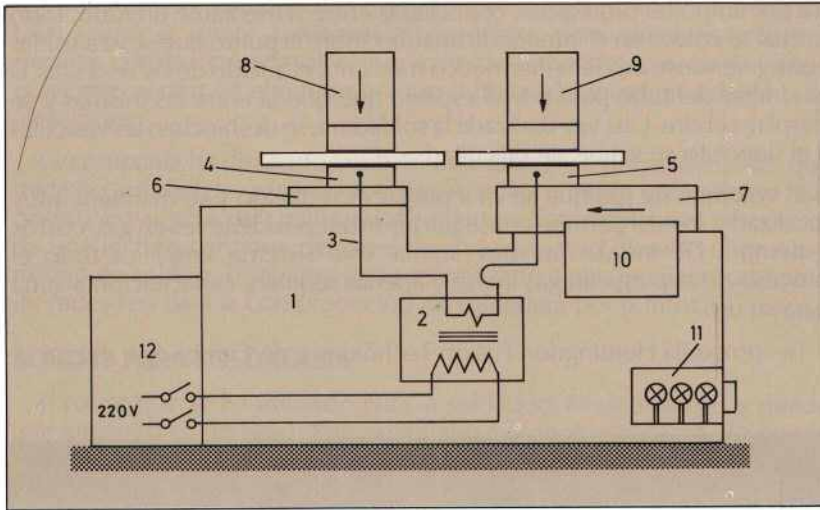


Figura 74. Representación esquemática de una máquina de soldadura a tope.
 1) armazón; 2) transformador de soldadura; 3) conexión del circuito secundario exterior; 4) electrodo izquierdo; 5) electrodo derecho; 6) mesa fija; 7) mesa móvil; 8) dispositivo de sujeción izquierdo; 9) dispositivo de sujeción derecho; 10) sistema generador del movimiento de la mesa móvil; 11) sistema de refrigeración por circulación de agua - alimentación; 12) aparellaje eléctrico y electrónico.

- el transformador, destinado a hacer circular por las piezas la corriente de soldadura;
- el circuito secundario exterior, que realiza la unión entre los bornes del secundario del transformador de soldadura y los electrodos en contacto con cada una de las piezas a soldar;
- los electrodos izquierdo y derecho sujetos a la mesa fija y móvil, y conectados eléctricamente a los bornes del secundario del transformador;
- la mesa fija;
- la mesa móvil;
- los dispositivos de sujeción, dispuestos sobre las mesas fija y móvil, equipados con mordazas de amarre que proporcionan a las piezas la presión contra los electrodos;
- un sistema propulsor del movimiento y de regulación de la velocidad de avance de la mesa móvil;
- un sistema que desarrolla el esfuerzo de forja durante la fase de recalcado;
- un sistema de refrigeración, por circulación de agua, de los órganos sometidos a calentamiento durante el paso de la corriente;
- accesorios eléctricos y, a menudo, electrónicos.

SOLDADURA TRANSVERSAL DE TUBOS

Utilizando un nuevo sistema altamente eficaz, a pesar de su sencillez, concebido por una compañía británica, pueden obtenerse soldaduras circunferenciales de alta calidad.

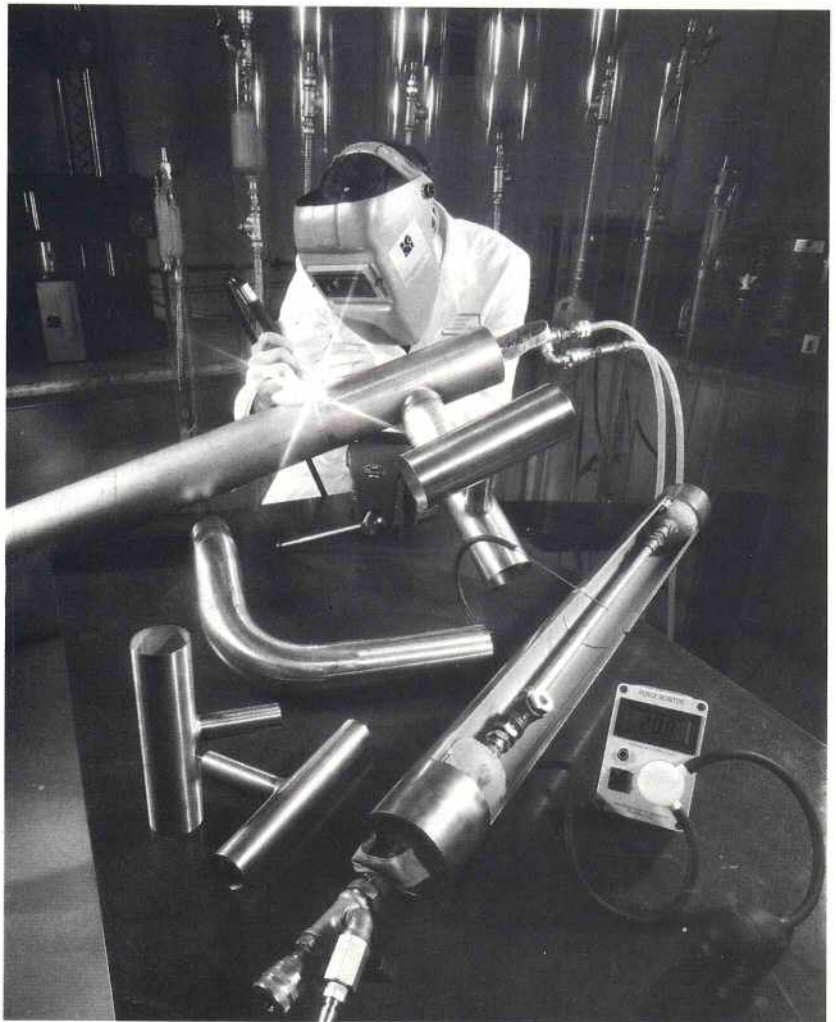
Conocido con el nombre de Argweld, el equipo (figura 75) está constitui-

do por ampollas protegidas, conectadas entre sí mediante un tubo, todo lo cual se coloca en el interior de un tubo sobre el punto que se va a soldar consiguiéndose un cierre hermético mediante el inflado de las vesículas. El gas inerte del tubo pasa por el espacio que queda entre las mismas y se desplaza el aire. Una vez realizada la soldadura, se deshinchan las vesículas y el depósito se extrae sin dificultad.

El volumen de gas que se va a purgar es reducido y se mantiene muy localizado, lo cual permite conseguir ahorros considerables en gas, costos y tiempo. De instalación muy rápida, este sistema simplifica todo el proceso de la purga de gas inerte y apenas requiere capacitación alguna para su uso.

La compañía Huntingdon Fusion Techniques, de Cambridge, diseñó el

Figura 75. Argweld: soldadura transversal de tubo.



sistema Argweld para distintos diámetros de tubo utilizados en industrias tales como el sector aeroespacial, productos petroquímicos, industria nuclear, construcción naval, elaboración de alimentos, cervecería y cualquier otro sector en el que se utilizan tuberías de acero inoxidable o de aleaciones.

La compañía ha diseñado también un monitor de purga (derecha), que mide la cantidad de oxígeno en el gas de purga e indica el momento más oportuno y seguro para realizar una soldadura. Este dispositivo proporciona una lectura continua del nivel del oxígeno, aun durante el proceso mismo de soldeo. También puede ser utilizado a manera de instrumento de muestreo para la comprobación de soldadura por puntos.

ROBOTS PARA SOLDADURA

El robot que se ha utilizado para la soldadura es de seis ejes y puede manipular 10 kg de peso. Está accionado por motores de c.a., lo que le hace aún más fiable. El sistema de control puede ser más o menos avanzado, incluso existe la tercera generación de control de robots.

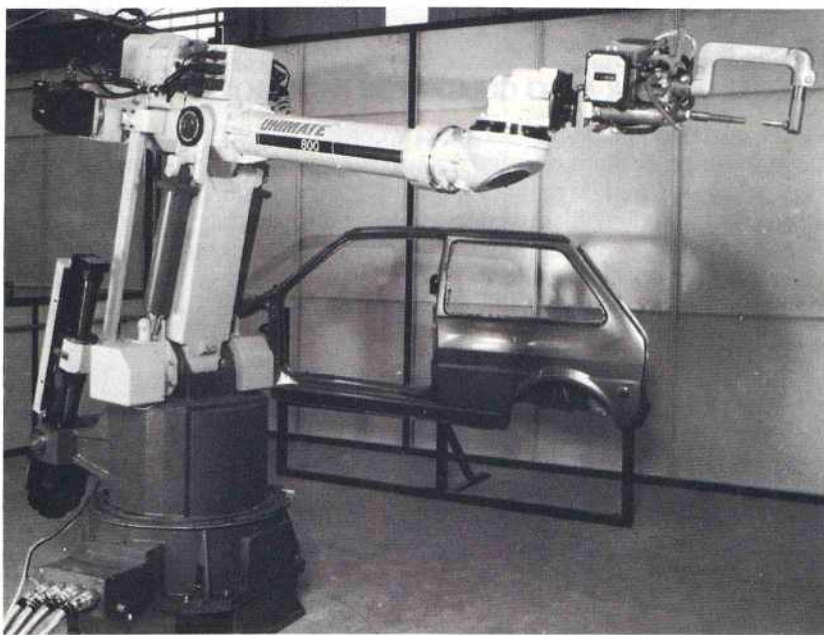


Figura 76. Movimiento de un robot utilizado para la soldadura de chapas de coche.

