

9



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SOLDADURA CON RAYO LASER
COMO PROCESO ALTERNATIVO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
PRESENTA

MIGUEL ANGEL ARRIOJA GUERRERO



DIRECTOR DE TESIS:
ING. UBALDO E. MARQUEZ AMADOR

MEXICO, D. F.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS

Con gran respeto y agradecimiento para mis padres, por su gran apoyo e incansable trabajo para que su onceavo hijo saliera adelante en sus estudios. Para todos y cada uno de mis hermanos y hermanas, que con las vivencias cotidianas han enriquecido mis principios, valores y perspectivas.

Para la facultad de Ingeniería, la cual, entre muchas otras cosas, nos otorga una visión de análisis y estudio como una disciplina infalible para hacer frente a cualquier aspecto de nuestra vida profesional y personal.

Al Ing. Ubaldo Eduardo Márquez Amador, director de la presente tesis y buen amigo, que con su apoyo fue posible la realización y culminación del presente trabajo de tesis, al M.I. J. Javier Cervantes, al Ing. Jesús Roviroza López, al Ing. Héctor Mejía y a mi asesora Alejandra Garza Vázquez por sus acertadas correcciones y disertaciones para la elaboración del presente trabajo.

INTRODUCCION

En la antigüedad se le dio el nombre de soldadura a la unión de dos metales por medio de la fusión; sin embargo, ésta definición hoy en día resulta insuficiente, puesto no sólo el calor es uno de los medios utilizados en la fusión,. Así también, existen medios que no requieren del calentamiento para soldar, como es un ejemplo, la soldadura fría bajo presión y sonido.

Por tal motivo aquí utilizaré la siguiente definición general:

“Una Soldadura es la unión de metales o plásticos por medios que no precisan dispositivos de sujeción”.

Los procesos de la soldadura que se utilizan ahora en escala muy amplia. Constituyen algunos de los medios recientes introducidos en la fabricación metálica. Sin embargo, sabemos que la operación de unir metales mediante procesos de soldadura ha sido conocida desde hace muchas generaciones. Se han encontrado utensilios de cobre soldados que pertenecen a la civilización que existió 1 400 años a.de C. Asimismo, en el Antiguo testamento se hace referencia al conocimiento que se tenía de la soldadura.

Aunque la soldadura ha sido empleada durante varios cientos de años, su completa utilización se inició hace menos de un siglo. Tan pronto como se encontraron las respuestas a los secretos ocultos de nuestro mundo, como son la estructura, composición y naturaleza de los metales, la soldadura alcanzó la posición de “joven gigante de la industria.” El consumidor contempla la soldadura como el origen de un método confiable de producción a bajo costo.

Las operaciones de soldadura desempeñan un papel importante en el mantenimiento de nuestros altos niveles de vida, pues las máquinas y herramientas de que dispone la sociedad moderna no existirían sin la presencia de los procesos de soldadura. Por ejemplo, un automóvil necesita de cientos de operaciones de soldadura durante la etapa de su producción.

OBJETIVO

Estudio de la tecnología de soldadura con rayo láser como un proceso alternativo así como sus características aplicaciones, modos de aprovechamiento y ventajas.

I N D I C E

CAPITULO	PAGINA
I. TIPOS CONVENCIONALES DE SOLDADURA	
I. SOLDADURA CON ARCO	5
I.1 LOS FACTORES PRINCIPALES DE LA SOLDADURA CON ARCO	6
I.2 ELECTRODOS PROTEGIDOS (RECUBIERTOS)	9
I.3 SOLDADURA AUTOMATICA CON ARCO	10
I.4 SOLDADURA CON ARCO CON PROTECCION GASEOSA	11
I.5 LA SOLDADURA CON ARCO EN MEDIO DE HIDROGENO ATOMICO	12
I.6 LA SOLDADURA CON ARCO O METAL	12
I.7 LA SOLDADURA DE BOTON O DE PUNTOS DE ARCO	13
I.8 SOLDADURA CON ARCO Y PLASMA	13
I.9 SOLDADURA CON ARCO SUMERGIDO	14
I.10 SOLDADURA VERTICAL	15
I.11 SOLDADURA ELECTROGASEOSA	16
I.12 SOLDADURA DE ESPARRAGO	17
I.13 COMPARACIÓN ENTRE LOS PROCESOS DE SOLDADURA CON ARCO	17
I.14 SOLDADURA CON RAYO ENERGETICO	20
I.15 SOLDADURA A RESISTENCIA	22
I.16 SOLDADURA A RESISTENCIA DE ALTA FRECUENCIA	24
I.16.1 EQUIPOS PARA SOLDAR A RESISTENCIA	25
I.16.2 MAQUINAS PARA SOLDAR CON PUNTOS	25
I.17 SOLDADURA DE PROYECCIONES	26
I.18 SOLDADURA DE COSTURA	28
I.19 SOLDADURA A TOPE CON RECALCADO	30
I.20 SOLDADURA A TOPE CON DESTELLO	32
I.21 SOLDADURA POR PERCUSSION O PERCUSIVA	32
I.22 SOLDADURA CON TERMITA	33
I.23 SOLDADURA CON GAS	35
I.23.1 GASES COMBUSTIBLES	36
I.23.2 SOLDADURA CON GAS OXIACETILENO	38
I.24 SOLDADURA A PRESION	39
I.25 SOLDADURA A FRICCION	40
I.26 SOLDADURA ULTRASONICA	41
I.27 SOLDADURA POR EXPANSIÓN	41
I.28 UNION POR DIFUSION	42
II. SOLDADURA CON RAYO LASER	
II SOLDADURA CON RAYO LASER	43
II.1 APLICACIONES	44
II.2 FUNDAMENTOS	45
II.3 CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES DEL LASER	51
II.4 EL RAYO LASER ADECUADO PARA SOLDAR	52
II.5 LASER DE GAS	55
II.6 SELECCIÓN DE UN SISTEMA DE LASER	59
II.7 PRODUCTIVIDAD	61
II.8 CALIDAD DE LA SOLDADURA	62

II.9 FLEXIBILIDAD	63
II.10 INTERACCION LASER Y MATERIAL	64
II.11 CONSIDERACIONES GENERALES DE LA SOLDADURA	66
II.12 EFECTOS CRITICOS	66
II.13 SOLDADURA CON HAZ DE LASER DE PULSOS	69
II.14 MEJORAMIENTO DEL PRODUCTO	70
II.15 REDUCCION DE COSTOS	71
II.16 PUNTO DE SOLDADURA	72
II.17 SOLDADURA DE COSTURA	73
II.18 SOLDADURA DE HAZ DE LASER DE ONDA CONTINUA	74
II.19 SOLDADURA DE OJO DE CERRADURA	77
II.20 GAS PROTECTOR	78

III.- EFECTOS DEL PLASMA

III. EFECTOS DEL PLASMA	79
III.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES	79
III.2 EFECTOS EN EL DESEMPEÑO DE LA SOLDADURA	82
III.3 TECNICA DE SUPRESION	84
III.4 PROPIEDADES DE LA SOLDADURA	88

IV.- MATERIALES SOLDADOS CON LASER.

IV. ALUMINIO Y SUS ALEACIONES	89
IV.1 ACERO	91
IV.2 TITANIO Y SUS ALEACIONES	93
IV.3 ALEACIONES DE IRIDIO	95

V.- DISEÑO DE LAS UNIONES PARA SOLDAR CON HAZ DE LASER.

V. DISEÑO DE LAS UNIONES PARA SOLDAR CON HAZ DE LASER.	96
--	----

VI. PARAMETROS A CONSIDERAR EN UN PROCESO DE SOLDADURA CON LASER

VI. DISEÑOS OPTICOS Y TRANSPORTE DEL HAZ	102
VI.1 MEDIDAS DE POTENCIA	102
VI.2 SEÑALAMIENTO AUXILIAR DE HELIO-NEON	103
VI.3 TRANSPORTACION DEL HAZ	103
VI.4 MATERIALES OPTICOS	104
VI.5 EFECTOS ATMOSFERICOS	105
VI.6 MONTURAS OPTICAS	105
VI.7 SELECCIÓN DEL ENFOQUE OPTICO	108
VI.8 TRAYECTORIA DEL PUNTO FOCAL	110
VI.9 EQUIPOS DE MANIPULACION DEL TRABAJO Y MANIPULACION DEL HAZ	111
VI.10 PROCESOS DE INSPECCION	114

VII. COSTOS DE OPERACION

VII. COSTOS DE OPERACIÓN	
VII.1 ELECTRICIDAD	116
VII.2 ENFRILAMIENTO	116
VII.3 MEDIO	116
VII.4 RENDIMIENTO DE LA UNION O VENTANA	117
VII.5 MANTENIMIENTO	117
	118

VIII. SEGURIDAD

VIII SEGURIDAD	
VIII.1 RIESGOS ELECTRICOS	119
VIII 2 RIESGOS PARA EL OJO	119
VIII 3 EXPOSICION DE LA PIEL	120
VIII.4 RIESGOS QUÍMICOS	122
VIII 5 CAPACITACION, EXAMINACIÓN MÉDICA Y DOCUMENTACIÓN	122
	123

IX VENTAJAS DEL PROCESO DE SOLDADURA CON LASER

IX VENTAJAS DEL PROCESO DE SOLDADURA CON LASER	125
CONCLUSIONES	127
BIBLIOGRAFIA.	128

I. SOLDADURA CON ARCO ELECTRICO

La base de la soldadura por arco eléctrico es un arco eléctrico formado entre un electrodo y la pieza de trabajo o entre dos electrodos. El arco está constituido por una descarga eléctrica sostenida a través de una trayectoria de partículas ionizadas conocido como plasma. La temperatura puede ser superior a unos $16,665^{\circ}\text{C}$ ($30,000^{\circ}\text{F}$) en el interior es caso de unos $11,110^{\circ}\text{C}$ ($20,000^{\circ}\text{F}$) en la superficie del arco. Las aplicaciones se clasifican según el electrodo sea no consumible, para soldadura al arco de carbono o al arco de tungsteno, o consumible para soldadura al arco metálico.

El electrodo metálico usado para la soldadura de arco a metal se funde progresivamente por efecto del arco y éste se hace avanzar para mantener la longitud del arco. Los electrodos forrados suministran un escudo protector gaseoso y escoria que flota sobre la superficie de la fusión, como se ilustra en la figura 1. Otros métodos para la protección de la soldadura consiste en verter un fundente formador de escoria, o en inyectar un gas inerte alrededor del arco y del metal fundido, cuando se usa un electrodo sin recubrimiento. El metal original se funde bajo el efecto del arco y se agrega al estanque metal de relleno a medida que se funde el electrodo.

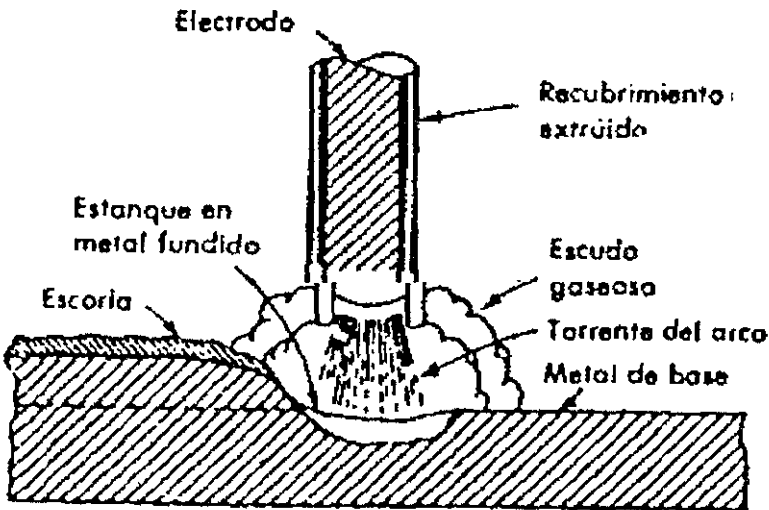


Fig 1 El electrodo protegido entre arco y metal, tormenta del arco y su escudo protector, metal depositado y escoria protectora.

1.1 LOS FACTORES PRINCIPALES DE LA SOLDADURA AL ARCO.

La tasa a que se suministra la energía queda expresada por IR^2 , con una corriente de I amperios y R ohmios de resistencia. La resistencia presente en una operación de soldadura al arco consiste en la de los electrodos, una fase entre cada electrodo y el arco, y la resistencia en la columna del arco. Cada una de estas resistencias es independiente de la otra y puede variar de manera diferente al modificarse de manera diferente la corriente, el voltaje, la protección impartida por el escudo y otras condiciones. La resistencia global aparente puede disminuir al aumentarse la corriente hasta unos 100 amperios pero adquiere, generalmente, un valor bastante constante para las corrientes de varios cientos, o más, de amperios que son las empleadas comúnmente para los trabajos de soldadura. La velocidad a que funde el metal depende de la energía suministrada y puede expresarse, en libras por minuto, de manera aproximada como:

$$M = k_1 I^2 \quad (1-1)$$

Los símbolos k_1 , son factores constantes en el caso presente, k_1 , toma en consideración, aquí, los valores medios correspondientes a la capacidad calorífica del metal, la resistencia y las pérdidas de calor.

La velocidad a que funde un metal determina el tamaño y la rapidez con que se asienta una soldadura como la que ilustramos en la ecuación 1-3. En tal caso es:

$$M = \delta AV \quad (1-2)$$

Siendo "A" el área de sección transversal de la perla expresada en pulgadas cuadradas, incluyendo al metal de relleno el metal original fundido y, V es la velocidad de

desplazamiento expresada en cm/min. (o ipm-pulgadas por minuto) del electrodo a lo largo de la soldadura y δ es la densidad expresada en lb/por pulgada cúbica.

La profundidad hasta la que se deposita y funde un metal se denomina la penetración P de un empalme. Determina el tamaño y, por tanto, la fuerza de la perla que mantiene unida a la pieza de trabajo. La cantidad de penetración depende del área de la sección transversal A de la perla, la corriente y el voltaje. Al aumentar la distancia h entre el electrodo y la soldadura aumenta el espacio abarcado por el arco y aumenta el ancho W de la perla. Resulta entonces que la penetración sea menor. El voltaje del arco, E, aumenta con la separación del electrodo, una relación media es $E = 20 + 30h$. Igualmente, cuando aumenta la corriente se hace más profunda la penetración a causa de la mayor intensidad del arco. Los resultados experimentales y analíticos indican un valor bastante exacto de

$$P = \sqrt[3]{k_2 \frac{IA}{E^2}} \quad (1-3)$$

Si combinamos las ecuaciones 1-1, 1-2 y 1-3, tenemos por resultado:

$$P = \sqrt[3]{\frac{K_3 I}{E^2 V}} \quad (1-4)$$

Los resultados experimentales exhibidos en la ecuación 1-3 demuestran que esta es una relación de los factores, basada en realidades, que afectan la profundidad de penetración y por lo tanto, la efectividad de una operación de soldar. Varios investigadores han demostrado que este criterio es aplicable a los materiales y operaciones comunes. La parte del lado derecho de la ecuación (1-4) se conoce como el factor de desempeño de la técnica de soldadura. Sus términos representan la corriente, voltaje y velocidad de avance, es posible variar estos factores muy fácilmente con el fin de regular una operación de soldadura.

Criterio seguido para conocer el desempeño de la soldadura con arco. La soldadura al arco se efectuará más eficazmente utilizando toda la corriente que permita el trabajo y el equipo. Como lo muestran las ecuaciones (1-1) y (1-3) significa una corriente más grande que el metal se funde más rápidamente, que la penetración es más profunda y que se necesita menos pasos en el trabajo. Todo esto resulta en un aumento en la velocidad de producción. Las limitaciones presentadas quedan impuestas por la pieza de trabajo, la capacidad del equipo para soldar y el electrodo.

Corriente Eléctrica Para Soldar. Si se hace uso de corriente continua (CC) para soldar con arco queda constituida la polaridad directa por una pieza de trabajo positiva (ánodo) y un electrodo negativo (cátodo). Los electrones fluyen de la terminal negativa a la terminal positiva de un arco. Habiendo una polaridad directa o recta golpean la pieza de trabajo a gran velocidad y el material se calienta más rápidamente que el electrodo. Este fenómeno es ventajoso al soldar por fusión piezas macizas, ya que sitúan el calor en donde se necesita. La polaridad inversa, con conexiones, opuestas a las de la polaridad directa, limita la corriente que puede enviarse a través de un electrodo.

Pero es de preferirse cuando van a soldarse secciones delgadas. También tiene la capacidad inherente de eliminar la película de óxido presente en la superficie de aluminio, magnesio, etcétera.

Un volumen importante de los trabajos de soldadura se realiza con corriente continua (directa), porque ésta puede hacer frente a todas las situaciones y trabajos, suministra ordinariamente un arco estable, la mayoría de los operarios conoce el manejo de esa corriente y es preferida para ejecutar trabajos difíciles como los de soldadura de abajo para arriba. Hay ocasiones en que un campo magnético deformado desvía un arco de corriente continua. Esto se conoce como soplo de arco y puede reducirse al mínimo usando corriente alterna (CA). Aunque no pueden ejecutarse todos los trabajos con corriente alterna, si es posible hacer cerca de 90% de éstos con ella, su aceptación va siendo mayor porque el equipo utilizado es más sencillo y sólo cuesta cerca del 60% del valor del hecho para trabajar con corriente directa.

I.2 ELECTRODOS PROTEGIDOS (RECUBIERTOS)

Prácticamente todos los electrodos de varilla utilizados manualmente son del tipo forrado pues tienen un recubrimiento extruido que cubre el alambre. El revestimiento puede contener ingredientes como SiO_2 , TiO_2 , FeO , MgO , Al_2O_3 y celulosa en varias proporciones. Se fabrican más de 100 formulaciones de recubrimiento para electrodos. Los ingredientes están destinados a desempeñar todas o un número de las funciones siguientes, en diversos grados, para satisfacer propósitos diferentes.

- 1.- Ayudar a estabilizar y dirigir el arco para obtener una penetración efectiva.
- 2.- Proveer un escudo gaseoso para evitar la contaminación atmosférica.
- 3.- Regular la tensión superficial en el estanque para influir sobre la configuración de la perla formada cuando se endurezca el metal.
- 4.- Actuar como recolectores para reducir los óxidos.
- 5.- Incorporar a la soldadura elementos aleantes.
- 6.- Formar una escoria que elimine las impurezas, proteja el metal caliente y disminuya la velocidad de enfriamiento.
- 7.- Aislar el electrodo eléctricamente.
- 8 - Disminuir al mínimo las salpicaduras de metal de soldadura.
- 9 - Formar plasma para conducir la corriente a través del arco.

Un tipo de electrodo tiene un recubrimiento grueso que contiene una cantidad importante de hierro en polvo. El recubrimiento forma una corteza alrededor del arco y contribuye a la concentración del mismo. El hierro en polvo añade una cantidad adicional de metal al material para soldar y aumentar la velocidad de la operación de soldadura.

I.3 SOLDADURA AUTOMÁTICA CON ARCO

Un electrodo de alambre desnudo se alimenta continuamente a través de unos rodillos movidos a motor cuando el equipo es semi o enteramente automático. Ordinariamente se emplea alambre macizo pero en algunos casos puede estar hueco y lleno de fundente en el centro para obtener los beneficios derivados de los electrodos recubiertos. El metal fundido queda rodeado por gas o fundente en uno de los sistemas de protección que se describirán posteriormente. Una pistola o soplete semiautomático se mueve a mano a lo largo de la soldadura. En una máquina de soldar con arco automática, se hace avanzar mecánicamente la cabeza de soldar o, si no, la mesa de trabajo.

En las industrias de alto volumen de producción son comunes las máquinas de soldar destinadas a propósitos especiales. Un ejemplo de éstas es una máquina enteramente automática para producir miembros transversales de bastidor de sección caja para la construcción de automóviles, usando material de 3.175 mm. hasta 2.38mm (1/8" hasta 3/32"). Un operario coloca dos mitades de una sección en la primera estación en donde se oprimen una contra la otra y afianzan aplicando puntos por soldadura de resistencia. Una viga viajera transfiere la sección a la estación de soldar en donde unas mordazas automáticas cuadran las bridas, aseguran el ajuste y la colocan en posición. Cuatro cabezas de soldadura, alimentando alambre de 1.985mm (5/64") de diámetro, y guiadas a lo largo de los perfiles curvos, completan soldaduras de 1.9m (80 pulgadas) en menos de ocho segundos.

El costo de los equipos va desde menos de 2,000 dólares para los modelos semiautomáticos pequeños hasta decenas de miles de dólares para las máquinas enteramente automáticas destinadas a la producción pesada.

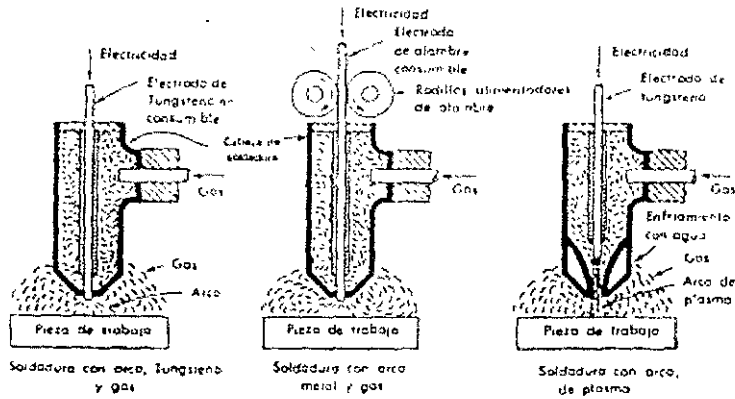


Fig. 1-5 Tipos de soldadura con arco, protegidos con escudo gaseoso.

I.4 SOLDADURA CON ARCO CON PROTECCION GASEOSA

El arco y el estanque metálico pueden quedar protegidos por la acción de una envoltura aportada por un gas inerte o semi-inerte. Este gas puede estar contenido en una cámara cerrada en la que se efectúa la operación de soldadura pero comúnmente se inyecta el gas en el espacio abierto que rodea al punto en donde se lleva a cabo la soldadura. Uno de los diversos procesos a ésta clase es la operación de soldadura con gas, tungsteno y arco, GTA., conocido también como soldadura Tig que significa soldadura con arco, tungsteno y cubierta protectora de gas inerte, ilustrado en la figura 1-5. Este método utiliza un electrodo de aleación de tungsteno que no se deteriora apreciablemente en una atmósfera de gas inerte. El metal de relleno se introduce por medio de una varilla o alambre separada a medida que se necesita. Para formar el escudo protector se utilizan helio y argón solos, juntos, o mezclados con algún otro gas. Este procedimiento es costoso pero con él se obtienen trabajos de soldadura limpios y confiables, y es importante en construcciones aeroespaciales y otras aplicaciones críticas, principalmente de metales no ferrosos. No hay necesidad de que una sustancia extraña entre en contacto con la soldadura. Puede iniciarse el arco con una descarga de alta frecuencia y alto voltaje para evitar hasta que el electrodo toque la pieza de trabajo.

1.5 LA SOLDADURA CON ARCO EN MEDIO DE HIDROGENO ATOMICO

Es parecida a la soldadura de tungsteno con arco en medio gaseoso pero se lleva a cabo en un arco desplegado entre dos electrodos de tungsteno en una corriente de hidrógeno gaseoso. El hidrógeno protege el trabajo contra la atmósfera. Las moléculas de hidrógeno se separan quedando en forma atómica en el calor del arco y el gas transfiere el calor más rápidamente en este estado. Además, los átomos vuelven a combinarse al quedar alejados del arco y desprenden calor en la pieza de trabajo. De esta manera se generan temperaturas altas que facilitan la soldadura. Una varilla separada suministra el metal de relleno a medida que se necesita éste. El proceso descrito forma soldaduras excepcionalmente limpias pero es costoso y no se utiliza frecuentemente excepto en casos de soldaduras profundas, como para bloques de dados, y para aleaciones de alta temperatura, especialmente para acabados superficiales.

1.6 LA SOLDADURA CON ARCO O METAL

Con protección gaseosa, conocida como GMA (gas-metal-arc) o Mig (metal inter-gas-shielded arc welding) o soldadura con escudo de gas inerte, se efectúa usando un alambre que se alimenta a través de una cabeza de soldar que actúa como electrodo y suministro de metal de relleno, como se describe en la figura 1-5. Los gases inertes se aplican en la realización de trabajos delicados pero el dióxido de carbono, que es más económico se emplea ampliamente para una gran diversidad de operaciones de producción. El bióxido de carbono no mantiene bien el arco. Un remedio contra este defecto consiste en mantener un arco corto con dispositivos para limitar automáticamente la corriente durante periodos de corto circuito frecuentes. También tenemos el hecho que el bióxido de carbono se disocia formando monóxido de carbono y oxígeno haciéndose necesario añadir antioxidantes para proteger la soldadura. Una de las formas de proceso utiliza alambre con núcleo de fundente que contiene estabilizantes para el arco y desoxidantes. Otra variante del proceso se conoce como soldadura con microalambre y alimenta alambres muy delgados, hasta de 0.762 mm (0.030 pulgada) de diámetro, efectuando la alimentación a alta velocidad. Con densidades de corriente altas, hasta 150,000 amp/pulgada cuadrada (1 pulgada cuadrada equivale a 6,452 cm²) se precalienta el alambre de manera satisfactoria y la corriente se concentra en Soldadura con rayo laser como un proceso alternativo

la soldadura. La soldadura GMA es rápida y versátil, se ha descubierto que es aplicable para operaciones de soldadura semiautomática, en cualquier posición.

1.7 LA SOLDADURA DE BOTON, O DE PUNTOS CON ARCO

Se efectúa con arco a metal, en medio gaseoso, aplicando un punto en cada etapa de soldadura. Una forma de la operación de este tipo está programada para atravesar, quemando, una o más capas, hasta de 9,525 mm de espesor (3/8") y detenerse luego dejando un tapón de metal fundido que pasa a través de las láminas, dejando en la superficie un botón de metal excedente. La principal ventaja que reporta este método estriba en que puede hacerse toda la operación desde un lado, sin aplicar presión alta. Una manera para perforar el metal consiste en quemar a través de una pieza utilizando para ello un electrodo protegido y expulsar el metal fundido por medio de un chorro de aire o gas. Un proceso empleado en la producción en cantidades grandes utiliza una hilera de electrodos situados a lo largo de una unión recta o curva. Los electrodos se disparan en sucesión rápida y se produce una serie de puntos de soldadura sobrelapados. Se reporta que algunas juntas se forman más rápidamente por este sistema que cuando se usan electrodos de avance. Este método de soldar se conoce como soldadura **PIGME** que son las siglas de soldadura con electrodos múltiples, con gas inerte, programada.

1.8 SOLDADURA CON ARCO Y PLASMA

Se conoce por plasma un gas ionizado a alta temperatura y ocurre en cualquier arco eléctrico. Si se hacen fluir a través de una restricción un chorro de gas inyectado y el arco, siendo esa restricción (por ejemplo un orificio de cobre enfriado por agua, como vemos en la figura 1-5), se incrementan marcadamente la densidad de corriente del arco y también la velocidad del gas. De esta manera se aumentan mucho el grado de ionización y la temperatura de gas. Las partículas excitadas ceden grandes cantidades de energía cuando vuelven a constituirse en átomos, algunas de ellas en la superficie de la pieza de trabajo. Se ha reportado que la temperatura ha llegado a ser superior a 16,665°C (30,000°F.). Cuando se trabaja sobre material delgado es suficiente la fuerza del chorro para abrir un agujero que se llena de metal fundido a medida que se desplaza el arco. La penetración es profunda y

completa y puede ejecutarse una cantidad de trabajo grande sin el auxilio de metal de relleno.

Es posible fundir y aun vaporizar cualquier material conocido utilizando el proceso de arco y plasma quedando así al alcance de las operaciones de soldadura. El resultado es un trabajo limpio, se reporta que este proceso es de dos a cinco veces más rápido que el proceso de soldadura Tig siendo el costo del equipo más o menos igual (aproximadamente 5,000 dólares por unidad). La soldadura con arco y plasma exige un control automático y no es práctica para usarse en trabajos de soldadura cortos.

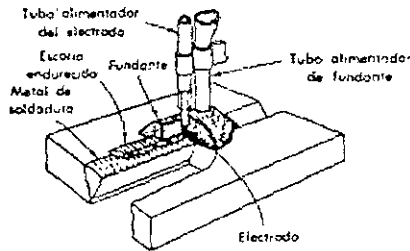


Fig. 1-6 Vista de corte seccional de una soldadura con arco sumergido.

1.9 SOLDADURA CON ARCO SUMERGIDO

En la soldadura con arco sumergido se deja caer fundente granular sobre el área de soldadura por delante del arco en movimiento. El electrodo es un alambre desnudo que se alimenta automáticamente a la cubierta de material fundente. El fundente se licúa alrededor del arco, protege a éste y a la soldadura y se deposita como escoria encima de la soldadura cuando endurece. El efecto descrito se muestra en la figura 1-6. El fundente puede ser de carácter neutro o contener elementos aleantes para enriquecer la soldadura. La protección permite que se obtenga una soldadura de buena calidad y elimina salpicaduras del arco. El fundente sobrante puede devolverse al depósito para volver a utilizarlo en otra ocasión. La escoria puede desprenderse fácilmente con algún instrumento.

El método de arco sumergido se usa para trabajos de soldadura automáticos o semiautomáticos principalmente de acero y se obtienen con él grandes velocidades de deposición de metal. Existe la posibilidad que el operario no puede ver el arco y tropiece

con dificultades para seguir el desarrollo de la unión, pero no necesita un protector de ojos.

El método funciona con corriente alterna o continua.

