

MANUAL DE SOLDADURA

TOMO I

Octava edición

AMERICAN WELDING SOCIETY

R. L. O'Brien
Editor

TRADUCCIÓN:

Ing. Roberto Escalona García
M. en C. UNAM

REVISIÓN TÉCNICA:

Ing. Juan Antonio Torre Marina
Universidad Anáhuac



MÉXICO • ARGENTINA • BRASIL • COLOMBIA • COSTA RICA • CHILE
ESPAÑA • GUATEMALA • PERÚ • PUERTO RICO • VENEZUELA

**AMERICAN WELDING SOCIETY/MANUAL DE SOLDADURA
TOMO I (8a. EDICIÓN)**

Traducido de la 8a. edición en inglés: **WELDING HANDBOOK/WELDING PROCESSES. VOLUME 2.**

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o método, sin la autorización escrita del editor.

No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Derechos reservados © 1996 respecto a la primera edición en español publicada por
PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A.

Calle 4 N° 25-2º piso Fracc. Ind. Alce Blanco,
Naucatpan de Juárez, Edo. de México,
C.P. 53370

ISBN 968-880-767-2 Tomo I, ISBN 968-880-766-4 Obra completa

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial, Reg. Núm. 1524

Original English Language Edition Published by **AMERICAN WELDING SOCIETY**
Copyright © MCMXCI
All rights reserved

ISBN 0-87171-354-3

IMPRESO EN MÉXICO/PRINTED IN MEXICO

CONTENIDO

TOMO I

PRÓLOGO	ix
PREFACIO	xi

CAPÍTULO 1, FUENTES DE POTENCIA PARA SOLDADURA POR ARCO	1
Introducción	2
Generalidades	2
Principios de funcionamiento	4
Características volt-ampere	11
Ciclo de trabajo	14
Voltaje de circuito abierto	15
Requisitos de la NEMA para fuentes de potencia	17
Fuentes de potencia de corriente alterna	19
Fuentes de potencia de corriente continua	29
Fuentes de potencia especiales	38
Lista de lecturas complementarias	41

CAPÍTULO 2, SOLDADURA POR ARCO DE METAL PROTEGIDO	43
Fundamentos del proceso	44
Equipo	47
Materiales	52
Aplicaciones	56
Diseño y preparación de las uniones	57
Procedimientos de soldadura	61
Calidad de la soldadura	68
Recomendaciones de seguridad	70
Lista de lecturas complementarias	71

CAPÍTULO 3, SOLDADURA POR ARCO DE TUNGSTENO Y GAS	73
Introducción	74
Principios de funcionamiento	75
Equipo	77
Técnicas de GTAW	94
Materiales	98
Diseño de las uniones	101
Calidad de la soldadura	102
Aplicaciones	103
Prácticas seguras	105
Lista de lecturas complementarias	106

CAPÍTULO 4, SOLDADURA POR ARCO DE METAL Y GAS	109
Introducción	110
Fundamentos del proceso	111
Equipo	123
Consumibles	132
Gases protectores	133
Aplicaciones	136
Aplicaciones especiales	142
Inspección y calidad de la soldadura	146
Localización de problemas	150
Prácticas seguras	152
Lista de lecturas complementarias	154

CAPÍTULO 5, SOLDADURA POR ARCO CON NÚCLEO DE FUNDENTE	157
Fundamentos del proceso	158
Equipo	162
Materiales	168
Control del proceso	175
Diseños de uniones y procedimientos de soldadura	181
Calidad de la soldadura	187
Seguridad	190
Lista de lecturas complementarias	190

CAPÍTULO 6, SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO	191
Fundamentos del proceso	192
Equipo	196
Materiales	204
Aplicaciones generales del proceso	211
Variables de operación	212
Tipos de soldaduras	216
Procedimientos de soldadura	218
Variaciones del proceso	224
Calidad de la soldadura	230
Recomendaciones de seguridad	230
Lista de lecturas complementarias	231

CAPÍTULO 7, SOLDADURA ELECTROGÁS	233
Introducción	234
Fundamentos del proceso	234
Equipo	238
Consumibles	239
Variables de operación	243
Aplicaciones	247

Seguridad	268
Lista de lecturas complementarias	269

CAPÍTULO 8, SOLDADURA ELECTROESCORIA	271
Introducción	272
Fundamentos	273
Equipo	276
Seguridad	279
Consumibles	280
Aplicaciones	282
Inspección y control de calidad	295
Localización de problemas	296
Lista de lecturas complementarias	297

CAPÍTULO 9, SOLDADURA DE PERNOS	299
Introducción	300
Posibilidades y limitaciones del proceso	301
Soldadura de pernos por arco	301
Soldadura de pernos por descarga de condensador	317
Selección y aplicación de los procesos	324
Consideraciones de aplicación	326
Precauciones de seguridad	326
Lista de lecturas complementarias	327

PRÓLOGO

Este es el 53 aniversario del primer *Manual de soldadura* de la AWS. A partir de ese inicio en 1938, el comité del manual de soldadura se ha constituido en un grupo dedicado de voluntarios dispuestos a donar su tiempo y esfuerzo para la producción de este manual.

Algunos de los procesos descritos en la primera edición casi no han cambiado en los años subsecuentes. Otros procesos descritos en la presente edición, como los de arco de plasma, rayo láser y haz de electrones, hubieran sido inimaginables para aquel primer comité del manual. Hacemos una pausa para considerar qué procesos estarán describiendo nuestros sucesores en cincuenta años más, y cómo los presentarán.

Se dedicó un tiempo considerable en la selección de expertos de diversos campos para representar a los fabricantes de equipo, usuarios y grupos de interés general a fin de equilibrar los comités de capítulo del manual de soldadura. Este procedimiento garantiza que los capítulos del manual contienen los datos más actualizados y presentan el material sin ninguna desviación.

R. L. O'Brien, Editor
Manual de soldadura

PREFACIO

Este volumen de la octava edición del *Manual de soldadura*, cubre el material que se había presentado en los volúmenes 2 y 3 de la séptima edición en inglés.

Los autores de este volumen han actualizado el material de la séptima edición de modo que refleje lo último en tecnología. También han aumentado el número de aplicaciones a fin de que las descripciones de los procesos se relacionen con el entorno de producción real, y han utilizado un mayor número de ilustraciones. Se han añadido varias secciones sobre seguridad.

El comité del manual de soldadura y los miembros de cada comité de capítulo han invertido miles de horas de su tiempo personal en la producción de este volumen. Hemos reconocido sus contribuciones citando sus nombres en la página de título de sus respectivos capítulos. Deseamos agradecer su generosa contribución de tiempo y talento, y hacemos extensivo nuestro aprecio a sus organizaciones por apoyar este trabajo.

El comité del manual de soldadura expresa su agradecimiento a Alexander Lesnewich, Hallock C. Campbell y Leonard P. Connor por su supervisión editorial, a Deborah Givens por su asistencia editorial y a Linda Williams por su ayuda en el procesamiento de textos.

Nos gustaría conocer sus comentarios acerca del manual. Por favor, dirjalos al Editor, *Welding Handbook*, American Welding Society, P.O. Box 351040, Miami, FL 33135, E.U.A.

M. J. Tomsic, Presidente
Comité del Manual de soldadura
1987-1990

R. L. O'Brien, Editor
Manual de soldadura

**MANUAL DE
SOLDADURA**

FUENTES DE POTENCIA PARA SOLDADURA POR ARCO

PREFARADO POR UN
COMITÉ INTEGRADO POR:

M. J. Tomsic, Presidente
Plastronic, Inc.

N. Crump
Hobart Brothers Co.

J. F. Grist
Miller Electric Mfg. Co.

W. T. Rankin
Pow Con Incorporated

J. M. Thommes
Pow Con Incorporated

J. L. Winn
*L-Tec Welding and Cutting
Systems*

MIEMBRO DEL COMITÉ DEL
MANUAL DE SOLDADURA:

M. J. Tomsic, Presidente
Plastronic, Inc.

Introducción	2
Generalidades	2
Principios de funcionamiento	4
Características volt-ampere	11
Ciclo de trabajo	14
Voltaje de circuito abierto	15
Requisitos de la NEMA para fuentes de potencia	17
Fuentes de potencia de corriente alterna	19
Fuentes de potencia de corriente continua	29
Fuentes de potencia especiales	38
Lista de lecturas complementarias	41

CAPÍTULO 1

FUENTES DE POTENCIA PARA SOLDADURA POR ARCO

INTRODUCCIÓN.

SE REQUIEREN MUCHOS tipos de fuentes de potencia para satisfacer las singulares exigencias eléctricas de los diversos procesos de soldadura por arco. Las fuentes de potencia para soldadura por arco que se describen en este capítulo incluyen las que se usan para los procesos de arco de metal protegido (SMAW), arco de metal y gas (GMAW), arco con núcleo de fundente (FCAW), arco de tungsteno y gas (GTAW), arco sumergido (SAW), electroescoria (ESW), electrogás (EGW), arco de plasma (PAW) y soldadura de pernos por arco (ASW). Existen configuraciones tanto pulsadas como no pulsadas de estas fuentes de potencia, controladas ya sea manual o automáticamente.

El propósito del presente capítulo es servir como guía para la comprensión y selección de la fuente de potencia apropiada. Las

aplicaciones delineadas son típicas y su fin es únicamente ilustrar y explicar la relación entre la fuente de potencia y el proceso.

Desde luego, la selección de la fuente de potencia correcta depende de los requisitos del proceso. El primer paso consiste en determinar los requerimientos eléctricos del proceso de soldadura con el cual se utilizará. Otros factores que se deben considerar incluyen cosas como requerimientos futuros, mantenimiento, consideraciones económicas, transportabilidad, entorno, disponibilidad de personal capacitado, seguridad, apoyo del fabricante, cumplimiento con normas y códigos, y estandarización. No obstante, este capítulo tratará únicamente los aspectos técnicos de la potencia.

GENERALIDADES

EL VOLTAJE QUE las compañías eléctricas suministran para fines industriales es demasiado alto para usarse directamente en la soldadura por arco. Por tanto, la primera función de las fuentes de potencia para soldadura por arco es reducir el voltaje de entrada o de línea a un intervalo de voltaje de salida apropiado [por lo regular de 20 a 80 volts (V)]. Se puede usar ya sea un transformador, un inversor de estado sólido o un motor-generador para reducir la potencia de 120, 240 o 480 V de la línea al voltaje terminal o de circuito abierto especificado apropiado para la soldadura por arco. Como alternativa, una fuente de potencia para soldadura por arco puede derivar su energía de un impulsor primario, como un motor de combustión interna. Las fuentes que derivan potencia de motores de combustión interna deben utilizar generadores o rotatorios o alternadores como fuente de electricidad.

El mismo dispositivo (transformador o motor-generador) proporciona también una corriente de soldadura elevada, generalmente del orden de 30 a 1500 amperes (A). La salida típica de una fuente de potencia puede ser corriente alterna (ca), corriente continua (cc) o ambas. Puede ser de corriente constante, de voltaje constante o ambas cosas. También puede tener un modo de salida de pulsos.

Algunas configuraciones de fuente de potencia sólo proporcionan ciertos tipos de corriente. Por ejemplo, las fuentes de potencia tipo transformador sólo suministran corriente alterna. Las fuente de potencia de transformador-rectificador pueden proporcionar tanto ca como cc. Las fuente de potencia de motor-generador eléctrico por lo regular tienen una salida de corriente continua. Un motor-alternador proporciona ca o, cuando cuenta con rectificadores, cc.

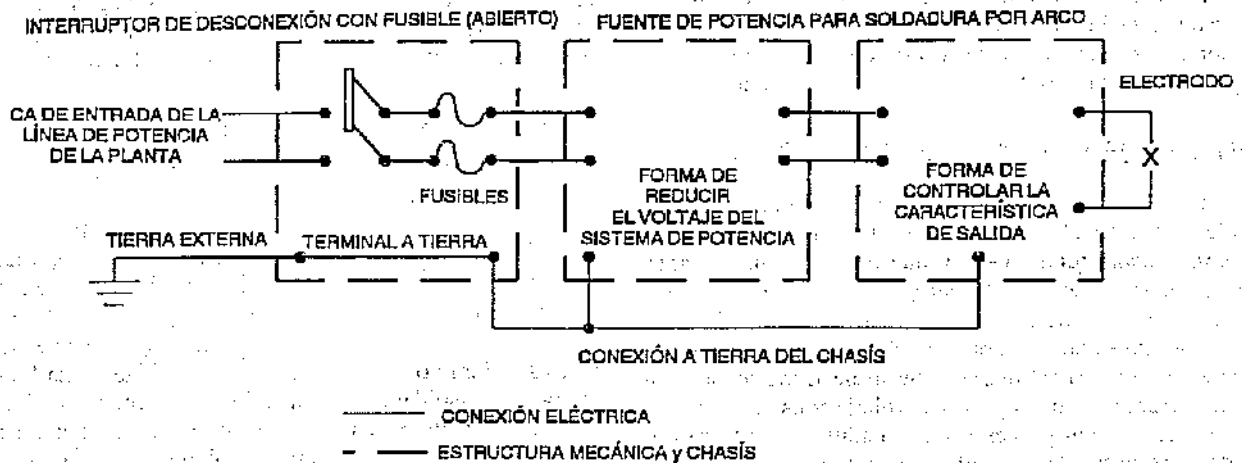


Figura 1.1—Elementos básicos de una fuente de potencia para soldadura por arco

Las fuentes de potencia también pueden clasificarse según subcategorías. Por ejemplo, una fuente de potencia para soldadura por arco de tungsteno y gas podría identificarse como transformador-rectificador, corriente constante, ca/cc. Una descripción más completa incluirá la especificación de corriente de soldadura, la especificación de ciclo de trabajo, la clasificación de servicio y los requerimientos de potencia de entrada. También pueden incluirse características especiales, como control remoto, estabilización de alta frecuencia, capacidad de pulsos de corriente, corriente inicial y final vs. programación temporal, capacidad de balanceo de onda y compensación de voltaje de línea. También podría incluirse control de la corriente o el voltaje. Los controles convencionales típicos son las derivaciones móviles, reactores saturables, amplificadores magnéticos, impedancia en serie o devanados con derivación. Los controles electrónicos de estado sólido pueden ser semiconductores de control de fase o de control de inversor; estos elementos pueden controlarse con un microprocesador.

La figura 1.1 muestra los elementos básicos de una fuente de potencia para soldadura alimentada de las líneas eléctricas. La fuente de potencia para soldadura por arco propiamente dicha por lo regular no incluye el interruptor de desconexión con fusible; sin embargo, éste es un elemento protector necesario. Una fuente de potencia impulsada por motor requeriría elementos distintos de los que se muestran en la figura 1.1. Necesitaría un motor, un regulador de velocidad del mismo, un alternador con o sin rectificador, o un generador y un control de salida.

Hasta la aparición de los procesos de soldadura que emplean corriente a pulsos, las fuentes de potencia para soldadura solían clasificarse como de corriente constante o de voltaje constante. Tales clasificaciones se basan en las características estáticas volt-ampere de la fuente de potencia, no en las características dinámicas. En general, la palabra *constante* sólo es correcta hasta cierto punto. Las fuentes de potencia de *voltaje constante* por lo regular se acercan más a una salida de voltaje constante que las fuentes de *corriente constante* a una salida de corriente constante. En ambos casos, existen fuentes de potencia especializadas que mantienen el voltaje o la corriente de salida verdaderamente constantes. Las fuentes de potencia de corriente constante también se caracterizan como de *voltaje variable*, y

las de voltaje constante a menudo reciben el nombre de fuentes de potencia de *potencial constante*. La rápida respuesta de las fuentes de estado sólido que han aparecido en años recientes puede suministrar potencia en pulsos dentro de una amplia gama de frecuencias.

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONSTANTE

LA PUBLICACIÓN EW-1 de la National Electrical Manufacturers Association (NEMA), *Fuentes de potencia para soldadura con arco eléctrico*, define una máquina de soldadura por arco de corriente constante como una que "... cuenta con un mecanismo para ajustar la corriente de carga y tiene una curva volt-ampere estática que tiende a producir una corriente de carga relativamente constante. El voltaje de carga, a una corriente de carga dada, varía con la rapidez con que un electrodo consumible se alimenta al arco, excepto que, cuando se usa un electrodo no consumible, el voltaje de carga varía con la distancia entre el electrodo y el trabajo".

Estas características son tales que si la longitud del arco varía a causa de influencias externas que producen pequeños cambios en el voltaje del arco, la corriente de soldadura permanece más o menos constante. Cada nivel de corriente produce una curva volt-ampere individual cuando se prueba en condiciones estables, como con una carga resistiva. En las inmediaciones del punto de operación, el cambio porcentual en la corriente es menor que el cambio porcentual en el voltaje.

El voltaje sin carga o de circuito abierto de las fuentes de potencia de corriente constante es bastante más alto que el voltaje del arco.

Estas fuentes de potencia generalmente se usan para soldadura manual con un electrodo cubierto o uno de tungsteno, donde son inevitables las variaciones en la longitud del arco a causa del elemento humano.

Cuando se usan en aplicaciones automatizadas o semiautomatizadas donde se requiere un arco de longitud constante, se hacen necesarios dispositivos de control externos. Por ejemplo, se puede usar un alimentador de alambre sensible al voltaje del arco para mantener una longitud de arco constante para soldadura por arco de metal y gas (GMAW) o para soldadura por arco

con núcleo de fundente (FCAW). En la soldadura por arco de tungsteno y gas (GTAW), el voltaje de arco se vigila y, por medio de una retroalimentación de ciclo cerrado, se usa para regular un deslizador motorizado que ajusta la posición del soplete de modo que se mantenga una longitud de arco (voltaje) constante.

MÁQUINAS DE VOLTAJE CONSTANTE

LA NORMA NEMA define una fuente de potencia de voltaje constante como sigue: "Una fuente de potencia de voltaje constante para soldadura por arco es una que cuenta con un mecanismo para ajustar el voltaje de carga y que tiene una curva volt-ampere estática que tiende a producir un voltaje de carga relativamente constante. La corriente de carga, a un voltaje de carga dado, varía con la rapidez con que un electrodo consumible se alimenta al arco." Las máquinas de voltaje constante normalmente se emplean con procesos de soldadura que utilizan un electrodo consumible de alimentación continua, que por lo regular tiene forma de alambre.

Un arco de soldadura que recibe su potencia de una fuente de voltaje constante, empleando un electrodo consumible y una alimentación de alambre de velocidad constante, es en esencia

un sistema autorregulado. Tiende a estabilizar la longitud del arco aunque haya cambios momentáneos en la posición del soplete. La corriente de arco será aproximadamente proporcional a la alimentación del alambre, sea cual sea el diámetro de éste.

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONSTANTE/VOLTAJE CONSTANTE

LA NEMA DEFINE a una fuente de potencia que produce tanto corriente constante como voltaje constante así: "Una fuente de potencia para máquina soldadora por arco de corriente constante/voltaje constante es una fuente de potencia en la que puede seleccionarse entre las características de una fuente de potencia para soldadura por arco de corriente constante y una fuente de potencia para soldadura por arco de voltaje constante."

Además, algunos diseños pueden realizar automáticamente el cambio de corriente constante a voltaje constante (control de fuerza del arco para SMAW) o de voltaje constante a corriente constante (control limitador de corriente para fuente de potencia de voltaje constante).

PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

LA SOLDADURA POR arco emplea arcos de bajo voltaje y alta corriente entre un electrodo y la pieza de trabajo. La forma de reducir el voltaje del sistema de potencia en la figura 1.1 puede ser un transformador o un generador eléctrico o un alternador impulsado por un motor eléctrico.

Los generadores eléctricos diseñados para soldadura por arco casi siempre se destinan únicamente a soldadura con cc. En este caso, el mecanismo electromagnético para controlar la característica volt-ampere de la fuente de potencia por lo regular forma parte del generador y no es un elemento separado, como aparece en la figura 1.1. A diferencia de los generadores, los alternadores suministran una salida de ca que debe ser rectificada para obtener una salida de cc. Se emplean diversas configuraciones en la construcción de los generadores de cc. Pueden tener un excitador aparte y composición ya sea diferencial o acumulativa para controlar y seleccionar las características volt-ampere de salida.

TRANSFORMADOR PARA SOLDADURA

LA FIGURA 1.2 muestra los elementos básicos de un transformador para soldadura y componentes asociados. En el caso de un transformador, las relaciones significativas entre el número de vueltas de los devanados y los voltajes y corrientes de entrada y salida son las siguientes:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.1)$$

donde

N_1 = número de vueltas del devanado primario del transformador

N_2 = número de vueltas del devanado secundario

E_1 = voltaje de entrada

E_2 = voltaje de salida

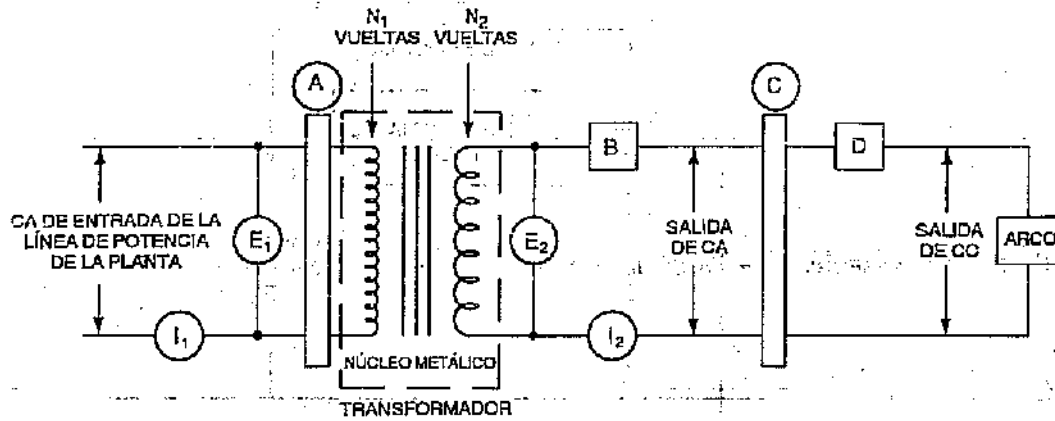
I_1 = corriente de entrada

I_2 = corriente de salida (de carga)

Se pueden usar derivaciones en el devanado secundario del transformador para modificar el número de vueltas del secundario, como se muestra en la figura 1.3, variando así el voltaje de salida de circuito abierto (sin carga). En este caso, el transformador con derivación permite seleccionar el número de vueltas, N_2 , del devanado secundario del transformador. Si el número de vueltas del secundario disminuye, el voltaje de salida baja porque se está usando una porción menor del devanado secundario del transformador. Por tanto, el selector de derivación controla el voltaje de circuito abierto. Como lo indica la ecuación, la razón de corriente primario/secundario es inversamente proporcional a la razón de voltaje primario/secundario. Esto hace posible obtener corrientes de secundario elevadas (de soldadura) a partir de corrientes de línea relativamente bajas.

El transformador puede diseñarse de modo que el selector de derivación ajuste directamente las características de pendiente volt-ampere de salida para una condición de soldadura correcta. Pese a ello, es más común que se inserte una fuente de impedancia en serie con el devanado secundario del transformador para suministrar esta característica, como se aprecia en la figura 1.4. Algunos tipos de fuentes de potencia emplean una combinación de estos mecanismos, donde las derivaciones ajustan el voltaje de circuito abierto (sin carga) de la máquina soldadora y la impedancia proporciona las características de pendiente volt-ampere deseadas.

En las fuentes de potencia de corriente constante, la caída de voltaje, E_s , a través de la impedancia que se muestra en la figura 1.4 aumenta considerablemente al incrementarse la corriente de carga. El aumento en la caída de voltaje causa una reducción



- (A) Si se emplea un inversor primario de estado sólido, este cuadro indica los componentes de control de estado sólido.
- (B) Ubicación de los componentes de control en serie, si se emplean.
- (C) Control de rectificador o SCR, si la fuente de potencia produce salida de cc.
- (D) Dispositivo de conmutación secundario de estado sólido si se emplea control tipo conmutador. También indica la posición del resistor de pendiente, si se usa, o del inductor para el circuito de ca.

Figura 1.2—Principales elementos eléctricos de una fuente de potencia de transformador

considerable en el voltaje del arco, E_A . Un ajuste del valor de la impedancia en serie controla su caída de voltaje y la relación entre la corriente de carga y el voltaje de carga. Esto se conoce como *control de corriente* o, en algunos casos, *control de pendiente*. El voltaje E_a prácticamente es igual al voltaje sin carga (de circuito abierto) de la fuente de potencia.

En las fuentes de potencia de voltaje constante, el voltaje de salida es muy cercano al que requiere el arco. La caída de voltaje, E_a , a través de la impedancia (reactor) apenas si se incrementa

conforme aumenta la corriente de carga. La reducción en el voltaje de carga es pequeña. El ajuste del valor de la reactancia no permite controlar bien la relación entre la corriente de carga y el voltaje de carga.

Este método de control de pendiente con reactores simples también permite controlar el voltaje con reactores saturables o amplificadores magnéticos. La figura 1.5 muestra una relación vectorial ideal de los voltajes alternantes para el circuito de la figura 1.4 cuando se usa un reactor como dispositivo de impedancia. La caída de voltaje a través de la impedancia más el voltaje de carga es igual al voltaje sin carga sólo cuando la suma se hace vectorialmente. En el ejemplo de la figura, el voltaje de circuito abierto del transformador es de 80 V; la caída de voltaje a través del reactor es de aproximadamente 69 V cuando el voltaje de carga (equivalente a un resistor) es de 40 V. Es necesario sumar vectorialmente porque los voltajes de carga y de impedancia alternantes no están en fase temporal.

La caída de voltaje a través de una impedancia en serie en un circuito de ca se suma vectorialmente al voltaje de carga para dar el voltaje del secundario del transformador. Si se varía la caída de voltaje a través de la impedancia, se podrá modificar el voltaje de carga. Esta peculiar característica (suma vectorial) de voltaje de impedancia en los circuitos de ca está relacionada directamente con el hecho de que se puede usar tanto reactores como resistencias para producir una característica de voltaje descendente que cae. Una ventaja del reactor es que consume muy poca o ninguna potencia, aunque por él fluya una corriente y pueda medirse un voltaje a través de él.

Cuando se usan resistores, se pierde potencia y la temperatura se eleva. En teoría, en un circuito puramente resistivo (sin reactancia), la caída de voltaje a través del resistor podría sumarse aritméticamente al voltaje de carga para dar el voltaje de salida del transformador. Por ejemplo, una máquina soldadora

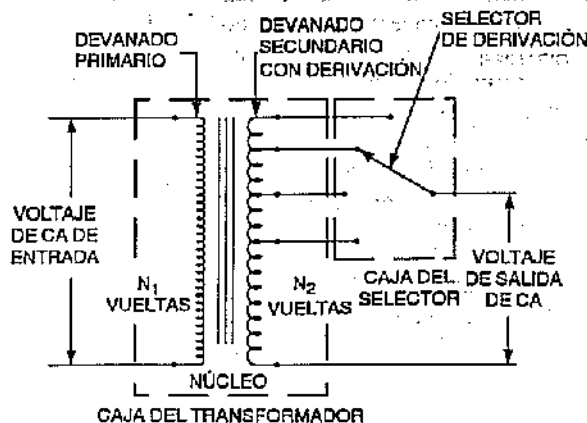


Figura 1.3—Transformador para soldadura con derivación del devanado secundario

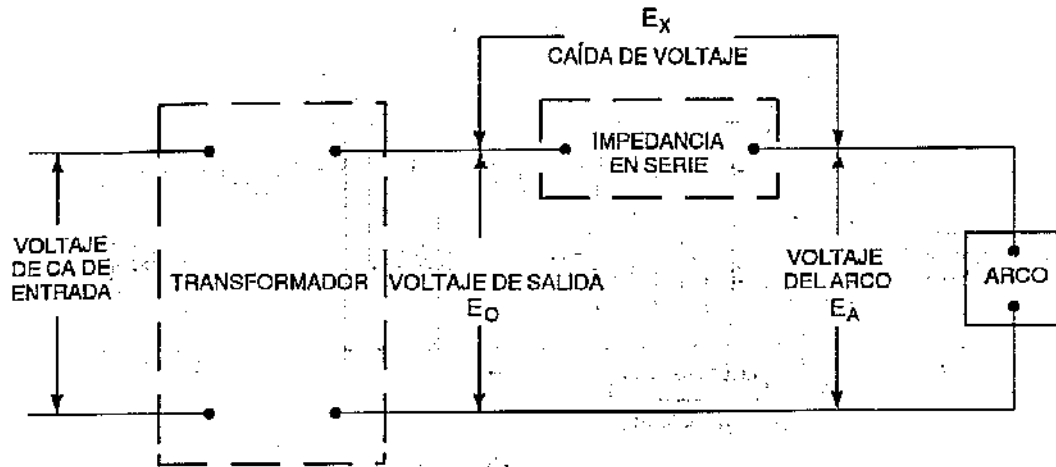


Figura 1.4—Control típico de la corriente de salida por impedancia en serie

con una característica de corriente aproximadamente constante, un circuito abierto de 80 V y un arco que requiere 25 V y 200 A, tendría que disipar $55 \text{ V} \times 200 \text{ A} = 11\,000 \text{ watts (W)}$ en el resistor para alimentar 5000 W al arco. La razón es que en un circuito resistivo el voltaje y la corriente están en fase. En el circuito reactivo, el cambio de fase hace que la pérdida de potencia se reduzca considerablemente. En un circuito así sólo intervienen la pérdida del hierro y la pérdida del cobre, que son muy pequeñas en comparación.

Puede usarse reactancia inductiva variable o inductancia mutua variable para controlar las características volt-amperes en fuentes de potencia para soldadura por arco de transformador o

de transformador-rectificador típicas. La impedancia equivalente de una reactancia inductiva variable o de una inductancia mutua se encuentra en el circuito eléctrico de ca de la fuente de potencia, en serie con el circuito secundario del transformador, como se muestra en la figura 1.4. Otra ventaja importante de la reactancia inductiva es que el cambio de fase producido por el reactor en la corriente alterna mejora la estabilidad del arco para un voltaje de circuito abierto dado. Ésta es una ventaja en los procesos de soldadura por arco de metal protegido y de tungsteno y gas.

Hay varias maneras de modificar la reactancia de un reactor. Una es cambiando de derivación en una bobina o empleando otros métodos eléctricos/mecánicos que se verán más adelante. Al variar la reactancia se altera la caída de voltaje a través del reactor. Así, para cualquier valor de reactancia inductiva, se puede graficar una curva volt-amperes específica. Esto crea la función de control dominante de este tipo de fuentes de potencia.

Además de ajustarse la reactancia, también puede ajustarse la inductancia mutua entre las bobinas del primario y el secundario. Esto puede hacerse desplazando las bobinas una respecto a la otra empleando una derivación móvil que puede insertarse en el transformador o sacarse de él. Estos métodos alteran el acoplamiento magnético de las bobinas produciendo una inductancia mutua ajustable.

En las fuentes de potencia ca-cc para soldadura que cuentan con transformador y rectificador, el rectificador se encuentra entre la impedancia ajustable o las derivaciones del transformador y la terminal de salida. Además, las fuentes de potencia para soldadura por arco tipo transformador-rectificador por lo regular incluyen una inductancia estabilizadora o *choke*, situado en el circuito de soldadura de cc, cuyo propósito es mejorar la estabilidad del arco.

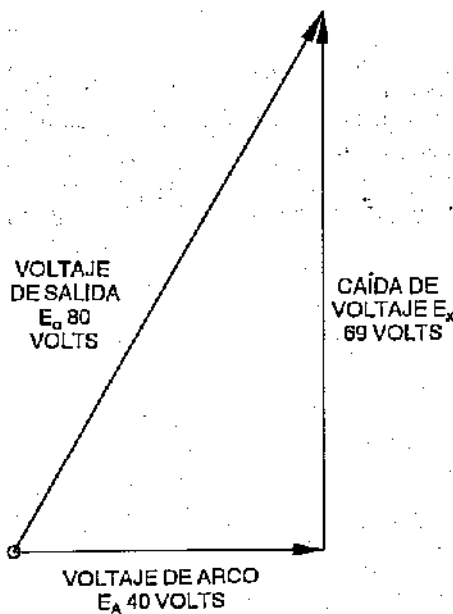


Figura 1.5—Relación vectorial ideal de la salida de voltaje alternante empleando control de reactor

GENERADOR Y ALTERNADOR

TAMBIÉN SE USA maquinaria giratoria como fuente de potencia para soldadura por arco. Estas máquinas son de dos tipos: generadores que producen corriente continua y alternadores que producen corriente alterna.

El voltaje de salida sin carga de un generador de cc puede controlarse con una corriente variable relativamente pequeña en el devanado de campo principal o en paralelo. Esta corriente controla la salida del devanado de campo en serie o contrario del generador de cc que suministra la corriente de soldadura. La polaridad puede invertirse cambiando la conexión entre el excitador y el campo principal. Por lo regular no se necesita un inductor o reactor de filtro para mejorar la estabilidad con este tipo de equipo de soldadura. En vez de ello, Las múltiples vueltas del devanado en serie en los polos de campo del generador rotatorio proporcionan inductancia de sobra para garantizar un arco estable. Estas unidades se describirán con mayor detalle más adelante en este mismo capítulo.

Una fuente de potencia de alternador (una fuente de potencia de tipo giratorio en la que se produce ca que se utiliza directamente o se rectifica para obtener cc) puede emplear una combinación de los mecanismos de ajuste antes descritos. Se puede usar un reactor con derivaciones para hacer ajustes burdos a la salida para soldadura, y el ajuste fino puede efectuarse controlando la fuerza del campo.

DIODOS DE ESTADO SÓLIDO

El TÉRMINO POR excepción *estado sólido* proviene de la física del estado sólido: la ciencia de los sólidos cristalinos. Se han desarrollado métodos para tratar ciertos materiales modificando sus propiedades eléctricas. El más importante de esos materiales es el silicio.

Las fuentes de potencia de transformador-rectificador o de alternador-rectificador utilizan rectificadores para convertir ca en cc. Las primeras máquinas soldadoras empleaban rectificadores de selenio. En la actualidad, la mayor parte de los rectificadores se fabrica con silicio por razones de economía, capacidad de transporte de corriente, confiabilidad y eficiencia.

Un solo elemento rectificador se denomina *diodo*: una válvula eléctrica de una sola vía. Si un diodo se coloca en un circuito eléctrico, permite que la corriente fluya sólo en una dirección: en aquella en la que el ánodo del diodo es positivo respecto al cátodo. Si se disponen los diodos de manera adecuada, es posible convertir ca en cc.

La resistencia al flujo de la corriente a través de un diodo produce una caída de voltaje entre las terminales del componente y genera calor dentro del diodo. Si el calor no se disipa, la temperatura del diodo puede elevarse lo suficiente para hacer que el componente falle. Por ello, los diodos normalmente se montan sobre sumideros de calor (placas de aluminio) para eliminar el calor.

Los diodos tienen límites en cuanto a la magnitud del voltaje que pueden bloquear en la dirección inversa (ánodo negativo y cátodo positivo). Esto se expresa como la especificación de voltaje del dispositivo. Los diodos de fuentes de potencia para soldadura por lo regular se escogen con una especificación de bloqueo de por lo menos el doble del voltaje de circuito abierto, a fin de contar con un margen de operación seguro.

Un diodo puede resistir picos de corriente bastante superiores a su especificación normal de estado estacionario, pero un transitorio alto de voltaje inverso puede dañarlo. La mayor parte de las fuentes de potencia de rectificador tienen un resistor, condensador u otro dispositivo electrónico para suprimir los transitorios de voltaje que pudieran dañar a los rectificadores.

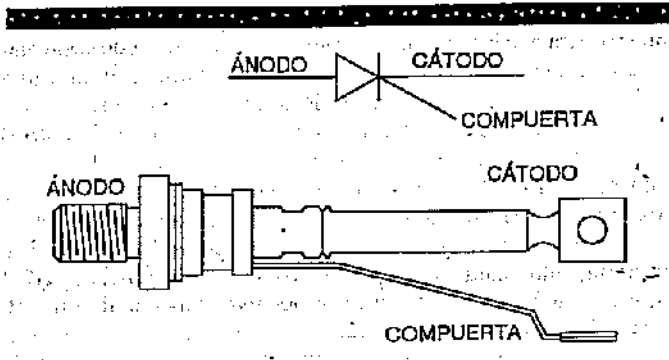


Figura 1.6—Rectificador controlado por silicio

TIRISTOR DE RECTIFICADOR CONTROLADO POR SILICIO (SCR)

TAMBIÉN PUEDEN USARSE dispositivos de estado sólido con características especiales para controlar directamente la potencia de soldadura alterando la corriente de voltaje o la forma de onda del voltaje. Estos dispositivos de estado sólido han reemplazado a los reactores saturables, derivaciones móviles, bobinas móviles, etc. que antes se usaban para controlar la salida de los transformadores de soldadura. Uno de los más importantes de dichos dispositivos es el rectificador controlado por silicio (*silicon controlled rectifier, SCR*), a veces llamado *tiristor*.

El SCR es una variación del diodo con un disparador denominado *compuerta*, como se ilustra en la figura 1.6. El SCR no conduce en tanto no se aplica una señal eléctrica positiva a la compuerta. Cuando esto sucede, el dispositivo se convierte en un diodo, y conducirá la corriente mientras el ánodo sea positivo con respecto al cátodo. Sin embargo, una vez que comienza a conducir, la corriente no puede interrumpirse enviando una señal a la compuerta; la conducción cesará sólo si el voltaje aplicado al ánodo se vuelve negativo con respecto al cátodo. No volverá a haber conducción hasta que se aplique un voltaje positivo al ánodo y la compuerta reciba otra señal.

Los SCR tienen dos aplicaciones principales: en configuraciones de inversor y en modalidad de control de fase con

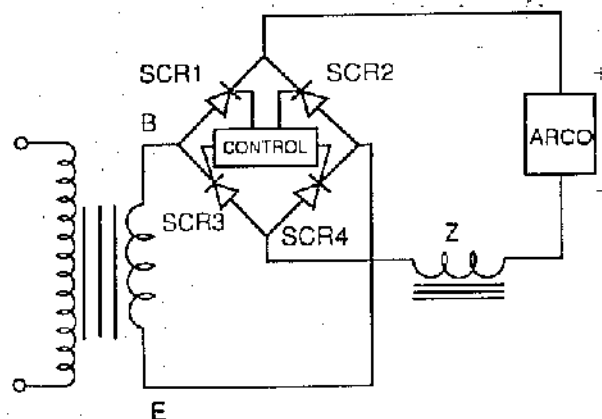


Figura 1.7—Fuente de potencia de cc monofásica controlada mediante un puente de SCR

transformadores. Si se emplea la acción de una señal de compuerta para encender selectivamente el SCR, se puede controlar la salida de una fuente de potencia para soldadura. En la figura 1.7 se muestra un circuito de SCR de control de fase típico.

Con referencia a la figura, durante el tiempo que el punto B es positivo con respecto al punto E, no fluirá corriente hasta que tanto SCR 1 como SCR 4 reciban una señal de compuerta que los encienda. En ese instante, fluirá corriente a través de la carga. Al término de ese medio ciclo, cuando la polaridad de B y E se invierta, se aplicará un voltaje negativo a través de SCR 1 y SCR 4, y se apagarán. Con el punto E positivo respecto al punto B, una señal de compuerta aplicada por el control a SCR 2 y SCR 3 hará que estos dos conduzcan, suministrando una vez más potencia al circuito de carga. Para ajustar la potencia en la carga, es necesario saber en qué preciso momento de cada medio ciclo se debe iniciar la conducción.

Si se requiere potencia elevada, la conducción se inicia poco después del comienzo del medio ciclo; si el requerimiento es de baja potencia, la conducción se retrasa hasta más avanzado el medio ciclo. Esto se conoce como *control de fase*. El resultado se muestra en la figura 1.8. La potencia resultante se suministra en pulsos a la carga, y es proporcional al área sombreada bajo la envoltura de la forma de onda. En la figura se observa que puede haber intervalos significativos durante los cuales no se suministra potencia a la carga. Esto puede hacer que se apague el arco, sobre todo a niveles de potencia bajos. Por tanto, es necesario filtrar la onda.

La figura 1.7 muestra una inductancia grande, Z , en el circuito de carga. Para que un circuito monofásico opere dentro de un intervalo de control apreciable, Z debe ser muy grande a fin de alisar los pulsos lo suficiente como para que los tiempos de conducción se incrementen. Por otro lado, si se usan SCR en un circuito trifásico, los intervalos sin conducción se reducirán significativamente. La inductancia (Z) tendría un tamaño acorde. Por esta razón, los circuitos de SCR trifásicos son más prácticos para las fuentes de potencia de soldadura, a menos que la salida sea ca/cc y se utilice moldeo de onda.

La sincronización de las señales de compuerta se debe controlar con mucha precisión. Ésta es otra función del control que se muestra en la figura 1.7. Para adaptar el sistema a un servicio de soldadura satisfactorio, se requiere otra función: retroalimentación. La naturaleza de la retroalimentación depende del parámetro que se va a controlar y del grado de control requerido. Si se desean características de voltaje constante, la retroalimentación debe ser alguna señal que sea proporcional al voltaje del arco. En todo momento, esa señal controla con precisión el voltaje del arco, de modo que el control pueda sincronizar debidamente la iniciación de los SCR en la secuencia correcta para mantener el voltaje preestablecido. El mismo efecto se logra para corriente constante empleando una referencia de corriente.

Casi todas las fuentes de potencia para soldadura de tipo comercial controladas por fase con SCR son máquinas trifásicas, tanto de corriente constante como de voltaje constante. Estas fuentes tienen funciones bien definidas porque las características de salida se controlan electrónicamente. Por ejemplo, es muy fácil incluir compensación automática del voltaje de línea, lo que permite mantener la potencia de soldadura en el nivel exacto establecido aunque el voltaje de la línea de entrada varíe. Además, las curvas volt-ampere pueden moldearse y adaptarse a un proceso de soldadura en particular o a una aplicación de dicho proceso. Este tipo de máquinas puede adaptar su característica estática a cualquier proceso de soldadura, desde uno que se aproxime a un genuino voltaje constante a uno que tenga corriente prácticamente constante. Otras posibilidades son el pulsado, el control de corriente respecto al voltaje del arco, el control del voltaje del arco respecto a la corriente y un pulso de corriente o voltaje elevado al principio de la soldadura.

Un SCR también puede fungir como contactor secundario, permitiendo el flujo de la corriente sólo cuando el control deja que el SCR conduzca. Ésta es una función útil en operaciones de ciclaje rápido, como la soldadura de puntos y la soldadura provisional. Sin embargo, un contactor de SCR no proporciona el aislamiento eléctrico que se tendría con un contactor o interruptor mecánico. Por tanto, se requiere un cortacircuito prima-

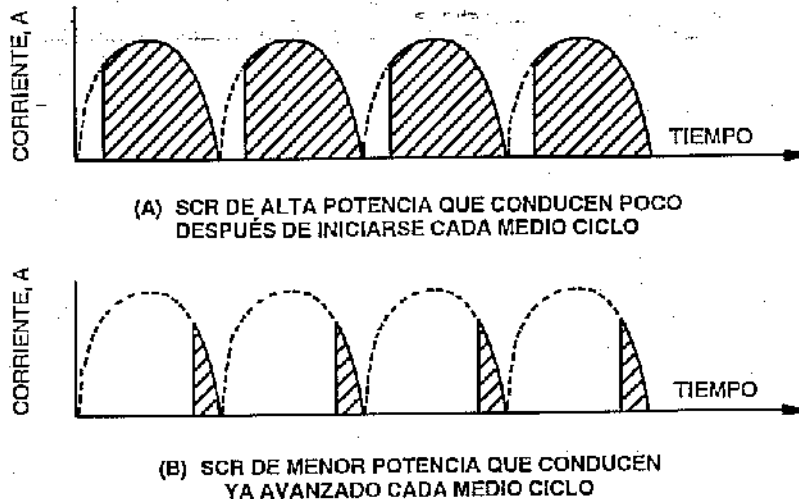


Figura 1.8—Control de fase con un puente de SCR

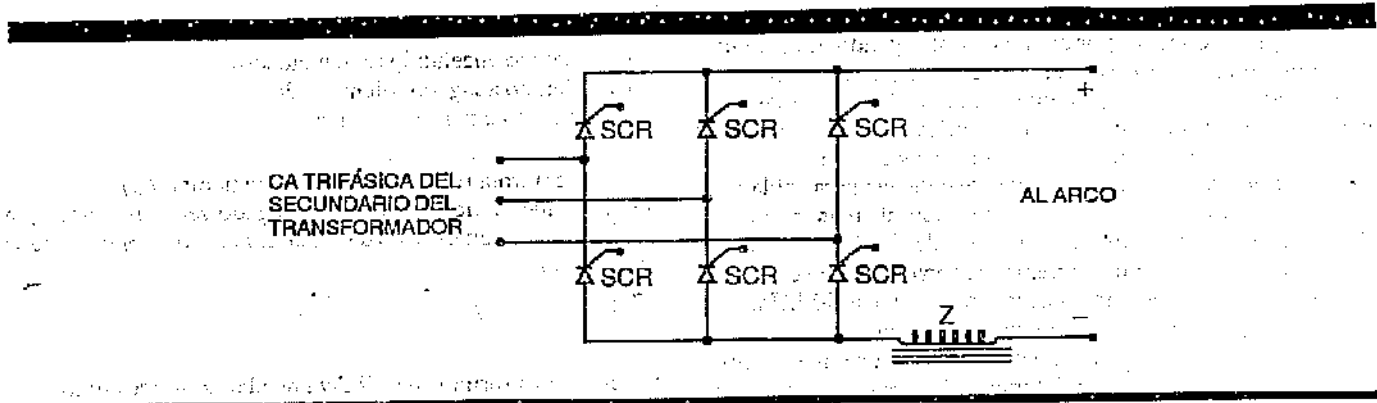


Figura 1.9—Puentes trifásico que emplea seis SCR (control de onda completo)

rio o algún otro dispositivo que proporcione aislamiento eléctrico para fines de seguridad.

Son varias las configuraciones de SCR que pueden usarse en soldadura por arco. La figura 1.9 muestra un puente trifásico con seis SCR. Si la frecuencia de línea es 60 Hz, esta disposición produce una frecuencia de rizo de 360 Hz si hay carga. También ofrece un control preciso y una respuesta rápida; de hecho, cada medio ciclo de la salida trifásica se controla por separado. La respuesta dinámica mejora porque se reduce el tamaño del inductor requerido para alisar la corriente de soldadura.

La figura 1.10 es un diagrama de un rectificador de puente trifásico con tres diodos y tres SCR. Debido al mayor rizo de corriente, esta configuración requiere un inductor de mayor tamaño que la unidad con seis SCR y, por lo mismo, tiene una respuesta dinámica más lenta. Se puede añadir un cuarto diodo, llamado *diodo libre*, para recircular las corrientes inductivas del inductor de modo que los SCR se apaguen, es decir, conmuten. Esto resulta más económico que la unidad de seis SCR porque utiliza menos SCR y una unidad de control de más bajo costo.

TRANSISTORES

EL TRANSISTOR ES otro dispositivo de estado sólido que se emplea en las fuentes de potencia para soldadura. Debido a su costo, el empleo de transistores está limitado a fuentes de potencia que requieren un control preciso de muchas variables. El transistor difiere del SCR en muchos aspectos. Uno es que la

conducción a través del dispositivo es proporcional a la señal de control aplicada. Si no hay señal, no hay conducción. Si se aplica una señal pequeña, la conducción será proporcionalmente pequeña; si la señal es grande, la conducción aumentará de manera acorde. A diferencia del SCR, el control puede apagar el dispositivo sin esperar a que se invierta la polaridad o haya un tiempo "apagado". Como los transistores no tienen la capacidad de transporte de corriente de los SCR, se pueden necesitar varios de ellos para producir la salida de un solo SCR.

Hay varios métodos para aprovechar los transistores en fuentes de potencia de soldadura, como la modulación de frecuencia y la modulación de anchura de pulso. Con modulación de frecuencia, la corriente de soldadura se controla variando la frecuencia suministrada al transformador principal. Puesto que la frecuencia está variando, el tiempo de respuesta también cambia. El tamaño del transformador y del inductor debe optimizarse para la frecuencia de operación más baja posible.

Con modulación de anchura de pulso, la salida de soldadura se controla variando el tiempo de conducción del dispositivo conmutador. Puesto que la frecuencia es constante, el tiempo de respuesta es constante y los dispositivos magnéticos pueden optimizarse para una frecuencia de operación.

INVERSOR DE ESTADO SÓLIDO

LO QUE MÁS contribuye al peso/masa de cualquier fuente de potencia son los componentes magnéticos (transformador prin-

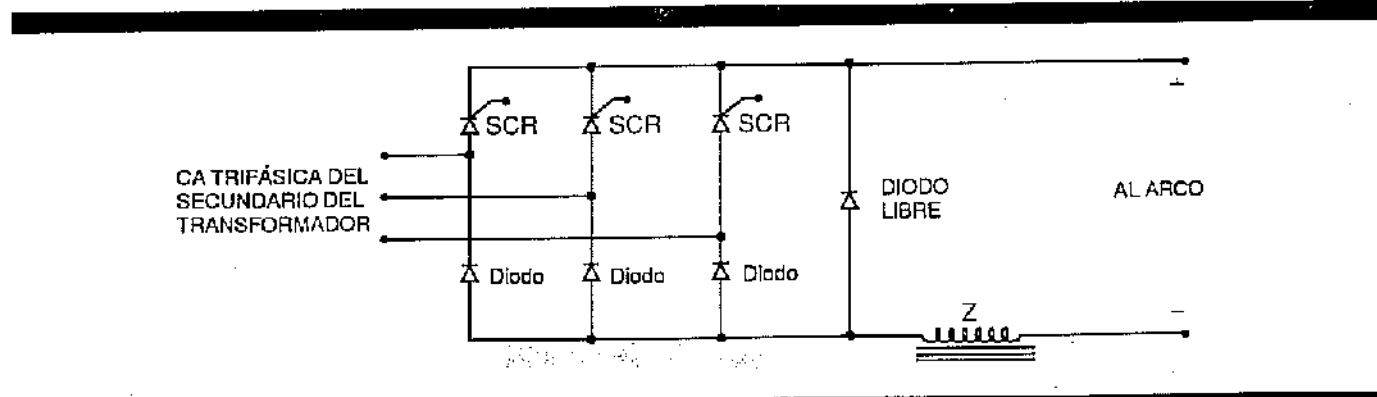


Figura 1.10—Puentes trifásico híbrido con tres SCR y cuatro diodos (control de media onda)

cial e inductor de filtro). Se han hecho varios intentos por reducir su peso y tamaño; por ejemplo, sustituyendo el cobre por aluminio en los devanados. El empleo de un circuito inversor puede reducir significativamente el tamaño y el peso de esos componentes, y también sus pérdidas eléctricas. Una fuente de potencia basada en inversor es más pequeña y compacta, requiere menos electricidad que las fuentes de potencia para soldadura convencionales y ofrece un tiempo de respuesta más rápido.

Un inversor es un circuito que se vale de dispositivos de estado sólido (SCR o transistores) para convertir cc en ca de alta frecuencia, por lo regular en el intervalo de 1 a 50 kHz. Las fuentes de potencia para soldadura convencionales emplean transformadores que operan con una frecuencia de línea de 50 o 60 Hz. Puesto que el tamaño del transformador es inversamente proporcional a la frecuencia de línea o aplicada, es posible reducir el tamaño y el peso de la fuente de potencia hasta en un 75% empleando circuitos inversores.

Un circuito inversor controla la potencia de salida aprovechando el principio de control de razón de tiempo (*time ratio control*, TRC). Los dispositivos de estado sólido (semiconductores) de un inversor actúan como interruptores; o bien están "encendidos" y conducen, o están "apagados" y bloquean. Esta operación de "encendido" y "apagado" a veces recibe el nombre de *operación en modo de interruptor*. TRC es la regulación de los tiempos de "encendido" y "apagado" de los interruptores para controlar la salida. La figura 1.11 ilustra un circuito de TRC sencillo que controla la salida a una carga que podría ser un arco de soldadura.