El robot para soldadura suele ser más bien rápido. Su alcance acostumbra a ser de, aproximadamente, 1,5 m y su zona de trabajo práctica es superior a 1 m (desde dentro hacia fuera).

El robot es un sistema flexible de brazos con alimentación interna de aire y de corriente. El peso tan liviano de sus brazos hace que su aceleración sea muy rápida. Muy adecuados para utilizarlos como soldadores (figura 76).

Suelen funcionar con velocidades de hasta 3 m/s en producción; la velocidad generalmente es de 1 m/s. Los ejes de la muñeca pueden girar alrededor de 300 grados/segundo y no es necesario esperar al giro de la muñeca para la reorientación del robot. La precisión repetitiva es mejor de $\pm 0,1$ mm.

Para mejorar la fiabilidad y reducir el mantenimiento, el robot para soldar está equipado con motores de corriente alterna. Además, el control del robot tiene determinadas funciones que permiten que los motores sean utilizados con muy altos rendimientos.

Existen sistemas de compensación continua de inercia y masa de los ejes del robot. Esta característica permite rápidas aceleraciones y desaceleraciones en cada punto. Algunos sistemas pueden controlar simultáneamente hasta doce ejes, constituidos por los seis ejes del robot y por otros seis ejes externos. Disponen de gran número (más de 100) de entradas/salidas para control del equipo periférico y para interfaz de sensores. A veces poseen circuitos de seguridad y de autodiagnóstico dobles. Si se produce un evento, como por ejemplo un corte de potencia, el programa en curso del robot puede ser arrancado automáticamente en el mismo punto donde fue interrumpido. Esto se debe a la función de medición absoluta.

SOLDADURA POR ARCO GUIADA POR PALPADORES

Con el desarrollo de un buscador de cordón en 1983, ABB dio el primer paso hacia un sistema de seguimiento de cordón. Este aparato permite buscar la posición de la ranura y el ancho de la hendidura para el mando de los parámetros de soldadura. El aparato es en particular apto para soldar cordones cortos en chapa fina. Entretanto, se encuentran en funcionamiento más de 300 buscadores de cordón, que corresponden al sistema de palpadores ópticos más utilizados en todo el mundo para la soldadura y el montaje.

A principio de 1987, con la designación de producto Laser Trak, ABB presentó un nuevo sistema de seguimiento de cordón; la disponibilidad de componentes apropiados, como láser de semiconductores y captadores ópticos, con fiabilidad suficiente, así como, finalmente, un trabajo intensivo de desarrollo, crearon la base del nuevo sistema, en el que, en lugar de limitarse a los palpadores propiamente dichos, se trató de conseguir la integración en el mando de los robots.

El principio de medición se basa en la triangulación óptica (figura 77). Un haz láser se proyecta sobre la superficie. Una disposición optoelectrónica reproduce la imagen de luz difusamente reflejada y muestra con ello la posición sobre esta disposición correspondiente a la distancia del caso concreto desde la superficie de trabajo. Con ello, se encuentran fijadas tanto la distancia como la posición, dos condiciones importantes para un cordón de soldadura impecable.

El rayo luminoso y la luz reflejada se palpan con la ayuda de dos espejos, con una frecuencia de 20 Hz y una amplitud de ± 15 mm, transversalmente respecto de la ranura. El perfil de altura sobre la ranura se obtiene a partir de la señal del palpador de medición (figura 78).

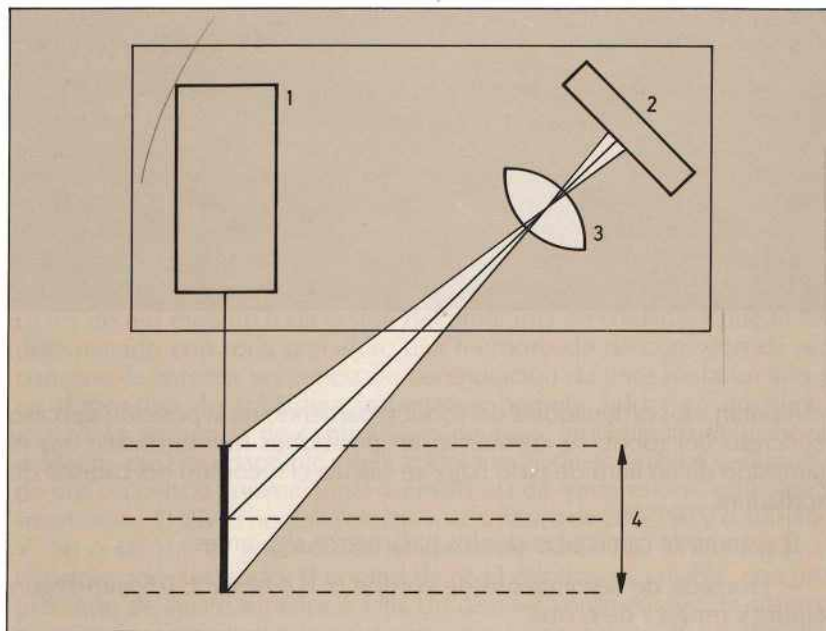


Figura 77. Medición de distancia de una hendidura de soldadura por triangulación óptica. 1) Lector; 2) foco; 3) lente; 4) hendidura.

Este sistema de seguimiento del cordón puede palpar las hendiduras sin que las soldaduras por puntos o los dispositivos de tensado perturben la medición (figura 79). Un ordenador filtra y analiza la señal con la ayuda de algoritmos para las diferentes ranuras. De ello se deduce la posición vertical y lateral de las ranuras y los anchos de hendiduras. Estos valores

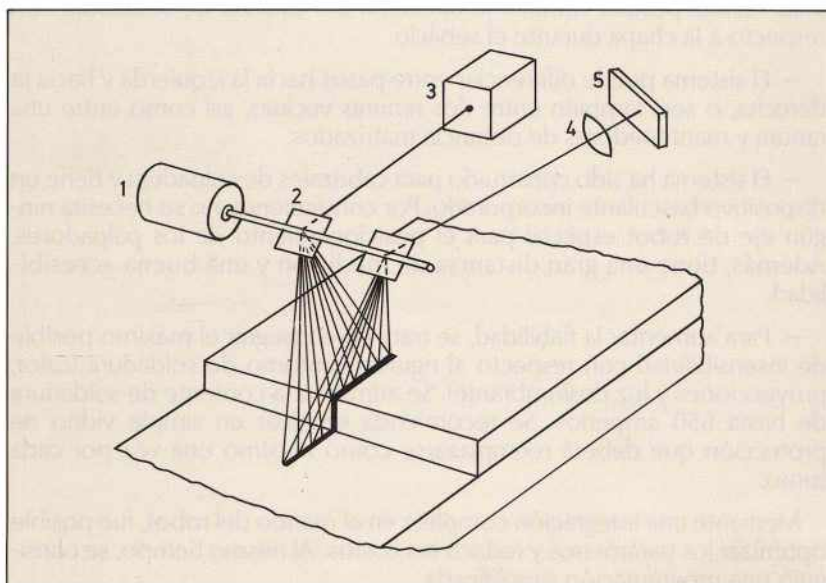


Figura 78. Determinación del perfil de altura de la ranura por palpado de la mancha de medición transversalmente respecto a la hendidura de soldadura. 1) Mando; 2) espejo; 3) lector; 4) lente; 5) foco.

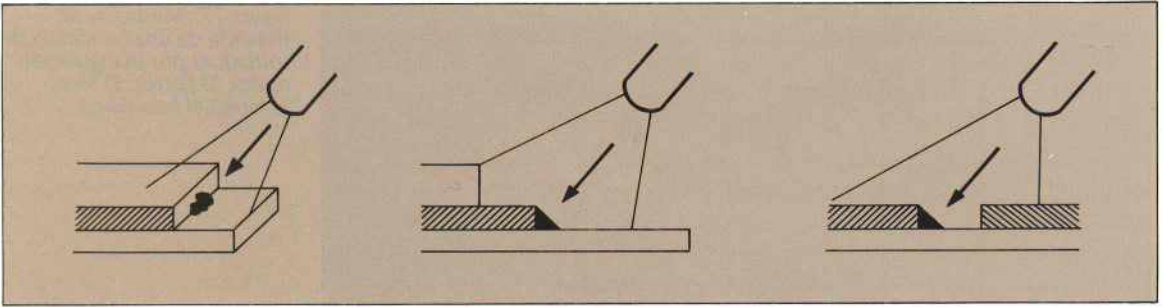


Figura 79. Sistema de seguimiento del cordón para palpar la hendidura sin que las soldaduras por puntos o los dispositivos de tensado perturben la medición.

alimentan a los ordenadores del robot y, partiendo de la posición del caso concreto del robot, se convierten en posiciones memorizadas; tras el tamizado de un filtro de paso bajo, se calcula el recorrido del cabezal de soldadura.

El sistema se caracteriza por los parámetros siguientes:

- Precisión de seguimiento de cordón $\pm 0,4$ hasta $\pm 0,6$ mm según ranura y espesor de chapa.
- Velocidad máxima de seguimiento de cordón 42 mm/s.
- Tipo de cordón: cordones solapados y de ángulo.
- Espesor mínimo de chapa recomendado 0,8 mm.