Existen otras maneras para aplicar el fundente a la soldadura. La soldadura con fundente magnético utiliza un fundente que es atraído magnéticamente hacia el electrodo de alambre, cubriéndolo, mientras el electrodo porta una corriente densa. Las soldaduras con arco o metal, con cinta impregnada, se efectúan con una máquina que enrolla una cinta fundente alrededor del electrodo a medida que éste avanza hacia el arco. La soldadura con electrodo de alambre con núcleo de fundente, sin gas, también encuentra algunas aplicaciones.

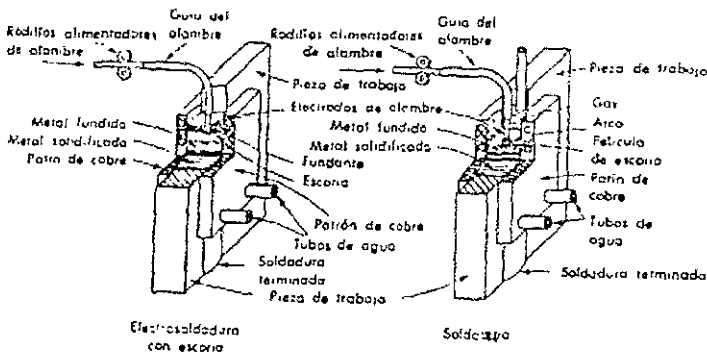


Fig. 1-7 Dos formas de Soldadura Vertical.

I.10 SOLDADURA VERTICAL

La soldadura de electroescoria, ilustrada en la figura 1-7 es una forma de la soldadura vertical utilizada especialmente para unir piezas de más de 3.81cm (1 1/2") de espesor para la fabricación de flechas para turbinas, partes para calderas y prensas pesadas. La operación de soldadura se principia en un bloque de iniciación situado en el fondo de la unión colocada verticalmente. El fundente, se convierte en escoria que flota sobre una capa de metal fundido confinado en la unión por zapatas de cobre refrigeradas con agua que se deslizan a los lados. No es visible ningún arco y se dice que una parte importante del calor proviene de la resistencia eléctrica de la escoria. Las cortinas y la cabeza de soldadura se mueven hacia arriba a medida que se solidifica el metal de soldadura y los electrodos de alambre introducen nuevas cantidades de metal. El alambre oscila, por la acción de un

mecanismo apropiado, desplazándose sobre la junta para distribuir la soldadura uniformemente siendo posible introducir dos o tres alambres a la vez cuando una junta es ancha.

I.11 LA SOLDADURA ELECTROGASEOSA

Que ilustramos en la figura 1-7, es apropiada para soldar en una pasada uniones de 12.7 mm (1/2") hasta 38.1mm (1 1/2") de espesor. El electrodo de alambre consumible puede ser macizo o tener núcleo de fundente, pero la mayor parte de la protección, o toda ella, es impartida por medio de una mezcla gaseosa de argón y bióxido de carbono que se inyecta en el claro. El calor se introduce por medio de un arco eléctrico que se descarga entre el electrodo y el estanque metálico. La cabeza y las cortinas se mueven hacia arriba a medida que progresa la operación.

La operación de soldadura vertical es la más natural y fácil para muchas aplicaciones. Es económica para soldar secciones en una sola pasada que exigen de otra manera varias pasadas. La preparación es fácil en el caso de la soldadura vertical porque para la soldadura con arco convencional se necesita hacer preparativos de biselés y ajustes precisos, operaciones que se eliminan en la soldadura vertical. El calentamiento y el enfriamiento son inherentemente lentos de manera que no existe la necesidad de efectuar un calentamiento preliminar ni de un enfriamiento regulado. La zona afectada por el calor es grande, sin embargo, y después de la operación de soldadura vertical es descable ordinariamente aplicar un calentamiento térmico con el fin de obtener propiedades de fatiga aceptables.

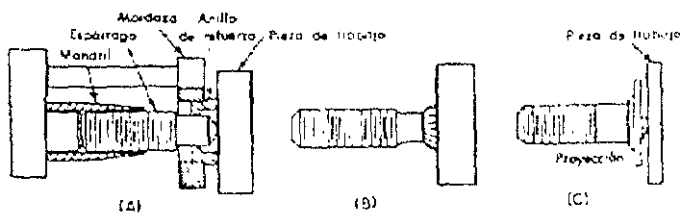


Fig. 1-8 Procedimiento para soldadura de espárragos. A) Arreglo para soldadura con arco de espárragos. B) Un espárrago soldado con arco. C) Un espárrago para soldadura con descarga de capacitor.

I.12 SOLDADURA DE ESPARRAGO

El proceso de soldadura de espárrago con arco utiliza una pistola que controla automáticamente un arco eléctrico y fija un espárrago en su sitio. Se muestra en la figura 1-8A el esquema de la distribución original. Se prende una corriente y el espárrago se aleja de la pieza de trabajo para iniciar un arco dentro del anillo de refuerzo hecho de material cerámico.

Al cabo de un tiempo determinado previamente se corta la corriente y se empuja el espárrago contra el estanque de metal fundido. Después de haberse solidificado el metal se retira el equipo para dejar el espárrago soldado a la pieza de trabajo como vemos en la figura 1-8B. Una variante del proceso que es especialmente apropiada para unir espárragos a láminas delgadas en la solución por descarga de capacitor. Para efectuar esta operación se hace un espárrago provisto de una punta delgada en el extremo que se oprime contra la pieza de trabajo, como se ilustra en la figura (1-8C). Una descarga de corriente densa funde la protección y establecer un arco en el espacio libre. A continuación se oprime el espárrago contra la pieza de trabajo para terminar la soldadura.

I.13 COMPARACION ENTRE LOS PROCESOS DE SOLDADURA CON ARCO

La soldadura manual con arco protegido es muy versátil y su costo inicial es bajo. Para hacer ensamblajes de una pieza de una clase por vez en trabajos variados, probablemente el proceso más rápido y eficaz es el electrodo cubierto en manos de un soldador hábil. Sin embargo, sabemos que el trabajo manual es inherentemente lento para efectuar trabajos de repetición, es necesario descartar los extremos cortos de las varillas y existe un límite humano definido para la velocidad con que se puede depositar el metal. Las máquinas semiautomáticas que mecanizan algunas partes de la operación de soldadura cuestan cerca de cuatro veces más que el equipo para soldadura con varilla y arco protegido. En cambio, con este equipo puede un operario controlar más fácilmente el metal fundido y el arco, puede hacer uso de una mayor cantidad de corriente y puede depositar el metal más uniforme y continuamente. Está en condiciones de soldar de dos a diez veces más rápidamente que un operario que solo disponga de un electrodo recubierto

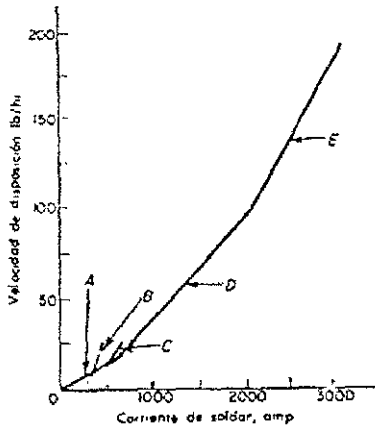


Fig. 1-9 Desempeño medio obtenido con varios procesos de soldadura con arco A) Soldadura manual con arco protegido, con electrodo de 4 762mm (3/16"). B) Soldadura semiautomática con arco a metal gaseosa C) Soldadura semiautomática con arco sumergido. D) Soldadura enteramente automática con arco sumergido. E) Soldadura enteramente automática con arco sumergido, con electrodos múltiples

En la figura 1-9 se traza una comparación entre las tasas de desempeño reportadas para varios procesos de soldadura con arco. El resultado registrado podrá ser algo diferente en otros talleres, para diferentes clases de trabajo. La soldadura semiautomática, con arco a metal, gaseosa, es vista globalmente, muchas veces más rápida que la soldadura con arco sumergido, principalmente cuando el trabajo es variado, porque el operario puede seguir visualmente el trabajo de soldadura efectuado, no queda ninguna escoria que eliminar despostillándola, ni fundente que limpiar. La soldadura con arco sumergido ofrece cierta ventaja al no tener pérdidas por salpicaduras mientras la pérdida de metal puede ser hasta de 10% en el caso de la soldadura con arco a metal, gaseosas. Cuando la operación es enteramente automática, con regulación continua completa, la soldadura con arco sumergido ofrece los medios para utilizar corrientes densas para depositar metales a las velocidades más altas, especialmente con electrodos de cinta, múltiples con técnicas de soldadura vertical.

Factor de costo	Tipo de Operación			
	Arco a metal Convencional Con electrodo Recubierto	Arco a metal con electrodo de polvo metálico	Arco manual sumergido	manual protegida con CO ₂
Diámetro del electrodo (pulg.)	3/16	5/32	5/64	1/64
Velocidad de desplaza- miento (pulg./ min)	10	15	30	30
Ciclo de servicio (%)	30	35	45	60
Costo de electrodos (\$/lb)	0.14	0.185	0.135	0.26
Eficiencia de la deposi- ción (%)	68	70	100	92
Corriente de soldadura (amp)	175	200	350	350
Potencial de arco nominal (v)	30	30	35	32
Costo unitario de la soldadura (\$/ por pie)	0.526	0.317	0.144	0.118

Tabla 1-10 Costos de soldadura unitarios relativos correspondientes a varios procedimientos manuales

En la tabla 1-10, se indican los costos relativos para la realización de un trabajo determinado siguiendo varios métodos en uso común. Comunes para todos los procesos son el costo de mano de obra de 2.50 dólares por hora, gastos generales de 5 dólares por hora, la cantidad de soldadura depositada de 0.106 lb. por pie lineal de trabajo de soldadura, el costo de energía equivalente a 0.02/kwhr, y la eficiencia de la fuente de poder que es de 50%. Para el proceso con arco sumergido se utiliza el fundente a razón de 1.5 lb de fundente por libra de metal (una libra es aproximadamente 0.454 kg) siendo el costo del fundente de 0.095 dólar la libra. En el caso del proceso con CO₂ gaseoso tenemos un flujo gaseoso de 84.948 libra (30 pies cúbicos) por hora y el costo del gas es de 0.01 dólar por pie cúbico.

El ciclo de servicio representa, en la Tabla 1-10, el tiempo de funcionamiento del arco, expresado en porcentaje, del tiempo de operación total. Distinto al tiempo de funcionamiento del arco, o tiempo de soldadura activa, son los periodos que se ocupan en cambiar electrodos, eliminar la escoria, manejar el fundente, hacer ajustes, etcétera. El procedimiento de soldadura manual protegido con gas carbónico registra el menor tiempo perdido porque en este no es necesario manejar escorias ni fundentes. La eficiencia de deposición es el porcentaje del metal utilizable que se deposita en el sitio de soldadura, con respecto al peso total del electrodo utilizado. Una parte de la pérdida proviene de los extremos no utilizables de los electrodos de varilla.

La Tabla 1-10 es válida para una situación en particular y se presenta para demostrar los costos comparativos. En otras circunstancias bien podría ser que los datos demostrasen que el proceso de arco a metal convencional, con electrodo recubierto, o el que utiliza un electrodo de polvo de hierro fuesen los métodos más económicos. Un caso de esta índole podría suceder en un taller en donde resultasen excesivamente altos los costos para adaptar los métodos semiautomáticos a la producción de una gran diversidad de trabajos. Otro caso como el citado podría encontrarse en la soldadura del marco de sostenimiento de una estructura alta en la que fuese demasiado difícil, si no imposible, manejar el equipo semiautomático.

I.14 SOLDADURA CON RAYO ENERGETICO

Soldadura con haz de electrones. Es posible introducir energía para soldar y cortar dirigiendo un haz de electrones concentrados para bombardear la pieza de trabajo de la manera descrita en la figura 1-11. El haz se forma en un ambiente al alto vacío. Si el trabajo se realiza en un vacío cercano a 0.1 micra (μ) no existe necesidad para que lo contaminen electrodos, gases o metal de relleno y pueden hacerse soldaduras puras. La soldadura con haz electrónico puede desempeñar los mismos trabajos que la soldadura Tig y la plasma y arco, en algunos aspectos resulta hasta mejor. El haz energético puede concentrarse fuertemente (hasta 50 veces más que el caso de la soldadura con arco y plasma) para soldar metales ferrosos y no ferrosos, refractarios, desiguales, y aún metales reactivos. Las soldaduras pueden confinarse a sitios poco profundos o prolongarse hasta

una profundidad de unos 15.24 cm. (6 pulgadas), con una relación de profundidad a anchura hasta de 25 a 1 (en comparación con la relación de uno a uno que se obtiene con otras técnicas de fusión). Esto significa que es posible confinar la licuación del metal a límites bastante angostos, y efectuarse tan velozmente que la zona afectada por el calor es pequeña. Las tasas de desplazamiento de la aplicación de soldadura pueden ser elevadas, el tamaño del grano permanece pequeño y las soldaduras son, esencialmente de lados rectos.

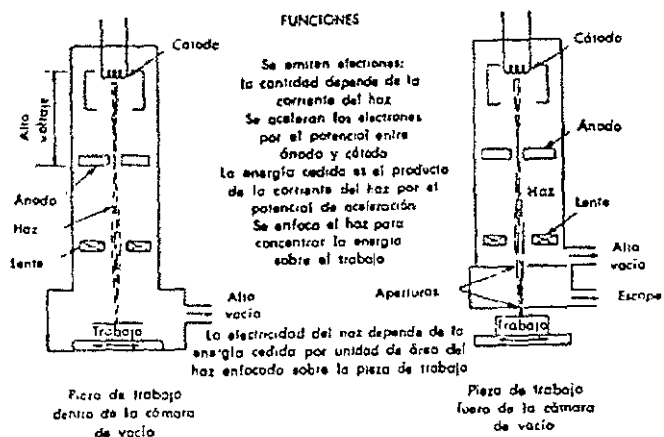


Fig. 1-11 Diagrama esquemático de una operación de soldadura con haz electrónico

Si la soldadura se efectúa en una cámara de alto vacío es probable que se pierda un tiempo muy considerable si existe la necesidad de evacuar las cámaras al introducir cada pieza nueva (desde 5 minutos en el caso de cámaras pequeñas hasta 20 minutos, más o menos, en las cámaras grandes). Se han utilizado cierres y sellos de aire para deslizar una pieza después de la otra hasta su posición, o para pasar piezas largas a través de una cámara. Otra solución consiste en pasar el haz a través de dos o más cámaras efectuándose la soldadura en un vacío intermedio (de 50 a 500 μ) o aún expuesta a la atmósfera como se ilustra en la figura 1-11. Puede reducirse el tiempo de operación total a unos segundos pero entonces se

pierden algunas de las ventajas propias del proceso. Un haz de electrones se dispersa en un medio gaseoso en proporción a la densidad del medio; se necesitan unas tres veces más de energía para obtener una penetración determinada después de haber pasado un haz electrónico a través de una capa de 9,525 mm (3/8") de un gas a presión atmosférica, que cuando atraviesa un espacio al alto vacío. La soldadura se ancha y ocurre cierto grado de contaminación aun en presencia de una cantidad moderada de gas.

La soldadura mediante un haz electrónico puede justificarse cuando ésta puede producir resultados que no pueden obtenerse por otros medios, y en algunos casos económica porque es más rápida. De todos modos, es necesario que la ventaja sea suficientemente grande para absorber el costo inicial más alto. Un tipo de este sistema es relativamente sencillo y funciona menos de 60 Kv., un modelo con capacidad nominal para suministrar 2 Kv. a 20 Kv. cuesta alrededor de 25,000 dólares.

I.15 SOLDADURA A RESISTENCIA

PRINCIPIOS. La soldadura a resistencia se lleva a cabo pasando una corriente eléctrica a través de dos piezas de metal unidas a presión. Las piezas coalescen en las superficies de contacto porque en esos sitios están concentrados más resistencia y calor. El calor queda localizado en donde se necesita, la acción es rápida. No se necesita usar metal de relleno, la operación exige poca experiencia por parte del operario y es fácil automatizarla, haciendo que estas ventajas hagan del procedimiento un método apropiado para la producción en grandes cantidades. Todos los metales comunes y dísímbolos pueden soldarse a resistencia aunque es necesario tomar precauciones especiales al trabajar algunos de estos. Normalmente no se perjudica ni pierde nada del metal original. Es posible procesar muchas formas y secciones de configuración difícil.

La desventaja principal de la soldadura a resistencia se encuentra en el alto costo del equipo. Tiene que estar disponible mucho trabajo para que se justifique la inversión. Algunos trabajos exigen equipo especial, como aditamentos, que gravan la inversión apreciablemente. Para instalar y mantener el aparato en buenas condiciones de operación se necesita mucha experiencia.

La soldadura a resistencia se efectúa, ordinariamente, con corriente alterna procedente de la línea y reducida a través de un transformador y aplicada durante un tiempo controlado por un dispositivo regulador del tiempo. En la figura 1-12 se ilustra un circuito típico. El calor generado en un circuito es $H=I^2RTK$, siendo I la corriente expresada en amperios, R la resistencia en ohmios, T el tiempo de duración del flujo de la corriente, en segundos, y K un factor de conversión de kw a la unidad calorífica en que se desee obtener el resultado.

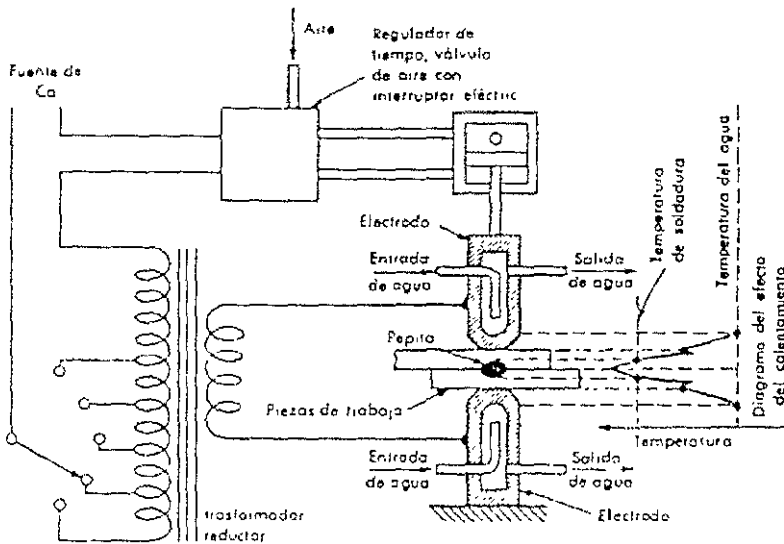


Fig. 1-12 Ilustración de los principios que rigen la soldadura a resistencia.

Los electrodos que conducen la electricidad hacia el trabajo también se ocupan para oprimir las piezas entre sí. La corriente se encuentra ante una resistencia en el metal pero más marcadamente en las superficies de contacto. Se genera más calor en los sitios en donde es mayor la resistencia. Por lo tanto, se trata de introducir el máximo de resistencia y calor en las superficies de contacto entre las piezas de trabajo para hacer una soldadura que ofrezca seguridad, sin dañar los electrodos. Estando sometidos a presión, no siempre es necesario

que los metales se fundan para obtener la coalescencia de los mismos. El diagrama ilustrado en la figura 1-12 indica la distribución térmica que ocurre en una operación satisfactoria.

En el exterior de la zona que tiene que soldarse deberá permanecer baja la temperatura con el fin de conservar los electrodos en buen estado. Esto se efectúa eliminando el mayor calor posible y generando tan poco como se pueda en donde no se necesite. Los electrodos están enfriados sin agua normalmente para eliminar calor. El calor generado en cualquier punto es proporcional a la resistencia. Los electrodos están hechos de cobre para que conduzcan bien la electricidad y el calor pero están aleados y chapeados con otros elementos para que su resistencia y durabilidad sean buenas. Las superficies limpias y lisas de las piezas de trabajo favorecen la baja resistencia y ayudan a la conservación de los electrodos.

I.16 LA SOLDADURA A RESISTENCIA DE ALTA FRECUENCIA

Se lleva a cabo con una corriente de 400 a 450 kc suministrada ordinariamente por un oscilador. La corriente de alta frecuencia irrumpe fácilmente a través de los obstáculos presentados por películas de óxidos y produce una zona delgada afectada térmicamente porque viaja sobre la superficie del material. Este sistema de soldadura es aplicable a la unión de metales con 0.01016 cm (0.004") hasta 19,050 mm (3/4") de espesor para fabricar perfiles estructurales, tubos o ductos, a velocidades hasta de unos 305 metros por minuto (1,000 pies por minuto). Una unidad de 60 kw vale 50,000 dólares pero el alto costo se justifica si hay manera de sacar provecho de la alta velocidad de producción que es posible obtener con ese equipo.

Los principios que se han descrito se aplican en diferentes procesos para satisfacer diversos propósitos. Estos son: la soldadura por puntos, proyección, costura, soldadura a recalado, a tope, con destello y a percusión.

Se describirán a continuación las características de cada uno de estos procedimientos para soldar.

I.16.1 EQUIPOS PARA SOLDADURA A RESISTENCIA

No existe ninguna máquina universal para toda clase de soldaduras a resistencia, pero hay varias características básicas que sí son comunes a las diversas formas de equipo. Comunes a todas las máquinas son una fuente de poder, un sistema de reguladores, una impulsión mecánica y una estructura.

I.16.2 MAQUINAS PARA SOLDAR CON PUNTOS

Las máquinas de soldar con puntos pueden clasificarse como máquinas estándar, máquinas de electrodos múltiples especiales y máquinas de soldar portátiles.

Una máquina de soldar con puntos estándar, como la que vemos en la figura 1-13, tiene un cuerno o brazo superior y uno inferior que portan los electrodos y que sobresalen de un bastidor vertical. Dos tipos adicionales son las máquinas de soldar con puntos de brazos oscilantes y las máquinas con puntos tipo prensa, o máquinas de soldar de proyección. El cuerno superior situado en el modelo provisto de brazo oscilantes está pivoteado en el bastidor y se inclina hacia arriba para abrir el espacio de separación y hacia abajo para aproximar los electrodos. El tipo prensa tiene un mazo en el extremo final del cuerno superior que sirve para mover el electrodo verticalmente arriba y abajo. Las diversas clases de fuentes de poder, circuitos eléctricos, controles e impulsiones mecánicas que se han descrito en general, en el caso de las máquinas de soldar por resistencia, se encuentran también en las máquinas de soldadura con puntos.

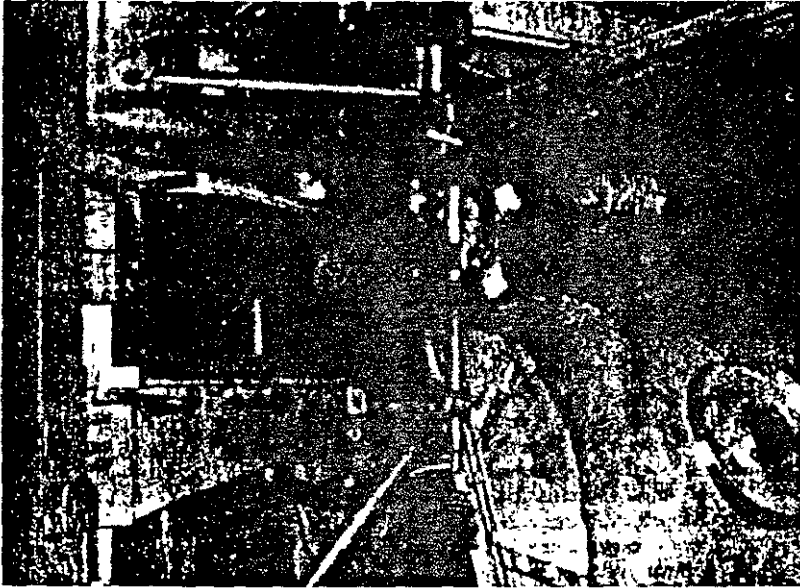


Fig 1-13 Vista de una máquina de soldar con puntos de operación.

I.17 SOLDADURA DE PROYECCIONES

La soldadura de proyecciones se realiza de la misma manera que la soldadura por puntos pero la corriente se concentra en los puntos que han de soldarse por medio de proyecciones preformadas en el trabajo, como se indica en la figura 1-14. Los electrodos son relativamente grandes y quedan sometidos a una densidad de corriente baja de manera que resisten bien el trabajo. El procedimiento es rápido porque es posible soldar un número de puntos en una sola operación de cierre de la prensa.

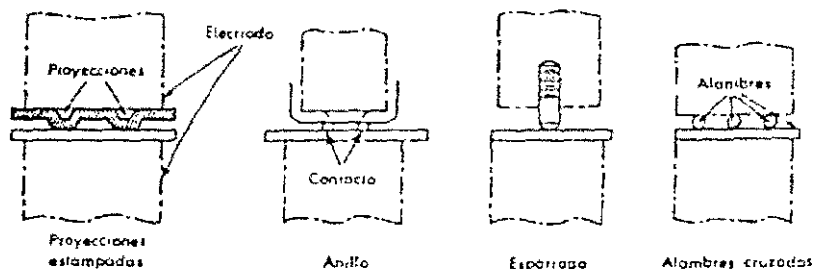


Fig. 1-14 Tipo de soldadura de proyección.

Las proyecciones para soldar pueden hacerse en metal desplegado o en piezas coladas, forjadas o maquinadas. Una variante del proceso se conoce como soldadura de espárragos. En uno de los electrodos se sostiene un espárrago con extremos redondeados y se oprime contra su parte contraria coincidente mientras fluye la corriente para calentar la soldadura. El efecto de la soldadura de proyección se obtiene con alambres cruzados, como se podrían unir soldando para formar una parrilla. Un metal debe tener suficiente resistencia en caliente para que se le pueda soldar satisfactoriamente. Por esta razón se suelda el aluminio en pocas ocasiones por este procedimiento, y el cobre y algunos latones, nunca. Los aceros de corte libre con alto contenido de fósforo y azufre no debe soldarse con proyecciones porque las uniones soldadas quedan porosas y quebradizas. La mayoría de los otros aceros se sueldan fácilmente por este método. Las proyecciones deben estar situadas en la más pesada de dos piezas coincidentes, de manera que no se quemen antes de haberse completado la operación.

Pueden usarse las máquinas para soldar con puntos para las soldaduras con proyecciones si se instalan los electrodos apropiados. Las máquinas hechas específicamente para la soldadura con proyecciones son como las máquinas para soldadura con puntos de tipo prensa y están construidas rigidamente para mantener alineadas las partes durante la operación. La soldadura mediante proyección consume ordinariamente más corriente en periodos más breves más presión que la soldadura con puntos.

I.18 SOLDADURA DE COSTURA

Una soldadura de costura está formada por una serie de soldaduras de punto que se sobrelapan o quedan espaciadas a intervalos cortos. Esta última se denomina soldadura de puntos o rodillo o soldadura con puntadas. La soldadura con costuras se realiza pasando el trabajo entre electrodos en forma de rodillos giratorios, como se ilustra en la fig. 1-15. Se aplica un refrigerante para conservar los electrodos y enfriar el trabajo rápidamente para acelerar la operación. Los rodillos giran ordinariamente sin parar a lo largo de una costura y se interrumpe la corriente. En otro método se aplica una corriente estable combinada con un movimiento intermitente de los rodillos, o con rodillos amuecados. Las superficies que han de soldarse con costura tienen que estar perfectamente limpias, desincrustadas y desoxidadas para que se obtengan resultados satisfactorios. Un método preferido para la preparación de las superficies consiste en un baño desoxidante ácido.

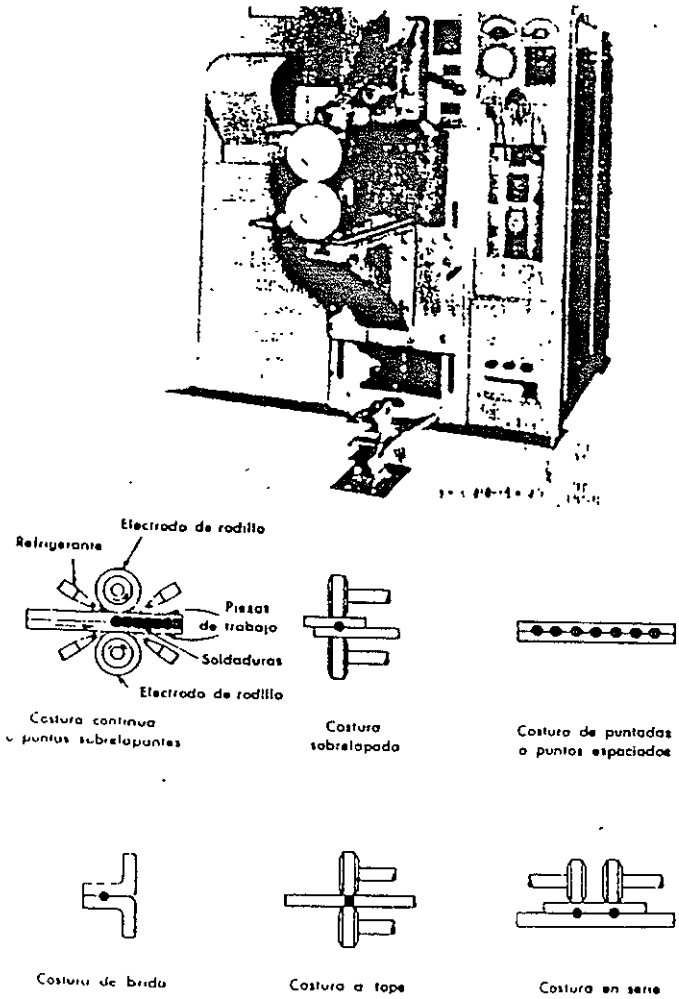


Fig 1-15 Una soldadura de costura y esquemas descriptivos de tipos comunes de costuras soldadas

Tanto las uniones sobrelapadas como las de extremo contra extremo pueden soldarse sin costura. Las costuras continuas son estancas a los gases y los líquidos. La operación de soldadura con costuras se efectúa sobre láminas y placas metálicas de 0.0762 mm (0.003 pulgada) hasta 4.7498 mm (0.187 pulgada) de espesor utilizando equipo estándar, y hasta de 9.525 mm (3/8") de espesor con máquinas de construcción especial. La soldadura con

costuras se efectúa principalmente en aceros con bajo contenido de carbono, de aleación e inoxidable, pero también con muchos otros metales entre los que se incluye el aluminio, latón, titanio y tantalio. Entre los productos obtenidos por la soldadura con costuras están los silenciadores, barriles y tanques de almacenamiento. Las especificaciones para conocer las proporciones y diseños correctos para diversas aplicaciones y materiales están tabulados en los manuales del ramo. Una costura bien hecha es más fuerte que el metal original.