Cuando el interruptor está encendido (*on*), el voltaje de salida (V_{out}) es igual al voltaje de entrada (V_{in}); cuando el interruptor está apagado (*off*), $V_{out} = 0$. El valor medio de V_{out} es como sigue:

$$V_{out} = \frac{t_{on} \cdot V_{in} + 0 \cdot t_{off}}{t_{on} + t_{off}} \text{ o bien } \frac{V_{in} \cdot t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (1.2)$$

Por tanto: $V_{out} = V_{in} \cdot \frac{t_{on}}{t_p}$

donde

- t_{on} = tiempo encendido (conduciendo)
- t_{off} = tiempo apagado (bloqueando)
- $t_p = t_{on} + t_{off}$ o tiempo de un ciclo

V_{out} se controla regulando la razón de tiempo t_{on} / t_p .

Puesto que el ciclo encendido/apagado se repite para cada intervalo t_p , la frecuencia (f) de los ciclos encendido/apagado se define como:

$$f = \frac{1}{t_p} \quad (1.3)$$

Así pues, la fórmula de TRC ya puede escribirse como:

$$V_{out} = V_{in} \cdot t_{on} \cdot f$$

La fórmula de TRC escrita de esta manera permite entrever dos métodos para controlar una fuente de potencia de inversor. Si se varía t_{on} , el inversor emplea TRC con anchura de pulso modulada. Otro método de control de inversor, llamado *TRC de modulación de frecuencia* varía f . Se ha utilizado tanto la modulación de frecuencia como la modulación de anchura de pulso en inversores para soldadura comerciales.

La figura 1.12 es un diagrama de bloques de un inversor empleado para soldadura con cc. La potencia de entrada trifásica o monofásica de 50/60 Hz se convierte en cc mediante un rectificador de onda completa. Esta cc se aplica al inversor que, valiéndose de interruptores semiconductores, la invierte para dar una ca de onda cuadrada de alta frecuencia. En otra variación que también se emplea para soldadura, el inversor produce ondas senoidales mediante una tecnología resonante con control por modulación de frecuencia. La conmutación de los semiconductores se realiza con una frecuencia de entre 1 y 50 kHz, dependiendo del componente empleado y del método de control.

Este voltaje de alta frecuencia permite emplear un transformador reductor más pequeño. Una vez transformada, la ca se

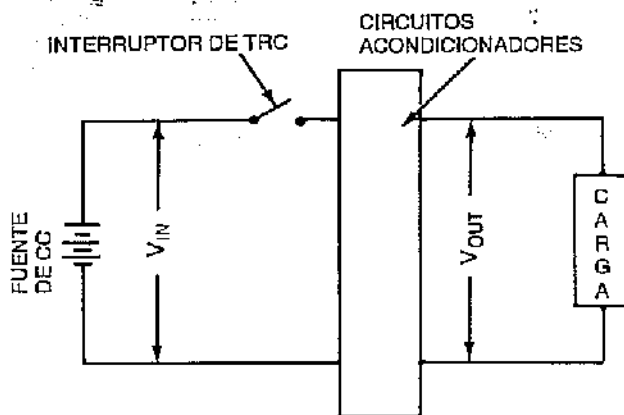


Figura 1.11—Diagrama simplificado de un circuito inversor empleado para demostrar el principio de control de razón de tiempo. (Obsérvese que los circuitos acondicionadores incluyen componentes como el transformador, rectificador e inductor mostrados en la figura 1.7.)

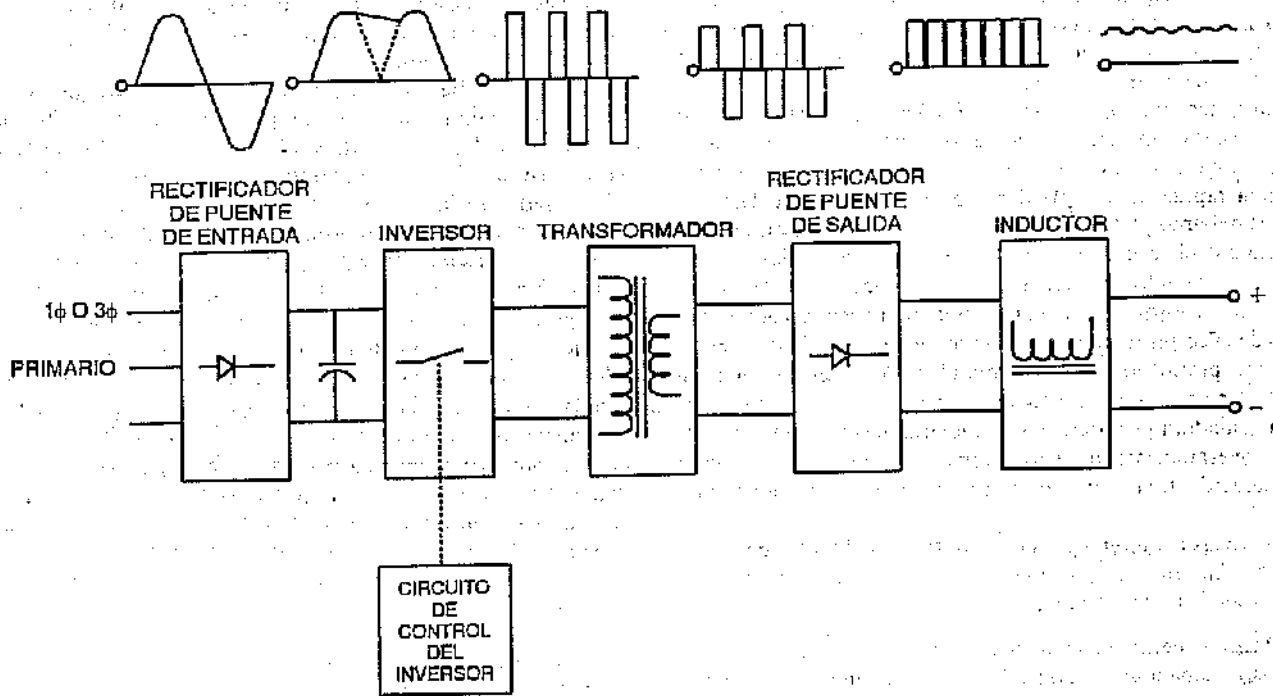


Figura 1.12—Diagrama de inversor que muestra las secciones de la fuente de potencia y las formas de onda del voltaje

rectifica a cc para soldar. Controles de estado sólido permiten al operador seleccionar entre salida de corriente constante y de voltaje constante; además, si se cuenta con las opciones apropiadas, estas fuentes pueden proporcionar salidas a pulsos.

Las capacidades de los semiconductores y la topología específica de los circuitos determinan el tiempo de respuesta y la frecuencia de conmutación. Los tiempos de respuesta rápidos generalmente están asociados a las frecuencias de conmutación y de control más altas, produciendo arcos más estables y de mejor rendimiento. No obstante, es preciso tener en cuenta otras variables, como la longitud de los cables para soldar, ya que pueden afectar el desempeño de la fuente de potencia. La tabla 1.1 compara los dispositivos conmutadores de inversor y la frecuencia que se aplica al transformador.

La tecnología de inversor también puede servir para mejorar el rendimiento de las fuentes de potencia de ca para soldadura. Otra aplicación es en las fuentes de potencia de cc de corriente constante empleadas para el corte con plasma.

Tabla 1.1
Tipos de dispositivos conmutadores de inversor y frecuencia aplicada al transformador

Dispositivo conmutador	Intervalo de frecuencia
Dispositivos tipo SCR	1 kHz a 10 kHz
Dispositivos tipo transistor	10 kHz a 100 kHz

CARACTERÍSTICAS VOLT-AMPERE

LA EFECTIVIDAD DE todas las fuentes de potencia para soldadura está determinada por dos clases de características operativas, cada una de las cuales afecta el rendimiento de diferente manera. Se definen como las características estática y dinámica. Ambas afectan la estabilidad del arco, pero de forma distinta dependiendo del proceso de soldadura.

Las características de salida estáticas se miden fácilmente en condiciones de estado estacionario empleando procedimientos de prueba convencionales con cargas resistivas. Por lo regular se usa un conjunto de curvas características de voltaje de salida contra corriente de salida (curvas volt-ampere) para describir las características estáticas.

La característica dinámica de una fuente de potencia para soldadura por arco se determina midiendo las variaciones transitorias en la corriente y el voltaje de salida que aparecen en el arco. Las características dinámicas describen variaciones instantáneas o variaciones que ocurren durante intervalos muy cortos, del orden de milésimas de segundo.

La generalidad de los arcos de soldadura opera en condiciones que cambian continuamente. En particular, hay transitorios (1) durante el encendido del arco, (2) cuando la longitud del arco cambia rápidamente, (3) durante la transferencia de metal a través del arco y (4) en el caso de soldadura con ca, durante la extinción del arco y la reignición en cada medio ciclo.

Estos transitorios del arco pueden ocurrir en 0.001 s, el intervalo en el que ocurre un cambio significativo en la ionización de la columna del arco. La fuente de potencia debe responder con prontitud a estas demandas. Por ello, es importante controlar las características dinámicas de una fuente de potencia para soldadura por arco. Las características volt-ampere estáticas o de estado estacionario no sirven de mucho para determinar las características dinámicas de un sistema de soldadura por arco.

Entre las características de diseño de las fuentes de potencia para soldadura por arco que sí afectan las características dinámicas son las que ofrecen:

- (1) Almacenamiento local de la energía transitoria, como circuitos de capacitancia en paralelo o inductancia en serie de cc.
- (2) Controles de retroalimentación en sistemas regulados automáticamente.
- (3) Modificaciones de la forma de onda o de las frecuencias de operación del circuito.

El objetivo al modificar o controlar estas características casi siempre es mejorar la estabilidad del arco. Entre los resultados benéficos están:

- (1) Transferencia de metal más uniforme.
- (2) Reducción en las salpicaduras de metal.
- (3) Menor turbulencia en el charco de soldadura.

El fabricante de una fuente de potencia generalmente publica las características volt-ampere estáticas. No existe un método para especificar las características dinámicas que goce de aceptación universal. El usuario debe solicitar al fabricante confirmación de que las características tanto estáticas como dinámicas de la fuente de potencia son aceptables para la aplicación prevista.

CORRIENTE CONSTANTE

EN LA FIGURA 1.13 se muestran curvas de salida volt-ampere (V-A) típicas para una fuente de potencia de corriente constante convencional. A veces se dice que la fuente es *de caída* a causa de la marcada pendiente descendente (negativa) de las curvas. La fuente de potencia puede contar con regulación del voltaje de circuito abierto además del control de la corriente de salida. Al variar cualquiera de estos controles se modificará la pendiente de la curva volt-ampere.

El efecto de la pendiente de la curva V-A sobre la potencia de salida es evidente en la figura 1.13. En la curva A, que tiene un circuito abierto de 80 V, un aumento uniforme en el voltaje del arco de 20 a 25 volts (25%) produciría una disminución en

la corriente de 123 a 115 A (6.5%). El cambio en la corriente es relativamente pequeño. Por tanto, en un proceso de soldadura con electrodo consumible, la tasa de fusión del electrodo se mantendría más o menos constante si el cambio en la longitud del arco no es muy grande.

Si se ajusta la fuente de potencia para un circuito abierto de 50 V y una pendiente menos empinada que intercepte la misma posición de 20 V y 123 A, se obtendrá la curva volt-ampere B. En este caso, el mismo incremento en el voltaje del arco de 20 a 25 V reducirá la corriente de 123 a 100 A (19%), que es un cambio bastante más significativo. En la soldadura manual, la curva V-A más plana daría a un operador experimentado la oportunidad de variar sustancialmente la corriente modificando la longitud del arco. Esto podría ser útil para soldar fuera de posición, porque el soldador podría controlar la tasa de fusión del electrodo y el tamaño del charco fundido. Pese a ello, los soldadores menos habilidosos podrían preferir en general que la corriente permaneciera constante al cambiar la longitud del arco.

El control de corriente sirve para suministrar una salida más baja. Produciría curvas volt-ampere con pendiente más abrupta, como se ilustra con las curvas C y D, las cuales ofrecen la ventaja de una salida de corriente casi constante que permite cambios de mayor magnitud en el voltaje con variaciones pequeñas en la corriente.

VOLTAJE CONSTANTE

EN LA FIGURA 1.14 se muestra una curva volt-ampere típica para una fuente de potencia de voltaje constante convencional. Esta fuente de potencia no tiene una salida de voltaje verdaderamente constante; tiene una pendiente ligeramente descendente (negativa) porque la impedancia eléctrica interna del circuito de soldadura causa una ligera caída del voltaje en la salida. Si se modifica esa impedancia se alterará la pendiente de la curva volt-ampere.

Partiendo del punto B de la figura 1.14, el diagrama muestra que un incremento o decremento del voltaje a A o C (5 V o 25%) produce un cambio considerable en el amperaje (100 A o 50%). Esta característica de V-A es apropiada para procesos con alimentación continua del electrodo, como la soldadura por arco de metal con gas, por arco sumergido y por arco con núcleo de fundente; y sirve para mantener un arco de longitud constante. Un pequeño cambio en la longitud del arco (voltaje) causará un cambio apreciable en la corriente de soldadura. Esto elevará o reducirá automáticamente la tasa de fusión del electrodo para recuperar la longitud de arco (voltaje) deseada. Este efecto ha recibido el nombre de *autorregulación*. Algunas fuentes de potencia de voltaje constante cuentan con ajustes para modificar la pendiente o la forma de la curva de V-A. Si esto se hace con dispositivos de inducción, las características dinámicas también cambiarán.

La curva de la figura 1.14 también puede servir para explicar la diferencia entre las características estática y dinámica de las fuentes de potencia. Por ejemplo, durante la transferencia en cortocircuito de GMAW, la punta del electrodo de soldadura toca el charco de soldadura, causando un cortocircuito. En este punto, el voltaje del arco se aproxima a cero y sólo la resistencia o la inductancia del circuito limita el rápido incremento de la corriente. Si la fuente de potencia respondiera instantáneamente, una corriente muy alta fluiría de inmediato por el circuito de soldadura, derritiendo con rapidez el electrodo en cortocircuito.

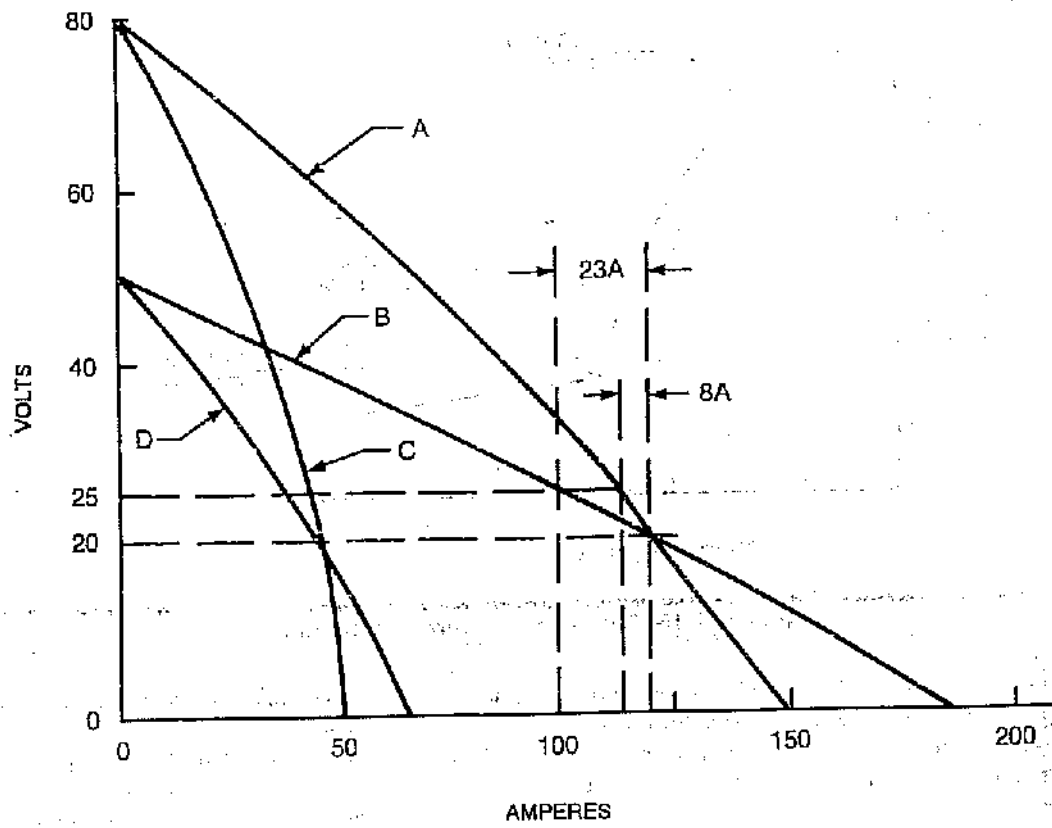


Figura 1.13—Características volt-ampere típicas de una fuente de potencia "de caída" con voltaje de circuito abierto ajustable

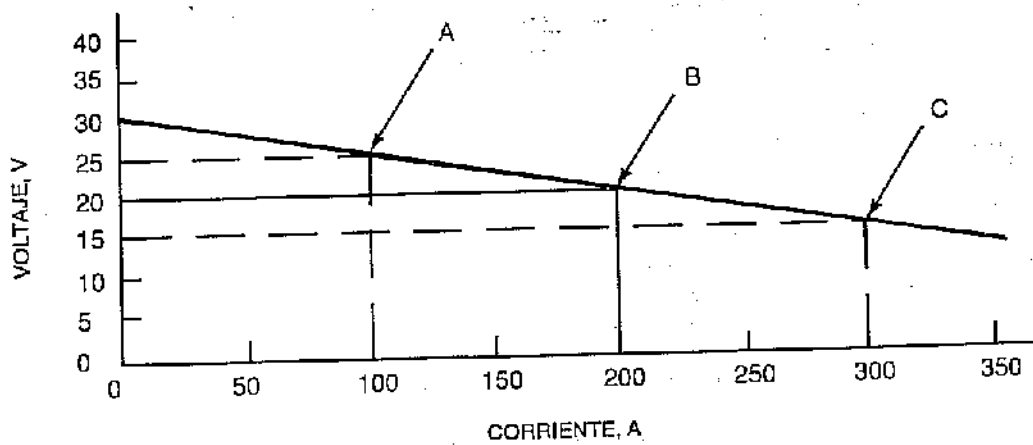


Figura 1.14—Relación de salida volt-ampere de una fuente de potencia de voltaje constante

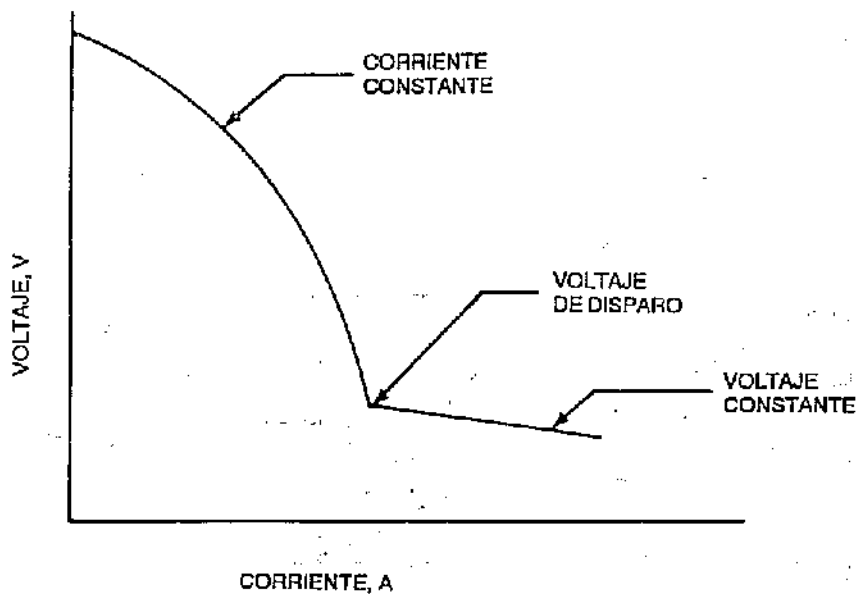


Figura 1.15—Curva volt-amperes combinada

liberándolo con fuerza explosiva y dispersando el metal de soldadura como salpicaduras. Las características dinámicas incluidas en el diseño de esta fuente de potencia compensan esta acción limitando la rapidez de cambio de la corriente, con lo que se reduce la fuerza explosiva.

CARACTERÍSTICAS COMBINADAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE CONSTANTES

ES POSIBLE DISEÑAR controles eléctricos que suministren una salida ya sea de voltaje constante o de corriente constante de una

misma fuente de potencia. Estas fuentes pueden usarse en diversos procesos de soldadura.

Las salidas controladas electrónicamente también pueden producir curvas de salida que sean una combinación de corriente constante y voltaje constante, como se muestra en la figura 1.15. La parte superior de la curva es en esencia de corriente constante; sin embargo, por debajo de cierto voltaje de disparo, la curva cambia a voltaje constante. Este tipo de curva es bueno para SMAW porque ayuda al arranque y a evitar que el electrodo se pegue en el charco si el soldador reduce demasiado la longitud del arco.

CICLO DE TRABAJO

LOS COMPONENTES INTERNOS de una fuente de potencia para soldadura tienden a calentarse cuando la corriente de soldadura fluye por la unidad. La cantidad de calor que puede tolerarse depende de (1) la temperatura de ruptura de los componentes eléctricos y (2) los medios aislantes de los devanados del transformador y de otros componentes. Los fabricantes de componentes y las organizaciones que se ocupan de establecer normas en el campo del aislamiento eléctrico especifican estas temperaturas máximas.

Básicamente, el *ciclo de trabajo* es la razón entre el tiempo de carga permitido y un tiempo de prueba especificado. Es importante ajustarse a esta razón para que los devanados y componentes internos y sus sistemas de aislamiento eléctrico no se calienten por encima de su temperatura especificada. Estos criterios de temperatura máxima no cambian con el ciclo de

trabajo ni con la especificación de corriente de la fuente de potencia.

El ciclo de trabajo expresa, en forma porcentual, el tiempo máximo que la fuente de potencia puede suministrar su salida especificada durante cada uno de varios intervalos de prueba sucesivos sin que su temperatura exceda un límite preestablecido. En Estados Unidos, los ciclos de trabajo de la NEMA se basan en un intervalo de prueba de 10 minutos. Algunas agencias y fabricantes de otros países emplean intervalos de prueba más cortos, como por ejemplo 5 minutos. Así, un ciclo de trabajo NEMA del 60% (que es una especificación industrial estándar) significa que la fuente de potencia puede suministrar su salida especificada durante 6 de cada 10 minutos sin sobrecalentarse. (Cabe señalar que una operación ininterrumpida con la "carga especificada" durante 36 minutos de un lapso de una hora no

constituye un ciclo de trabajo del 60%, sino del 100%.) Una fuente de potencia con ciclo de trabajo del 100% está diseñada para producir su salida especificada continuamente sin exceder los límites de temperatura prescritos para sus componentes.

Anteriormente se usaba también una especificación de ciclo de trabajo de una hora para fuentes de potencia de muy alta corriente (750 A o más). Algunos fabricantes todavía producen fuentes de potencia con especificación de ciclo de trabajo de una hora. Para determinar la salida especificada de estas máquinas, se cargan durante una hora con la salida especificada. Acto seguido, la salida se reduce al 75% del valor de corriente especificado y se mantiene durante tres horas más. Las temperaturas de los componentes se miden al final del primer periodo de una hora y al término de la prueba. Estas temperaturas deben estar dentro de los límites permitidos.

El ciclo de trabajo es un factor importante para determinar el tipo de servicio para el cual está diseñada una fuente de potencia. Las unidades industriales diseñadas para soldadura manual normalmente tienen una especificación de ciclo de trabajo del 60%. Para procesos automáticos o semiautomáticos, la especificación suele ser del 100%. Las fuentes de potencia para trabajo ligero por lo regular tienen ciclo de trabajo del 20%. Los fabricantes pueden proporcionar especificaciones con otros valores de ciclo de trabajo.

Un punto importante es que el ciclo de trabajo de una fuente de potencia se basa en la corriente de salida y no en una especificación de kilovolt-ampere o kilowatt. Los fabricantes realizan pruebas de ciclo de trabajo en lo que la NEMA define como condiciones de servicio usuales. Debe tenerse cuidado al basar la operación en otras condiciones que no sean las de servicio usuales. Entre los factores que contribuyen a un rendimiento menor que el calculado o el estimado a partir de las pruebas están una temperatura ambiente elevada, insuficiente aire de enfriamiento y bajo voltaje de línea.

Se dan las siguientes fórmulas para estimar el ciclo de trabajo a salidas distintas de la especificada (ecuación 1.4) y para esti-

mar una salida de corriente distinta de la especificada a un ciclo de trabajo determinado (ecuación 1.5):

$$T_a = \left(\frac{I}{I_a} \right)^2 \times T \quad (1.4)$$

$$I_a = I \times \left(\frac{T}{T_a} \right)^{1/2} \quad (1.5)$$

donde

T = ciclo de trabajo especificado en por ciento

T_a = ciclo de trabajo requerido en por ciento

I = corriente especificada con el ciclo de trabajo especificado

I_a = corriente máxima con el ciclo de trabajo requerido

La fuente de potencia nunca debe operarse por encima de su corriente o ciclo de trabajo especificados a menos que se cuente con la aprobación del fabricante.

Ejemplo: ¿Con qué ciclo de trabajo puede operar una fuente de potencia de 200 A con especificación de ciclo de trabajo del 60% si la potencia de salida debe ser de 250 A? Usando la ecuación (1.4):

$$T_a = \left(\frac{200}{250} \right)^2 \times 60\% = (.8)^2 \times .6 = 38\% \quad (1.6)$$

Portanto, esta unidad no debe operar a 250 A durante más de 3.8 minutos de cada periodo de 10 minutos. Si se usa de esta manera, no se excederá la especificación de corriente de ningún componente de la fuente de potencia soldando a 250 A.

Ejemplo: Se quiere operar la fuente de potencia antes mencionada en forma continua (ciclo de trabajo del 100%). ¿Qué corriente de salida no debe excederse? Usando la ecuación (1.5):

$$I_a = 200 \times \left(\frac{60}{100} \right)^{1/2} = 200 \times .775 = 155 \text{ amps} \quad (1.7)$$

Si se opera continuamente, la corriente deberá limitarse a una salida de 155 A.

VOLTAJE DE CIRCUITO ABIERTO

EL VOLTAJE DE circuito abierto es el voltaje en las terminales de salida de una fuente de potencia para soldadura cuando está energizada, pero no se está extrayendo corriente. El voltaje de circuito abierto es uno de los factores de diseño que influyen en el rendimiento de todas las fuentes de potencia para soldadura. En un transformador, el voltaje de circuito abierto es una función del voltaje de entrada primario y de la razón entre las bobinas del primario y del secundario. Aunque desde el punto de vista de la iniciación y estabilidad del arco puede ser deseable un voltaje de circuito abierto elevado, los factores de riesgo eléctrico asociados a los altos voltajes limitan los valores que pueden utilizarse. El costo es otro factor, aunque de menor importancia.

El voltaje de circuito abierto de los generadores o alternadores se relaciona con características de diseño tales como la fuerza del campo magnético, la velocidad de rotación, el número de vueltas de las bobinas de carga, etc. Estas fuentes de potencia generalmente tienen controles que permiten variar el voltaje de circuito abierto.

La norma EW-1 de la NEMA contiene requisitos específicos de voltaje de circuito abierto máximo. Cuando se aplica el voltaje de línea especificado al devanado primario de un transformador, o cuando una máquina soldadora por arco del tipo de generador está trabajando a la velocidad máxima especificada sin carga, el voltaje de circuito abierto no debe exceder los niveles que se muestran en la tabla 1.2.

Las fuentes de potencia de las clases I y II de la NEMA normalmente tienen un voltaje de circuito abierto igual o cercano al máximo especificado. Las fuentes de potencia de arco clase III a menudo suministran dos o más voltajes de circuito abierto. Un sistema consiste en tener un intervalo de amperaje de salida de la fuente de potencia alto y otro bajo. El intervalo bajo normalmente tiene aproximadamente 80 V en circuito abierto, un poco mayor que el intervalo alto. Otro sistema es el de bobina secundaria con derivación, previamente descrito, en el que, a cada nivel de corriente, el voltaje de circuito abierto cambia unos 2 a 4 volts.

Tabla 1.2
Voltajes de circuito abierto máximos para diversos tipos de fuentes de potencia para soldadura con arco

Para aplicaciones manuales y semiautomáticas	
Corriente alterna	80 V rms
Corriente continua - voltaje de rizo* mayor que 10%	80 V rms
Corriente continua - voltaje de rizo* de 10% o menor	100 V prom.
Para aplicaciones automáticas	
Corriente alterna	100 V rms
Corriente continua - voltaje de rizo* mayor que 10%	100 V rms
Corriente continua - voltaje de rizo* de 10% o menor	100 V prom.

* Voltaje de rizo, % = $\frac{\text{voltaje de rizo, rms}}{\text{voltaje total promedio}}$

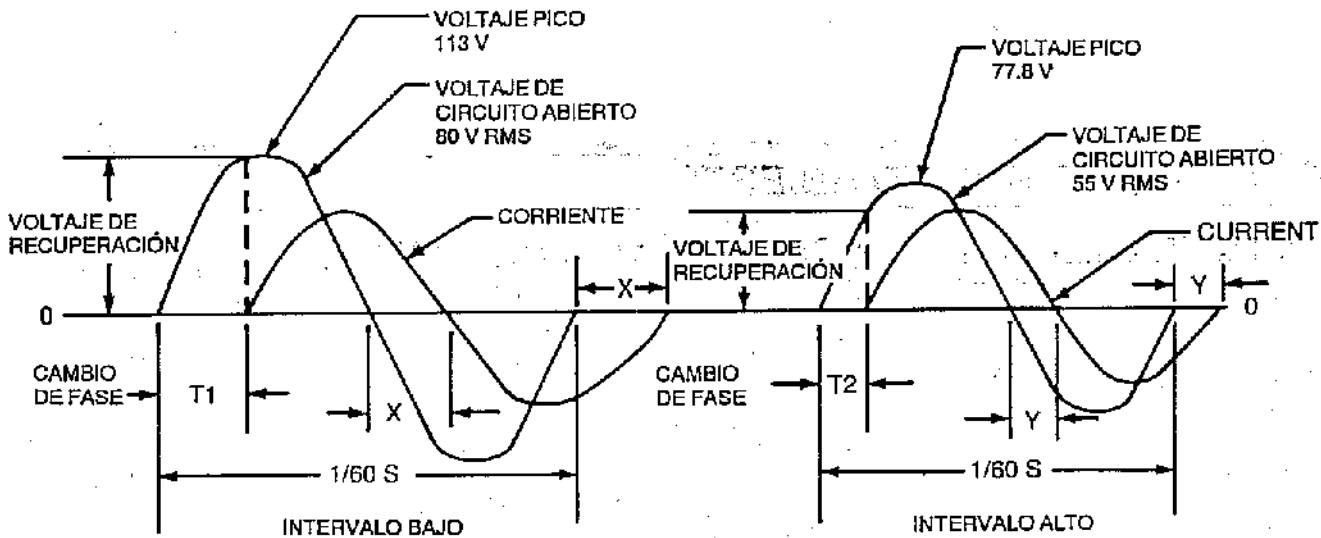
En Estados Unidos, las fuentes de potencia de ca tanto de transformador como de alternador producen inversiones en la dirección del flujo de la corriente cada 1/120 de segundo (60 Hz). En la figura 1.6 se presenta un diagrama de las formas de onda senoidal típicas de una máquina de doble intervalo con voltajes de circuito abierto de 80 y 55 V rms.

Puesto que la corriente debe cambiar de dirección después de cada medio ciclo, es evidente que durante un instante, cuando la forma de onda de la corriente cruza la línea de cero, deja de fluir corriente por el arco. Un instante después, la corriente debe invertir la dirección de su flujo. Sin embargo, durante el periodo en el que la corriente disminuye y llega a cero, el plasma del arco se enfría, reduciendo la ionización del chorro del arco.

La corriente de soldadura no podrá restablecerse en la dirección opuesta a menos que se mantenga la ionización dentro del espacio del arco, o se reinicie rápidamente. Con las fuentes de potencia convencionales, es posible que la ionización no se mantenga, dependiendo del proceso de soldadura y del electrodo que se utilice. El reinicio de la ionización se mejora estableciendo un voltaje de la magnitud apropiada a través del espacio del arco: el voltaje de recuperación. Cuanto mayor sea el voltaje de recuperación, más corto será el periodo durante el cual el arco estará extinguido. Si no es suficiente, el arco no podrá restablecerse sin hacer cortocircuito con el electrodo.

La figura 1.16 muestra las relaciones de fase entre el voltaje de circuito abierto y corrientes iguales para dos diferentes voltajes de circuito abierto, suponiendo el mismo voltaje de arco (no se muestra) en cada caso. Como puede verse en la figura, el voltaje pico disponible de 113 V es mayor con 80 V (rms) de circuito abierto. El voltaje pico de 77.8 V disponible con 55 V (rms) de circuito abierto tal vez no baste para sostener un arco estable. El mayor cambio de fase que se muestra para la condición de intervalo bajo causa una inversión de la corriente a un voltaje de recuperación más alto porque está cerca del pico de la forma de onda del voltaje de circuito abierto, que es la mejor condición para la reignición. No se usa resistencia para regular la corriente de soldadura alterna porque el voltaje y la corriente de la fuente de potencia estarían en fase. Puesto que el voltaje de recuperación sería cero durante la inversión de corriente, sería imposible mantener un arco estable.

Para SMAW con máquinas de bajo voltaje de circuito abierto es necesario incorporar ingredientes en los recubrimientos de los electrodos que ayuden a mantener la ionización y proporcionen



NOTA: T1 ES MAYOR QUE T2

Figura 1.16—Ondas de voltaje y corriente típicas de una fuente de potencia de ca de doble intervalo

características de transferencia de metal favorables que eviten aumentos repentinos y considerables en la longitud del arco.

En un sistema de cc, una vez establecido el arco, la corriente no pasa por cero. Así, un incremento rápido del voltaje no es crítico; los resistores permiten controlar adecuadamente la corriente en las máquinas de cc. Sin embargo, en algunos procesos

las fuentes de potencia de corriente continua deben funcionar de manera muy similar en lo tocante a la necesidad de proporcionar un voltaje de circuito abierto cuando la longitud del arco cambia abruptamente. Con frecuencia se incluye reactancia o inductancia en estas fuentes de potencia con el propósito de fomentar este efecto.

REQUISITOS DE LA NEMA PARA FUENTES DE POTENCIA

LA PUBLICACIÓN EW-1 (última edición) de la National Electric Manufacturers Association (NEMA) describe los requisitos para los equipos de soldadura por arco eléctrico, incluidas las fuentes de potencia.

(f) Fuente de potencia para soldadura por arco de transformador-rectificador de cc.

(g) Fuente de potencia para soldadura por arco de transformador-rectificador de ca/cc.

CLASIFICACIONES DE LA NEMA

LA NEMA CLASIFICA las fuentes de potencia para soldadura por arco primordialmente con base en el ciclo de trabajo. Hay tres clases:

(1) "Una máquina para soldadura por arco NEMA Clase I se caracteriza por su capacidad para suministrar la salida especificada con ciclos de trabajo de 60, 80 o 100%. Si una fuente de potencia se fabrica de acuerdo con las normas aplicables para las máquinas Clase I, se marcará como 'NEMA Clase I (60)', 'NEMA Clase I (80)' o 'NEMA Clase I (100)'."

(2) "Una máquina para soldadura por arco NEMA Clase II se caracteriza por su capacidad para suministrar la salida especificada con ciclos de trabajo de 30, 40 o 50%. Si una máquina se fabrica de acuerdo con las normas aplicables para las máquinas Clase II, se marcará como 'NEMA Clase II (30)', 'NEMA Clase II (40)' o 'NEMA Clase II (50)'."

(3) "Una máquina para soldadura por arco NEMA Clase III se caracteriza por su capacidad para suministrar la salida especificada con ciclo de trabajo de 20%. Si una máquina se fabrica de acuerdo con las normas aplicables para las máquinas Clase III, se marcará como 'NEMA Clase III (20)'."

Adicionalmente, las fuentes de potencia NEMA Clase I y II se definen como fuentes de potencia para soldadura por arco completamente armadas que abarcan las características de las siguientes máquinas:

- (1) Una máquina de corriente constante, voltaje constante o corriente constante/voltaje constante.
- (2) Una máquina de un solo operador.
- (3) Una de las siguientes:
 - (a) Fuente de potencia para soldadura por arco de generador de cc.
 - (b) Fuente de potencia para soldadura por arco de generador de ca.
 - (c) Fuente de potencia para soldadura por arco de generador-rectificador de cc.
 - (d) Fuente de potencia para soldadura por arco de generador-rectificador de ca/cc.
 - (e) Fuente de potencia para soldadura por arco de transformador de ca.

REQUISITOS DE ENTRADA Y SALIDA

ADEMÁS DEL CICLO de trabajo, la NEMA define las especificaciones de salida y las capacidades de rendimiento de las fuentes de potencia de cada clase. La tabla 1.3 muestra las especificaciones de corriente de salida (tamaño) para las máquinas soldadoras Clases I, II y III. Los volts de carga especificados (E) para las máquinas Clases I y II de menos de 500 A pueden calcularse empleando $E = 20 + 0.04I$, donde I es la corriente de carga especificada. Para máquinas con especificación de 600 A y mayores, el voltaje de carga especificado es 44 V. Las especificaciones de salida en amperes y volts de carga, y también las corrientes de salida y volts de carga mínimos y máximos para las fuentes de potencia se dan en la publicación EW-1 (última edición) de la NEMA.

Los requisitos de entrada eléctrica para las máquinas de soldadura por arco de transformador NEMA Clases I y II para 50 y 60 Hz son las siguientes:

- 60 Hz: 200, 230, 460 y 575 V
- 50 Hz: 220, 380 y 440 V

Para las máquinas soldadoras por arco del tipo de transformador NEMA Clase III, el requisito de entrada eléctrica es 60 Hz, 230 V. El devanado primario del transformador por lo regular tiene derivaciones que permiten seleccionar dos o tres fuentes de voltaje alternativas, como 200, 230 y 460 V.

Tabla 1.3
Corriente de salida especificada por la NEMA para máquinas de soldadura por arco

Corriente de salida especificada, A		
Clase I	Clase II	Clase III
200	150	180-230
250	175	235-295
300	200	
400	225	
500	250	
600	300	
800	350	
1000		
1200		
1500		

Tabla 1.4

Especificaciones típicas de placa de identificación para una fuente de potencia de soldadura por arco de ca/cc

Modelo	Corriente de soldadura, A				Voltaje de circuito abierto ca y cc	Amperes de entrada con la carga especificada Salida - 60 Hz monofásica			
	ca		cc			Amperes			
	Arco de tungsteno y gas	Arco de metal protegido	Arco de tungsteno y gas	Arco de metal protegido		230 V	460 V	kVA	kW
300 amperes	5-48 20-230 190-435	5-48 20-245 200-460	5-60 20-250 200-460	5-45 16-200 150-350	80	104	52	23.9	21.8

Tabla 1.5

Recomendaciones de tamaño típicas para conductor primario y fusible

Modelo	Tamaño del alambre de entrada, AWG (a)				Tamaño del fusible en amperes			
	200 V	230 V	460 V	575 V	200 V	230 V	460 V	575 V
300 A	No. 2 (No. 6) (b)	No. 2 (No. 6) (b)	No. 8 (No. 8) (b)	No. 8 (No. 8) (b)	200	175	90	70

- a. American wire gage (calibra de alambre americano).
- b. Indica tamaño del conductor a tierra.

Las normas de voltaje y frecuencia para los motores-generadores de soldadura son las mismas que para los primarios de los transformadores NEMA Clases I y II.

DATOS DE LA PLACA DE IDENTIFICACIÓN

LOS DATOS MÍNIMOS que deben incluirse en la placa de identificación de una fuente de potencia para soldadura por arco, según la publicación EW-1 de la NEMA son los siguientes:

- (1) Designación de tipo o número de identificación del fabricante, o ambas cosas.
- (2) Designación de clase NEMA.
- (3) Voltaje de circuito abierto (OCV) máximo.
- (4) Volts de carga especificados.
- (5) Amperes de carga especificados.
- (6) Ciclo de trabajo con la carga especificada.
- (7) Velocidad máxima en rpm sin carga (generador o alternador).
- (8) Frecuencia de la fuente de potencia.
- (9) Número de fases de la fuente de potencia.
- (10) Voltaje(s) de entrada de la fuente de potencia.
- (11) Amperes de entrada con la salida de carga especificada.

El instructivo que acompaña a cada fuente de potencia es la fuente primaria de datos relativos a los requisitos de entrada

eléctrica. También se dan datos generales en la placa de identificación de la fuente de potencia, por lo regular en forma de tabla junto con otros datos pertinentes aplicables a la unidad de que se trate. La tabla 1.4 muestra información típica para una fuente de potencia para GTAW con especificación NEMA de 300 A. Los intervalos de corriente de soldadura se dan con respecto al proceso de soldadura. La fuente de potencia puede usar uno de dos voltajes de entrada, indicándose la corriente de entrada correspondiente para cada voltaje cuando la máquina está produciendo su carga especificada. También se dan los datos de entrada de kilovolt-amperes (kVA) y kilowatts (kW). El factor de potencia, *pf*, puede calcularse como sigue:

$$pf = \frac{kW}{kVA} \tag{1.8}$$

El fabricante también proporcionará otros datos relativos a los requisitos de entrada, como los tamaños de conductor primario y de fusible recomendados. Las fuentes de potencia no pueden protegerse con fusibles cuyo valor sea igual a su demanda de corriente primaria. Si es así, los fusibles se quemarán o los cortacircuitos se botarán continuamente. La tabla 1.5 muestra los tamaños de alambre de entrada y fusible típicos para la fuente de potencia de 300 A de la tabla 1.4. Es necesario consultar todos los códigos pertinentes además de estas recomendaciones.

FUENTES DE POTENCIA DE CORRIENTE ALTERNA

FUENTES DE POTENCIA DE TRANSFORMADOR

Las fuentes de potencia de corriente alterna normalmente son transformadores monofásicos que se conectan con las líneas de potencia de ca del edificio y transforman el voltaje y el amperaje de entrada a niveles adecuados para la soldadura por arco. Los transformadores también sirven para aislar los circuitos de soldadura de las líneas de potencia de la planta. Como las diversas aplicaciones tienen distintos requerimientos de potencia de soldadura, la fuente de potencia de transformador para soldadura debe incluir un mecanismo para controlar la corriente de soldadura o el voltaje del arco, o ambas cosas. En las secciones que siguen se describirán los métodos que comúnmente se usan para controlar la salida del circuito de soldadura.

Control por bobina móvil

EN ESENCIA, UN transformador de bobina móvil consiste en un núcleo alargado en el cual se encuentran las bobinas primaria y secundaria. Una de las dos bobinas puede ser móvil, mientras que la otra se mantiene en una posición fija. La mayor parte de los transformadores de ca que siguen este diseño tienen la bobina secundaria fija. La bobina primaria normalmente se conecta a un tornillo terminal; cuando éste se gira, la bobina se acerca o se aleja de la bobina secundaria.

La variación de la distancia entre las dos bobinas regula el acoplamiento inductivo de las líneas de fuerza magnética que hay entre ellas. Cuanto más separadas estén las dos bobinas, más vertical será la curva de salida volt-ampere y menor será el valor de corriente en cortocircuito máxima. En cambio, cuando las dos bobinas están cerca una de la otra, la corriente máxima en cortocircuito es mayor y la pendiente de la curva de salida volt-ampere es menos empinada.

La figura 1.17A muestra una forma de transformador de bobina móvil con las bobinas muy separadas para que la salida sea mínima y la curva volt-ampere tenga una pendiente empinada. La figura 1.17B muestra las bobinas lo más cercanas posible. Se indica la curva volt-ampere con salida máxima, con una pendiente menos empinada que la de la figura 1.17.

Otra forma de bobina móvil emplea un movimiento de pivoteo. Cuando las dos bobinas están perpendiculares, la salida es mínima; cuando están alineadas con una bobina anidada dentro de la otra, la salida es máxima.

Control de derivación móvil

EN ESTE DISEÑO, las bobinas primarias y secundarias están fijas, y el control se logra mediante una derivación de núcleo de hierro laminado que se mete entre las bobinas primarias y secundarias. Se fabrica con el mismo material que se emplea para el núcleo del transformador.

Cuando la derivación se coloca entre las bobinas primarias y secundarias, como se muestra en la figura 1.18A, algunas líneas de fuerza magnética se desvían a través de la derivación de hierro

en vez de llegar a las bobinas secundarias. Con la derivación de hierro en esta posición, la pendiente de la curva volt-ampere aumenta y la corriente disponible para soldadura disminuye. La corriente de salida mínima se obtiene cuando la derivación ha entrado por completo entre las bobinas.

Como puede verse en la figura 1.18B, la disposición de las líneas de fuerza magnética, o flujo magnético, no encuentra ningún obstáculo cuando la derivación de hierro se separa de las bobinas primarias y secundarias. En este caso la corriente de salida es máxima.

Control de bobina secundaria derivada

SE PUEDE USAR una bobina secundaria con derivaciones para controlar la salida volt-ampere de un transformador, como se muestra en la figura 1.3. Este método de ajuste a menudo se emplea con las fuentes de potencia NEMA Clase III, comúnmente llamadas *soldadoras de granja*. Son las fuentes de potencia para soldadura de más bajo costo y de uso más universal. Su construcción básica se parece un poco a la del tipo de derivación móvil, excepto que la derivación se coloca permanentemente dentro del núcleo principal y las bobinas secundarias tienen derivaciones que permiten ajustar el número de vueltas. Si se reduce el número de vueltas del secundario, disminuirá el voltaje de circuito abierto y también la inductancia del transformador, aumentando la corriente de soldadura.

Reactor de núcleo móvil

La MÁQUINA SOLDADORA de ca del tipo de reactor de núcleo móvil consiste en un transformador de voltaje constante y un reactor en serie. La inductancia del reactor se modifica moviendo mecánicamente una sección de su núcleo de hierro. En la figura 1.19 se presenta un diagrama de la máquina. Cuando la sección móvil del núcleo está en posición retraída, la permeabilidad del trayecto magnético es muy baja debido al espacio de aire. El resultado es una reactancia inductiva baja que permite el flujo de una corriente de soldadura grande. Cuando la sección móvil del núcleo penetra en el núcleo estacionario, como se indica con líneas punteadas en la figura 1.19, el aumento en la permeabilidad hace que aumente la reactancia inductiva, reduciendo la corriente de soldadura.

Control de reactor saturable

UN CONTROL DE REACTOR saturable es un control eléctrico que se vale de un circuito de cc de bajo voltaje y bajo amperaje para modificar las características magnéticas efectivas de los núcleos reactores. Los reactores saturables de autosaturación se conocen como *amplificadores magnéticos* porque un cambio relativamente pequeño en la potencia de control produce un cambio considerable en la potencia de salida. Este tipo de circuito de control hace relativamente fácil el control remoto de la salida de la fuente de potencia, y normalmente requiere menos mantenimiento que los controles mecánicos.

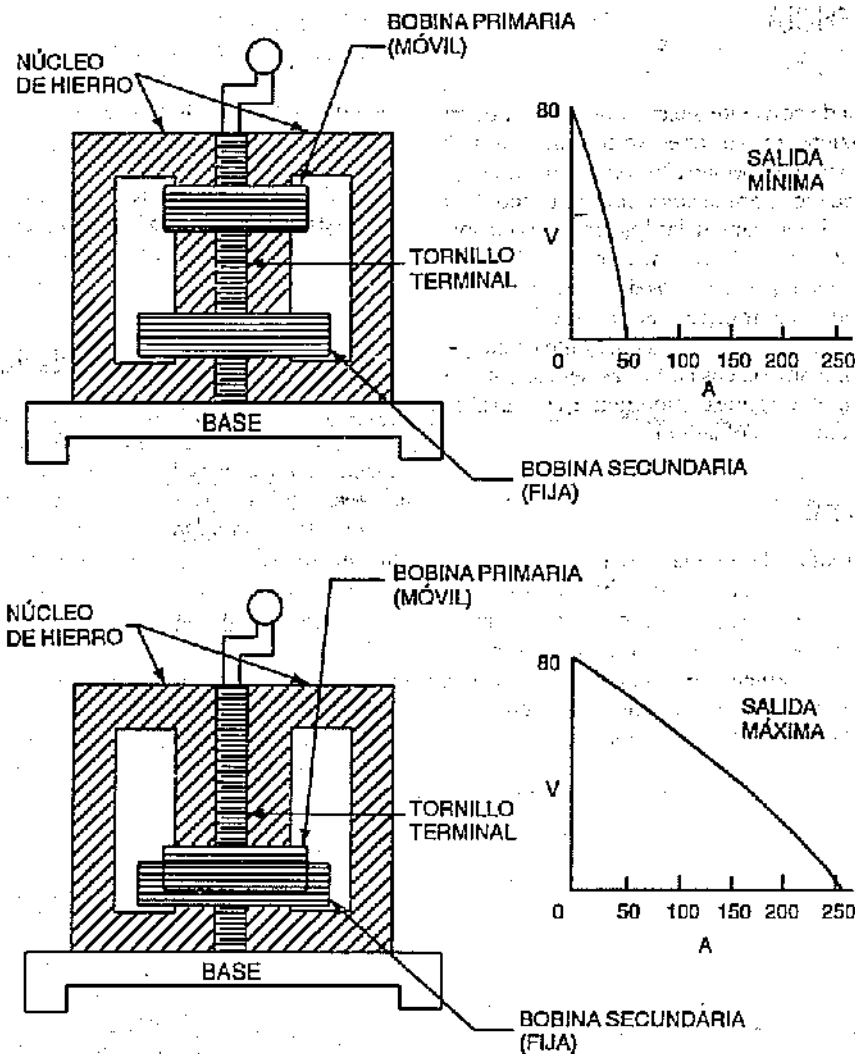


Figura 1.17—Fuente de potencia de ca de bobina móvil

Con esta construcción, el transformador principal no tiene partes móviles. Las características volt-ampere dependen de las configuraciones del transformador y del reactor saturable. El circuito de cc de control del sistema reactor permite ajustar la curva volt-ampere de salida desde el mínimo hasta el máximo.

En la figura 1.20 se presenta un diagrama de una fuente de potencia sencilla de reactor saturable. Las bobinas del reactor se conectan en oposición a las bobinas de control de cc. Si no se hace esto, la acción del transformador hará que haya corrientes circulantes elevadas en el circuito de control. Con la conexión en oposición, los voltajes y corrientes instantáneos tienden a cancelarse mutuamente. Los reactores saturables tienden a dis-

torsionar severamente la onda senoidal suministrada por el transformador. Esto no es deseable en la soldadura por arco de tungsteno y gas porque la forma de onda es importante para ese proceso. Un método que puede reducir esta distorsión consiste en introducir un espacio de aire en el núcleo del reactor. Otro consiste en insertar un choke grande en el circuito de control de cc. Cualquiera de los dos métodos, o una combinación de ambos, producirá los resultados que se desean.