También las características siguientes tienen un valor de carácter práctico:

- A pesar de que sólo se programan el producto inicial y el producto final, resulta posible cambiar la dirección del cabezal de soldadura con respecto a la chapa durante el servicio.

- El sistema puede diferenciar entre pasos hacia la izquierda y hacia la derecha, o sea, también entre dos ranuras vecinas, así como entre una ranura y mantenedores de distancia matizados.

- El sistema ha sido construido para cabezales de soldadura y tiene un dispositivo basculante incorporado. Por consiguiente, no se necesita ningún eje de robot especial para el posicionamiento de los palpadores. Además, tiene una gran distancia de medición y una buena accesibilidad.

- Para aumentar la fiabilidad, se trata de conseguir el máximo posible de insensibilidad con respecto al riguroso entorno de soldadura (calor, proyecciones y luz deslumbrante). Se admite una corriente de soldadura de hasta 650 amperios. Se recomienda emplear un simple vidrio de protección que deberá reemplazarse como máximo una vez por cada turno.

Mediante una integración completa en el mando del robot, fue posible optimizar los parámetros y reducir los costos. Al mismo tiempo, se consiguió una programación simplificada.

CONTROLADOR PROGRAMABLE PARA SOLDADURA POR PUNTOS Y DE COSTURAS

Se ha creado en Gran Bretaña un sistema de control de soldadura flexible, exacto y económico, para ser incorporado a nuevos grupos soldadores o a equipos ya existentes: el controlador Pulsepack SSW3, programable para soldadura por puntos y de costuras; es de constitución modular y permite una fácil aplicación a diversos equipos. Cuatro tableros electrónicos basados en lógica integrada CMOS de alto nivel, sincronizados con la red general, hacen posible una economía de componentes y contribuyen a reducir los gastos de desembolso de capital. El número de ciclos de red durante toda la fase del programa de soldadura puede ser determinado con toda precisión; una memoria de desconexión de red conserva la anterior secuencia de conmutación durante hasta un año y un dispositivo de soldadura instantánea permite soldar en un punto exacto. La secuencia de control (flujo de agua, movimiento del cabezal soldador, etc.), es adaptable a aplicaciones individuales, si bien se dispone de una secuencia convencional normalizada de «prepresión», «presión» y «mantener». El SSW3 necesita electricidad trifásica de 200-250 V o 380-440 V, 50 o 60 Hz. La potencia de salida es de hasta 100 kVA, según el transformador instalado. El control de nivel calórico es variable, con una precisión de ajuste superior a 1 %. Un dispositivo de ensayo de sistema permite monitorizar el programa a una dieciseisava parte de la velocidad normal con la potencia soldadora desconectada.

Aplicaciones

SOLDADURA DEL ACERO

Existe una gran cantidad de sistemas para la unión de piezas de acero de pequeño espesor, pero al aumentar éste los procesos disponibles disminuyen hasta que, para estructuras realmente pesadas construidas con placas de 300 mm o incluso más gruesas, las técnicas disponibles se reducen solamente a tres o cuatro: soldadura al arco, al arco sumergido, por escoria conductora o por haz de electrones. Para que el técnico responsable de la producción pueda encontrar el proceso más adecuado en términos de posibilidad de soldadura, se puede confeccionar una tabla utilizando una escala arbitraria de valoración comprendida entre 0 y 100 (figura 80).

Sistema	Puntuación
Sistemas por resistencia (por puntos, protuberancias, solape, etc.)	100
Soldadura oxiacetilénica manual	95
Sistema MIG manual	95
Soldadura por arco manual	85
Sistema MIG automático (en caso de ser aplicable)	80
Soldadura al latón, con soplete	60
Soldadura al latón por inducción	55
Soldadura a la plata, con soplete	50
Soldadura a la plata, por inducción	45
Soldadura eléctrica al latón o a la plata en atmósfera gaseosa	40
Soldadura por microplasma	35
Sistemas TIG manuales	30
Sistemas TIG automáticos	15
Sistemas oxiacetilénicos automáticos	10
Soldadura al arco de carbón	8
Soldadura al latón con arco de carbón	3
Soldadura con hidrógeno atómico	2
Soldadura blanda	1

Figura 80. Procedimientos utilizados para soldar chapas delgadas de acero al carbono y su valor aproximado de la idoneidad.

La soldadura por arco palía el efecto del alabeo de las chapas delgadas de acero bajo en carbono, defecto propio de los otros procedimientos de soldadura.

A veces el método elegido como más adecuado se puede demostrar como menos apropiado para la producción que otro sistema que tenga una puntuación inferior en la escala. Por ejemplo, la soldadura oxiacetilénica se podría, de modo muy ventajoso, sustituir por un sistema de soldadura MIG automática si las uniones a soldar se diseñan de modo apropiado. Ello requeriría un estrechamiento de las tolerancias, la eliminación de las malas condiciones de ajuste de las piezas y la adecuada consistencia dimensional de las mismas.

Este coste adicional se tiene que comparar con el gran incremento de la producción y la mayor calidad de la soldadura obtenida por los sistemas MIG automáticos, en comparación con el caso de la soldadura oxiacetilénica manual, donde la velocidad y la calidad de la soldadura son función de la habilidad del operario.

Al dar un valor cuantitativo al procedimiento de soldadura se tiene que tener en cuenta también la finalidad de la estructura soldada. Si, por ejemplo, se tomara en consideración la producción de latas para conservas, la soldadura blanda tendría fácilmente la asignación 100. Si, por otra parte, se considera, por ejemplo, la fabricación de automóviles, electrodomésticos o piezas de aviación, será realmente necesario tener en cuenta varias técnicas de unión de metales.

De modo general, cualquier proceso automático es superior y más económico si se prevé una producción masiva. Si la producción prevista es solamente de lotes individuales o de escasas unidades, debe hacerse una evaluación más precisa entre los sistemas manuales y los automáticos.

SOLDADURA DE LA FUNDICIÓN

La fundición se suelda, principalmente, por los siguientes procedimientos:

- Soldadura oxiacetilénica.
- Soldadura con electrodo revestido.
- Soldadura MIG.

La fundición es una aleación base hierro con 2 % en carbono y elevados porcentajes en silicio. En la soldadura de la fundición se debe evitar la eliminación del carbono; por este motivo se suele soldar con metal de aportación. Para soldar la fundición, normalmente se requieren altos precalentamientos, los cuales pueden producir distorsión de la pieza y formación de óxidos. Estos defectos son muy poco deseables cuando es importante el control dimensional. La magnitud del precalentamiento aumenta con el tamaño de la pieza de fundición. Con piezas de fundición de gran tamaño pueden ser necesarios días para el enfriamiento y el calentamiento lento. Otra característica de la soldadura de la fundición es que esta aleación antes de fundir no pasa por un estado de gran plasticidad, sino que, al contrario que el acero, se funde bruscamente; por este motivo sólo se puede soldar en posición horizontal.

Antes de aplicar cualquier proceso de soldadura a la fundición se requiere una preparación especial: la película superficial de la pieza debe ser eliminada en la proximidad de la unión. La eliminación de esta película debe ser realizada mecanizando las caras de soldadura y las áreas en una extensión de 10 mm desde los bordes de la unión. Los defectos, como porosidad y fisuras tienen que ser cortados. Después del chafanado las superficies tienen que ser ligeramente amoladas para eliminar cualquier área endurecida. El tamaño del área eliminada tiene que ser suficientemente grande como para permitir el acceso a la manipulación del electrodo o de la pistola de soldadura. Se pueden practicar agujeros en los extremos de las fisuras antes de sanear la fisura para evitar la propagación

de la grieta durante su eliminación. Las fisuras deben ser chaflanadas para dar un ángulo de 70° para soldadura con electrodo MIG y hasta 90° para soldadura oxiacetilénica y TIG. Estos ángulos también son aconsejables para la preparación de bordes en fabricación. Los extremos de las fisuras tienen que ser redondeados para reducir tensiones en la raíz de la soldadura, y los extremos de la soldadura tienen que ser inclinados un ángulo de 45° respecto a la superficie de la fundición. Cuando el espesor sea superior a 12 mm, se recomienda una preparación por ambas caras si lo permite la accesibilidad de la unión. Todos los materiales extraños tienen que ser eliminados de la junta y su proximidad: arenas, pinturas, aceite, grasa, óxido... Se eliminan mediante una combinación adecuada de métodos tipo mecanizado, amolado, cepillado y desengrase con disolventes.

La soldadura oxiacetilénica se aplica para soldar fundiciones siempre que el espesor de las piezas a soldar no sea demasiado grande, lo que requiere elevadas cantidades de calor, difícil de suministrar por este procedimiento de soldadura.

La soldadura con electrodos revestidos se ha utilizado para la reparación de fundiciones durante muchos años y también se ha utilizado para la fabricación de piezas de fundición. Este proceso con electrodo revestido tiene la ventaja de mayores velocidades de soldadura respecto a la soldadura oxiacetilénica y puede ser usado para reparar grandes piezas in situ cuando es imposible aplicar un precalentamiento generalizado. Las particulares características de la soldadura con electrodo y las características metalúrgicas de la fundición han conducido al desarrollo de electrodos especiales para este procedimiento. Mientras que con la soldadura oxiacetilénica siempre es necesario cierto grado de precalentamiento para subir la temperatura de la unión de forma que la llama oxiacetilénica pueda fundir la fundición más fácilmente, el hecho de cebar un arco con electrodo en la superficie causa un pequeño baño de fusión que produce un cierto precalentamiento. Sin embargo, el proceso con electrodo revestido tiene la desventaja de causar mucha más penetración que la soldadura oxiacetilénica.