En una máquina para soldadura con costuras pueden hacerse soldaduras planas (horizontales) o trabajo circular, o ambos. Las máquinas de soldar con costura constan de casi los mismos elementos que las de soldadura con puntos y también se clasifican como tipos de brazo oscilante y prensa. Además, es necesario que una máquina para soldadura con costuras tenga un motor para hacer girar los rodillos y pueda proveer corrientes densas y desarrollar gran esfuerzo. La corriente tiene que ser fuerte porque una buena parte de ésta se pierde a través de los puntos cerca de la soldadura que se esté haciendo en el instante. Un ciclo de servicio ordinario para una máquina de soldadura con costuras puede ser hasta de 80% mientras que este ciclo apenas equivale al 10% en una máquina de puntos, y raramente sobrepasa ese valor. Una presión recomendada para trabajar el acero con bajo contenido de carbono es de $1,054.5 \text{ kg/cm}^2$ (15,000 psi). Es necesario que la construcción de la máquina sea fuerte para resistir a las fuerzas tan intensas. Se necesitan controles de buena calidad para la distribución de tiempos precisos.

1.19 SOLDADURA A TOPE CON RECALCADO

La soldadura a tope con recalado consiste en la opresión entre sí de dos piezas metálicas uniendo un extremo con el otro, y pasando una corriente entre ellas. La densidad de corriente varía de 2,000 a 5,000 amperios por pulgada cuadrada. La resistencia de las superficies contiguas con poca presión calienta la unión. A continuación se aumenta la presión. Esto ayuda a que se una estrechamente el metal de las dos partes y obliga a que algo del metal forme rebaba o se recalque como se ilustra en la figura 1-16A. Puede interrumpirse la corriente una o más veces cuando se trata de superficies grandes. Las presiones finales fluctúan entre 175.75 kg/cm^2 (2,500 psi) a 562.4 kg/cm^2 (8,000 psi)

dependiendo del material. La presión demasiado baja deja una unión porosa y poco fuerte, una presión excesiva expulsa un exceso de metal plastificado formando una unión con baja resistencia al impacto.

El metal no se funde cuando se suelda a tope con recalado y no hay salpicadura. El recalado es terso, simétrico y uniforme, sin rasgaduras pero, por lo común, es necesario maquinar los extremos de las piezas antes de soldarlas.

Es posible soldar con recalado la mayoría de los metales. Entre las aplicaciones comunes de esta técnica se encuentra el empalmado de alambres y barras en posición de frente contra frente, la soldadura de una proyección para unirla a alguna pieza y la unión de los extremos de un rizo para hacer un rin de rueda. Es posible soldar con recalado a los tubos de la manera ilustrada en la figura 1-8c

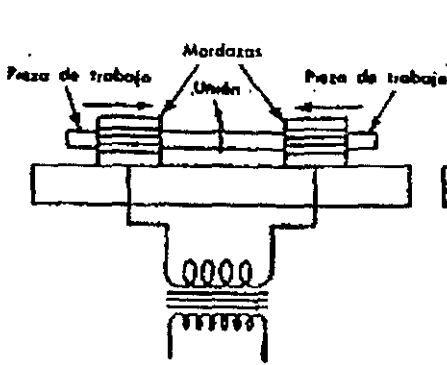


Fig. 1-16A Diagrama de la soldadura con recalado.

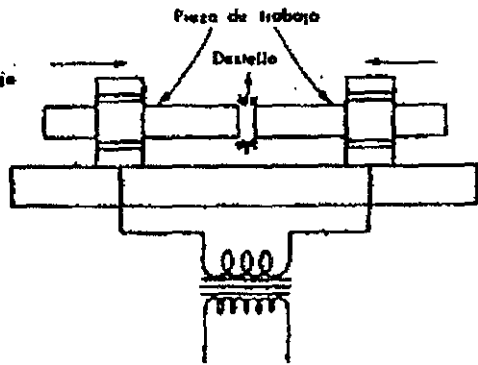


Fig 1-16B Diagrama de la soldadura a tope con destello.

I.20 SOLDADURA A TOPE CON DESTELLO

Dos piezas que vayan a soldarse con destello, se fijan con mordazas dejando sus extremos muy próximos entre sí, pero sin tocarse bien. Se aplica a las piezas una corriente de 2,000 a 5,000 amperios por pulgada cuadrada de densidad, y los arcos que se generan así a través de la unión funden, en un destello, el metal en los extremos de las piezas, como se indica en la figura 1-16B. Se aplica repentinamente una presión de 1,054.40 kg/cm² (15,000 psi) a 1,406 kg/cm² (20,000 psi) para cerrar la unión, eliminar vacíos y extruir impurezas. Al recalcar puede subir la densidad de corriente hasta 50,000 amperios por pulgada cuadrada (una pulgada cuadrada es 6,452 cm²).

La mayoría de los metales comerciales pueden soldarse a destello. Las piezas unidas soldándolas de esta manera deben tener más o menos la misma superficie en la unión. Entre las aplicaciones comunes de este método para soldar se encuentra la soldadura por sus extremos de láminas, cintas y barras. Un ejemplo es la soldadura con destello del extremo de una bobina de material al tramo siguiente para permitir el paso ininterrumpido de material a través de una laminadora continua. Una soldadura hecha a destello tiene una cantidad pequeña de material recalcado filoso y desigual alrededor de la junta. En vista que el metal se funde es posible obtener una soldadura de fuerza íntegra aún al soldar materiales disímboles. Los extremos de las piezas no exigen ninguna preparación previa. La soldadura a destello consume menos energía, es más rápida y calienta toda la pieza menos que la soldadura con recalcado.

Tanto la soldadura a tope con recalcado como de tope a destello tienen la ventaja, en comparación con otras operaciones para la formación de uniones, de formar uniones confiables, rápidamente y a bajo costo, uniendo metales diferentes y configuraciones inapropiadas para soldarse por otros procesos, exigiendo poca destreza operativa en el equipo fácilmente ascquible en el mercado.

I.21 SOLDADURA POR PERCUSION O PERCUSIVA

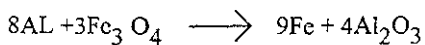
Dos partes que han de soldarse por percusión se unen firmemente por sus extremos, pero dejando cierta distancia entre las mismas. Una de ellas se coloca sobre un patín cargado con un muelle. Cuando se dispara la máquina se lanza una parte para que se establezca con

la otra. Las partes están conectadas a las terminales o bornes de un condensador cargado con alto voltaje que hace que destelle un arco entre aquéllas partes durante cerca de 0.001 segundo antes de tocarse. El arco funde una capa cuyo espesor es próximo a 0.0762 mm (0.003 pulgada) en el extremo de cada parte. El metal fundido y reblandecido se forja para formar una soldadura al unirse las partes violentamente.

La soldadura por percusión es método rápido para formar una unión y genera muy poca salpicadura y destello. Con ella pueden manejarse metales diferentes. El procedimiento queda limitado a la soldadura de superficies menores a 3.226cm² (1/2 pulgada cuadrada). Se ha observado que la soldadura por percusión forma uniones fuertes y más confiables, para conectar alambres pequeños a componentes eléctricos, que las formadas por rebordado o soldadura, pero resulta más costoso cuando van a hacerse un número de uniones inferior a millones porque el equipo es relativamente caro.

1.22 SOLDADURA CON TERMITA

PRINCIPIOS. La soldadura con termita se efectúa rellenando una unión con metal fundido que se obtiene reduciendo el óxido del metal por la acción del aluminio. El aluminio reduce cualquier óxido, excepto el de magnesio, pero la soldadura con termita se efectúa principalmente con hierro, acero y cobre. Se mezclan aluminio óxido de hierro magnético, finamente pulverizados, en la proporción de 1 a 3 kilogramos, y se inflaman efectuándose la reacción siguiente:



La reacción eleva la temperatura a unos 2,500 °C (4,500 °F) hasta 2775° C (5,000°F). El metal producido así corresponde más o menos a la mitad de la mezcla original en peso, o a cerca de 1/2 en volumen.

PROCEDIMIENTO. El primer paso para hacer una soldadura con termita consiste en preparar un molde para el metal. Las piezas que se van a soldar se colocan y fijan en posición. En torno a la junta se hace una plantilla de cera con la forma deseada de la

soldadura y se apisona un molde de arena alrededor de la zona que se va a soldar. En la figura 1-17 se ilustra un arreglo típico. Se inserta en el molde un soplete para fundir la cera y extraerla y, también, para calentar las piezas de trabajo hasta color rojo cereza.

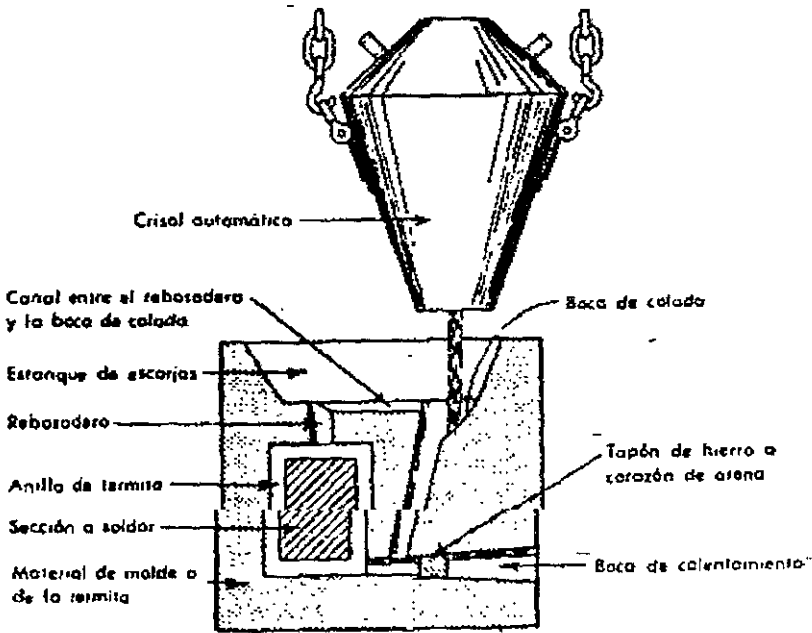


Fig 1-17 Proceso de soldadura con termita.

La mezcla de termita se coloca en un crisol y se incendia por medio de un soplete para soldar o por la adición de una cantidad pequeña de peróxido de bario y una cinta de magnesio. La reacción se desarrolla en unos 30 segundos para producir hasta una tonelada o más de metal que fluye penetrando en el molde, rodando a las partes que van a soldarse. El metal de soldadura sobrecalentado funde cantidades apreciables del metal original y todo se solidifica al enfriarse para formar una unión por soldadura fuerte y homogénea. Después se arranca el molde, se desprenden los respiraderos y compuertas se arregla la soldadura con cincel y se limpia.

APLICACIONES. La soldadura con termita se usa principalmente, pero no enteramente, a la unión de secciones pesadas. Es capaz de aportar rápidamente una cantidad de calor grande a partes que tienen gran capacidad térmica.

Entre los trabajos típicos que se desempeñan por este procedimiento mencionaremos la unión de cables, conductores, rieles, flechas y bastidores de maquinaria rotos y también la reconstrucción de engranes de dimensiones grandes. Los forjados y secciones cortadas a la flama pueden unirse de esta manera con el fin de construir partes muy grandes. A veces es éste el único método factible y, muchas veces, el más rápido para soldar piezas grandes. La composición del metal de soldadura puede regularse por la adición a la mezcla original de chatarra de acero o de diversas aleaciones en forma de óxido. Comúnmente se obtienen resistencias a la tracción desde 3,515 kg./cm² (50,000 psi) hasta 7,733 kg./cm² (110,000 psi) y alargamiento de 20 a 40%, en secciones de 5.08 cm (2"). Las soldaduras con termita se consideran mejores que el acero colado y las muestras de prueba pueden doblarse sobre sí mismas. Ocurre una desoxidación completa, la escoria tiene posibilidades amplias para salir, y se excluye el aire de la soldadura. La lentitud del enfriamiento alivia los esfuerzos internos.

I.23 SOLDADURA CON GAS

La soldadura con gas se efectúa quemando un gas combustible con aire u oxígeno en una flama concentrada que genera altas temperaturas. Lo mismo que los demás métodos de soldadura, la finalidad que se persigue con la flama es el de calentar y fundir el metal original y el de relleno de una junta. Muchos trabajos que se realizaban con soldadura con gas se han reemplazado con la soldadura con arco eléctrico y a resistencia pues esos métodos son más rápidos, pero la soldadura con gas aún tiene aplicaciones importantes. Sus temperaturas de operación son más bajas y regulables, característica que es necesaria para efectuar trabajos delicados. Con ella puede soldarse la mayoría de los materiales comunes. El equipo es versátil, poco costoso y sirve de manera adecuada en muchos talleres de maquilado y de reparaciones en general. Es probable que sea de más importancia el hecho que el calentamiento con gas sea el medio para cortar a la flama, salpicar metales y soldar con soldadura fuerte y blanda. Los procedimientos se describen

posteriormente pero lo que se explica aquí acerca de los combustibles es aplicable a estos métodos.

1.23.1 GASES COMBUSTIBLES

El acetileno es el hidrocarburo más importante en la industria de la soldadura. Algunas mezclas estabilizadas más novedosas de metilacetileno y propadieno, conocida como MAPP, han estado ganando terreno entre los consumidores. Otros gases combustibles comerciales con hidrógeno, propano, butano y gas de iluminación natural y manufacturado, así como cloro quemado con hidrógeno. Las propiedades que explican la ventaja ofrecida por el uso del acetileno se comparan en la Tabla 1-18 con las de propano (como ejemplo de gases de otras clases).

El acetileno genera temperaturas más altas que otros gases porque contiene más carbono disponible para la oxidación y cede calor cuando sus componentes (C y H) se disocian para quemarse al combinarse con oxígeno. La mayoría de los otros gases combustibles como propano absorben alguna parte del calor de combustión cuando se disocian sus elementos.

El acetileno es incoloro y tiene un olor dulzón, pero para muchas personas, molesto. Se genera este gas industrialmente por una reacción controlada de carburo de calcio en agua; la ecuación química es $\text{CaC}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$. El carburo de calcio es una sustancia gris, de aspecto pétreo que se hace fundiendo piedra caliza y coque juntos en un horno eléctrico. El gas puede generarse en una planta central y comprimirse en cilindros para su distribución, o puede generarse como lo necesite el consumidor.

La principal desventaja del acetileno es su peligrosidad si no se le maneja con precaución. Según las ordenanzas legales la presión del acetileno libre queda limitada a 1.0545 kg/cm² (15 psi) a 1.406 kg/cm² (20 psi) porque estalla a presiones superiores a 1.7576 kg/cm² (25 psi) y a veces aún a menos. Sin embargo, se puede almacenar sin riesgos hasta cerca de 14.06 kg/cm² (200 psi) estando disuelto en acetona. Un tanque o cilindro de acero para almacenar acetileno está empacado con 80% de material poroso como asbesto, madera balsa, carbón vegetal, tierra de infusorios, fibra de seda o kapok ("algodón de ceiba"). El Soldadura con rayo laser como un proceso alternativo

material de empaque se satura perfectamente con acetona que es capaz de absorber el acetileno hasta una proporción de 25 veces su volumen por cada atmósfera de presión. Se obliga al gas a entrar en el cilindro para cargarlo y se extrae para servicio, a través de una válvula situada en la parte superior del cilindro. Unos tapones fusibles de seguridad instalados en el cilindro sirven para aliviar la presión al quedar expuestos al fuego. Como medida de seguridad, los tanques en uso se vacían a una velocidad no superior a 1/5 de tanque por hora.

EL MAPP es comparable al acetileno por su desempeño y costo según las indicaciones de la Tabla 1-18 pero se puede estabilizar por medio de aditivos. De esta manera es posible manejar el MAPP disponible comercialmente pudiendo someterse a manejos bruscos sin correr riesgos. Se puede almacenar a presiones superiores a 14.06 kg./cm² (200 psi) y más, en tanques sencillos y usarse en chorros a alta presión para operaciones más aceleradas como en el salpicado de metales.

Propiedad	Unidades	Acetileno	MAPP	Propano
		C ₂ H ₂	C ₃ H ₄	C ₃ H ₈
Calor de combustión bruto	Btu/lb	21 500	21 100	21 700
Calor desprendido	Btu/lb	3 720	2 020	
Calor Absorbido	Btu/lb			1 020
Oxígeno consumido	lb/lb	3.1	3.2	7.3
Calor en los productos de la combustión	Btu/lb	5 830	5 030	3 450
Temperatura máxima de la flama (quemada en oxígeno)	°F	5 589	5 301	4 579
Costo	\$/lb	0.29	0.27	0.26

Tabla 1-18 Algunas propiedades de gases para soldar y cortar.

Los gases combustibles se queman con oxígeno comercialmente puro para alcanzar temperaturas más altas. Para fines industriales se extrae el oxígeno por licuefacción del aire y se distribuye en cilindros de acero a una presión próxima a 140.6 kg./cm² (2,000 psi). Para obtener temperaturas de flama inferiores a unos 1,982°C (3,600°F) que son convenientes para trabajar con láminas delgadas y materiales que no deben sobrecaentarse. La flama puede hacerse ligeramente reductora para obtener soldaduras de buena calidad.

libres de óxido. El hidrógeno se almacena en cilindros a presiones hasta de 140.6 kg./cm^2 (2,000 psi).

1.23.2 SOLDADURAS CON GAS OXIACETILENO

Muchas operaciones de soldadura con gas oxiacetileno se efectúan manualmente. La presión del gas procedente del tanque de acetileno o del oxígeno se reduce primero por medio de un regulador. Esta es una válvula accionada por medio de un diafragma que puede ajustarse para que deje salir del tanque solamente una cantidad de gas suficiente para mantener la presión deseada en el lado de salida. Los manómetros instalados en cada regulador muestran la presión en el tanque y la manguera.

Las mangueras conducen los gases hasta el soplete o antorcha sostenida por el operario. El soplete mezcla los dos gases en la proporción correcta y los emite hacia la flama. Está constituido, básicamente, por válvulas reguladoras, cuerpo, cabeza mezcladora y punta o boquilla. Existen en el comercio puntas de varios tamaños para formar flamas de diversas dimensiones e intensidad, para aplicarse a diversos usos.

Los sopletes se clasifican en tipos de baja presión y de presión intermedia dependiendo si funcionan como presiones de acetileno hasta de 0.0703 kg./cm^2 ($0.0703 \text{ lb/pulgada}$ cuadrada o psi), o desde 0.0703 hasta 1.0545 kg./cm^2 (1 hasta 15 psi). En el soplete de baja presión se inyecta el oxígeno a alta presión a través de un venturi y arrastra entonces la cantidad necesaria de acetileno a través de la cámara mezcladora para salir por la boquilla. Ambos gases atraviesan más o menos a la misma presión el soplete de presión intermedia.

Partiendo de diferentes mezclas de gases pueden obtenerse tres tipos distintos de flamas (figura 1-19). La flama neutra no tiene ninguna tendencia a reaccionar con los materiales que se sueldan. La temperatura más alta se encuentra en la punta del cono interior y es suficiente para fundir la mayoría de los metales usuales en el comercio y muchos materiales refractarios. Las flamas de carburización se distinguen por una "pluma" rojiza en la punta del cono interior. Esta puede reducir óxidos. El acero tomará el carbono depositado sobre la superficie y principiará a fundirse a una temperatura más baja. Una flama oxidante asegura la combustión completa y la temperatura más elevada pero posee una tendencia

fuerte a oxidar los metales que se soldan, reacción que puede ser perjudicial. En realidad, el calentamiento se efectúa por medio del cono interior y la envoltura de una flama escuda y protege la zona de soldadura contra la atmósfera.

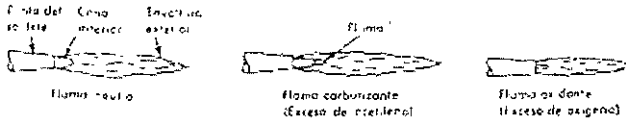


Fig. 1-19 Tipos de flamas

La soldadura a tope puede realizarse con el calor cedido por la flama oxiacetilénica por métodos parecidos a los empleados para la soldadura eléctrica con recalado a tope con destello. De acuerdo con un método, se oprimen entre sí las dos piezas que han de unirse y la juntura se calienta con un soplete hasta que adquiere consistencia. Entonces puede aplicarse más presión y se suspende el calentamiento para dejar que solidifique la unión. En un segundo método se calientan las dos piezas separadamente y luego se unen rápidamente, a presión. Una pieza de acero de aleación puede colocarse en el extremo de un vástago de acero dúctil, por cualesquiera de estos métodos, para hacer una herramienta. Otras aplicaciones incluyen la unión de secciones de tubería y rieles.

1.24 SOLDADURA A PRESION

Los metales se mantienen unidos por ligaduras entre sus átomos y cristales. Por consiguiente es necesario hacer que los átomos y cristales de dos piezas establezcan contacto efectivo sobre toda el área que les es común para obtener una junta tan firme como el material original. Normalmente, aún las superficies más lisas y uniformes se tocan únicamente en algunos puntos relativamente altos, cuando se ponen en contacto. Las superficies metálicas están cubiertas asimismo con películas de óxidos y gases absorbidos y vapor de agua, y se mantienen separadas por distancias considerables aun en los puntos más próximos entre sí. La soldadura por fusión vence las barreras existentes entre las piezas porque los átomos de los metales fundidos fluyen y se unen. Si se prensan piezas de metal

frías, aplicándoles una presión suficiente, podrán atenuarse las proyecciones para ensanchar el contacto sobre superficies amplias y pueden expulsarse los óxidos. Al aplicar un poco de calor se hace que los óxidos fluyan un poco mejor y el metal más plástico necesitándose entonces menos presión para efectuar la soldadura. Esta operación se realiza, hasta cierto punto, en el caso de la operación de soldadura por resistencia eléctrica y constituye la base para la soldadura a forjar que es una de las formas más antiguas empleadas para soldar practicada desde los tiempos antiguos por armeros y herreros. Consiste en calentar dos piezas al rojo vivo, aplicando un fundente como bórax y completando la soldadura martillando el metal sobre un yunque para formar la unión por las presión de los golpes. La práctica del arte manual es una rareza en la actualidad pero algunos de los métodos mecánicos descritos en este sitio son las contrapartes de aquéllos. Los procedimientos descritos en esta sección se realizan por medio de la aplicación de presión, con o sin calor.

I.25 SOLDADURA A FRICCION

En la soldadura por fricción se oprimen los extremos de dos piezas mientras una de ellas se mantiene inmóvil y se hace girar a la otra. Frecuentemente se hace girar esa pieza en un huso impulsado por un volante del que toma la energía y por esta razón conocen algunas personas el procedimiento como soldadura por inercia. La fuerza friccionante presente entre las superficies ensamblantes fijas y deslizantes genera el calor suficiente para efectuar la soldadura y añade un componente de forjadura al factor presión, exclusivamente, que se encuentra en otras operaciones de soldadura de tope.

Los metales y metaloides comunes y los poco usuales, presentes en pares similares y disímbolos, pueden unirse mediante la soldadura por fricción cuando se trabaja en secciones esencialmente redondas, de 4.72 mm hasta 10.16 cm (3/16" hasta 4 pulgadas) de diámetro. El tiempo de operación es corto, desde 0.2 hasta 2 segundos y el calentamiento y el recalado afectan sólo una zona pequeña. Por regla general se acortan las piezas menos de 0.508 mm y hay poco destello y desperdicio. Siendo apropiado el control de la energía aplicada, se trabaja el metal correctamente, la unión resultante es limpia y más fuerte que el metal base y el producto obtenido es uniforme de una pieza a la otra. La operación no emite luz intensa, chispas, humos o vapores ni sonidos fuertes.

1.26 SOLDADURA ULTRASONICA

Es posible unir dos piezas si se oprimen una contra la otra y se hacen vibrar a frecuencias ultrasónicas, en posición paralela a la interface de contacto. Las vibraciones desencajan las superficies y películas de óxidos y pueden actuar directamente a través de la suciedad y recubrimientos superficiales para establecer la mezcla íntima de los metales nascentes. Las superficies se calientan y plastifican produciéndose así una ligadura metalúrgica sólida. Pueden hacerse soldaduras en puntos o en torno a anillos en un segundo o menos, a lo largo de costuras a velocidades hasta de unos 123 metros por minuto (400 fpm). El proceso es muy ventajoso para unir alambres delgados, laminillas y hojas de metales blandos porque no ocurre ninguna fusión. No existe ninguna zona afectada por el calor y es fácil unir metales diferentes. No se necesita la presencia de ningún metal llenador ni se aporta ninguna contaminación. La soldadura es tan fuerte, o más, que el metal original. Comúnmente se usa la soldadura ultrasónica hasta para soldar materiales plásticos. El equipo es costoso, una unidad pequeña, de 2 kw. cuesta cerca de 25,000 dólares.

1.27 SOLDADURA POR EXPANSION

Es posible unir superficies impulsando dos piezas una contra la otra mediante una explosión. La aplicación principal de este método ha sido en el revestimiento de láminas y forrado de tubos. Se han hecho revestimientos hasta de 2.134 por 6.1 metros (7 x 20 pies) de superficie. Dos piezas que necesitan unirse se colocan a poca distancia una de la otra, ordinariamente formando un ángulo, de manera que choquen a lo largo de una línea de avance o una serie de puntos al ser golpeadas por la explosión. Cuando las condiciones son apropiadas, las altas presiones generadas obligan a que se aproximen rápidamente las superficies que establecen contacto violento, adelantándose al punto donde ocurre la colisión y se mezclan estrechamente para formar una ligadura uniforme.

Se genera calor solo incidentalmente y no ocurre fusión. De esta manera es posible unir metales bastante diferentes, sin que haya ninguna interacción térmica. El equipo es de construcción sencilla pero las ondas de choque explosivas exigen que haya cierto aislamiento.

I.28 UNION POR DIFUSION

La unión por difusión, conocida también como soldadura en estado sólido, se lleva a cabo oprimiendo piezas entre sí mientras se calientan hasta un punto inferior al de fusión y aún a temperaturas inferiores a las de recristalización, en un vacío, o en medio gaseoso inerte. La formación de las ligaduras se efectúa al cabo de un tiempo porque los metales coalescen mediante la difusión interatómica. Las superficies destinadas a formar la unión tienen que maquinarse para que queden planas y se limpian perfectamente para asegurar que el contacto será estrecho sobre toda la superficie. En ocasiones se agregan capas metálicas intermedias como catalizador para acelerar la difusión y fortalecer las ligaduras y en otras instancias se aplican capas de detención para obtener la formación de ligaduras selectivas en áreas determinadas.

No se efectúa ninguna fusión y no se necesita la presencia de un metal de relleno en la formación de ligaduras por difusión. Por este motivo no se agrega peso y la unión queda tan fuerte y resistente a la temperatura como el metal original. Este proceso es aplicable a metales reactivos y refractarios, para unir metales parecidos y muchos diferentes, así como para ligar entre sí tanto piezas gruesas como bastante delgadas. El procedimiento es relativamente costoso y no puede competir excepto en el caso de trabajos difíciles de unirse por otros medios, como cuando se desea unir materiales sensibles al calor o quebradizos, así como placas delgadas, o laminillas. Entre los usos importantes dados a este método se encuentra la soldadura de zirconio y berilio en la construcción de componentes para reactores nucleares, tungsteno para partes para uso aerospacial y estructuras de panel de abeja delgadas.

SOLDADURA CON RAYO LASER

II. SOLDADURA CON RAYO LASER.

Es un proceso de unión, que produce la soldadura de materiales, con el calor obtenido de la aplicación de un Rayo de luz, consistente y concentrado que choca contra los materiales a soldar.

Las siglas de la palabra láser significan "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". (Amplificación de luz por la emisión simultánea de radiación).

El láser puede ser considerado, para la aplicación de unión o soldadura de metales, como única fuente o recurso de energía termal, controlable con precisión en intensidad y posición.

Para soldar, el rayo o haz de láser debe ser enfocado a un pequeño punto para producir una alta densidad de poder. Este controla la intensidad para fundir al metal y en su caso la profundidad de penetración de la soldadura, evapora parte del metal y cuando la solidificación ocurre, la zona de fusión o junta de soldadura resulta.

El rayo de láser consiste en un flujo de Fotones que pueden ser enfocados y dirigidos por elementos ópticos como (espejos y lentes). El haz de láser puede ser transmitido a través del aire a apreciables distancias sin serios problemas de alteración o degradación.

Los dos tipos de procesos de soldadura por láser, conducción limitada y penetración profunda, son normalmente autógenos, estos usan únicamente los metales principales a unir sin necesidad de adicionar material de relleno

En la soldadura con láser con conducción limitada, el metal absorbe el haz de láser en la superficie de trabajo. La región de la superficie es calentada completamente por conducción térmica

El proceso de soldadura con láser en el método de conducción limitada usa estado sólido y la potencia moderada del bióxido de carbono (CO_2) y trabaja normalmente con menos de ($\leq 1 \text{ K W}$) de potencia.