La magnitud del ajuste de la corriente en un reactor saturable se basa en las amperes-vueltas de las diversas bobinas. El término *amperes-vueltas* se define como el número de vueltas de la bobina multiplicado por la corriente (en amperes) que fluye a

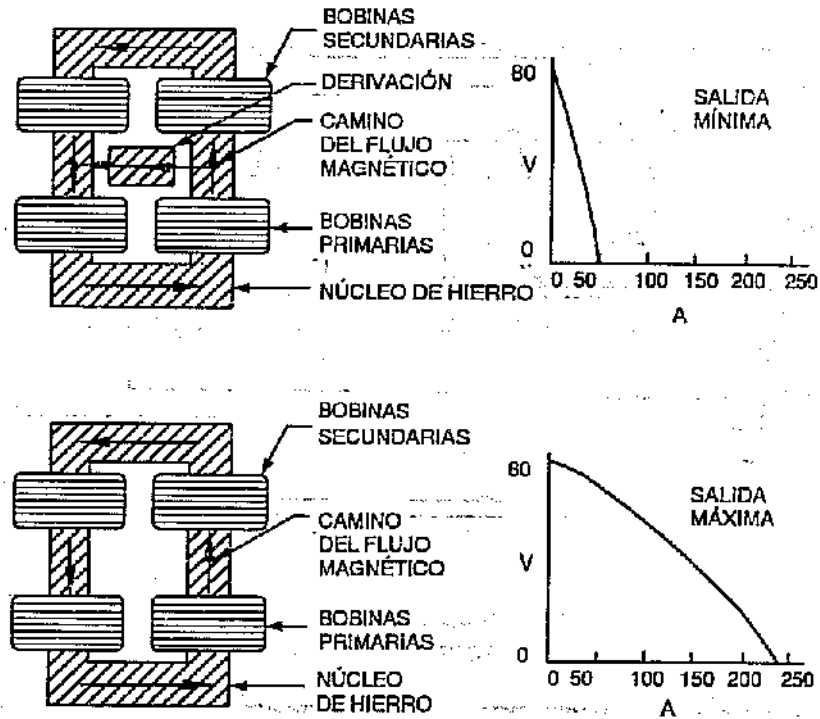


Figura 1.18—Fuente de potencia de ca de derivación móvil

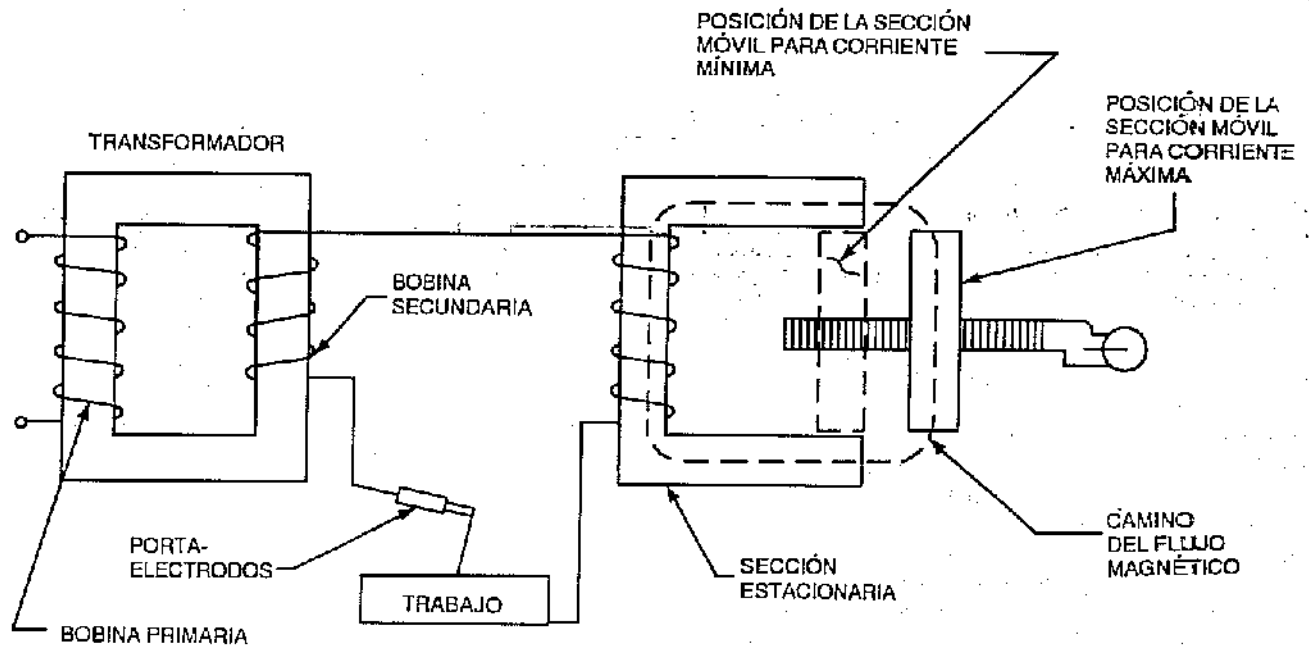


Figura 1.19—Fuente de potencia de ca del tipo de reactor de núcleo móvil

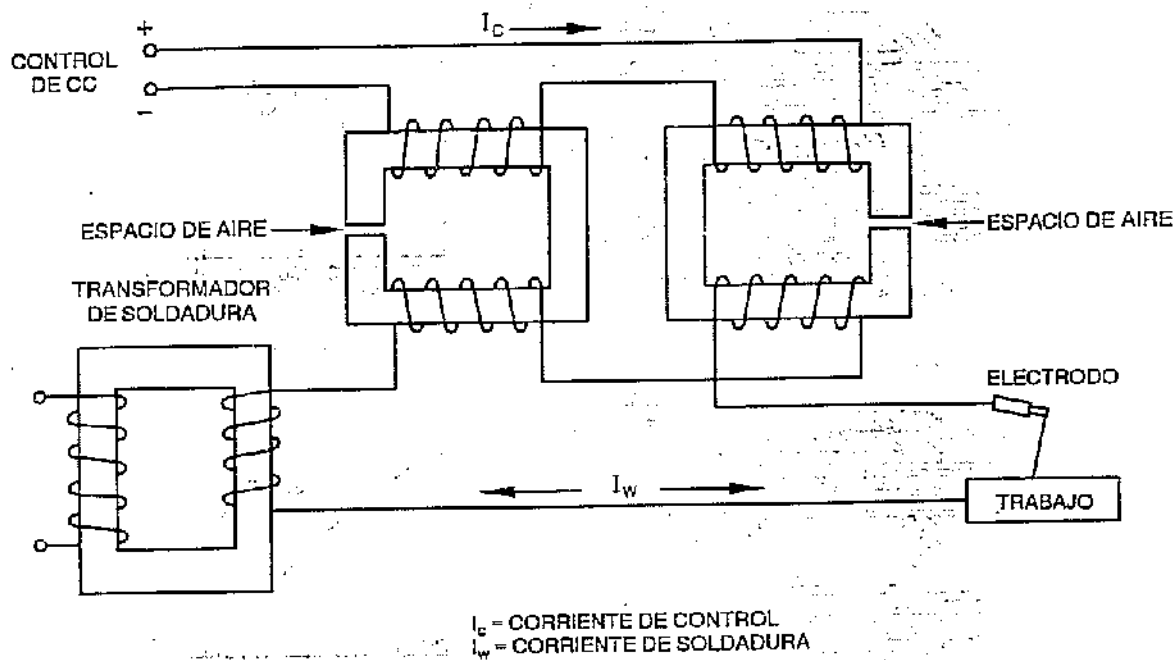


Figura 1.20—Fuente de potencia de ca para soldadura del tipo de reactor saturable

través de la bobina. En el reactor saturable básico, se aplica la ley de amperes-vueltas iguales. Para aumentar la salida del circuito de soldadura, se debe hacer fluir una corriente en el circuito de control. La magnitud del cambio se puede aproximar con la siguiente ecuación:

$$I_w = \frac{I_c N_c}{N_w} \quad (1.9)$$

donde

- I_w = cambio en la corriente de soldadura, A
- I_c = cambio en la corriente en el circuito de control, A
- N_c = número de vueltas en el circuito de control
- N_w = número de vueltas en el circuito de corriente de soldadura

La corriente mínima de la fuente de potencia está determinada por el número de vueltas de las bobinas del reactor del circuito de soldadura y por la cantidad de hierro en el núcleo del reactor. Si se desea una corriente mínima baja, se requiere una cantidad grande de hierro o bien un número relativamente grande de vueltas, o ambas cosas. Si se utiliza un gran número de vueltas, será necesario un gran número de vueltas de control o una corriente de control elevada, o ambas cosas. A fin de reducir la necesidad de bobinas de control grandes, grandes cantidades de hierro o corrientes de control elevadas, los reactores saturables a menudo tienen derivaciones en las bobinas del circuito de soldadura, creando máquinas de múltiples intervalos. Los intervalos más altos tendrán menos vueltas en estos devanados y, por tanto, corrientes mínimas correspondientemente más altas.

Control por amplificador magnético

TÉCNICAMENTE, EL AMPLIFICADOR magnético es un reactor saturable con autosaturación. Se denomina *amplificador magnético* porque usa la corriente de salida de la fuente de potencia para conferir una magnetización adicional a los reactores. De este modo, las corrientes de control pueden reducirse y las bobinas de control pueden ser más pequeñas. Aunque en muchos casos las máquinas de amplificador magnético tienen múltiples intervalos, los intervalos de control pueden ser mucho más amplios que los que pueden obtenerse con un control de reactor saturable ordinario.

En la figura 1.21 puede verse que si se utiliza una conexión diferente para las bobinas de la corriente de soldadura y los diodos rectificadores en serie con las bobinas, las amperes-vueltas de la carga ayudan a las amperes-vueltas de control a magnetizar los núcleos. Un valor menor de amperes-vueltas de control hará que fluya una corriente de soldadura correspondientemente mayor porque la corriente de soldadura prácticamente "se encenderá a sí misma". Los devanados de control son sensibles a la polaridad.

Factor de potencia

LAS FUENTES DE potencia de ca de corriente constante se caracterizan por factores de potencia bajos a causa de su reactancia inductiva relativamente grande. En muchos casos esto no es conveniente porque las corrientes de línea son altas cuando las cargas son pesadas, y los usuarios industriales por lo regular tienen que pagar tarifas más altas cuando el factor de potencia

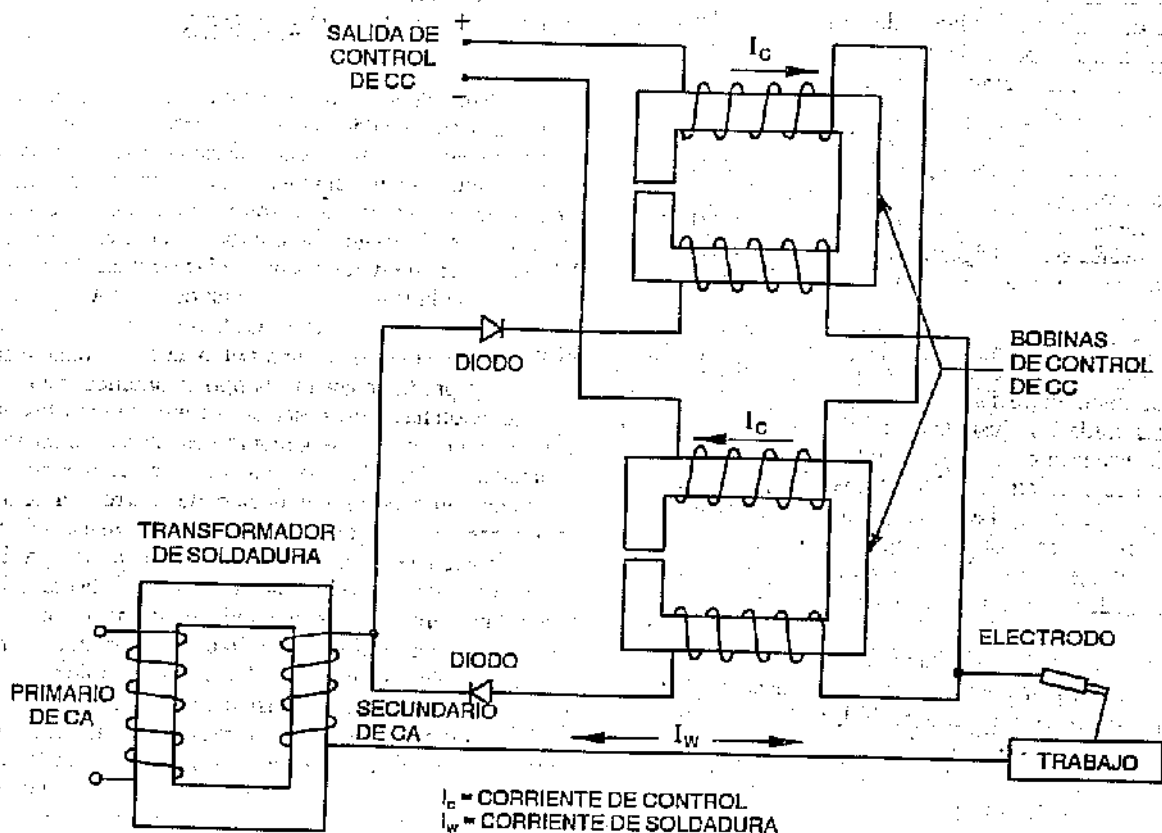


Figura 1.21—Control de corriente de soldadura por amplificador magnético

es bajo. Este factor puede mejorarse añadiendo condensadores al circuito primario de cargas inductivas del tipo de los transformadores de soldadura. Esto reduce la corriente primaria de las líneas de potencia mientras se está soldando. Desafortunadamente, la extracción de corriente en condiciones de carga ligera o sin carga aumentará.

Las fuentes de potencia de ca de gran tamaño del tipo de transformador pueden equiparse con condensadores para corregir el factor de potencia a aproximadamente el 75% con la carga especificada. A niveles de corriente de carga menores que la especificada, el factor de potencia puede tener una característica adelantada. Si el transformador está operando sin carga o con cargas muy ligeras, los condensadores extraerán sus kVA correctivos completos, contribuyendo una corrección del factor de potencia al resto de la carga del sistema eléctrico total.

Si varias fuentes de potencia para soldadura del tipo de transformador están trabajando con cargas ligeras, debe cuidarse que la capacitancia de corrección del factor de potencia combinada no altere la estabilidad del voltaje de línea. Si se emplea potencia trifásica, deberá equilibrarse la carga en cada fase del sistema primario a fin de obtener un rendimiento óptimo. En condiciones normales, la corrección del factor de potencia no afecta el rendimiento de la soldadura.

Funciones auxiliares

LAS FUENTES DE potencia de ca de corriente constante están disponibles en muchas configuraciones en lo que respecta a sus funciones auxiliares. En general, estas funciones se incluyen para adaptar mejor la unidad a un proceso o aplicación específico, o para facilitar su operación. Conviene consultar con el fabricante acerca de las funciones disponibles cuando se considere la adquisición de tales fuentes de potencia.

Las fuentes de potencia de ca por lo regular cuentan con contactores primarios o interruptores de potencia de operación manual para encender y apagar la unidad. La mayor parte de las unidades NEMA Clases I y II están provistas de un tablero de terminales u otra forma de conectar los diversos voltajes de línea primaria especificados. Estas fuentes de potencia para soldadura normalmente no vienen con cables de alimentación. Las fuentes de potencia NEMA Clase III más pequeñas generalmente vienen equipadas con un interruptor primario de operación manual y un cable de alimentación.

Algunas fuentes de potencia de ca cuentan con un sistema que suministra al arco corriente mayor que la normal durante una fracción de segundo al inicio de una soldadura. Esta función de "arranque en caliente" da características de pico inicial,

similares a las de los conjuntos de motor-generador, que ayudan a iniciar el arco, sobre todo a niveles de corriente por debajo de 100 A. Otras fuentes de potencia pueden estar equipadas con un control de arranque que permite iniciar la soldadura con una corriente reducida ("arranque suave") para minimizar la transferencia de tungsteno desde el electrodo en el proceso de GTAW.

Los equipos diseñados para el proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas por lo regular incluyen además válvulas y cronómetros operados eléctricamente para controlar el flujo del gas protector y el flujo de refrigerante al portaelectrodos. Pueden añadirse unidades de alta frecuencia que ayuden a iniciar y estabilizar el arco.

Las fuentes de potencia NEMA Clase I y II pueden contar con un mecanismo para el ajuste remoto de la potencia de salida. Esto puede consistir en un dispositivo impulsado por motor para usarse con las unidades ajustadas por palanca, o en un control manual en la estación de trabajo cuando se usa una fuente de potencia de ajuste eléctrico. Si un trabajo requiere cambios frecuentes del amperaje, o si es preciso realizar la soldadura en un lugar poco accesible, los ajustes por control remoto pueden ser muy útiles. Los controles remotos operados con el pie liberan las manos del operador y permiten aumentar o reducir gradualmente la corriente de soldadura. Esto es una gran ayuda cuando se rellenan cráteres durante la soldadura por arco de tungsteno y gas.

Se pueden conseguir controles de voltaje de seguridad para reducir el voltaje de circuito abierto de las fuentes de potencia de ca para soldadura. Estos controles reducen a cerca de 30 V el voltaje de circuito abierto en el portaelectrodos. Los reductores de voltaje pueden consistir en relevadores y contactores que reconectan el devanado secundario del transformador principal para que produzca un voltaje menor o bien conmutan la carga de soldadura del transformador principal a un transformador auxiliar con menor voltaje sin carga.

FUENTES DE POTENCIA DE CORRIENTE ALTERNA - ALTERNADORES

OTRA FORMA DE obtener potencia de ca para soldadura es usar un alternador (a menudo llamado *generador de ca*) que convierte energía mecánica en potencia eléctrica apropiada para la soldadura por arco. La potencia mecánica puede provenir de diversas fuentes, como un motor de combustión interna o un motor eléctrico. Difieren de los generadores de cc estándar en que la unidad del rotor de un alternador contiene las bobinas del campo magnético (véase la figura 1.22) en vez de las bobinas del estator, como en otros generadores (véase la figura 1.23). Se usan anillos deslizantes para conducir una potencia de cc baja al miembro que gira y producir así un campo magnético rotatorio. Esta configuración hace innecesarios el conmutador y las escobillas que se requieren en los generadores de cc. El estator (parte estacionaria) tiene las bobinas de la corriente de soldadura devanadas en ranuras del núcleo de hierro. La rotación del campo genera potencia de soldadura de ca en estas bobinas.

La frecuencia de la corriente de soldadura producida se controla mediante la velocidad de rotación de la unidad del rotor y por el número de polos que tiene el alternador. Un alternador de dos polos debe trabajar a 3600 rpm para producir corriente de 60 Hz, en tanto que un alternador de cuatro polos debe operar a 1800 rpm para producir la misma corriente.

Pueden usarse reactores saturables y de núcleo móvil para controlar la salida de estas unidades, aunque el método normal se vale de un reactor con derivaciones para controlar aproximadamente los intervalos de corriente, combinado con un control del campo magnético del alternador para lograr un control fino dentro de cada intervalo. Estos controles se muestran en la figura 1.24.

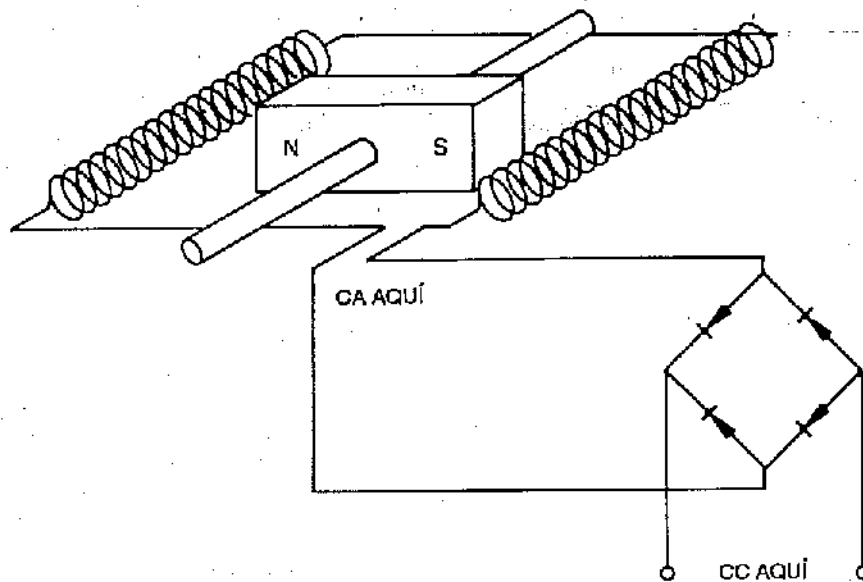


Figura 1.22—Esquema de un alternador en el que se muestra el campo magnético contenido en la unidad del rotor

FUENTES DE POTENCIA DE CORRIENTE ALTERNA DE ONDA CUADRADA

LAS MÁQUINAS SOLDADORAS de ca para los procesos SMAW, GTAW, PAW y SAW tradicionalmente se han basado en métodos para regular sus campos: (1) bobinas móviles, (2) derivación móvil y (3) reactores saturables. La necesidad de intervalos de corriente más amplios y de un control remoto de la corriente condujo al desarrollo de amplificadores magnéticos con diodos de silicio. Aunque esta tecnología ha sido muy útil, la industria necesitaba máquinas con las que fuera posible lograr soldaduras de más alta calidad y una mayor confiabilidad. Al aumentar la aceptación y la confiabilidad de los semiconductores de potencia, apareció una nueva generación de máquinas soldadoras.

Con corriente alterna de 60 Hz, la corriente de soldadura se invierte 120 veces cada segundo. Si se usan fuentes de tipo magnético, esta inversión ocurre lentamente, obstaculizando la reignición de la siguiente media onda. Aunque es posible recurrir a un mecanismo auxiliar para proporcionar un voltaje de ionización elevado, como la superposición de energía de alta frecuencia para GTAW y PAW, en muchas ocasiones la corriente disponible en forma instantánea es demasiado baja para asegurar un encendido confiable del arco.

Este problema puede evitarse empleando una corriente con forma de onda cuadrada, como la del diagrama de la figura 1.25. Con su rápido cruce por cero, es posible que la desionización no ocurra o que, por lo menos, la reignición del arco se fomente a tal grado que no haya necesidad de usar sistemas de reignición

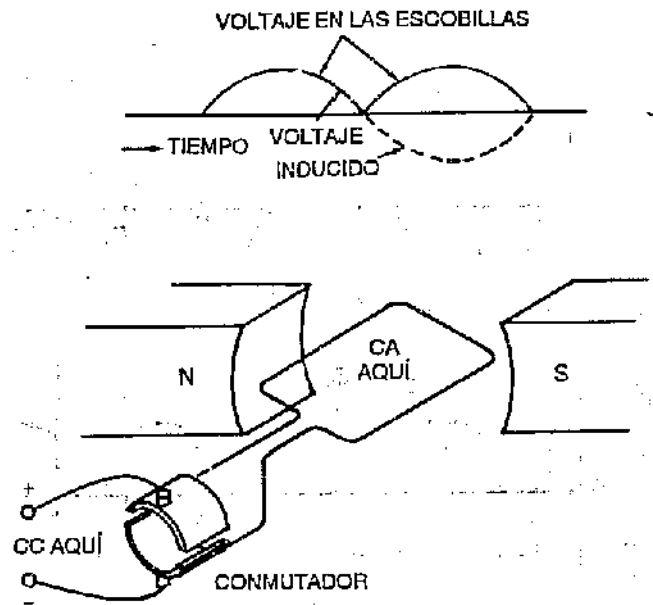


Figura 1.23—Esquema de un generador que muestra el campo magnético contenido en la unidad del estator

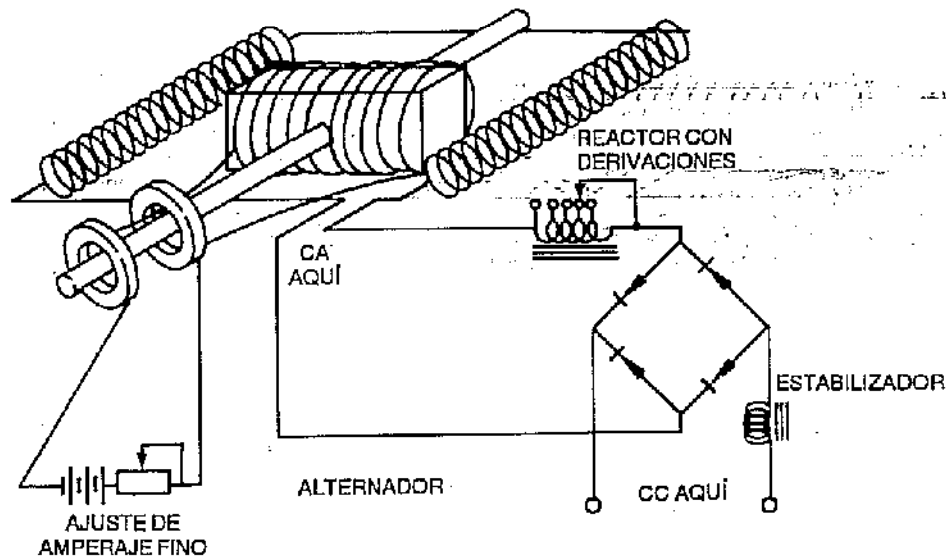


Figura 1.24—Esquema de una fuente de potencia del tipo de alternador que incluye un reactor con derivaciones para el control burdo de la corriente y un amperaje de campo magnético ajustable para el control fino de la corriente de salida

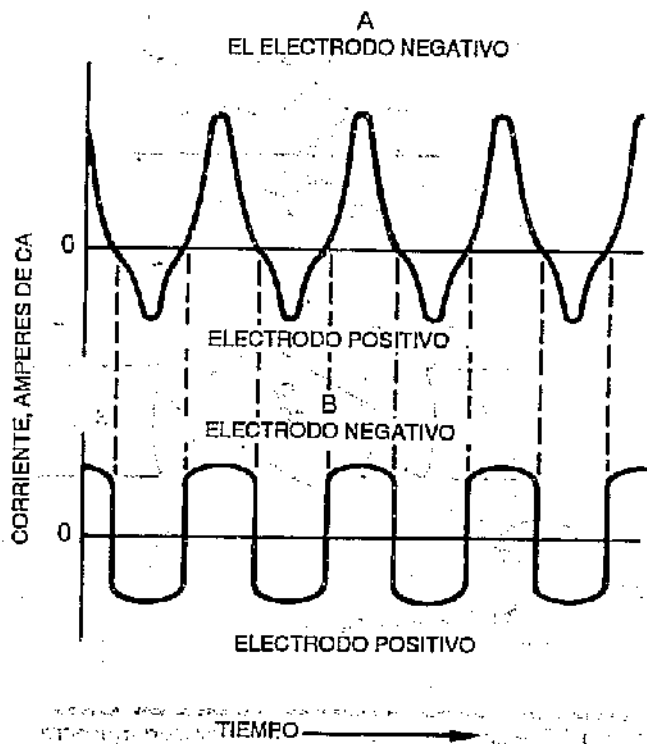


Figura 1.25—Comparación de las formas de onda de corriente de arco de (A) un amplificador magnético y (B) una fuente de onda cuadrada en el mismo nivel de corriente media

de volante eléctrico). Junto con un grupo de cuatro SCR de potencia, puede servir para crear una corriente de ca de onda cuadrada. Se utiliza el forzado de corriente, en el que el núcleo de memoria almacena energía en proporción con la corriente del medio ciclo previo, y luego bombea esa misma cantidad de corriente al arco al principio de cada nuevo medio ciclo de polaridad opuesta. Una vez que el gas se ha reionizado, sólo puede suponerse un valor de la corriente. Éste es el valor de corriente media "recordado" de múltiples ciclos mantenido por el dispositivo de núcleo de memoria. El tiempo de transición de una polaridad a la otra es muy corto, del orden de 80 microsegundos.

Un sensor colocado en el trayecto de la corriente del núcleo de memoria produce una señal de voltaje que es proporcional a la salida de corriente de ca. Esa señal de corriente se compara con la señal de referencia de la corriente deseada en un amplificador regulador. La señal de error accionadora resultante se procesa de modo que dispare en fase cuatro SCR en la secuencia correcta para llevar la salida al nivel correcto. En consecuencia, la corriente de soldadura se mantiene dentro de 1% de su nivel para variaciones en el voltaje de línea de 10%. El tiempo de respuesta es rápido, lo que se presta a operaciones de GTAW de ca a pulsos.

Otra función incluida en el diseño de este tipo de fuentes de potencia es una forma de onda asimétrica variable, que permite al operador obtener una corriente equilibrada o diversos grados de desequilibrio controlado de CCEN (corriente continua con electrodo negativo, o polaridad directa) vs. CCEP (corriente continua con electrodo positivo, o polaridad inversa). Esta capacidad es una herramienta muy potente para controlar el arco. La razón principal para usar ca con el proceso de GTAW es que tiene una acción limpiadora. Esto es importante sobre todo cuando se suelda aluminio. Durante los ciclos de CCEP, los óxidos de la superficie de la pieza de trabajo son expulsados por fuerzas de emisión de electrones, dejando al descubierto metal limpio para soldar. Pruebas con diversas fuentes de potencia asimétricas dejaron en claro que sólo se requiere una pequeña cantidad de corriente CCEP: generalmente basta con cantidades tan bajas como el 10%, siendo la excepción los casos en que el alambre de aporte introduce hidrocarburos.

El equilibrio se ajusta con una sola perilla, desde corriente equilibrada hasta 70-80% de CCEN, 20-30% de CCEP en un extremo, y 35-45% de CCEN, 55-65% de CCEP en el otro (véase la figura 1.26). El control de equilibrio en realidad ajusta la anchura de cada polaridad, sin modificar la amplitud ni la frecuencia de la corriente. El sistema regulador mantiene la proporción de equilibrio constante mientras se seleccionan otros valores de amperaje.

La utilidad de un control de balance de este tipo es obvia. Si la pieza de trabajo está razonablemente limpia, el operador puede escoger un porcentaje bajo de acción limpiadora (CCEP). Con la forma de onda con alto porcentaje de CCEN que resulta, el balance calorífico se aproxima al de CCEN, y es posible aportar más calor al trabajo, reducir la deriva del arco y obtener una franja de soldadura más angosta. Si consideramos que el proceso GTAW muchas veces se escoge por razón de su arco concentrado, esto permite aprovechar al máximo su mejor característica.

de alta frecuencia. La configuración cuadrada del flanco trasero de la forma de onda mantiene el gas de cobertura ionizado y la punta del electrodo caliente durante más tiempo, en preparación para la reignición con la polaridad opuesta. Estas características son importantes en las instalaciones en las que conviene eliminar la alta frecuencia porque (1) puede causar interferencia con radio o televisión, (2) el grabado del trabajo en las inmediaciones de la soldadura puede ser indeseable desde el punto de vista cosmético, (3) la fuga de altas frecuencias puede molestar al operador y (4) la alta frecuencia puede dañar equipos periféricos.

Se han empleado varios enfoques de diseño para producir formas de onda de ca cuadradas. Algunas máquinas emplean entrada monofásica y otras trifásica. Dos estrategias comunes consisten en emplear un núcleo de memoria y circuitos inversores.

Núcleo de memoria

UN NÚCLEO DE memoria es un dispositivo magnético que mantiene el flujo de la corriente en un valor constante (una especie

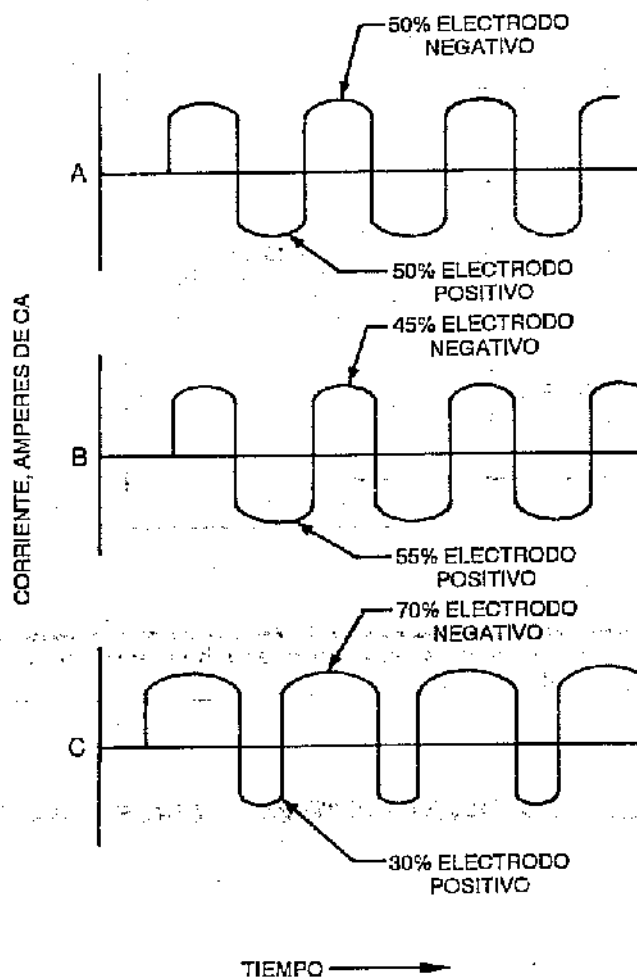


Figura 1.26—Formas de onda típicas producidas por control de balance de potencia de onda cuadrada

La onda asimétrica, con menos tiempo de CCEP, permite al operador usar electrodos de menor diámetro sin correr el riesgo de que las elevadas temperaturas erosionen la punta. De hecho, permite una mayor densidad de corriente, con el resultado de que el cono del arco tiene menor diámetro y mayor concentración de calor. Si se emplea una copa de gas más pequeña, esto muchas veces permite al operador tener acceso a configuraciones de unión más estrechas.

Inversor con salida de ca

OTRA ESTRATEGIA PARA obtener una salida de ca de onda cuadrada consiste en usar circuitos inversores. Se emplean varios sistemas con el enfoque de inversor para lograr una salida de ca

de onda cuadrada con cruce por cero rápido. Son: (1) fuentes duales con conmutación de inversor, (2) fuente única con conmutación de inversor y (3) inversor rectificador sincrónico.

El enfoque de fuente dual con conmutación de inversor utiliza tecnología de SCR de estado sólido. Combina dos fuentes de potencia de cc trifásicas de corriente ajustable. Una de ellas, que suministra la corriente de soldadura principal, se controla por SCR y tiene una especificación típica de salida de cc de 300 A, 50V; suministra corriente durante todas las fases de operación, tanto CCEN (polaridad directa) como CCEP (polaridad inversa). La otra fuente de potencia es del tipo convencional controlado por reactor y con especificación típica de salida de cc de 5 a 100 A, 50V. La función de esta fuente es proporcionar una corriente más elevada durante las fases de operación CCEP (polaridad inversa) a fin de que se mejore la acción limpiadora. Se ha demostrado mediante pruebas que el grabado más efectivo se obtiene cuando la corriente CCEP es más alta, pero aplicada durante un tiempo mucho más corto, que la corriente CCEN. Ambas fuentes deben producir una salida de 50V para asegurar una regulación de corriente satisfactoria al soldar, ya que el voltaje de arco real durante la fase CCEP puede aproximarse a este voltaje.

La conmutación y combinación de la corriente de las dos fuentes de potencia se controla por medio de cinco SCR (véase la figura 1.27). Cuatro de estos SCR forman parte de un circuito inversor que conmuta la polaridad de la corriente alimentada al arco. Estos cuatro SCR se disponen de modo que operen en pares.

Un par (SCR1 y SCR4) se enciende para suministrar corriente de la fuente principal durante las porciones de CCEN de la onda cuadrada. El otro par (SCR2 y SCR3) se enciende para suministrar corriente de ambas fuentes durante las porciones de CCEP de la onda cuadrada. Se utiliza un SCR de cortocircuito (SCR5) con un diodo de bloqueo para desviar la corriente de la segunda fuente de potencia de modo que no pase por el circuito inversor durante la porción de CCEN del ciclo, evitando así que se sume a la corriente de soldadura.

Los SCR se encienden mediante un circuito de compuertas que incluye funciones de temporización para ajustar las porciones de CCEN y CCEP de la salida de onda cuadrada. El tiempo de CCEN comúnmente puede ajustarse entre 5 y 100 milisegundos (ms), y el de CCEP entre 1 y 100 ms. Un ajuste de tiempo típico para soldar aluminio grueso podría ser 19 ms de CCEN y 3 ms de CCEP. Los SCR se apagan por medio de circuitos de conmutación individuales. La forma de onda de la corriente se muestra en la figura 1.28.

El enfoque de fuente única con conmutación de inversor es mucho más sencillo y menos voluminoso que el sistema de fuente dual. Cuando se usa una sola fuente, ésta es del tipo de cc de corriente constante. La figura 1.29 muestra un inversor de ca de onda cuadrada con fuente única que utiliza transistores en vez de SCR. El funcionamiento de esta fuente es muy similar al de la fuente dual. Los cuatro transistores se disponen de modo que trabajen en pares. Puesto que no hay una fuente adicional de corriente inversa, no se necesita un quinto transistor ni un diodo de bloqueo. El balance de ca se puede controlar como en la fuente de núcleo de memoria y en el inversor de fuente dual. Sin embargo, la corriente de polaridad inversa debe tener la misma amplitud que la de polaridad directa y no puede incrementarse como en el caso del inversor de fuente dual. Ambos

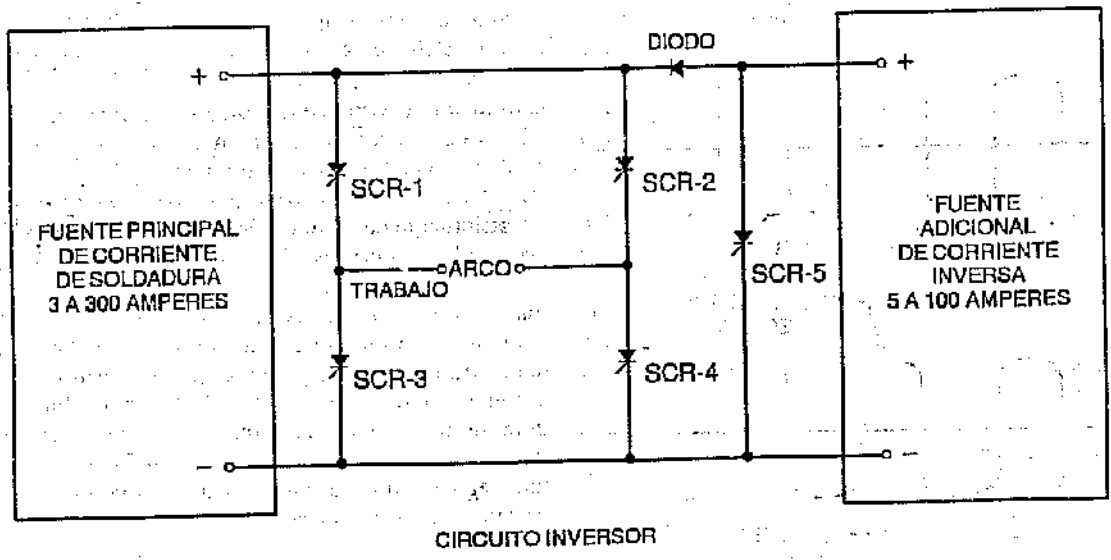


Figura 1.27-Circuito inversor empleado con fuentes de potencia de cc duales para controlar el balance calorífico en soldadura por arco de tungsteno y gas

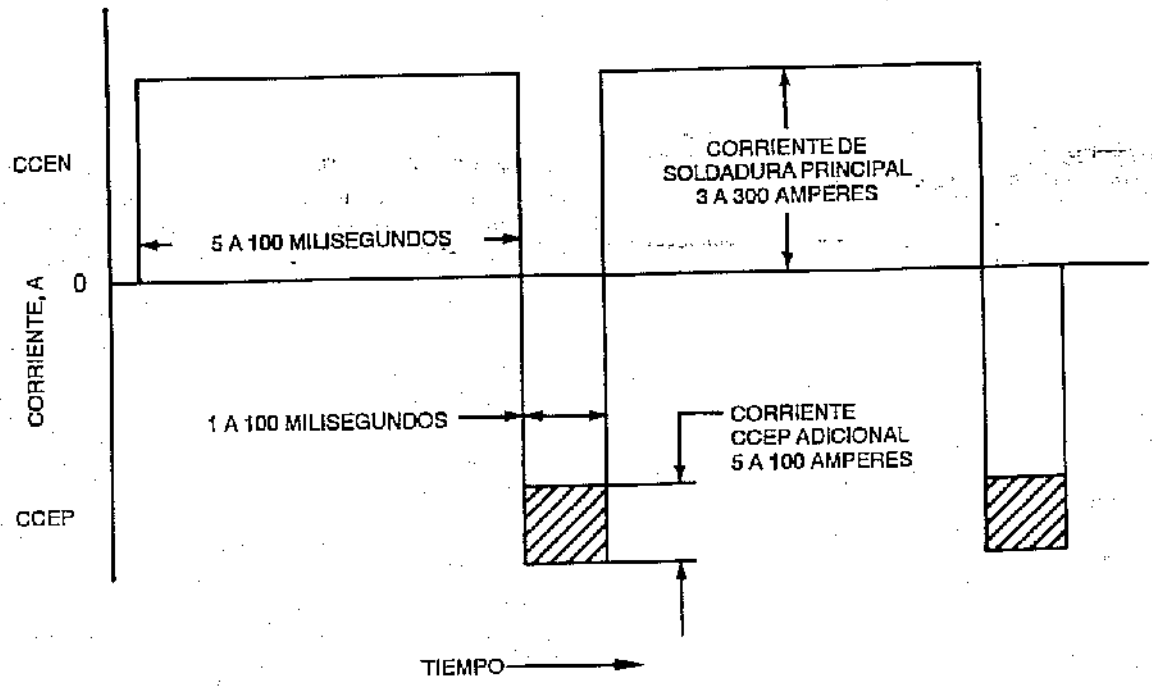


Figura 1.28-Forma de onda de corriente típica para la fuente de potencia de inversor dual con balance ajustable

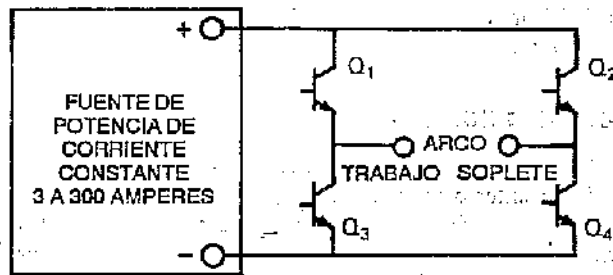


Figura 1.29—Circuito inversor de ca (fuente única).

inversores, de fuente única y de fuente dual, pueden variar la frecuencia de la salida de ca de onda cuadrada, en tanto que la fuente de núcleo de memoria debe trabajar a la frecuencia de la línea (50 o 60 Hz).

Un tercer enfoque utiliza un dispositivo llamado *rectificador síncrono*. Aquí, se parte de una fuente de potencia con un inversor en el primario que produce una salida de ca de alta frecuencia. Esta ca de alta frecuencia se aplica al circuito rectificador síncrono que, según se le ordene, rectifica la ca para dar una salida CCEN o bien CCEP. Conmutando en forma alternada el rectificador síncrono entre CCEN y CCEP, es posible crear una salida de ca sintetizada de más baja frecuencia.

FUENTES DE POTENCIA DE CORRIENTE CONTINUA

VOLTAJE CONSTANTE

Las fuentes de potencia de voltaje (potencial) constante se usan comúnmente para GMAW, FCAW y SAW. Son máquinas de los tipos rotatorio, de transformador rectificador o de inversor. Los generadores que pueden suministrar potencia para soldadura de voltaje constante normalmente son del tipo de devanado compuesto modificado excitado independientemente. La composición de las unidades de voltaje constante es distinta de la de las unidades de corriente constante, a fin de producir características volt-ampere de salida planas. Estas máquinas pueden tener dispositivos de estado sólido en el circuito de excitación para optimizar el rendimiento y permitir el control remoto. Para este fin se emplean diversos tipos de circuitos electrónicos, como los de SCR controlados por ángulo de fase y los inversores.

Las fuentes de potencia de transformador-rectificador y de inversor normalmente son unidades trifásicas, aunque se venden unidades monofásicas pequeñas, por lo regular con especificación de 200 A o menos, para aplicaciones ligeras.

Características eléctricas

Las fuentes de potencia de voltaje constante se caracterizan por sus curvas volt-ampere típicamente planas. No es rara una pendiente negativa de 1 o 2 V por cada 100 A. Esto significa que la corriente de cortocircuito máxima casi siempre es muy alta, a veces del orden de miles de amperes. Las máquinas con curvas volt-ampere con pendientes de hasta 8 V por cada 100 A aún se consideran fuentes de potencia de voltaje constante.

Existen muchas variedades y combinaciones de fuentes de potencia de voltaje constante. Es posible construir la fuente de modo que tenga pendiente fija, o que pueda ajustarse para adaptar la pendiente de la curva volt-ampere al proceso de soldadura.

Las características dinámicas de estas fuentes de potencia son de importancia primordial. Si se utiliza inductancia para ajustar la pendiente, cambiará no sólo las características estáticas de la

máquina, sino también las dinámicas. En algunos casos se emplean inductores ajustables en la porción de cc del circuito para tener un control independiente de las características estáticas y dinámicas. El inductor de cc no alterará las características estáticas pero sí afectará las dinámicas, que son muy importantes para la transferencia en cortocircuito durante la soldadura por arco de metal y gas.

Diseño general

EXISTEN MÁQUINAS DE voltaje constante de muchos diseños distintos. Las ventajas de un tipo en particular se relacionan con la aplicación y con las expectativas del usuario.

Voltaje de circuito abierto. El voltaje de circuito abierto de algunas máquinas de transformador-rectificador se ajusta cambiando de derivación en el transformador. Otro tipo de máquina controla el voltaje de circuito abierto con bobinas secundarias devanadas de modo que escobillas de carbón, impulsadas por un tornillo terminal, se deslicen a lo largo de los conductores de las bobinas. En muchos casos se incluye además un segundo control para ajustar las características volt-ampere a los requisitos del proceso de soldadura. Debido al efecto adicional sobre la curva volt-ampere de salida, esto se denomina *control de pendiente*.

Las fuentes de potencia de voltaje constante tienen una amplia gama de voltajes de circuito abierto. Las máquinas controladas eléctricamente pueden tener hasta 75 V de circuito abierto. El voltaje de circuito abierto de los equipos de transformador ajustable o con derivaciones puede variarse entre un máximo de 30 a 50 V y un mínimo de 10 V.

Pendiente. La pendiente generalmente se controla cambiando de derivación en los reactores en serie con la porción de ca del circuito. El control puede efectuarse también con escobillas de carbón, conectadas a un tornillo terminal, en contacto con las

vueltas del reactor. Este reactor variable permite ajustar de manera continua la pendiente. Otro método de control se vale de amplificadores magnéticos o dispositivos de estado sólido para regular eléctricamente el voltaje de salida. Estas máquinas pueden tener derivaciones de voltaje o bien de pendiente, además del control eléctrico.

Los controles eléctricos tienen algunas ventajas, como la facilidad de ajuste, la posibilidad de emplear control remoto y la ausencia de componentes móviles. Además, algunas máquinas controladas eléctricamente permiten ajustar la salida durante la soldadura. Esto resulta útil al "llenar cráteres" o al modificar las condiciones de soldadura. La combinación de derivaciones con el control eléctrico para un ajuste fino entre una derivación y otra es un sistema apropiado para una aplicación de servicio en la que la máquina requiere poca atención durante la soldadura. Las máquinas totalmente controladas por electricidad son más fáciles de configurar y reajustar cuando los requerimientos de soldadura cambian rápidamente. La pendiente también puede controlarse electrónicamente en la mayor parte de las fuentes de potencia de SCR controlados por ángulo de fase y de inversor.

En muchos casos, las máquinas controladas eléctricamente no tienen controles aparte para la pendiente; el diseño incluye una pendiente fija de propósito general.

En los generadores de voltaje constante, el control de pendiente normalmente se ejerce mediante un resistor con derivaciones en el circuito de soldadura. Esto es deseable en vista de la respuesta dinámica inherentemente lenta del generador a condiciones de arco cambiantes. Los controles de pendiente del tipo de resistencia limitan la corriente de cortocircuito máxima. El control de pendiente por reactor también limita la corriente de cortocircuito máxima; sin embargo, hace más lenta la respuesta de la fuente de potencia a condiciones de arco cambiante que el control de pendiente del tipo resistivo.

Aunque no existe una regla fija en lo tocante a la pendiente volt-ampere en el intervalo de soldadura, la mayor parte de las máquinas tienen pendientes de 1 a 3 V por cada 100 A.

Inductancia. Las máquinas de arco de metal con gas diseñadas para la transferencia en cortocircuito generalmente incluyen una inductancia de cc adicional que mejora el rendimiento al conferir las características dinámicas deseadas. La inductancia puede ser variable o fija.

Rizo. Las fuentes de potencia monofásicas generalmente requieren algún sistema de filtro de rizo en el circuito de soldadura. Por lo regular este filtro es un banco de condensadores electrolíticos conectado a través de la salida del rectificador. Su propósito es producir una salida de cc lisa, capaz de despejar un cortocircuito. Se usa un inductor para controlar la salida de los condensadores. Sin algo de inductancia, la descarga de los condensadores a través de un cortocircuito sería demasiado violenta para una soldadura satisfactoria.

Dispositivos de control

LAS FUENTES DE potencia de voltaje constante por lo regular vienen equipadas con contactores primarios. Los modelos controlados eléctricamente suelen tener capacidad de control remoto del voltaje. Otras funciones con que cuentan ciertas máquinas

son la compensación del voltaje de línea y accesorios para comunicarse con equipo de alimentación de alambre que permiten modificar tanto la rapidez de alimentación como la corriente de soldadura.

Especificación eléctrica

LAS ESPECIFICACIONES PRIMARIAS son similares a las que se analizaron anteriormente. Las máquinas de voltaje constante suelen tener un factor de potencia más favorable que las de corriente constante y no requieren corrección de dicho factor. El voltaje de circuito abierto, aunque sujeto a las especificaciones de la NEMA, por lo regular está bastante por debajo del máximo establecido. Las especificaciones de corriente de las máquinas NEMA Clase I van de 200 a 1500 A.

Las fuentes de potencia de voltaje constante normalmente se clasifican como NEMA Clase I o Clase II. Se acostumbra darles especificación de ciclo de trabajo del 100%, con la excepción de algunas de las unidades ligeras de 200 A o menos, que pueden tener especificaciones de ciclo de trabajo tan bajas como 20%.

CORRIENTE CONSTANTE

LAS FUENTES DE potencia para soldadura caracterizadas como *máquinas de corriente constante* comúnmente se usan para SMAW, GTAW, PAC, PAW y SAW. Estas máquinas pueden ser inversores, transformador-rectificadores o generadores. Las máquinas de transformador-rectificador y de inversor son estáticas, y transforman potencia de ca a cc. Los generadores convierten energía mecánica de rotación en potencia eléctrica.

Los voltajes de circuito abierto de las fuentes de potencia tipo rectificador de corriente constante varían dependiendo de la aplicación de soldadura a la que se destinan, estando entre 50 y 100 V. La mayor parte de las máquinas NEMA Clase I y Clase II por lo regular están fijadas en el intervalo de 70 y 80 V.

Características eléctricas

UNA CARACTERÍSTICA ELÉCTRICA importante es la relación entre la corriente de salida y el voltaje de salida. De especial interés son tanto una relación estática (de estado estacionario) como una dinámica (transitoria). La relación estática por lo regular se indica por medio de curvas volt-ampere, como las de las figuras 1.13 y 1.14. Las curvas normalmente representan el máximo y el mínimo para cada intervalo de corriente. Como se explicó en la sección anterior, no es fácil definir ni medir la relación dinámica para todas las condiciones de carga. Las características dinámicas determinan la estabilidad del arco en las condiciones de soldadura reales, y en ellas influyen el diseño y el control del circuito.

Diseño general

EN ESTADOS UNIDOS, los voltajes usuales de las líneas principales de alimentación son nominalmente 208, 240, 480 y 600 V con una frecuencia de 60 Hz. Los transformadores están diseñados para trabajar con estos voltajes. Esto se hace disponiendo las bobinas primarias en secciones con derivaciones; así, las termi-

nales de cada sección pueden conectarse en serie o en paralelo con otras secciones para igualar el voltaje de línea de entrada. En las máquinas trifásicas, el primario puede conectarse en configuración de triángulo (delta) o estrella ("Y"). El secundario muchas veces se conecta en triángulo; esta conexión se prefiere para voltaje bajo y corriente elevada.