La solución más satisfactoria al problema de la dilución del metal de la soldadura y de la absorción, por parte del cordón, del carbono del metal base es el uso de aleaciones de níquel. El carbono se separa en forma de finas partículas de grafito y se obtiene un depósito fácilmente mecanizable. El metal depositado es dúctil, incluso sin precalentamiento, porque no tiene lugar ninguna transformación. Las altas velocidades de enfriamiento no tienen ningún efecto perjudicial en el metal de soldadura. Una desventaja del metal de soldadura de níquel es su susceptibilidad a la fisuración por solidificación como resultado de la absorción de fósforo y azufre del metal base que tenga alto contenido de estos elementos. Las fundiciones maleables y nodulares normalmente tienen bajos contenidos de fósforo y azufre y no presentan estos problemas. Sin embargo, las fundiciones grises tienen niveles elevados de fósforo y azufre y es aconsejable reducir la dilución a un mínimo. Por esta razón, los electrodos de níquel diseñados para la soldadura de metal base níquel no son utilizables para su uso en fundición debido a su penetración que puede producir mucha dilución. Los electrodos de níquel para la soldadura de la fundición

tienen un recubrimiento de tipo grafito, que produce una penetración media y permite trabajar a baja intensidad de corriente, ya sea con corriente continua o con corriente alterna. Aunque el metal depositado base níquel no es afectado por un precalentamiento, éste sí puede influenciar las propiedades de la zona afectada térmicamente.

También se utilizan electrodos que contienen aproximadamente 55-60 % de níquel y el resto de hierro. Estos electrodos son más baratos que los de níquel puro y menos susceptibles a la fisuración por solidificación causada por fósforo o azufre.

Durante algunos años los procesos de soldadura MIG usando aleaciones de níquel o de cobre y protección de gas argón se han aplicado a la soldadura de fundición. Es necesario utilizar la técnica de cortocircuito para garantizar bajas penetraciones y bajas diluciones y, generalmente, se producen menos carburos en la zona afectada que con la soldadura con electrodos recubiertos. Otra ventaja de la soldadura MIG es que puede ser automatizada y, por lo tanto, es ideal en trabajos repetitivos. Tal como se ha comentado en el apartado de soldadura con electrodos, pueden emplearse alambres base níquel, ya sea níquel puro o níquel-hierro, aleaciones base cobre y también alambres de acero, pero en este último caso el cordón depositado no será mecanizable. Estos hilos en algunos casos son macizos y en otros son tubulares.

El reciente desarrollo de la soldadura MIG en cortocircuito, cuya ventaja es la baja penetración de las soldaduras, ha permitido soldar numerosas piezas. Los procesos MIG se han empleado con éxito para unir fundiciones nodulares y fundiciones maleables consigo mismas y con acero.

En la fundición se pueden también emplear otros procedimientos de soldadura como la soldadura TIG, la soldadura por arco sumergido, la soldadura por fricción, la soldadura por difusión y la soldadura por haz electrónico, pero no están tan extendidas en la industria.

SOLDADURA DEL COBRE

En principio existen tres tipos de cobre: el cobre desoxidado al vacío, el cobre desoxidado con fósforo y el cobre con partículas de óxido cuproso. Este último presenta dificultades al soldarlo, pues las partículas de óxido cuproso forman con el cobre base un eutéctico de bajo punto de fusión, que fragiliza la soldadura.

El cobre se suelda por los siguientes procedimientos:

- Soldadura blanda.
- Soldadura dura.
- Forja.
- MIG con baja tensión.
- Soldadura por resistencia eléctrica.
- Soldadura a la llama oxiacetilénica.
- Soldadura aluminotérmica.

El cobre desoxidado se suelda, principalmente, con soldadura blanda, con arco en atmósfera de gases protectores y a la llama. El arco se utiliza, fundamentalmente, para soldar los bordes de chapas delgadas de cobre.

El cobre es uno de los metales que tiene mayor conductividad calorífica. Por este motivo, la fusión local necesaria para la soldadura autógena sólo se logra cuando la mayor parte de la masa metálica ha recibido la suficiente cantidad de calor.

La soldadura de cobre requiere mayor cantidad de calor y, por consiguiente, llamas más grandes que las necesarias para soldar el acero, aunque su punto de fusión es unos cientos de grados inferior al del hierro.

Si la cantidad de calor transmitida al metal es igual a la emitida por radiación, hasta el punto de que la llama no es capaz de vencer las pérdidas de calor, la soldadura con metal aportado del cobre será imposible, y no podrá obtenerse una soldadura impecable: la llama es demasiado pequeña. Ésta, en cambio, resulta ser demasiado grande si al cabo de cierto tiempo se produce una acumulación creciente de calor y un paso rápido al estado líquido sobre una amplia base.

En la soldadura oxiacetilénica del cobre la llama debe mantenerse, al principio de la operación, en la posición vertical, a ser posible sobre el baño de fusión hasta que se pierda la coloración oscura procedente de la oxidación superficial y consiga el color rojo claro propio de los colores de revenido, señal de que casi se ha alcanzado ya el punto de fusión. Sólo después de haber recibido la pieza de trabajo la suficiente cantidad de calor, puede aplicarse el ángulo de soldar usual e inclinar más el soplete al llegar al final de la costura, cuando se haya estancado el calor, lo cual es ventajoso especialmente cuando se sueldan chapas delgadas. La propiedad del dióxido de carbono de reducir el poder de absorción del cobre líquido para otros gases, en particular para el oxígeno, se aprovecha prácticamente sosteniendo verticalmente el soplete, sobre todo cuando se sueldan chapas gruesas, para que la llama se extienda en la chapa uniformemente sobre las zonas muy calentadas. De esta manera se ayuda al propio tiempo la acción del desoxidante (fundente), aplicado sobre el cobre frío en forma pastosa.

El fundente suele contener fosfato monoácido de sodio y ácido bórico.

La soldadura aluminotérmica del cobre se realiza para unir cables entre sí y cables de protección en arquetas enterradas. El calor para fundir el cobre se genera encendiendo una mezcla de óxido cuproso, aluminio en polvo y óxido de bario.

SOLDADURA DEL LATÓN

Los latones se sueldan mediante:

- Soplete oxiacetilénico.
- MIG.
- Resistencia eléctrica.

Es mucho más fácil soldar el latón que el cobre. Su conductividad

calorífica es 2,5 a 3 veces la del acero y, por tanto, 2/3 inferior a la del cobre, por lo que casi siempre se aplica una llama del tamaño de la utilizada para la soldadura del acero. La fusión mucho más fluida en el baño de latón, los fenómenos de tensión esencialmente menores, la menor eliminación de calor y el peligro de recalentamiento no tan grande como en el cobre, son todos ellos factores que aumentan su soldabilidad, prescindiendo de que sirve casi únicamente para soldar chapas delgadas y tubos, raras veces para espesores de paredes de más de 10 mm. Al contrario del cobre, la probabilidad de absorción de hidrógeno en el latón es de poca importancia, porque el cinc reduce sensiblemente la solubilidad para este gas. El cinc, cuyo punto de ebullición es únicamente de 907 °C, tiende, sin embargo, a vaporizarse más rápida y fuertemente y oxidarse formando óxido de cinc, lo cual requiere una llama oxidante. Costuras de latón soldadas con una llama mal regulada presentan un precipitado blanco, más o menos extenso, que consta de óxido de cinc y se adhiere fuertemente a la superficie del latón.

Muy raras veces se utiliza un alambre de latón ordinario como material de aportación, por ser difícil obtener con él una soldadura exenta de poros. Generalmente se utilizan alambres de latón especiales, con un contenido en cinc superior en 2 a 3 % al del latón a soldar y adiciones de silicio. Los fundentes son los mismos que se emplean siempre para el cobre y sus aleaciones; el bórax o pastas hechas de este material son inadecuados.

En el procedimiento MIG de soldadura del latón no se utiliza esta aleación como metal de aportación sino alambrón de bronce (Cu + 5 % Sn) o cuproaluminio (Cu + 6 % Al).

SOLDADURA DEL BRONCE

El bronce tiene un grave inconveniente para soldarlo: pierde rápidamente parte de su resistencia y ductilidad conforme aumenta la temperatura y se resquebraja, al menor descuido, bajo el propio peso del cuerpo. La resistencia del bronce a 600 °C es únicamente del 20 % del material a temperatura ambiente. Al pasar de 500 °C bastan pequeñas trepidaciones y movimientos, o más bien golpes o choques, para que se quiebre la pieza de bronce, razón por la cual se aconseja evitar todo cambio de sitio o local, es decir, no hacer girar ni dar vueltas a la pieza de bronce al exceder la temperatura de 400 °C. En el proceso de la soldadura las piezas de trabajo de bronce deben colocarse, antes de iniciar la unión, sobre un soporte fuerte y firme, para que no sufra cambios de posición.

La dificultad para soldar el bronce aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de estaño. El bronce no es tan quebradizo como la fundición, pero no debe prescindirse de un calentamiento previo para eliminar las tensiones existentes. Este calentamiento no debe pasar, sin embargo, de los 600 °C. Si se trata de cuerpos pequeños, bastará calentarlos previamente con la llama, pero los objetos grandes se pondrán al horno.