La soldadura con láser de penetración profunda requiere una alta potencia de CO_2 . La conducción térmica no tiene limitación de penetración. La energía del haz de láser es suministrada al metal a soldar a través de todo su espesor, no tan sólo en la superficie

La soldadura de láser con penetración profunda es similar en fuerza a soldadura con haz de electrones (EBW) en vacío.

II.1 APLICACIONES

La Industria Automotriz, Productos de Consumo, Aeroespaciales y la Industria Electrónica, todos ellos usan soldadura por láser para unir variedades de metales.

Entre los metales soldados podemos mencionar metales preciosos y sus aleaciones, cobre y aleaciones de cobre, aluminio y sus aleaciones, titanio y sus aleaciones, metales refractarios, acero rolado en frío y caliente, de alta resistencia y baja y sus aleaciones, Níquel y hierro basado en aleaciones. Soldadura libre de porosidad puede ser lograda con esfuerzos de tensión iguales o excediendo a los del metal base.

En la Industria Automotriz, el láser fue usado por el endurecimiento de las superficies de las partes a usar. Existen dos grandes ventajas del endurecimiento por láser, ambos resultan del pequeño tamaño y fácil manipulación, características del haz de láser.

La primera es la capacidad de localizar el punto exacto de endurecimiento, donde se requiere. Esto minimiza que todo el material tenga que ser calentado, eliminando así la distorsión que con frecuencia acompaña a otras técnicas de endurecimiento. La segunda ventaja es la capacidad de aplicar calor a áreas inaccesibles, por ejemplo pequeños taladros o formas complicadas no receptivas para inducir endurecimientos.

En aplicaciones de soldado, el láser ha sido usado para unir estructuras que forman refuerzos de partes de vehículos.

En estos procesos computarizados se ha logrado un rango de desempeño de 400 a 450 pulg/min. La soldadura con láser es continua, lo que resulta en una estructura integral eliminando la necesidad de operaciones de sellado.

La programación del sistema LBW (soldadura por láser) ofrece la ventaja de que cualquier parte del automóvil de cualquier modelo puede ser soldada únicamente reprogramando la memoria de la computadora.

El haz de soldadura de láser también ha sido aceptada como una técnica para proveer una unión controlable en los sensores de oxígeno que son usados para el control de estándares de contaminación.

Estos dispositivos son atornillados dentro de un múltiple al vacío y son expuestos a continuas altas temperaturas de operación. Como la señal de información eléctrica en esta aplicación es muy sensible en los pequeños cambios en resistividad, el contacto eléctrico debe ser inmune a la corrosión y la soldadura por láser ofrece estas cualidades, y garantiza una pieza uniforme en rangos de producción muy altos.

En la industria electrónica, es usado para sellado de dispositivos electrónicos que deben ser altamente confiables y para usos especiales. Ejemplos de éstos son equipos que están herméticamente sellados para aplicaciones de aviación militar. Estas aplicaciones demandan alta confiabilidad bajo condiciones ambientales muy severas.

La soldadura por láser en envases y recipientes ha probado ser una forma de empacar, sellando herméticamente cada paquete.

II.2 FUNDAMENTOS

La soldadura con haz de láser requiere un meticuloso enfoque. Cuando se enfoca al tamaño apropiado del punto a soldar, el haz funde el metal, produciendo rápidamente una soldadura reducida con alta eficiencia de unión y mínima distorsión.

El control preciso del poder del láser es necesario durante la soldadura para mantener la zona de fundición localizada, usualmente el control se realiza con la variación de pulsos, un rango de repetición de puntos, el tamaño del haz y el nivel de potencia.

El láser es un equipo que produce un intenso, concentrado y fuerte haz de luz paralelo. Todos los láser deben consistir en tres partes fundamentales:

- 1) Un material o medio de láser
- 2) Un método de excitación
- 3) Y un espacio de resonancia.

Si consideramos un gas encerrado en un recipiente conteniendo átomos libres con un nivel de energía, que sea metastable, al hacer pasar una luz blanca y brillante a través de este gas, los átomos podrán ser movidos o excitados en resonancia, de un estado de reposo a uno de excitación. Cuando los electrodos se mueven muchos otros átomos son atrapados en el estado metastable. Si el bombardeo de luz es suficientemente intenso, entonces la población se invierte, y más átomos en estado metastable habrá comparados con el estado estable.

Cuando un electrón en estado metastable espontáneamente brinca a estado de reposo, un fotón de energía es emitido, este fotón pasa a otro átomo cercano de estado metastable, este es el principio de la resonancia, inmediata y simultáneamente éste átomo radia un fotón de exactamente la misma frecuencia y regresa al estado de reposo. Este fotón simultáneamente tiene exactamente la misma frecuencia, dirección y polarización como el fotón inicial (coherente en el espacio) y exactamente la misma fase y velocidad (coherente en el tiempo).

Estos dos fotones deben de ser considerados ahora como ondas primarias, y cuando pasan cerca de otros átomos en su estado metastable, ellos simultáneamente emitirán a otros la misma dirección y la misma fase.

La transición desde el estado de reposo al estado de excitación, puede también ser estimulada, sin embargo, con éso se absorbe la onda primaria. Por lo tanto, un exceso de emisión dará como resultado una inversión en el estado de toda la población de átomos, esto es más átomos en el estado Metastable que en el de reposo.

Y si las condiciones en el gas son correctas una reacción en cadena puede desarrollarse, resultando una alta intensidad de radiación.

Para producir un láser, la emisión estimuladora debe de ajustar con la proyección de resonancia, característica en espacio para que las ondas se puedan usar una y otra vez. Suponga que dos espejos de alta reflexión son puestos al final del recipiente cilíndrico, y los electrones de los átomos, son excitados para producir una inversión en el estado de la población. Si uno o más átomos en el estado metastable radia espontáneamente, estos fotones moviéndose a un ángulo considerable de las paredes del recipiente escapan y se

pierden. Los fotones se emiten en paralelo a un eje y se reflejan hacia adelante y hasta el final. La oportunidad de que la emisión de estos fotones ahora dependan de la alta capacidad de reflexión (reflejarse) al final en un espejo y una alta densidad de población de átomos dentro del recipiente adquieran el estado metastable.

Así, el láser consiste en:

- (1) Un material o medio capaz de mantener una población de inversión metastable.
- (2) Un método para producir y mantener a la población en inversión.
- (3) Un sistema de ajuste visual que refleje las ondas de regreso y hacia delante en el recipiente. Todo sistema láser puede ser descompuesto en estos tres fundamentos.

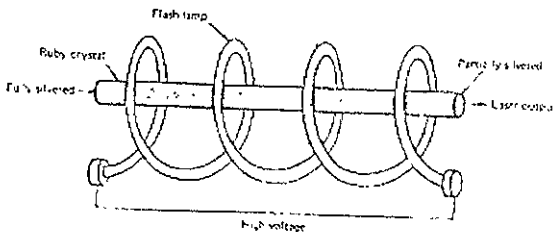


Fig 2-1 Láser de Rubí utilizando una lámpara de flash helicoidal para un borbandeo óptico.

Un láser de Rubí, por ejemplo, consiste en un cristal transparente de corundum (Al_2O_3) compuesto de aproximadamente 0.05% de átomos de chromium trivalente en la forma de Cr_2O_3 que provee el color rosa. Los átomos de oxígeno y aluminio son inertes; los iones de cromo son los ingredientes que permiten la inversión de la población.

Cuando la luz blanca entra al cristal de rubí ocurre una absorción por los átomos de (cromo) en la parte azul-verde del espectrum. Por lo tanto una luz de una intensa fuente, alrededor del cristal mueve y excita muchos electrones a una banda ancha de nivel de energía.

Estos electrones rápidamente retroceden, muchos regresan a su estado de reposo, algunos electrones regresan a un estado de nivel intermedio, sin embargo no por la emisión de protones, sino por la conversión de energía de vibración de los átomos, que forman una rejilla de cristal.

Para lograr un alto incremento en la población de electrones en nivel metastable se ha desarrollado un sistema de luz de alta intensidad, en una lámpara con un haz de luz helicoidal que puede rodear el cristal de rubí, con un suministro adecuado de luz para producir la inversión de la población. Otro arreglo muy efectivo es colocar una fuente de una fuerte luz pulsante enfocada de un lado del reflector cilíndrico cruzando la sección y la barra de rubí en el otro enfoque.

Suministrando una fuerte fuente de luz que alrededor de una parte de la energía almacenada se convierte en un haz concentrado.

Ondas concentradas viajan en dirección opuesta del arreglo de cristal de rubí, llegando las ondas a un nivel comparable al de resonancia en microondas. Con una parte al final parcialmente reflejada, parte de la luz interna es transmitida como un haz de emergencia.

Así en el sistema de láser de rubí, tiene como material base el Cr_2O_3 o modificado con cristales de corundum; el método de excitación es la intensa luz blanca, y el medio en el

cristal de rubí, con un extremo completamente reflejado y el otro con una transmisión parcial.

El medio del láser puede ser operado en una variedad de modos de oscilación similar a ondas guía, como las ondas viajan de regreso y de un lado hacia el otro de los espejos, por lo que el arreglo puede llevar muchas ondas.

Con una fuente de espectro la longitud de onda puede ser seleccionada por oscilación insertando un prisma en uno de los espejos. Dada la dispersión del prisma, los caminos ópticos pueden ser afinados para que sean paralelos para la longitud de onda deseada. Adicionalmente al modo longitudinal de oscilación, los modos de oscilación transversal pueden ser sustituidos simultáneamente. Porque el medio dentro de un gas está normalmente cerca del eje, esto se conoce como modo de electricidad transversal y magnética $(TEM)_{MN}$ los suscritos M y N especifican el número integral de líneas nodales transversales que cruzan el haz de emergencia. En otras palabras el haz que cruza la sección es seccionado en capas.

El modo simple es TEM_{00} , en el cual, la densidad del flujo sobre el haz en la sección que cruza es aproximadamente de forma Gausiana. No existiendo cambios de fasc a lo largo del haz. Por lo que el haz es especialmente consistente. La extensión angular de haz puede ser limitada por difracción en la abertura de la salida. El haz TEM_{00} es el más enfocable. Hazes Multimodales donde M y N son grandes, tienen capas cruzando la sección. Haz cruzado en secciones de diferentes TEM_{00} se muestran en la figura 2-2.

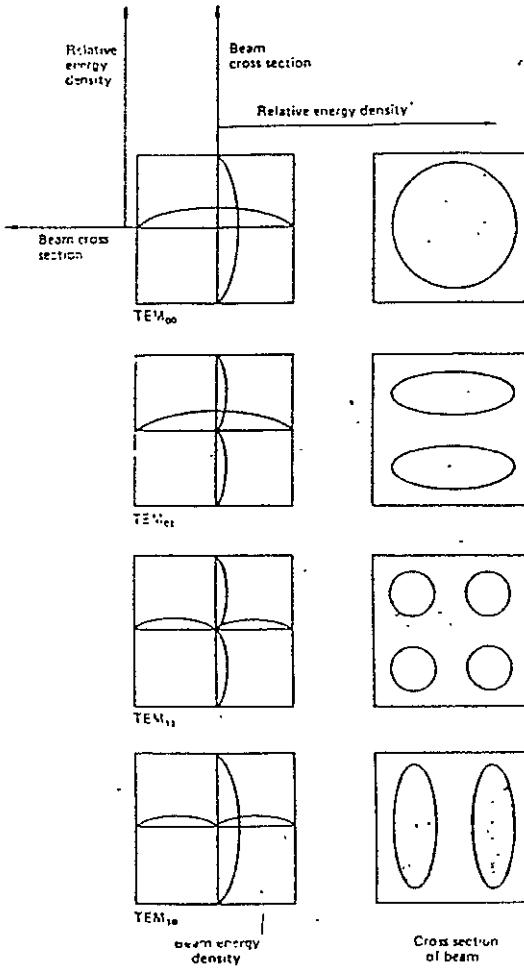


Fig 2-2 Sección transversal del haz para cuatro diferentes modos de TEM.

II.3 CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DEL LASER

Una de las características que lo hacen interesante para trabajos metálicos es su ancho de línea, su divergencia, consistencia y su capacidad de ser enfocable. Describiendo el Láser como monocromático, significa que su salida es un espectro muy estrecho. Por ejemplo todo el poder de salida del láser está concentrada en una simple longitud de onda. El ancho del espectro no es cero, pero típicamente es muy pequeño comparado con fuentes de luz convencional.

Quizá la característica más importante del láser es que la salida de luz es altamente direccional y lineal dado que el haz de láser es lineal (el ángulo de esparción es muy pequeño). Puede ser colectado en lentes y enfocado en pequeñas áreas. En fuentes de luz convencional, la radiación se extiende de ángulos de 4 y es virtualmente imposible coleccionar esa energía en un haz.

Dado que el haz del láser es concentrado y las ondas viajan de un lado al otro y de regreso entre los espejos se aumenta su capacidad original. Este es el resultado de fotones que tienen la misma velocidad y fase como el fotón inicial. Esto es coherencia temporal y el hecho de que los fotones tengan la misma frecuencia, dirección y polarización como el fotón inicial es llamado coherencia espacial

El resultado de ambos, la coherencia espacial y coherencia temporal nos da un haz muy intenso de láser.

La capacidad de poder del haz de láser en la pieza de trabajo es función del poder del haz de láser y la mínima región en la que va a ser enfocado.

El T_{em00} del haz de láser es esencialmente un haz de forma de Gauss y tiene la misma distribución de intensidad en ambos tanto cerca como lejos y la misma fase a lo largo de toda la avanzada de la onda. Un haz de Gauss puede ser siempre enfocado en un mínimo tamaño de áreas del orden de longitud de onda

Uniendo fases gaussianas de haz, puede ser principalmente enfocado en un área más pequeña comparado con hazes incoherentes.

Un haz (tem_{mn}) multimodo de alto orden podrá tener una área de haz mayor que un haz gaussian (tem_{00}). Como resultado de la alineación y consistencia del haz de láser, el láser es una fuente de energía que puede ser concentrada con lentes para alcanzar una densidad de poder extremadamente alto en la superficie de trabajo.

II.4 EL RAYO LASER ADECUADO PARA SOLDAR

El láser Industrial usado para procesar materiales y soldar puede ser dividido en dos categorías: Estado sólido y gas, dependiendo del medio. Lo interesante de esta división es el hecho de que en estado sólido tiene una longitud de onda de 1.06 μm . Mientras el láser de gas tiene una longitud de onda de 10.6 μm . El elemento activo en estado sólido es el ion de neodimium (Nd), en el láser de gas el medio activo es de molécula de CO_2

Láser de estado sólido, son caracterizados por un medio activo de impureza. En algunos materiales base. Para materiales proccsados el elemento estimulante es el ION DE neodymiun (Nd^{+++}) en forma de cristal y YAG. El resultado de la longitud de onda es dado por Nd^{+++} y es 1.06 μm . El material de láser está en la forma de una varilla cilíndrica con terminaciones lisas planas y paralelas. Su generación se da principalmente con la intensidad óptica de lámparas (Krypton o Xenón). Un arreglo muy sencillo de varilla, lámparas y espejos se muestra en la figuras siguiente.

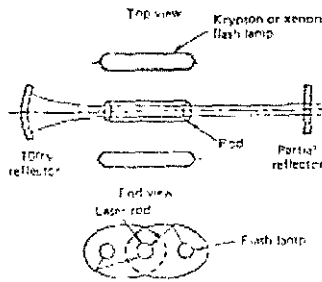


Fig 2-3 Arreglo de un láser de estado sólido

En producción, la conductividad térmica, el tiempo de vida de la fluorescencia, eficiencia y la banda de absorción óptica. Son los factores que afectan la capacidad de un sistema particular para emitir una cantidad de energía en un simple pulso. Los materiales que lo pueden lograr son aquellos de los que se puede obtener una gran cantidad de energía.

ITRIO ALUMINIO GARNET tiene la composición Química: $Y_3 Al_5 O_{12}$ es un duro cristal isotrópico que puede llegar a hacer un material de alta producción óptica y puede ser pulido con un buen acabado.

ITRIO ALUMINIO GARNET ofrece un bajo valor de umbral (al comienzo) y altos valores de ganancia, además la alta dureza que permite características de pulimiento óptico. Y la conductividad térmica de YAG es sobre 10 veces más que la de un cristal, la absorción del espectro del Nd en YAG contiene muchas líneas estrechas.

Las características de salida del LASER Nd: YAG depende del método de excitación y puede ser continuo o con pulsos repentinos.

En operación continua el láser se logra excitado con lámparas de Xenón con niveles de poder del orden de 10 W o lámparas Krypton con niveles de poder del orden de 100 W ó más.

Para Láser de pulsos repetidos, las características finales dependerán de la configuración de la lámpara.

La figura 2-3 muestra la configuración más común (LAMPARAS RECTAS Y PARALELAS) mientras que una variante se muestra en la Fig.2-1(Lámpara Helicoidal).

Continuos wave operation	
Average power	<1000 W(multimode)
	<20 W (TEM ₀₀)
Divergence.....	1-20 mrad
Beam diameter	0.04 - 0.4 in.
Pulse length of 0.1 TO 20 ms	
Output energy	<500J/pulse(multimode)
	5J/pulse(TEM ₀₀)
Repetition rate	200 Hz
Divergence.	10 mrad(multimode)
	3 mrad(TEM ₀₀)
Beam diameter	0.2-0.4in.
Pulse length of 0.1 to 1 μ s(repetitive switch)	
Output energy	1 mJ/pulse
Repetition rate	50-100kHz
Average power	10-100 W
Peak power	10-50 kW

Tabla 2-1 Rendimiento de un Láser de Nd. YAG

La tabla 2-1 da las características para el láser Nd: YAG y ofrece una idea de la capacidad para cambiar entre un promedio de potencia, energía de pulso, duración del pulso y rangos de repetición del pulso para tales láseres.

Con una línea relativamente estrecha, con un espesor de 1.06 μm de radiación de láser Nd:YAG se facilita una operación de onda continua a la temperatura ambiente.

El resultado es que la onda continua del láser Nd:YAG es el segundo únicamente comparado con la onda continúa de láser CO₂ en términos de capacidad de generación de potencia de onda continua, como quiera que sea estos tienen una muy baja eficiencia comparada al láseres de CO₂ (Típicamente < 2%).

El cristal tiene un número considerable de características deseable para usarse como material base. Ya que cuenta con largos tramos de alta calidad óptica y pueden ser fabricados en una variedad de tamaños y formas.

En alineaciones de fibras con diámetros de pocos micrones en tramos de hasta 6 1/2 pies de largo, con diámetros aproximados a 4 pulgadas. La conductividad térmica del vidrio es menor, en la mayor parte de la base cristalina. Por lo tanto el enfriamiento es un problema que limita el máximo rango de repeticiones dada por un pulso de energía. Por lo que el promedio de potencia a la salida está limitado.

Las líneas de emisión de iones en vidrio son ampliadas en los materiales cristalinos.

Éste aumenta al principio del vidrio por la acción del láser, porque la alta inversión poblacional requiere la misma ganancia. Las características del vidrio de láser Nd conveniente para LBW se dan en la tabla 2-2.

II.5 LASER DE GAS

El más eficiente láser actualmente disponible para aplicaciones de proceso de materiales es el láser de CO_2 que puede ser usado en ambas formas: alto poder de onda continua y modo de operación por pulsos.

El láser de dióxido de carbono usa una descarga eléctrica como fuente de excitación del medio en la que el medio del láser es la molécula de CO_2 .

Output energy..20J/pulse(multimode)
Repetition rate 10 Hz
Divergence..5-10mrad
Beam diameter0.2-0.4in.

Tabla 2-2 Rendimiento de un láser de Nd-glass para longitud de pulso de 1a. 10ms.

La mezcla de gas para el láser es una combinación de helio, nitrógeno y bióxido de carbón. El láser de bióxido de carbón puede ser clasificado de acuerdo a su sistema de flujo del gas.

El láser sencillo de CO₂ tiene flujo axial; el gas fluye en la misma dirección que el haz de láser y el campo eléctrico Fig. (2-4). El flujo axial del gas es mantenido a través del tubo para reponer moléculas eliminadas por el efecto de descarga eléctrica de multikilovolts de la excitación.

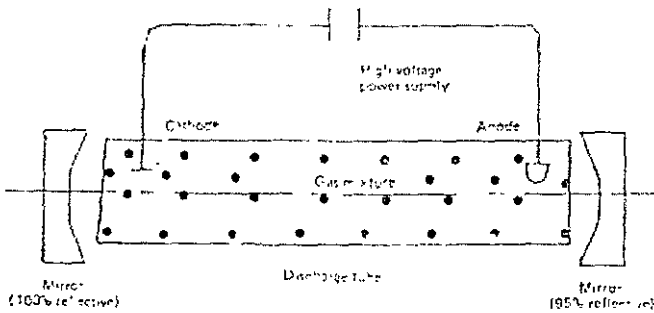


Fig. 2-4 Configuración básica de láser de CO₂

Un espejo es colocado en cada uno de los dos extremos del tubo de descarga para completar la cavidad de resonancia.

Típicamente un espejo es totalmente reflectivo y el otro es parcialmente transmisor y parcialmente reflectivo. Un láser de flujo axial es capaz de generar un haz de láser con una fuerza continua de 50 W para cada metro de longitud de resonancia. Un pliegue en el tubo es usado para alcanzar niveles de fuerza de 50 a 1000 W en un pequeño volumen.

La excitación transversal atmosférica de láser de CO₂ es capaz de producir pulsos de Haz de salida de muy alta fuerza.

El medio gaseoso de láser es mantenido a presión atmosférica y es excitado por descargas eléctricas por electrodos localizados longitudinalmente a lo largo del resonador óptico. Fig. (2-5).

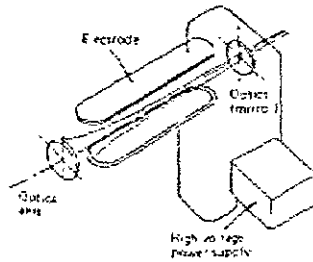


Fig. 2-5 Excitación transversal de láser atmosférico.

En la proximidad de los electrones se requiere un bajo potencial para mantener un alto campo de fuerza. Una descarga muy corta en tiempo facilita una descarga eléctrica en el gas a presión de 1 atmósfera o más.

La excitación atmosférica transversal puede generar 10 MW o más de poder en una simple pulsación menos de 1 μ s de largo. Este láser usualmente opera en rangos de pocos pulsos por segundo.

El gas transportador de láser opera por circulación continua, el gas a través de la cavidad de resonancia se emplea como un soplador de alta velocidad. Mientras se mantiene un campo eléctrico perpendicular a ambos al gas y al haz de láser. Porque el volumen de la resonancia es relativamente alto, comparado con la longitud. Grandes espejos pueden ser ubicados en cada uno de los extremos para reflejar el Haz a través de la región de descarga varias veces antes de escapar a través del acoplamiento de salida. Un láser de transporte de gas se ve en la figura 2-6.

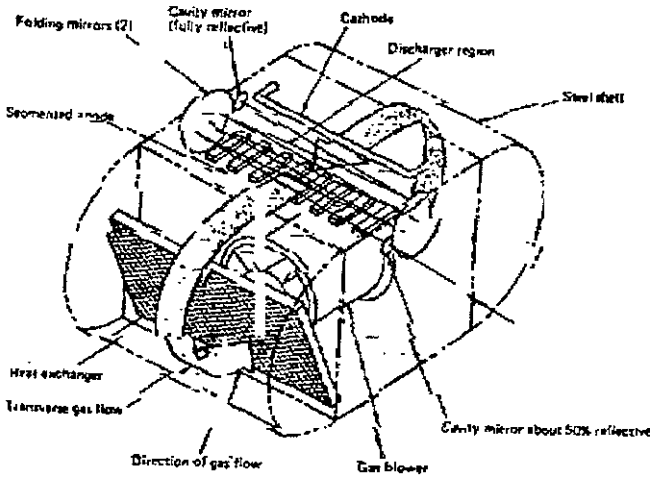


Fig. 2-6 Láser transportador de gas.

La capacidad para alcanzar un camino óptico efectivamente largo en una distancia realmente corta permite al gas transportar al láser a ser una estructura compacta que genera un poder de salida muy alto. Láser de onda continua capaz de tener entre 1 y 25 KW que ya están disponibles. Las características de salida de algunos sistemas comerciales de onda continua de CO₂ se en listan en la tabla 2-3 Y las características de potencia, moderada y alta de láser industrial por pulsaciones son comparados en la tabla 2-4.

Gas flow System	output power	Beam divergence Mrad	Beam diameter, in.	Available features
Conventional axial flow	10W	1 - 5	0.2	Sealed operation, high Stability, tunable
	10W - 100W	1 - 3	0.2 - 0.4	Gas recycling, pulsed operation, tunable
	100W - 1000W	1 - 2	0.2 - 0.4	Gas recycling, pulsed operation, tunable
Fast axial flow	2 kW	1.2	0.5	pulsing, gas recycling
Gas transport	6 - 15 kW	~1	2.7	.

Tabla 2-3 Rendimiento de laser de onda continua de CO₂

type	Designation	Output, kW	Maximum pulse rate, pps	Characteristics
Moderate power	CO ₂	To 1.5	1000	Continuous or pulsed from 0.2 Ms up
	YAG (solid -state)	To 2	. . .	Continuous
High power	CO ₂	1.5 - 20	. . .	Continuous
Pulsed.	YAG (solid state)	100 _(a)	200	Pulsed 0.1 - 8 ms, 200W max, average power
	Nd - glass (solid state)	100 _(a)	4(per min)	Pulse 0.6 - 8 ms
	Ruby (solid state)	100 _(a)	1	Pulsed 1-5 ms, 12W max, average power

(a) Output given in J/ pulse, maximum

Tabla 2-4 Lasers industriales para soldadura.

II.6 SELECCION DE UN SISTEMA DE LASER

Considerando la variedad de lasers que hay disponibles para propósitos de soldadura, la selección de un tipo de láser o de un nivel de potencia deberá contar y abarcar con lo más importante, que es la aplicación y la penetración de soldado requerida.

Penetración La máxima penetración que podrá ser alcanzada con el láser es función de la potencia del haz la densidad y las características de enfoque.

Se ha demostrado que la penetración de soldado alcanza un máximo aproximado de 0.80 IN a un nivel de 20 KW, como se muestra en la figura 2-5.

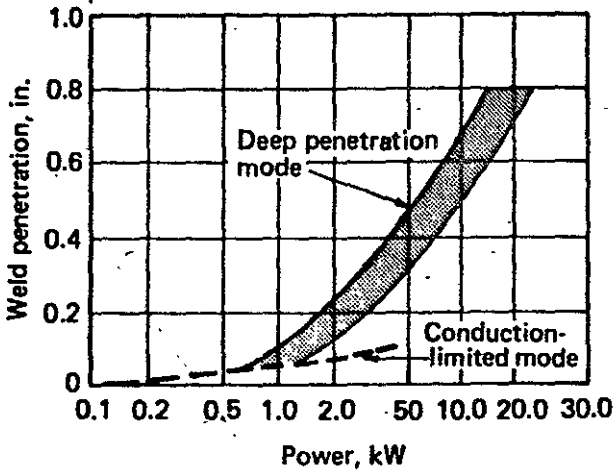


Fig. 2-5 Efectos de la potencia de soldadura de máxima penetración.

El área sombreada de la curva representa datos para varios metales, incluyendo Acero Inoxidable, aluminio y titanio. La máxima penetración para una potencia dada puede ser alterada cambiando relativamente la posición del punto de enfoque respecto a la pieza. La máxima penetración ocurre cuando el haz es enfocado ligeramente abajo de la superficie; la penetración disminuye cuando el haz es enfocado en la superficie o adentro de la pieza.

La zona de fusión aparentará tener forma de reloj de arena, donde la cintura del reloj de arena Fig.2-5B es controlada por la posición del punto de enfoque relativo a la pieza de trabajo.

La penetración no solamente depende de la potencia, sino también depende de la velocidad de la soldadura.

La consistencia de la soldadura de láser no se había determinado hasta mucho después, cuando las pruebas no destructivas fueron desarrolladas y las propiedades mecánicas y microestructura de las soldaduras de láser fueron determinadas. Algunos materiales son fácilmente soldados usando láser, mientras otros por una diversidad de razones, son menos soldables con láser

Aunque considerable la información empírica y teórica referente a la capacidad de penetración de diferentes láseres específicos, existen las variaciones que ocurren entre láseres similares de diferentes marcas y que son de gran importancia práctica en la selección del láser. Por ejemplo, un láser de flujo axial, 1-KW CO₂ posiblemente proveerá gran capacidad de penetración comparado con uno de flujo transversal de 1-KW CO₂. Esta diferencia posiblemente sea el resultado de pequeñas variaciones en la divergencia de la producción del láser ó será el resultado de varios factores, como vibración óptica. Entre las características más importantes de la soldadura por láser, la penetración, así como el número y tipo de capacidad de soldadura continua y su crecimiento, deben ser dadas por el proveedor.

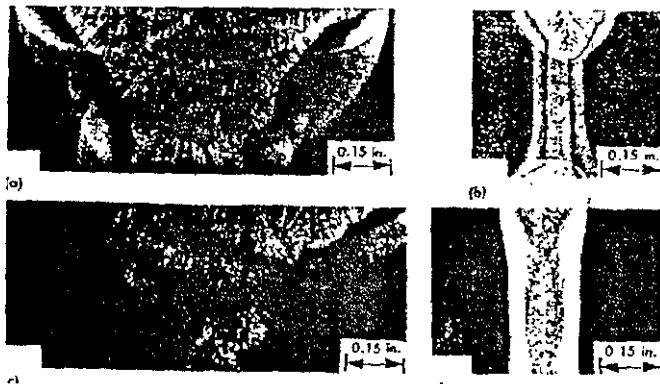


Fig. 2-5B Vista de la Sección trasversal de 0.5 mm NY-130 Soldadura realizada en 10% de amonio (a)soldadura de arco protegida (b)soldadura de haz de electrones (c) soldadura de arco en metal (d) soldadura de haz de láser.