La corriente por lo regular se controla en la sección de la máquina que está entre el transformador y los rectificadores. El control de corriente se basa en el principio de la inductancia o impedancia variable. Los que siguen son métodos para variar la impedancia y así controlar la corriente:

- (1) Bobina móvil.
- (2) Derivación móvil.
- (3) Reactor saturable o amplificadores magnéticos.
- (4) Reactor con derivaciones.
- (5) Núcleo de reactor móvil.
- (6) Estado sólido.

Además de estos seis sistemas de control, existe un tipo que utiliza resistores en serie con la porción de cc del circuito de soldadura. Los métodos (1), (2) y (5) se clasifican como controles mecánicos; los métodos (3) y (6), como controles eléctricos; el método (4) y el tipo de resistor externo, como controles de derivación. Estos mismos métodos sirven también para controlar las fuentes de transformador de corriente constante.

Por lo regular se incluye una inductancia en el circuito de soldadura de cc para controlar los picos excesivos en la corriente de carga. Estos picos de corriente pueden ocurrir por cambios dinámicos en la carga del arco. La inductancia también sirve para reducir el rizo inherente que se observa después de rectificar la corriente alterna. Un rectificador trifásico produce un rizo relativamente pequeño; por tanto, el tamaño de su inductor está determinado en primer término por la necesidad de controlar los picos en la carga del arco. Los rizados grandes se asocian a la rectificación monofásica. El tamaño de los inductores para las máquinas monofásicas está determinado por la necesidad de reducir el rizo; por tanto, son mayores que los de las máquinas trifásicas de la misma especificación. Las fuentes de potencia de este tipo por lo regular tienen un conmutador en la salida de cc que permite invertir la polaridad del voltaje en las terminales de la máquina sin intercambiar los cables de soldadura.

Funciones auxiliares

LAS FUNCIONES AUXILIARES son similares a las que ofrecen las fuentes de potencia de ca de corriente constante, aunque no todas las fuentes cuentan con todas las funciones. El fabricante puede proporcionar información completa al respecto.

Además de las funciones antes mencionadas, muchas fuentes de potencia de cc cuentan con capacidad de pulsado de corriente como equipo estándar u opcional. Las fuentes de potencia de pulsos pueden alternar en forma repetitiva entre corriente de soldadura alta y baja. Normalmente, los valores de corriente alta y baja, la duración de los pulsos y la tasa de repetición de los mismos se pueden ajustar de manera independiente. Esta función resulta útil cuando se suelda fuera de posición y en aplicaciones críticas de la soldadura por arco de tungsteno y gas.

FUENTE DE POTENCIA DE INVERSOR

UNA MÁQUINA DE inversor difiere de una del tipo de transformador-rectificador en que el inversor rectifica la corriente de línea de ca de 60 Hz, utiliza un circuito conmutador para producir una ca de alta frecuencia, reduce ese voltaje con un transformador de ca y luego lo rectifica para obtener la salida de corriente de cc requerida. El cambio de la frecuencia de ca a un valor mucho más alto hace posible reducir considerablemente el tamaño del transformador, así como las pérdidas de este último.

GENERADORES Y ALTERNADORES IMPULSADOS POR MOTOR ELÉCTRICO Y DE COMBUSTIÓN

LAS FUENTES DE potencia del tipo de generador convierten energía mecánica en potencia eléctrica adecuada para la soldadura por arco. La potencia mecánica puede obtenerse de un motor de combustión interna o eléctrico, o aprovechando la potencia de otro equipo. En soldadura se usan dos tipos básicos de fuente de potencia rotatoria: el generador y el alternador. Ambos tienen un miembro que gira, llamado *rotor* o *armadura*, y un miembro estacionario, llamado *estator*. Ambos tipos requieren un sistema de excitación.

El principio en que se basan todas las fuentes de potencia rotatorias es que se produce una corriente en un conductor eléctrico cuando éste se desplaza dentro de un campo magnético. Físicamente, no importa si el campo magnético se mueve o el conductor lo hace; lo importante es que la bobina experimente una intensidad magnética cambiante. En la práctica, un generador tiene un campo estacionario y conductores móviles, y un alternador tiene un campo móvil y conductores estacionarios.

El generador de cc tiene un sistema de conmutador-escobilla para convertir la ca en potencia de cc para soldadura. Normalmente, este generador es un dispositivo eléctrico trifásico. Los sistemas trifásicos producen la potencia de soldadura más uniforme de todas las fuentes de potencia electromecánicas.

Un generador de cc consta de un rotor y un estator. La unidad del rotor se compone de (1) un eje de través, (2) dos cojinetes en los extremos para sostener la carga del rotor y el eje, (3) una armadura que incluye el núcleo de hierro laminado y las bobinas portadoras de corriente y (4) un conmutador. Es en las bobinas de la armadura que se genera la potencia para soldar.

El estator es la parte estacionaria del generador dentro de la cual gira la unidad del rotor, y contiene las bobinas de campo magnético del generador. Estas bobinas conducen una pequeña cantidad de cc necesaria para mantener el campo magnético continuo que se requiere para generar la potencia. El amperaje de cc normalmente no excede los 10 o 15 V, y en muchos casos es menor.

En la generación de potencia eléctrica, debe haber un movimiento relativo entre un campo magnético y un conductor portador de la corriente. En el generador de cc, la armadura es el conductor portador de la corriente; las bobinas del campo magnético se encuentran en el estator. La armadura gira dentro del estator y su sistema de campos magnéticos; y así se genera la corriente para soldar.

Los conductores de la armadura de un generador para soldadura son relativamente gruesos porque transportan la corriente de soldadura. El conmutador se encuentra en un extremo de la armadura; es un grupo de barras conductoras que se colocan paralelas al eje rotatorio para establecer un contacto de conmutación con un juego de escobillas de carbón estacionarias. Estas barras están conectadas a los conductores de la armadura. Todos estos componentes se disponen con la sincronización debida con el campo magnético de modo que, al girar la armadura, el conmutador realice una función de rectificación mecánica.

Las fuentes de potencia de alternador son muy similares, excepto que en general las bobinas del campo magnético se devanan en el rotor, y las bobinas pesadas de la corriente de soldadura se devanan en el estator. Estas máquinas se denominan también *máquinas de campo giratorio o rotatorio*.

El voltaje de ca producido por las bobinas de la armadura al moverse a través del campo magnético del estator se conduce a las barras de un conmutador de cobre por medio de conductores eléctricos desde las bobinas de la armadura. Los conductores están unidos por soldadura blanda a las barras individuales del conmutador, las cuales pueden considerarse como terminales, o "barras colectoras" para la corriente alterna generada en la armadura.

El conmutador es un sistema de barras de cobre montado en el eje del rotor. Cada barra de cobre tiene una superficie superior maquinada y pulida. Escobillas de contacto descansan sobre esa superficie para captar cada medio ciclo de la corriente alterna generada. El propósito del conmutador es transportar ambos medios ciclos de la onda senoidal de ca generada, pero en barras de cobre separadas. Cada una de las barras del conmutador está aislada respecto a las demás.

Las escobillas de carbón captan cada medio ciclo de la corriente alterna generada y la dirigen a un conductor como corriente continua. Puede decirse que el sistema de escobillas-conmutador es un tipo de rectificador mecánico, ya que convierte la corriente alterna generada en corriente continua (cc). Casi todas las escobillas empleadas son una aleación de carbón, grafito y pequeñas hojuelas de cobre.

Cuando se colocan los conductores gruesos en el estator se hacen innecesarios el conmutador y las escobillas de carbón para transportar la corriente elevada; sin embargo, la salida es ca, y requerirá rectificación externa para aplicaciones de cc. La rectificación suele hacerse con un puente, empleando "diodos de silicio". Los alternadores por lo regular tienen escobillas y un anillo deslizante para alimentar la potencia baja a las bobinas de campo. No se acostumbra retroalimentar una porción de la corriente de soldadura al circuito de campo del alternador. Existen alternadores tanto monofásicos como trifásicos para suministrar ca al sistema rectificador necesario. Las características de cc son similares a las de las unidades de transformador-rectificador monofásicas y trifásicas.

El alternador o generador puede ser autoexcitado o excitado externamente, dependiendo de la fuente de la potencia para el campo. Cualquiera de ellos puede valerse de un alternador o generador auxiliar pequeño, con su rotor en el mismo eje que el rotor principal, para proveer la potencia de excitación. En muchas unidades impulsadas por motor de combustión, una porción de la potencia del campo excitador está disponible para operar herramientas o lámparas que se necesitan para la operación de soldadura. En el caso de los generadores, esta potencia auxiliar

suele ser de 115 V cc. Las fuentes de potencia del tipo de alternador generalmente producen potencia auxiliar de 120 o 120/240 V cc. La frecuencia del voltaje depende de la velocidad del motor.

Características de salida

Las FUENTES DE potencia tanto del tipo de generador como de alternador normalmente permiten ajustar la corriente de soldadura a niveles discretos amplios llamados *intervalos*, y por lo regular se coloca un reóstato u otro control en el circuito de campo para ajustar la fuerza del campo magnético interno y así realizar un ajuste fino de la potencia de salida dentro de cada intervalo. Como el ajuste fino regula la fuerza del campo magnético, también modifica el voltaje de circuito abierto. Si el ajuste se hace cerca del límite inferior del intervalo, el voltaje de circuito abierto normalmente será bastante más bajo que en el extremo superior del intervalo.

En la figura 1.30 se muestra una familia de curvas características volt-ampere para una fuente de potencia ya sea del tipo de generador o de alternador.

En muchas fuentes de potencia de alternador, los intervalos amplios se obtienen de derivaciones sacadas de un reactor en la porción de ca del circuito. La máquina básica pocas veces posee la respuesta dinámica requerida para soldadura por arco de metal protegido, por lo que casi siempre se inserta un inductor conectado en serie en una rama de la salida de cc del rectificador. Los generadores para soldadura por lo regular no necesitan un inductor.

El equipo rotatorio normalmente tiene asociado un intervalo de traslapo limitado en el que es posible obtener la corriente de soldadura deseada con una gama de voltajes de circuito abierto. Si suelda dentro de este intervalo, el soldador tiene la oportunidad de adaptar mejor la fuente de potencia al trabajo. Si se usa un voltaje de circuito abierto bajo, la pendiente de la curva será menos pronunciada, y el soldador podrá regular hasta cierto punto la corriente de soldadura variando la longitud del arco. Esto puede ayudar a controlar el charco de soldadura, sobre todo cuando se trabaja fuera de posición.

Algunos generadores de soldadura llevan esta función más allá de los pasos limitados que se acaban de describir. Los generadores con devanado compuesto y controles de corriente y voltaje independientes y continuos pueden ofrecer al operador varias curvas volt-ampere a escoger con casi cualquier capacidad de amperaje dentro del intervalo total de la máquina. Así, el soldador puede fijar el voltaje de arco deseado con un control y la corriente de arco con otro. Con esto se ajusta la fuente de potencia de generador de modo que proporcione una característica volt-ampere estática susceptible de "adaptarse" al trabajo dentro de casi todo su intervalo. Las curvas volt-ampere que se obtienen cuando cada control se modifica de manera independiente se muestran en las figuras 1.31 y 1.32.

Hay fuentes de potencia que producen tanto corriente constante como voltaje constante. Estas unidades se usan en aplicaciones de campo en las que ambos modos de operación se necesitan en el lugar de trabajo y no se dispone de potencia de las líneas eléctricas. Además, muchos diseños nuevos se valen de circuitos electrónicos de estado sólido para obtener diversas características volt-ampere.

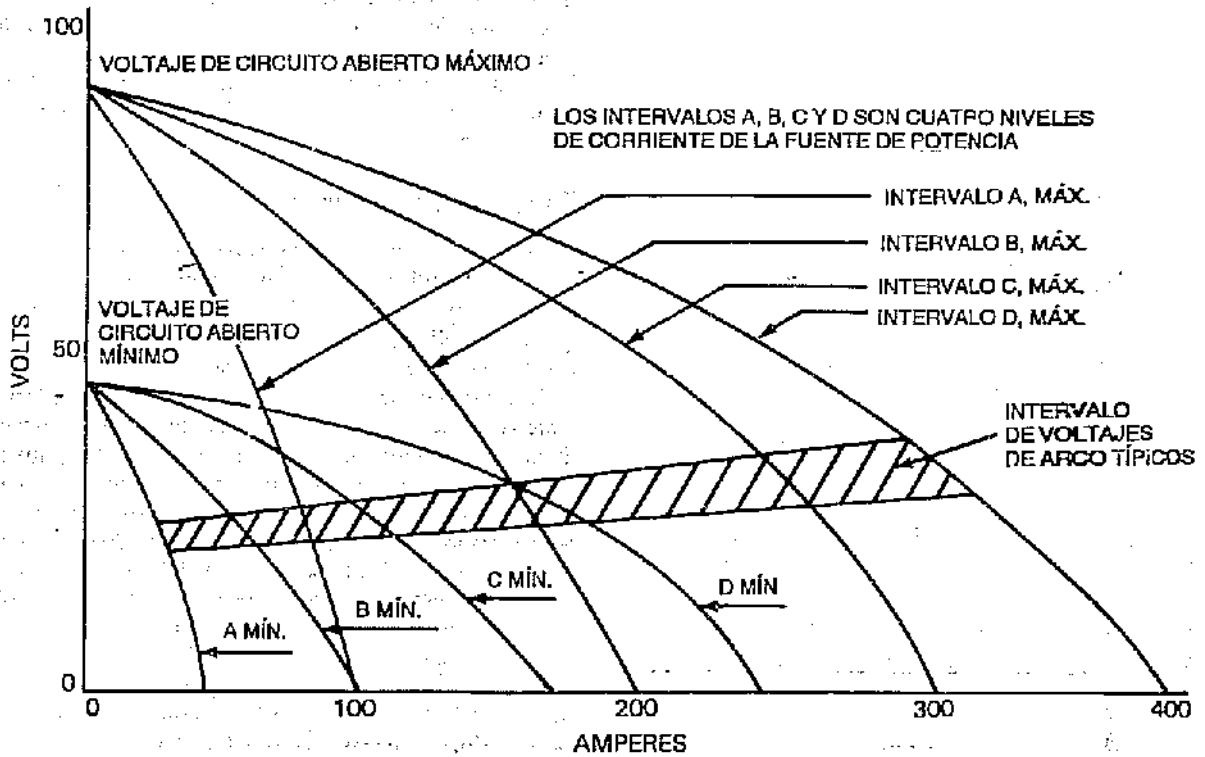


Figura 1.30—Relación volt-ampere para una fuente de potencia rotatoria de corriente constante típica

Fuentes de potencia mecánica

EXISTEN GENERADORES CON motores impulsores de ca con diversas especificaciones de voltaje y frecuencia, y también con motores de cc. Los generadores para soldadura suelen ser unidades de una sola pieza con el motor impulsor y el generador montados sobre el mismo eje.

Los generadores para soldadura impulsados por motores de inducción normalmente se fabrican para alimentación con potencia trifásica de 200, 240, 480 y 600 V a 60 Hz. Otros requerimientos de entrada estándar son 220, 380 y 440 V a 50 Hz. Pocos se fabrican con motores monofásicos, ya que las fuentes de potencia para soldadura del tipo de transformador por lo regular satisfacen las necesidades de operación monofásica. El motor impulsor de uso más común es el de inducción trifásico de 230/460 V a 60 Hz.

En la figura 1.33 se resumen algunas de las características eléctricas de un conjunto motor-generador típico de 230/460 V, trifásico, de 60 Hz: eficiencia global, factor de potencia y entrada de corriente. Los motores de los generadores para soldadura con cc suelen tener un factor de potencia favorable (80 a 90%) cuando están sometidos a carga, con un factor rezagado del 30 al 40% en condiciones sin carga. La entrada de potencia en condiciones sin carga puede ser de 2 a 5 kW, dependiendo de la especificación del conjunto motor-generador. El factor de potencia de los generadores para soldadura impulsados por motor de inducción puede mejorarse empleando condensadores estáti-

cos similares a los que se usan en los transformadores para soldadura. Se han construido generadores para soldadura con motores impulsores síncronos a fin de corregir el bajo factor de potencia.

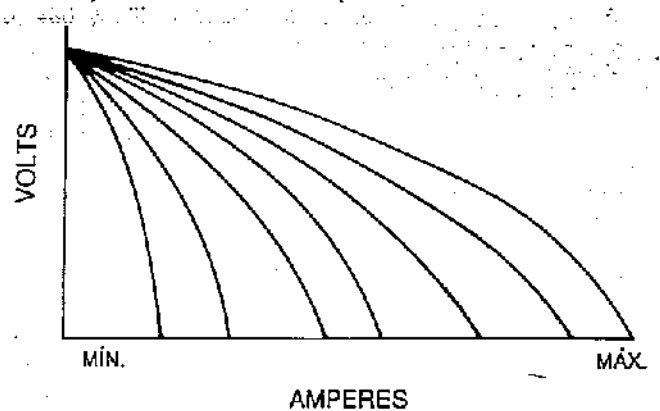


Figura 1.31—Efecto de las variaciones de control de corriente sobre la salida del generador

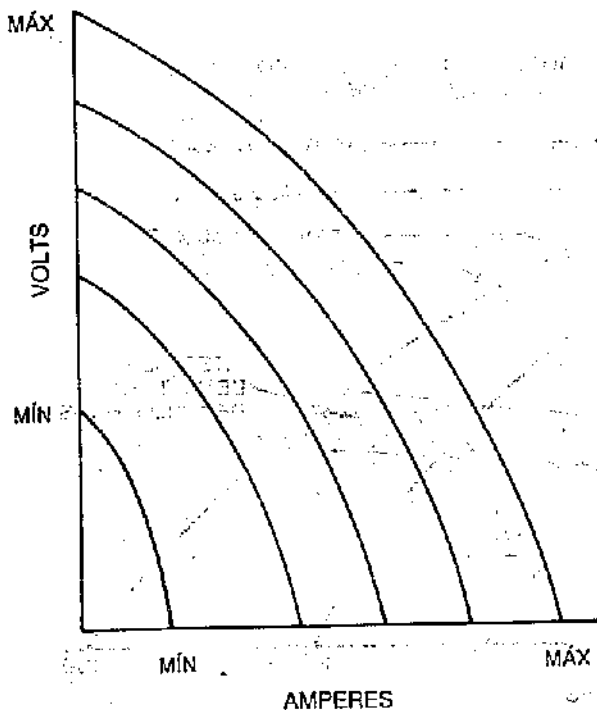


Figura 1.32—Efecto de las variaciones en el control de voltaje sobre la salida del generador

Las fuentes de potencia del tipo rotatorio se emplean en labores de construcción en el campo donde no se dispone de potencia eléctrica. Para este fin está disponible una amplia variedad de motores de combustión interna, tanto enfriados por líquido como enfriados por aire, dependiendo de las aplicaciones específicas de la fuente de potencia.

En Estados Unidos el combustible más utilizado es la gasolina, en virtud de su precio y disponibilidad. El combustible diesel también es popular por su elevado punto de inflamación. Además, algunas leyes federales sólo permiten el empleo de diesel en motores utilizados para aplicaciones específicas. Un buen ejemplo es el uso de motores diesel en las fuentes de potencia para soldar en las plataformas petroleras marinas. En algunas aplicaciones se emplea propano porque su combustión es más limpia que la de la gasolina, aunque requiere un sistema de carburación especial.

Operación en paralelo

ES POSIBLE INCREMENTAR la salida de corriente conectando en paralelo generadores para soldadura. Sin embargo, la conexión en paralelo no se recomienda a menos que se sigan las instrucciones específicas del fabricante. Esta precaución es necesaria porque para que una conexión en paralelo funcione es necesario igualar el voltaje de salida, la corriente de salida y la polaridad de todas las máquinas. En el caso de los generadores autoexcita-

dos, el problema se complica todavía más por la necesidad de igualar la excitación entre los generadores.

La naturaleza bloqueadora de los rectificadores facilita la operación en paralelo de las unidades de alternador. Debe verificarse que las conexiones tengan la misma polaridad, y todas las unidades conectadas en paralelo deben ajustarse para que suministren salidas iguales.

Funciones auxiliares

LAS FUENTES DE potencia del tipo rotatorio cuentan con muchas funciones auxiliares. Las unidades pueden estar equipadas con un aditamento de control remoto: un control de mano o de pie que el operador lleva a la estación de trabajo para ajustar la fuente de potencia mientras suelda.

Los motores de gas a menudo cuentan con dispositivos de marcha en vacío cuyo fin es ahorrar combustible. Estos dispositivos son automáticos en cuanto a que el motor trabaja a cierta velocidad de marcha en vacío hasta que se toca el trabajo con el electrodo. Marchando en vacío, el voltaje de circuito abierto del generador es bajo. Cuando se toca el trabajo con el electrodo se energiza un circuito sensor que acelera automáticamente el motor hasta la velocidad de operación. Cuando el arco se interrumpe, el motor vuelve a la marcha en vacío después de un tiempo preestablecido.

Los generadores impulsados por motor de combustión a menudo están equipados con una salida de potencia eléctrica auxiliar. En algunas unidades esta potencia está disponible todo el tiempo, y en otras sólo durante la marcha en vacío. Otras funciones auxiliares con que cuentan muchas máquinas soldadoras impulsadas por motor son los conmutadores de polaridad (para cambiar fácilmente de CCEN a CCEP), medidores de tiempo de funcionamiento, medidores de combustible, cargadores de baterías, iniciadores de arco de alta frecuencia, tacómetros y medidores de salida. Algunas de las unidades más grandes están equipadas con compresoras de aire.

FUENTES DE POTENCIA A PULSOS Y A PULSOS SINÉRGICOS

LAS FUENTES DE potencia a pulsos se han empleado con SMAW, GTAW, GMAW, FCAW y SAW. Estas fuentes aparecieron en el mercado en la década de 1960, y las más comunes son las que se usan para GMAW y GTAW.

Fuentes de potencia a pulsos para soldadura por arco de metal y gas

EN EL PROCESO GMAW se usan fuentes de potencia a pulsos para reducir la potencia del arco y la rapidez de deposición del alambre pero sin perder la transferencia por aspersión que es deseable. El concepto se basa en el hecho de que el metal se transfiere desde el electrodo de alambre con dos tasas distintas, dependiendo de la corriente de soldadura; una alcanza unos cuantos cientos de gotas por segundo (el modo de arco de aspersión), cuando la corriente excede un nivel crítico, y el otro es de menos de 10 gotas por segundo (el modo globular), cuando la corriente está por debajo del nivel crítico. Esta corriente crítica se denomina *corriente de transición*. Si se pulsa la corriente

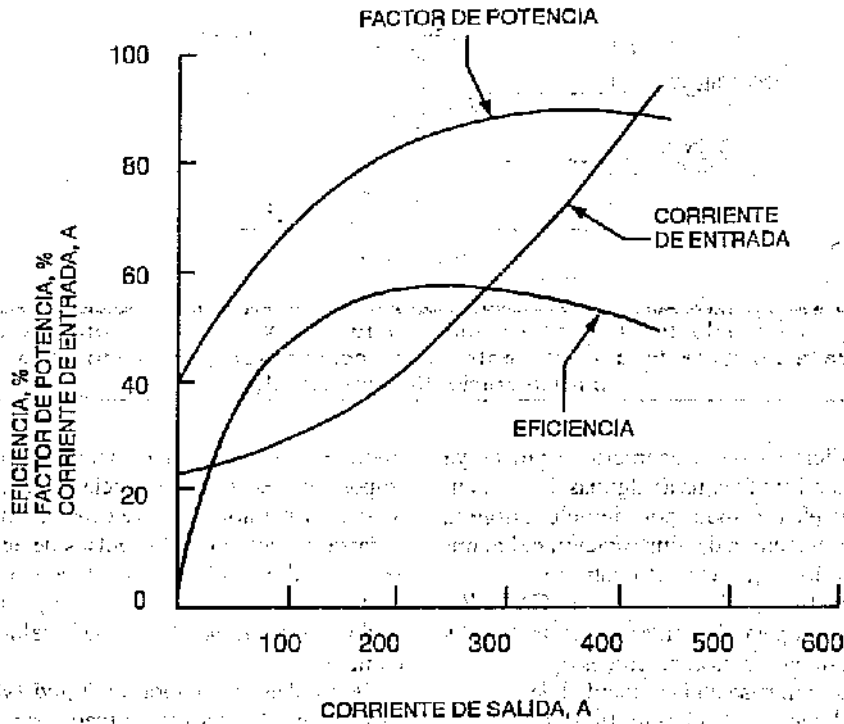


Figura 1.33—Curvas características típicas de una fuente de potencia de motor-generador de 300 amperes de cc

entre estas dos regiones, es posible obtener las cualidades deseables de la transferencia por aspersión y también reducir la corriente media y la tasa de deposición significativamente. Esto permite usar el proceso GMAW en todas las posiciones y para soldar piezas de lámina.

En la práctica, el nivel de corriente durante el intervalo globular se mantiene tan bajo que no hay transferencia de metal, pero lo bastante alto como para mantener la ionización en las regiones del arco. Por esta razón, se le conoce como "corriente de supervivencia", aunque el término más común es *corriente de fondo*. Durante el intervalo de aspersión, la corriente se eleva por encima del nivel de transición durante el tiempo suficiente para transferir una o dos gotas; ésta es la corriente de pulso. Se han diseñado fuentes de potencia con los controles necesarios para producir la salida regulada que necesita la GMAW a pulsos.

Las primeras fuentes de potencia para GMAW a pulsos eran máquinas de frecuencia fija, que todavía se usan. Consisten en una fuente de potencia de voltaje constante para la corriente de fondo y una fuente de potencia rectificadora de media onda para los pulsos de corriente (véase la figura 1.34).

La siguiente versión mejorada produjo pulsos a 60 o 120 Hz; empleaba una fuente de potencia de corriente constante para la corriente de fondo y una de SCR controlado por ángulo de fase para ajustar la corriente pico (véase la figura 1.35).

Con la aparición de las fuentes de potencia transistorizadas a finales de los años sesenta y principios de los setenta, se realizaron investigaciones con GMAW a pulsos empleando fuentes de potencia de frecuencia variable. Con las fuentes de potencia

de estado sólido, como las de inversor, fue posible ajustar de manera independiente todas las variables de los pulsos: corriente pico, corriente de fondo, duración de la corriente de pulso (anchura de pulso) y duración de la corriente de fondo. Véase la figura 1.36. Al controlar estas variables individualmente, o al hacerlas interactuar, es posible tener un control casi total de la transferencia de metal, haciendo que se transfiera una sola gota en cada pulso, al tiempo que se mantiene el control de la corriente media.

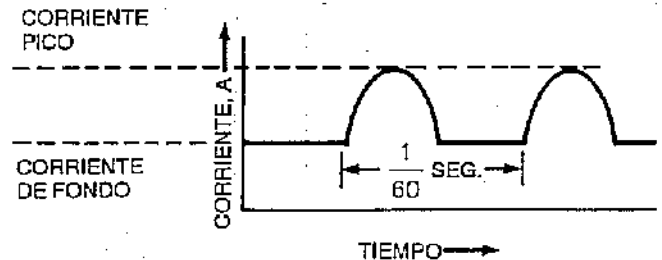


Figura 1.34—Salida de corriente de una fuente de potencia a pulsos para GMAW. Fuente de potencia de voltaje constante para la corriente de fondo y fuente de potencia rectificadora de media onda para los pulsos de corriente

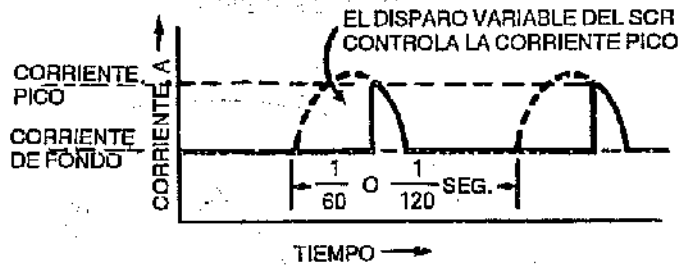


Figura 1.35—Salida de corriente de una fuente de potencia para GMAW a pulsos. Fuente de potencia de corriente constante para la corriente de fondo y fuente de potencia de SCR controlado por ángulo de fase para la corriente pico variable

Cuando todas las condiciones de la operación a pulsos ya están establecidas, puede ser difícil reajustar algunas de las fuentes de potencia más complejas cuando, por ejemplo, surge la necesidad de modificar la velocidad de alimentación del alambre, pues esto hace necesario reajustar cierto número de variables. La operación de estas fuentes de potencia para GMAW a pulsos puede simplificarse empleando controles electrónicos y de microprocesador para establecer las condiciones óptimas para el funcionamiento a pulsos con base en la velocidad de alimentación del alambre. Los elementos de circuito típicos para esta clase de fuentes de potencia se presentan en forma de diagrama en la figura 1.37.

Las variables empleadas y los controles ejercidos dependen de los objetivos de sus diseñadores. Por ejemplo, si se desea

modificar la tasa de deposición es posible efectuar cambios proporcionales en la frecuencia de los pulsos manteniendo fijas las demás variables. En vez de cambiar la frecuencia, podría variarse la anchura de los pulsos de acuerdo con las demandas del arco. Algunas fuentes de potencia se diseñan de modo que ajusten tanto la frecuencia de los pulsos como la corriente de fondo, siempre dependiendo de la velocidad de alimentación del alambre.

Se emplea la palabra *sinérgico* (varias cosas actuando al unísono) para describir las máquinas de GMAW a pulsos que establecen las variables del proceso con base en la velocidad de alimentación del alambre. Usando controles electrónicos, es posible elegir entre varias curvas sinérgicas para satisfacer las necesidades de aplicaciones específicas.

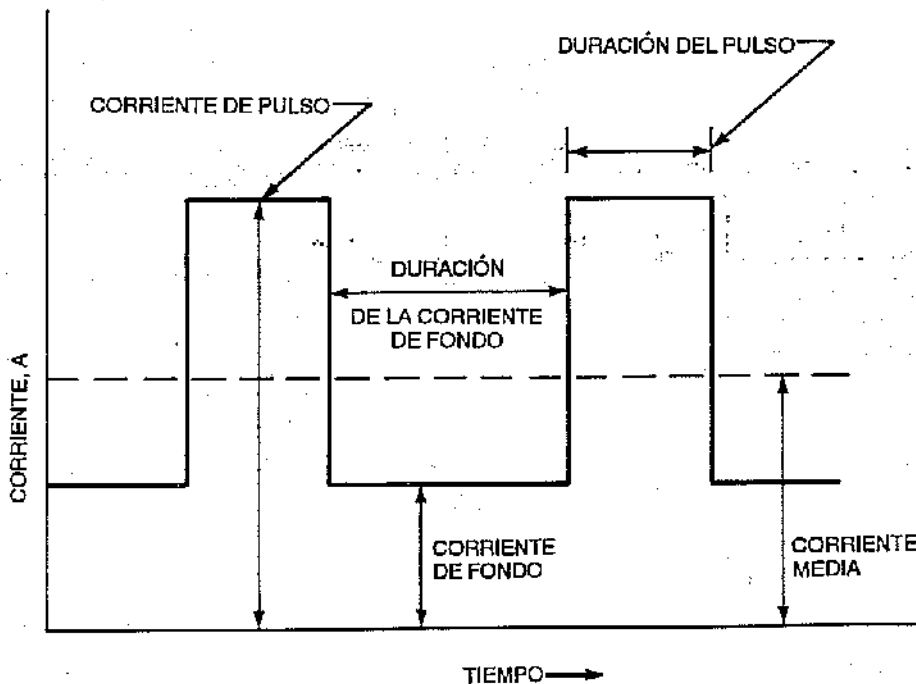


Figura 1.36—Variables de soldadura por arco de gas y metal a pulsos

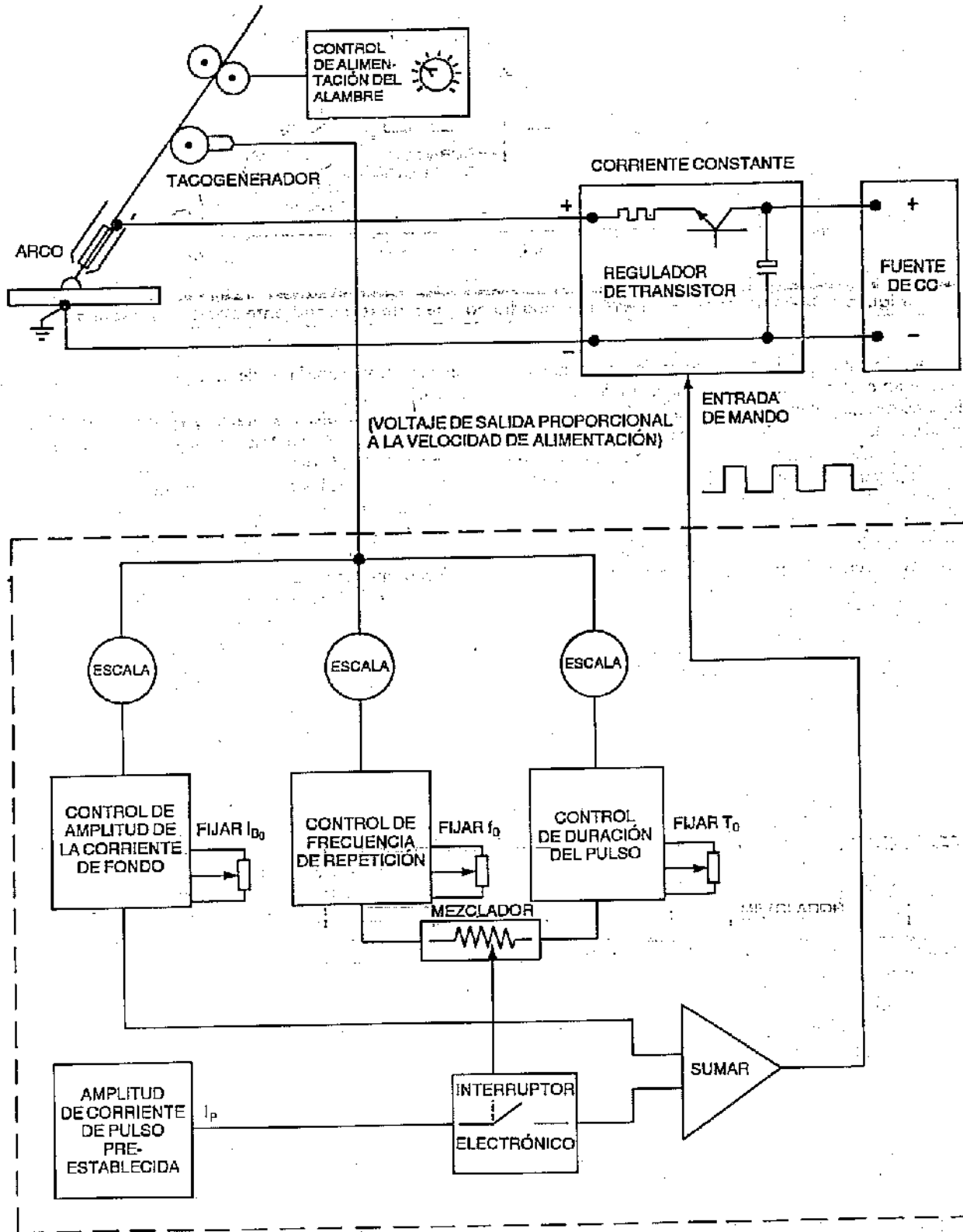


Figura 1.37-Circuito base para la operación a pulsos sinérgicos

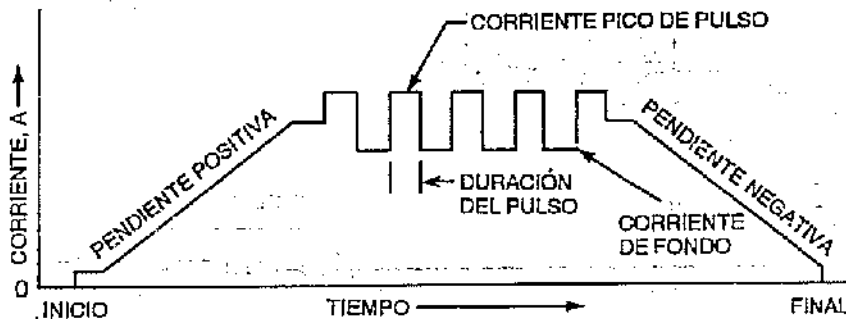


Figura 1.38—Programa de GTA a pulsos típico que muestra pendiente positiva y negativa

En los años sesenta, las fuentes de potencia totalmente transistorizadas eran bastante costosas. Con la aparición de los semiconductores de alta potencia y respuesta rápida se ha reducido considerablemente el precio de las fuentes de potencia a pulsos de frecuencia variable. La mayor parte de las fuentes de potencia de inversor para soldadura puede usarse para GMAW a pulsos. Tanto los tiempos de respuesta como la frecuencia, la anchura del pulso y los niveles pico y de fondo son ajustables con los inversores de estado sólido. Algunas fuentes de potencia sinérgicas están diseñadas para asegurar la transferencia de una sola gota con cada pulso mediante ajustes instantáneos de la frecuencia y la anchura de los pulsos, dependiendo del voltaje que se detecte a lo largo del arco. Algunas máquinas varían la frecuencia de los pulsos, la duración de la corriente pico (anchura de pulso) o bien la velocidad de alimentación del alambre cuando cambia la distancia que sobresale el alambre. Las fuentes de potencia de GMAW a pulsos típicamente alcanzan hasta 500 A de corriente pico, y la frecuencia varía entre 60 y 200 Hz.

Fuentes de potencia a pulsos para soldadura por arco de tungsteno y gas

El concepto de corriente pulsada también se ha usado con bastante efectividad en el proceso GTA. Las frecuencias difieren de las empleadas en el proceso GMAW, y generalmente van desde 2 segundos por pulso hasta 10 pulsos por segundo, siendo las frecuencias bajas las de uso más común. Debido a lo avanzado del sistema eléctrico que se requiere para la operación a pulsos, resulta sencillo incluir otras funciones deseables, como circuitos iniciadores y pendientes de corriente controladas. En la figura 1.38 se presenta un diagrama que muestra la forma

cómo puede variarse la corriente al programar una soldadura con tales máquinas.

La GTA a pulsos se caracteriza por una variación repetitiva de la corriente del arco desde un valor de fondo (bajo) hasta un valor pico (alto). Los niveles de corriente, tanto de pico como de fondo, se pueden ajustar dentro de un intervalo amplio. La duración de la corriente pico más la de la corriente de fondo constituyen la duración de un ciclo de pulso. Además, es posible ajustar de manera independiente la duración de la corriente pico y la de la corriente de fondo.

El propósito de pulsar es calentar y enfriar en forma alternada el metal de soldadura fundido. El ciclo de calentamiento (corriente pico) se basa en la obtención de un charco de metal fundido del tamaño apropiado durante el pulso de pico sin una fusión excesiva de las paredes laterales y sin perforación, dependiendo de la unión que se está soldando. La corriente de fondo y su duración están determinadas por el grado de enfriamiento del charco de soldadura deseado. El propósito de la porción de enfriamiento (corriente de fondo) del ciclo es acelerar la tasa de solidificación y reducir el tamaño del charco fundido sin interrumpir el arco. Así, los pulsos permiten aumentar y reducir en forma alternada el tamaño del charco fundido.

La fluctuación en el tamaño y la penetración del charco fundido está relacionada con las variables de pulsación, la velocidad de desplazamiento, el tipo, espesor y masa del metal base, el tamaño del metal de aporte y la posición de soldadura. Como el tamaño del charco fundido se controla en parte por la acción de pulsación de la corriente, se reduce o elimina la necesidad de manipular el arco para controlar el charco. Así pues, la corriente a pulsos es una herramienta útil para la GTA manual fuera de posición, como la unión de tuberías en su lugar y la soldadura a tope automática de conductos de paredes delgadas.

FUENTES DE POTENCIA ESPECIALES

SOLDADURA CON MÚLTIPLES OPERADORES

EL EQUIPO PARA soldadura con múltiples operadores resulta económico para talleres que tienen varias estaciones de solda-

dura en un área pequeña. La mayor parte de estos equipos se ha utilizado provechosamente en los astilleros y talleres de construcción que utilizan el proceso de soldadura por arco de metal protegido.

Típicamente, una instalación para múltiples operadores consiste en una fuente de potencia grande de voltaje constante con voltaje de circuito abierto de 70 a 80 V que alimenta a ocho o diez estaciones de soldadura.

Las unidades comerciales de motor-generador varían entre 500 y 2500 A; las de transformador-rectificador entre 500 y 1500 A; y las de transformador entre 400 y 2000 A. Se emplean dispositivos de sobrecarga y cortacircuitos para evitar que el equipo se dañe. El portaelectrodos de cada estación de soldadura se conecta a la fuente de potencia a través de un resistor variable o una red, con lo cual se obtiene una característica de caída de corriente esencialmente constante, en el arco de soldadura. Se usa una terminal de trabajo común para todas las estaciones de soldadura.

Módulos individuales

UN TIPO DE fuente de potencia para múltiples operadores consiste en un banco de módulos de potencia individuales que, albergados en un gabinete común, suministran potencia de soldadura de cc controlada remotamente desde la unidad principal hasta las estaciones individuales a distancias de hasta 60 m (200 pie). Si la salida de un módulo individual no basta para un trabajo de soldadura determinado, es posible conectar en paralelo dos o más módulos. Se cuenta con una conexión a la terminal de trabajo común para todos los módulos. Cada soldador puede elegir cualquiera de las dos polaridades; cada uno de los módulos está aislado, y puede controlarse individualmente.

Conceptos de diseño

EL EQUIPO DE múltiples operadores resulta efectivo cuando los ciclos de trabajo operativos de cada estación de soldadura manual son bastante bajos (20 a 25%). Estas condiciones prevalecen en las situaciones en las que los soldadores deben cambiar de electrodo con frecuencia, verificar el embonamiento, cambiar de posición y eliminar escoria. Así, su tiempo de arco real será relativamente corto en relación con su período de trabajo total. El equipo para múltiples operadores aprovecha este bajo ciclo de trabajo para reducir los costos de maquinaria y aumentar la flexibilidad y la transportabilidad.

Por ejemplo, si la corriente de arco media requerida es de 160 A y el ciclo de trabajo promedio de 10 minutos de una máquina soldadora es del 25%, la corriente media por máquina soldadora será de $160 \times 0.25 = 40$ A. Así, en cualquier período de 10 minutos una fuente de potencia de 800 A podrá alimentar 40 A en promedio a unas 20 máquinas soldadoras de la instalación.

Funciones

EN INSTALACIONES GRANDES, el empleo de fuentes de potencia de múltiples operadores casi siempre reduce los costos de capital del equipo y sus costos de instalación. Los costos de mantenimiento también se reducen, ya que sólo es necesario dar mantenimiento a una fuente de potencia, no a varias. Los bancos de resistores o tableros de reactores casi siempre pueden colocarse cerca de cada soldador para que éste pueda ajustar con comodidad la corriente.

SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

LA FUENTE DE potencia empleada para soldadura por arco sumergido (SAW) puede ser de ca o cc de corriente constante, o de cc de voltaje constante. Las fuentes de potencia de corriente continua pueden ser motores-generadores o bien transformadores-rectificadores. Las fuentes de corriente constante a menudo se usan en combinación con controles de la velocidad de alimentación del electrodo por voltaje del arco. Las fuentes de potencia de voltaje constante se configuran de modo que produzcan un arco con la longitud requerida, y se usa la velocidad de alimentación del electrodo para regular la corriente de soldadura. La soldadura por arco sumergido generalmente se efectúa con corrientes altas (350 a 1200 A), así que la fuente de potencia debe tener una especificación de corriente elevada con ciclo de trabajo alto.

Para la soldadura por arco sumergido se puede usar una fuente de potencia de cc estándar con especificación de la NEMA, ya sea del tipo de transformador-rectificador o del tipo de motor-generador, si tiene la especificación adecuada para esta aplicación. Las fuentes de potencia se pueden conectar en paralelo siguiendo las instrucciones del fabricante, si esto es necesario para obtener la capacidad de corriente de soldadura requerida. Existen unidades dúplex, constituidas por dos unidades de un solo operador armadas y conectadas para operación individual o en paralelo. Es preferible usar máquinas dúplex o unidades individuales con especificación de corriente elevada en lugar de fuentes de potencia estándar conectadas en paralelo.

Las fuentes de potencia de cc de voltaje constante que se empleen para soldadura por arco sumergido deberán tener un voltaje de circuito abierto del orden de 50 V y una especificación de corriente apropiada para la aplicación manual. La corriente de soldadura se controla automáticamente por la velocidad de alimentación del alambre del electrodo. Una de las ventajas de este método es que un sistema de control sencillo proporciona un voltaje de arco uniformemente estable, lo que resulta especialmente ventajoso en la soldadura de calibres delgados a alta velocidad, y además un inicio de arco más consistente gracias al pico de corriente inicial tan alto.

Si se emplean fuentes de potencia de motor-generador, los requerimientos de potencia elevada de algunas aplicaciones de soldadura por arco sumergido pueden implicar una carga excesiva para el motor impulsor. A una corriente dada, la entrada al generador es más o menos proporcional a su voltaje de carga; por tanto, se debe procurar escoger unidades con una especificación de potencia motora adecuada. Esta precaución también es aplicable a algunas máquinas del tipo de transformador-rectificador cuando el voltaje de arco real excede el voltaje de salida especificado.

El flujo de corriente de soldadura desde un generador puede iniciarse y suspenderse mediante un contactor magnético en el circuito de soldadura o por un relevador en el circuito de campo del generador, dependiendo de su diseño y características. Las fuentes de potencia del tipo de transformador controlan el flujo de corriente por medio de un contactor en la línea primaria de la máquina.

La desviación magnética del arco (golpe del arco), característica de la soldadura con corriente continua, por lo regular limita la magnitud de la cc que puede usarse en la soldadura por arco sumergido. La corriente alterna minimiza el golpe del arco.

Hay transformadores con especificaciones de hasta 2000 A con características especiales que permiten adaptarlos a aplicaciones de soldadura por arco sumergido. El voltaje de circuito abierto debe ser de por lo menos 80 V, pero es preferible que esté entre 85 y 100 V.

Hay varias formas distintas de suministrar la corriente de soldadura a los sistemas de arco múltiple. En la soldadura por arco paralelo, puede conectarse una fuente de potencia en la forma convencional para electrodo único, y luego alimentar dos o más electrodos de soldadura por medio de una cabeza de impulso único a través de una boquilla o mordaza común.

En los sistemas de arco en serie, puede usarse una sola fuente de potencia de transformador o de cc para alimentar dos electrodos independientes que se introducen en el mismo charco de soldadura. Las terminales de salida de la fuente de potencia se conectan por separado a una de las dos cabezas de soldadura, no al trabajo, de modo que la pieza de trabajo no forma parte del circuito eléctrico. Esto se conoce como *sistema de arco en serie*, y requiere una fuente de potencia con voltaje de circuito abierto elevado.

La soldadura en tándem a alta velocidad generalmente emplea dos cabezas de soldadura independientes que son alimentadas por múltiples unidades de transformador conectadas a una línea trifásica por medio de una conexión de triángulo cerrada o una conexión Scott. Puesto que en la soldadura en tándem es frecuente el uso de corrientes elevadas, estos sistemas distribuyen la carga de potencia en las tres fases.

El sistema de triángulo cerrado requiere tres transformadores con reactores de control de corriente individuales. Los secundarios de los transformadores se conectan en triángulo cerrado adelante de los reactores, como se indica en la figura 1.39. Este sistema contempla el ajuste de las corrientes de soldadura en ambos arcos, la corriente a tierra y el desplazamiento de ángulo

de fase entre las tres corrientes. Es importante ajustar estas condiciones para obtener la desviación de arco (magnéticamente), penetración y perfil de soldadura deseados. Las corrientes de arco no se pueden ajustar independientemente; un cambio en una hará cambiar la otra a causa de los ángulos de fase.

El sistema en conexión Scott emplea dos transformadores. Al menos uno de ellos debe haberse diseñado específicamente para conexión Scott, con los primarios y secundarios conectados como en la figura 1.40. Las unidades deberán tener voltaje de circuito abierto de 85 a 100 V. Este sistema se sobrepone al ajuste de corriente interrelacionado inherente al sistema de triángulo cerrado y ofrece control independiente de las corrientes de arco.

SOLDADURA DE PERNOS POR ARCO

LA SOLDADURA DE pernos por arco (SW) debe realizarse con una fuente de potencia de cc. El proceso requiere mayor capacidad, mejor consistencia de operación y mejor control dinámico de la corriente que lo que puede obtenerse con las fuentes de potencia convencionales. Las características generales deseables en una fuente de potencia para soldadura de pernos por arco son las siguientes:

- (1) Voltaje de circuito abierto alto, del orden de 70 a 100 V.
- (2) Característica volt-ampere de caída, tal que con carga máxima aparezcan entre 25 y 35 V a través del arco.
- (3) Tasa de elevación de corriente rápida.
- (4) Salida de corriente elevada para un ciclo de trabajo relativamente bajo.

Cada uno de los diversos tipos de fuentes de potencia especiales disponibles tiene sus propias características, por lo que es

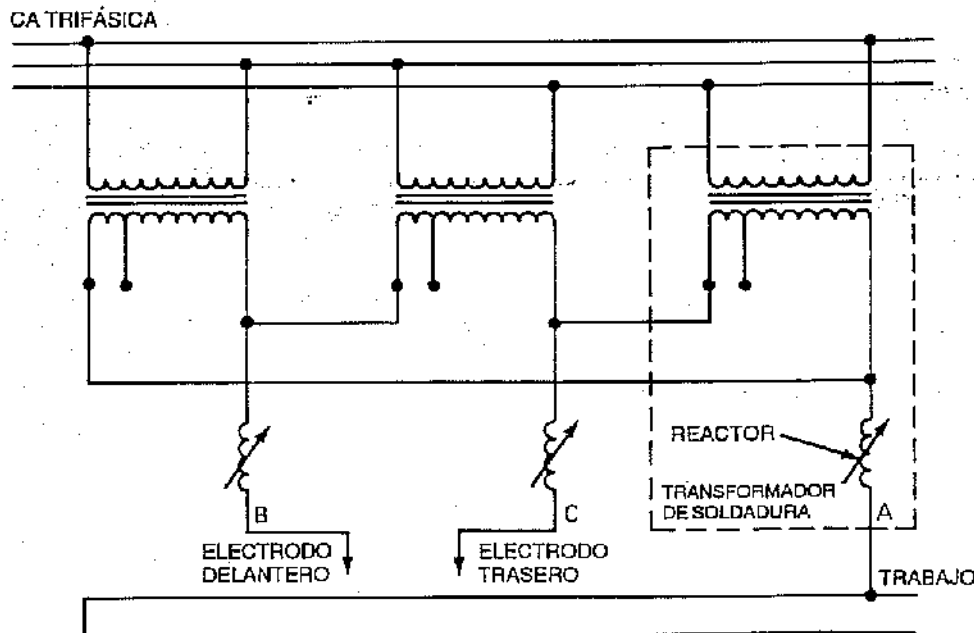


Figura 1.39—Conexiones de transformador para soldadura por arco con un sistema trifásico en triángulo. Este método iguala las cargas en las líneas

difícil comparar estos tipos con otras fuentes de potencia. Un método de comparación podría consistir en evaluar cada fuente de potencia en términos de la salida de corriente y del diámetro de la base de los pernos. La fuente de potencia debe poder suministrar la corriente de soldadura requerida para el tamaño de pernos que se van a soldar.