En la soldadura al arco del bronce (MIG) el metal de aportación generalmente contiene 8 % de cinc y 0,5 % de fósforo.

El bronce también se suelda por resistencia eléctrica.

SOLDADURA DEL ALUMINIO

El aluminio se puede soldar por:

- Forja.
- Resistencia eléctrica.
- MIG.
- TIG.
- Llama oxiacetilénica.
- Soldadura blanda.
- Soldadura dura.

El aluminio puede ser soldado en grandes espesores (hasta 25 mm) por el procedimiento de forja. Los recubrimientos de la chapa (dos o tres veces el grueso del material, pero no menos de 8 mm) se decapan mecánicamente y a continuación se quiebran los bordes y se calientan con la llama oxiacetilénica. La forja se efectúa a unos 420 °C, que es una temperatura en la que el aluminio es muy blando y fácil de martillar. Después se aísla la costura.

Por soldadura por forja se fabrican tubos de aluminio. Tres perfiles de aluminio calentados se introducen en la matriz puente y, al soldarse por forja, dan lugar al tubo.

La resistencia de la soldadura depende de la temperatura de ésta, que no debe ser inferior a 350 °C ni superior a 500 °C, porque entonces el aluminio se fragiliza.

Las soldaduras eléctricas por resistencia y por arco protegido con gases inertes cada día tienen mayor interés para el aluminio y sus aleaciones.

En la soldadura con gas la preparación de los bordes de la pieza de trabajo para la soldadura es análoga a la del acero. Los tubos deben ser soldados a tope. Los bordes a soldar deben limpiarse escrupulosamente de grasa, aceite y óxidos mediante limas, cepillos y rasquetas, que deben estar siempre preparados únicamente para el aluminio. Como desengrasante se recomienda el tricloroetileno. En aleaciones viscosas del aluminio, como, por ejemplo, aluminio-magnesio, conviene doblar (achaflanar) ligeramente los cantos de la chapa también por el lado opuesto (envés).

La pasta de soldar se aplica, antes de calentar la costura, con un pincel limpio —cualquier impureza, hasta la más pequeña, estorba— sobre y entre los bordes de la chapa, a ser posible también en la cara opuesta, y sobre el alambre. En chapas gruesas y piezas fundidas se opera, por regla general, con fundentes pulverizados, en los que se introduce únicamente el extremo caliente del alambre.

La soldadura blanda de metales ligeros, limitada exclusivamente a la unión del aluminio y sus aleaciones, puede emplearse únicamente para chapas muy delgadas, de menos de 0,2 mm de espesor en lo que se refiere a la soldadura por medio de soldador. Prescindiendo de ello, para este tipo de soldadura sólo puede emplearse la llama Bunsen o la soldante para

soldar todos los materiales a base de aluminio. Como la temperatura de trabajo para el proceso está comprendida entre 180 y 500 °C, los datos relativos a la soldadura autógena son válidos igualmente para la soldadura blanda en cuanto al descenso o disminución de resistencia de aleaciones de aluminio templadas.

Las varillas para la soldadura blanda de aluminio son especialmente de metales pesados a base de cinc y estaño con adiciones de plomo, cadmio, bismuto, etc., y contienen únicamente hasta 30 %, a lo sumo, de aluminio, pero por regla general esta cantidad no pasa de 15 %.

En contraposición a la soldadura blanda de aluminio, las soldaduras duras tienen una proporción considerablemente mayor de aluminio, de 70 a 90 %. Los demás componentes de la aleación, generalmente metálicos, de las varillas de soldadura dura, como cobre, cinc, estaño, plata, níquel, manganeso, cadmio, silicio, antimonio, bismuto, etc., están representados en cantidades mucho más pequeñas que en la soldadura blanda, con lo que resulta un aumento considerable de la temperatura de fusión y, consiguientemente, de la de trabajo.

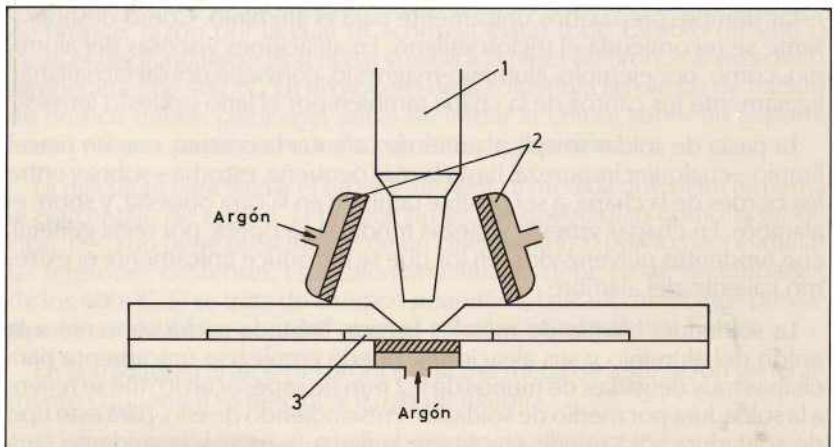
Una soldadura dura muy preferida es también el alambre de silumín con 13 % de silicio y el resto aluminio.

SOLDADURA DEL TITANIO

A temperaturas próximas a su punto de fusión absorbe fácilmente oxígeno y nitrógeno, haciéndose entonces extremadamente frágil. Por eso su empleo en las estructuras soldadas sólo ha podido realizarse gracias a la soldadura de argón (figura 81).

La técnica que se utiliza es muy especial y consiste en servirse de empuñaduras de gran consumo, provistas o seguidas de dispositivos que consumen argón en una gran zona a retaguardia de la junta, o en utilizar recintos cerrados con paredes de plástico transparente, llamados «cajas de guantes», provistas de aberturas para el paso de los brazos, completamen-

Figura 81. Soldadura del titanio con protecciones laterales e inferior: 1) pistola para soldar; 2) gas protector; 3) piezas a soldar.



te llenos de argón, los cuales contienen las piezas de soldadura y la empuñadura.

Las piezas más corrientes rebasan raramente los 3 mm de espesor, debiendo estar perfectamente limpias y desengrasadas en los entornos de la junta. Los bordes se dejan rectos, con una separación muy ligera entre ellos, basándose, para los parámetros de la soldadura, en los cuadros suministrados por el constructor del aparato utilizado o por el productor del titanio.

ACERO GALVANIZADO

El acero galvanizado por inmersión en caliente se obtiene introduciendo la chapa de acero, o la pieza de acero ya fabricada, en un horno que contiene el cinc en estado líquido (figura 82).

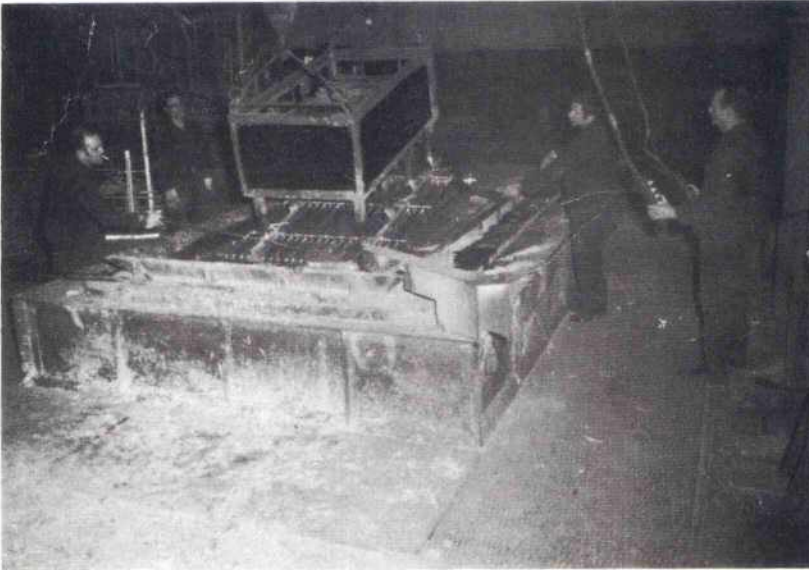


Figura 82. Horno de cuba para la galvanización en caliente del acero al carbono.

Para soldar acero galvanizado se puede utilizar la soldadura al arco, la soldadura oxiacetilénica y la soldadura por resistencia.

Una vez soldadas las piezas hay que limpiar perfectamente la zona unida, sobre todo de la escoria. Es preferible el chorreo con granalla tratada térmicamente. Seguidamente se aplica un cincado por proyección con pistola, suelda a base de cinc, o se pinta con pinturas ricas en cinc.

Cuando se sueldan aceros galvanizados empleando la protección de dióxido de carbono, se produce una mayor cantidad de proyecciones que cuando el acero está sin galvanizar. Estas partículas proyectadas pueden quedar adheridas a las piezas a soldar o en la pistola. En el primer caso se origina un aspecto superficial poco satisfactorio, y en el segundo se provocan trastornos en la salida de gases. La adherencia de estas partículas

puede paliarse mediante el empleo de aerosoles a base de silicio, grafito o petróleo, cuya aplicación previa a la soldadura evita la fuerte adherencia y permite limpiar, con un simple cepillado, tanto la pieza como la tobera de la pistola.

Los resultados de los ensayos de tracción, plegado y fatiga, así como el examen radiográfico, han demostrado que la presencia del recubrimiento de cinc no influye sobre las propiedades de la unión. No se detecta porosidad en las soldaduras a tope, pero las uniones T en ángulos pueden contener niveles variables de porosidad. Se ha demostrado que esta porosidad, aun en un nivel muy elevado, no tiene efecto sobre la resistencia de la unión.