II.7 PRODUCTIVIDAD

Después de decidir la penetración requerida para la soldadura de láser, las consideraciones importantes, dependiendo de la aplicación de la soldadura, son la velocidad de soldadura que afecte directamente a la productividad requerida, entonces se puede seleccionar un láser

Por ejemplo, un sistema de láser de pulsos de 500 W de flujo axial y uno 20 KW de haz ionizado de flujo transversal. Son ambos capaces de soldar una placa de acero inoxidable de 0.04 in, pero la velocidad de soldadura obviamente varía muchísimo, así es que cada vendedor deberá proveer la información exacta de la relación, velocidad, penetración de cada equipo.

II.8 CALIDAD DE LA SOLDADURA

La calidad de la soldadura es el siguiente factor más importante para la selección de un láser, además de consideraciones tales como el ancho del haz de soldadura, aspectos como consistencia de haz y distorsión, deben ser tomados en cuenta. Cada uno de estos aspectos probablemente afecte la calidad del haz y el nivel de potencia del sistema de láser. La alta potencia y un haz de alta calidad son probablemente los puntos más atractivos desde el punto de vista de producir una mínima distorsión. Sin embargo tal haz probablemente será poco atractivo desde el punto de vista de uniones soldadas en juntas con tolerancias mínimas.

Aspectos como la calidad de la soldadura probablemente no afecten únicamente la soldadura en el proceso de manufactura, sino que afectará dramáticamente el costo del proceso de manufactura.

La reducción en la distorsión resultado de la soldadura con láser resulta un ahorro en maquinado posterior de residuos de la soldadura.

Cada proceso de manufactura tiene tolerancias en muchas partes. Preparación de juntas, soldaduras, superficies terminadas, juntas de posición, juntas limpias probablemente varían el marco de manufactura. De esta manera es importante que el sistema de soldadura por láser sea diseñado con suficiente capacidad de adecuarse a pequeñas variaciones. Y la potencia a ampliar el láser deberá de ser ligeramente por arriba a la mínima requerida para soldaduras satisfactorias bajo condiciones ideales

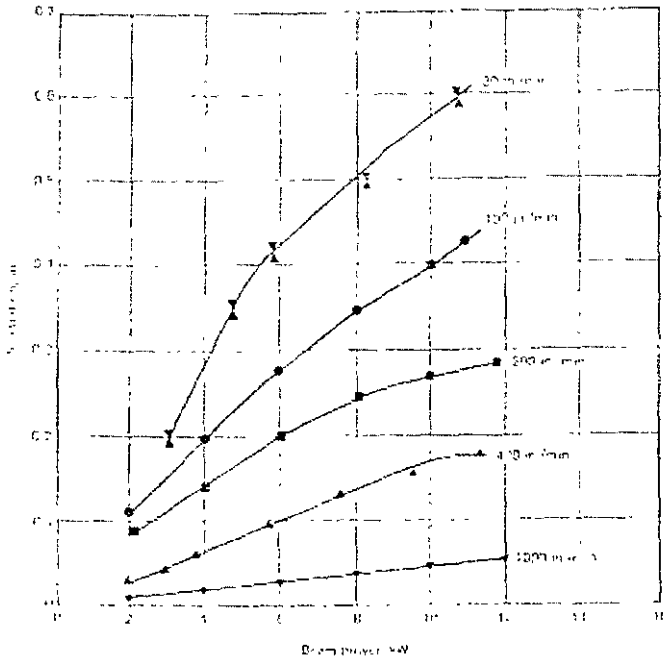


Fig. 2-6 Efectos de la potencia del haz en la penetración en acero inoxidable tipo 304 a varias velocidades de soldado.

II.90 FLEXIBILIDAD

Relativa a un posible incremento de productividad, necesidades futuras, alternativas de procesar otros materiales con el sistema de láser en un alto volumen de soldadura, estas preguntas de expansión y necesidades futuras deberán de ser importantes al considerar la capacidad de procesamiento de láser.

Un ejemplo obvio de requerir un sistema de láser expandible o flexible es un taller de láser. Posiblemente al principio establezcan la base de una simple aplicación pero en el futuro la aplicación no podrá ser identificable a detalle. Si este fuera el caso será conveniente escoger un láser de un nivel de potencia más allá de lo requerido de la aplicación que lo justifica inicialmente. Para el caso de requerir flexibilidad.

II.10 INTERACCION LASER Y MATERIAL

Cuando el haz de láser interactúa con el material, parte de la energía del haz de láser es absorbida por el material y el resto se refleja. Esta interacción y la partición de energía es función de las características de ambos, del haz y el material. Las propiedades del Haz de láser que afectan son intensidad, longitud de onda, longitud de pulso, divergencia, y la densidad de energía en el material. Las propiedades del material que afectan esta interacción son: reflectividad, coeficiente de absorción, densidad, difusión térmica, conductividad térmica, capacidad calorífica y calor contenido. La emisividad de un material (E) es la fracción de energía incidente absorbida durante la irradiación del Láser donde R. es la reflectividad del material, por lo tanto:

$$E = 1 - R_o.$$

Valores de E a temperatura ambiente para varios metales irradiados por láser de Nd: YAG (1.06 μm) son muy bajos e indican que sólo una pequeña cantidad de radiación es absorbida por el metal. Sin embargo, durante el periodo de tiempo que un pulso interactúa con el metal, la reflexión de metal cambia drásticamente como se muestra en la Fig. 2-7.

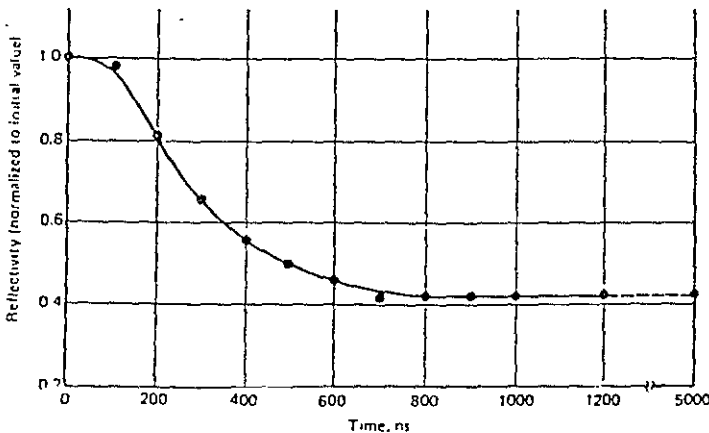


Fig 2-7 Reflectividad a 10 μm como una función del tiempo para la superficie de acero inoxidable, usando una excitación transversal atmosférica de láser de CO₂ suministrando $1.5 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ en pulsos de 200ns de ancho.

Esta figura muestra datos de reflectividad de acero inoxidable 304, siendo afectado por 200-ns de duración de excitación de pulsos transversales atmosféricos (TEA) láser CO₂ que entrega una densidad de potencia de $1.5 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$. La reflectividad caerá rápidamente en pocos cientos de nanosegundos, así la emisión sube rápidamente al mismo tiempo. Después aproximadamente de 1000ns, la emisividad es casi igual a la reflectividad.

Los efectos de cambio en la intensidad o en la densidad de energía en la superficie del material son más difícil de calcular cuantitativamente. Sin embargo para experimentos de LBW en los cuales la potencia y la velocidad de soldadura se varían. Pueden ser deducidos que sobre algunas intensidades críticas o densidades de energía, incrementando cualquiera de las dos efectivamente disminuye la escala de tiempo Fig. 2-7.

Comprimir la escala de tiempo significa que más energía es absorbida por el material al mismo tiempo o que la misma cantidad de energía es absorbida más rápido.

Las condiciones de la superficie del metal influyen mucho en la emisividad. En experimentos recientes la energía total retenida en un metal dividida por la energía incidente. (El coeficiente de acoplamiento térmico). Fue medida para diferentes condiciones en superficies de materiales (pulida, brumosa, oxidada). La superficie pulida tiene un coeficiente térmico de acoplamiento de 0.08. La superficie brumosa de metal tiene un coeficiente de 0.25 y la oxidada de 0.8. Estos experimentos fueron hechos en una aleación de hierro al 4% de carbono, usando láser de CO₂ de onda continua.

Así que, alterando las propiedades de la superficie, se logran grandes cambios en el coeficiente térmico de acoplamiento y podemos alcanzar incrementos en la eficiencia en la interacción láser metal.

Una vez que la energía de láser ha sido absorbida por el metal. La cantidad de energía que es requerida para fundir o evaporizar el metal es función de las propiedades termofísicas del metal, como son densidad, capacidad calorífica, temperaturas de fusión y evaporización, y calor latente de fusión y evaporización. Esta puede ser escrita como la primera ley de termodinámica, en la cual el total de la energía requerida para llevar una masa de metal de temperatura ambiente a su temperatura de evaporización puede ser expresada como:

$$q = \rho V (C_p \Delta T + H_f + C_{pl} \Delta T + H_v)$$

donde ρ es la densidad, V es el volumen del metal, $C_{ps}\Delta T$ es el calor requerido para llevar el metal de estado sólido a su punto de fusión. H_f es el calor latente de fusión, $C_{pl} \Delta T$ es el calor para elevar el metal líquido de su estado de fusión a su estado de ebullición. Y H_v es calor latente de evaporización. Así, conociendo las propiedades termofísicas de la aleación, se puede calcular una buena aproximación de la cantidad de energía requerida para llevar el metal del estado de fundición al estado de evaporización.

II.11 CONSIDERACIONES GENERALES DE LA SOLDADURA

La soldadura con láser puede hacerse a una variedad de potencias del láser, dependiendo si se desea una conducción limitada o una penetración profunda. Una conducción limitada es aquella en donde la potencia de láser funde el material sin evaporizarlo.

La potencia de láser a suministrar puede ser continua o pulsada. Si se utiliza uno de pulsos, el rango de pulsos deberá ser suficientemente rápido para permitir el traslape de pulsos y para que la junta solde rápidamente.

La soldadura por conducción limitada, está limitada a espesores de una hoja, mínimo de 0.08 in.

Soldadura de penetración profunda también llamada Keyhole Welds (soldadura de ojo de cerradura, ocurre cuando la alta potencia del haz de láser traspasa y evapora el material. Esta cavidad o keyhole, (ojo de cerradura) esta rodeado de material fundido. En otras palabras el haz en la pieza de trabajo ha hecho una soldadura.

II.12 EFECTOS CRITICOS

En LBW, la máxima potencia del láser está determinada por el láser, y el espesor del material a ser soldado es determinado por la aplicación. La mayor parte de las aplicaciones comunes de LBW son realizados en el modo de conducción limitada en hojas muy delgadas. En la fig.2-8. Se muestra un diagrama del espesor como función de la velocidad de soldado para la serie 300 de acero inoxidable para varios láser de baja potencia, en sus

dos variantes continuo y de pulsos. Los siguientes comentarios se han hecho referente a este comparativo de datos:

- Para velocidades de soldado 20 a 60 in/min., el láser de pulsos Nd: YAG de 150W puede soldar secciones más delgadas comparado con láser continuos de 400 W Nd: YAG. Esto se puede realizar, cambiando el rango de pulsos de 50 a 100 pulsos por segundo (pps).
- Debajo de 120 in/min., el láser de 400-W Nd: YAG de pulsos, solda secciones de mayor espesor que láser continuos de 375-W de CO₂ a la misma velocidad de soldado.
- Por arriba de 120 in/min, la soldadura continua de CO₂ y 375W soldará el mismo espesor que la de 400 W de pulsos, Nd: YAG a la misma velocidad.
- La soldadura de pulsos de 400 W Nd: YAG operando a 200 pulsos por segundo (PPS) realiza una soldadura de penetración, de aproximadamente el doble de espesor que la que haría a la misma velocidad, la de conducción limitada.

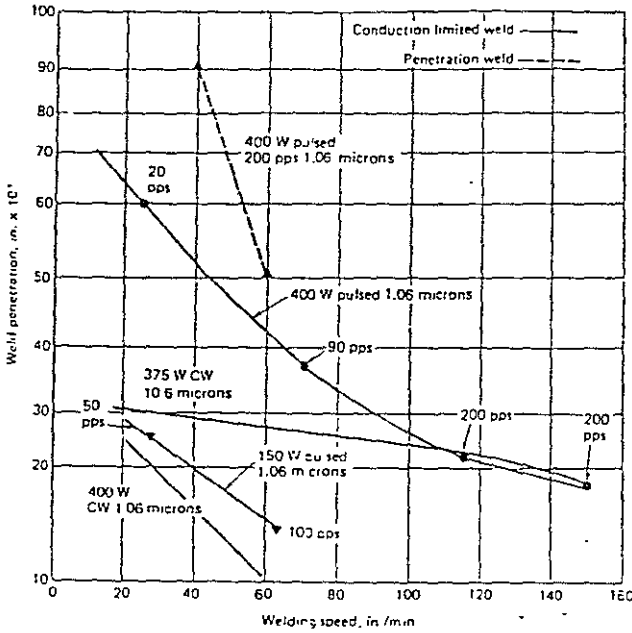


Fig 2-8 Efectos de la velocidad de soldado en la penetración en acero inoxidable serie 300.

Otro ejemplo de la relación entre espesor del material a ser soldado y velocidad de soldado a varias potencias se muestra en la Fig. 2-9, otra vez varios comentarios son apropiados:

- Tres materiales fueron soldados: Acero inoxidable, titanio y aluminio. Para una misma potencia y velocidad de soldado, y diferentes espesores de material y son dadas las propiedades termofísicas de los materiales.
- Para un espesor dado, incrementando la potencia se incrementa la velocidad de soldado.
- El máximo espesor que puede ser soldado es menor a 0.08in, para 0.06 in en acero inoxidable, el láser de 400W puede soldar a 1.2 in/min., mientras el láser de 100W puede únicamente soldar 0.012 in/min

El haz de láser con alta potencia de onda continua y de CO₂ es el más efectivo para penetración profunda u ojo de cerradura (keyhole) en el cual la fundición de láser es de volumen pequeña y cilíndrica y atraviesa el espesor del material. Una columna de vapor se produce en esta perforación y ésta es rodeada por parte líquida. (Fig. 2-10).

Como la columna de vapor se mueve a lo largo de la unión, el material en el lado de avance de la perforación es fundido conforme profundiza. El metal fundido fluye a lo largo de la base de la perforación y solidifica a lo largo de la parte trasera.

La columna de vapor se estabiliza por el balance entre la densidad de energía del haz del láser y la velocidad de soldadura. Así la densidad de energía del haz de láser en la pieza de trabajo y la velocidad de soldado, deben ser escogidos una para complementar a la otra. La densidad de energía que es muy alta resulta en una perforación muy inestable que puede causar goteo a través de material. La densidad de energía que es muy baja no permite evaporización y la formación de la perforación (keyhole). Una velocidad de soldadura muy rápida resulta en una penetración incompleta, y la velocidad que es demasiado lenta resulta en una zona de fusión muy ancha y posiblemente con goteo a través de la perforación.

La profundidad respecto a lo ancho de una perforación láser deberá ser mayor 4 a 1.

II.13 SOLDADURA CON HAZ DE LASER DE PULSOS

En la selección de un láser apropiado para soldadura, las siguientes diferencias entre láser de pulsos de CO₂ y YAG deben ser consideradas.

- Láser de pulsos YAG debe considerarse más pequeño comparado con láser de pulsos CO₂ o en igualdad de potencia.
- El Láser de Dióxido de Carbono está disponible en muchos niveles altos de potencia
- El láser itrio aluminio rojo (Yttrium Aluminium Garnet) no puede cortar o fundir materiales transparentes como vidrio o plástico, que lasers de CO₂ si pueden
- Altos picos en potencia promedio de salida están disponibles en láser de pulsos YAG comparado con unidades de pulsos de CO₂

- Láser itrio aluminio garnet utiliza vidrios ópticos, láser de CO₂ requiere de ópticos reflectivos o de exóticos lentes.
- Láser de dióxido de carbon son eléctricamente más efectivos que los láser YAG.
- Láser itrio aluminio garnet producen una longitud de luz de onda corta (1.06 μm) que es absorbida mejor para fundir comparado con longitudes de onda de luz de (10.6 μm) de láser de CO₂. Así el láser YAG es más conveniente para soldadura y fundición de alta reflectividad tal como aluminio y aleaciones de cobre.

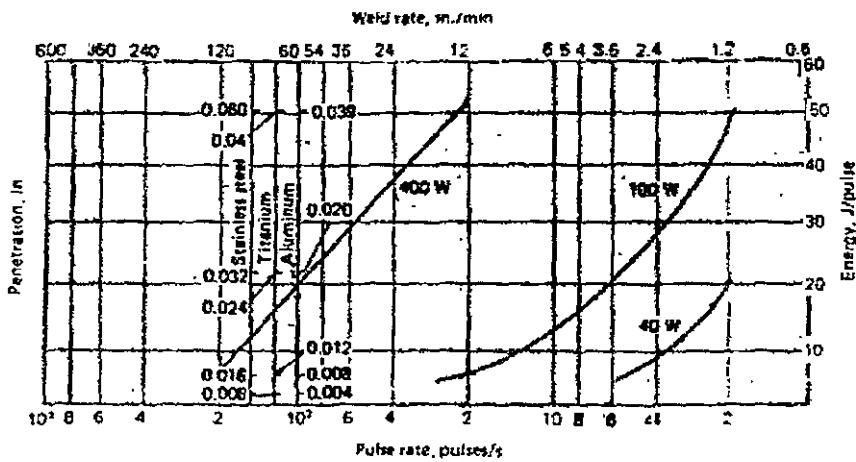


Fig. 2-9 Curvas de potencia para láser de pulsos Nd:YAG con una aproximación en la penetración para alcanzar una soldadura de alta calidad.

II.14 MEJORAMIENTO DEL PRODUCTO

Dentro de poco el desarrollo del láser demostrará la capacidad para soldar con alta precisión y mínimo daño térmico. El calor afecta zonas que son muy estrechas y el metal cercano a las soldaduras no son expuestas a calor excesivo comparado con técnicas de soldado convencionales. Esto se demuestra dramáticamente cuando por primera vez se le indica al usuario del láser remover una parte que acaba de ser soldada con láser.

Si se está familiarizado con el proceso convencional de soldadura la persona se opondrá a tocar la soldadura recientemente soldada, parte por miedo a ser quemado. Aunque el metal acabara de ser fundido, sin embargo el aumento de temperatura no es evidente, dado que el láser provee intensidades de magnitud mayores que las técnicas de soldadura convencionales. Comparado con las técnicas de soldadura convencional que requieren de un substancialmente alto incremento de temperatura comparable con una de láser para la formación de la misma unión.

Dado que solo un poco de calor afectará la parte a soldar, virtualmente no existe distorsión térmica como resultado de la soldadura con láser. No existe daño térmico en componentes sensibles. La baja temperatura de soldadura con láser reduce la demanda de fijación, dado que la fijación no se requiere para resistir o contener una larga expansión térmica o para actuar como disipador del calor.

II.15 REDUCCION DE COSTOS

La soldadura de láser reduce los costos en varias áreas. Primero, siempre existe menos proceso previo y posterior en las partes que son soldadas con láser. Segundo, el proceso con soldadura de láser presenta la facilidad de repetibilidad de soldadura de algún tipo en particular en sistemas de automatización. Uniendo con precisión y controlando por computadora la velocidad del láser teniendo bajos costos de producción. Tercero, porque el proceso de soldadura con láser es inherentemente más controlado y repetible comparado con procesos convencionales de soldaduras, los rangos de desecho se reducen dramáticamente, y en algunos casos se elimina totalmente.

Los diagramas de reflexión en la soldadura de láser varían alrededor del 70% para la mayor parte de los metales, y hasta 98% para plata y oro. Así el tamaño del punto del haz, el pico de potencia del láser son parámetros que pueden ser seleccionados, así es que esa reflexión cuando se considera absorbida, la potencia de concentración se encuentra en el orden de 10^6W/cm^2 o menos

Aunque existen varias teorías relativas a la velocidad de soldadura y penetración, la difusión térmica, longitud de pulso y relectividad, energía real de soldadura y longitud de pulso son determinadas empíricamente para cada material base, sobre la penetración y tamaño de trozo deseado.

La habilidad de soldadura de láser pulsada o de pulsos, ésta es determinada por ambos la capacidad de energía de cada pulso y la capacidad de potencia promedio. En general, una alta capacidad de energía o potencia por pulso es necesaria para producir soldadura de tamaño substancial o considerable (Penetración y diámetro de la pieza). La velocidad de producción deseada, así como la cantidad de puntos de soldadura en un tiempo determina la capacidad promedio requerido.

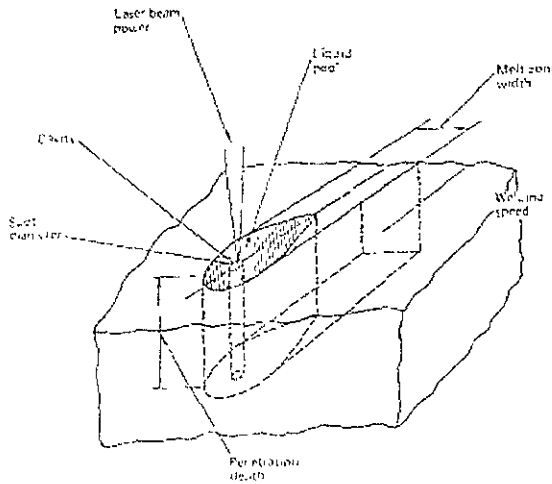


Fig 2-10 Características de una soldadura de penetración profunda

II.16 PUNTO DE SOLDADURA.

En principio, la producción de puntos de soldadura en rangos de hasta el máximo de pulsos de la máquina de soldadura de láser podría ser posible.

Equipos de soldadura láser están ahora disponibles para producir pulsos de 1-ms de duración y hasta rangos de 200 veces por segundo. En realidad sin embargo dos

limitaciones impiden esto. Para la mayor parte de las aplicaciones no es posible posicionar partes bajo el haz de láser a estos rangos. Segundo porque el pulso de láser requiere una cantidad finita de tiempo, el punto de láser posiblemente sea de aspecto borroso cuando las piezas continúen moviéndose a altos rangos durante la soldadura por pulsos. Por ejemplo a 200 pps, el punto del láser para hacer 0.3 pulgadas, aparte, las partes pasarán el haz de láser a un rango de 60 pulg/s. Para longitud de pulso de 1-ms, esto produce una mancha de 0.06 in, al punto a ser soldado. Esta cantidad de mancha reduce penetración y crea una larga más que aceptable zona de soldadura. Aunque las técnicas han sugerido como eliminar este problema hasta la fecha nadie lo ha probado.

Dentro de poco varias aplicaciones exitosas de punto de soldadura se conocerán donde la soldadura será de 20 puntos por segundo. Tales aplicaciones usan un sistema de control por computadora con partes moviéndose bajo un haz de láser fijo de manera continua. Los disparos del láser son controlados por la computadora que monitorea la posición de la mesa que mueve las piezas.

II.17 SOLDADURA DE COSTURA

Con frecuencia, la soldadura de costura es empleada para sellos herméticos en componentes. El láser pulsado YAG produce sellos herméticos traslapando puntos a un rango muy alto de repetición.

La operación pulsada para producción de costura continua no es únicamente para la soldadura de láser, es también usado en resistencia de avance y equipo de soldadura de arco, gas inerte. La operación de pulsos da inherentemente menor calor total y provee generalmente mejor control en la penetración de la soldadura, integridad de la pieza y mejor apariencia.

Con los modernos equipos de alto rango de pulsos ya disponibles, producir con velocidad es posible. Fig. (2-9) Muestra la velocidad de soldadura y penetración para Nd: YAG láser en acero inoxidable 300, aluminio y titanio.

II.18 SOLDADURA DE HAZ DE LASER DE ONDA CONTINUA

A potencias de niveles abajo de cientos de watts de promedio, la energía de láser es absorbida por la superficie de la pieza de trabajo, y la penetración del láser en la soldadura es por la conducción térmica. Este hecho limita la profundidad de penetración, así que la penetración de soldadura es realmente muy delgada. (Máximo espesor de 0.080 in). La mayor parte de las penetraciones será del orden de 0.040 in. la profundidad de la penetración podrá darse incrementando el tiempo (menor velocidad de soldadura). Lo cual resulta en un Haz más prolongado.

A 100-W de potencia promedio, con láser de pulsos repetitivos se tiene una herramienta de soldadura para algunos metales. Un láser continuo deberá emitir varios cientos de watts para tener una capacidad comparable de trabajo porque en la de pulsos un pico de potencia puede romper con la superficie de reflexión, permitiendo mayor eficiencia de absorción en la energía de láser. A potencias de cientos de watts en láser continuo (ambos Nd: YAG y CO_2) se ofrecen con una capacidad de soldado, velocidad de soldado y uniformidad en la soldadura satisfactorias.

La comparación entre profundidad de penetración y velocidad de soldadura para soldadura de costura a 375W de láser de onda continua de CO_2 se muestra en la figura 2-11.

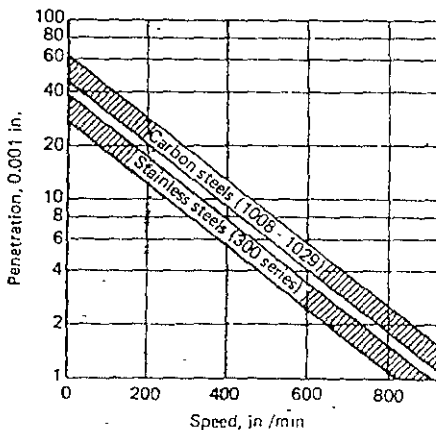


Fig. 2-11 Efectos de la velocidad de soldado en penetración profunda.

Los datos se muestran para dos diferentes tipos de acero, estos resultados se tomaron del extremo de la soldadura, con toda la penetración en la zona de la soldadura a través del material.

Muchas aplicaciones potenciales de soldadura pueden ser realizadas por combinación de penetración y velocidad, como se muestra. La alta velocidad es posible únicamente con materiales delgados dada la restricción impuesta por la conducción termal. Y a velocidades muy bajas la penetración se limita a aproximadamente 0.040 in para acero inoxidable y aproximadamente 0.060 in para acero al carbón.

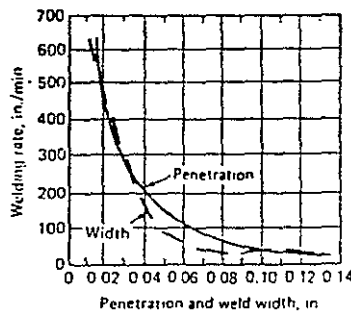


Fig. 2-12 Efectos de la velocidad de soldado en la penetración y espesor de la soldadura.

La figura 2-12 muestra una curva similar para acero inoxidable tipo 302, soldado por láser de onda continua de CO_2 a 1500-W. El incremento de potencia permite una penetración profunda, pero a una velocidad baja, la máxima penetración se limita a 0.12 in.

Vale la pena comparar los resultados obtenidos usando láser de CO_2 y Nd: YAG para soldar. Fig. 2-13 Muestra el rango de soldado obtenido con Nd: YAG continua, soldando acero inoxidable 304. Este resultado indica que la potencia requerida para realizar una soldadura a una velocidad dada o a un espesor dado de algún material es aproximadamente el mismo para el láser de Nd. YAG como para el láser de CO_2 . A una potencia de salida comparable. La diferencia en reflectividad de 1.06 y 10.6 μm no es tan importante para acero.

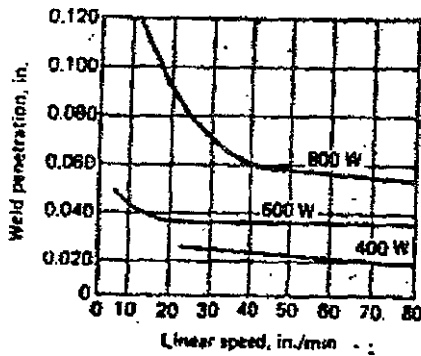


Fig. 2-13 Rangos obtenidos en soldadura de láser de onda continua Nd:YAG en acero inoxidable tipo 304.

Muchas descripciones de soldadura por láser en literatura de 1960, tiempo en el que el láser disponible para soldadura era de rubí o vidrio de Nd. eran de bajo rango de pulsos de repetición.

Soldadura de costura podría realizarse con estos láser, traslapando puntos de soldadura, pero con una velocidad de costura muy baja.

El desarrollo del láser de pulsos Nd: YAG y CO₂ con alta repetición de pulsos tiene facilidades de producción de soldadura de costura a rangos razonables de traslape de puntos.

Otra consideración es el efecto de variar el enfoque del Haz del láser. La Fig. 2-14, muestra como la penetración profunda y el ancho de la perforación varían para acero 1018. La soldadura fue realizada a 1500-W láser de onda continua y CO₂ a una velocidad de 50in/min.

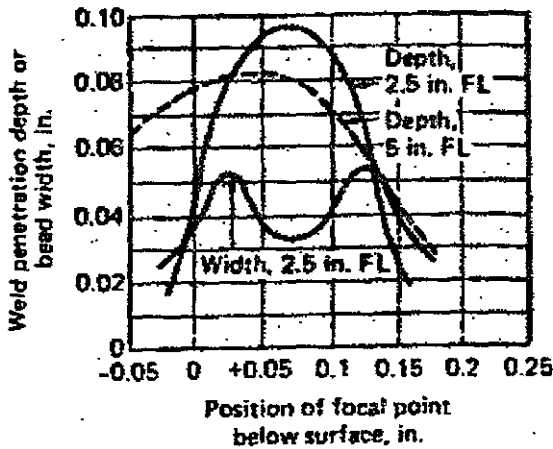


Fig. 2-14 Efectos de la posición del enfoque para acero 1018 en penetración de la soldadura y espesor de soldadura, usando lentes de varios enfoques largos (FL)

El efecto de cambiar el enfoque es aparente, una máxima penetración ocurre cuando el haz es enfocado a una distancia ligeramente cercana a la superficie. Cuando se utiliza un lente de distancia Focal más corta, la penetración es más profunda, y la mitad del espesor de la curva de penetración es mayor dado que el haz es enfocado en un mínimo grosor con un enfoque corto y un lente largo.