SOLDADURA ELECTROESCORIA Y ELECTROGÁS

EL EQUIPO EMPLEADO para soldadura electroescoria y electrogás es muy similar al requerido para soldadura por arco sumergido o por arco con núcleo de fundente. Pueden usarse las mismas fuentes de potencia para ambos procesos, con una excepción: no se usan fuentes de potencia de ca en el proceso electrogás. Pueden usarse fuentes tanto de cc como de ca para el proceso electroescoria. Las fuentes de potencia estándar que se empleen para cualquiera de estos procesos deberán tener un voltaje de circuito abierto de 80 V y poder suministrar 600 A continuamente (ciclo de trabajo del 100%), y estar equipadas con controles remotos. El número de fuentes de potencia requeridas dependerá del número de electrodos de soldadura que se empleen para rellenar la unión. Se necesita una fuente de potencia para cada electrodo.

Existen fuentes de potencia de cc de voltaje constante especiales para soldadura electroescoria y electrogás. Las más comunes son del tipo de transformador-rectificador con 74 V en circuito abierto y con especificación de salida de 750 A a 50 V, ciclo de trabajo de 100%. La entrada primaria es trifásica de 60 Hz, 230/460 V.

CA TRIFÁSICA

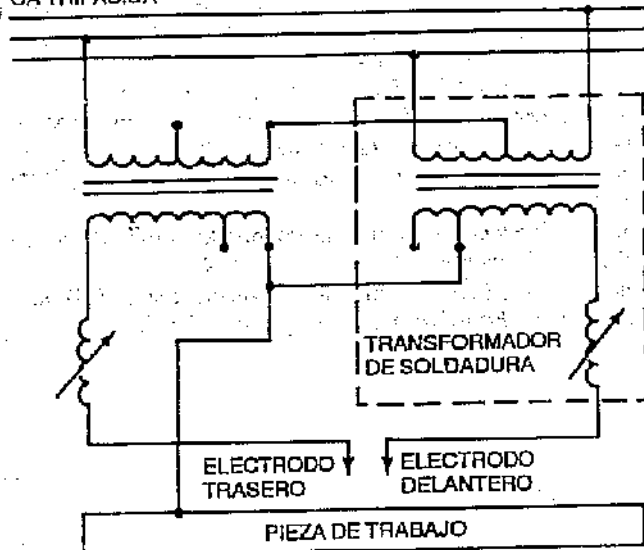


Figura 1.40—Conexiones de transformador para soldadura con arco con un sistema de conexión Scott

LISTA DE LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Amin, M. "Microcomputer control of synergic pulsed MIG welding". Document 166/1981. The Welding Institute, diciembre de 1981.
- Amin, M. y Watkins, P.V.C. "Synergic pulse MIG welding". Document 46. The Welding Institute, agosto de 1977.
- Bailey, K. y Richardson, R. "A microprocessor-based SCR type arc welding power supply". Technical Report 529501-83-14. Columbus, OH: Center for Welding Research.
- Brosilow, R. "The new GMAW power supplies", en *Welding Design and Fabrication* 22-28, junio de 1987.
- Correy, T. B., Atteridge, D. G., Page, R. E. y Wisner, M. C. "Arc starting in gas tungsten arc welding, radio frequency free", en *Welding Journal* 65(2): 33-41, febrero de 1986.
- Cullison, A. y Newton Montiel, B. "Changes are coming for welding power sources", en *Welding Journal* 69(5): 37, mayo de 1990.
- Frederick, J. E., et al. "Solid state remote controlled welding", en *Welding Journal* 57(8): 32-39, agosto de 1978.
- Gasawara, T. O., Maruyama, T., Saito, T., Sato, M., e Hida, Y. "A power source for gas shielded arc welding with new current waveforms", en *Welding Journal* 66(3): 57-63, marzo de 1987.
- Grist, F. J. "Improved, lower cost aluminum welding with solid state power source", en *Welding Journal* 54(5): 348-357; mayo de 1975.
- Grist, F. J., y Armstrong, F. W. "A new AC constant potential power source for heavy plate, deep groove welding", en *Welding Journal* 59(6): 35, junio de 1980.
- Kashima, T. y Yamanaha. "Development of the inverter controlled DC TIG arc welding power source". Document IW-XII-878-85. Inglaterra, International Institute of Welding, junio de 1985.
- Kyselica, S. "High frequency reversing arc switch for plasma arc welding of aluminum", en *Welding Journal* 66(1): 31-35; enero de 1987.
- Lesnewich, A. "MIG welding with pulsed power". Bulletin 170. Nueva York, Welding Research Council, febrero de 1972.
- Lucas, W. "A review of recent advancements in arc welding power sources and welding processes in Japan". Document 199/1982. Abington, U. K.: Welding Institute, noviembre de 1982.
- Malinowski-Brodnicka, M. et al. "Effect of electromagnetic stirring on GTA welds in austenitic stainless steel", en *Welding Journal* 69(2): 525; febrero de 1990.

- Manz, A. F. *Welding power handbook*. Nueva York, Union Carbide Corporation, 1973.
- Needham, J. C. "Review of new designs of power sources for arc welding processes"-Document XII-F-217-80. Inglaterra, International Institute of Welding.
- National Electrical Manufacturers Association. *Electric arc welding power sources*, EW1-1988. National Electrical Manufacturers Association: Washington, 1988.
- Pierre, E. R. *Welding processes and power sources*, 3a. ed., 1985.
- Rankin T. "New power source design breaks with tradition", en *Welding Journal* 69(5): 30, mayo de 1990.
- Schiedermayer, M. "The inverter power source", en *Welding Design and Fabrication*, 30-33, junio de 1987.
- Shira, C. "Converter power supplies more options for arc welding", en *Welding Design and Fabrication*, junio de 1985.
- Spicer, R. A. "Elemental effects on GTA spot weld penetration in cast alloy 718", en *Welding Journal* 69(8): 285s-288s; agosto de 1990.
- Tomsic, M. J., Bathorst, S. E. y Cary, H. B. "Welding of aluminum with variable polarity power". Document No. XII 83984. Inglaterra, International Institute of Welding.
- Villafuerte, J. C. y Kerr, H. W. "Electromagnetic stirring and grain refinement in stainless steel GTA welds", en *Welding Journal* 69(1): 1s; enero de 1990.
- Xiao, Y. H., y Van Ouden G. "A study of GTA weld pool oscillation", en *Welding Journal* 69(8): 289s-293s; agosto de 1990.

SOLDADURA POR ARCO DE METAL PROTEGIDO

PREPARADO POR UN COMITÉ INTEGRADO POR:

D. R. Amos, Presidente
Westinghouse Electric Corp.

D. A. Fink
Lincoln Electric Co.

J. R. Hannahs
Midmark Corporation

R. W. Heid
Newport News Shipbuilding

A. R. Hollins
Duke Power Co.

J. E. Mathers
Welding Consultants Inc.

L. C. Northard*
Tennessee Valley Authority

M. Parekh
Hobart Brothers Co.

A. Pollack
Consultor

M. S. Sierdzinski
Alloy Rods Co.

M. J. Tomsic
Plastronic, Inc.

Fundamentos del proceso

44

Equipo

47

Materiales

52

Aplicaciones

56

Diseño y preparación de las uniones

57

Procedimientos de soldadura

61

Calidad de la soldadura

68

Recomendaciones de seguridad

70

Lista de lecturas complementarias

71

MIEMBRO DEL COMITÉ DEL MANUAL DE SOLDADURA:

D. R. Amos
Westinghouse Electric Corp.

* Fallecido

SOLDADURA POR ARCO DE METAL PROTEGIDO

FUNDAMENTOS DEL PROCESO

DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL

LA SOLDADURA POR arco de metal protegido (*shielded metal arc welding, SMAW*) es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando.

El núcleo del electrodo cubierto consiste en una varilla de metal sólida de material estirado o colado, o bien una varilla fabricada encerrando metal en polvo en una funda metálica. La varilla del núcleo conduce la corriente eléctrica al arco y suministra metal de aporte a la unión. Las funciones principales de la cobertura del electrodo son estabilizar el arco y proteger el metal derretido de la atmósfera por medio de los gases que se crean cuando el recubrimiento se descompone por el calor del arco.

La protección empleada, junto con otros ingredientes de la cobertura y del alambre del núcleo, controlan en gran medida las propiedades mecánicas, la composición química y la estructura metalúrgica del metal de soldadura, así como las características de arco del electrodo. La composición de la cobertura del electrodo varía dependiendo del tipo de electrodo.

PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

LA SOLDADURA POR arco de metal protegido es por mucho el más ampliamente utilizado de los procesos de soldadura por arco. Aprovecha el calor del arco para derretir el metal base y la punta de un electrodo consumible cubierto. El electrodo y el trabajo forman parte de un circuito eléctrico que se ilustra en la figura 2.1. Este circuito comienza con la fuente de potencia eléctrica e incluye los cables de soldadura, un portaelectrodos, una conexión con la pieza de trabajo, la pieza de trabajo (soldamiento) y un electrodo de soldadura por arco. Uno de los dos cables de la fuente de potencia se conecta al trabajo; el otro se conecta al portaelectrodos.

La soldadura se inicia cuando se enciende un arco eléctrico entre la punta del electrodo y el trabajo. El intenso calor del arco derrite la punta del electrodo y la superficie del trabajo cerca del arco. En la punta del electrodo se forman con rapidez pequeños glóbulos de metal fundido, los cuales se transfieren a través del chorro del arco hasta el charco de soldadura fundida.¹ De esta forma se deposita metal de aporte conforme el electrodo se va consumiendo. El arco se mueve sobre el trabajo con una longitud de arco y velocidad de desplazamiento apropiadas, derritiendo y fusionando una porción del metal base y añadiendo continuamente metal de aporte. Puesto que el arco es uno de los más calientes que producen las fuentes de calor comerciales [se han medido temperaturas por encima de 5000°C (9000°F) en su centro], la fusión del metal base se efectúa en forma casi instantánea al iniciarse el arco. Si las soldaduras se hacen en posición plana u horizontal, la transferencia de metal es inducida por la fuerza de la gravedad, la expansión del gas, fuerzas eléctricas y electromagnéticas y la tensión superficial. Si se suelda en otras posiciones, la gravedad actuará oponiéndose a las demás fuerzas.

El proceso requiere suficiente corriente eléctrica para derretir tanto el electrodo como una cantidad adecuada del metal base. También requiere un espacio apropiado entre la punta del electrodo y el metal base o el charco de soldadura. Estos requisitos son necesarios para establecer las condiciones en que se llevará a cabo la coalescencia. Los tamaños y tipos de los electrodos para soldadura por arco de metal protegido definen los requerimientos de voltaje (dentro del intervalo global de 16 a 40 V) y de amperaje (dentro del intervalo global de 20 a 550 A) del arco. La corriente puede ser alterna o continua, dependiendo del electrodo empleado, pero la fuente de potencia debe ser capaz de controlar el nivel de corriente dentro de un intervalo razonable para responder a las complejas variables del proceso de soldadura en sí.

1. La transferencia de metal por el arco de soldadura se describe en el capítulo 2 de *Welding Handbook*, vol. 1, 8ª ed., pp. 50-54.

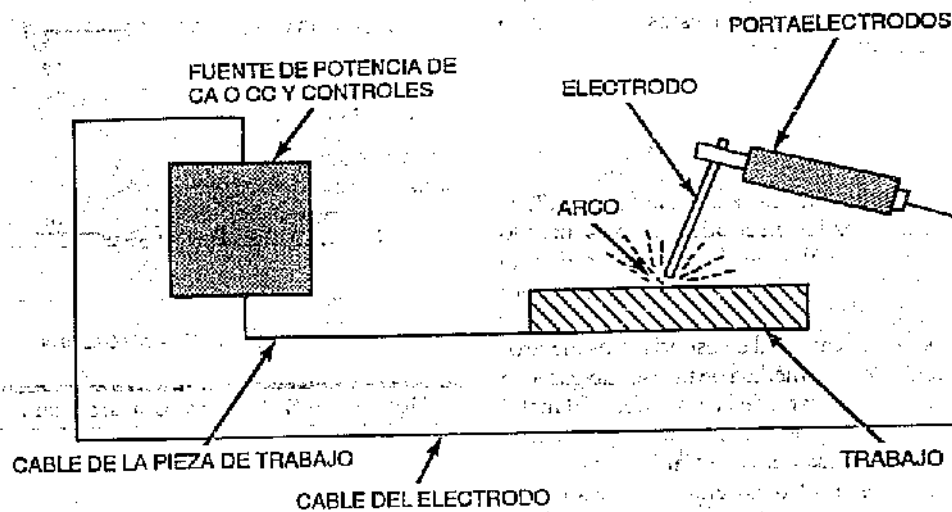


Figura 2.1—Elementos de un circuito de soldadura típico para soldadura por arco de metal protegido

Electrodos cubiertos

ADEMÁS DE ESTABLECER el arco y proporcionar metal de aporte para el depósito de soldadura, el electrodo introduce otros materiales en el arco o sus inmediaciones, o en ambos lugares. Dependiendo del tipo de electrodo que se use, la cobertura desempeña una o más de las siguientes funciones:

- (1) Provee un gas para proteger el arco y evitar una contaminación excesiva del metal de aporte derretido por parte de la atmósfera.
- (2) Suministra limpiadores, desoxidantes y agentes fundentes para purificar la soldadura y evitar un crecimiento excesivo de granos en el metal de soldadura.
- (3) Establece las características eléctricas del electrodo.
- (4) Proporciona un manto de escoria que protege el metal de soldadura caliente del aire y mejora las propiedades mecánicas, la forma de la franja y la limpieza superficial de dicho metal.
- (5) Constituye un medio para añadir elementos de aleación que modifiquen las propiedades mecánicas del metal de soldadura.

Las funciones 1 y 4 evitan la absorción de oxígeno y nitrógeno del aire por parte del metal de aporte derretido en el chorro del arco y del metal de soldadura mientras se solidifica y enfría.

La cobertura de los electrodos para SMAW se aplica por el método de extrusión o bien por el de inmersión. La extrusión se usa con mucha más frecuencia; el proceso de inmersión se usa principalmente para los núcleos de varilla colados y algunos de los fabricados. En todos los casos, la cobertura contiene la mayor parte de los materiales de protección, limpieza y desoxidación. La mayor parte de los electrodos para SMAW tienen un núcleo de metal sólido. Algunos se elaboran con un núcleo fabricado o compuesto formado por metal en polvo encerrado en una funda metálica; en este caso, el propósito de algunos de los polvos

metálicos, o incluso de todos, es producir un depósito de soldadura de aleación.

Además de mejorar las propiedades mecánicas del metal de soldadura, las coberturas de electrodo pueden diseñarse para soldar con corriente alterna (ca). Con ca, el arco de soldadura se apaga y reestablece cada vez que la corriente invierte su dirección. Para que el arco de ca sea estable, es necesario tener en el chorro del arco un gas que permanezca ionizado durante cada inversión de la corriente. Este gas ionizado hace posible la reignición del arco. Los gases fácilmente ionizables pueden obtenerse de diversos compuestos, incluidos los que contienen potasio. La incorporación de tales compuestos en la cobertura del electrodo es lo que permite a éste operar con ca.

A fin de aumentar la tasa de deposición, las coberturas de algunos electrodos de acero de carbono y de baja aleación contienen polvo de hierro, el cual es otra fuente de metal disponible para deposición, además del que se obtiene del núcleo del electrodo. La presencia de polvo de hierro en la cobertura también permite aprovechar de manera más eficiente la energía del arco. A menudo se emplean polvos metálicos distintos del hierro a fin de alterar las propiedades mecánicas del metal de soldadura.

Las coberturas de electrodo gruesas con cantidades relativamente grandes de hierro en polvo incrementan la profundidad del crisol en la punta del electrodo. Este crisol profundo ayuda a contener el calor del arco y permite usar la técnica de arrastre (descrita en el siguiente párrafo) para mantener una longitud de arco constante. Si se añade hierro pulverizado u otros polvos metálicos en cantidades relativamente grandes, la tasa de deposición y la velocidad de soldadura casi siempre se incrementan.

Los electrodos de hierro en polvo con coberturas gruesas reducen la habilidad que se necesita para soldar. La punta del electrodo puede arrastrarse sobre la superficie del trabajo manteniendo todo el tiempo un arco de soldadura. Por esta razón, los

electrodos gruesos con hierro en polvo se conocen también como *electrodos de arrastre*. Las tasas de deposición son altas pero, como la solidificación de la escoria es lenta, estos electrodos no son apropiados para usarse fuera de posición.

Protección del arco

LA ACCIÓN DE protección del arco, ilustrada en la figura 2.2, es en esencia la misma para todos los electrodos, pero el método específico de protección y el volumen de escoria producido varían de un tipo a otro. El grueso de los materiales de cobertura de algunos electrodos se convierte en gas por el calor del arco, y sólo se produce una pequeña cantidad de escoria. Los electrodos de este tipo dependen en buena medida de un escudo gaseoso para evitar la contaminación por parte de la atmósfera. El metal de soldadura de tales electrodos puede identificarse por la capa incompleta o clara de escoria que cubre a la franja.

En los electrodos situados al otro extremo, el grueso de la cobertura se convierte en escoria por el calor del arco, y sólo se produce un volumen pequeño de gas protector. Los diminutos glóbulos de metal que se transfieren por el arco están cubiertos totalmente por una película delgada de escoria fundida, la cual flota a la superficie del charco de soldadura porque es más ligera que el metal. La escoria se solidifica después de hacerlo el metal de soldadura. Las soldaduras hechas con estos electrodos se identifican por los gruesos depósitos de escoria que cubren por completo las franjas de soldadura. Entre estos extremos hay una amplia variedad de tipos de electrodos, cada uno con una combinación diferente de protección por escoria y por gas.

Las variaciones en la proporción de protección por escoria y por gas también influyen en las características de soldadura de los electrodos cubiertos. Los electrodos que producen mucha escoria pueden transportar un amperaje elevado y ofrecen altas tasas de deposición, lo que los hace ideales para soldar piezas gruesas en la posición plana. Los electrodos que producen poca escoria se usan con amperajes menores y ofrecen tasas de deposición más bajas. Estos electrodos producen un charco de soldadura más chico y son apropiados para soldar en cualquier posición. Por las diferencias en las características de soldadura, un tipo de electrodo cubierto será por lo regular el más adecuado para una aplicación dada.

CAPACIDADES Y LIMITACIONES DEL PROCESO

LA SOLDADURA POR arco de metal protegido es uno de los procesos más ampliamente utilizados, sobre todo para soldaduras cortas en trabajos de producción, mantenimiento y reparación, y para construcción en el campo. Las siguientes son ventajas del proceso:

- (1) El equipo es relativamente sencillo, económico y portátil.
- (2) El electrodo cubierto proporciona el metal de aporte y el mecanismo para proteger dicho metal y el metal de soldadura contra una oxidación perjudicial durante la soldadura.

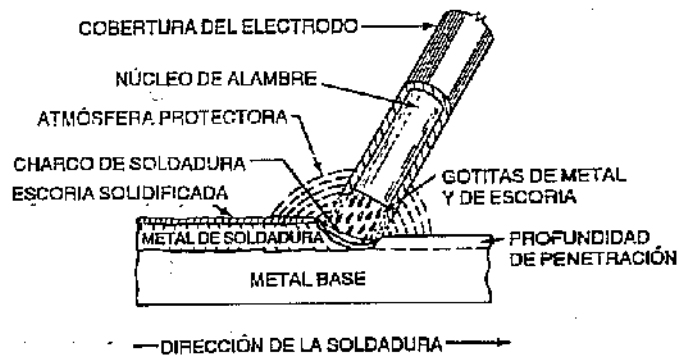


Figura 2.2—Soldadura por arco de metal protegido

- (3) No se requiere protección con gas auxiliar ni un fundente granular.
- (4) El proceso es menos sensible al viento y las corrientes de aire que los procesos de soldadura por arco protegidos con gas.
- (5) Se puede utilizar en áreas de acceso limitado.
- (6) El proceso es adecuado para la mayor parte de los metales y aleaciones de uso común.

Existen electrodos de SMAW para soldar aceros al carbono y de baja aleación, aceros inoxidable, hierro colado, cobre y níquel y sus aleaciones, y para algunas aplicaciones de aluminio. Los metales de bajo punto de fusión, como el plomo, el estaño y el cinc, y sus aleaciones, no se sueldan con SMAW porque el intenso calor del arco es demasiado para ellos. El proceso no es apropiado para metales reactivos como el titanio, zirconio, tantalio y colombio porque la protección es insuficiente para evitar que la soldadura se contamine con oxígeno.

Los electrodos cubiertos se producen en longitudes de 230 a 460 mm (9 a 18 pulg.). Al encenderse inicialmente el arco, la corriente fluye a lo largo de todo el electrodo; por tanto, la cantidad de corriente que puede aprovecharse está limitada por la resistencia eléctrica del alambre del núcleo. Un amperaje excesivo sobrecalienta el electrodo y descompone su cobertura. Esto, a su vez, altera las características del arco y de la protección que se obtiene. Por esta limitación, las tasas de deposición suelen ser más bajas que con un proceso como GMAW.

El ciclo de trabajo del operador y las tasas de deposición globales para los electrodos cubiertos suelen ser menores que los alcanzables con un proceso de electrodo continuo como FCAW. Esto se debe a que los electrodos sólo pueden consumirse hasta una cierta longitud mínima. Una vez alcanzada esa longitud, el soldador deberá desechar la cola de electrodo no consumida e insertar un electrodo nuevo en el portaelectrodos. Además, casi siempre debe eliminarse escoria en los puntos donde se inicia y se detiene, y antes de depositar una franja de soldadura junto a otra previamente depositada, o sobre ella.

EQUIPO

FUENTES DE POTENCIA

Tipo de corriente de salida

SE PUEDE USAR corriente alterna (ca) o bien continua (cc) para la soldadura por arco de metal protegido, dependiendo de la corriente suministrada por la fuente de potencia y del electrodo escogido. El tipo específico de corriente utilizada influye en el rendimiento del electrodo. Ambos tipos de corriente tienen ventajas y limitaciones, y éstas deben considerarse al seleccionar el tipo de corriente para una aplicación específica. Los factores que deben tenerse en cuenta son los siguientes:

Caída de voltaje. La caída de voltaje en los cables de soldadura es menor si se usa ca. Esto hace a la corriente alterna más apropiada cuando la soldadura debe efectuarse a cierta distancia de la fuente de potencia. Sin embargo, los cables largos que transportan ca no deben enrollarse porque las pérdidas inductivas que ocurren en tales casos pueden ser considerables.

Baja corriente. Si los electrodos son de diámetro pequeño y baja corriente de soldadura, la corriente continua ofrece mejores características de operación y un arco más estable.

Inicio del arco. En general, es más fácil encender el arco con cc, sobre todo si se usan electrodos de diámetro pequeño. Con ca, la corriente de soldadura para por cero cada medio ciclo, y esto presenta problemas para el inicio y la estabilidad del arco.

Longitud del arco. La soldadura con arco corto (bajo voltaje de arco) es más fácil con cc que con ca. Esto es una consideración importante, excepto cuando se usan electrodos gruesos de hierro en polvo, pues en estos casos el profundo crisol formado por la cobertura gruesa mantiene automáticamente la longitud de arco correcta cuando la punta del electrodo se arrastra sobre la superficie de la unión.

Golpe del arco. La corriente alterna pocas veces presenta problemas de golpe del arco porque el campo magnético se está invirtiendo constantemente (120 veces por segundo). El golpe de arco puede ser un problema significativo cuando se suelda acero ferrítico con cc a causa de los campos magnéticos desequilibrados que rodean al arco.²

Posición de soldadura. La corriente continua es un poco mejor que la alterna para soldaduras verticales o por encima de la cabeza porque permite usar un amperaje menor. Sin embargo, si se emplean los electrodos apropiados, es posible hacer soldaduras satisfactorias con ca en todas las posiciones.

Espesor del metal. Se puede soldar tanto metal laminado como secciones gruesas empleando cc. La soldadura de lámina metálica con ca es menos recomendable que con cc. Las condiciones del arco en los niveles de corriente bajos requeridos para materiales delgados son menos estables cuando se usa potencia ca que cuando se usa cc.

Un análisis de la aplicación de soldadura generalmente indicará si lo más adecuado es usar corriente alterna o continua. Hay fuentes de potencia de cc, ca o ca/dc combinadas. La fuente de potencia para el proceso SMAW debe ser del tipo de corriente constante, de preferencia sobre el de voltaje constante, porque para el soldador es difícil mantener la longitud de arco constante que requieren las fuentes de potencia de voltaje constante.

Importancia de la curva volt-ampere

LA FIGURA 2.3 muestra las características de salida volt-ampere típicas de las fuentes de potencia tanto de ca como de cc. Las fuentes de voltaje constante no son apropiadas para SMAW porque con su curva volt-ampere plana un cambio aunque sea pequeño en la longitud del arco (voltaje) produce un cambio relativamente grande en el amperaje. Las fuentes de potencia de corriente constante son preferibles para la soldadura manual, porque cuanto mayor sea la pendiente de la curva volt-ampere (dentro del intervalo de soldadura), menor será el cambio en la corriente para un cambio dado en el voltaje del arco (longitud del arco).

En aplicaciones en las que se usan electrodos de diámetro grande y corrientes de soldadura elevadas, es deseable una curva volt-ampere empinada.

Si se requiere un control más preciso del tamaño del charco de soldadura (soldaduras fuera de posición y repasos de raíz en uniones con embonamiento variable, por ejemplo), es más conveniente una curva volt-ampere más plana que permita al soldador variar la corriente de soldadura dentro de un intervalo específico con sólo modificar la longitud del arco. De esta manera, el soldador tiene cierto control sobre la cantidad de metal de aporte que se deposita. La figura 2.4 presenta estas distintas curvas volt-ampere para una fuente de potencia de soldadura típica. Aunque la diferencia en la pendiente de las diversas curvas es sustancial, la fuente de potencia se sigue considerando de corriente constante. Los cambios que se muestran en la curva volt-ampere se logran ajustando los niveles tanto de voltaje de circuito abierto como de corriente en la fuente de potencia.

Voltaje de circuito abierto

EL VOLTAJE DE circuito abierto, que es el voltaje establecido en la fuente de potencia, no se refiere al voltaje del arco. Este último es el voltaje que hay entre el electrodo y el trabajo cuando se está soldando, y depende de la longitud del arco para un electrodo determinado. En cambio, el voltaje de circuito abierto es el que genera la máquina soldadora cuando no se está soldando. Los voltajes de circuito abierto generalmente están entre 50 y

2. La influencia de campos magnéticos en el arco y el golpe del arco es estudiado en el capítulo 2 de *Welding Handbook*, vol. 1, 8ª ed., pp. 47-49

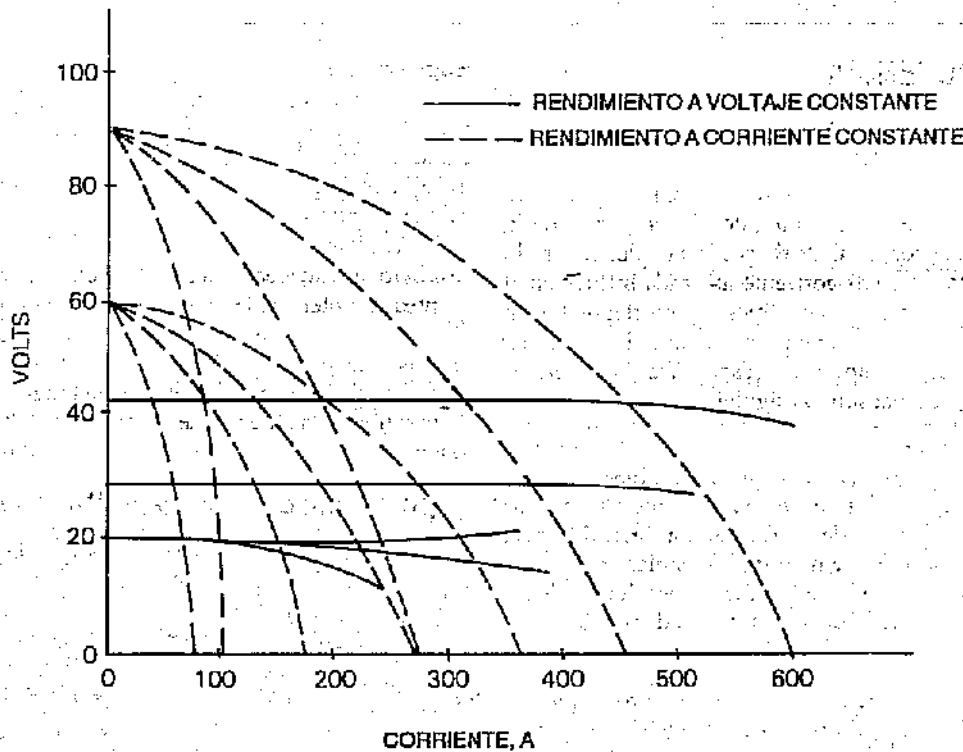


Figura 2.3—Curvas volt-amperes típicas para fuentes de potencia de corriente constante y de voltaje constante

100 V, en tanto que los voltajes de arco varían entre 17 y 40 V. El voltaje de circuito abierto cae hasta el voltaje de arco cuando se enciende el arco y la máquina se somete a la carga de soldadura. La longitud del arco y el tipo de electrodo empleado determinan el valor de este voltaje: si el arco se alarga, el voltaje de arco aumenta y la corriente de soldadura disminuye. El cambio en el amperaje producido por un cambio en la longitud del arco está determinado por la pendiente de la curva volt-amperes dentro del intervalo de soldadura.

Algunas fuentes de potencia no permiten controlar el voltaje de circuito abierto porque esto no es necesario para todos los procesos de soldadura. Es una función útil para SMAW, pero no se necesita para todas las aplicaciones del proceso.

Selección de la fuente de potencia

SON VARIOS LOS factores a considerar cuando se selecciona una fuente de potencia para SMAW:

- (1) El tipo de corriente de soldadura requerida.
- (2) El intervalo de amperaje requerido.
- (3) Las posiciones en que se soldará.
- (4) La potencia primaria disponible en la estación de trabajo.

La selección del tipo de corriente, ca, cc o ambas, dependerá en gran medida en los tipos de electrodos que se usarán y de los tipos de soldadura que se realizarán. Para ca, puede usarse una fuente de potencia del tipo de transformador o de alternador; para cc se dispone de fuentes de transformador-rectificador o de motor-generador. Si se necesita tanto ca como cc, puede usarse una fuente monofásica de transformador-rectificador o de alternador-rectificador. Si no, se necesitarán dos máquinas soldadoras, una para ca y otra para cc.

Los requerimientos de amperaje dependerán de los tamaños y tipos de electrodos que se usarán. Si la variedad es amplia, la fuente de potencia debe ser capaz de suministrar el intervalo de amperaje requerido. El ciclo de trabajo debe ser suficiente.³

También hay que considerar las posiciones en que se soldará. Si se planea soldar en posición vertical o por encima de la cabeza, probablemente será conveniente ajustar la pendiente de la curva volt-amperes (véase la figura 2.4). Si es así, la fuente de potencia deberá incluir esta función. Para esto por lo regular se necesitan controles tanto del voltaje como de la corriente de salida.

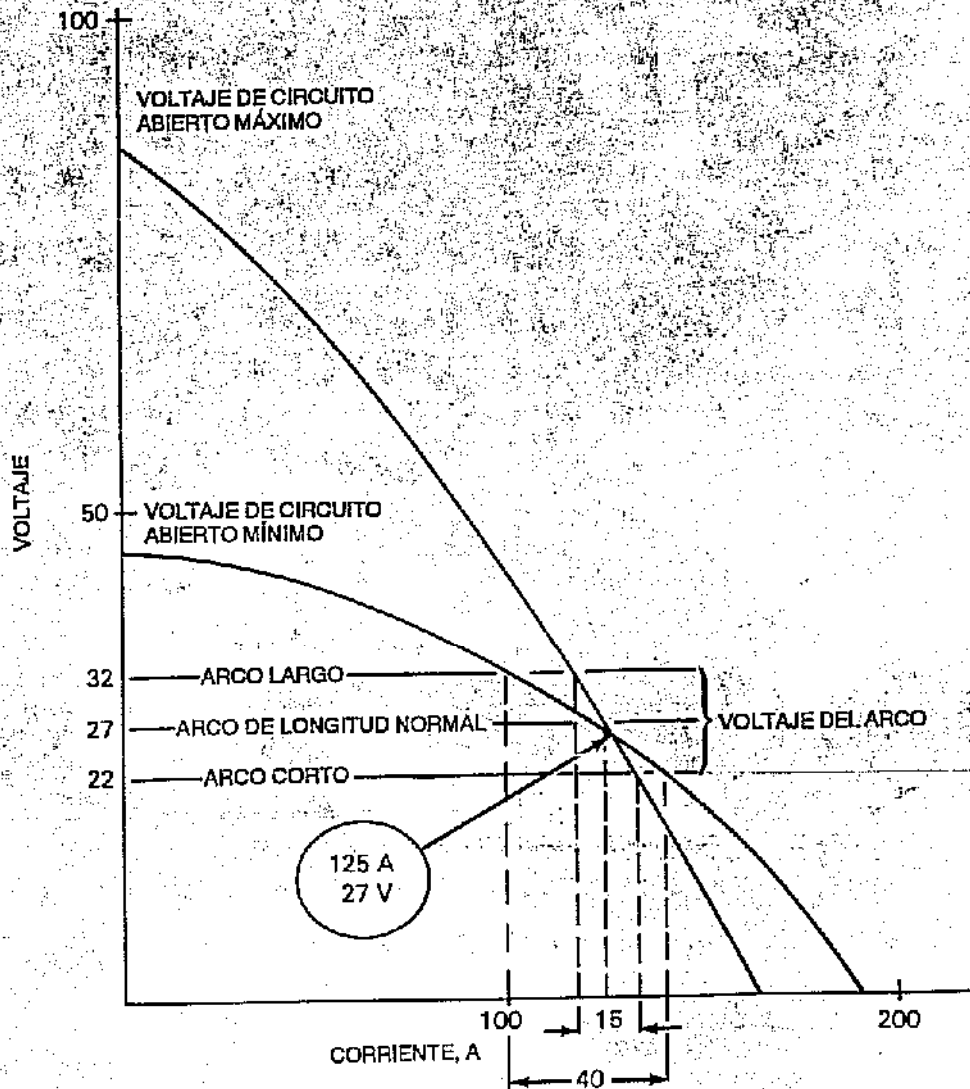
3. En el capítulo 1, págs. 14-15, se da una explicación del ciclo de trabajo.

Se requiere una fuente de potencia primaria. Si se dispone de potencia de línea, deberá averiguarse si es monofásica o trifásica. La fuente de potencia para soldadura debe estar diseñada para potencia monofásica o trifásica, y deberá usarse con la potencia para la cual fue diseñada. Si no hay potencia de línea disponible, será necesario usar un generador o alternador impulsado por motor.

EQUIPO ACCESORIO

Portaelectrodos

UN PORTAELECTRODOS ES un dispositivo de sujeción que permite al soldador sostener y controlar el electrodo, como se muestra



NOTA: UNA PENDIENTE MENOR PRODUCE UN CAMBIO MAYOR EN LA CORRIENTE DE SOLDADURA PARA UN CAMBIO DADO EN EL VOLTAJE DEL ARCO.

Figura 2.4-Efecto de la pendiente de la curva volt-amper sobre la salida de corriente con un cambio en el voltaje del arco



Figura 2.5—Soldadura de una estructura con el proceso de arco de metal protegido

en la figura 2.5. También sirve como medio para conducir la corriente de soldadura del cable al electrodo. Un mango aislado en el portaelectrodos separa la mano del soldador del circuito de soldadura. La corriente se transfiere al electrodo a través de las quijadas del portaelectrodos. A fin de asegurar una resistencia de contacto mínima y evitar el sobrecalentamiento del portaelectrodos, las quijadas deben mantenerse en buenas condiciones. El sobrecalentamiento del portaelectrodos no sólo es una molestia para el soldador, sino que también puede causar una caída de voltaje excesiva en el circuito de soldadura. Ambas cosas pueden perjudicar el desempeño del soldador y reducir la calidad de la soldadura.

El portaelectrodos debe sujetar el electrodo firmemente y mantenerlo en posición con un buen contacto eléctrico. La instalación del electrodo debe ser rápida y fácil. El portaelectrodos debe ser ligero y fácil de manipular, pero lo bastante robusto como para resistir un uso tosco. La mayor parte de los portaelectrodos tiene material aislante alrededor de las quijadas para evitar que éstas hagan tierra con el trabajo.

Los portaelectrodos se producen en tamaños apropiados para un intervalo de diámetros de electrodo estándar. Cada tamaño de portaelectrodos está diseñado para transportar la corriente requerida para el electrodo de mayor diámetro que puede sostener. El mejor portaelectrodos para un trabajo dado es el de menor tamaño que puede usarse sin sobrecalentamiento; será el más ligero y el más cómodo de usar para el operador.

Conexión con la pieza de trabajo

LA CONEXIÓN CON la pieza de trabajo es un dispositivo para conectar el cable de pieza de trabajo a ésta. Debe producir una conexión fuerte, pero al mismo tiempo debe poderse sujetar con rapidez y facilidad al trabajo. Para trabajo ligero puede ser apropiada una pinza tensada con resorte, pero para corrientes elevadas puede requerirse una abrazadera de tornillo para establecer una buena conexión sin sobrecalentar la abrazadera.

Cables para soldadura

LOS CABLES PARA soldadura sirven para conectar el portaelectrodos y la abrazadera de tierra a la fuente de potencia; son parte del circuito de soldadura (véase la figura 2.1). El cable se construye de modo que tenga flexibilidad máxima para facilitar su manipulación, sobre todo el que se conecta al portaelectrodos; también debe ser resistente al desgaste y a la abrasión.

El cable para soldadura consiste en muchos alambres finos de cobre o aluminio trenzados y encerrados en una funda aislante flexible. La funda se fabrica con hule sintético o un plástico que tenga buena tenacidad, elevada resistencia eléctrica y buena resistencia térmica. Se coloca una envoltura protectora entre los alambres conductores trenzados y la funda aislante para permitir un poco de movimiento entre ellos y así aumentar al máximo la flexibilidad.

Los cables para soldadura se producen en una gama de tamaños (desde aproximadamente AWG 6 a 4/0).⁴ El tamaño del cable requerido para una aplicación en particular depende del amperaje máximo que se usará para soldar, de la longitud del circuito de soldadura (combinación de los cables de soldadura y de la pieza de trabajo) y del ciclo de trabajo de la máquina soldadora. La tabla 2.1 muestra el tamaño recomendado para cable de cobre conectado a diversas fuentes de potencia y con diferentes longitudes del circuito. Si se usa cable de aluminio, deberá ser dos tamaños AWG mayor que el cable de cobre para la aplicación. Los tamaños de cable se incrementan al aumentar la longitud del circuito de soldadura a fin de mantener la caída de voltaje y la consiguiente pérdida de potencia en el cable en niveles aceptables.

Si se necesitan cables largos, es posible unir tramos cortos por medio de conectores apropiados. Los conectores deben establecer un buen contacto eléctrico de baja resistencia, y su aislamiento debe ser equivalente al del cable. Se emplean orejetas en el extremo de cada cable para conectarlo a la fuente de potencia. La conexión entre el cable y un conector u orejeta debe ser fuerte y de baja resistencia eléctrica; para ello se emplean

4. Tamaños de calibre de alambre americano (american wire gage).

Tabla 2.1
Tamaños recomendados para cable de soldadura de cobre

Fuente de potencia		Tamaño de cable AWG para el tramo combinado de cables de electrodo y tierra				
Tamaño en amperes	Ciclo de trabajo, %	0 a 15 m (0 a 50 pies)	15 a 30 m (50 a 100 pies)	30 a 45 m (100 a 150 pies)	45 a 61 m (150 a 200 pies)	61 a 76 m (200 a 250 pies)
100	20	6	4	3	2	1
180	20-30	4	4	3	2	1
200	60	2	2	2	1	1/0
200	50	3	3	2	1	1/0
250	30	3	3	2	1	1/0
300	60	1/0	1/0	1/0	2/0	3/0
400	60	2/0	2/0	2/0	3/0	4/0
500	60	2/0	2/0	3/0	3/0	4/0
600	60	2/0	2/0	3/0	4/0	*

* Usar dos cables 3/0 en paralelo.

uniones de soldadura blanda y conexiones mecánicas. Los cables de aluminio requieren una buena conexión mecánica para evitar el sobrecalentamiento. La oxidación del aluminio aumenta apreciablemente la resistencia eléctrica de la conexión. Esto, desde luego, puede causar sobrecalentamiento, excesiva pérdida de potencia y falla del cable.

Debe cuidarse de no dañar la funda del cable, sobre todo el del electrodo. El contacto con metal caliente o bordes filosos puede perforar la funda y aterrizar el cable.

Careta

EL PROPÓSITO DE la careta es proteger los ojos, el rostro, la frente, el cuello y las orejas del soldador de los rayos directos del arco y de chispas y salpicaduras que salen despedidas. Algunas caretas tienen una visera articulada opcional que permite levantar la placa de filtro oscura que cubre la abertura de la careta para que el soldador pueda ver al raspar la escoria de la soldadura. Esto protege la cara y los ojos del operador de las partículas de escoria que salen despedidas. Estas partículas pueden causar daños serios, sobre todo si están calientes, y pueden lastimar los ojos sea que estén calientes o frías.

Las caretas generalmente se construyen con un material aislante de fibra comprimida o fibra de vidrio. La careta debe ser ligera y diseñarse de modo que sea lo más cómoda posible para el usuario. El soldador de la figura 2.5 está usando careta; el observador está usando un escudo de mano.

Equipo diverso

LA LIMPIEZA AL soldar es importante. Las superficies de las piezas de trabajo y el metal de soldadura previamente depositado deben estar libres de suciedad, escoria y cualquier otro material extraño que pudiera interferir con la soldadura. Para este fin, el soldador debe contar con un cepillo de alambre de acero, un martillo, un cincel y un mazo para descascarar. Estas herramientas sirven para eliminar suciedad y orín del metal base, cortar soldaduras provisionales y raspar escoria de la franja de soldadura.

La unión que se va a soldar puede requerir respaldo para sostener el charco de soldadura durante la deposición de la primera capa de metal de soldadura. A veces se usan tiras de materiales de respaldo no metálicos, sobre todo para uniones que sólo son accesibles por un lado.

MATERIALES

METALES BASE

EL PROCESO SMAW se usa para aplicaciones de unión y recubrimiento sobre diversos metales base. La idoneidad del proceso para un metal base específico depende de la disponibilidad de un electrodo cubierto cuyo metal de aporte tenga la composición y propiedades requeridas. Hay electrodos para los siguientes metales base:

- (1) Aceros al carbono.
- (2) Aceros de baja aleación.
- (3) Aceros resistentes a la corrosión.
- (4) Hierros colados (dúctiles y grises).
- (5) Aluminio y aleaciones de aluminio.
- (6) Cobre y aleaciones de cobre.
- (7) Níquel y aleaciones de níquel.

Se dispone de electrodos para la aplicación a estos mismos metales de recubrimientos resistentes al desgaste, el impacto o la corrosión.

ELECTRODOS CUBIERTOS

LOS ELECTRODOS CUBIERTOS se clasifican de acuerdo con los requisitos de especificaciones emitidas por la American Welding Society. Ciertas agencias del Departamento de la Defensa de Estados Unidos también emiten especificaciones para los electrodos cubiertos. Los números de especificación de la AWS y las clasificaciones de electrodos correspondientes se dan en la tabla 2.2. Los electrodos se clasifican con base en la composición química o en las propiedades mecánicas, o ambas cosas, de su

metal de soldadura sin diluir. Los electrodos de acero al carbono, acero de baja aleación y acero inoxidable también se clasifican de acuerdo con el tipo de corriente de soldadura con la que trabajan mejor, y en ocasiones de acuerdo con las posiciones de soldadura en las que pueden emplearse.

Electrodos de acero al carbono

EN ANSI/AWS A5.1, *Especificación para electrodos de acero al carbono para soldadura por arco*, se usa un sencillo sistema de numeración para clasificar los electrodos. En E6010, por ejemplo, la E designa a un electrodo. Los dos primeros dígitos (60) indican la resistencia a la tensión mínima del metal de soldadura sin diluir en ksi, en la condición "recién soldada". El tercer dígito representa la posición de soldadura (en este caso, el 1 se refiere

Tabla 2.2
Especificaciones de la AWS para electrodos cubiertos

Tipo de electrodo	Especificación de la AWS
Acero al carbono	A5.1
Acero de baja aleación	A5.5
Acero resistente a la corrosión	A5.4
Hierro colado	A5.15
Aluminio y aleaciones de aluminio	A5.3
Cobre y aleaciones de cobre	A5.6
Níquel y aleaciones de níquel	A5.11
Recubrimiento	A5.13 y A5.21

sin diluir en ksi, en la condición "recién soldada". El tercer dígito representa la posición de soldadura (en este caso, el 1 se refiere a todas las posiciones). El último dígito se refiere al tipo de cobertura y al tipo de corriente con la que puede usarse el electrodo.

Los electrodos de acero al carbono tienen dos niveles de resistencia mecánica: la serie 60 y la serie 70. La resistencia a la tensión mínima permisible para el metal de soldadura de la serie 60 es de 62 ksi (427 MPa), aunque un alargamiento adicional puede permitir que algunos de éstos bajen hasta 60 ksi (414 MPa). Para la serie 70, es 72 ksi (496 MPa) y, una vez más, algunos de éstos pueden bajar hasta 70 ksi (483 MPa) con alargamiento adicional. En cuanto a la composición química, los límites superiores para los elementos significativos se dan dentro de las especificaciones AWS aplicables a la mayor parte de las clasificaciones de electrodos. Para algunos electrodos de ambas series se dan los requisitos de prueba de impacto Charpy con muesca en "V".

Algunos electrodos de acero al carbono están diseñados para operar sólo con cc; otros operan tanto con cc como con ca. La polaridad en cc por lo regular es inversa (electrodo positivo), aunque algunos electrodos están hechos para polaridad directa, y otros más pueden usarse con cualquier polaridad.

La mayor parte de los electrodos está diseñada para soldar en todas las posiciones. Sin embargo, los que contienen grandes cantidades de hierro en polvo u óxido de hierro en el recubrimiento generalmente están restringidos a soldaduras de surco en la posición plana y a soldaduras de filete horizontales. Las coberturas de estos electrodos son muy gruesas, lo que impide su uso en las posiciones vertical y arriba de la cabeza.

Varios electrodos de la serie 70 son del tipo de bajo hidrógeno. Sus recubrimientos tienen ingredientes con bajo contenido de humedad y de celulosa y, por tanto, de hidrógeno. El hidrógeno produce la baja ductilidad y el agrietamiento de la franja inferior que en ocasiones se observan en soldaduras muy restringidas. Por esta razón, los electrodos de bajo hidrógeno se usan para soldar aceros endurecibles; también se usan para soldar aceros de bajo azufre y para aportar metal de soldadura con buena tenacidad de muesca a baja temperatura.

La especificación no fija un límite para el contenido de humedad de estos electrodos, pero se recomienda que sea menor que el 0.6%. Para controlar la humedad es necesario un almacenamiento y manejo correctos; las condiciones de almacenamiento y cocimiento típicas se dan en ANSI/AWS A5.1

Electrodos de acero de baja aleación

ANSI/AWS A5.5, POR excepción especificación para electrodos de acero de baja aleación para soldadura por arco, clasifica los electrodos de acero de baja aleación cubiertos de acuerdo con un sistema de numeración similar al que acaba de describirse para los electrodos de acero al carbono. Además, esta especificación emplea un sufijo como A1 para designar la composición química (sistema de aleación) del metal de soldadura. Así, una clasificación de electrodo completa es E7010-A1; otra es E8016-C2. Los sistemas de aleación a los que pertenecen los electrodos son acero al carbono-molibdeno, acero al cromo-molibdeno, acero al níquel y acero al manganeso-molibdeno. Los niveles de resistencia mecánica del metal de soldadura van desde 70 hasta

120 ksi (480 a 830 MPa) de resistencia a la tensión mínima, en incrementos de 10 ksi (70 MPa). En esta especificación, los metales de soldadura de uso común que no suelen recibir tratamiento posterior se clasifican con base en sus propiedades en la condición "recién soldada". De manera similar, los que normalmente se usan en la condición de tensiones liberadas se clasifican con base en las propiedades que tienen después de un tratamiento térmico para liberar las tensiones.

En este respecto, cabe señalar que la liberación de tensiones que prescribe ANSI/AWS A5.5 consiste en mantener el ensamble de prueba a la temperatura indicada durante una hora. Los fabricantes que usen tiempos de retención a temperatura significativamente mayores o menores que una hora tal vez tengan que ser más selectivos en cuanto a los electrodos que usan, y quizá tengan que efectuar pruebas para demostrar que las propiedades mecánicas del metal de soldadura escogido son adecuadas después de un tratamiento térmico de cierta duración y a cierta temperatura. En muchas clasificaciones de electrodos para SMAW se incluyen normas radiográficas de calidad para metal de soldadura depositado y requisitos de tenacidad de muesca.

Las especificaciones militares para electrodos de acero de baja aleación a veces usan designaciones similares a las de la especificación de la AWS. Además, se producen algunos electrodos que no están clasificados en las especificaciones de la AWS pero que están diseñados para materiales específicos o que corresponden a grandes rasgos a las composiciones AISI estándar para metal base de acero de baja aleación, como 4130. La especificación A5.5 fija límites para el contenido de humedad de los electrodos de bajo hidrógeno empacados en recipientes sellados herméticamente. Estos límites van desde 0.2 hasta 0.6% en peso, dependiendo de la clasificación del electrodo. Cuanto mayor sea el nivel de resistencia mecánica, más bajo será el límite del contenido de humedad. Esto es porque la humedad es una fuente primaria de hidrógeno, y el hidrógeno puede producir agrietamiento en la mayor parte de los aceros de baja aleación si no se emplea precalentamiento a temperatura elevada y ciclos de enfriamiento largos y lentos. Cuanto mayor sea la resistencia mecánica de la soldadura y del metal base, mayor será la necesidad de niveles bajos de humedad para evitar el agrietamiento. La exposición a entornos húmedos (70% de humedad relativa o más) puede elevar el contenido de humedad del electrodo en unas cuantas horas.

Electrodos de acero resistente a la corrosión

LOS ELECTRODOS CUBIERTOS para soldar aceros resistentes a la corrosión se clasifican en ANSI/AWS A5.4, *Especificación para electrodos de acero al cromo y al cromo-níquel, resistentes a la corrosión, cubiertos, para soldadura*. La clasificación dentro de esta especificación se basa en la composición química del metal de soldadura sin diluir, las posiciones de soldadura y el tipo de corriente con la que se recomienda usar los electrodos. El sistema de clasificación es similar al de los electrodos de acero al carbono y de baja aleación. Tomando E310-15 y E310-16 como ejemplos, el prefijo E indica un electrodo. Los tres primeros dígitos se refieren al tipo de aleación (en cuanto a su composición química), y pueden ir seguidos de una o más letras que indiquen una modificación, como E310Mo-15. Los últimos dos dígitos se refieren a la posición de soldadura y al tipo de

corriente para la que son apropiados los electrodos. El -1 indica que los electrodos pueden usarse en todas las posiciones hasta diámetros de 4 mm (5/32 pulg). El número 5 indica que los electrodos están hechos para usarse con ccep (polaridad directa). El número 6 significa que los electrodos son apropiados tanto para ca como para ccep (polaridad directa). Los electrodos de más de 4 mm (5/32 pulg) de diámetro se usan en las posiciones plana y horizontal.

La especificación no describe los ingredientes de la cobertura, pero las coberturas -15 por lo regular contienen una proporción elevada de piedra caliza (carbonato de calcio). Este ingrediente suministra el CO y CO₂ que sirven para proteger el arco. El aglutinante que mantiene unidos los ingredientes en este caso es silicato de sodio. La cobertura -16 también contiene piedra caliza para protección del arco, pero además suele contener bastante titanio (dióxido de titanio) para mejorar la estabilidad del arco. El aglutinante en este caso probablemente será silicato de potasio.