Defectos de la soldadura

En primer lugar, hay que distinguir entre defectos internos y externos (figura 83), según quedan dentro o fuera de la soldadura. Los externos más fácilmente apreciables son los siguientes:

- Falta de penetración.
- Exceso de penetración.
- Sobreespesor del cordón.
- Cordón irregular.
- Mordeduras.
- Salpicaduras.
- Cráteres.

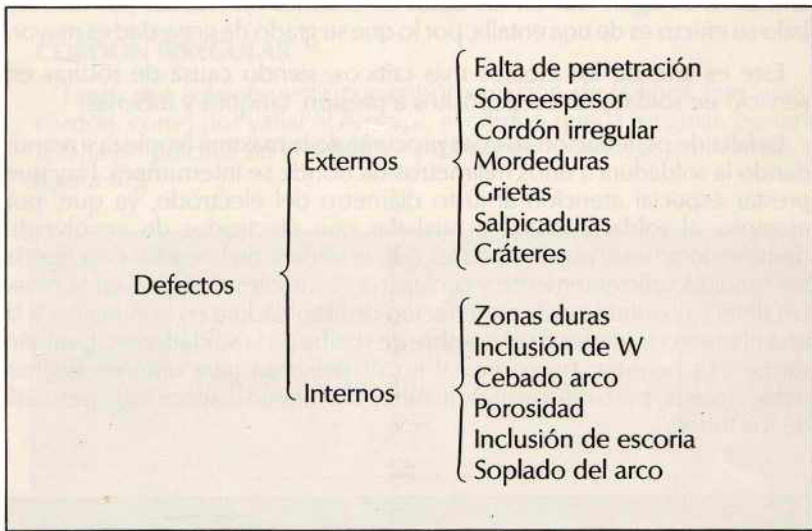


Figura 83. Principales tipos de defectos en las uniones soldadas.

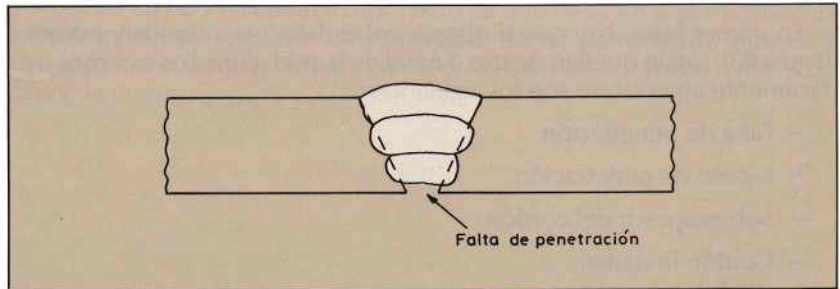
Para ser observados los defectos internos se necesitan instrumentos como los rayos X o ensayos metalográficos y pueden ser:

- Escorias incrustadas.
- Sopladuras.
- Grietas.
- Cebado arco.

FALTA DE PENETRACIÓN

La falta de penetración, que suele ir acompañada de incrustaciones de diminutas partículas de escoria, se produce por las interrupciones intermitentes en la fusión de los bordes (figura 84), sobre todo al reanudar la soldadura tras el cambio de electrodos.

Figura 84. Falta de penetración.

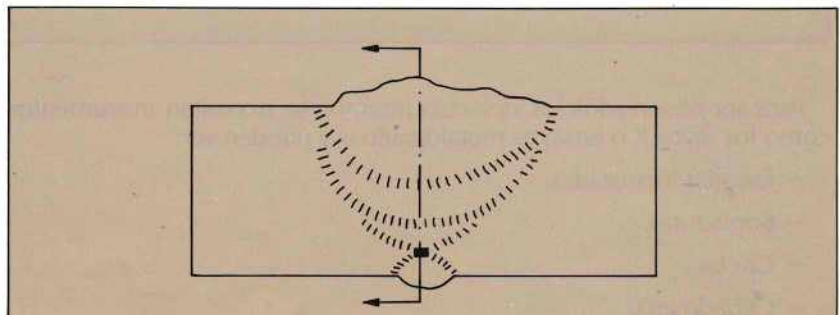


Consisten en una penetración incompleta del material de aportación. Generalmente afecta a la primera pasada en uniones realizadas desde un lado, y a la zona central del espesor de la unión de juntas soldadas por ambas caras (figura 85). En los casos de uniones efectuadas por un solo lado su efecto es de una entalla, por lo que su grado de gravedad es mayor.

Este es uno de los efectos más críticos, siendo causa de roturas en servicio de soldaduras en depósitos a presión, tanques y tuberías.

La falta de penetración se evita procurando la máxima limpieza y reanudando la soldadura a unos milímetros de donde se interrumpió. Hay que prestar especial atención al justo diámetro del electrodo, ya que, por ejemplo, al soldar costuras acanaladas con electrodos de envoltente demasiado gruesa, puede suceder que el vértice de la costura no pueda ser fundido suficientemente y dé lugar a inevitables defectos en la base. Un defecto contrario es la penetración de la soldadura en la filtración, a la que el obrero soldador da el nombre de «barba de la soldadura» o también «bolsa». La penetración como tal no es peligrosa para uniones hechas debidamente, pero en costuras de tubos disminuye la sección de paso útil de los tubos.

Figura 85. Falta de penetración interna.



De todos modos, estos defectos se presentan menos en las soldaduras por arco que en las soldaduras por gas.

SOBRESPESOR

Se denomina así al exceso de material que sobresale en la «cara» o la «raíz» de la soldadura (figura 86).

Soldaduras con sobreespesor llevan muchos años prestando servicio en todo tipo de industria sin que hayan producido roturas por su causa. El sobreespesor del cordón supone un gasto inútil de material y da al cordón de soldadura un aspecto demasiado abultado, que en realidad debilita la junta.

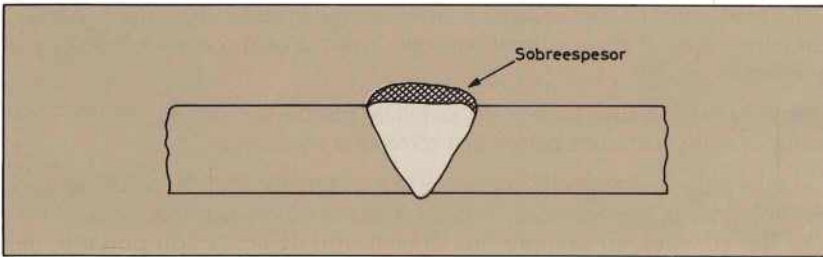


Figura 86. Sobreespesor.

CORDÓN IRREGULAR

Tanto por sobreespesor como por variación de la línea que sigue el cordón, como por variar el espesor, el cordón queda irregular, evidencia la falta de práctica en el soldador y da origen a defectos en la soldadura (figura 87).

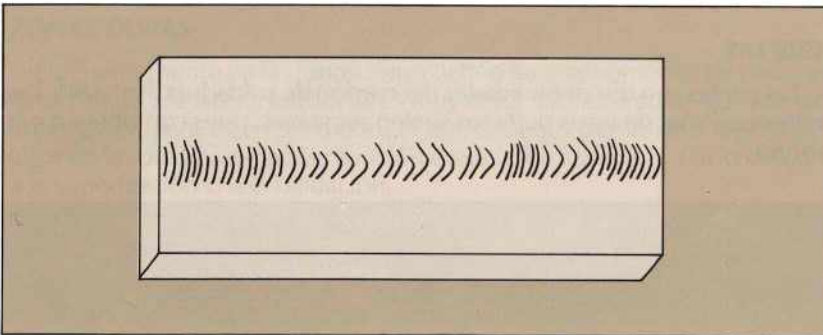


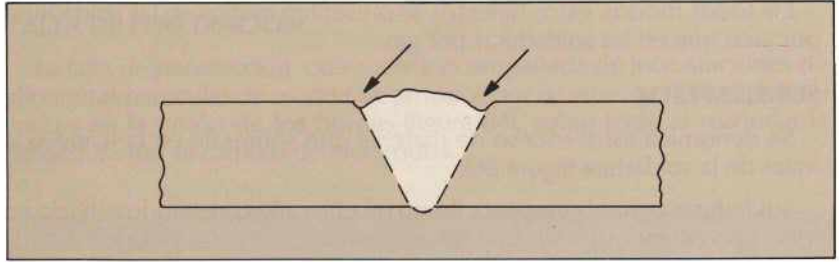
Figura 87. Cordón irregular.

MORDEDURAS

Las mordeduras son canales y hundimientos producidos en la zona donde empieza el sobreespesor entre el cordón y los bordes de las piezas (figura 88).

Son debidas a movimientos inadecuados del electrodo y reducen la sección resistente. Este defecto puede remediarse, en parte, dando una

Figura 88. Mordeduras.



pasada al relleno una vez acabada la soldadura. Se da con más frecuencia en la soldadura vertical.

Se presentan en forma de cavidades, generalmente de forma continua, en el metal base adyacente al baño de fusión a uno o ambos lados de la soldadura (fig. 89).