II.19 SOLDADURA DE OJO DE CERRADURA.

Cuando la alta potencia del haz de láser afecta sobre la superficie de la pieza de trabajo, parte de la energía es absorbida y parte es reflejada. La energía que es absorbida calienta la superficie, y si es suficiente, ocurrirá la fundición del material.

Cuando la alta potencia del haz de láser interactúa con la pieza de trabajo, ocurre la evaporización y se forma un plasma. Este plasma consistente en emisiones de metal fundido y electrones, que opaca al haz de láser, que se mueve sobre la superficie y efectivamente desacopla el haz de láser de la pieza de trabajo. Por lo que para soldar con haz de láser el plasma debe ser minimizado. Usualmente, éste es acoplado con el uso

directo de un chorro de alta velocidad de gas inerte sobre el área de interacción moviendo el plasma a un lado.

Dado que el haz de láser vaporiza y funde el material en la zona de fusión, esta área requiere de ser protegida de la atmósfera. La zona caliente de fusión puede absorber gases que no fácilmente se liberan cuando la soldadura se enfría, especialmente hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Una excesiva cantidad de estos gases resulta en una degradación de las propiedades mecánicas de la soldadura. La absorción de estos gases se puede minimizar protegiendo la zona de fusión con gases inertes, como el GMAW.

II.20 GAS PROTECTOR.

La soldadura de láser normalmente utiliza un gas inerte como protección para la soldadura, como son argón o helio. Para soldadura de pulsos o alguna otra de potencia moderada de onda continua, el gas protector es alimentado a la soldadura a lo largo del eje del haz de láser.

Para soldar con una soldadura de láser de alta potencia de CO₂ se requiere un accesorio de protección que cubra completamente la soldadura.

La soldadura láser de pulso simple de estado sólido es posible realizarla sin gas protector, dado que la parte de la soldadura es fundida durante muy poco tiempo.

El pulso de láser dura de 1 a 10ms., y la formación de la parte fundida dura mucho menos. La soldadura de costura usando puntos traslapados es una situación diferente y sí se recomienda un gas protector.

EFFECTOS DEL PLASMA

III.EFFECTOS DEL PLASMA

Una consecuencia indeseable asociada a densidades de potencias de 10^6 a 10^7 W/cm² con soldaduras de ojo de cerradura (keyhole) es la formación de una absorción de haz por el plasma en el punto de interacción entre el material y el haz. La ignición del plasma sucede cuando el grado de ionización en el medio local aumenta a un nivel crítico como resultado de la interacción con el intenso campo eléctrico asociado con la radiación láser.

A una densidad de potencia del rango para formar soldadura de ojo de cerradura, el plasma generado se propaga a velocidades subsónicas, dicho plasma es frecuentemente relacionado como la combustión que soporta al láser (LSC).

El plasma es indeseable en LBW, dado que este puede absorber una fracción significativa de la energía de haz e impedir que la energía efectiva de radiación se transfiera a la pieza de trabajo. La absorción de energía dentro del plasma ocurre por el proceso de radiación de frenado inverso. Y puede fácilmente exceder el 50% de la energía del láser entrante. Además de la absorción el plasma puede degradar la eficiencia de la soldadura por distorsión de las características ópticas del haz y la reducción de su capacidad de enfoque. Un breve repaso sigue sobre los aspectos de la formación del plasma, esto influye en la alta potencia y desempeño de LBW, y afecta negativamente en su control.

III.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

El haz de luz de láser se propaga como una onda electromagnética, se caracteriza por vectores de campo eléctricos y magnéticos. La intensidad del campo eléctrico asociado con la propagación del haz de láser se incrementa con la intensidad óptica del haz y es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda.

Si se asume que la ignición del plasma es causada por la precipitación en el proceso de ionización, entonces podrá ser comparada con el fenómeno de corto circuito en los gases. A este respecto se sabe que un campo eléctrico de 30,000 V/cm causa un corto circuito, entre dos planos paralelos separados por aire seco.

A la longitud de onda de CO_2 la radiación del láser ($10.6 \mu\text{m}$ ó $106\,000 \text{ \AA}$). La intensidad requerida para un corto circuito espontáneo está en el orden de 10^9 W/cm^2 . Tal intensidad es fácilmente alcanzable con láser de pulsos, y por lo tanto espontáneos cortos circuitos suceden en muchos gases. Por otro lado, la soldadura de ojo de cerradura (keyhole) con acabado liso, requiere densidades de potencia dos o tres por debajo del requerido para un corto circuito espontáneo. Por ejemplo densidades de potencia de 10^6 a 10^7 W/cm^2 . Densidades de potencia más bajas no dan como resultado la generación del modo esencial para un efectivo ojo de cerradura LBW, y densidades de potencias mayores provocan una excesiva evaporización. Esta última es más apropiada para cortar más que para soldar. Por lo tanto, problemas de plasma de ignición no deben esperarse bajo una condición normal de LBW. Las impurezas reducen el potencial de la chispa del corto circuito, sin embargo, así hacemos que las impurezas reduzcan el umbral del plasma de ignición para un haz de láser enfocado.

En el proceso de soldadura por láser, una pequeña cantidad de metal es evaporizada en el punto de interacción entre el material y el haz. Esta evaporización es inherente en la formación de la soldadura profunda de ojo de cerradura

La ionización térmica del metal caliente produce suficiente número de electrones libres en la zona de interacción para generar la ignición del plasma a la potencia de la intensidad del haz que es substancialmente por abajo de aquella requerida para realizar un espontáneo corto circuito. En la tabla 3-1 se puede checar el comportamiento y se puede obtener comparando el potencial de ionización de los gases y metales. El potencial de ionización de los metales parece estar en el orden de la mitad con respecto a los gases, y dado que el grado de ionización termal es una función exponencial del nivel de energía, la ionización a temperaturas comparables se diferencia en la orden de e^2 entre metales y gases. Un ejemplo de las consecuencias de esta diferencia se puede ver en la Fig. 3-2, donde se compara la absorción de la radiación del aluminio y el arc como una función de la temperatura.

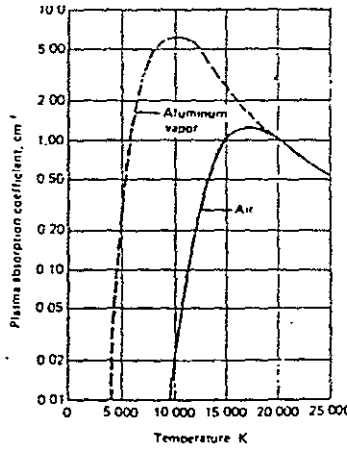


Fig 3-2 Efectos de la temperatura en el coeficiente de absorción del plasma Presión 1 atm.

Así, parece ser, que la ignición del plasma no es función únicamente de la intensidad del haz incidente del medio que lo rodea, sino también de las características del material que se solda. Porque ciertos tipos de metales que forman parte de aleaciones se evaporizan, la ignición se dominará por ciertos elementos que se encuentran dentro de la pieza de trabajo. Este comportamiento como un proceso de compleja interacción que incluye absorción de múltiples Fotones. Adicionalmente reduce la iniciación del umbral.

Material	First ionization potential, eV
Argon.....	15.68
Helium.....	24.46
Oxygen (O ₂).....	12.50
Neon (N ₂).....	15.54
Carbon dioxide(CO ₂).....	14.41
Water vapor (H ₂).....	12.56
Aluminum.....	5.96
Chromium.....	6.74
Nickel.....	7.61
Iron.....	7.83
Magnesium.....	7.61
Manganese.....	7.41

Tabla 3-1 Potencial de Ionización de gases comunes y metales.

III.2 EFECTOS EN EL DESEMPEÑO DE LA SOLDADURA.

La serie de muestras de penetración en una lámina mostradas en la figura 3-3 ilustran la manera de como el plasma de ignición influye la interacción en la soldadura de láser.

Toda la penetración de la soldadura se forma a una potencia del láser de 5KW y a una velocidad de soldadura de 80in/min. El material era 0.25in de espesor, tipo acero inoxidable 316. La penetración se forma con el material en una atmósfera inherente dentro de una cámara cerrada. Las condiciones atmosféricas dentro de la cámara fueron variadas desde el vacío hasta presión atmosférica. Para los dos casos mostrados, nitrógeno y argon fueron utilizados como medio ambiente

Inspeccionando la penetración formada a presión ambiente de 10^{-1} TORR se nota una penetración inicial estrecha con poca zona de fusión y penetración incompleta. Este comportamiento se asume que es causado por la ignición del plasma de vapor de metal dentro de la parte más profunda de la misma cavidad. Dicha ignición puede ser generada por la reducción del punto de ebullición de los componentes del acero inoxidable, 316 asociados con la reducción de presión. La inversión de la zona de fusión del perfil, extendida a lo largo de la longitud total de la penetración traspasa y no es solamente un fenómeno local. Este perfil persiste sobre el amplio rango de presiones en argón más que en el nitrógeno. A una presión de aproximadamente $1/3$ atm, se obtiene una penetración total en ambos nitrógeno y argón. Condiciones para la ignición de plasma de vapor de metal, interno, aparentemente todavía no se conocen para este nivel de presión, y reducir la presión a la mitad no fue suficiente para la ignición del plasma dentro y sobre el punto de interacción. La penetración de la soldadura obtenida era relativamente de perfil recto y parecido a la soldadura de láser de electrón de alto vacío, para el cual la ignición del plasma no es problema.

Como la presión ambiente fue aumentada hacia 1 atm, la penetración en ambos nitrógeno y argón disminuye, y la forma característica de reloj de arena asociada con la absorción del plasma y la distorsión del haz de luz es lo que resulta.

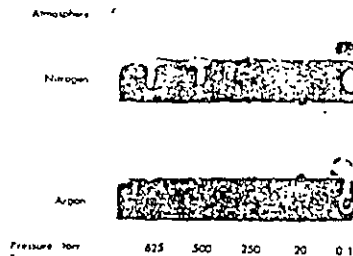


Fig. 3-3 Efectos del plasma en el desempeño de la soldadura el metal base fue acero inoxidable 316, potencia del láser 5KW y velocidad de 80 m/min

A una presión de 625 torr en argón, una pequeña interacción de fundición se ve que ocurre, aunque 5KW de potencia de haz se enfoque directamente a la pieza de trabajo. Un comportamiento similar se observa en nitrógeno, excepto porque en éste el efecto negativo de la absorción no es tan severo. El cual indica una tendencia a reducir la formación del

plasma. Este resultado es algo sorprendente en vista de la casi idéntica potencialidad de la primera ionización de estos dos gases. (Tabla 3-1) en experimentos similares con otros gases. El helio presentó la más alta resistencia a ignición del plasma.

Las señales que se dan de fotografías tomadas a una velocidad muy alta de la zona de interacción, revela que el plasma generado no se encuentra como un fenómeno de estado estable.

Analizando una película se encontró que la interacción inicial del haz con la pieza de trabajo resultarán en la generación de una ionización termal de vapor de metal que desencadena la ignición del plasma. Una vez con la ignición, el plasma inhibe la capacidad de interacción entre el haz y la pieza de trabajo, y lo propaga fuera de la pieza, expandiéndolo en un enfoque cónico y volumen inconveniente para el haz de láser. Cuando el plasma alcanza el punto en el cual la potencia de intensidad de haz es menos que la que el plasma, el haz se pierde, el plasma se apaga (extingue). Esto otra vez permite al haz interactuar con el material, iniciando otra formación de plasma.

III.3 TECNICA DE SUPRESION

Los aspectos de la ignición del plasma y sus efectos posteriores en el desempeño de LBW de alta potencia han sido detectados en las últimas experimentaciones de ignición del plasma. Y fue descubierto que puede ser prevenido removiendo el material ionizado de la zona de interacción usando un gas que cruza sobre la parte a soldar. Los efectos de un gas que atraviesa en el comienzo de la formación de la falla se ven en la fig. 3-4.

Helio es el gas más acostumbrado en LBW dada su alta resistencia a falla. Un control efectivo del plasma ha sido demostrado para niveles continuos de potencia de 100 KW.

La supresión del plasma con gas que atraviesa la zona de trabajo no tiene ninguna desventaja. Sin embargo, la alta velocidad de flujo requerida para suprimir el plasma puede provocar la aspiración de aire dentro de la soldadura y contaminarla. A velocidades suficientemente fuertes, la parte fundida puede ser desbaratada por el flujo, además, la protección del material a soldar de la contaminación atmosférica, con la generación de la cortina de gas inerte, usualmente argón dado que es más pesado que el aire.

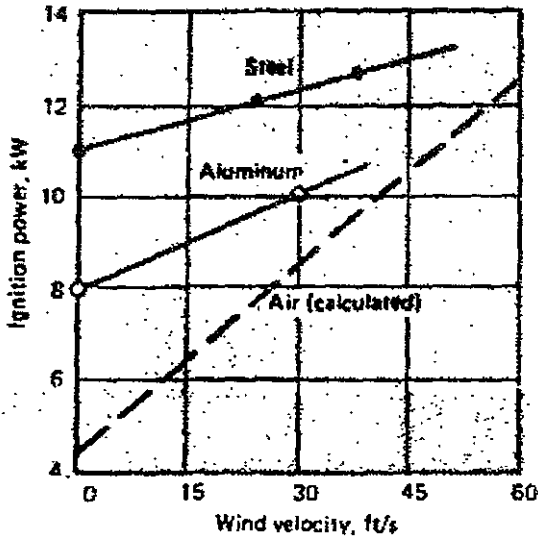


Fig 3-4 Efecto del umbral de potencia de ignición en un gas transversal de velocidad para 0.0008 in láser de punto de CO₂.

Estas condiciones son puntos de ventaja con el requerimiento de la supresión del plasma. Por lo tanto el arreglo entre proyección y supresión son necesarios para un óptimo desempeño de soldado y ha sido de importancia para desarrollar numerosos equipos que son supresores y protectores.

Un ejemplo de un mecanismo desarrollado para controlar el plasma es un tubo de pequeño diámetro que con precisión se posiciona en un ángulo especial sobre la zona de penetración de la soldadura (ojo de cerradura).

Dado que la pequeña cantidad del gas, suministrada en el momento es un minúsculo chorro que no es suficiente para causar distorsión en la zona fundida. La supresión del plasma se obtiene efectivamente y algo de interacción ocurre con el líquido dentro de la zona de fusión, contribuyendo la posibilidad de incrementar la zona de penetración. Las desventajas de esta técnica son la alta precisión con la que el chorro debe ser orientado y fragilidad térmica de la unidad.

Otra forma de suprimir el plasma utiliza el conocimiento de que la ignición no es espontánea, pero en cambio persiste en un periodo de tiempo generalmente excediendo los 500 μs sobre condiciones de soldado de ojo de cerradura (Keyhole). Así interrumpiendo el haz de láser una escala de tiempo menor que el tiempo para la formación del plasma resultará en la eliminación completa del plasma.

Pruebas usando este aproximamiento fueron conducidas a la interrupción de frecuencias de 24,000 Hz. Un resultado típico se muestra en la figura 3-5. Para una interrupción de frecuencia de 6,000 Hz (167 μs) y una potencia promedio del haz de 14 KW. El ciclo debió de haber sido de 75% para esta prueba por ejemplo, el tiempo de haz fue 128 μs y el tiempo fuera fue 39 μs . No existió ignición del plasma en esta alta velocidad en las fotos tomadas de la zona de interacción.



Fig. 3-5 Penetración de soldadura de Láser obtenida con haz interrumpido a 6000 Hz. El material fue acero aleado, 0.46 de espesor, a una velocidad de soldado de 80 m/min. usando 14kW.

El perfil de penetración obtenido en la figura 3-5 es extremadamente estrecho y relativamente de pared recta comparado con los obtenidos con un láser fijo de 14-kW usado

a flujo cruzado en técnica de supresión. Esta última muestra las características de cabeza de alfiler asociada con la extinción incompleta del plasma. De modo sorprendente sin embargo, la completa extinción del plasma no permite adelantar para aumentar una máxima penetración. Esto sugiere que para mejorar la penetración debemos tener un equipo o sistema de control de plasma. Posiblemente debiendo más influenciar el fluido dinámicamente a la cavidad de penetración, más que por los efectos del plasma. Eliminando las cabezas de clavo, sin embargo, si aumentan la velocidad de soldado un 60%, en efecto el volumen de material presentado dentro de la cabeza de clavo fue transferido a la porción central de la soldadura, creando una zona más grande de fusión en la unión y que es equivalente a la energía suministrada.

En soldadura de materiales delgados a alta velocidad, la supresión del plasma posiblemente sea inherente al mismo proceso. En el material evaporizado por la interacción del haz y la pieza de trabajo se mueve fuera de la superficie.

La dirección inicial de propagación es normal a la superficie, dado que el límite de la pieza de trabajo constituye una línea de presión constante. Si la velocidad de soldado es suficientemente alta, el material evaporizado dejará atrás una zona angular con un límite tangencial que es razón de la velocidad de propagación del material evaporizado. Para una velocidad de soldado suficiente, el haz no se propaga a través de suficiente material evaporizado que cause suficiente ionización térmica para la ignición del plasma.

Finalmente, menos problemas severos de ignición del plasma corresponden a radiaciones de longitud de onda corta. Aunque el láser de CO_2 es actualmente la única unidad adecuada para aplicaciones industriales de alta potencia, las pruebas nos condujeron con 3.8- μm deuterio fluoruro Láser Químico para explorar los efectos de la longitud de onda en la formación del plasma, y se encontró que los problemas para supresión del plasma fueron substancialmente menos severos que aquellos a 10.6 μm . Como en el caso de interrupción del haz en alta frecuencia, sin embargo, no se alcanza a incrementar al máximo la penetración al nivel de la potencia dada.

III.4 PROPIEDADES DE LA SOLDADURA

Las piezas soldadas con haz de láser fabricados con láser de pulsos son raramente probadas para checar sus propiedades mecánicas. La exactitud de la unión es lo más importante del proceso y con frecuencia un sellado perfecto y esto es lo que determina la selección del proceso de soldado.

Pruebas de maquinado en la unión, o punto de soldado, es otro asunto, porque la resistencia de la soldadura es secundario o no tan importante. Datos sobre las propiedades mecánicas raramente se reportan en artículos que describen la soldadura LBW por pulsos.

Las propiedades mecánicas de la soldadura con Haz de Láser continuo son más frecuentes de encontrar disponibles, resultados de pruebas de doblado, dureza, y pruebas a la fractura y ocasionalmente de fatiga son datos que se encuentran accesibles.

MATERIALES SOLDADOS CON LASER

IV. ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

Aunque el uso del láser de CO₂ de alta potencia para soldar titanio, acero inoxidable y aleaciones de acero, está totalmente desarrollado, sus aplicaciones en soldadura de aluminio no han merecido la suficiente atención. En la actualidad, muy pocos datos se encuentran disponibles en la literatura existente. Una de las razones que ha probado que las aleaciones de aluminio son muy difíciles de soldar por la alta reflectividad inicial de la superficie para radiación de 10.6- μ m para lasers de CO₂.

Los estudios de soldadura de láser de aleaciones de aluminio 5456 y 5086 revelan que estas dos aleaciones de aluminio parecen diferir en un grado considerable en su respuesta a la soldadura. Por ejemplo en la capacidad de penetración bajo las condiciones dadas y respecto a las apariencias. La penetración en 5456 fue substancialmente mayor, la diferencia fue atribuida al 1.5% mayor de contenido de magnesio contenido en esta aleación. La porosidad se presentó en porcentajes inaceptables en todas las muestras. Este problema es relativo a la viscosidad del líquido-metal y la tensión superficial, la interacción del gas protector, el plasma, con el haz y la picza de trabajo que da por resultado este fenómeno.

Se puede concluir que las aleaciones de aluminio son muy sensibles a la intensidad de la energía que se le aplica y las variables de la soldadura.

Se han logrado algunos éxitos con aleaciones de aluminio 2219 y 5456 han sido alcanzados, en ambos casos de estos materiales en soldaduras con espesores de no más de 0.4 in. con una microestructura aceptable y un perfil con burbujas, dado que la porosidad que no dejó de presentarse. Pruebas a la tensión en estas soldaduras resultaron con falla por partirse diagonalmente a través de la soldadura a un promedio de fuerza de 49.7 Ksi. Mientras que el último esfuerzo a la tensión obtenido para el metal original antes de la soldadura era 50 Ksi. La prueba a la torsión resultó aceptable en la punta de la soldadura. La prueba a la torsión tomada a lo largo de la unión soldada para aleación de aluminio 5456 de 0.2-in. de espesor exhibió dobleces con radios muy puntiagudos pero sin fractura en la soldadura si lo comparamos con un similar, soldadura hecha por GMAW.

Las propiedades mecánicas de soldadura de láser en 0.5in. de espesor en aleaciones de aluminio (5456) fueron medidas y probadas a la tensión hechas en estándares ASTM en una pieza de perfil redondo de diámetro 0.252 in. La soldadura era transversal a la dirección de la carga en las pruebas. Todas las soldaduras de aluminio fallaron en la zona de soldadura. La ductibilidad de estas piezas fue baja, y la cantidad de porosidad visible en la superficie de la fractura fue muy alta. En un espesor no estándar de 0.5-in. la prueba de ruptura dinámica de la muestra con corte en la soldadura fue usado para fracturar y probar la dureza (el campo estándar es 0.625 in). La porosidad se pudo también observar en la superficie de las fracturas.

La factibilidad de la soldadura de láser en otras tres aleaciones de aluminio (2036, 5182, 6009) se han estudiado a 1350-W en soldadura de láser continua de CO₂ y fue usado para soldado alrededor en un espesor de 0.04 in. de lámina de aluminio. La composición de la aleación se checó para determinar si los parámetros de irradiación eran críticos. Soldadura con láser libre de grietas con óptimos parámetros de radiación se pudo lograr, para aleación de aluminio 2036. Aleaciones de aluminio 5182 fueron más fáciles de soldar, comparadas con 2036 y 6009. Los parámetros de irradiación del láser no fueron muy críticos para lograr soldaduras aceptables, pero se observó una pérdida muy significativa de magnesio por evaporación. Aleaciones de aluminio 6009 demostraron poca facilidad para ser soldados. Los parámetros de irradiación de láser requieren para una buena soldadura ser extremadamente críticos.

Una excesiva precipitación de AL-Mg-Si se observó y ha sido la causa de las rupturas en la zona soldada. Sin embargo si adicionamos frío al material irradiado por una placa fría, facilitamos una buena soldadura.

Un estudio sistemático de la soldadura con láser de un espesor de 1/4in de una aleación de Al-Mg (5083) a 10-KW y láser de CO₂ y sistema de gas protector en el cual el plasma formado durante la interacción del láser y el material es llevado dentro de la zona de soldadura (Keyhole), fue un éxito produciendo en apariencia una soldadura libre de porosidad.

IV.1 ACERO

La mayor parte de los parámetros estudiados inicialmente sobre soldadura con láser fueron concluidos para acero inoxidable, dada la importancia del acero inoxidable en maquinarias de alta potencia y la industria química.

Experimentos con soldadura LBW de alta potencia con acero inoxidable de la serie 300 se han realizados. La soldadura se formó en acero inoxidable con la siguiente relación (Profundidad a razón de ancho) tanto como 12 a 1. Estos datos fueron obtenidos en una serie de muestras laminares expuestas a pruebas de penetración en condiciones ambientales ó atmosféricas usando un láser de hasta 5.5kW de potencia. Y se concluye que la profundidad de la penetración es una constante de la potencia del láser y es relativa a la velocidad de soldado.

Inspecciones radiográficas de soldaduras selectas de láser, en acero inoxidable han mostrado que la alta densidad sin porosidad en la soldadura pueden ser obtenidas. Pruebas a la tensión de acero inoxidable han mostrado que la resistencia de la unión con una selección apropiada de los parámetros de soldadura, es igual que los de material original. Observaciones similares se hicieron para acero 316, pero los datos obtenidos para acero 310 fueron menos alentadores.

Pruebas a la tensión en los extremos de acero inoxidable 316 y 310 y acero ferrítico Durol W30 fueron realizados a muestras lisas donde se usaron con el plano de la soldadura de láser corriendo transversalmente y tomando como longitud de referencia la parte central medida de lado a lado. La temperatura ambiente sobre el eje de prueba a la tensión fue realizada a una velocidad de cabezal de 0.064 in/s, correspondiendo al rango de tensión de 2.8×10^{-2} /s. La soldadura de haz de láser de 0.24in de espesor de acero inoxidable 316 y Durol de W30 fueron comparados con GTAW, EBW, y soldadura del método de arco de plasma (PAW) y mejor calidad de soldadura, EBW y LBW son técnicas preferibles. Sin embargo, uno debe tener en mente que el haz de electrones requiere una cámara al vacío mientras el láser no la necesita.

Soldados a tope dos cuadrados con soldadura autógena de X-80 Arctic de acero y después usando una soldadura de láser de alta potencia continua el CO₂ reportó que soldando con

una sola pasada y con dos pasadas, técnica usada para un material de 0.52-in. de espesor. Con la soldadura de pasada doble se logró tener una estructura con grano de menor tamaño comparado con la soldadura de una sola pasada. La capa superior para soldadura de doble pasada fue tan grande como 264 ft lb., y la temperatura de transición fue de -6° F. Las propiedades mecánicas de la soldadura de láser parecen ser mejores que las del material base. Por lo tanto, LBW promete ser el método indicado para aplicaciones de soldadura de alta calidad, en tubos de gran diámetro.

Una de las principales áreas Comerciales para la soldadura es en la manufactura de materiales delgados. La posibilidad de soldadura de alta velocidad de acero usado en latas (hojalata y hoja de lata libre de acero) con un láser continuo de CO_2 . La velocidad de soldado excesivo de 62 ft/min pudo alcanzarse para el borde en la lámina soldada de 0.008-in. de espesor, usando una potencia de 1,950 W en el láser. El proceso de soldadura con láser fue comparado con otro proceso de fabricación de latas y se encontró que es el único método capaz de soldar hojalata libre de acero (con una capa de $0.01 \mu\text{m}$ de cromo (Chromium) y $0.04 \mu\text{m}$ de capa de óxido de cromo como inhibidor de óxido) sin preparación auxiliar.

Aunque una soldadura de láser continuo de CO_2 de 2-KW por sí misma no alcanzaría la velocidad de soldado requerida, el arco aumentado de ésta parece capaz de lograrlo.

Las propiedades mecánicas de soldadura de Láser en lámina de hojalata y hojalata libre de acero parecen ser tan buenas como el del material base.

Todas las características durante las pruebas a la tensión fueron observadas en el material base. Las radiografías mostraron que las soldaduras de láser estaban en muy buen estado. Simples pruebas de fatiga al doblar revelaron un rango de endurecimiento de 0.45 a 0.5. Datos para rangos de corrosión de la soldadura de Láser usando la exploración del método Tafel han mostrado que la zona de soldado es al final tan resistente o mejor a la corrosión que el material base. En conclusión soldaduras sanas de buena apariencia y con buenas propiedades mecánicas pueden ser realizadas con láser en hojalata y hojalata libre de acero. El haz de láser tiene un haz muy estrecho y puede hacerse pasar a través de áreas pintadas. Esta soldadura es autógena y por lo tanto no presenta problemas de reciclaje tal como soldaduras selladas hechas en latas

IV.2 TITANIO Y SUS ALEACIONES

La técnica EBW ha sido utilizada con mayor frecuencia que LBW para soldadura en Ti-6Al-4V, y aleaciones muy usadas en la industria espacial por su gran resistencia en relación a su peso. Sin embargo la penetración profunda de EBW se puede obtener únicamente para distancias cortas, bajo condiciones al vacío. Para una óptima eficiencia, EBW es puesto en cámaras al vacío, en contraste con el haz de láser de CO₂ que puede ser transmitido en distancias apreciables a través de la atmósfera sin serios problemas de atenuación o degradación óptica. Así, el láser ofrece una fácil maniobrabilidad, limpieza química, alta intensidad, proceso de soldadura atmosférica que produce soldadura de alta penetración, con un haz de luz muy estrecho y una muy baja distorsión subsecuente.

La aplicación de la técnica del láser a metales así como aleaciones de titanio, requiere una extrema limpieza para alcanzar una soldadura sana, es de gran interés para la industria aeroespacial y química. Mas generalmente, la técnica de láser es más interesante para el punto de vista de soldaduras de metales químicamente sensibles y con una compleja dependencia estructural a la temperatura. La importancia y la necesidad de un método para lograr una mejor unión en titanio y sus aleaciones ha resultado en varias investigaciones de técnicas de LBW, sobre varios rangos de potencia.

La relación entre los parámetros LBW la metalurgia y las propiedades mecánicas de la soldadura de láser Ti-6Al-4V y titanio puro, comercial fueron reportados, La velocidad de soldado arriba de 50 ft/min se obtuvo para un espesor de 0.04in Ti-6Al-4V usando 4.7KW de potencia del láser.

Radiografías de rayos X de piezas bien soldadas con láser de Ti 6Al-4V y titanio comercial puro no mostraron grietas, porosidad o inclusiones. Se observó también una muy baja porosidad en titanio y sus aleaciones lo cual se puede ver a simple vista. Así como soldaduras radiográficamente sanas se lograron con Banas donde ahorrar dinero no fue importante.