Las diferencias en las proporciones de estos ingredientes producen diferencias en las características del arco. Los electrodos 15 (coberturas tipo cal) tienden a producir un arco más penetrante y una franja más convexa y con ondulaciones más pronunciadas. La escoria se solidifica con relativa rapidez, por lo muchos los prefieren para trabajos fuera de posición, como la soldadura de tuberías. Por otro lado, las coberturas -16 (tipo titanio) producen un arco más uniforme, menos salpicaduras y una franja más uniforme con ondulaciones más finas. La escoria, empero, es más fluida y el electrodo suele ser más difícil de manejar en trabajos fuera de posición.

Los aceros inoxidable pueden dividirse en tres tipos básicos: austeníticos, martensíticos y ferríticos. El grupo austenítico (2XX y 3XX) es, por mucho, el más grande. Normalmente, la composición del metal de soldadura de un electrodo de acero inoxidable es similar a la del metal base para el que fue diseñado el electrodo.

En el caso de los aceros inoxidable austeníticos, la composición del metal de soldadura difiere un poco de la del metal base con el fin de producir un depósito de soldadura que contenga ferrita (esto es, que no sea del todo austenítico) para evitar fisuras o agrietamiento en caliente del metal de soldadura. La cantidad de ferrita común a los diversos electrodos para soldadura se analiza en ANSI/AWS A5.4 con cierto detalle. En general, basta un contenido de ferrita dentro del intervalo de número de ferrita (FN) de 3 a 5 para evitar el agrietamiento. Un contenido de ferrita tan alto como 20 FN puede ser aceptable para algunas soldaduras a las que no se aplica tratamiento térmico posterior. El diagrama de Schaeffler, o la modificación de DeLong de una porción de ese diagrama, puede servir para predecir el contenido de ferrita de los metales de soldadura de acero inoxidable. Existen instrumentos magnéticos para medir directamente el contenido de ferrita del metal de soldadura depositado. (Véase ANSI/AWS A4.2, *Procedimientos estándar de calibración de instrumentos magnéticos para medir el contenido de delta ferrita de metal de soldadura de acero inoxidable austenítico.*)

Ciertos metales de soldadura de acero inoxidable austenítico (los tipos 310, 320 y 330, por ejemplo) no forman ferrita porque su contenido de níquel es demasiado elevado. En estos materiales se limita el contenido de fósforo, azufre y silicio, o se aumenta el contenido de carbono, a fin de minimizar las fisuras y el agrietamiento.

También pueden usarse procedimientos de soldadura apropiados para reducir las fisuras y el agrietamiento. Por ejemplo, un bajo amperaje resulta benéfico. También puede ser útil un ligero movimiento zigzagueante al soldar, con el fin de promover el crecimiento celular del grano. Se recomienda seguir los procedimientos adecuados al apagar el arco, a fin de evitar las grietas de cráter.

ANSI/AWS A5.4 contiene dos clasificaciones para los electrodos cubiertos de aceros inoxidable al cromo puro (serie 4XX). Una prescribe del 11 al 13.5% de cromo; la otra, de 15 a 18%. El contenido de carbono en ambas es 0.1% como máximo. Los metales de soldadura de las dos clasificaciones se endurecen en aire, y las piezas soldadas con ellos requieren precalentamiento y tratamiento térmico posterior para adquirir la ductilidad que se necesita en la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería.

La especificación también contiene tres clasificaciones de electrodos que se usan para soldar aceros al cromo-molibdeno de 4 a 10%. Estos materiales también se endurecen al aire, y se requiere precalentamiento y tratamiento térmico posterior para obtener uniones firmes y útiles.

Electrodos de níquel y aleaciones de níquel

LOS ELECTRODOS CUBIERTOS para soldar por SMAW níquel y sus aleaciones tienen composiciones que en general se asemejan a las de los metales base que unen, y algunos tienen adiciones de elementos como titanio, manganeso y cobalto para desoxidar el metal de soldadura y evitar el agrietamiento.

ANSI/AWS A5.11, *Especificación para electrodos cubiertos para soldar níquel y aleación de níquel*, clasifica los electrodos en grupos de acuerdo con sus elementos de aleación principales. La letra "E" al principio indica un electrodo, y el símbolo químico "Ni" identifica los metales de soldadura como aleaciones con base de níquel. Se agregan otros símbolos químicos para indicar los elementos de aleación principales, seguidos por números sucesivos que identifican cada clasificación dentro de su grupo. Por ejemplo, ENiCrFe-1 contiene bastante hierro y cromo además del níquel.

La mayor parte de los electrodos está diseñada para usarse con ccep (polaridad directa), aunque algunos también pueden operar con ca para sobreponerse a posibles problemas de golpe del arco (por ejemplo, cuando se suelda acero con 9% de níquel). Casi todos los electrodos pueden usarse en cualquier posición, pero los mejores resultados cuando se suelda fuera de posición se obtienen con electrodos de 3.2 mm (1/8 pulg) de diámetro o menores.

La resistividad eléctrica del alambre del núcleo de estos electrodos es excepcionalmente alta, por lo que un amperaje excesivo sobrecalentará el electrodo y dañará la cobertura, causando inestabilidad del arco y excesiva salpicadura. Cada clasificación y tamaño de electrodo tiene un intervalo de amperaje óptimo.

Electrodos de aluminio y aleaciones de aluminio

ANSI/AWS A5.3, *ESPECIFICACIÓN para electrodos de aluminio y aleación de aluminio para soldadura por arco de metal protegido*, contiene dos clasificaciones de electrodos cubiertos para

soldar metales base de aluminio. Estas clasificaciones se basan en las propiedades mecánicas del metal de soldadura sin tratamiento térmico y en la composición química del alambre del núcleo. Un alambre de núcleo es aluminio comercialmente puro (1100) y el otro una aleación de aluminio con 5% de silicio (4043). Ambos electrodos se usan con ccep (polaridad directa).

La cobertura de estos electrodos tiene tres funciones. Provee un gas para proteger el arco, un fundente para disolver el óxido de aluminio y una escoria protectora para cubrir la franja de soldadura. Como la escoria puede ser muy corrosiva para el aluminio, es importante que se elimine por completo después de soldar.

La presencia de humedad en la cobertura de estos electrodos es una causa importante de porosidad en el metal de soldadura. Para evitar esta porosidad, los electrodos deben guardarse en un gabinete con calefacción mientras no se usen. Los electrodos que se hayan expuesto a la humedad deberán reacondicionarse (coarse) antes de usarse, o desecharse.

Un problema que puede surgir al soldar es la fusión de escoria con el extremo del electrodo si el arco se interrumpe. Para poder encender otra vez el arco, es preciso eliminar esta escoria fusionada.

Los electrodos de aluminio cubiertos se emplean principalmente para soldadura no crítica y aplicaciones de reparación. Sólo deben usarse con metales base para los que se recomienden metales de aporte 1100 o 4043. Estos metales de soldadura no responden a tratamientos térmicos de endurecimiento por precipitación. Si se usan con materiales de este tipo, habrá que evaluar con cuidado cada aplicación.

Electrodos de cobre y aleaciones de cobre

ANSI/AWS A5.6, *Especificación para electrodos de cobre y aleación de cobre, cubiertos, para soldadura por arco*, clasifica los electrodos de cobre y de aleaciones de cobre con base en las propiedades y la composición química del metal de soldadura sin diluir. El sistema de designación es similar al de los electrodos de níquel; la diferencia principal es que cada clasificación individual dentro de un grupo se identifica con una letra, la cual en ocasiones va seguida por un número, como en ECuAl-A2, por ejemplo. Los grupos son: CuSi para el bronce de silicio, CuSn para el bronce fosforado, CuNi para el cupro-níquel y CuAl para el bronce de aluminio. En general, estos electrodos se usan con ccep (polaridad directa).

Los electrodos de cobre se usan para soldar cobre puro y reparar revestimientos de cobre en acero o hierro colado. Los electrodos de bronce de silicio sirven para soldar aleaciones de cobre y cinc, cobre, y algunos materiales con base de hierro. También se usan para recubrimientos que protegen contra la corrosión.

Los metales base de bronce fosforado y latón se sueldan con electrodos de bronce fosforado. Estos electrodos también sirven para soldar en fuerte aleaciones de cobre a acero y a hierro colado. Los bronces fosforados son un tanto viscosos cuando se derriten, pero su fluidez mejora precalentando a unos 200°C (400°F). Los electrodos y el trabajo deben estar secos.

Los electrodos de cobre-níquel se usan para soldar una amplia gama de aleaciones de cobre y níquel y también revestimientos de cupro-níquel en acero. En general, no se requiere precalentamiento para estos materiales.

Los electrodos de bronce de aluminio tienen una amplia aplicación en la soldadura de aleaciones con base de cobre y algunas combinaciones de metales disímiles. Se emplean para soldar en fuerte muchos metales ferrosos y aplicar superficies de apoyo resistentes al desgaste y a la corrosión. La soldadura por lo regular se efectúa en posición plana con algo de precalentamiento.

Electrodos para hierro colado

ANSI/AWS A5.15, *Especificación para electrodos y varillas para soldar hierro colado*, clasifica los electrodos cubiertos para soldar hierro colado. Los electrodos clasificados en A5.15 son de níquel, níquel-hierro, aleaciones de níquel-cobre y una aleación de acero. Se recomienda precalentamiento al soldar piezas de hierro coladas, sobre todo si se emplea el electrodo de acero. La temperatura específica depende del tamaño y la complejidad de la pieza colada y de los requisitos de maquinabilidad. Los hoyos y grietas pequeños pueden soldarse sin precalentamiento, pero la soldadura no será maquinable. La soldadura se efectúa con ccep (polaridad directa) de bajo amperaje para minimizar la dilución con el metal base. En este caso no se aplica precalentamiento, excepto para minimizar los esfuerzos residuales en otras partes de la pieza colada.

Los electrodos patentados de níquel y aleaciones de níquel también pueden servir para reparar piezas coladas y unir los diversos tipos de hierros colados consigo mismos y con otros metales. La dureza del metal de soldadura depende del grado de dilución del metal base.

Los electrodos de bronce fosforado y de bronce de aluminio se usan para soldar en fuerte hierro colado. El punto de fusión de sus metales de soldadura es menor que el del hierro colado. La pieza colada deberá calentarse a unos 200°C (400°F) y soldarse con ccep (polaridad directa) empleando el amperaje más bajo que produzca una buena adhesión entre el metal de soldadura y las caras del surco. Las superficies del hierro colado no deben derretirse.

Electrodos de recubrimiento

LA MAYOR PARTE de los electrodos de recubrimiento duro se diseñan de modo que cumplan con ANSI/AWS A5.13, *Especificación para electrodos y varillas de soldadura para recubrimiento sólido*, o ANSI/AWS A5.21, *Especificación para electrodos y varillas de soldadura para recubrimiento compuesto*. Se dispone de una amplia gama de electrodos para SMAW (dentro de ésta y otras especificaciones AWS para metales de aporte) que producen capas resistentes al desgaste, el impacto, el calor o la corrosión sobre diversos metales base. Todos los electrodos cubiertos especificados en A5.13 tienen alambre de núcleo sólido; los especificados en A5.21 tienen un núcleo compuesto. El sistema de designación de los electrodos en ambas especificaciones es similar al que se usa para los electrodos de aleación de cobre, con excepción de los electrodos de carburo de tungsteno, en los que la E de la designación para estos electrodos va seguida por WC y por los límites de tamaño de malla para los gránulos de carburo de tungsteno del núcleo para completar la designación. En este caso, el núcleo consiste en un tubo de acero relleno con los gránulos de carburo de tungsteno.

El recubrimiento con electrodos cubiertos se emplea para revestimientos, untaduras, engrosamientos y aplicación de superficies duras. El objetivo del depósito de soldadura en estas aplicaciones es conferir a las superficies una o más de las siguientes cualidades:

- (1) Resistencia a la corrosión.
- (2) Control metalúrgico.
- (3) Control dimensional.
- (4) Resistencia al desgaste.
- (5) Resistencia al impacto.

La selección de electrodos cubiertos para una aplicación de recubrimiento en particular deberá hacerse después de analizar detenidamente las propiedades que debe tener el metal de soldadura aplicado a un metal base específico.

Acondicionamiento de los electrodos

Las COBERTURAS DE los electrodos para SMAW son higroscópicas (absorben con facilidad y retienen la humedad), aunque algunas son más higroscópicas que otras. La humedad que captan al exponerse a una atmósfera húmeda se disocia durante la soldadura produciendo hidrógeno y oxígeno. Los átomos de hidrógeno se disuelven en la soldadura y en la zona térmicamente afectada, y pueden causar agrietamiento en frío. Este tipo de grietas es más común en los metales base de aceros endurecibles

y en los metales de soldadura de aceros de alta resistencia. Un exceso de humedad en la cobertura de los electrodos puede originar porosidad en el metal de soldadura depositado.

A fin de minimizar los problemas de humedad, sobre todo con los electrodos de bajo hidrógeno, es preciso empacarlos, almacenarlos y manejarlos correctamente. Este control es crítico para los electrodos que se usan para soldar metales base endurecibles. El control de la humedad aumenta en importancia conforme se incrementa la resistencia mecánica del metal de soldadura o del metal base. Se usan estufas de retención para los electrodos de bajo hidrógeno que se han sacado de su recipiente sellado y no se han usado durante un tiempo determinado. Este periodo puede ser tan bajo como media hora o tan alto como ocho horas, dependiendo de la resistencia mecánica del electrodo, de la humedad durante la exposición e incluso del recubrimiento específico del electrodo. El tiempo que un electrodo puede conservarse fuera de una estufa o calentador de varillas se reduce al aumentar la humedad.

La temperatura de la estufa de retención debe estar dentro del intervalo de 65 a 150°C (150 a 300°F). Los electrodos que han estado expuestos demasiado tiempo deben cocerse a una temperatura bastante más alta para expulsar la humedad absorbida. Es necesario seguir las recomendaciones específicas del fabricante del electrodo porque las limitaciones de temperatura y tiempo pueden variar de un fabricante a otro, incluso para electrodos con la misma clasificación. Un calentamiento excesivo puede dañar la cobertura del electrodo.

APLICACIONES

MATERIALES

EL PROCESO SMAW puede servir para unir la mayor parte de los metales y aleaciones comunes. La lista incluye los aceros al carbono, los de baja aleación, los aceros inoxidable y el hierro colado, así como cobre, níquel y aluminio y sus aleaciones. La soldadura por arco de metal protegido también se usa para unir una amplia gama de materiales químicamente disímiles.

El proceso no se usa para materiales en los que resulta insatisfactoria la protección del arco provista por los productos gaseosos de una cobertura de electrodo. Los metales reactivos (Ti, Zr) y refractarios (Cb, Ta, Mo) pertenecen a esta categoría.

ESPEORES

EL PROCESO DE arco de metal protegido se puede adaptar a materiales de cualquier espesor dentro de ciertos límites prácticos y económicos. Si el espesor es menor que unos 1.6 mm (1/16 pulg), el metal base se fundirá de lado a lado y el metal derretido se perderá a menos que se empleen procedimientos de fijación y soldadura especiales. No hay un límite superior para el espesor, pero otros procesos como SAW o FCAW pueden ofrecer mayo-

res tasas de deposición y ahorros para casi todas las aplicaciones en las que intervienen espesores de más de 38 mm (1.5 pulg). La mayor parte de las aplicaciones de SMAW implican espesores de entre 3 y 38 mm (1/8 y 1.5 pulg), excepto cuando la configuración de las piezas de trabajo es irregular. Estas configuraciones representarían una desventaja de tipo económico para los procesos de soldadura automatizados, y en tales casos es frecuente usar el proceso por arco de metal protegido para soldar materiales de hasta 250 mm (10 pulg) de espesor.

POSICIÓN DE SOLDADURA

UNA DE LAS ventajas importantes de SMAW es que puede soldarse en cualquier posición con la mayor parte de los materiales para los que el proceso es apropiado. Esto hace que el proceso sea de utilidad para soldar uniones que no se pueden colocar en la posición plana. A pesar de esta ventaja, es recomendable soldar en la posición plana siempre que resulte práctico porque se requiere menos habilidad y es posible usar electrodos más grandes que ofrecen mayores tasas de deposición. Las soldaduras en posición vertical o por encima de la cabeza

(cenital) requieren mayor habilidad por parte del soldador y se realizan con electrodos de menor diámetro. Los diseños de las uniones para soldadura vertical y cenital pueden ser diferentes de los apropiados para soldar en la posición plana.

UBICACIÓN DE LA SOLDADURA

La sencillez del equipo hace que SMAW sea un proceso extremadamente versátil en lo tocante a la ubicación y el entorno de

la operación. Puede soldarse en interiores o exteriores, en una línea de producción, un barco, un puente, un armazón de edificio, una refinería de petróleo, una tubería a campo travesía o cualquier otro trabajo de esta clase. No se requieren mangueras de gas ni de agua, y los cables de soldadura se pueden extender a una distancia considerable de la fuente de potencia. En áreas remotas es posible usar unidades que trabajen con gasolina o diesel. A pesar de esta versatilidad, siempre es recomendable usar el proceso en un entorno que lo proteja del viento, la lluvia y la nieve.

DISEÑO Y PREPARACIÓN DE LAS UNIONES

TIPOS DE SOLDADURAS

LAS UNIONES SOLDADAS se diseñan teniendo en cuenta en primer término la resistencia mecánica y la seguridad que la pieza soldada debe ofrecer en las condiciones de servicio a las que se someterá. Siempre debe considerarse la forma en que se aplicarán los esfuerzos de servicio, y la temperatura a la que se expondrá la pieza soldada. Una unión que soportará una carga dinámica puede ser muy distinta de otra permitida bajo carga estática.

La carga dinámica exige considerar la resistencia a la fatiga y a la fractura frágil. Esto, entre otras cosas, obliga a diseñar las uniones de modo que se reduzcan o eliminen los puntos de concentración de esfuerzos. El diseño también debe equilibrar los esfuerzos residuales y lograr un nivel de estos esfuerzos lo más bajo posible. La soldadura debe producir una unión con la resistencia mecánica requerida.

Además de los requerimientos de servicio, las uniones soldadas deben diseñarse de modo que sean económicas y accesibles para el soldador durante la fabricación. La accesibilidad de las uniones puede mejorar la capacidad del soldador para satisfacer los requisitos de hechura y calidad deseados, y puede ayudar a controlar la distorsión y a reducir los costos de soldadura. A continuación se analizará el efecto del diseño sobre algunos de estos aspectos.

Soldaduras de surco

SE EMPLEAN DIFERENTES tipos de diseños de unión para soldaduras de surco. En la selección del diseño más apropiado para una aplicación específica influyen los siguientes factores:

- (1) Idoneidad para la estructura que se considera.
- (2) Accesibilidad de la unión para soldarla.
- (3) Costo de soldadura.
- (4) Posición en que se soldará.

Los surcos cuadrados son los más económicos de preparar, pues sólo requieren un recorte recto del borde de cada miembro. Este tipo de unión está limitado a los espesores en los que puede obtenerse resistencia mecánica e integridad satisfactorias. En el caso de SMAW, dicho espesor casi nunca es mayor que unos 6 mm (1/4 pulg) y eso sólo cuando la unión se va a soldar en la

posición plana por ambos lados. También debe considerarse el tipo de material que se va a soldar.

Si se van a soldar miembros más gruesos, el borde de cada miembro debe prepararse con un perfil que permita dirigir el arco al punto en el que debe depositarse el metal de soldadura. Esto es necesario para que haya fusión hasta la profundidad requerida.

Por economía y también para reducir la distorsión y los esfuerzos residuales, el diseño de la unión debe incluir una abertura de raíz y un ángulo de surco que confiera resistencia mecánica e integridad suficientes con la deposición de la mínima cantidad de metal de aporte. La clave para lograr la integridad es que pueda tenerse acceso a la raíz y las paredes laterales de la unión. Las uniones de surco en "J" y de surco en "U" son recomendables para secciones gruesas. En secciones muy gruesas, los ahorros de metal de aporte y tiempo de soldadura alcanzan a compensar con creces el costo adicional de preparación de estas uniones. El ángulo de las paredes laterales debe ser suficientemente grande como para evitar el atrapamiento de escoria.

Soldaduras de filete

SI LOS REQUERIMIENTOS de servicio de la pieza soldada lo permiten, es común usar soldaduras de filete en lugar de soldaduras de surco, pues requieren poca o ninguna preparación de la unión, si bien las soldaduras de surco en ocasiones requieren menos soldadura. Puede usarse soldadura de filete intermitente si una soldadura continua conferiría más resistencia mecánica que la necesaria para soportar la carga.

La soldadura de filete a menudo se combina con una soldadura de surco para conferir la fortaleza requerida y reducir la concentración de esfuerzos en la unión. Si se emplean filetes cóncavos, se logra una concentración mínima de esfuerzos en la base de la soldadura.

RESPALDOS DE SOLDADURA

SI SE REQUIEREN soldaduras con penetración completa y se suelda desde un lado de la unión, puede ser necesario contar con un respaldo de soldadura. El propósito es proveer un lugar para que se deposite la primera capa de metal y así evitar que el metal derretido de esa capa escape por la raíz de la unión.

Son cuatro los tipos de respaldo de uso común:

- (1) Tira de respaldo.
- (2) Soldadura de respaldo.
- (3) Barra de cobre de respaldo.
- (4) Respaldo no metálico.

Tira de respaldo

UNA TIRA DE respaldo es una tira de metal que se coloca detrás de la unión, como se muestra en la figura 2.6 (A). La primera pasada de soldadura pega ambos miembros de la unión a sí mismos y a la tira de respaldo. La tira puede dejarse en su lugar si no interfiere con el servicio de la unión; de lo contrario, deberá eliminarse, para lo cual es preciso que el lado de atrás de la unión esté accesible. Si no es así, habrá que usar alguna otra forma de realizar una pasada de raíz apropiada.

La tira de respaldo siempre debe ser de un material metalúrgicamente compatible con el metal base y el electrodo que se usará para soldar. Si el diseño lo permite, otro miembro de la estructura puede servir como respaldo para la soldadura. La figura 2.6 (B) presenta un ejemplo de esto. En todos los casos, es importante que la tira de respaldo y las superficies de la unión estén limpias para evitar la porosidad y la inclusión de escoria en la soldadura. También es importante que la tira de respaldo embone debidamente, pues de lo contrario el metal de soldadura fundido escurrirá por cualquier hueco entre la tira y el metal base en la raíz de la unión.

Barra de respaldo de cobre

EN OCASIONES SE utiliza una barra de cobre para sostener el charco de soldadura en la raíz de la unión. Se usa cobre en virtud de su elevada conductividad térmica, que ayuda a evitar que el metal de soldadura se fusione con la barra de respaldo. Con todo, la barra de cobre debe tener la masa suficiente para no derretirse durante la deposición de la primera pasada de soldadura. En aplicaciones de alta producción es posible pasar agua por agujeros en la barra para eliminar el calor que se acumula durante la soldadura continua. Sea cual sea el método de enfriamiento empleado, no deberá permitirse que el arco incida sobre la barra de cobre, pues si ésta se funde aunque sea un poco el metal de soldadura se contaminará con cobre. La barra puede tener surcos para dar a la cara de raíz el perfil y el refuerzo deseados.

Respaldo no metálico

EL RESPALDO NO metálico con fundente granular o bien material refractario es otro método que se usa para producir una pasada inicial íntegra. La principal función del fundente es sostener el metal de soldadura y moldear la superficie de la raíz. Una capa de fundente granular se sostiene contra la parte de atrás de la soldadura con algún método como podría ser una manguera para incendio presurizada. Los sistemas de este tipo se usan en trabajos de línea de producción, aunque no se utilizan mucho para SMAW.

El respaldo refractario consiste en una pieza moldeada flexible que se sostiene contra el dorso de la soldadura mediante

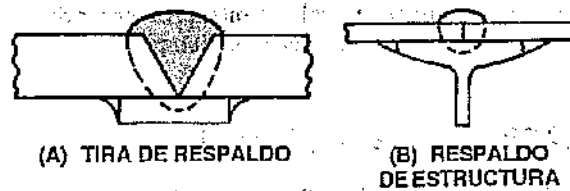


Figura 2.6—Respaldo de metal fusible para una soldadura

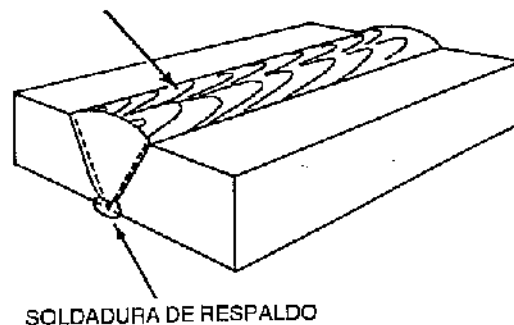
abrazaderas o cinta sensible a la presión. Este tipo de respaldo se usa ocasionalmente con el proceso SMAW, aunque se requieren técnicas de soldadura especiales para obtener buenos resultados de manera consistente. Es importante seguir las recomendaciones del fabricante del respaldo.

Soldadura de respaldo

UNA SOLDADURA DE respaldo consiste en una o más pasadas de respaldo en una unión de surco único. Esta soldadura se deposita en el dorso de la unión antes de depositarse la primera pasada en el anverso. Este concepto se ilustra en la figura 2.7. Después de la soldadura de respaldo, todas las pasadas subsecuentes se realizan en el surco desde el anverso. La raíz de la unión puede amolarse o bisclarse después de aplicarse la soldadura de respaldo a fin de producir metal limpio e íntegro sobre el cual depositar la primera pasada del anverso de la unión.

La soldadura de respaldo puede hacerse con el mismo proceso que el empleado para soldar el surco, o con uno distinto. Si se emplea el mismo proceso, los electrodos deberán tener la misma clasificación que aquellos con los que se soldará el surco. Si se utiliza otro proceso, como el de soldadura por arco de tungsteno y gas, las varillas de soldadura deberán depositar metal que tenga composición y propiedades similares a las del metal de soldadura de SMAW. El metal de soldadura de respaldo debe tener el

SOLDADURA DE SURCO HECHA DESPUÉS DE SOLDAR EL OTRO LADO



SOLDADURA DE RESPALDO

Figura 2.7—Soldadura de respaldo típica

espesor suficiente para soportar cualquier carga que se aplique. Esto es importante sobre todo cuando es necesario cambiar de posición la pieza soldada después de haber depositado la soldadura de respaldo y antes de soldar el surco.

EMBONAMIENTO

EL EMBONAMIENTO DE la unión implica la colocación de los miembros de la unión de modo que se obtengan las dimensiones y la alineación especificadas para el surco. Los puntos que deben cuidarse son la abertura de la raíz y la alineación de los miembros a lo largo de la raíz de la soldadura. Estas dos cosas influyen de manera importante sobre la calidad de la soldadura y la economía del proceso. Una vez que la unión se ha alineado correctamente a todo lo largo, hay que mantener las posiciones de los miembros por medio de abrazaderas o soldaduras provisionales. Es posible colocar barras de dedo o puentes en "U" atravesando la unión y soldarlas provisionalmente a cada uno de los miembros.

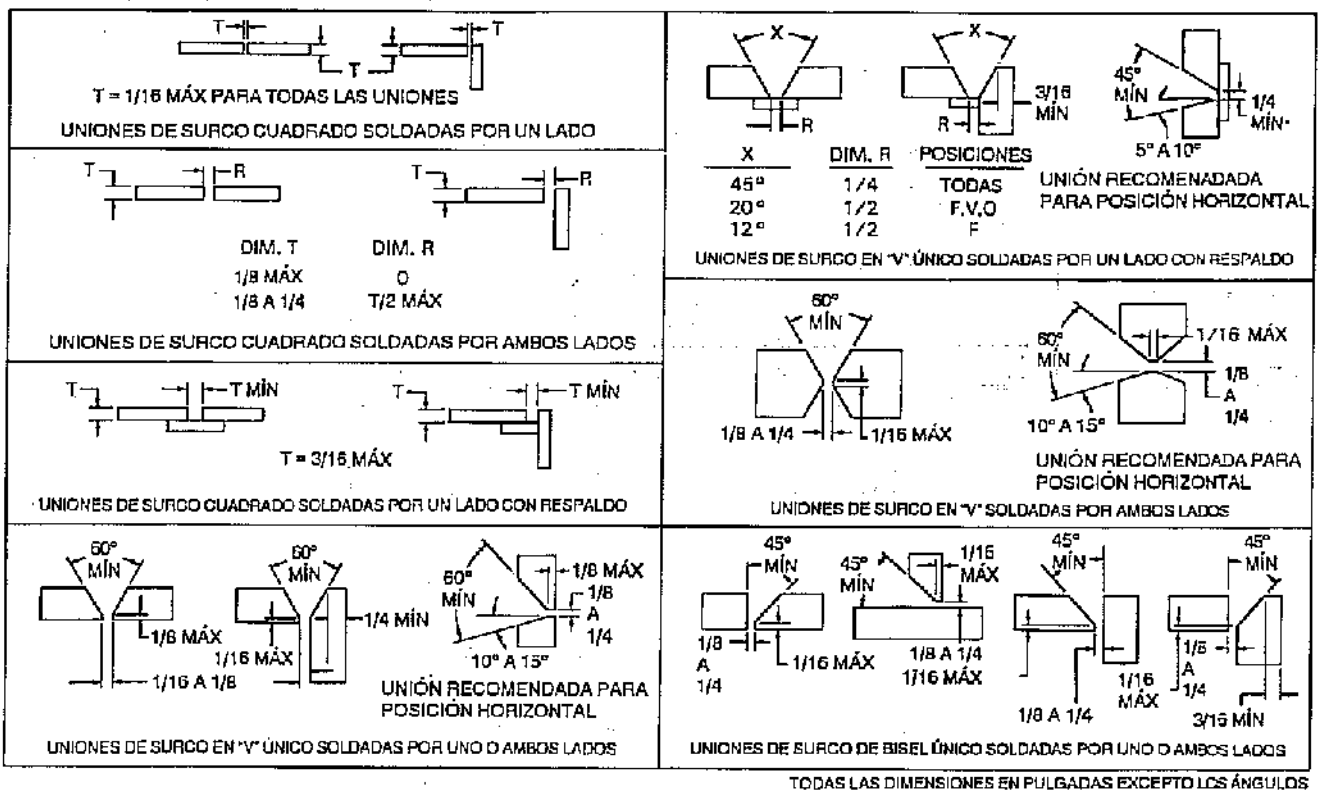
Si la abertura de la raíz no es uniforme, la cantidad de metal de soldadura variará de un lugar a otro a lo largo de la unión. En consecuencia, el encogimiento, y por tanto la distorsión, no será uniforme. Esto puede ser un problema si las dimensiones del

ensamble terminado se predicen con base en un encogimiento uniforme y controlado.

Una desalineación a lo largo de la raíz de la soldadura puede causar falta de penetración en algunas áreas o un perfil deficiente de la superficie de la raíz, o ambas cosas. Una abertura insuficiente de la raíz puede ser causa de penetración incompleta en la unión; una abertura demasiado ancha dificulta la soldadura y requiere más metal para llenar la unión. Esto, desde luego, implica un costo adicional. En miembros delgados, una abertura de raíz excesiva puede ocasionar perforación del dorso de la unión, e incluso hacer que se derrita el borde de uno de los miembros, o ambos.

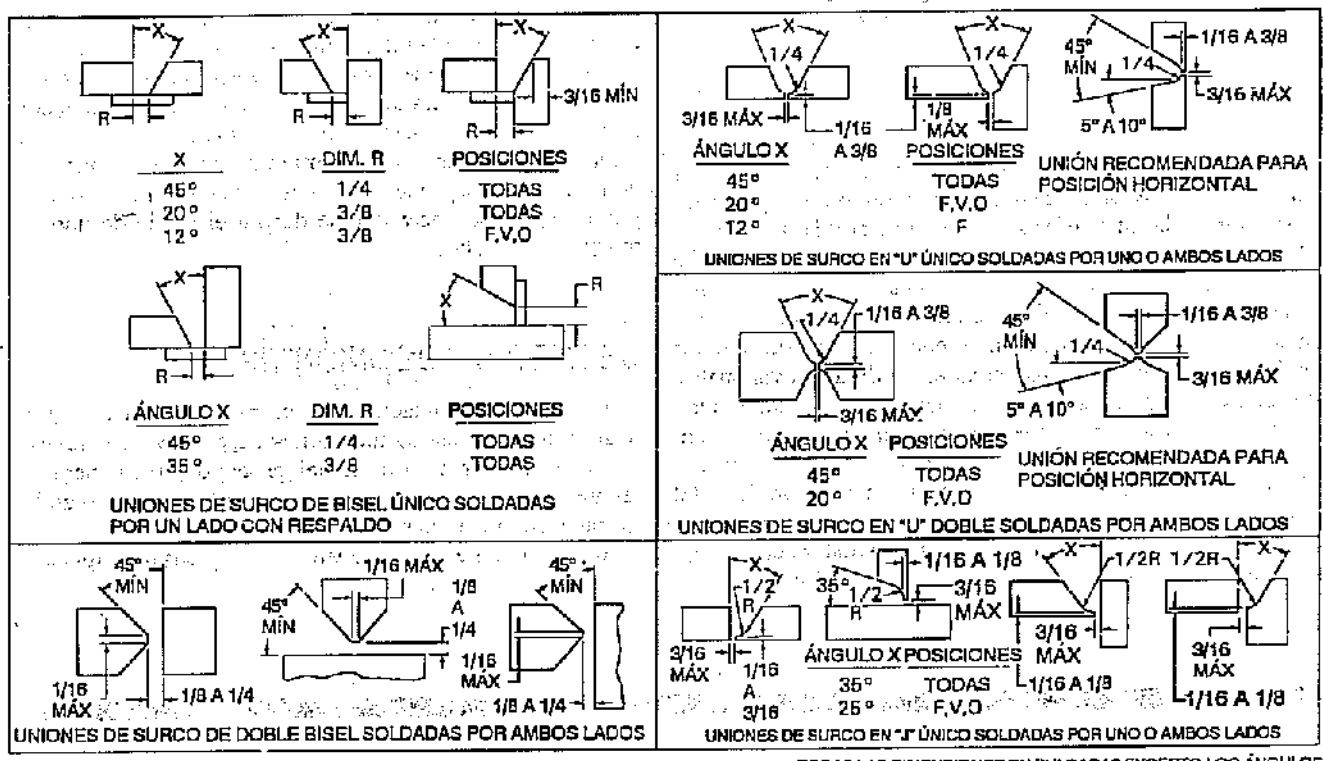
GEOMETRÍAS DE UNIÓN TÍPICAS

LOS SURCOS DE soldadura que se muestran en la figura 2.8 ilustran los diseños y dimensiones típicas de las uniones para soldar acero por arco de metal protegido. En general, estas uniones son apropiadas para lograr soldaduras integrales en forma económica. Es posible que se requieran otros diseños de unión o cambios en las dimensiones sugeridas para aplicaciones especiales.



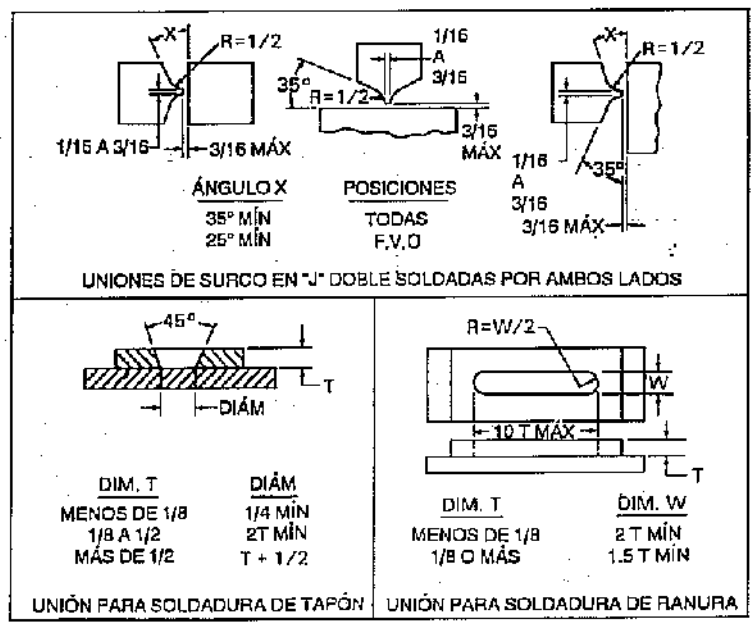
(A)

Figura 2.8—Geometrias de unión típicas para soldar acero por arco de metal protegido



TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS EXCEPTO LOS ÁNGULOS

(B)



TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS EXCEPTO LOS ÁNGULOS

(C)

Figura 2.8--(Continúa)-Geometrias de unión típicas para soldar acero por arco de metal protegido

PESTAÑAS DE ESCURRIMIENTO

EN ALGUNAS APLICACIONES, es necesario llenar por completo el surco hasta los extremos de la unión. En tales casos se emplean pestañas de escurrimiento que, de hecho, extienden el surco más allá de los bordes de los miembros que se van a soldar. La soldadura se prolonga hasta las pestañas. Con esto se asegura que la unión esté llena en toda su longitud hasta la profundidad necesaria con metal de soldadura íntegro. En la figura 2.9 se muestra una pestaña de escurrimiento típica. Estas pestañas son lugares excelentes para comenzar a soldar y terminar, pues cualesquier defectos que presenten el inicio y el paro quedarán en áreas que posteriormente se eliminarán.

La selección del material para las pestañas es importante. No debe permitirse que la composición de las pestañas afecte de manera adversa las propiedades del metal de soldadura. Por ejemplo, en el caso de acero inoxidable destinado a servicio en condiciones de corrosión, las pestañas de escurrimiento deben ser de un acero inoxidable de grado compatible. Las pestañas de acero al carbono serían más baratas, pero la fusión con el metal de aporte de acero inoxidable alteraría la composición del metal de soldadura en la juntura entre la pestaña y los miembros de acero inoxidable de la unión. Con toda probabilidad, el metal de soldadura en este punto no tendría la suficiente resistencia a la corrosión.

PRECALENTAMIENTO

ES NECESARIO CALENTAR el área que se va a soldar antes de soldar y durante la soldadura, a fin de obtener las propiedades deseadas en la soldadura o en el metal base adyacente, o ambas cosas. Hay que evitar todo precalentamiento innecesario, ya que consume tiempo y energía. Las temperaturas de precalentamiento excesivas no justifican el costo y podrían degradar las propie-

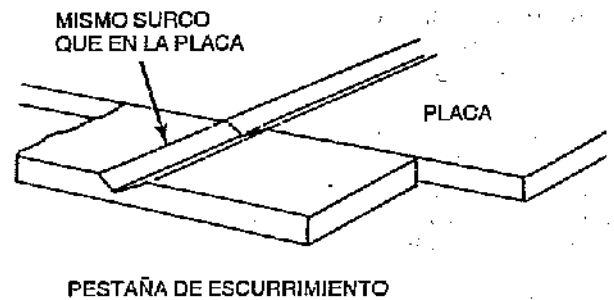


Figura 2.9—Pestaña de escurrimiento en el extremo de una unión

dades y la calidad de la unión. La incomodidad del soldador aumenta si el precalentamiento es muy alto, y la calidad del trabajo tiende a bajar. Las temperaturas de precalentamiento que se usen se basarán en los requisitos de soldadura prescritos, una evaluación técnica competente o los resultados de pruebas. En general, la temperatura dependerá del material que se va a soldar, los electrodos que se usarán y el grado de restricción de la unión.

Normalmente se requiere precalentamiento para los aceros endurecibles, los aceros de alta resistencia y cuando se usan electrodos distintos de los de bajo hidrógeno.

En ocasiones se aplica precalentamiento al soldar materiales de elevada conductividad térmica, como las aleaciones de cobre y aluminio, a fin de reducir el amperaje de soldadura requerido, mejorar la penetración y ayudar a fusionar el metal de soldadura y el metal base.

PROCEDIMIENTOS DE SOLDADURA

DIÁMETRO DEL ELECTRODO

EL DIÁMETRO DE electrodo correcto es aquel que, usado con el amperaje y velocidad de desplazamiento correctos, produce una soldadura del tamaño requerido en el tiempo más corto posible.

El diámetro que se escoja dependerá en gran medida del espesor del material por soldar, la posición en la que se efectuará la soldadura y el tipo de unión. En general se escogerán electrodos más grandes para aplicaciones que impliquen materiales más gruesos y para soldar en la posición plana, a fin de aprovechar sus mayores tasas de deposición.

Al soldar en las posiciones horizontal, vertical y cenital, el metal de soldadura fundido tiende a fluir hacia fuera de la unión debido a la fuerza de la gravedad. Esta tendencia puede controlarse empleando electrodos pequeños a fin de reducir el tamaño del charco de soldadura. La manipulación del electrodo y la mayor velocidad de recorrido a lo largo de la unión también ayudarán a controlar el tamaño del charco de soldadura.

Al seleccionar el tamaño del electrodo también debe considerarse el diseño del surco de la unión. El electrodo empleado en las primeras pasadas debe ser lo bastante pequeño como para

que pueda manipularse con facilidad en la raíz de la unión. En los surcos en "V", es frecuente usar electrodos de diámetro pequeño para la pasada inicial, a fin de evitar la perforación y controlar la forma de la franja. Luego pueden usarse electrodos más grandes para completar la soldadura, aprovechando su mayor penetración y altas tasas de deposición.

Por último, la experiencia del soldador a menudo influye en la elección del tamaño del electrodo, sobre todo cuando se va a soldar fuera de posición, ya que la habilidad del soldador determina el tamaño del charco de soldadura que puede controlar.

Se recomienda usar el electrodo de mayor tamaño que no viole cualesquier limitaciones de aporte de calor pertinentes ni deposite una franja demasiado grande. Las soldaduras innecesariamente grandes son más costosas y, en algunos casos, incluso perjudiciales. Cualquier cambio repentino en el tamaño de la sección o en el perfil de una soldadura, como sería el caso de una unión sobresoldada, crea concentraciones de esfuerzos. Es obvio que el tamaño de electrodo correcto es aquel que, empleado con el amperaje y velocidad de recorrido apropiados, produce una soldadura del tamaño requerido en el tiempo más corto posible.

CORRIENTE DE SOLDADURA

LA SOLDADURA POR arco de metal protegido puede efectuarse con corriente tanto alterna como continua, siempre que se use el electrodo adecuado. El tipo de corriente de soldadura, la polaridad y los constituyentes de la cobertura del electrodo afectan la rapidez de fusión de todos los electrodos cubiertos. Para un electrodo determinado, la rapidez de fusión se relaciona directamente con la energía eléctrica suministrada al arco. Parte de esta energía se destina a fundir una porción del metal base, y otra parte sirve para fundir el electrodo.

Corriente continua

LA CORRIENTE CONTINUA siempre produce un arco más estable y una transferencia de metal más uniforme que la corriente alterna. Esto se debe a que la polaridad de la corriente no está cambiando todo el tiempo, como sucede con ca. La mayor parte de los electrodos cubiertos trabajan mejor con polaridad inversa (electrodo positivo), aunque algunos son apropiados (e incluso están diseñados) para polaridad directa (electrodo negativo). La polaridad inversa logra mayor penetración, pero la directa aumenta la rapidez de fusión del electrodo.

El arco de cc hace que el charco de soldadura moje mejor las superficies de unión y produce una franja de soldadura de dimensiones más uniformes incluso con amperajes bajos. Por esta razón, la corriente continua es ideal para soldar secciones delgadas. La mayor parte de los electrodos combinados de cc/ca trabajan mejor con cc, a pesar de estar diseñados para operar con cualquiera de los dos tipos de corriente.

La corriente continua es la preferida para soldar en posición vertical o cenital, y también para soldar con arco corto. El arco de cc no es tan propenso a entrar en cortocircuito cuando glóbulos de metal fundido se transfieren a través de él.

El golpe del arco puede ser un problema al soldar con cc metales magnéticos (hierro y níquel). Una forma de resolver este problema es cambiar a ca.

Corriente alterna

PARA EL PROCESO SMAW, la corriente alterna ofrece dos ventajas que no tiene la continua. Una es la ausencia de golpe del arco y la otra es el costo de la fuente de potencia.

Al no haber golpe del arco, es posible usar electrodos más grandes y corrientes de soldadura más elevadas. Ciertos electrodos (los que tienen hierro pulverizado en su cobertura) están diseñados para operar a mayores amperajes con ca. Las velocidades de soldadura máximas con SMAW se logran empleando la técnica de arrastre con estos electrodos y con corriente alterna. Es posible que los materiales de fijación, el diseño de las fijaciones y la posición de la conexión de la pieza de trabajo no sean tan críticos si se usa ca.

Un transformador de ca cuesta menos que una fuente de potencia de cc equivalente, pero el costo del equipo no debe ser el único criterio para seleccionar la fuente de potencia; es preciso considerar todos los factores operativos.

Amperaje

LOS ELECTRODOS CUBIERTOS de un tamaño y clasificación específicos pueden operar de manera satisfactoria a diversos ampe-

rajes dentro de cierto intervalo. Este intervalo varía un poco dependiendo del espesor y la formulación de la cobertura.

La rapidez de deposición aumenta con el amperaje. Para un electrodo de cierto tamaño, los intervalos de amperaje y las tasas de deposición resultantes varían dependiendo de la clasificación del electrodo. En la figura 2.10 se muestra esta variación para diversas clasificaciones de electrodos de acero al carbono del mismo tamaño.

Para un tipo y tamaño de electrodo específicos, el amperaje óptimo depende de varios factores como la posición de soldadura y el tipo de unión. El amperaje debe ser suficiente para obtener una buena fusión y penetración sin perder el control del charco de soldadura. Al soldar en posición vertical o cenital, lo más probable es que los amperajes óptimos estén en la región baja del intervalo permitido.

No conviene usar amperajes que rebasen el intervalo recomendado, ya que el electrodo puede sobrecalentarse y causar demasiadas salpicaduras, golpe del arco, socavamiento y agrietamiento del metal de soldadura. En las figuras 2.11 (A), (B) y (C) se muestra el efecto del amperaje sobre la forma de la franja de soldadura.

LONGITUD DEL ARCO

LA LONGITUD DEL arco es la distancia entre la punta derretida del núcleo del electrodo y la superficie del charco de soldadura. Es importante usar un arco con la longitud apropiada para obtener una soldadura de buena calidad. La transferencia de metal desde la punta del electrodo hasta el charco de soldadura no es una acción suave y uniforme. El voltaje instantáneo del arco varía al transferirse gotitas de metal fundido a través del arco, incluso cuando la longitud de éste se mantiene constante. No obstante, las variaciones en el voltaje serán mínimas si se suelda con el amperaje y la longitud de arco correctos. Para lo segundo se requiere una alimentación del electrodo constante y consistente.

La longitud de arco correcta varía con la clasificación del electrodo, su diámetro y la composición de su cobertura; asimismo varía con el amperaje y la posición de soldadura. La longitud del arco aumenta al incrementarse el diámetro del electrodo y el amperaje. Por regla general, la longitud del arco no debe exceder el diámetro del alambre del núcleo del electrodo, aunque suele ser aún más corta en el caso de electrodos con cobertura gruesa, como los de hierro en polvo o de "arrastre".

Si el arco es demasiado corto, puede ser irregular y entrar en cortocircuito durante la transferencia de metal. Por otro lado, si el arco es demasiado largo, carecerá de dirección e intensidad, y tenderá a dispersar el metal fundido que viaja desde el electrodo hasta la soldadura. Las salpicaduras pueden ser considerables, y la eficiencia de deposición se reducirá. Además, el gas y el fundente generados por la cobertura del electrodo no serán tan eficaces para proteger el arco y el metal de soldadura; esto puede causar porosidad y contaminación del metal de soldadura con oxígeno o hidrógeno, o con ambos.

El control de la longitud del arco es en gran medida cuestión de habilidad del soldador, e implica conocimientos, experiencia percepción visual y destreza manual. Aunque la longitud del arco varía dentro de ciertos límites al cambiar las condiciones, hay algunos principios fundamentales que pueden servir como

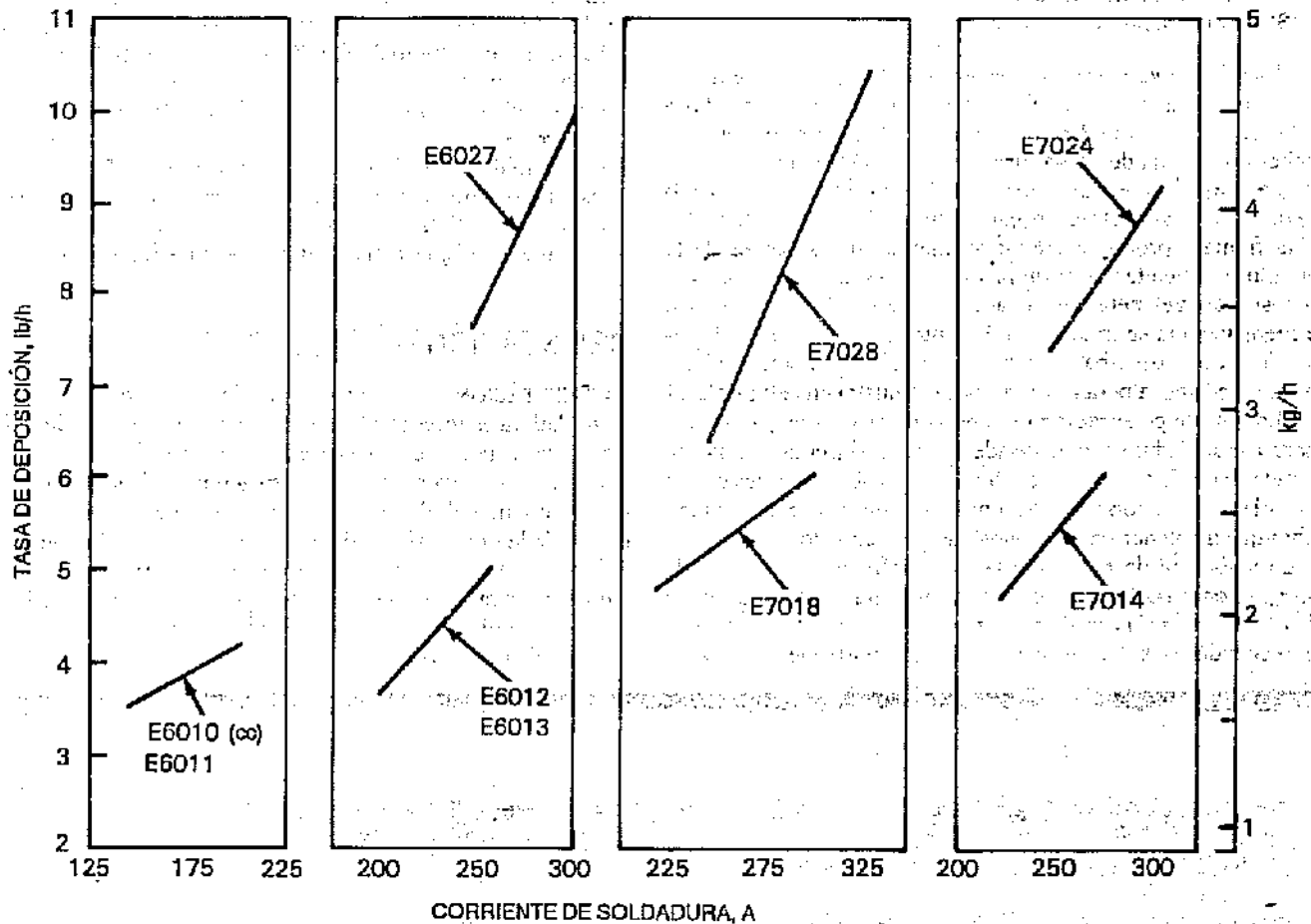


Figura 2.10—Relación entre tasa de deposición y corriente de soldadura para diversos tipos de electrodos de acero al carbono de 4.8 mm (3/16 pulg) de diámetro

guía para determinar la longitud del arco correcta para un conjunto de condiciones determinado.