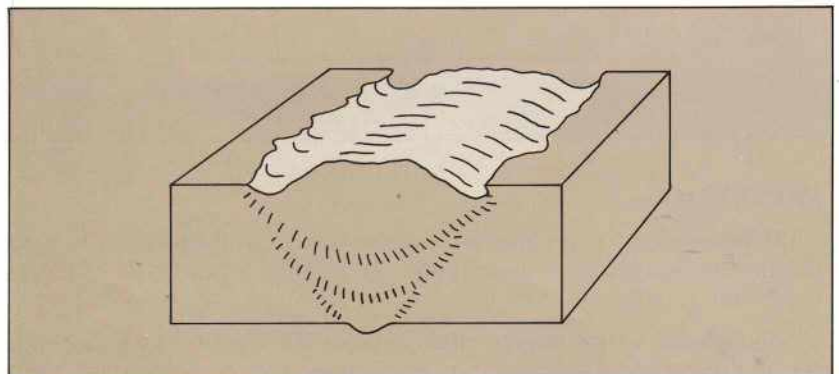
Por constituir una fuente de entallas, puede ser origen de grietas y roturas, especialmente bajo fatiga térmica o mecánica.

Debe atribuirse especial importancia a las entallas, dando por resultado, en soldaduras horizontales, una falsa conducción del electrodo. Estas entallas constituyen siempre una debilitación de la sección portante del material y son, por tanto, más peligrosas cuanto más perpendicularmente actúan sobre ellas las fuerzas de tracción o han de soportar esfuerzos de flexión. Estas entallas se presentan especialmente cuando se suelda en paredes verticales y por debajo. También se favorecen por la clase del electrodo empleado, como ocurre en las soldaduras acanaladas con más frecuencia que en cualquier otra clase de costuras. Las entallas transversales que se forman en la superficie de la costura cuando se trabaja con electrodos desnudos de lenta fusión o mal conducidos, son, en efecto, menos perjudiciales, pero presentan un aspecto muy feo.

GRIETAS

Las grietas son discontinuidades del cordón de soldadura (figura 90). Las consecuencias de estos defectos suelen ser graves, pues contribuyen a la rotura.

Figura 89. Ranura o garganta en la superficie de la chapa a lo largo del borde de la soldadura.



El peligro de las grietas de contracción es aún mayor cuando están ocultas, y no en la superficie. Estos defectos coinciden muy raras veces con la ejecución del trabajo y, por tanto, no puede decirse que sean debidas a poca habilidad del operario; más bien parece que están relacionados con las propiedades del material base y del electrodo, y quizá también con un falso orden de sucesión de la soldadura. Las grietas que aparecen al aplicar la primera capa deben ser separadas o fundidas completamente, porque, como se comprenderá fácilmente, prosiguen en las capas siguientes.

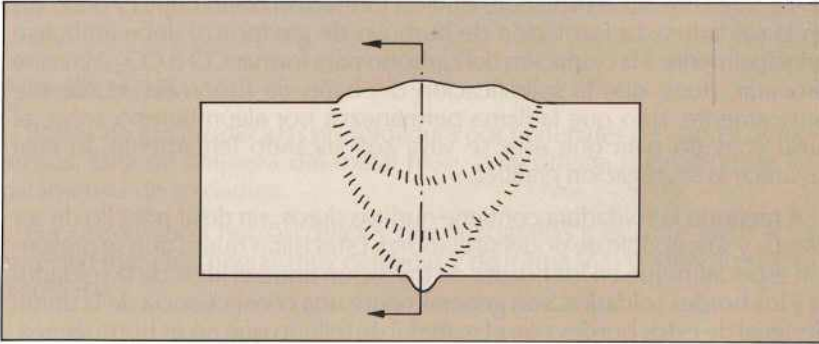


Figura 90. Grieta.
Discontinuidad del cordón de soldadura.

SALPICADURAS

Se trata del desprendimiento en forma de gotas más o menos gruesas del material de aportación que forma la raíz.

A pesar de que su aspecto suele ser alarmante no son peligrosas, a menos que sean muy acusadas y continuas con cambios bruscos en su forma.

ZONAS DURAS

Frecuentemente en las fundiciones tienen lugar fenómenos de endurecimiento. La soldadura entonces es muy difícil. Hay dos cosas que son de importancia para este fenómeno: el enfriamiento demasiado rápido del lugar de la soldadura y la disminución esencial de carbono y silicio debido a la vaporización o a la oxidación.

La pieza de fundición se ablanda por recocido. El tiempo que dura el recocido varía entre 3 horas y 5 días, según la masa de la pieza soldada. La causa de la dureza producida en el lugar de la soldadura es un enfriamiento rápido, la misma circunstancia que ha causado el endurecimiento de la fundición blanca: la evitación de la suficiente formación de grafito y la de cementita y ledeburita o la mezcla de ambas. Esto puede notarse claramente en los bordes de la superficie de rotura de una pieza maciza de fundición, que, por haberse enfriado con mayor rapidez por fuera, son siempre más pobres en grafito y permiten reconocer a simple vista una microestructura de grano mucho más fino. Con la finura del tamaño del grano crece la resistencia a la rotura de la fundición, pero también su dureza. Como el lugar de la soldadura se enfría más deprisa que la pieza después de solidificada en su molde, por lo que representa siempre

una microestructura mucho más fina, se comprende que el lugar de la soldadura de la fundición tenga mayor resistencia que el material básico.

La pérdida de carbono y silicio de la soldadura produce un material muy parecido a un acero endurecido o templado, de modo que ambos elementos deben estar siempre en cantidad suficiente en el material de aportación. Una parte del carbono y del silicio pasa al estado gaseoso (en parte en combinación con el oxígeno o el hidrógeno del aire y de la llama) y sube, en forma de pequeñas burbujas, a la superficie del baño de fusión. Si la masa fundida se solidifica sin dejar tiempo a los gases encerrados para salir al aire libre, no será posible evitar la formación de rechupes y burbujas en la soldadura. La formación de burbujas de gas (poros) debe atribuirse principalmente a la oxidación del carbono para formar CO o CO₂. Hay que procurar, pues, que la solidificación del baño de fusión no se efectúe bruscamente, sino que la llama permanezca por algún tiempo sobre el lugar soldado para que éste se vaya solidificando lentamente, lo cual favorece la segregación grafitica.

A menudo la soldadura contiene nuditos duros, sin dejar por ello de ser blanda y susceptible de poderse elaborar. Estas islitas duras, que se presentan especialmente en los bordes de transición entre el lugar de la soldadura y los bordes soldados, son generalmente una consecuencia de la unión desigual de estos bordes con el material de relleno que no es homogénea. Hay que tener el cuidado de que la sección del material de relleno no sea muy débil y se adapte a la de la pieza de trabajo. Las varillas delgadas deben fundirse por debajo de la superficie del baño de fusión al mismo tiempo que se agitan sin interrupción.

Las zonas duras en la soldadura de la fundición pueden provenir también de que quedan encerrados óxidos no escorificados con la debida rapidez por los polvos de soldar. La costra de óxido se forma, no sólo en la superficie del baño de fusión, de donde se puede retirar con una barra de hierro, sino también en el extremo de la varilla que está fuera del baño. El silicio contenido en la soldadura reduce el óxido de hierro, disminuyendo así al mismo tiempo el silicio contenido en la masa líquida, en detrimento de la segregación de grafito. Para evitarlo, se da a la llama, al soldar hierro colado, un exceso notable de acetileno, porque la presencia de grandes cantidades de carbono apoya el trabajo de silicio y éste no se quema tanto.

CRÁTERES

Los cráteres son rechupes en forma casi circular que se producen a la terminación de cada electrodo y se extienden de forma irregular en el metal de soldadura. Son debidos a la contracción del material de aportación fundido como consecuencia de una interrupción brusca del arco.

A menos que haya en ellos grietas o faltas de fusión, no suelen ser causa de roturas en servicio.

INCLUSIONES DE TUNGSTENO

Son partículas de material procedente de los electrodos utilizados en la soldadura TIG, que quedan retenidas en el interior de la unión.

Estas inclusiones no son perjudiciales, a menos que su tamaño y número sean excesivos.

CEBADOS DE ARCO

Son zonas localizadas afectadas por el calor o cambios en el contorno de la soldadura y metal base causadas por un arco. Su origen es el calor generado al paso accidental de la corriente a través de un electrodo de soldadura o los punzones de inspección por partículas magnéticas. Este tipo de discontinuidad raras veces ha sido causa de rotura en servicio.

POROSIDADES

Bolsas de gas producidas en soldadura por materiales de aporte defectuosos, falta de limpieza del metal base, o incorrecta regulación de los parámetros de soldadura.

Por observación microscópica y por radiografías mediante rayos X, se aprecian manchas negras muy definidas y de forma más o menos esférica (figura 91).

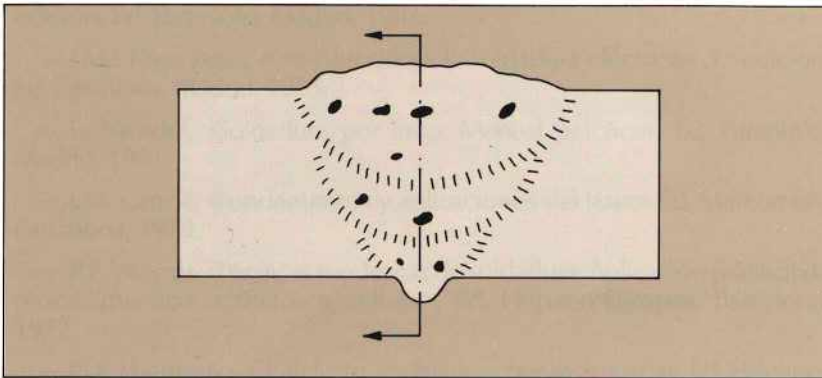


Figura 91. Porosidad.