Pruebas a la tensión realizadas en uniones soldadas con láser en aleaciones de titanio revelan que la soldadura es finalmente tan fuerte como el material base bajo simples

dobles para la prueba de fatiga, el rango de endurecimiento para muestras soldadas (con soldadura transversal y central) se encontró que era 0.40 a 0.47 y para muestras sin soldar de 0.5 se ha reportado ya que, bajo condiciones de soldadura apropiadas se puede hacer que el Ti-6Al-4V tenga las mismas características a la fatiga que el material base.

La estructura martensita en la zona de soldadura es la responsable de buenas propiedades a la tensión de la soldadura con láser en aleaciones de titanio. Comparando la microestructura con la predicción del modelo de transferencia de calor en tres dimensiones, el rango de enfriamiento de la zona soldada fue estimada que es 10^4 °C/s. Este rápido enfriamiento es la causa de la estructura de martensita. El análisis de oxígeno total de una simple soldadura indicó que no existió contaminación por oxígeno que sea significativa durante la soldadura de láser utilizando gas protector durante ésta.

Un estudio comparativo de haz de electrones y haz de láser, y soldadura de arco de plasma en aleación de Ti-6Al-4V fue realizado por Banas. Radiografías de soldaduras en buen estado se produjeron por tres técnicas. La soldadura con haz de electrones mostró ser poco estrecha y una apariencia poco uniforme debido a las salpicaduras en la superficie, mientras la soldadura con arco se considera más ancha, pero también poco uniforme en densidad. Soldadura con láser es más estrecha que de arco y es comparablemente mucho más uniforme que la soldadura de haz de electrones.

Siguiendo con las pruebas a la presión durante dos horas y a temperatura de 1000° F, las soldaduras producidas por los tres métodos demostraron resistencia equivalente o superior a los del material base. Soldadura con haz de láser en aleaciones de titanio (Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo), resultaron mecánicamente satisfactorias, las láminas fueron limpiadas con chorro de arena, y el borde a soldar fue una mojado con una solución de HF-HNO₃. Y lavado con alcohol y secado con nitrógeno. Y las partes a soldar se protegieron con un gas de helio. La interacción de la pieza de trabajo y el haz fue protegido con un chorro de helio.

El resultado de la prueba se muestra en la tabla 3-3.

Yield strength.....	121-128 ksi
Ultimate tensile strength.....	134-137 ksi
Elongation.....	10-19%
Reduction in area.....	15-43%
Charpy V-notch energy.....	31-39 ft lb.
Dynamic tear energy.....	181-189 ft. lb
K_{ISCC}	75-86 ksi $\sqrt{\text{in.}}$

Tabla 3-3 propiedades mecánicas de T-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo soldado con láser.

El CVN y los valores de rupturas dinámicos fueron determinados a 32 y 77^oF. Estas evaluaciones fueron favorables comparadas con aquéllas de la placa base.

Un preagrietamiento de una viga en cantiliver de una muestra, fue fracturado en el aire previo a la prueba de ruptura de tensión y corrosión. Un valor de AK de 82 Ksi $\sqrt{\text{in}}$ fue obtenido para ruptura en el aire. Como se ve en la tabla 3-3, este valor cae dentro del rango de K_{ISCC} , indicando no susceptibilidad de la soldadura de láser del Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo. al rompimiento por efecto de la corrosión bajo las condiciones de la prueba.

IV.3 ALEACIONES DE IRIDIO

La alta potencia de láser continuo de CO₂ resulta ser una atractiva herramienta para unir aleaciones difíciles de soldar, como aleaciones de Torio en Iridio (DOP-14 y DOP-16) esta aleación se agrieta severamente durante GTAW o soldadura con alto enfoque de haz de electrones. Se han reportado soldaduras con láser de muy buena calidad libre de grietas en DOP-14 por David y Liv. Esto es debido a la característica de alta concentración de calor de la fuente disponible con el láser y el perfeccionamiento en la estructura de la zona de fusión. La fortaleza de la estructura de fusión será función de la velocidad de soldado.

Soldadura de láser con refinamiento en la estructura de la zona de fusión se reportó también en aleaciones en DOP 26. La estructura en la zona de fusión de la soldadura de Láser es comparada con la mejor estructura obtenida con soldadura de arco usando arco oscilatorio.

V. DISEÑO DE LAS UNIONES PARA SOLDADURA CON HAZ DE LASER

La mayor parte de formas geométricas usadas en soldadura térmica tradicionales son adecuadas para LBW. La más usada para láser es el empalme plano y tipo solapa o traslape.

El ajuste requerido en el espesor del material se muestra en la Fig. 3-7 y 3-8. Aunque la distorsión durante el proceso de soldadura es mínimo. Alguna fijación es recomendada para mantener las piezas en posición durante la realización de la soldadura.

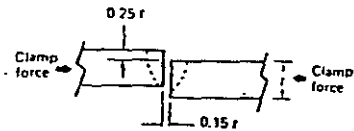


Fig.3-7 Típica tolerancia
unión de extremos.

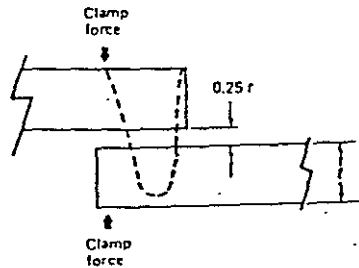


Fig.3-8 Típica tolerancia unión de
Traslape.

Las tolerancias mostradas son aplicables a aleaciones ferrosas y de níquel. Algunas tolerancias más estrictas son requeridas para buenos conductores, tales como aleaciones de cobre y aluminio.

La cantidad de claro (vacío) en soldadura de empalme plano también determina el grado de concavidad de la soldadura, dado que normalmente no se usa metal de relleno.

En la soldadura de traslape (Fig 3-8), el 25% es la tolerancia referente al más delgado los espesores de los dos metales a soldar es lo recomendado, y es preferible soldar el material más delgado al más pesado de los materiales. Un exceso de espacio entre las piezas causa que la pieza de arriba se queme más que soldar.

El interés en componentes con soldadura en hojas de metal se ha reforzado tanto en la industria automotriz como en aplicaciones industriales.

La figura 3-9 muestra una unión de esquina soldada con láser, donde la inclinación del borde es fundido para formar una barra que funciona como ángulo de refuerzo.

Con los parámetros adecuados, el metal puede hacerse que llene completamente el espacio entre las dos hojas. Formando una esquina cuyo interior es fácil de limpiar y de mantener higiénico. Cuando lo comparamos con una soldadura convencional de doble cerradura, esta unión ofrece un ahorro de material y de tiempo, menores costos muertos y permite el uso de materiales que tienen un límite de flujo plástico.

Esta soldadura se hace posible por la precisión del control de la potencia y suave encendido y apagado del haz de láser.

La figura 3-10 muestra una soldadura con láser de un solo punto de candado. Este proceso proporciona un sellado hermético; sin embargo, la curvatura de la unión debe de conservar las tolerancias de la figura 3-8. Especialmente entre las dos o tres láminas más delgadas a unir. Poco calor o en su caso ausencia de éste es necesario para unir los estos materiales. Mientras que para la soldadura de la figura 3-9 si se requiere de calor. Con frecuencia el diseño de las uniones es muy similar a aquéllos de soldadura por EBW.. La figura 3-11 muestra unión diseñada para LBW en hojas de lámina. La esquina soldada en la fig. 3.11j provee una unión muy rígida entre las dos partes laminares de metal. Con suficiente potencia para fundir las pestañas. El material fundido fluye y reviste tensión para la gota (El área gris). Es importante tener un montaje rígido, y es posible necesitar platos de enfriamiento y rebordes similares pueden ser realizados en bridas y uniones de borde. La fig. 3-11 (K) llamada de soldadura de beso, dado que el baño de fundición formado donde las dos piezas se besan, produce un pequeño ángulo entre las dos partes que atrapan la mayor parte de la energía del haz de láser. Si se requiere presión para la soldadura esta sería muy baja, pero la superficie de empalme deberá tener la forma adecuada. El hueco entre las hojas de aleación permitirán el escape de la radiación. Esta unión realizada satisfactoriamente une delgadas hojas en casos donde la soldadura de puntos atravesaría quemando. El haz es atrapado, como en la soldadura de besos, permitiendo una completa penetración de soldadura de la unión en T para un lado únicamente, una ventaja cuando el lado más lejano de la T es inaccesible, atrapando el haz ayudando a la penetración del haz de láser para la soldadura.

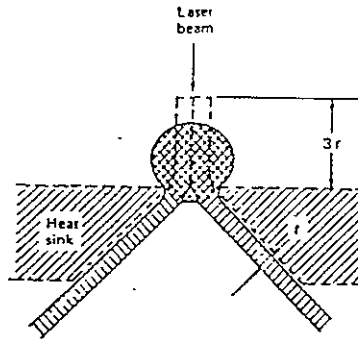


Fig. 3-9 Soldadura de láser formando una esquina. Note la recomendación de penetración de calor y las dimensiones para lograr que la esquina sea una barra de soporte.

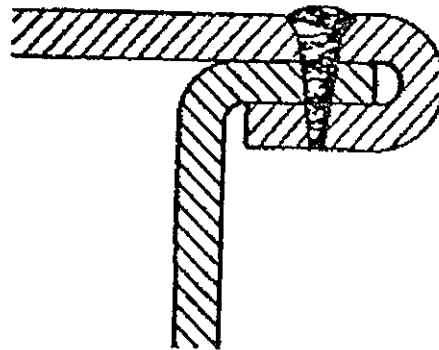


Fig. 3.10 Soldadura de láser de simple sello de candado.

La configuración de la unión para cables Fig. 3-12 fue desarrollado por la industria electrónica. Esta soldadura debe ser usada con láser de estado-sólido de pulsos. Aunque no necesariamente. Para uniones de cable a cable. Los dos cables deben compartir la energía incidente del láser, por ejemplo en la unión cruzada Fig. 3-12 (c), el haz de láser es dirigido a la intersección de los cables, así éstos dos cables toman directamente la energía del haz.

La terminal o soldadura de arrastre (Fig. 3-12e) queda mejor realizado cuando la masa terminada de muñón, es igual a la masa térmica del alambre que la enrolla. Dirigiendo el haz de láser hacia el muñón ayuda a evitar la fundición a través del alambre.

La soldadura de láser para conexiones eléctricas se puede hacer sin pelar el cable, el láser evapora el aislamiento.

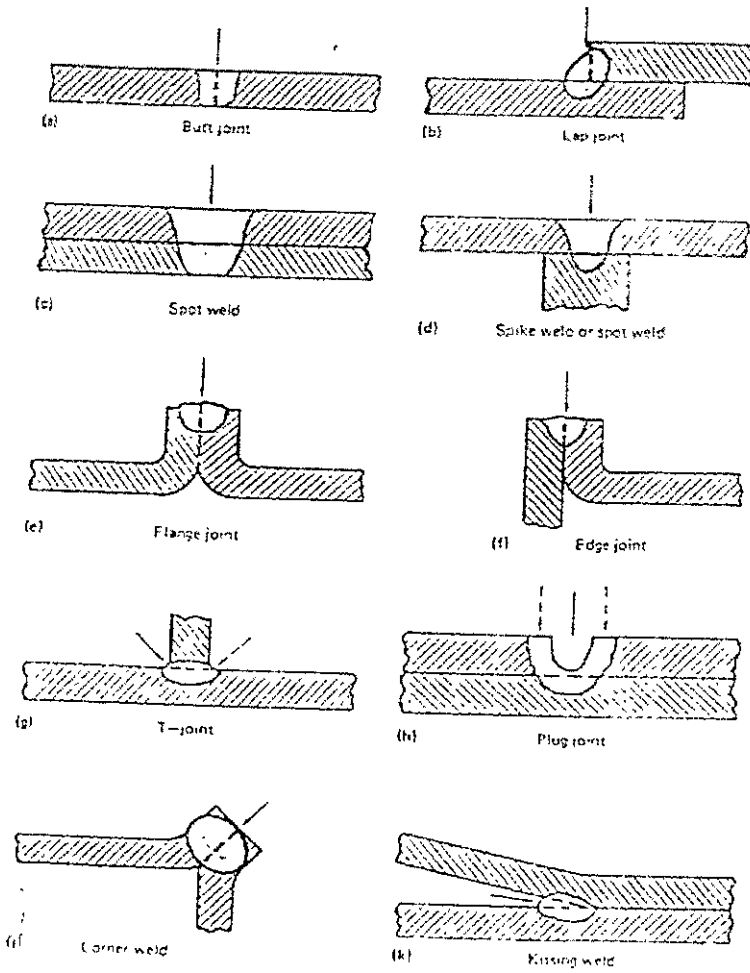


Fig 3-11 Diseño de juntas para soldadura con haz de láser en hojas de metal: Las flechas muestran la dirección del haz de láser

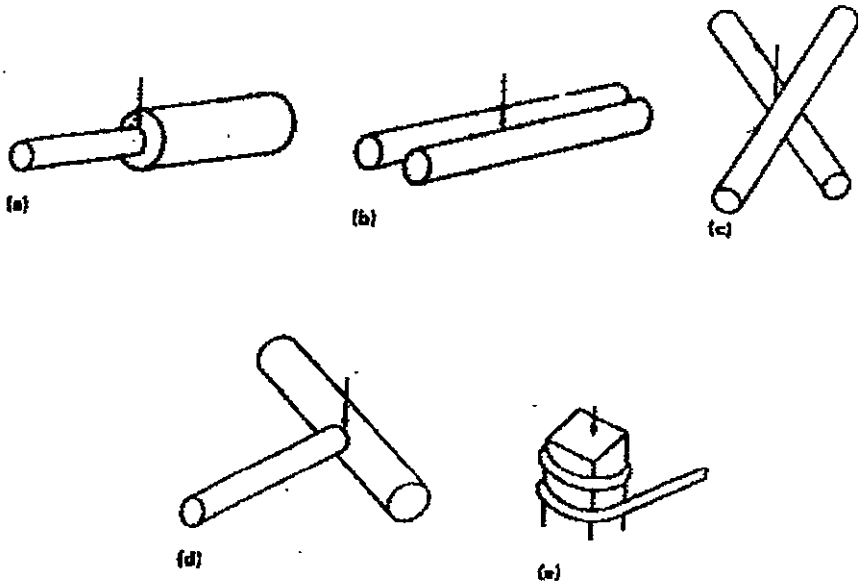


Fig.3-12 Diseño de uniones para soldar por haz de láser en alambre. Las flechas muestran la dirección del haz del láser (a)soldadura de tope.(b)soldadura lateral de perfiles circulares.(c)soldadura de cruz.(d)soldadura en T.(e)soldadura de terminal

PARAMETROS PARA CONSIDERAR EN UN PROCESO DE SOLDADURA CON LASER

VI. DISEÑOS OPTICOS Y TRANSPORTE DE HAZ

Entre los láseres que son apropiados para soldar, la naturaleza de la capacidad varía en rangos muy extremos. No únicamente son diferentes en la longitud de onda, como en la comparación entre Neodimio y CO₂ donde existen diferencias y, desde luego en la potencia. Estas diferencias en la configuración de potencia de salida requiere diversos tratamientos del sistema de transportación de haz y formas ópticas de haz. En esta selección, los diferentes elementos de diseño del sistema óptico son consideradas individualmente.

VI.1 MEDIDAS DE POTENCIA

Inmediatamente después de la incorporación del láser será aconsejable tener una medición de la potencia de éste. El equipo para monitorear la potencia usualmente se incorpora como característica estándar en la mayor parte de las fuentes de láser de alta potencia. Este equipo mide la potencia de salida en un sistema continuo que están de moda o intermitente entre los diferentes usos del haz.

Los mecanismos que miden potencia de manera continua son los aconsejables dado que no requerimos tiempos muertos dedicados a pruebas. Sin embargo, los equipos para monitorear potencia continua, es posible que introduzcan oscilaciones muy pequeñas en la salida de potencia del haz.

Si son del tipo de monitoreo de potencia que muestra la potencia de salida del haz con una rápida rotación en lámina o alambre. En la mayor parte de los casos, este método de monitorear la medida de potencia del haz no es perjudicial; sin embargo en aplicaciones excepcionales se requiere potencia de salida muy consistente, dado que pequeñas variaciones pueden ser determinantes. En otras técnicas convenientes para monitoreo de potencia en láseres de relativamente baja potencia (1 KW) la potencia evaluada es determinada a través de la medición de una transmisión en particular en la parte trasera del

reflector en el resonador del láser. Aunque esta técnica provee una medición continua de la salida de potencia, la medición es muy subjetiva, dado que el valor de esta medición no es realmente la potencia de salida.

VI.2 SEÑALAMIENTO AUXILIAR DE HELIO-NEON.

En adición al equipo de medición de la potencia, muchas fuentes de láser, particularmente aquellas que involucran alta potencia en CO₂, utilizan un señalador de helio-neón (He-Ne) en baja potencia para ayudar en la alineación como medio óptico externo.

Esta prealineación con el señalador helio-neón está diseñado para interponer su haz visible a lo largo de la trayectoria coaxial con la del haz de infrarroja del láser de alta potencia y es extremadamente usual en alineación de sistemas ópticos muy largos o complejos que seguramente no se pueden alinear por otro medio dado la alta potencia involucrada. En el caso de baja potencia (haz de subkilowatt de 10.6 o 1.06 μm de longitud de onda), este sistema de señalamiento con frecuencia no se incorpora dado el impacto que tendría en el costo de la fuente de láser.

En estos casos sistemas externos ópticos de alineación son posiblemente de procedimiento más tedioso.

VI.3 TRASPORTACION DE HAZ

Dada una fuente de láser con específica longitud de onda, divergencia y potencia de salida. La prueba de diseño óptico externo podría proceder. El primer elemento en esta prueba es el establecimiento de la trayectoria del haz de la fuente de láser a la pieza de trabajo. En alguna producción específica con el sistema de láser. La trayectoria posiblemente corta podría involucrar uno o dos espejos o lentes. Sin embargo en muchos otros diseños de sistemas de láser, particularmente aquellos que involucran múltiples conceptos de estación de trabajo. La trayectoria del haz y el sistema de transportación óptica del haz posiblemente sea substancialmente largo y/o complicado. Una de las primeras preguntas que debe hacerse en la porción de transporte del haz del sistema óptico externo es la distancia desde la fuente de láser hacia el lugar de trabajo. Dado que todos los sistemas de

láser considerados aquí tienen un nivel de divergencia o variación desde la perfecta alineación de la fuente del haz, el diámetro de los espejos o lentes adecuados para proporcionarlos con un haz específico deben ser evaluados en distancia.

Para ilustrar este punto, consideremos la diferencia entre divergencia de 3 mrad, 1-in de diámetro y haz de CO₂ y 20 mrad-divergente, 1/4-in de diámetro y haz de láser Nd: YAG. La fuente de haz de láser de Nd: YAG para distancias cortas requiere un espejo significativamente pequeño comparados con los del Láser de CO₂. Cuando se ve que la divergencia restringe la habilidad para transportar haz, alineado sobre la distancia requerida, es conveniente reajustar el haz de láser a un diámetro mayor, antes de transportarlo al lugar de trabajo. Muy simple, si el haz es reajustado a dos veces su diámetro original, la divergencia está partida a la mitad, así, la expansión del haz o reajuste es conveniente para proveer transportabilidad aumentada para el haz en bruto de salida.

VI.4 MATERIALES OPTICOS

La opción de espejos como materiales de sistema de transporte está en función de la longitud de onda, potencia y diámetro de haz. Lo más importante, el diámetro del espejo debe ser seleccionado, de este modo el diámetro mayor de haz que se pudiera tener caerá dentro del centro hasta 2/3 partes del diámetro del espejo.

Esta consideración posiblemente sea revisada como una consideración especial, por fabricantes de espejos, sin embargo, ésta es la causa que (1) ocurran algunas variaciones en el diámetro del haz, (2) ocurran variaciones en el haz de señalamiento, (3) con rara excepción, los elementos ópticos son más precisos cerca de la porción central.

Teniendo la selección de un espejo de diámetro apropiado para el sistema de transportación del haz, la siguiente consideración más importante es la habilidad de los espejos de ocuparse del nivel de potencia de un haz de láser específico. Dado que toda la superficie de reflectividad absorbe una porción medible de potencia del láser, esta potencia debe ser disipada en un modo que no induzca distorsión en la cara del espejo por virtud de gradientes térmicos. La mayor parte de los fabricantes de espejos especifican densidades

continua y/o de potencia pico que posiblemente sean usados en sus aparatos. Debe tenerse cuidado en este respecto dado que la reflectividad de los espejos se degrada como una función del tiempo de uso. La capacidad de mantener consistente la superficie de alta reflectividad en los espejos de láser es una función de material del espejo y la calidad de la atmósfera que rodea al espejo.

Partículas de polvo, humedad y vapores químicos son ejemplos de condiciones que presentan riesgo potencial para el mantenimiento de la calidad de espejo. Entre los contaminantes determinantes de más alto poder para la óptica del láser son aquellos producidos por el mismo proceso de soldadura, aunque LBW es típicamente limpio en comparación con procesos convencionales de soldadura, aunque aún así libera cantidades significantes de vapor de metal ó salpica.

VI.5 EFECTOS ATMOSFERICOS

Con una muy alta potencia por arriba de 5 kW un fenómeno disruptivo llamado haz de hiperluminosidad o hiperluminosidad térmica ocurre que con los absorbentes de la trayectoria del haz tales como las partículas de polvo, vapores químicos o hasta la humedad, son calentados por el haz. Este calentamiento de la atmósfera en la trayectoria de haz, causa refracción, la cual da por resultado distorsión de la dirección y / o calidad. Porque la mayor parte de la trayectoria de alta potencia del haz de láser se encierra en tubos como protección del personal. Con frecuencia la introducción del aire o nitrógeno seco dentro de este tubo es muy conveniente. Alternativamente, el flujo forzado de aire a través del camino de haz ha sido usado efectivamente para minimizar la hiperluminosidad del haz, porque el movimiento más rápido del aire no reside en la trayectoria de haz por un periodo de tiempo indicado para producir el efecto de hiperluminosidad.

VI.6 MONTURAS OPTICAS

Finalmente para completar la trayectoria del haz, los espejos transportadores del haz deben ser montados en una superficie estable, la localización del lugar de montaje debe estar libre

de vibraciones y térmicamente estable. Si se esperan resultados consistentes, en muchos casos los elementos ópticos se montan directamente al láser y a la envolvente del lugar de trabajo. Deben tomarse precauciones cuando se sujeten elementos ópticos directamente, dado que las envolventes posiblemente produzcan vibraciones por sí mismas.

En aplicaciones que implican múltiples estaciones de trabajo, se ha demostrado consistentemente que el piso justo sobre el cual el láser y la estación de trabajo están localizadas posiblemente sirva igualmente para posicionar los elementos ópticos de la trayectoria del haz. A pesar de todo la elección del lugar para el montaje de la trayectoria del haz, examinando el punto de estabilidad de la trayectoria como una función de tiempo durante cambio de trabajo, también como el cambio de estaciones del año, es aconsejable porque las variaciones probablemente ocurran vía cambios térmicos.

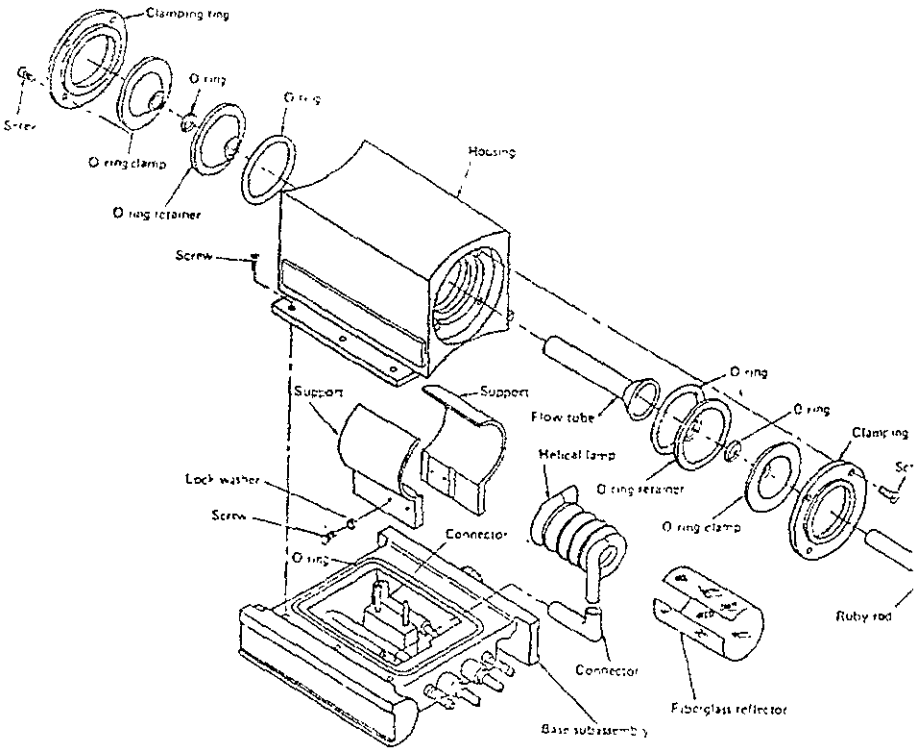


Fig. 3-13 Muestra un montaje clásico de láser de rubí. el montaje incluye la barra, cerca de 6 in de largo; lámpara de flash helicoidal; los reflectores y soportes apropiados para alinear juntos la barra y la lámpara de flash.

VI.7 SELECCION DEL ENFOQUE OPTICO

Teniendo una producción de láser exitosa y una transportación del haz desde el láser hasta la localización del trabajo. Debe entonces ser enfocado a un tamaño apropiado de punto, para la prueba de soldadura particular que haya que realizar. Varios aspectos respecto al enfoque de haz deberán revisarse individualmente.

El aspecto más importante en el enfoque del haz para soldar es la selección del apropiado diámetro ó tamaño del punto del haz. Como se notará en secciones previas, el enfoque del tamaño es función de la calidad del haz, longitud de onda y radio de curvatura del enfoque óptico. Para operar láser de CO₂ a altos niveles de potencia o menores de 10kW y, más razonablemente menor que 5kW, el enfoque debe ser realizado con transmisores ópticos tales como Zinc seleniuro o gallium arsenide. La selección de la longitud focal para una soldadura de aplicación particular está siempre relacionada entre la velocidad de soldado, penetración, el ajuste de las piezas y los requerimientos de la posición de la unión. Por ejemplo, la soldadura de alta velocidad con frecuencia se realiza con un enfoque de diámetro muy pequeño; sin embargo, la correcta posición de una unión a soldar para una exposición de un enfoque excepcionalmente pequeño del punto de láser será muy difícil. Como un comienzo de la consideración en el contexto general se recomienda que el tamaño focal de punto del láser para una aplicación de soldadura sea de una séptima a un cuarto con respecto a la penetración deseada. Especialmente para buenos ensambles y situaciones de uniones localizadas. El enfoque del tamaño del punto posiblemente sea menor, situaciones que implican menor calidad de ensamble y entonces la unión posiblemente requerirá un mayor número de puntos de enfoque para garantizar el compromiso de ambos porción y el destino ó uso de la unión soldada.

Es posible determinar el tamaño del diámetro del punto del haz de un sistema óptico dado, multiplicando la longitud focal del elemento a enfocar por la divergencia del haz de láser. Por ejemplo, un haz de láser con una divergencia de 3 mrad puede ser enfocado con un 10 m. La longitud focal del lente será de un tamaño de unos 0.03 in. En discusión de longitud focal y tamaño de punto El concepto de f número de frecuencia alcanzada. El

número de f de equipo a enfocar es sencillamente la longitud focal dividida por el diámetro del haz alineado al elemento de enfoque. Suponiendo en el ejemplo citado que el haz de entrada tiene un diámetro de 1.6 in. Así el número de f de este sistema de enfoque podrá ser 10 in dividido por 1.6 in, o F 6.25. Una f baja tal como F 3 a F 5 es usual para alta velocidad de soldado de materiales delgados, mientras enfoques mayores de sistemas mayores, tales como F 7 a F 15 son adecuadas para soldar acero de 1/4 a 1 in. Entendiendo que un tamaño de punto del haz, puede proporcionar a la localización de la soldadura una corta o una muy larga distancia es importante, que es el mismo número de F . Situación de enfoque puede llevarse a cabo con un enfoque óptico final que es menor a 4 in, para trabajos tan grandes como 3 1/4 ft desde la pieza de trabajo. El elemento que limita en esta área es el diámetro óptico final que puede ser económicamente producido. Por ejemplo transmisión óptica para alta potencia de láser de CO_2 simplemente no está disponible en tamaños mayores que 3 in.

La consideración del punto de enfoque deseado a la distancia del elemento a enfocar es en gran parte función del salpicado y/o el hollín asociado con la prueba de soldadura. El salpicado nos da mayor determinación de la longitud de transmisión del enfoque óptico. Cuando un elemento del salpicado afecta al elemento de transmisión de enfoque el revestimiento óptico es destruido, y esta localización probablemente absorberá más energía de haz comparado con otras áreas o superficies no peligrosas. Como el elemento de enfoque empezará a transmitir cada vez menos, por virtud del daño de la salpicadura que daña o ensucia con su acumulación, el calentamiento del elemento óptico por la energía del haz se incrementa. Si el calentamiento comienza a ser excesivo, la distorsión resultante puede causar una falla catastrófica o la rotura de los lentes. Por lo que mantener los lentes con máxima limpieza prolongará la vida de éstos. Esta limpieza podrá realizarse con gases de flujo coaxial que sirve para resistir el depósito de salpicaduras y hollín, o podría también llevarse a cabo con un rápido flujo de cortinas de aire transversales intentando desviar las salpicaduras y la suciedad.