Si se suelda con la mano hacia abajo, sobre todo si el electrodo tiene cobertura gruesa, la punta del electrodo puede arrastrarse suavemente a lo largo de la unión. En este caso, la longitud del arco estará determinada automáticamente por el espesor del recubrimiento y la rapidez de fusión del electrodo; además, será uniforme. En la soldadura vertical o cenital, el soldador debe estimar la longitud del arco. En estos casos, la longitud correcta será aquella que permita al operador controlar el tamaño y el movimiento del charco de soldadura.

En las soldaduras de filete, el arco debe introducirse en la unión a fin de obtener una penetración y tasa de deposición óptimas. Lo mismo se aplica a las pasadas de raíz en las soldaduras de surco en tuberías.

Si hay golpe del arco, la longitud del arco deberá reducirse hasta donde sea posible. Las diversas clasificaciones de electrodos tienen características de operación muy distintas, incluida la longitud del arco. Por ello, es importante que el soldador esté familiarizado con las características de operación de los tipos de

electrodos que usa; así sabrá cuál es la longitud de arco correcta y qué efectos tienen las diferentes longitudes del arco. En las figuras 2.11 (D) y (E) se muestran los efectos de un arco corto y largo sobre el aspecto de la franja de soldadura cuando se usa un electrodo de acero dulce.

VELOCIDAD DE RECORRIDO

LA VELOCIDAD DE recorrido o de desplazamiento es la rapidez con que el electrodo se desplaza a lo largo de la unión. La velocidad de recorrido correcta es aquella que produce una franja de soldadura con el perfil y el aspecto correctos, como se muestra en la figura 2.11 (A). Son varios los factores que determinan cuál debe ser la velocidad correcta:

- (1) Tipo de corriente de soldadura, amperaje y polaridad.
- (2) Posición de soldadura.
- (3) Rapidez de fusión del electrodo.
- (4) Espesor del material.
- (5) Condición de la superficie del metal base.

- (6) Tipo de unión.
- (7) Embonamiento de la unión.
- (8) Manipulación del electrodo.

Al soldar, la velocidad de recorrido debe ajustarse de modo que el arco vaya un poco adelante del charco de soldadura. Hasta cierto punto, un aumento en la velocidad de recorrido reduce el ancho de la franja de soldadura y aumenta la penetración. Más allá de ese punto, el incremento en la velocidad de recorrido puede reducir la penetración, causar un deterioro de la superficie de la franja y producir un socavamiento en los bordes de la soldadura, dificultar la eliminación de la escoria y atrapar gas (porosidad) en el metal de soldadura. El efecto de una velocidad de recorrido alta se muestra en la figura 2.11 (G). Si la velocidad de recorrido es baja, la franja de soldadura será ancha y convexa, con poca penetración, como se ilustra en la figura 2.11 (F). La falta de penetración se debe a que el arco se queda en el charco de soldadura en vez de adelantarse a él y concentrarse en el metal base. Esto, a su vez, afecta la dilución. Si es necesario controlar la dilución (por ejemplo, al aplicar revestimientos), habrá que mantener baja la velocidad de recorrido.

La velocidad de recorrido también influye en el aporte de calor, y por tanto afecta las estructuras metalúrgicas del metal de soldadura y de la zona térmicamente afectada. Si la velocidad de recorrido es baja, se incrementa el aporte de calor y en

consecuencia la anchura de la zona térmicamente afectada, y se reduce la rapidez de enfriamiento de la soldadura. La velocidad de recorrido hacia adelante necesariamente se reduce cuando se aplica una franja "tejida" (con un movimiento zigzagueante del electrodo), en comparación con las velocidades que pueden lograrse aplicando una franja recta. Un aumento en la velocidad de recorrido reduce el tamaño de la zona afectada por el calor y eleva la rapidez de enfriamiento de la soldadura. El aumento en la tasa de enfriamiento puede elevar la resistencia mecánica y la dureza de una soldadura en un acero endurecible, a menos que se precaliente hasta un nivel tal que se evite el endurecimiento.

ORIENTACIÓN DEL ELECTRODO

LA ORIENTACIÓN DEL electrodo con respecto al trabajo y al surco de soldadura es importante para la calidad de la soldadura. Una orientación incorrecta puede causar atrapamiento de escoria, porosidad y socavamiento. La orientación adecuada depende del tipo y tamaño del electrodo, la posición de soldadura y la geometría de la unión. Un soldador experimentado toma en cuenta todos estos factores automáticamente al determinar la orientación que usará para una unión específica. Se emplea el ángulo de desplazamiento y el ángulo de trabajo para definir la orientación del electrodo.

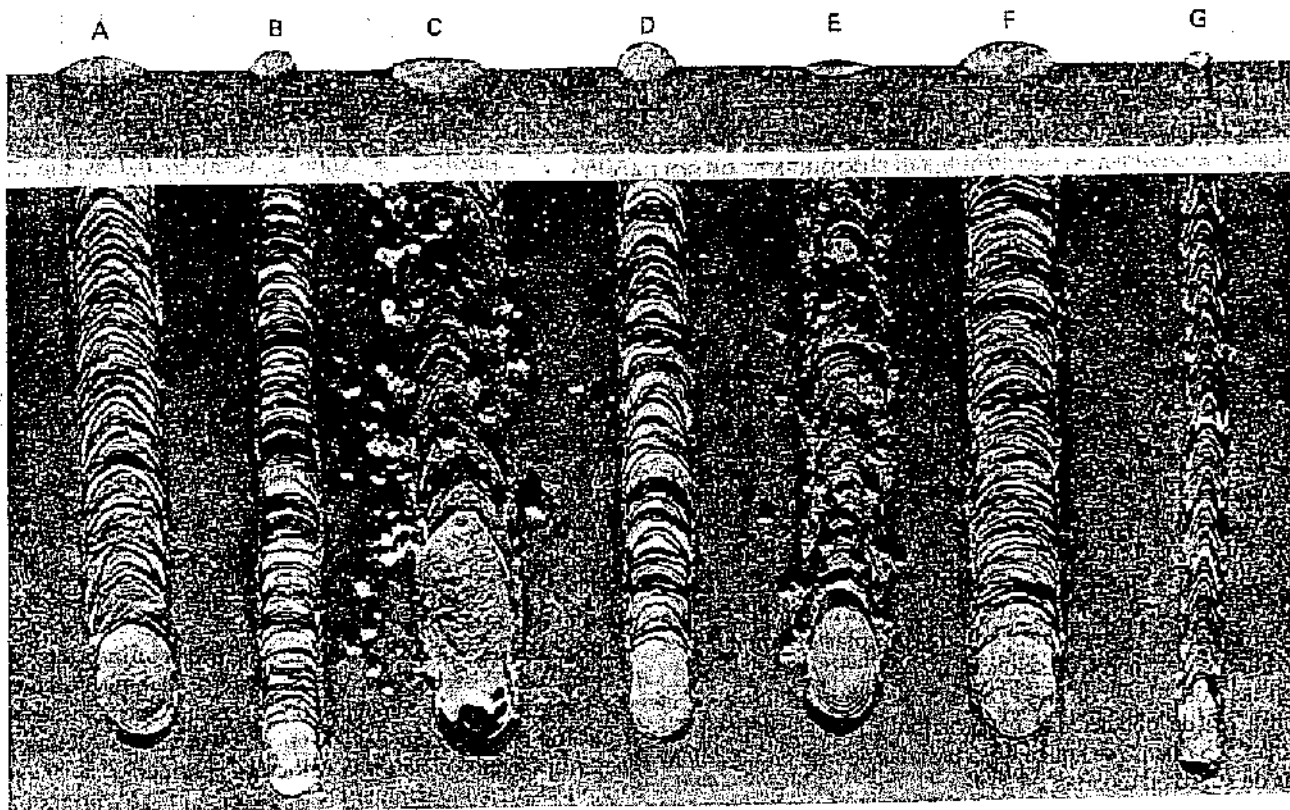


Figura 2.11—Efectos del amperaje, la longitud del arco y la velocidad de recorrido al soldar; (A) amperaje, longitud de arco y velocidad de recorrido correctos; (B) amperaje demasiado bajo; (C) amperaje demasiado alto; (D) arco demasiado corto; (E) arco demasiado largo; (F) velocidad de recorrido demasiado lenta; (G) velocidad de recorrido excesiva

El *ángulo de desplazamiento* es el ángulo menor que 90 grados entre el eje del electrodo y una línea perpendicular al eje de soldadura, en un plano determinado por el eje del electrodo y el eje de soldadura. El *ángulo de trabajo* es el ángulo menor que 90 grados entre una línea perpendicular a la superficie principal de la pieza de trabajo y un plano determinado por el eje del electrodo y el eje de soldadura. Si el electrodo apunta hacia la dirección de soldadura, se está usando la *técnica de derecha*, y en tal caso el ángulo de desplazamiento se denomina *ángulo de empuje*. En la *técnica de dorso* el electrodo apunta en dirección opuesta a la de soldadura, y el ángulo de desplazamiento es el *ángulo de arrastre*. Estos ángulos se muestran en la figura 2.12.

En la tabla 2.3 se indica la orientación del electrodo y la técnica de soldadura típicas para soldaduras de surco y de filete, para electrodos de acero al carbono. Estos valores pueden ser distintos para otros materiales. Si la orientación es la correcta se puede controlar mejor el charco de soldadura, la penetración deseada y la fusión con el metal base.

Un ángulo de desplazamiento excesivo puede producir una franja convexa con insuficiente penetración y una forma deficiente, en tanto que un ángulo de desplazamiento demasiado pequeño puede causar atrapamiento de escoria. Un ángulo de trabajo grande puede producir socavamiento, pero si es demasiado pequeño el resultado puede ser falta de fusión.

TÉCNICA DE SOLDADURA

EL PRIMER PASO para soldar por arco de metal protegido es reunir el equipo, materiales y herramientas apropiados para el trabajo. A continuación hay que determinar el tipo de corriente de soldadura y su polaridad (si es cc), y ajustar la fuente de potencia de manera acorde. También es preciso ajustar la fuente de potencia de modo que produzca la característica volt-ampere apropiada (voltaje de circuito abierto) para el tamaño y tipo de electrodo que se usará. Después de esto, el trabajo se coloca en posición para soldar y, de ser necesario, se sujeta.

El arco se enciende golpeando suavemente la pieza de trabajo con la punta del electrodo cerca del lugar donde se comenzará a soldar, y retirando de inmediato el electrodo una distancia corta para producir un arco de la longitud correcta. Otra técnica para encender el arco consiste en usar un movimiento de frotación similar al que se usa para encender un fósforo. Cuando el

electrodo toca el trabajo, tienden a pegarse; el propósito del movimiento de golpe o de frotación es evitar esto. Si el electrodo se pega, es preciso despegarlo de inmediato; de lo contrario, se sobrecalentará y los intentos por despegarlo de la pieza de trabajo sólo lograrán que se doble. En un caso así será necesario usar un martillo y un cincel.

La técnica para volver a encender el arco una vez que se ha interrumpido varía un poco dependiendo del tipo de electrodo. En general, la cobertura de la punta del electrodo se vuelve conductora cuando se calienta durante la soldadura. Esto ayuda a reiniciar el arco si se hace antes de que el electrodo se enfríe. El encendido y reencendido del arco se facilitan mucho si el electrodo tiene una proporción apreciable de polvos metálicos en su cobertura, ya que tales coberturas conducen la electricidad aun frías. Si se usan electrodos con cobertura gruesa pero no conductora, como los E6020, los de bajo hidrógeno y los de acero inoxidable, puede ser necesario romper la cobertura en la punta para dejar al descubierto el alambre del núcleo y poder reencender el arco con facilidad.

El encendido del arco cuando se usan electrodos de bajo hidrógeno requiere una técnica especial para evitar la porosidad de la soldadura en el punto donde se inicia el arco. Esta técnica consiste en encender el arco unos cuantos diámetros de electrodo más adelante de punto donde se desea comenzar a soldar. En seguida se regresa rápidamente el electrodo y se suelda normalmente. La soldadura continúa sobre el área donde se encendió originalmente el arco, volviendo a fundir cualesquier glóbulos pequeños de metal de soldadura que puedan haber quedado después de encender el arco.

Durante la soldadura, el operador mantiene una longitud de arco normal moviendo el electrodo uniformemente hacia el trabajo conforme el electrodo se funde. Al mismo tiempo, el electrodo se desplaza de manera constante a lo largo de la unión en la dirección de soldadura para formar la franja.

Hay varias técnicas para romper el arco. Una de ellas consiste en acortar el arco rápidamente y luego sacar el electrodo del cráter con un movimiento lateral brusco. Esta técnica se emplea cuando se va a reemplazar un electrodo agotado, en cuyo caso la soldadura continuará a partir del cráter. Otra técnica consiste en detener el movimiento hacia adelante del electrodo y dejar que el cráter se llene, retirando después el electrodo gradualmente para romper el arco. Cuando se continúa una soldadura a partir de un cráter, el arco deberá encenderse en el borde delantero del cráter, moverse de inmediato al lado opuesto del cráter y ade-

Tabla 2.3
Orientación del electrodo y técnica de soldadura típicas para soldar por arco de metal protegido con electrodos de acero al carbono

Tipo de unión	Posición de soldadura	Ángulo de trabajo, grados	Ángulo de desplazamiento, grados	Técnica de soldadura
Surco	Plana	90	5-10*	De dorso
Surco	Horizontal	80-100	5-10	De dorso
Surco	Vertical subiendo	90	5-10	De derecha
Surco	Cenital	90	5-10	De dorso
Filete	Horizontal	45	5-10*	De dorso
Filete	Vertical subiendo	35-45	5-10	De derecha
Filete	Cenital	30-45	5-10	De dorso

* El ángulo de desplazamiento puede ser de 10° a 30° para electrodos con coberturas de hierro en polvo gruesas.

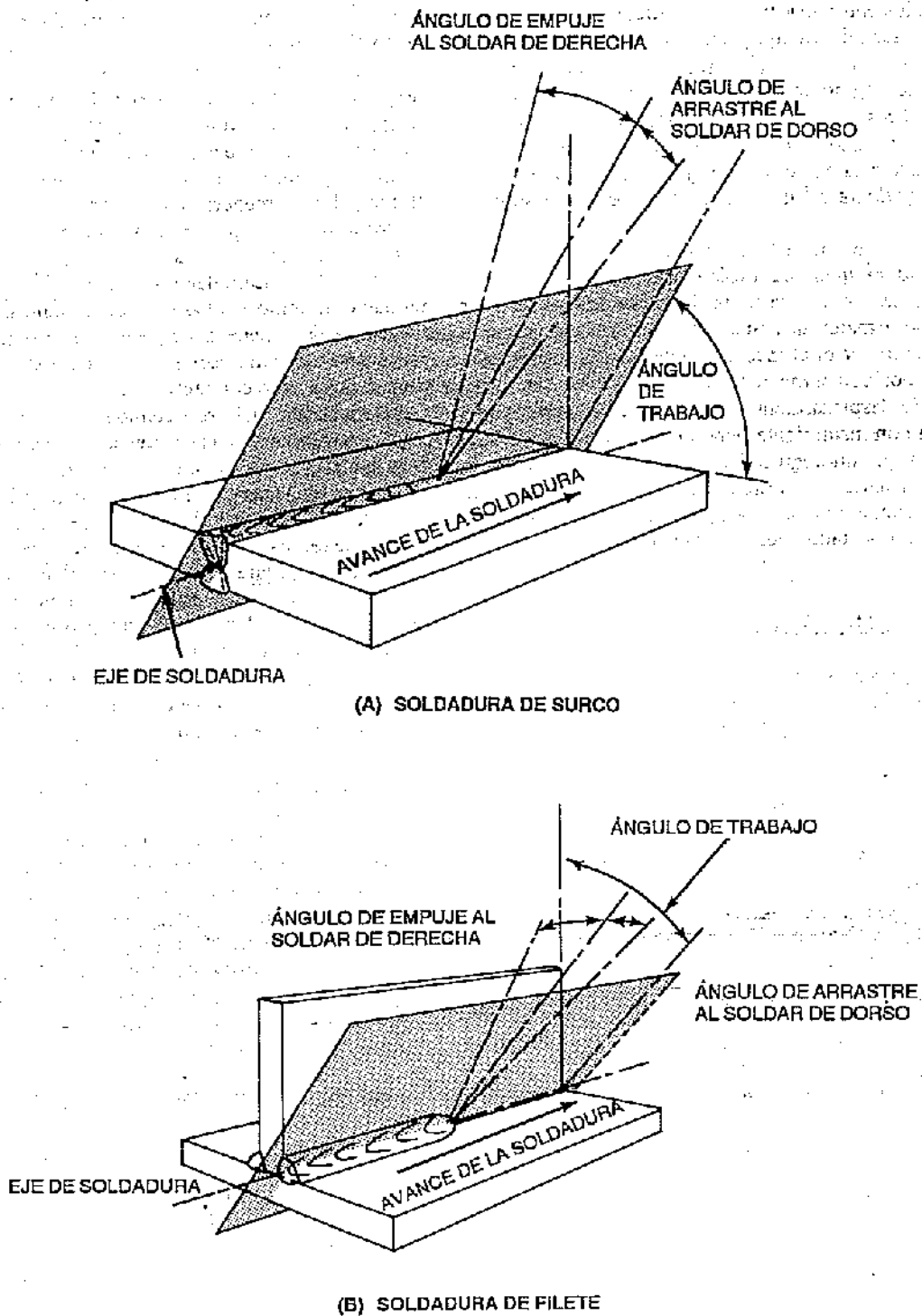


Figura 2.12—Orientación del electrodo

lanzarse lentamente para continuar con la soldadura. Así, el cráter se llenará sin causar porosidad ni atrapar escoria. Esta técnica tiene importancia especial cuando se usan electrodos de bajo hidrógeno.

ELIMINACIÓN DE ESCORIA

LA MINUCIOSIDAD CON que se elimina la escoria de cada franja de soldadura antes de soldar sobre ella influye directamente en la calidad de las soldaduras de múltiples pasadas. Si no se limpia exhaustivamente cada franja, aumenta la probabilidad de atrapar escoria y, por tanto, de producir una soldadura defectuosa. Para la eliminación completa y eficiente de la escoria es necesario que cada franja tenga el perfil apropiado y que se funda en forma continua con la franja o el metal base adyacente.

Las franjas pequeñas se enfrían con mayor rapidez que las grandes, lo que facilita la eliminación de escoria de las franjas pequeñas. Las franjas cóncavas o planas cuyos bordes se confunden con el metal base o la franja adyacente, si la hay, minimizan el socavamiento e impiden que se forme una muesca aguda en el borde de la franja donde podría pegarse la escoria. Por último, es vital que el soldador pueda reconocer las áreas donde podría quedar atrapada la escoria. Los soldadores experimentados saben que es preciso eliminar toda la escoria antes de continuar con una soldadura.

CONEXIÓN CON LA PIEZA DE TRABAJO

ES IMPRESCINDIBLE CONECTAR debidamente el cable del trabajo cuando se suelda con arco de metal protegido. La ubicación del cable es importante sobre todo al soldar con cc. Si la posición no es la correcta, puede fomentar el golpe del arco y dificultar el control de éste. Además, es importante la forma como se sujeta el cable. Una conexión deficiente no establece un contacto eléctrico consistente, y se calienta. Esto puede hacer que se interrumpa el circuito y se rompa el arco. Lo mejor es una zapata de contacto de cobre fijada con una abrazadera con forma de "C". Si la adhesión de cobre al metal base debida a esta conexión resulta perjudicial, la zapata de cobre deberá sujetarse a una placa que sea compatible con el trabajo. La placa, a su vez, se sujetará al trabajo. En el caso de contactos rotatorios, el contacto se hará con zapatas que se deslicen sobre el trabajo, o cojinetes de rodillo sobre el eje en el que se monta el trabajo. Si se emplean zapatas deslizantes, conviene usar por lo menos dos. Si se emplea sólo una zapata y se pierde momentáneamente el contacto, el arco se extinguirá.

ESTABILIDAD DEL ARCO

SE NECESITA UN arco estable para producir soldaduras de calidad. Los defectos como fusión inconsistente, escoria atrapada, agujeros de respiración y porosidad pueden ser el resultado de un arco inestable.

Los siguientes factores influyen de manera importante en la estabilidad del arco:

- (1) El voltaje de circuito abierto de la fuente de potencia.
- (2) Las características de recuperación de voltajes transitorios de la fuente de potencia.

(3) El tamaño de las gotas de metal de aporte fundido y escoria en el arco.

(4) La ionización del trayecto del arco desde el electrodo al trabajo.

(5) La manipulación del electrodo.

Los dos primeros factores tienen que ver con el diseño y las características de operación de la fuente de potencia. Los dos que siguen son funciones del electrodo. La última representa la habilidad del soldador.

El arco de un electrodo cubierto es transitorio; incluso cuando el soldador mantiene una longitud de arco más o menos constante. La máquina soldadora debe poder responder con prontitud cuando el arco tiende a apagarse, o está en cortocircuito a través de las gotas de metal que forman un puente en el espacio del arco. En tal caso, se requiere un pico de corriente para despejar el cortocircuito. Si se usa ca, es importante que el voltaje pase por cero antes que la corriente lo haga. Si los dos están en fase, el arco será muy inestable. Este desplazamiento de fase debe estar integrado al diseño de la máquina soldadora.

Algunos ingredientes de la cobertura del electrodo tienden a estabilizar el arco, y son necesarios para que un electrodo trabaje bien con ca. Algunos de estos ingredientes son dióxido de titanio, feldespato y diversos compuestos de potasio (incluido el aglutinante, silicato de potasio). La inclusión de uno o más de estos compuestos estabilizadores del arco en la cobertura suministra un gran número de partículas fácilmente ionizables que contribuyen a la ionización del chorro del arco. Así pues, tanto el electrodo como la fuente de potencia y el soldador contribuyen a la estabilidad del arco.

GOLPE DEL ARCO

EL GOLPE DEL arco se presenta con mayor frecuencia al soldar con cc materiales magnéticos (hierro y níquel). Puede ocurrir con ca, en ciertas condiciones, pero estos casos son poco frecuentes y la intensidad del golpe siempre es mucho menos severa. La corriente continua, al fluir por el electrodo y el metal base, crea campos magnéticos alrededor del electrodo que tienden a desviar el arco del trayecto deseado. El arco puede desviarse lateralmente, pero lo más común es que desvíe hacia adelante o hacia atrás a lo largo de la unión. El golpe hacia atrás se presenta cuando se suelda hacia la conexión con la pieza de trabajo cerca del extremo de la unión o en una esquina. El golpe hacia adelante se presenta cuando se suelda alejándose del cable al principio de la unión, como se muestra en la figura 2.13.

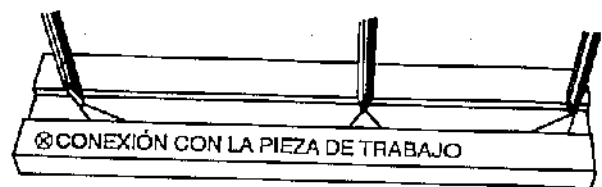


Figura 2.13—Efecto de la ubicación de la conexión con la pieza de trabajo sobre el golpe de arco

El golpe del arco puede hacer que la fusión no sea completa y haya un exceso de salpicaduras, y puede ser tan severo que imposibilite la producción de una soldadura satisfactoria. Al soldar con electrodos de hierro en polvo o electrodos que producen mucha escoria, el golpe hacia adelante puede ser particularmente problemático, ya que permite que la escoria fundida, que normalmente está restringida al borde del cráter, fluya hacia adelante bajo el arco.

La flexión del arco en estas condiciones se debe a los efectos de un campo magnético desequilibrado. Si hay una mayor concentración de flujo magnético en un lado del arco que en el otro, el arco siempre se flexiona alejándose de la concentración más alta. La fuente del flujo magnético sigue la regla eléctrica según la cual un conductor que transporta una corriente eléctrica produce un campo magnético en círculos alrededor del conductor. Estos círculos están en planos perpendiculares al conductor y se centran en él.

Al soldar, este flujo magnético se superpone al acero y cruza el espacio que se va a soldar. El flujo en la placa no causa problemas, pero una concentración desigual de flujo a través del espacio o alrededor del arco hace que éste se flexione alejándose de la concentración más alta. Puesto que el flujo atraviesa el acero con mucha mayor facilidad que el aire, el trayecto del flujo tiende a permanecer dentro de las placas de acero. Por esta razón, cuando el electrodo está cerca de un extremo de la unión, el flujo alrededor del electrodo se concentra entre éste y el extremo de la placa. Esta mayor concentración del flujo en un lado del arco, al principio o al final de una soldadura, desvía el arco alejándolo de los extremos de las placas.

El golpe hacia adelante aparece momentáneamente al principio de una soldadura y después disminuye; esto se debe a que el flujo pronto encuentra un camino fácil a través del metal de soldadura. Una vez que el flujo magnético detrás del arco se concentra en la placa y en la soldadura, la principal influencia sobre el arco será la del flujo que está adelante de él, cuando este flujo cruza la abertura de la raíz. En este momento puede aparecer el golpe hacia atrás, y la posibilidad de que ocurra está latente hasta llegar al final de la unión. Cuando la soldadura se aproxima al final, el flujo adelante del arco se construye cada vez

más, incrementando el golpe hacia atrás. En el final mismo de la unión, el golpe hacia atrás puede hacerse muy severo.

La corriente de soldadura que atraviesa el trabajo crea un campo magnético a su alrededor, perpendicular al trayecto de la corriente entre el arco y la conexión con la pieza de trabajo. El campo magnético alrededor del arco es perpendicular al campo en el trabajo, y esto hace que el flujo magnético se concentre en el lado del arco que da hacia el cable conectado al trabajo; esta concentración tiende a empujar el arco en dirección opuesta. Los dos campos de flujo magnético que hemos mencionado son en realidad un solo campo, perpendicular al trayecto de la corriente a través del cable, el trabajo, el arco y el electrodo.

Si el golpe del arco no es demasiado severo, hay varias medidas correctivas que pueden tomarse para eliminarlo, o por lo menos reducir su severidad. Quizá sea necesario tomar algunas de las siguientes medidas, o todas:

- (1) Coloque las conexiones con la pieza de trabajo lo más lejos posible de las uniones que vaya a soldar.
- (2) Si el problema es un golpe hacia atrás, coloque la conexión con la pieza de trabajo al principio de la soldadura, y suelde hacia una soldadura provisional gruesa.
- (3) Si hay problema por golpe hacia adelante, coloque la conexión con la pieza de trabajo al final de la unión que va a soldar.
- (4) Sitúe el electrodo de modo que la fuerza del arco se oponga al golpe del arco.
- (5) Emplee el arco más corto posible que se ajuste a las prácticas de soldadura recomendadas. Esto ayudará a que la fuerza del arco contrarreste el golpe.
- (6) Reduzca la corriente de soldadura.
- (7) Suelde hacia una soldadura provisional gruesa o una pestaña de escurrimiento.
- (8) Emplee la secuencia de soldadura de paso hacia atrás.
- (9) Cambie a ca, lo que puede requerir un cambio de clasificación de electrodo.
- (10) Enrolle el cable de trabajo alrededor de la pieza de trabajo en dirección tal que el campo magnético creado contrarreste el campo magnético que causa el golpe del arco.

CALIDAD DE LA SOLDADURA

LA UNIÓN SOLDADA debe tener las cualidades necesarias para desempeñar su función esperada en servicio. Para ello, la unión ha de poseer las propiedades físicas y mecánicas requeridas, y para esto pueden ser necesarias cierta microestructura y composición química. También son importantes el tamaño y la forma de la soldadura, así como la integridad de la unión. Tal vez se necesite resistencia a la corrosión. En todos estos aspectos influyen los materiales base, los materiales de soldadura y la manera de soldar.

La soldadura por arco de metal protegido es un proceso manual, y la calidad de la unión depende de la habilidad del soldador que la produce. Por esta razón, es preciso seleccionar

con cuidado los materiales que se usarán, el soldador debe ser apto, y el procedimiento que use debe ser el correcto.

Las uniones soldadas, por su naturaleza, contienen discontinuidades de diversos tipos y tamaños. Por debajo de cierto nivel aceptable, éstas no se consideran perjudiciales; por encima de ese nivel, se consideran defectos. El nivel de aceptación puede variar con la severidad de las condiciones de servicio, pero lo más común es que se base en requisitos de los contratos de fabricación o en un código o especificación determinados.

En las soldaduras hechas con el proceso SMAW a veces se encuentran las siguientes discontinuidades:

- (1) Porosidad.
- (2) Inclusiones de escoria.
- (3) Fusión incompleta.
- (4) Socavamiento.
- (5) Grietas.

POROSIDAD

ESTE TÉRMINO SE emplea para describir las bolsas de gas o huecos en el metal de soldadura. Estos huecos son el resultado de la formación de gases por ciertas reacciones químicas que ocurren durante la soldadura. Contienen gas en vez de sólidos, y en este sentido se distinguen de las inclusiones de escoria.

Por lo regular, la porosidad puede prevenirse empleando el amperaje apropiado y manteniendo un arco con la longitud correcta. En muchos casos también resultan útiles los electrodos secos. Si se emplea una corriente elevada o un arco largo, los desoxidantes que un electrodo cubierto requiere se pierden fácilmente durante la deposición; la cantidad que queda no basta para desoxidar debidamente el metal derretido.

INCLUSIONES DE ESCORIA

ESTE TÉRMINO SE emplea para describir los óxidos y sólidos no metálicos que a veces quedan atrapados en el metal de soldadura entre franjas adyacentes o entre el metal de soldadura y el metal base. Durante la deposición y subsecuente solidificación del metal de soldadura, tienen lugar muchas reacciones químicas. Algunos de los productos de estas reacciones son compuestos no metálicos sólidos insolubles en el metal fundido. En virtud de su menor peso específico relativo, estos compuestos flotarán sobre el metal derretido si es que no quedan atrapados dentro de él.

La acción de agitación del arco puede hacer que la escoria que se forma a partir de la cobertura de los electrodos de arco de metal protegido se meta debajo de la superficie del metal derretido. También, si el soldador no es cuidadoso, la escoria puede fluir hacia adelante del arco. Es fácil que suceda esto cuando se suelda sobre la grieta entre dos franjas paralelas pero convexas o entre una franja convexa y una pared lateral del surco. También puede ocurrir cuando se suelda pendiente abajo. En tales casos, el metal derretido puede fluir por encima de la escoria, atrapándola debajo de la franja. Los factores que propician esto son una escoria muy viscosa o que se solidifica con rapidez, o una corriente de soldadura insuficiente.

La mayor parte de las inclusiones de escoria puede prevenirse con una buena práctica de soldadura y, en áreas problema, preparando debidamente el surco antes de depositar la siguiente franja de metal de soldadura. En estos casos, debe tenerse cuidado de corregir los perfiles que sean difíciles de penetrar como es debido con el arco.

FUSIÓN INCOMPLETA

ESTE TÉRMINO, EN el sentido que se le da aquí, se refiere a la incapacidad para fusionar franjas adyacentes de metal de soldadura, o el metal de soldadura con el metal base. Se puede tratar de una condición localizada o generalizada, y puede ocurrir en cualquier lugar del surco de soldadura. Incluso puede ocurrir en la raíz de la unión.

La fusión incompleta puede deberse a que el metal base (o la franja de metal de soldadura previamente depositada) no se elevó al punto de fusión. La causa también puede ser que, por carencia de fundente, no se disolvieron los óxidos o demás materiales extraños que podrían estar presentes en la superficie que debe fusionarse con el metal de soldadura.

La fusión incompleta puede evitarse asegurándose de que las superficies por soldar estén debidamente preparadas y embonadas, y que estén lisas y limpias. En el caso de fusión incompleta en la raíz, las correcciones deben asegurar que la cara de la raíz no sea demasiado grande, que la abertura de la raíz no sea demasiado angosta, que el electrodo no sea demasiado grande, que la corriente de soldadura no sea demasiado baja y que la velocidad de recorrido no sea demasiado rápida.

SOCAVAMIENTO

ESTE TÉRMINO SE usa para describir una de dos situaciones. La primera es cuando se derrite la pared lateral de un surco de soldadura en el borde de la franja, con la formación de un nicho agudo en la pared lateral en el área donde se va a depositar la siguiente franja. La otra es cuando se reduce el espesor del metal base en la línea donde las franjas de la capa final de metal de soldadura se ligan a la superficie del metal base (esto es, en el pie de la soldadura).

Ambos tipos de socavamiento suelen deberse a la técnica de soldadura específica empleada por el operador. Si el amperaje es elevado y el arco largo, aumenta la tendencia al socavamiento. Otras causas son una posición incorrecta del electrodo o una velocidad de recorrido inadecuada, así como tardarse demasiado en los cambios de dirección de una soldadura "tejada" (zigzagante). Incluso el tipo de electrodo influye sobre este fenómeno. Las distintas clasificaciones de electrodos presentan características muy diversas en este respecto. Con algunos electrodos, incluso el soldador más habilidoso podría verse imposibilitado para evitar por completo el socavamiento en ciertas posiciones de soldadura, sobre todo en uniones con acceso restringido.

El socavamiento de las paredes laterales de un surco de soldadura no afecta en absoluto la soldadura terminada si se elimina antes de depositar en ese sitio la siguiente franja. Se requerirá una herramienta de raspado bien redondeada o una piedra de amolar para eliminar el socavamiento. Sin embargo, si el socavamiento no es profundo, un soldador experimentado que sepa hasta dónde va a penetrar el arco posiblemente no tenga que eliminar el socavamiento.

El grado de socavamiento que se permite en una soldadura terminada por lo regular está determinado por el código de fabricación empleado, y es necesario seguir los requisitos especificados porque un socavamiento excesivo puede reducir apreciablemente la resistencia mecánica de la unión. Esto es aún más importante en aplicaciones sujetas a fatiga. Por fortuna, este tipo de socavamiento puede detectarse mediante un examen visual de la soldadura terminada, y puede corregirse mediante abrasión de fusión o depositando una franja adicional.

GRIETAS

EL AGRIETAMIENTO DE las uniones soldadas puede clasificarse como agrietamiento en caliente o en frío. Pueden producirse grietas en el metal de soldadura, en el metal base, o en ambos.

Si se observa agrietamiento durante la soldadura, las grietas deberán eliminarse antes de seguir soldando, porque si se deposita metal de soldadura sobre una grieta ésta puede continuar hacia la franja recién depositada.

El agrietamiento en caliente es una función de la composición química, y su causa principal es la presencia en el metal de soldadura de constituyentes con punto de fusión relativamente bajo, los cuales se acumulan en las fronteras de los granos durante la solidificación. Un ejemplo típico es el sulfuro de hierro en aceros. Las grietas son intergranulares o interdendríticas, y se forman conforme el metal de soldadura se enfría. Al avanzar la solidificación en el metal de soldadura, los esfuerzos de encogimiento aumentan hasta que llega un momento en que los granos que todavía tienen algo de líquido en sus fronteras se separan. Las estructuras de grano grueso, de una sola fase, son muy propensas a este tipo de agrietamiento. Entre las soluciones aplicables a los problemas de agrietamiento están:

(1) Cambiar el metal base (por ejemplo, usar un acero con adiciones de manganeso, o uno producido de modo que tenga una estructura de grano fino).

(2) Cambiar el metal de aporte (por ejemplo, usando metal de aporte con suficiente ferrita al soldar acero inoxidable austenítico).

(3) Modificar la técnica/procedimiento de soldadura ajustando las temperaturas de precalentamiento y entre pasadas, y reduciendo la corriente de soldadura.

El agrietamiento en frío se debe a falta de ductilidad o a la presencia de hidrógeno en aceros endurecibles. La causa de esta condición es una tenacidad insuficiente en presencia de muesca mecánica o metalúrgica y esfuerzos de cierta magnitud. En algunos materiales los esfuerzos no tienen que ser muy elevados, por ejemplo en acero inoxidable ferrítico de granos grandes.

Para evitar el agrietamiento en frío de aceros endurecibles es preciso emplear electrodos de bajo hidrógeno secos y un precalentamiento adecuado. También se requiere precalentamiento con materiales que naturalmente son quebradizos o de baja tenacidad. Los materiales propensos a un crecimiento excesivo de los granos (como el acero con 28% de cromo) deben soldarse con un aporte de calor bajo manteniendo bajas las temperaturas entre pasadas. También deben evitarse las muescas.

Si se desea mayor información al respecto, la publicación de la AWS, *Welding Inspection*, es una buena referencia.

RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD

EL OPERADOR DEBE protegerse los ojos y la piel de la radiación producida por el arco. Se recomienda usar una careta de soldador con un filtro ocular adecuado, así como ropa oscura, preferiblemente de lana, para proteger la piel. Conviene usar guantes y ropa de cuero para protegerse contra las quemaduras por las salpicaduras del arco.

Las caretas de soldador cuentan con ventanas con filtros cuyo tamaño estándar es de 51 por 130 mm (2 por 4-1/8 pulg), aunque las hay con aberturas más grandes. La placa del filtro deberá ser capaz de absorber rayos infrarrojo, rayos ultravioleta y la mayor parte de los rayos visibles que emanan del arco. Ya hay filtros que absorben el 99% o más de los rayos infrarrojo y ultravioleta del arco.

El tono de filtro que se sugiere emplear con electrodos de hasta 4 mm (5/32 pulg) de diámetro es el número 10. Para electrodos de 4.8 a 6.4 mm (3/16 a 1/4 pulg), se recomienda usar la sombra número 12. El número 14 es el más apropiado para electrodos de más de 6.4 mm (1/4 pulg).

La placa del filtro debe protegerse contra salpicaduras de metal derretido y contra rotura. Esto se hace colocando una placa de vidrio transparente, u otro material apropiado, a cada lado de la placa de filtro. Las personas que no sean soldadores pero que trabajen cerca del arco también deben protegerse. Esta protección por lo regular consiste en escudos permanentes o portátiles. Si no se utiliza una protección adecuada el resultado puede ser quemaduras oculares del operador o de quienes trabajan cerca del arco. La quemadura ocular, similar a las quemaduras de la piel por el sol, es muy dolorosa durante

un periodo de 24 a 48 horas. La piel no protegida expuesta al arco también puede quemarse. En caso de quemaduras severas por el arco, sean de la piel o de los ojos, debe consultarse al médico.

Si se suelda en espacios cerrados con poca ventilación, es preciso suministrar aire auxiliar al soldador. Esto debe hacerse mediante un aditamento sujeto a la careta.

El método empleado no debe restringir la manipulación de la careta por parte del soldador, interferir el campo de visión de éste, ni dificultar la soldadura. En ANSI Z49.1, *Seguridad al soldar y cortar*, publicada por la American Welding Society, se proporciona mayor información sobre la protección ocular y la ventilación.

De vez en cuando durante la soldadura, chispas o glóbulos de metal derretido salen despedidos del arco. Esto siempre amerita atención, pero adquiere mayor importancia cuando se suelda fuera de posición o cuando se emplean corrientes de soldadura muy elevadas. Para protegerse de las quemaduras en estas condiciones, el soldador debe usar guantes resistentes al fuego, un delantal protector y una chaqueta (véase la figura 2.5). También puede ser conveniente proteger los tobillos y pies del soldador contra la escoria y las salpicaduras. Se recomiendan pantalones sin doblez y zapatos de trabajo altos o botas.

A fin de evitar choques eléctricos, el operador nunca debe soldar si está parado en una superficie húmeda. El equipo debe examinarse periódicamente para verificar que no haya grietas ni lugares desgastados en el portaelectrodos ni en el aislante de los cables.

LISTA DE LECTURAS COMPLEMENTARIAS

American Society for Metals. "Welding, brazing, and Soldering", en *Metals Handbook*, vol. 6, 9ª ed., 75-95. Metals Park, Ohio, American Society for Metals, 1983.

Barbin, L. M. "The new moisture resistant electrodes", en *Welding Journal* 56(7): 15-18; julio de 1977.

Chew, B. "Moisture loss and gain by some basic flux covered electrodes", en *Welding Journal* 55(5): 127s-134s; mayo de 1976.

Gregory, E. N. "Shielded metal arc welding of galvanized steel", en *Welding Journal* 48(8): 631-638; agosto de 1969.

Jackson, C. E. "Fluxes and slags in welding". Bulletin 190. Nueva York, Welding Research Council, diciembre de 1973.

Lincoln Electric Company. *The procedure handbook of arc welding*, 12ª ed. Cleveland, Lincoln Electric Company, 1973.

Silva, E. A. y Hazlett, T. H. "Shielded metal arc welding underwater with iron powder electrodes", en *Welding Journal* 50(6): 406s-415s; junio de 1971.

Stout, R. D., y Doty, W. D. *Weldability of Steels*, 2ª ed., Epstein, S., y Somers, R. E. (comps.), Nueva York, Welding Research Council, 1971.

SOLDADURA POR ARCO DE TUNGSTENO Y GAS

PREPARADO POR UN
COMITÉ INTEGRADO POR:

G. K. Hicken, Presidente
Sandia National Labs

R. D. Campbell
E. G. & G. Rocky Flats

G. I. Daumeyer, III
Allied Signal Aerospace

R. B. Madigan
Edison Welding Institute

S. J. Marburger
Sandia National Labs

B. Young
*Westinghouse Savannah River
Company*

MIEMBRO DEL COMITÉ DEL
MANUAL DE SOLDADURA:

M. I. Tomsic
Plastronic Incorporated

Introducción	74
Principios de funcionamiento	75
Equipo	77
Técnicas de GTAW	94
Materiales	98
Diseño de las uniones	101
Calidad de la soldadura	102
Aplicaciones	103
Prácticas seguras	105
Lista de lecturas complementarias	106

SOLDADURA POR ARCO DE TUNGSTENO Y GAS

INTRODUCCIÓN

LA SOLDADURA POR arco de tungsteno y gas (*gas tungsten arc welding, GTAW*) es un proceso de soldadura por arco que utiliza un arco entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y el charco de soldadura. El proceso se emplea con un gas protector y sin aplicación de presión. La adición de metal de aporte es opcional. La figura 3.1 muestra el proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas.

El proceso GTAW se ha vuelto una herramienta indispensable en muchas industrias en virtud de la alta calidad de las soldaduras producidas y del bajo costo del equipo. El propósito del presente capítulo es presentar los fundamentos del proceso GTAW, el equipo y los consumibles empleados, los procedi-

mientos y variables del proceso, sus aplicaciones y consideraciones de seguridad.

La posibilidad de utilizar helio para proteger un arco de soldadura y el charco de metal fundido se investigó por primera vez en la década de 1920.¹ Sin embargo, nada se hizo con este método hasta el comienzo de la Segunda Guerra Mundial, cuando en la industria de los aviones se hizo imperativo encontrar una forma de unir materiales reactivos como el aluminio y el magnesio sin emplear remaches. Con la ayuda de un electrodo de tungsteno y potencia de arco de corriente continua con el electrodo negativo, se logró producir una fuente de calor estable y eficiente con la que se podían realizar soldaduras excelentes.

I. H. M. Hobart, Patente de EE.UU. 1,746,081, 1926 y P. K. Devers, Patente de EE.UU. 1,746,191, 1926.

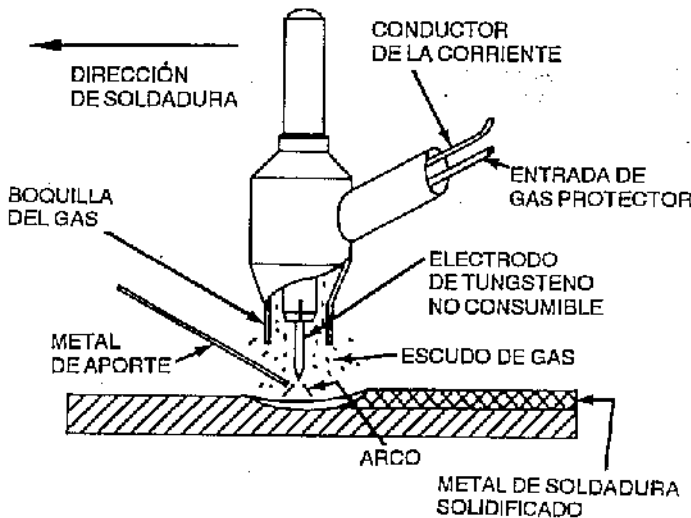


Figura 3.1—Operación de soldadura por arco de tungsteno y gas

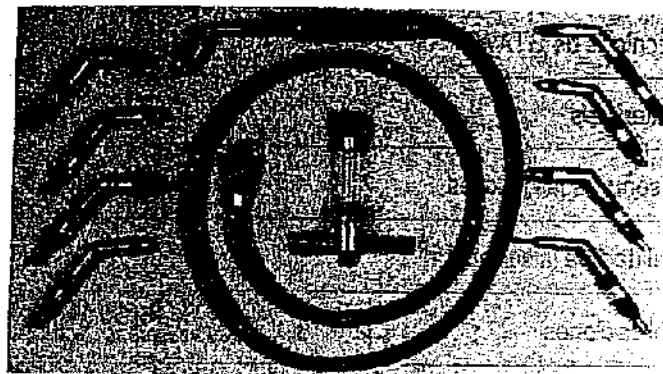


Figura 3.2—Algunas de las primeras cabezas para soldadura por arco de tungsteno y gas, de alrededor de 1943, con un cuerpo de soplete y un medidor de flujo primitivo

Se escogió el helio para crear la protección necesaria porque, en esa época, era el único gas inerte disponible en abundancia. En la figura 3.2 se muestran sopletes de electrodo de tungsteno con gas inerte típicas de ese periodo.² El proceso ha recibido también los nombres de soldadura con electrodo no consumible y soldadura con tungsteno y gas inerte (TIG), pero la terminología de la AWS para este proceso es soldadura por arco de tungsteno y gas (GTAW) porque en algunas aplicaciones es posible usar mezclas de gases protectoras que no son inertes.

Desde que se inventó el proceso, se han hecho numerosas mejoras a los procedimientos y al equipo. Se han creado fuentes

de potencia de soldadura específicamente para el proceso. Algunas suministran potencia de cc a pulsos y ca de polaridad variable. Se inventaron sopletes enfriados por agua y enfriados por gas. El electrodo de tungsteno se ha aleado con cantidades pequeñas de elementos activos para aumentar su emisividad; con esto ha mejorado el encendido del arco, la estabilidad del arco y la durabilidad de los electrodos. Se han identificado mezclas de gases protectoras que mejoran el rendimiento de la soldadura. Los investigadores están tratando de lograr otros avances en las áreas de control automático, visión y sensores de penetración, y controles de longitud del arco.

PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

EL PROCESO DE soldadura por arco de tungsteno y gas se ilustra en la figura 3.1. El proceso utiliza un electrodo de tungsteno (o de una aleación de tungsteno) no consumible sostenido en un soplete. Se alimenta gas protector por el soplete para proteger el electrodo, el charco de soldadura y el metal de soldadura en proceso de solidificación de contaminación por parte de la atmósfera. El arco eléctrico se produce por el paso de corriente a través del gas protector ionizado, que conduce la electricidad. El arco se establece entre la punta del electrodo y el trabajo. El calor generado por el arco funde el metal base. Una vez establecido el arco y el charco de soldadura, el soplete se mueve a lo largo de la unión y el arco funde progresivamente las superficies de empalme. Si se usa alambre de aporte, se alimenta por el borde delantero del charco de soldadura para llenar la unión.

Todas las configuraciones de GTAW tienen en común cuatro componentes básicos, como puede verse en las figuras 3.1 y 3.3:

- (1) Soplete.
- (2) Electrodo.
- (3) Fuente de potencia para soldadura.
- (4) Gas protector.

VENTAJAS DEL PROCESO

ÉSTAS SON ALGUNAS de las ventajas del proceso de arco de tungsteno y gas:

- (1) Produce soldaduras de muy buena calidad, generalmente libres de defectos.
- (2) Está libre de las salpicaduras que ocurren con otros procesos de soldadura por arco.
- (3) Puede usarse con metal de aporte o sin él, según lo requiera la aplicación específica.
- (4) Ofrece un control excelente de la penetración de la pasada de raíz.
- (5) Puede producir soldaduras autógenas económicas a altas velocidades.
- (6) Puede usar fuentes de potencia de costo relativamente bajo.
- (7) Permite controlar de manera precisa las variables de soldadura.

(8) Puede servir para soldar casi todos los metales, incluso las uniones de metales disímiles.

(9) Permite controlar en forma independiente la fuente de calor y las adiciones de metal de aporte.

LIMITACIONES DEL PROCESO

ALGUNAS DE LAS limitaciones del proceso de arco de tungsteno y gas son:

(1) Las tasas de deposición son más bajas que las que pueden alcanzarse con procesos de soldadura por arco con electrodo consumible.

(2) El soldador requiere un poco más de destreza y coordinación que con la soldadura por arco de metal y gas o la de arco de metal protegido cuando suelda manualmente.

(3) Para secciones de más de 10 mm (3/8 pulg) de espesor, resulta menos económica que los procesos de soldadura por arco con electrodo consumible.

(4) Es difícil proteger debidamente la zona de soldadura en lugares donde hay corrientes de aire.

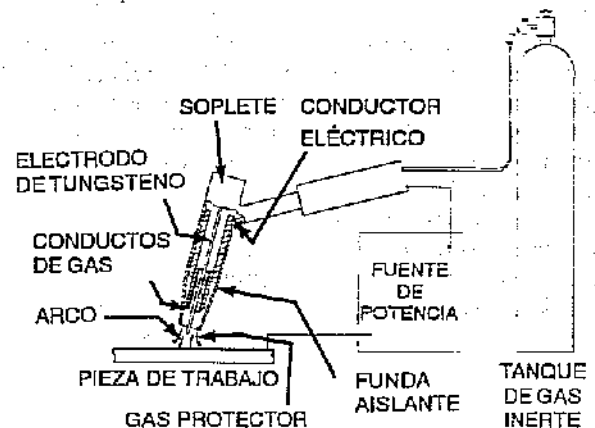


Figura 3.3—Disposición del equipo para soldadura por arco de tungsteno y gas

2. R. Meredith, Patente de EE.UU. 2,274,631.

Entre los problemas potenciales del proceso están:

- (1) Puede haber inclusiones de tungsteno si se permite que el electrodo haga contacto con el charco de soldadura.
- (2) El metal de soldadura puede contaminarse si no se mantiene como es debido el escudo de gas protector alrededor del metal de aporte.
- (3) No se tolera mucha contaminación de los metales base o de aporte.
- (4) Puede haber contaminación o porosidad causadas por fugas del refrigerante en sopletes enfriados por agua.
- (5) Puede haber golpe o desviación del arco, como en otros procesos.

VARIABLES DEL PROCESO

Las principales variables en el proceso GTAW son el voltaje del arco (longitud del arco), la corriente de soldadura, la velocidad de recorrido y el gas protector. La cantidad de energía producida por el arco es proporcional a la corriente y al voltaje. La cantidad transferida por unidad de longitud de soldadura es inversamente proporcional a la velocidad de recorrido. El arco en helio es más penetrante que en argón. Sin embargo, como todas estas variables tienen fuertes interacciones, es imposible tratarlas como variables independientes al establecer los procedimientos de soldadura para uniones específicas.

Corriente del arco

EN TÉRMINOS GENERALES, la corriente del arco controla la penetración de la soldadura; su efecto es directamente proporcional, si no es que un poco exponencial. Además, la corriente del arco afecta el voltaje: si se mantiene constante la longitud del arco, su voltaje aumentará en proporción con la corriente. Por esta razón, si se desea mantener una longitud de arco fija, es preciso ajustar también el voltaje cuando se ajusta la corriente.

El proceso puede usarse con corriente tanto continua como alterna, y la elección depende en buena parte del metal que se va a soldar. La corriente continua con el electrodo negativo ofrece las ventajas de penetración profunda y velocidades de soldadura altas, sobre todo cuando se usa escudo de helio. El helio es el gas preferido para la soldadura mecanizada. La corriente alterna tiene una acción de limpieza catódica (chisporroteo) que elimina óxidos refractarios de las superficies de unión de aluminio y magnesio, lo que permite obtener soldaduras de muy buena calidad. En este caso es preciso usar argón como gas protector porque no puede lograrse chisporroteo con helio. El argón es el gas preferido para la soldadura manual, sea que se utilice con corriente alterna o continua.