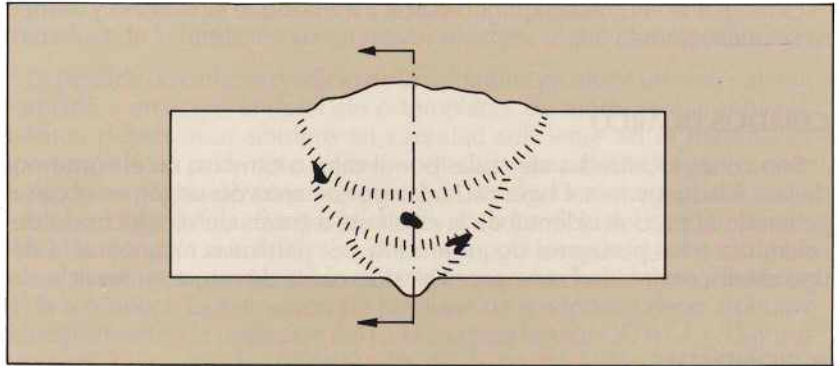
INCLUSIONES DE ESCORIA

Materiales sólidos no metálicos atrapados en el metal de soldadura, o entre el cordón de soldadura y el metal base. Por observación metalográfica se distinguen manchas oscuras de forma más o menos irregular (figura 92).

SOPLADO DEL ARCO

Es una perturbación magnética del arco de soldadura que lo hace fluctuar del curso normal (frecuente cuando se trabaja con equipos de corriente continua). Es la causa del mal encendido de los electrodos incandescentes.

Figura 92. Inclusiones.



Si la calidad de la unión soldada decrece más o menos sensiblemente por cualquiera de los defectos y faltas anotados, peor es aún el resultado cuando concurren dos o más de estos defectos en la misma costura. Entonces intensifican sus efectos.

Bibliografía

- «Metals Handbook». ASM. Edición n.º 9, volumen 6. Materials Park, Ohio, 1983.
- P. Molera y R.L. Felip. «Metalización». Ed. Prensa XXI, Barcelona, 1982.
- P. Schimpke y H.A. Horn. «Soldadura y Corte con soplete». Ed. G. Gili, México, 1982.
- P. Schimpke y H.A. Horn. «Soldadura Eléctrica». Ed. G. Gili, México, 1982.
- J. González Vázquez. «Manual de soldadura eléctrica». 3.ª edición. Ed. CEAC, Barcelona, 1981.
- J. González Vázquez. «Manual de soldadura con llama». 3.ª edición. Ed. CEAC, Barcelona, 1983.
- J.M.ª Rivas Arias. «Soldadura Eléctrica y sistemas TIG y MAG». 2.ª edición. Ed. Paraninfo, Madrid, 1983.
- J.M.ª Rivas Arias. «Introducción a la soldadura eléctrica». 3.ª edición. Ed. Paraninfo, Madrid, 1983.
- L. Mendel. «Soldadura por arco. Manual práctico». Ed. Paraninfo, Madrid, 1981.
- J.M. Carroll. «Fundamentos y aplicaciones del láser». Ed. Marcombo, Barcelona, 1978.
- P.F. Woods. «Técnicas modernas de soldadura. Aplicación práctica de procedimientos, aparatos y utillajes». Ed. Hispano-Europea, Barcelona, 1972.
- G.E. Lheureux y E.J. Belotte. «Soldadura por resistencia». Ed. Hispano-Europea, Barcelona, 1968.
- R. Pons y V.R. Andreano. Deformación Metálica, 138 (1988) pág. 55.
- M.V. Piredda. «Soldadura con arco sumergido». Ed. Limusa, México, 1982.
- M.V. Piredda. «Soldadura de arco metálico con protección de gas». Ed. Limusa, México, 1983.
- «Papers on soldering». ASTM, Filadelfia, Pennsylvania, 1963.
- G. Edling. Deformación Metálica, 156 (1989) pág. 57.

COLECCION "PRODUCTICA"

Volúmenes aparecidos

- 1 Cómo mejorar la productividad en el taller
- 2 Diseño industrial por computador
- 3 Autómatas programables
- 4 Fabricación asistida por computador-CAM
- 5 Círculos de calidad
- 6 Cómo y cuándo aplicar un robot industrial
- 7 Control de métodos y tiempos
- 8 Redes locales en la industria
- 9 La fábrica flexible
- 10 Aplicación de la estadística al control de la calidad
- 11 Introducción a la neumática
- 12 La formación permanente en la empresa
- 13 Aplicaciones industriales de la neumática
- 14 Cómo programar un control numérico
- 15 Seguridad e higiene en el trabajo
- 16 Control de procesos industriales; criterios de implantación
- 17 Planificación y rentabilidad de proyectos industriales
- 18 Gestión de calidad
- 19 Aplicaciones industriales del láser
- 20 Dispositivos y sistemas para ahorro de energía
- 21 Management: la tecnología punta del mando
- 22 Nuevas técnicas de gestión de stocks
- 23 Simulación de procesos con PC
- 24 Planificación y programación de la producción
- 25 La innovación tecnológica y su gestión
- 26 Optimización industrial (I): distribución de los recursos
- 27 Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales
- 28 Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos
- 29 Optimización industrial (II): programación de los recursos
- 30 Electromecanizado: Electroerosión y mecanizado electroquímico
- 31 Programas de formación para el empleo
- 32 Ingeniería económica
- 33 Recubrimiento de los metales
- 34 Combustión y quemadores
- 35 Metales resistentes a la corrosión
- 36 El departamento de I + D: organización y control
- 37 Corrosión industrial
- 38 La ergonomía y el ordenador
- 39 Adhesivos industriales
- 40 Materiales no metálicos resistentes a la corrosión
- 41 El directivo impulsor de la innovación
- 42 Medida y control del ruido
- 43 Previsión tecnológica y de la demanda
- 44 Logística empresarial
- 45 La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el RAT
- 46 Ingeniería de sistemas
- 47 Conformación metálica
- 48 Localización, distribución en planta y manutención
- 49 Fiabilidad y seguridad de procesos industriales
- 50 Marketing estratégico
- 51 Tratamientos térmicos de los metales
- 52 El mando intermedio: figura clave en la empresa
- 53 Climatización de confort e industrial
- 54 Fabricación integrada por ordenador (CIM)
- 55 Técnicas gráficas en Productiva
- 56 Soldadura industrial: clases y aplicaciones

Soldadura industrial: clases y aplicaciones

La soldadura se interpreta como una operación de ensamblaje, muy utilizada en el sector de la calderería, de la chapa hechurada y como operación de reparación de piezas rotas. La soldadura, a la par que soluciona la unión de componentes metálicos, puede fragilizar al metal base en la zona afectada por el calor. No obstante, como procedimiento de unión entre partes de objetos metálicos, la soldadura constituye el procedimiento de conformación metálica más versátil. Existe una gran variedad de aparatos, instalaciones, accesorios... metálicos, de formas más o menos complejas, que se han fabricado gracias a la introducción del proceso de unión por soldadura en alguna de sus etapas del proceso productivo.

Los fundamentos de la soldadura de metales y aleaciones, la humectabilidad y la difusión en estado sólido, constituyen la primera parte del libro. En la segunda parte se describen los procedimientos de soldadura: autógena, a gas, arco (TIG, MIG, MAG, electrodo revestido, electrodo sumergido, electrodo bajo escoria electroconductora, plasma), resistencia (a tope, puntos, protuberancias, roldanas, costura), electrólisis, aluminotérmica, explosión, ultrasónica, fricción, láser, haz de electrones, forja, inducción, soldadura dura y soldadura blanda.

El libro termina explicando algunas técnicas especiales de soldadura tales como el recargue y la compactación isostática en caliente, las instalaciones, los equipos y los productos utilizados en las técnicas de la soldadura. También se describen los defectos más comunes en las soldaduras.

Pere Molera Solà es Doctor en Ciencias Químicas, profesor titular de Metalurgia de la Universidad de Barcelona. Ha sido becario de la Dirección General de Universidades e Investigación para la Formación de Personal Investigador, profesor de Metalurgia de la Universidad Autónoma de Barcelona, profesor invitado en diferentes universidades extranjeras (Oporto, Lisboa, Bogotá y Washington).

Ha sido presidente de la sección de Corrosión de Barcelona de la Asociación Nacional de Químicos de España y fundador de la sección de Metalurgia de la citada Asociación.

Ha publicado catorce libros y un centenar de artículos en revistas de la especialidad españolas y extranjeras. El último libro publicado es «Tratamientos térmicos de los metales», volumen nº 50 de esta colección. Ha presentado más de cincuenta ponencias en diversos congresos de la especialidad celebrados en distintos países.

Ha sido distinguido con un accésit del premio Manuel Torrado Varela de la Asociación Técnica Española de Estudios Metalúrgicos. Es asesor metalúrgico de varias revistas y enciclopedias. Es director de la revista «Deformación Metálica».

Ha sido investigador principal de varios proyectos de investigación subvencionados por la Dirección General de Investigación Científica y Técnica del Ministerio de Educación y Ciencia y por la Generalitat de Catalunya.



marcombo
BOIXAREU EDITORES

P R O D U C T I C A