Cuando usamos equipos de transmisión de enfoque de alta potencia (1kW ó mayor) LBW, es esencial el entendimiento que elementos individuales de enfoque muestran una ligera

diferencia focal de posición. Dado que la efectividad de la posición del punto focal en cualquier posición de soldadura dada esto limitada a ± 0.02 in. ó menos, la suposición de que recambio de los elementos ópticos de enfoque nos darán exactamente el mismo punto posición focal como el original no es cierto. Además el calentamiento de los elementos de transmisión presentes en la frecuencia del haz de láser causa un cambio en la posición del punto focal. Esta inducción térmica cambia la posición del punto focal y usualmente ocurre en una dirección hacia el elemento enfocado en menos de 1 s. En algunos casos, programando un movimiento en la posición del punto focal para acomodar este pequeño término térmico incluido es necesario. Note que estos cambios de ajuste focal no ocurren con metales adecuadamente enfriados, disminuyendo así su reflectividad óptica.

Solamente con transmisiones de láser a 5-KW, CO₂ por ejemplo, puede causar un diámetro de 2.2 in, 10 in. Longitud focal de lentes de seleniuro Zinc cambia su punto focal tanto como 0.04 in, dentro del primer segundo de tiempo de haz. Pueden ahorrarse confusiones considerables en el sistema de posición de enfoque por transmitir de láser óptico si esta consideración no se olvida. Si se requiere una gran distancia óptica de trabajo, por cualquiera de dos razones para evitar el alto grado de salpicaduras o para acomodar las partes a acoplar en una soldadura muy compleja, se puede utilizar un tamaño grande de reflectividad óptica. El número de reflectividad óptica en sistemas de enfoque disponible continúa aumentando con la rápida aceleración en aplicaciones de LBW.

VIS TRAYECTORIA DEL PUNTO FOCAL

Si la soldadura se desplaza del punto focal ésta será a través del desplazamiento del sistema de enfocado, como oposición al desplazamiento de la pieza de trabajo. Consideraciones de vibración en el mecanismo de desplazamiento posiblemente introduce al sitio o punto de enfoque necesariamente. Porque el punto focal ocurre a alguna distancia desde el elemento de enfocamiento, pequeñas vibraciones del elemento de montaje del sistema de enfocamiento pueden causar grandes oscilaciones en el mismo punto de enfoque. Estas vibraciones provocan reducción en la penetración incrementando la porosidad, y un desempeño de soldado inconsistente. Las vibraciones de este tipo deben ser mantenidas

menores de un cuarto del tamaño del punto del haz de láser. Incluso este pequeño grado de variaciones posiblemente induce inconsistencias en el proceso de soldado.

Debe ser notado que trabajos de largas distancias posiblemente suponen una mayor posibilidad de ir en perjuicio de una amplitud de vibraciones.

Finalmente, un contorno multidireccional de soldado implica desplazamiento del punto focal en más de una dirección por lo que requiere una velocidad tangencial constante del punto focal. El desplazamiento del punto focal alrededor de círculos u otra forma compleja debe ser suave, y debe ser de velocidad tangencial no variar más allá de límites permisibles (usualmente algunos porcentajes de la velocidad nominal).

VI.9 EQUIPOS DE MANIPULACION DEL TRABAJO Y MANIPULACION DEL HAZ

Como una industria de alto crecimiento los láseres se hacen disponibles, la velocidad de soldado con láser para espesores dados se han incrementado, para procesos de penetración hasta en los láseres de potencia moderada, las velocidades de soldado son típicamente mayores que aquéllos que se encuentran en soldaduras convencionales.

Debido a que los requerimientos de soldadura de alta velocidad, mecanismos de desplazamiento deben ser capaces de proveer una aceleración más rápida. El control de velocidad es probable que sea el que más demande pruebas en soldadura de láser comparado con cualquier otro proceso de soldadura.

Por ejemplo, un empalme soldado en una situación de soldadura de láser, posiblemente podrá tolerar únicamente $\pm 5\%$ de variación en la velocidad de desplazamiento. Porque se requiere una velocidad de desplazamiento constante de LBW, frecuentemente los movimientos o desplazamientos están provistos de un servo circuito cerrado, esto es una serie de dispositivos que autocontrola y regula los desplazamientos.

Consideraciones importantes incluyen no únicamente el desempeño de soldadura en línea recta o circular a una velocidad constante, sino también el desempeño de la soldadura en

perfiles o contornos complejos a velocidad constante. Nuevos y ya existentes mecanismos de desplazamientos difíciles, para LBW existen ya en esta área, y porque muchos fabricantes de mecanismos no han sensibilizado los requerimientos de velocidad continua para contornos, este aspecto debe ser direccionado ó dirigido en la etapa del diseño del sistema.

Otra vez, con respecto a la velocidad constante naturalmente de la soldadura de láser con mecanismos de desplazamiento oscilación y vibración deben ser considerados. En algunas aplicaciones de LBW, el área con material fundido y el ojo de cerradura (keyhole) existen en condiciones metaestables. Vibraciones en la pieza de trabajo y/o el punto focal del láser posiblemente trastornarán este delicado balance. Servo mecanismos y mecanismos mecánicos convencionales inducen vibraciones en el mecanismo de desplazamiento, es difícil de observar en la fuente de LBW. Técnicas de registro fotográfico de alta velocidad, emisión acústica, acelerómetro (medida de la rapidez de la variación de la velocidad), o láser de baja potencia que queman en materiales, réplicas posiblemente se usen para resolver la cuestión de oscilación y/o vibración en el haz y/o pieza de trabajo.

Finalmente, en el área de vibración del haz u oscilación, es importante recordar que la distancia del punto focal al elemento óptico final representa un arma a través de la cual la amplitud de vibraciones ópticas es posible que se aumenten.

Este aspecto de amplificación de vibraciones del punto focal es una de las razones que los fabricantes de mecanismos de desplazamientos prefieran proveer sistemas con movimientos o desplazamientos en piezas de trabajo y se oponen a movimientos en medios ópticos. Muchos intentos para proveer precisión en mecanismos ópticos de movimiento de alta velocidad fallaron en 1970. Pero recientes intentos de mecanismos ópticos con desplazamiento han sido considerados más exitosos.

En ningún caso, es razonable esperar que mecanismos de desplazamiento óptico para LBW podrían requerir mayor calidad y serán más caros que mecanismos de desplazamiento que están asociados con la convencional flama de corte con plasma, o soldado de antorcha.

La trayectoria de costura requerida para LBW es substancialmente más severa o necesaria que para procesos convencionales de soldadura. Esta podrá ser fácilmente aparentadas por marcas donde la tolerancia no puede exceder $1/2$ del tamaño del punto focal del haz, con

deslizamiento de esa distancia podrá resultar que el haz incida o toque únicamente en un lado de la unión.

En la práctica, las tolerancias son muy reducidas en comparación a un medio del tamaño del punto focal, y es exactamente evaluado con una función de muchos otros factores, incluyendo la composición del material, espesor, borde final de la forma deseada, velocidad de soldado y potencia. En soldadura con un diámetro del punto focal de 0.03 in, por ejemplo, una tolerancia típica en la trayectoria de la costura podrá ser del orden de ± 0.01 in. Esta tolerancia podrá disminuir en soldadura de alta velocidad de materiales delgados y podrá aumentar para soldaduras de baja velocidad ó secciones pesadas.

Para un propósito general el sistema LBW, la configuración de mecanismos de desplazamiento para partes manuales o haz con desplazamiento, podrá variar considerablemente. Un propósito general para sistemas LBW para una industria podrá ser enteramente diferente comparada con el propósito general designado en otra industria. En la actualidad no han surgido candidatos favoritos en diseño de sistemas LBW de propósito general o uso general.

En la actualidad la mayor parte de sistemas LBW son diseñados para dedicarlos a uniones o fabricaciones muy específicas. Estos equipos desempeñan el mismo trabajo siempre, o una pequeña variedad de trabajos simples en un alto volumen de manufactura.

No nos sorprende por lo tanto que la industria automotriz ha venido progresando en la implementación de ensambles de LBW. Aplicaciones tales como componentes de transmisión o componentes para la dirección que son soldados en la industrias automotriz, permitiendo que éstas sean idealmente realizadas por LBW. En estos casos, la precisión que la parte proporciona para la prueba de ensamble está bien controlada. El ajuste del material es por lo tanto bien controlado y consistente, una superficie bien terminada y limpia es muy favorable. En esta aplicación, suministrar una carga automática, inspección, y características de descarga para el sistema de LBW son deseables con frecuencia. Mecanismos tales como alimentadores de la parte de carga y mecanismos manuales son comunes y un equipo tipo línea de traslado también se incorpora. En este sistema,

incorporando técnicas de posicionador que están asociadas con un fin particular o son apropiadas para LBW son con frecuencia muy convenientes.

Estas técnicas de alimentación posiblemente incluyan un manguillo magnético o de vacío.

Es notable que ninguna de estas últimas técnicas de manguillo o porta piezas ha sido empleada convenientemente en EBW, que es la más cercana competencia de LBW en la industria automotriz u otra de ensamble de gran volumen.

VI.10 PROCESO DE INSPECCION

Dado que la mayor parte de los sistemas de LBW están acompañados con mecanismos de movimiento o desplazamiento de alta precisión de un tipo o de otro, monitorear la precisión del control de velocidad, es muy conveniente como una primera medición del desempeño de la soldadura. Este parte de la información, es la más fácil de obtener y no deberá ser pasado por alto en la consideración de inspección de datos del proceso. Información adicional relativa a la consistencia de la soldadura se provee por el monitor de poder del láser. Esta combinación de velocidad de soldado consistente y potencia, es la primera línea de defensa contra el desconocimiento de las variaciones en la calidad de la soldadura. En algunos casos, equipos para examinar el tipo de calidad del haz de láser en tiempo real se han venido incorporando para ayudar en el proceso de inspección. Dichos equipos, sin embargo no están disponibles para todos los láser manufacturados. Adicionalmente, el uso de sistemas de inspección requiere atención especial del operador, una prueba que posiblemente le quita mérito a otras pruebas, tales como carga, descarga, o inspección de componentes post soldados.

Presentando en estos últimos desarrollos la emisión acústica de la soldadura de láser posiblemente ofrece una prometedora aplicación en el proceso de técnicas de inspección. La emisión acústico de la soldadura de láser posiblemente sea usada en cualquiera de las dos en modo de contacto o más simple escuchando el ruido que genera el plasma de la soldadura de láser.

En contacto la emisión acústica monitorea, no solamente el sonido del plasma de láser y oscilaciones en la parte fundida, sino también detecta la información de grietas si es que

éstas ocurren. Variaciones en la calidad de la soldadura son perceptibles a través de emisión acústica sin contacto, que monitorea también la falta de penetración, excesivo hueco en la unión de soldadura, penetración intermitente y porosidad. El monitoreo de emisión acústica sin contacto tiene la ventaja evidente de censo remoto, así las consideraciones de probar el contacto de la soldadura quedan eliminadas y reducimos la complejidad del sistema.

Otro método de proceso de inspección sin contacto incorpora cualquiera de los dos sobre el eje o fuera del eje un video de observación de la acción de la soldadura del láser es rico en información a color, intensidad, estabilidad y posición del láser generado, plasma de soldadura con respecto a la localización de la unión. Adicionalmente información referente al rango de solidificación y del área fundida está disponible en la presentación del video de la operación de la soldadura de láser. Mientras esta área de LBW de proceso de inspección posiblemente ofrece la última gran calidad de confianza, se requiere considerable hardware y software para que se desarrollen estas técnicas de proceso de inspección y queden bien terminadas.

Aún cuando la técnica mencionada anteriormente ha demostrado ser efectiva en la industria de LBW todavía existen quienes se inclinan por las pruebas de inspección post soldadura.

Por ejemplo, en la industria automotriz se sobresolda o resolda y tanto como el 25% para poder proveer una conveniente inspección post soldadura, de la parte posterior de la parte soldada. Esta técnica de inspección no solamente requiere una labor adicional sino también reduce la productividad del sistema de soldado.

La utilización exitosa de una técnica de proceso de inspección podrá por lo tanto, proveer un incremento en productividad. Como esta técnica se ha desarrollado más completamente, ellos seguramente la utilizarán considerando sus impactos en productividad

COSTOS DE OPERACION

VII. COSTOS DE OPERACION

Considerando el rango en el cual los rayos láser de alta potencia se han venido modificando y mejorando la presentación de algún costo actual de operación en estos equipos es inapropiado. Sin embargo ciertos elementos de costo de operación probablemente continúan existiendo, y éstos los presento a continuación.

VII.1 ELECTRICIDAD.

A pesar del tipo de láser, si es de estado sólido o gas, la conversión a energía eléctrica de entrada a energía en forma de luz de salida posiblemente se caracterice como ineficiencia.

Eficiencias de conversión están en el rango de 2 a 15% típicamente. Así el consumo de energía eléctrica es una porción sustancial del costo de la operación del láser.

VII.2 ENFRIAMIENTO.

Considerando la relativa ineficiencia de la producción de la luz de láser, un considerable gasto de calor es generado por estos mecanismos. La implementación de convertidores de calor nos da otra consideración de gasto de operación. En el caso de láser de estado sólido Nd:YAG por ejemplo, la colocación de un cambiador de calor va acompañado de agua desionizada no conductiva, de vez en cuando habría que sustituir las lámparas flash de láser, lo cual es un gasto muy considerable, y alguna porción de agua también muy cara se perderá. En láser de alta potencia de CO₂, se requieren grandes cantidades de agua de enfriamiento. Si en casa no se tiene disponible un sistema de agua de enfriamiento. Se requerirá comprar mucha agua de la toma y descargarla como medio de enfriamiento. En algunos casos, el costo del agua de enfriamiento probablemente sea equivalente al costo de energía eléctrica

VII.3 MEDIO

En todos los sistemas de láser, hay una tendencia a degradar el medio del láser. Si el medio de láser es vidrio, cristal o gas, el medio deberá ser reemplazado en algunos horarios o programas básicos. En láser de estado sólido este programa podrá estar determinado por el número de disparos, mientras el láser de gas reemplazará su medio por lenta evacuación y rellenando el volúmen del gas. Con más avances en el sistema de descarga que se espera sean introducidos, la reducción del consumo de gas de láser será posible. Esta consideración es importante para aquellas naciones que no cuentan con suministro de helio que es el mayor elemento del láser de CO₂.

VII.4 RENDIMIENTO DE LA UNION O VENTANA.

Adicionalmente al consumo obvio de electricidad, agua de enfriamiento, y medios de láser, ciertos elementos ópticos del láser posiblemente requerirán reemplazarse rutinariamente. Esta rutina de reemplazo constituye un costo. En el caso de láser de estado sólido, el principal consumo óptico está en la misma lámpara de flash. En láser de alta potencia de CO₂, el consumo óptico es usualmente asociado con la extracción del haz de láser de la región de presión del medio de láser al mundo exterior. En el caso del láser para niveles de potencia menores a 9kW, el rendimiento del servicio de la unión o acoplamiento para su servicio tiene un tiempo de vida finita.

Para láser de potencias mayores que 10kW, ventanas aerodinámicas o cortinas que aceleran el uso de los gases de láser cuando estas son abiertas se incorporan. Además estos están sujetos a daño por el haz si sucede el desalineamiento de los elementos ópticos internos. En este sentido, consideraciones de las ventanas aerodinámicas o cortinas como un consumible posiblemente es inapropiado, sin embargo la experiencia sugiere que estos deben ser incluidos en el costo de operación.

VII.5 MANTENIMIENTO

El costo de mantenimiento de láser de alta potencia varía dramáticamente; limpieza de electrodos, limpieza de espejos, reemplazo de cojinetes o rodamientos del soplador, rutinas de alineamiento óptico y muchos otros factores podrán sumarse al costo de mantenimiento del sistema LBW.

Cada sistema deberá ser considerado individualmente para determinar costo esperado de mantenimiento.

Como se ha hecho notar en secciones previas, el proveedor del láser es probablemente la fuente de información más exacta referente a los costos de mantenimiento y consumibles de equipo.

Entre todos los costos de la operación del láser, el costo de no funcionamiento es seguramente el más alto. El tiempo fuera de servicio del sistema deberá considerarse fuertemente en la evaluación total del costo de operación del láser.

SEGURIDAD

VIII. SEGURIDAD

Los riesgos en la soldadura con láser son diferentes de los riesgos encontrados en otras técnicas de soldadura. Los riesgos no aparecen fácilmente, y por inexperiencia personal posiblemente podría sufrir daños permanentes antes de existir y reconocer las condiciones peligrosas. Por esta razón, el instituto American National Standard, en sus especificaciones ANSI Z136.1, uso seguro de láser (última edición), requiere que cada facilidad del uso del láser designe un individuo como "oficial de seguridad de láser". Este individuo deberá de estar familiarizado con la seguridad del láser y ANSI Z316.1. El oficial deberá monitorear el uso del láser para asegurar su adherencia a práctica de seguridad de láser y de los requerimientos de ANSI. Dada la complejidad de la seguridad del láser, este aproximamiento es fuertemente revisado y aprobado.

Las siguientes, breves revisiones de la seguridad del láser, no son suficientes para garantizar la seguridad del personal.

VIII.1 RIESGOS ELECTRICOS

Todos los láseres usados para soldadura emplean alto voltaje capaz de dar shocks eléctricos que serían mortales.

Por lo tanto, el mantenimiento debe ser dado por personas familiarizadas con procedimientos de seguridad en alto voltaje.

Las fuentes de suministro de alta potencia de los láser contienen capacitores capaces de dar sock eléctricos mortales, siempre después de una descarga inicial debido al fenómeno conocido como acumulamiento de carga. Para facilitar el mantenimiento y acceso seguro se deberán seguir las precauciones siguientes.

- Un circuito automático de descarga y circuito de tierra deberán actuar cuando el láser se apague.

- Aterrizado y descargando bloqueará todos los paneles de acceso.
- Aterrizado por varilla para una verificación manual de completa descarga, gafas de seguridad deberán ser usados, porque descargas como explosiones son posibles en parte de la descarga de los capacitores.
- Aterrizado por straps, sucesivo de los capacitores para evitar acumulamiento de carga. Adicionalmente, todos los capacitores deberán de ser descargados y aterrizados antes de cualquier trabajo, sea realizado en cualquier componente cercano de alto voltaje. El control del láser usualmente requiere switches de capacitores. Switches aislados que no expongan al personal a conductores eléctricos preferentemente. Si los switches requieren trabajo en la barra de distribución, el procedimiento siguiente deberá ser seguido, y el uso de herramientas aisladas deberá ser considerado. Fugas del agua de enfriamiento no se pueden aceptar, especialmente cuando las líneas de electricidad y agua comparten el mismo cordón.

VIII.2 RIEGOS PARA EL OJO

Cualquier haz de láser capaz de soldar metales es también capaz de causar serios daños al ojo. El personal expuesto al haz en cualquier reflexión regular deberá ser prevenida siempre.

Ciertos lasers, sin embargo, son capaces de producir una reflexión difusa que causan un daño permanentemente en el ojo. Por lo tanto, la revisión del área de impacto del haz del láser o el haz de reflexión también debe ser prevenido. El método preferible para esto es completamente cerrado.

El encerrar el láser puede ir desde una simple camisa entre el óptico de láser y la parte a ser soldada a la operación totalmente automática en habitaciones cerradas. Las siguientes son directivas generales.

- El lugar que encierra al sistema debe opacar la longitud de onda. En general es conveniente usar metales para este fin. También es posible seleccionar plásticos. Láser de infrarrojo, por ejemplo pueden ser encerrados en polimetílico metano acrílico (Methylmethacrylate) El requerimiento de espesor puede ser calculado usando ANSI Z 136.1 y las propiedades de transmisión del material. La unidad que encierra al sistema debe ser bloqueado para prevenir disparos del haz de láser cuando el personal pueda estar expuesto. Cuando la pieza a ser soldada es una parte de la envolvente que encierra el sistema, el bloqueo deberá también prevenir disparos, a menos de que la pieza esté en su lugar. En el caso de láser de pulsos, la falta de bloqueo deberá también descargarse la energía almacenada en una carga falsa.
- Se requiere de señalamientos hacia los puntos de acceso a la envolvente, ver ANSI Z 136.1.
- La examinación del área soldada se puede hacer de varias formas. Las más comunes son revisión de orificios con filtros y monitores de televisión. Para microsoldadura, los microscopios deberán tener examinadores con filtros ópticos o dar la vuelta a los espejos que permitan ambos soldar y examinar.
- La alineación del sistema de soldadura de láser deberá ser realizada usando láser de baja potencia. La soldadura de láser podrá también realizarse con la presencia de personal. Cuando se haga de esta manera, el riesgo deberá de ser evaluado para cada proceso de soldadura usado. El estándar ANSI incluye los siguientes requerimientos generales:
- El área de soldado con láser deberá de ser totalmente cerrada y el acceso deberá ser restringido.
- En la mayor parte de los casos, se requerirán protecciones para los ojos para todo el personal del área. La densidad óptica de la protección de ojos deberá de estar calculado para reducir el potencial del ojo que estará expuesto a menos que el nivel máximo permisible expuesto por el nivel(MPE).

- El haz del láser deberá de ser controlado cuidadosamente y deberá estar contenido o encerrado en la mayor extensión posible. La protección de ojos probablemente falle en la exposición del haz primario.
- Cursos al personal es un requerimiento de extremada importancia.

VIII.3 EXPOSICION EN LA PIEL

La piel expuesta al haz primario obviamente podrá resultar en quemaduras y deberán ser prevenidas con una cubierta o encierro total de sistema y cursos de su operación.

El estándar ANSI también prescribe valoraciones MPE para exposición de la piel, en la región visible y cerca de la infrarroja, éstas son mucho más altas comparadas con los valores MPE valuados para los ojos; por lo tanto, un problema de excesiva exposición debido a reflexión difusa a esta longitud de onda raramente ocurre.

Excesiva exposición de piel en la región ultravioleta e infrarroja es posible que se dé, sin embargo, típicamente la exposición ultravioleta se puede controlar con ropa de tejido muy cerrado y resistente y cremas especiales aplicadas a la piel expuesta. Niveles dañinos de luz ultravioleta puede también ser generado por las lámparas de flash; por lo tanto, se deberá uno cubrir para permanecer en el lugar.

VIII.4 RIESGOS QUIMICOS

La soldadura con láser genera humos de metal similar a otros procesos de soldadura, y el peligro es en gran parte dependiendo de la composición de los metales a soldar. Por lo que se requiere ventilación.

En el "Standard and American Conference" (OSHA) de "Governmental and Industrial Hygienists" (ACGIH) se dan los valores de umbral límite, por ejemplo en aplicaciones de soldadura de alta potencia, los humos se generan en suficientes cantidades para requerir una

ventilación de escape, del lugar de trabajo, aunque éste es un gasto adicional, resulta económico y necesario.

Los humos y vapores dañinos, también son generados cuando la energía del láser es depositada en materiales indeseables, tales como sobre el plástico que cubre el sistema debido a estar expuesto al haz del láser por falla en el exótico material del lente térmico. Estas condiciones son mejor controladas por la selección cuidadosa del material y monitoreando el desempeño del láser. Finalmente los agentes limpiadores para los ópticos del láser posiblemente sean tóxicos e inflamables y deberán ser por consiguiente manejados con cuidado.

VIII.5 CAPACITACION, EXAMINACION MEDICA Y DOCUMENTACION

El estándar ANSI Z 136.1 solicita se dé un curso de riesgos potenciales y medidas de control, deben ser dados a operadores, ingenieros, técnicos y personal de servicio de mantenimiento. Especial capacitación de aspectos tales como riesgos potenciales (incluyendo efectos biológicos) control de medidas y los estándares aplicables son requeridos para la seguridad oficial del láser. Un modelo de seguridad y programa de entrenamiento se muestra en el apéndice D del estándar.

La rutina médica para sobrevivientes de usuarios del láser, ya no se mantiene por el estándar. Sin embargo, el empleado posiblemente descará ser llevado al médico, por ejemplo por razones legales.

Una buena documentación del láser debe incluir:

- Una lista de la duración de los sistemas de láser.
- Resultado de sobrevivientes dañados y cálculo de la radiación accesible.
- Pruebas de uniones.

- Número de empleados que pudieran estar en el área del láser.
- Fecha y duración del curso.
- Datos y resultados de exámenes médicos (si existen).
- Cursos y calificaciones oficiales de la seguridad del láser.

VENTAJAS DEL PROCESO DE SOLDADURA CON LASER

El Proceso de soldadura con láser es ya una práctica común en industrias como la automotriz, la electrónica y la aeroespacial, dadas las múltiples ventajas que representa su utilización como son, entre otras:

- Que el láser es una fuente de energía controlable con precisión en intensidad y posición.
- El control de la intensidad nos permite fundir el metal en la profundidad deseada y en aplicaciones de penetración profunda, prácticamente no tiene limitación.
- El haz de láser puede ser transmitido a través del aire a apreciables distancias sin alteración o degradación.
- El proceso de soldadura es normalmente autógeno, éstos usan únicamente los metales principales a unir sin necesidad de adicionar material de relleno.
- Entre los metales soldados con LBW podemos mencionar metales preciosos y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, aluminio y sus aleaciones, titanio y sus aleaciones, metales refractarios, acero rolado en frío y caliente, de alta y baja resistencia y sus aleaciones, níquel y hierro basado en aleaciones. En todos ellos se puede lograr una soldadura libre de porosidad, que puede soportar esfuerzos de tensión iguales o excediendo a los del metal base.
- Se puede utilizar para lograr endurecimiento en superficies o puntos bien identificados, en ocasiones inaccesibles para cualquier otra técnica, en partes que lo requieran de tal forma que no requerimos calentar todo el material, eliminando la posibilidad de distorsión que con frecuencia acompaña otras técnicas de endurecimiento.
- La soldadura con láser es continua, lo que resulta en una estructura integral eliminando la necesidad de operaciones de sellado.
- La programabilidad del sistema LBW ofrece la ventaja de que cualquier parte del automóvil, de cualquier modelo, puede ser soldada únicamente reprogramando la memoria de la computadora.
- Dado que sólo un poco de calor afecta la parte a soldar, virtualmente no existe distorsión térmica como resultado de la soldadura con láser. Tampoco existe daño térmico en componentes sensibles.

- La soldadura de láser reduce los costos en varias áreas. Primero; siempre existe menos proceso previo y posterior en las partes que son soldadas con láser. Segundo, el proceso con soldadura de láser presenta la facilidad de repetibilidad de soldadura de algún tipo en particular en sistemas de automatización. Uniendo con precisión y controlando por computadora la velocidad del láser teniendo bajos costos de producción. Tercero, porque el proceso de soldadura con láser es inherentemente más controlado y repetible, comparado con procesos convencionales de soldaduras, los rangos de desecho se reducen dramáticamente y en algunos casos se elimina totalmente.
- La reducción en la distorsión resultado de la soldadura con láser, resulta en un ahorro de maquinado posterior por residuos de la soldadura.
- Dado que el haz de láser tiene un haz muy estrecho puede hacerse pasar a través de áreas pintadas. Además dado que esta soldadura es autógena no presenta problemas de reciclaje, tal como soldaduras selladas hechas en latas.
- Pruebas a la tensión realizadas en uniones soldadas con láser en aleaciones de titanio, revelan que la soldadura es finalmente tan fuerte como el material base

Por todo lo anterior es probable que la soldadura con laser sea cada vez más común en las diferentes industrias.

CONCLUSIONES

Las ventajas que presenta el proceso de soldadura con rayo láser lo hacen atractivo para aplicaciones repetitivas y de gran precisión, logrando el abatimiento de costos, debido a que se evita el reprocesado, residuos, trabajos previos y posteriores a la soldadura, por lo que, para procesos donde estas condiciones sean necesarias, si se comparan los costos de los procesos de fabricación de soldadura convencional se podrá definir en qué tiempo se recupera la inversión, y de esta manera apoyar el crecimiento industrial y económico de nuestro negocio y nación con productos que garantizarán una calidad uniforme y competitiva.

La selección de la potencia del sistema es uno de los puntos clave de un equipo de soldadura con rayo láser y dependerá no tan sólo de la aplicación inmediata para lo que se adquiere, sino que deberán considerarse las aplicaciones futuras, de tal forma que podamos cubrir dichas necesidades futuras vía la programación del sistema dado que la mayor parte de estos sistemas lo permiten, por lo que será recomendable contar con la asistencia de un experto o de los proveedores especialistas.

Comparado con cualquiera de las otras técnicas de soldadura convencionales el calor que genera la soldadura o endurecimiento utilizando la tecnología de láser únicamente afecta estructuralmente una zona muy estrecha dado que el metal cercano a la soldadura no es expuesto al calor excesivo. Por lo que prácticamente no existe daño térmico. Esta ventaja así como las mencionadas en el capítulo anterior de la soldadura con rayo láser apoyarán sin duda el crecimiento de la utilización a mediano plazo de sistemas de este tipo sobre los tipos convencionales.

Sin duda será necesario un conocimiento profundo de la tecnología de soldadura con rayo láser y de los diferentes parámetros que intervienen como son: velocidad de soldadura, espesor del material, tipo de material, terminado del material y gas protector, entre otros que intervienen en estos procesos, para obtener en la práctica los mejores resultados de desempeño durante la operación del sistema.

BIBLIOGRAFIA

1. Metal Handbook, Ninth Edition
Vol. 6 Welding, Brazing and Soldering
Vol. 16 Matching
American Society for metals 1989, Ohio U.S.A.
2. Serop Kalpakjian, Manufacturing process of Engineering
Materials
3^a Ed. 1997 U.S.A. Addison Wesley Longman Inc.
3. Manufacturing engineering
Society of Manufacturing Engineers,
1997 Michigan U.S.A.
4. Ciencia y tecnica de la soldadura
W.J. Patton
Urmo, S.A. de ediciones
1979 España
5. Soldadura Aplicación y practica
Herry Horwitz P.E.
Representaciones y Servicios de Ing.
México enero 1984