Existe una tercera opción en cuanto a la potencia: usar corriente continua con el electrodo positivo. Esta polaridad casi nunca se usa porque hace que se sobrecaliente el electrodo. Estos efectos de la polaridad se explicarán con mayor detalle más adelante, en la sección sobre corriente continua.

Voltaje del arco

EL VOLTAJE MEDIDO entre el electrodo de tungsteno y el trabajo se conoce comúnmente como *voltaje del arco*. Este voltaje

es una variable muy dependiente, que acusa efectos por lo siguiente:

- (1) Corriente del arco.
- (2) Forma de la punta del electrodo de tungsteno.
- (3) Distancia entre el electrodo de tungsteno y el trabajo.
- (4) Tipo de gas protector.

El voltaje del arco cambia cuando cambian las otras variables, y sólo se utiliza para describir los procedimientos de soldadura porque es fácil de medir. Como las demás variables, como el gas protector, el electrodo y la corriente se determinan previamente, el voltaje del arco puede servir para controlar la longitud del arco, una variable crítica que es difícil de vigilar. La longitud del arco es importante en este proceso porque afecta la anchura del charco de soldadura; la anchura del charco es proporcional a la longitud del arco. Por tanto, en casi todas las aplicaciones con excepción de aquellas en las que se suelda lámina, la longitud de arco recomendada es la más corta posible.

Desde luego, hay que tener en cuenta la posibilidad de que el electrodo haga cortocircuito con el charco o con el metal de aporte si el arco es demasiado corto. Sin embargo, en la soldadura mecanizada con escudo de helio, potencia CCEN y corriente relativamente alta, es posible sumergir la punta del electrodo por debajo de la superficie de la placa y producir soldaduras muy penetrantes pero angostas a altas velocidades. Esta técnica ha recibido el nombre de *arco enterrado*.

Si se usa el voltaje del arco para controlar la longitud del arco en aplicaciones críticas, hay que vigilar las otras variables que afectan el voltaje del arco. Entre ellas están los contaminantes del electrodo y del gas protector, una alimentación incorrecta del alambre de aporte, cambios de temperatura en el electrodo y corrosión del electrodo. Si cualquiera de estas cosas cambia lo suficiente como para afectar el voltaje del arco durante la soldadura mecanizada, habrá que ajustar la longitud del arco para restablecer el voltaje deseado.

Velocidad de recorrido

LA VELOCIDAD DE recorrido afecta tanto la anchura como la penetración de una soldadura por arco de tungsteno y gas, aunque el efecto sobre la anchura es más pronunciado que aquel sobre la penetración. La velocidad de recorrido es importante por su efecto sobre el costo. En algunas aplicaciones, la velocidad de recorrido se define como un objetivo, y las demás variables se seleccionan de modo que se logre la configuración de soldadura deseada a esa velocidad. En otros casos, la velocidad podría ser una variable dependiente, elegida de modo que se obtenga una soldadura con la calidad y uniformidad deseada en las mejores condiciones posibles con la combinación de las demás variables. Independientemente de los objetivos, en la soldadura mecanizada casi siempre se fija la velocidad de recorrido y se modifican otras variables como la corriente o el voltaje para mantener el control de la soldadura.

Alimentación del alambre

EN LA SOLDADURA manual, la forma como el metal de aporte se añade al charco influye sobre el número de pasadas necesarias y el aspecto de la soldadura terminada.

En la soldadura mecanizada y automática, la velocidad de alimentación del alambre determina la cantidad de metal de aporte depositada por unidad de longitud de la soldadura. Si se reduce la velocidad de alimentación del alambre, se incrementará la penetración y se aplanará el perfil de la franja. Si el

alambre se alimenta con demasiada lentitud, puede haber socavamiento, agrietamiento de la línea central y subrellenado de la unión. Al aumentarse la velocidad de alimentación del alambre se reduce la penetración de la soldadura y se produce una franja más convexa.

EQUIPO

EL EQUIPO PARA GTAW incluye sopletes, electrodos y fuentes de potencia. Los sistemas de GTAW mecanizada pueden incluir controles de voltaje del arco, osciladores del arco y alimentadores de alambre.

SOPLETES PARA SOLDAR

LOS SOPLETES DE GTAW sostienen el electrodo de tungsteno que transporta la corriente de soldadura al arco y conducen el gas protector a la zona del arco.

Las especificaciones de los sopletes se refieren a la corriente de soldadura máxima que pueden transportar sin sobrecalentarse. En la tabla 3.1 se dan los intervalos de corriente típicos. La mayor parte de los sopletes está diseñada para manejar electrodos dentro de cierto intervalo de tamaños y diferentes tipos y tamaños de boquillas.

Casi todos los sopletes para aplicaciones manuales tienen un ángulo de cabeza (el ángulo entre el electrodo y el mango) de 120°. También hay sopletes con cabeza de ángulo ajustable, cabeza a 90° o cabeza en línea recta (tipo lápiz). Los sopletes de GTAW manuales a menudo cuentan con interruptores y válvulas auxiliares integradas a su mango para controlar la corriente y el flujo de gas. Los sopletes para GTAW mecanizada o automática por lo regular se montan en un dispositivo que centra el soplete sobre la unión, puede desplazar el soplete a lo largo de la unión, y puede modificar o mantener la distancia entre el soplete y el trabajo.

Sopletes enfriados por gas

EL CALOR GENERADO en el soplete durante la soldadura se elimina mediante enfriamiento por gas o bien por agua. Los sopletes enfriados por gas (o, como a veces se dice, enfriados por aire) eliminan el calor por medio del flujo del gas protector,

relativamente frío, a través del soplete, como se muestra en la figura 3.1. Los sopletes enfriados por gas están limitados a una corriente de soldadura máxima de unos 200 amperes.

Sopletes enfriados por agua

LOS SOPLETES ENFRIADOS por agua eliminan el calor mediante el flujo continuo de agua a través de conductos interiores. Como se aprecia en la figura 3.4, el agua de enfriamiento entra en el soplete a través de la manguera de entrada, circula por el soplete y sale por la manguera de salida. Por lo regular, el cable procedente de la fuente de potencia se coloca en el interior de la manguera de salida del agua.

Los sopletes enfriados por agua están diseñados para usarse con corrientes de soldadura en un ciclo de trabajo continuo más altas que los sopletes enfriados por gas de tamaño similar. Por lo regular es posible usar corrientes de 300 a 500 amperes, aunque se han construido sopletes capaces de manejar corrientes de soldadura de hasta 1000 amperes. En la mayor parte de las aplicaciones mecanizadas o automáticas se emplean sopletes enfriados por agua.

Estos sopletes normalmente se enfrían con agua de la llave que fluye a través del soplete y luego se desecha al desagüe. Si se desea ahorrar agua, es posible usar un sistema cerrado que incluye un tanque, una bomba y un radiador o enfriador de agua para dispersar el calor del sistema. La capacidad de estos sistemas va desde uno a 50 galones. Se puede agregar anticongelante de automóvil al líquido de enfriamiento para evitar el congelamiento y la corrosión y al mismo tiempo lubricar la bomba de agua.

Mandriles

LOS ELECTRODOS DE diferentes diámetros se sujetan en el porta-electrodos por medio de mandriles del tamaño apropiado, típicamente fabricados con una aleación de cobre. El mandril sujeta el electrodo cuando se aprieta la tapa del soplete. Es indispensable que el electrodo y la superficie interior del mandril estén en contacto íntimo para una buena transferencia de la corriente sin sobrecalentamiento.

Boquillas

EL GAS PROTECTOR se dirige a la zona de soldadura mediante boquillas o copas que se montan en la cabeza del soplete, como se muestra en la figura 3.1. El cuerpo del soplete también incluye difusores o espreas de patrón muy preciso que alimentan el gas protector a la boquilla. Su propósito es ayudar a que el escudo de gas que sale tenga un flujo laminar. Las boquillas de gas se

Tabla 3.1
Especificaciones de corriente típicas para sopletes de GTAW enfriados con gas y con aire

Característica del soplete	Tamaño del soplete		
	Pequeño	Mediano	Grande
Corriente máxima (trabajo continuo), A	200	200-300	500
Método de enfriamiento	Gas	Agua	Agua
Diámetros de electrodo manejados, pulg	0.020-3/32	0.040-5/32	0.040-1/4
Diámetros de copa de gas manejados, pulg	1/4 - 5/8	1/4 - 3/4	3/8 - 3/4

fabrican con diversos materiales resistentes al calor y con distintas formas, diámetros y longitudes. Estas boquillas se atornillan al soplete o bien se ensartan y sujetan por fricción.

Materiales de la boquilla. Las boquillas se fabrican con cerámicas, cerámicas con funda metálica, cuarzo fusionado u otros materiales. Las boquillas de cerámica son las más económicas y populares, pero son quebradizas y deben reemplazarse con frecuencia. Las boquillas de cuarzo fusionado son transparentes y ofrecen una mejor vista del arco y del electrodo. Sin embargo, la contaminación con vapores metálicos de la soldadura puede hacer que se vuelvan opacas, y además son quebradizas. Las boquillas metálicas enfriadas por agua son las más duraderas y se emplean principalmente en aplicaciones de soldadura mecanizada y automática en las que las corrientes de soldadura exceden los 250 A.

Tamaños y formas de las boquillas. La boquilla o copa de gas debe ser lo bastante grande como para cubrir con gas protector el área del chorro de soldadura y el metal base caliente circundante. El diámetro de la boquilla debe ser apropiado para el volumen de gas protector que se requiere para dar la protección necesaria con la suficiente rigidez para mantener la cobertura cuando hay corrientes de aire. Hay un equilibrio delicado entre el diámetro de la boquilla y la tasa de flujo. Si la tasa de flujo para un diámetro dado es excesiva, el escudo dejará de ser

eficiente a causa de la turbulencia. Para mantener una tasa de flujo elevada sin turbulencia se requiere un diámetro grande; éstas son condiciones esenciales cuando el amperaje es alto. La selección del tamaño depende del tamaño del electrodo, el tipo de unión por soldar, el área de soldadura que debe protegerse efectivamente y el acceso a la unión que se va a soldar.

En la tabla 3.2 se dan los tamaños de copa de gas sugeridos para electrodos de diversos diámetros. El empleo de la boquilla más pequeña sugerida permite soldar en áreas más restringidas y ofrece una mejor visión de la soldadura. Sin embargo, si se usa una boquilla demasiado chica, puede haber turbulencia y formación de chorros del gas protector, e incluso puede fundirse el borde de la boquilla. Las boquillas más grandes ofrecen mejor protección, sobre todo al soldar metales reactivos como el titanio.

Hay boquillas de diversas longitudes diseñadas para soldar uniones con geometrías específicas y mantener la distancia requerida entre la boquilla y el trabajo. En general, las boquillas más largas producen escudos de gas más rígidos y menos turbulentos.

La mayor parte de las boquillas para gas tiene forma cilíndrica con extremos rectos o ahusados. Hay boquillas con construcción interna aerodinámica que minimizan la turbulencia del gas protector, y con secciones posteriores alargadas o extremos abocinados que ofrecen mejor protección al soldar metales como el titanio, que es muy susceptible a la contaminación a temperaturas elevadas.

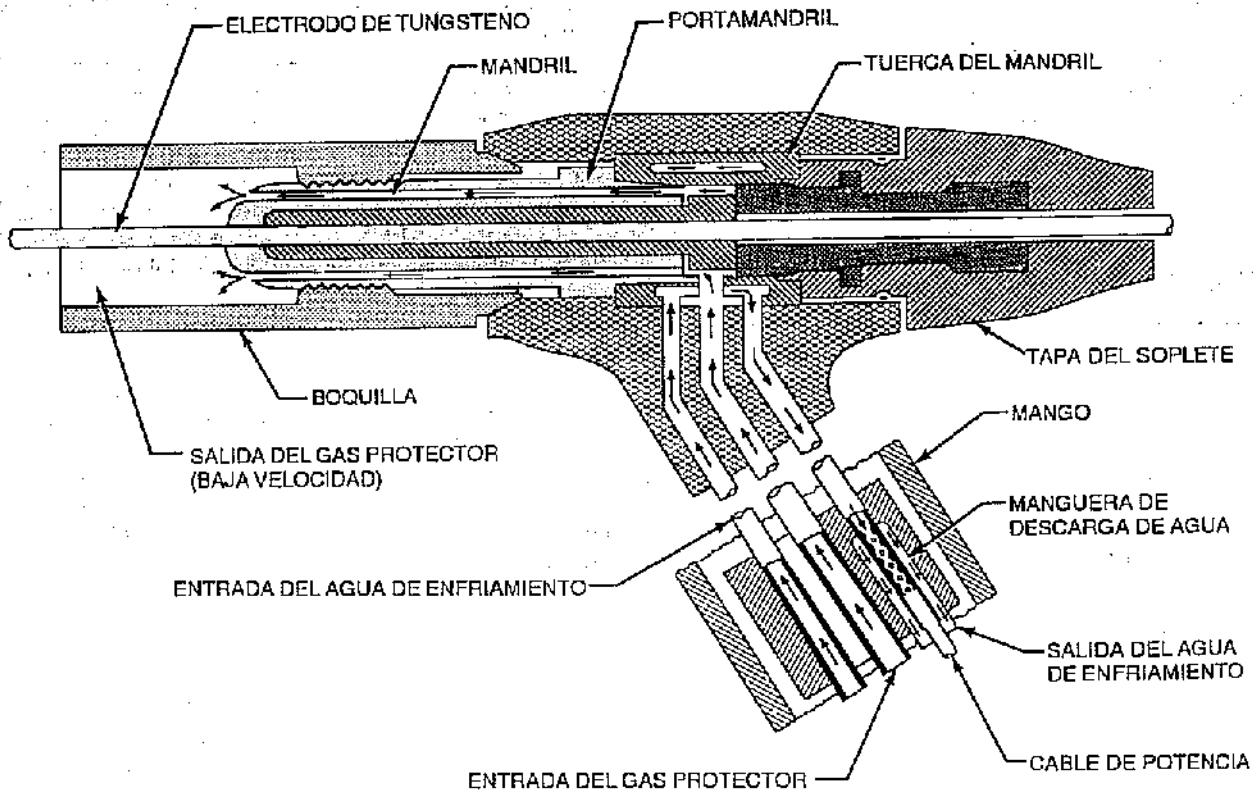


Figura 3.4—Corte seccional de un soplete enfriado por agua típico para GTAW manual

Lentes de gas. Un dispositivo que se emplea para asegurar un flujo laminar del gas protector es un aditamento conocido como *lente de gas*. Los lentes de gas contienen un difusor de barrera porosa y están diseñados para insertarse alrededor del electrodo o del mandril. Estos lentes producen un flujo más largo y uniforme del gas protector y permiten a los operadores soldar con la boquilla a 25 mm (1 pulg) o más del trabajo, lo que mejora su capacidad para ver el charco de soldadura y alcanzar lugares con acceso limitado como las esquinas interiores.

ELECTRODOS

EN GTAW LA palabra *tungsteno* se refiere al elemento tungsteno puro y a las diferentes aleaciones de tungsteno empleadas como electrodos. Los electrodos de tungsteno son no consumibles si el proceso se emplea como es debido, ya que no se derriten ni se transfieren a la soldadura. En otros procesos, como SMAW, GMAW y SAW, el electrodo es el metal de aporte. La función del electrodo de tungsteno es servir como una de las terminales eléctricas del arco que proporciona el calor necesario para

soldar. El punto de fusión del tungsteno es 3410°C (6170°F), y cuando se acerca a esta temperatura se vuelve termoiónico; es decir, es una fuente abundante de electrones. El electrodo alcanza esta temperatura gracias al calentamiento por resistencia y, de no ser por el considerable efecto de enfriamiento de los electrones que se desprenden de su punta, dicho calentamiento haría que se fundiera la punta. De hecho, la punta del electrodo tiene una temperatura mucho menor que la parte que está entre la punta y el mandril con enfriamiento externo.

Clasificación de los electrodos

LOS ELECTRODOS DE tungsteno se clasifican con base en su composición química, como se especifica en la tabla 3.3. Los requisitos para los electrodos de tungsteno se dan en la edición más reciente de ANSI/AWS A5.12, *Especificación para electrodos de tungsteno y de aleación de tungsteno para soldadura y corte por arco*. El sistema de identificación por código de color de las diversas clases de electrodos de tungsteno se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.2
Electrodos de tungsteno y copas de gas recomendados* para diversas corrientes de soldadura

Diámetro del electrodo		Diám. int. copa de gas	Corriente continua, A		Corriente alterna, A	
			Polaridad directa ^b	Polaridad inversa ^b	Onda no balanceada ^c	Onda balanceada ^c
pulg	mm	pulg	CCEN	CCEP		
0.010	0.25	1/4	hasta 15		hasta 15	hasta 15
0.020	0.50	1/4	5-20		5-15	10-20
0.040	1.00	3/8	15-80		10-60	20-30
1/16	1.6	3/8	70-150	10-20	50-100	30-80
3/32	2.4	1/2	150-250	15-30	100-160	60-130
1/8	3.2	1/2	250-400	25-40	150-210	100-180
5/32	4.0	1/2	400-500	40-55	200-275	160-240
3/16	4.8	5/8	500-750	55-80	250-350	190-300
1/4	6.4	3/4	750-1100	80-125	325-450	325-450

- a. Todos los valores se basan en el empleo de argón como gas protector.
b. Usar electrodos EWTh-2.
c. Usar electrodos EWP.

Tabla 3.3
Código de color y elementos de aleación de diversas aleaciones para electrodo de tungsteno

Clasificación AWS	Color ^a	Elemento aleación	Óxido de aleación	Porcentaje en peso nominal del óxido de aleación
EWP	Verde	—	—	—
EWCe-2	Anaranjado	Cerio	CeO ₂	2
EWLa-1	Negro	Lantano	La ₂ O ₃	1
EWTh-1	Amarillo	Torio	ThO ₂	1
EWTh-2	Rojo	Torio	ThO ₂	2
EWZr-1	Marrón	Zirconio	ZrO ₂	25
EWG	Gris	No se especifica ^b	—	—

- a. El color puede aplicarse en forma de bandas, puntos, etc. en cualquier punto de la superficie del electrodo.
b. El fabricante debe identificar el tipo y el contenido nominal de la adición de óxido de tierra rara.

Los electrodos se producen con un acabado limpio o amolado. Los que tienen acabado limpio han sido sometidos a limpieza química para eliminar las impurezas superficiales después de la operación de moldeado. Los que tienen acabado amolado se amolaron con una técnica sin centro para eliminar las imperfecciones superficiales.

Tamaños y capacidades de corriente de los electrodos

EN LA TABLA 3.2 se indican los tamaños e intervalos de corriente de los electrodos de tungsteno y de tungsteno con torio, junto con los diámetros de copa de gas protector recomendados para usarse con diferentes tipos de potencia de soldadura. Esta tabla es una guía útil para seleccionar el electrodo correcto para una aplicación específica con cierto nivel de corriente y cierto tipo de fuente de potencia.

El empleo de niveles de corriente por encima de los que se recomiendan para un tamaño de electrodo y configuración de punta determinados hará que el tungsteno se erosione o derrita. Es posible que caigan partículas de tungsteno en el charco de soldadura y se conviertan en defectos de la unión soldada. Si la corriente es demasiado baja para un tamaño de electrodo determinado, el arco puede ser inestable.

Si se usa corriente continua con el electrodo positivo (CCEP) se requerirá un diámetro mucho mayor para manejar un nivel de corriente dado porque la punta no se enfría por la evaporación de electrones sino que se calienta por el impacto de los electrones contra ella. En general, se esperará que un electrodo de cierto diámetro con CCEP maneje una corriente de sólo el 10% de la que podría manejar con el electrodo negativo. Si se usa corriente alterna, la punta se enfriará durante el ciclo de electrodo negativo y se calentará durante el positivo; por tanto, la capacidad de transporte de corriente de un electrodo con ca está entre la de CCEN y la de CCEP. En general, es de cerca del 50% de la capacidad de CCEN.

Clasificación de electrodos EWP. Los electrodos de tungsteno puro (EWP) contienen por lo menos 99.5% de tungsteno, y ningún elemento de aleación intencional. La capacidad de transporte de corriente de los electrodos de tungsteno puro es menor que la de los electrodos aleados. Los electrodos de tungsteno puro se emplean principalmente con ca para soldar aleaciones de aluminio y magnesio. La punta del electrodo EWP mantiene un extremo limpio con forma de bola, que produce un arco bastante estable. Estos electrodos también pueden usarse con cc, pero no ofrecen las características de encendido y estabilidad del arco de los electrodos con torio, con cerio o con lantano.

Clasificaciones de electrodos EWTh. La emisión termiónica del tungsteno puede mejorarse aleándolo con óxidos metálicos que tienen funciones de trabajo muy bajas. El resultado es que los electrodos pueden manejar corrientes de soldadura más altas sin fallar. El óxido de torio es uno de estos aditivos. A fin de evitar problemas de identificación con éstos y otros tipos de electrodos de tungsteno, se marcan con un código de color como se indica en la tabla 3.3. Hay dos tipos de electrodos de tungsteno con torio. Los electrodos EWTh-1 y EWTh-2 contie-

nen 1% y 2%, respectivamente, de óxido de torio (ThO_2) llamado *torio*, dispersado uniformemente en toda su longitud.

Los electrodos de tungsteno con torio superan a los de tungsteno puro en varios aspectos. La toria aumenta en cerca del 20% la capacidad de transporte de corriente y en general hace al electrodo más duradero; además, tiende a contaminar menos la soldadura. Con estos electrodos es más fácil encender el arco, y éste es más estable que el producido por electrodos de tungsteno puro o de tungsteno con zirconio.

Los electrodos EWTh-1 y EWTh-2 se diseñaron para aplicaciones de CCEN. Mantienen una configuración de punta aguda durante la soldadura, lo que es deseable cuando se suelda acerc. Casi nunca se usan con ca porque es difícil mantener el extremo de bola, necesario para la soldadura con ca, sin rajarse el electrodo.

El torio es un material radiactivo de muy bajo nivel. No se ha demostrado que el nivel de radiación represente un peligro para la salud, pero si se va a soldar en espacios encerrados durante periodos largos, o si existe la posibilidad de ingerir polvo de amolado de los electrodos, conviene considerar precauciones especiales en lo tocante a la ventilación. Se recomienda al usuario consultar con el personal de seguridad apropiado.

Una clasificación de electrodos de tungsteno descontinuada es la clase EWTh-3. Este electrodo tenía un segmento longitudinal o axial con un contenido de toria entre 1.0 y 2.0%. El contenido de toria medio de todo el electrodo variaba entre 0.35 y 0.55%. Los avances en la metalurgia de polvos y otras mejoras del procesamiento han hecho que se descontinúe esta clasificación, y ya no es posible encontrar estos electrodos en el comercio.

Clasificación de electrodos EWCe. Los electrodos de tungsteno con cerio se introdujeron en el mercado estadounidense a principios de la década de 1980. Estos electrodos se crearon como un posible sustituto de los electrodos con torio porque el cerio, a diferencia del torio, no es un elemento radiactivo. Los electrodos EWCe-2 son electrodos de tungsteno que contienen 2% de óxido de cerio (CeO_2), llamado *ceria*. En comparación con los electrodos de tungsteno puro, los de tungsteno ceriado tienen menores tasas de vaporización o quemado. Estas ventajas mejoran al aumentar el contenido de ceria. Los electrodos EW-Ce-2 trabajan bien con ca o cc.

Clasificación de electrodos EWLa. Los electrodos EW-La-1 se inventaron en la misma época que los de tungsteno con cerio y por la misma razón, que el lantano no es radiactivo. Estos electrodos contienen 1% de óxido de lantano (La_2O_3), conocido como *lantana*. Las ventajas y características de operación de estos electrodos son muy similares a las de los electrodos de tungsteno ceriado.

Clasificación de electrodos EWZr. Los electrodos de tungsteno con zirconio (EWZr) contienen una pequeña cantidad de óxido de zirconio, como se indica en la tabla 3.3. Estos electrodos tienen características de soldadura que generalmente están entre las del tungsteno puro y las del tungsteno con torio. Son los electrodos preferidos para soldar con ca porque combinan las características deseables de estabilidad del arco y extremo de bola típicas del tungsteno puro con las características de capacidad de corriente y encendido del arco del tungsteno con torio. Tienen mayor resistencia a la contaminación que el tung-

teno puro y se prefieren para aplicaciones de soldadura de calidad radiográfica en las que debe minimizarse la contaminación de la soldadura con tungsteno.

Clasificación de electrodos EWG. La clasificación de electrodos EWG se asignó a las aleaciones no cubiertas por las clases anteriores. Estos electrodos contienen una adición no especificada de un óxido o combinación de óxidos (de tierras raras u otros) no especificada. El propósito de esta adición es afectar la naturaleza o características del arco, según la definición del fabricante, quien debe identificar la adición o adiciones específicas y la cantidad nominal añadida.

Hay varios electrodos EWG disponibles en el mercado o en desarrollo. Incluyen electrodos con adiciones de óxido de itrio o de óxido de magnesio. Esta clasificación también incluye los electrodos con cerio o con lantano que contienen los óxidos correspondientes en cantidades distintas de las que se mencionaron, o combinados con otros óxidos.

Configuraciones de punta de los electrodos

LA FORMA DE la punta del electrodo de tungsteno es una variable importante del proceso GTAW. Es posible usar electrodos con diversas preparaciones de la punta. Para soldar con ca, los electrodos de tungsteno puro o zirconiado forman un extremo hemisférico abultado. Para soldar con cc suelen usarse electrodos de tungsteno con torio, con cerio o con lantano. En este caso, el extremo por lo regular se amuela hasta un ángulo incluido específico, a menudo con el extremo truncado. Como puede verse en la figura 3.5, las diferentes geometrías de punta del electrodo afectan la forma y el tamaño de la franja de soldadura. En general, al aumentar el ángulo incluido, aumenta la penetración de la soldadura y disminuye la anchura de la franja. Aunque pueden usarse electrodos de diámetro pequeño con punta cuadrada para soldar con CCEN, las puntas cónicas ofrecen un mejor rendimiento.

Sea cual sea la geometría de punta del electrodo que se escoja, es importante seguir usando la misma geometría una vez establecido el procedimiento de soldadura. Los cambios en la geometría del electrodo pueden influir de manera significativa en el tamaño y la forma de la franja de soldadura; por tanto, la configuración de la punta del electrodo es una variable que debe estudiarse durante el desarrollo del procedimiento de soldadura.

En general, las puntas de tungsteno se preparan por formación de bola, amolado o afilado químico. En casi todos los electrodos, con excepción de los más pequeños, se prepara una punta ahusada, aunque posteriormente se le vaya a dar forma de bola para soldar con ca.

Formación de bola. Cuando se suelda con ca (por lo regular con un electrodo de tungsteno puro o zirconiado) la forma de punta más deseable es la hemisférica. Antes de usarse para soldar, se le puede dar forma de bola a la punta del electrodo encendiendo un arco sobre un bloque de cobre u otro material apropiado enfriado por agua empleando ca o CCEP. La corriente del arco se aumenta hasta que el extremo del electrodo se calienta al blanco y comienza a fundirse, con lo cual se forma una pequeña bola en la punta. A continuación se reduce gradual-

mente la corriente y se extingue, dejando una bola hemisférica en el extremo del electrodo de tungsteno. El tamaño del hemisferio no debe ser mayor que 1.5 veces el diámetro del electrodo, pues de lo contrario puede desprenderse cuando está fundido.

Amolado. Si se desea un arco con estabilidad óptima, los electrodos de tungsteno deben amolarse con su eje perpendicular al eje de la rueda de amolar. La rueda deberá reservarse para amolar exclusivamente tungsteno, a fin de evitar una posible contaminación de la punta de tungsteno con materiales extraños durante la operación de amolado. Es recomendable usar campanas de ventilación al amolar electrodos con torio a fin de eliminar el polvo de amolado del área de trabajo.

Los electrodos de tungsteno con torio, con cerio y con lantano no forman bola con tanta facilidad como los de tungsteno puro o con zirconio; mantienen mucho mejor la forma de la punta amolada. Si se usan con ca, estos electrodos a menudo se rajan.

Afilado químico. El afilado químico consiste en sumergir el extremo al rojo vivo de un electrodo de tungsteno en un recipiente con nitrato de sodio. La reacción química entre el tungsteno caliente y el nitrato de sodio hará que el tungsteno se erosione con velocidad uniforme alrededor de la circunferencia y el extremo del electrodo. El calentamiento e inmersión repetidos del tungsteno en el nitrato de sodio formarán una punta ahusada.

Contaminación de los electrodos

LA CONTAMINACIÓN DEL electrodo de tungsteno ocurre con mayor frecuencia cuando el soldador toca accidentalmente el charco de soldadura con la punta del electrodo o toca el tungsteno con el metal de aporte. El electrodo de tungsteno también puede oxidarse si el gas protector no es el adecuado o si su flujo es insuficiente durante la soldadura o después de extinguirse el arco. Otras fuentes de contaminación son: vapores metálicos del arco de soldadura; erupciones o salpicaduras del charco de soldadura, causadas por atrapamiento de gases; y evaporación de impurezas superficiales.

El extremo contaminado del electrodo de tungsteno afectará adversamente las características del arco y puede dar pie a inclusiones de tungsteno en el metal de soldadura. Si esto ocurre, será preciso detener la operación de soldadura y eliminar la porción contaminada del electrodo.

Los electrodos de tungsteno contaminados deben rectificarse debidamente desprendiendo la sección contaminada y amolando hasta darles la forma correcta según el procedimiento sugerido por el fabricante.

ALIMENTADORES DE ALAMBRE

LOS ALIMENTADORES DE alambre sirven para añadir metal de aporte durante la soldadura mecanizada y automática. Se puede alimentar alambre a temperatura ambiente (frío) o bien precalentado (caliente) al charco de soldadura. El alambre frío se alimenta por el borde delantero del charco, y el alambre caliente por el borde de atrás.

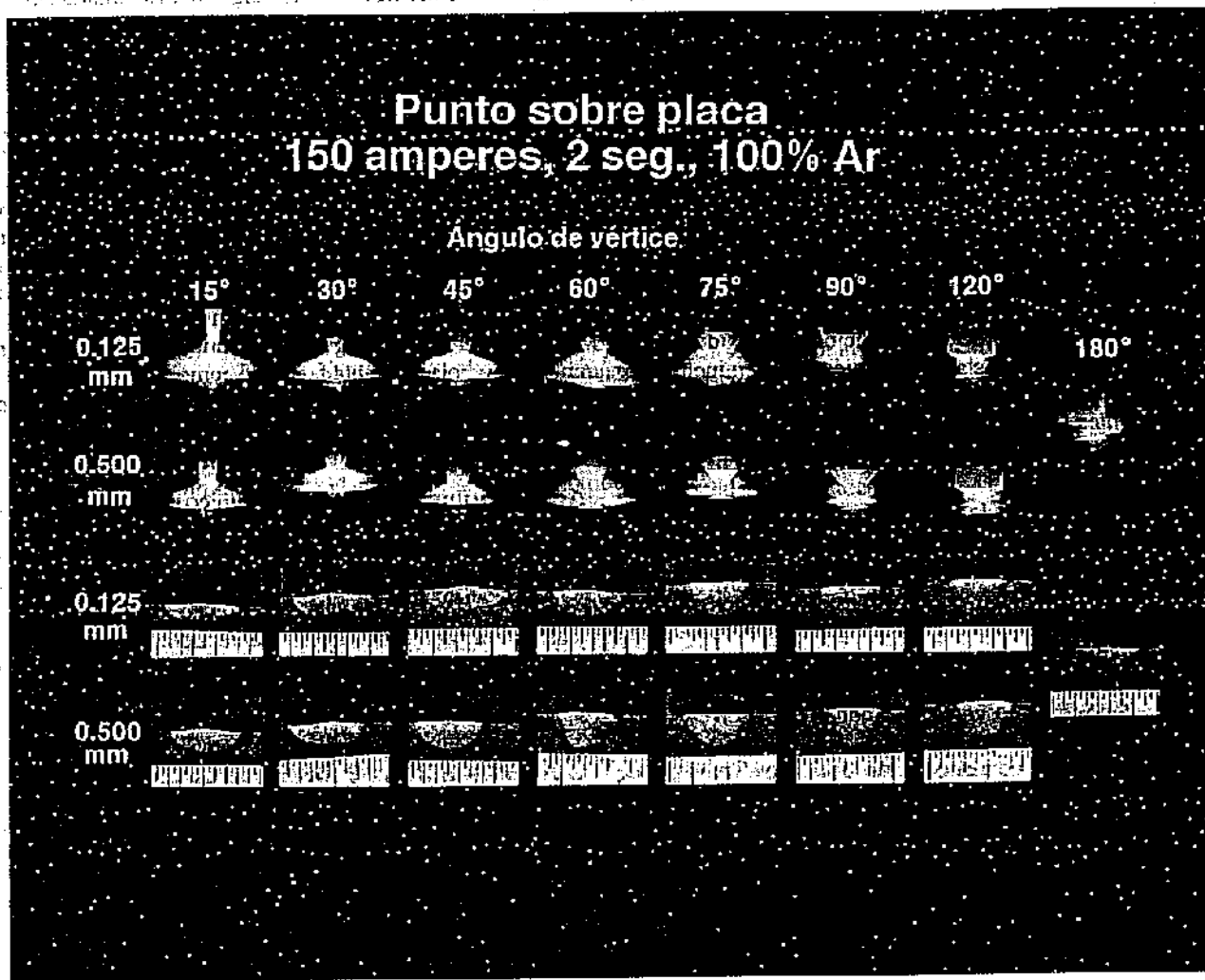


Figura 3.5—Forma del arco y perfil de la zona de fusión en función de la geometría de la punta del electrodo con un escudo de argón puro (150 A, 2.0 s, punto sobre placa)

Alambre frío

EL SISTEMA PARA alimentar alambre frío tiene tres componentes:

- (1) Mecanismo impulsor del alambre.
- (2) Control de velocidad.
- (3) Aditamento guía para introducir el alambre en el charco de soldadura.

El impulsor consiste en un motor y tren de engranes que impulsan un conjunto de rodillos, los cuales empujan el alambre. El control es en esencia un gobernador de velocidad constante que puede ser un dispositivo mecánico o electrónico. El alambre se alimenta a la guía a través de un conducto flexible.

La guía de alambre ajustable se sujeta al portaelectrodos. Esta guía mantiene la posición de entrada del alambre a la soldadura y el ángulo de aproximación relativo al electrodo, la superficie de trabajo y la unión. En aplicaciones de trabajo pesado, la guía del alambre se enfría con agua. Se emplean alambres con diámetros entre 0.4 y 2.4 mm (0.015 a 3/32 pulg). Hay alimentadores especiales que introducen el alambre en forma continua, pulsada o intermitente.

Alambre caliente

EL PROCESO DE adición del alambre caliente es similar al del alambre frío, excepto que el alambre se calienta por resistencia hasta una temperatura cercana a su punto de fusión justo antes

de hacer contacto con el charco de soldadura. Si se usa alambre precalentado (caliente) en soldadura por arco de tungsteno y gas mecanizada o automática en la posición plana, el alambre se alimenta mecánicamente al charco de soldadura a través de un retén desde el que fluye gas inerte para proteger el alambre caliente contra la oxidación. Este sistema se ilustra en la figura 3.6. Normalmente se usa una mezcla de 75% de helio y 25% de argón para proteger el electrodo de tungsteno y el charco de soldadura.

La tasa de deposición es mayor con alambre caliente que con alambre frío, como se aprecia en la figura 3.7. Esta tasa es comparable con la de soldadura por arco de metal y gas. El flujo de corriente se inicia cuando el alambre hace contacto con la superficie de la soldadura. El alambre se alimenta al charco fundido inmediatamente detrás del arco con un ángulo de 40 a 60 grados respecto al electrodo de tungsteno.

El alambre se calienta por resistencia con corriente alterna de una fuente de potencia de voltaje constante. Se usa ca para calentar el alambre con el fin de evitar el golpe del arco. Si la corriente no excede el 60% de la corriente del arco, el arco oscilará 30 grados en dirección longitudinal. La oscilación aumenta a 120 grados cuando las corrientes de calentamiento y del arco son iguales. La amplitud de oscilación del arco puede controlarse limitando el diámetro del alambre a 1.2 mm (0.045 pulg) y reduciendo la corriente de calentamiento a menos del 60% de la corriente del arco.

Se ha usado con éxito alambre de aporte precalentado para unir aceros al carbono y de baja aleación, aceros inoxidables y aleaciones de cobre y níquel. No se recomienda el precalentamiento para alambres de aporte de aluminio y cobre porque la baja resistencia eléctrica de estos metales exige una corriente de calentamiento elevada, que a su vez produce una desviación excesiva del arco y una fusión dispareja.

FUENTES DE POTENCIA

LAS FUENTES DE potencia recomendadas para GTAW son las de corriente constante. La potencia requerida para soldar tanto con ca como con cc puede obtenerse de fuentes de transformador-rectificador o de generadores rotatorios de ca o cc. Los avances en la electrónica de semiconductores han popularizado el em-

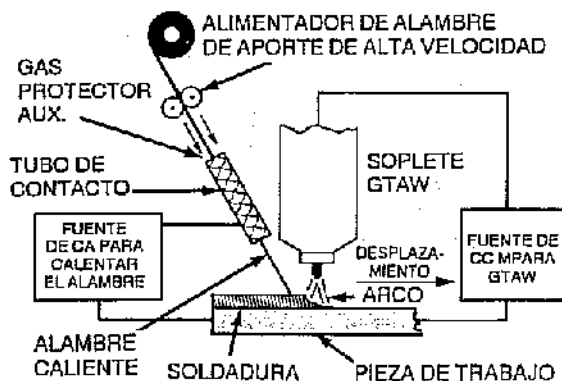


Figura 3.6—Sistema de alambre caliente para arco de tungsteno y gas

pleo de fuentes de potencia de transformador-rectificador para GTAW tanto en talleres como en el campo, pero las fuentes del tipo rotatorio se siguen utilizando mucho en el campo.

Las fuentes de potencia para GTAW suelen tener características estáticas de salida de caída o de corriente prácticamente constante, como las que se muestran en la figura 3.8. La característica de salida estática es función del tipo de control de corriente de soldadura empleado en el diseño de la fuente de potencia.

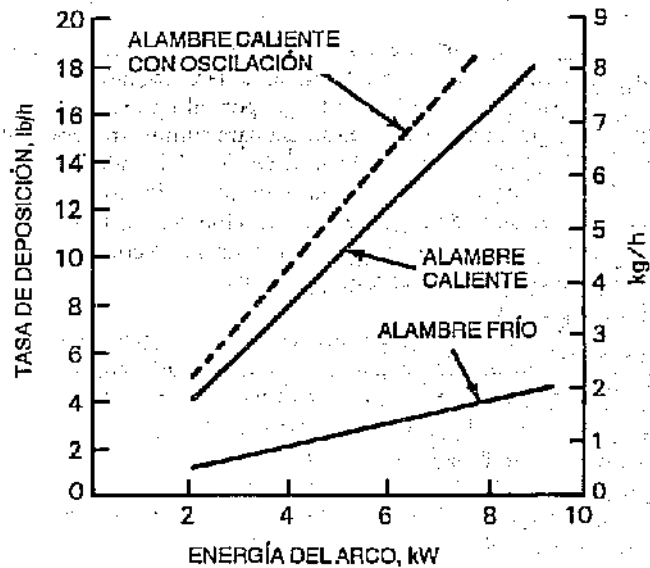


Figura 3.7—Tasas de deposición para soldadura por arco de tungsteno y gas con alambre de aporte de acero frío y caliente

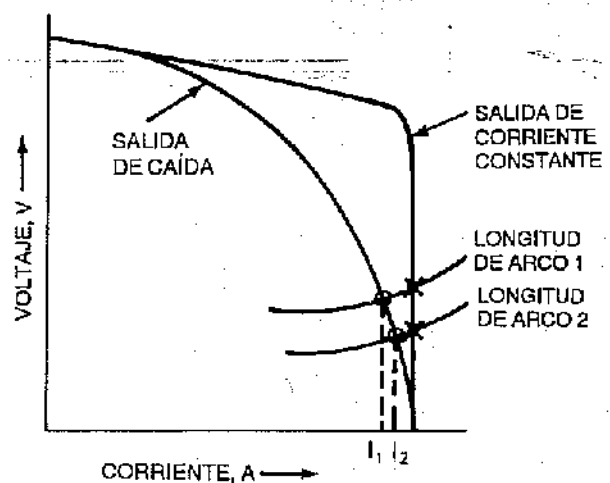


Figura 3.8—Características volt-ampere estáticas para fuentes de potencia de caída y de corriente constante

La característica volt-ampere de caída es típica de las fuentes de potencia controladas magnéticamente, incluidos los diseños de bobina móvil, derivación móvil, reactor de núcleo móvil, reactor saturable o amplificador magnético, y también los de fuente de potencia rotatoria. Se puede obtener una salida de corriente verdaderamente constante con fuentes de potencia de control electrónico. La característica del tipo de caída es ventajosa para la soldadura manual cuando no se dispone de un control remoto de corriente operado por pedal. Con este tipo de característica, el soldador puede variar ligeramente el nivel de corriente modificando la longitud del arco. El grado de control que es posible cambiando la longitud del arco puede inferirse de la figura 3.8.

En la mayor parte de las fuentes de potencia controladas magnéticamente, el control del nivel de la corriente se efectúa en la porción de ca de la fuente. Es por ello que este tipo de fuentes de potencia casi nunca se usa para suministrar corriente a pulsos, pues su respuesta dinámica es lenta. La adición de un puente rectificador permite a estas fuentes suministrar corriente de soldadura tanto de ca como de cc. Las fuentes de potencia que emplean un componente móvil para controlar la corriente no se prestan al control remoto mediante un pedal, como sucede con las de los demás tipos.

En general, se considera que las fuentes de potencia controladas magnéticamente tienen control de lazo abierto, en cuanto a que la corriente de soldadura real para un nivel de corriente dado depende de las condiciones de soldadura y puede variar si éstas cambian. Las fuentes de potencia monofásicas pueden suministrar corriente tanto de ca como de cc, en tanto que las trifásicas por lo regular sólo suministran cc. La corriente de cc de una fuente trifásica casi siempre es más constante que la de una fuente monofásica por su menor amplitud de corriente de rizo.

Las ventajas de las fuentes de potencia controladas magnéticamente son su sencillez de operación, el poco mantenimiento que requieren en entornos industriales adversos, y su costo relativamente bajo. Las desventajas es que son grandes en volumen y en peso y tienen menor eficiencia en comparación con las fuentes controladas electrónicamente. Además, como ya se dijo, la mayor parte de las técnicas de control magnético es de lazo abierto, lo que limita la repetibilidad, la exactitud y la respuesta. Las fuentes de potencia controladas electrónicamente, como los diseños de regulador lineal en serie, rectificador controlado por silicio, secundario conmutado e inversor, pueden proporcionar una característica volt-ampere de corriente esencialmente constante.

Este tipo de característica suele ser ventajosa en la soldadura mecanizada y automática, pues ofrece exactitud y repetibilidad en el nivel de corriente de una soldadura a otra. La mayor parte de las fuentes de potencia de corriente verdaderamente constante tienen control de lazo cerrado, en el que la corriente real se mide y compara con el nivel de corriente deseado. Los ajustes se efectúan electrónicamente dentro de la fuente de potencia a fin de mantener la corriente deseada aunque cambien las condiciones de soldadura.

En general, las fuentes de potencia controladas electrónicamente ofrecen una respuesta dinámica rápida; por ello, pueden servir para suministrar corriente de soldadura a pulsos. Los diseños de regulador lineal en serie y secundario conmutado sólo proporcionan corriente de soldadura de cc a partir de potencia

de entrada monofásica o trifásica. Los diseños de rectificador controlado por silicio puede suministrar corriente de ca y cc a partir de potencia monofásica y corriente de cc a partir de potencia trifásica. Dependiendo del diseño, los inversores pueden proporcionar salida de ca y cc a partir de potencia de entrada monofásica y trifásica. Las fuentes de potencia de inversor son las más versátiles, y muchas ofrecen capacidades de multiproceso y salida de corriente de soldadura con forma de onda variable. Además, los inversores son más ligeros y compactos que otros diseños de fuente de potencia con especificación de corriente equivalente.

Las ventajas de las fuentes de potencia controladas electrónicamente son que ofrecen una respuesta dinámica rápida, proporcionan corriente de salida con forma de onda variable, tienen excelente repetibilidad y se prestan al control remoto. Las desventajas son que su operación y mantenimiento son más complejos y su costo es relativamente elevado.

Es importante seleccionar la fuente de potencia para GTAW con base en el tipo de corriente requerida para una aplicación en particular. Los tipos de corriente de soldadura incluyen ca senoidal, ca de onda cuadrada, cc y cc a pulsos. En la siguiente sección del presente capítulo se dará más información acerca de los tipos de corriente de soldadura y sus efectos. Existen muchas fuentes de potencia con diversos controles y funciones adicionales, como control del agua y del gas protector, secuenciado del alimentador de alambre y del mecanismo de desplazamiento, pendiente de corriente positiva y negativa, y secuencias de corriente múltiple. Si desea información más detallada, consulte el capítulo 1.

Corriente directa

SI SE USA corriente directa, el electrodo de tungsteno puede conectarse ya sea a la terminal negativa o a la positiva de la fuente de potencia. En casi todos los casos, se escoge que el electrodo sea negativo (cátodo). Con esta polaridad, los electrones fluyen del electrodo al trabajo y los iones positivos se transfieren del trabajo al electrodo, como se muestra para CCEN (polaridad directa) en la figura 3.9. Cuando el electrodo es positivo (ánodo), las direcciones de flujo de los electrones y los iones positivos se invierten, como se muestra para CCEP (polaridad inversa) en la figura 3.9.

Con CCEN y un electrodo termoiónico como el de tungsteno, aproximadamente el 70% del calor se genera en el ánodo y el 30% en el cátodo. Puesto que CCEN produce la mayor parte del calor en la pieza de trabajo para una corriente de soldadura dada, esta polaridad produce mayor penetración de la soldadura que CCEP (véase la Fig. 3.9). CCEN es la configuración más común empleada en GTAW, y se usa con argón, helio o una mezcla de los dos para soldar la mayor parte de los metales.

Cuando el electrodo de tungsteno se conecta a la terminal positiva (CCEP), se crea una acción de limpieza catódica en la superficie de la pieza de trabajo. Esta acción ocurre con todos los metales, pero es más importante cuando se suelda aluminio o magnesio porque elimina la película de óxido refractario que inhibe la humectación del soldamento por parte del metal de soldadura.

A diferencia de CCEN, donde la punta del electrodo se enfría por la evaporación de los electrones, cuando el electrodo se usa

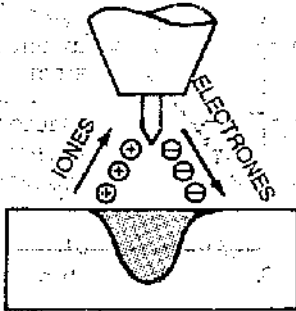
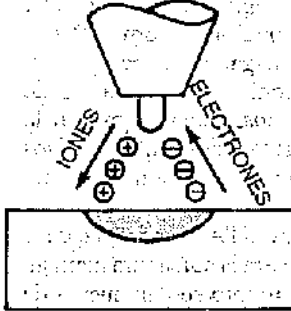
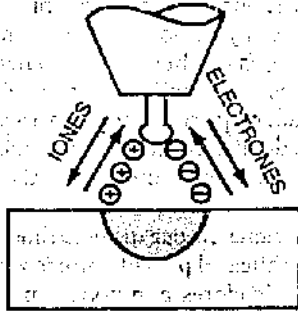
TIPO DE CORRIENTE	CCEN	CCEP	CA (EQUILIBRADA)
POLARIDAD DEL ELECTRODO	NEGATIVA	POSITIVA	
FLUJO DE ELECTRONES E IONES			
CARACTERÍSTICAS DE PENETRACIÓN			
ACCIÓN LIMPIADORA DE ÓXIDOS:	NO	SÍ	SÍ, UNA VEZ CADA MEDIO CICLO
BALANCE CALORÍFICO EN EL ARCO (APROX.)	70% EN EL EXTREMO DEL TRABAJO 30% EN EL EXTREMO DEL ELECTRODO	30% EN EL EXTREMO DEL TRABAJO 70% EN EL EXTREMO DEL ELECTRODO	50% EN EL EXTREMO DEL TRABAJO 50% EN EL EXTREMO DEL ELECTRODO
PENETRACIÓN	PROFUNDA; ANGOSTA	SOMERA; ANCHA	MEDIANA
CAPACIDAD DEL ELECTRODO	EXCELENTE p. ej. 3.2 mm (1/8 pulg) 400 A	DEFICIENTE p. ej. 6.4 mm (1/4 pulg) 120 A	BUENA p. ej. 3.2 mm (1/8 pulg) 225 A

Figura 3.9—Características de los tipos de corriente para soldadura por arco de tungsteno y gas

como polo positivo su punta se calienta por el bombardeo de electrones además de por la resistencia que opone a su paso por el electrodo. Por tanto, cuando se usa polaridad inversa se requiere un electrodo de diámetro más grande para una corriente de soldadura dada, a fin de reducir el calentamiento por resistencia e incrementar la conducción térmica hacia el mandril del electrodo. La capacidad de transporte de corriente de un electrodo conectado a la terminal positiva es aproximadamente la décima parte de la de un electrodo conectado a la terminal negativa. En general, el uso de CCEP está limitado a la soldadura de piezas de lámina.

Soldadura con cc a pulsos. En la cc a pulsos la corriente del arco varía en forma repetitiva desde un valor de fondo (bajo) hasta un valor pico (alto). Las fuentes de potencia de cc a pulsos por lo regular permiten ajustar la duración del pulso de corriente, el tiempo de la corriente de fondo, el nivel de la corriente pico y el nivel de la corriente de fondo, a fin de producir una salida con forma de onda adaptada a una aplicación en particular. En la figura 3.10 se muestra una forma de onda de corriente a pulsos típica. En general, los tiempos de duración del pulso y del fondo se ajustan de modo que la corriente cambie de nivel a intervalos que van desde una vez cada dos segundos hasta 20 pulsos por segundo. La corriente a pulsos por lo regular se aplica con el electrodo negativo (CCEN).

En la soldadura con cc a pulsos, el nivel de corriente del pulso suele ajustarse a entre 2 y 20 veces el nivel de corriente de

fondo. Esto combina las características de arco vigoroso de la corriente elevada con el aporte de calor bajo de la corriente reducida. La corriente de los pulsos logra buena fusión y penetración, en tanto que la corriente de fondo mantiene el arco y permite que se enfríe el área de soldadura.

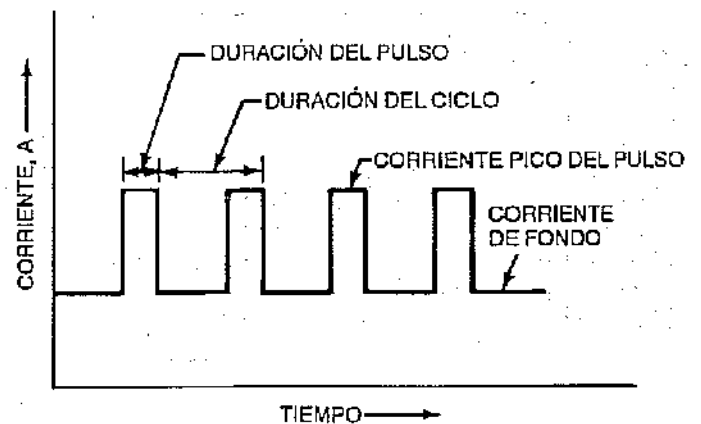


Figura 3.10—Forma de onda de cc a pulsos

La corriente a pulsos tiene varias ventajas. Para un nivel de corriente medio dado, es posible obtener mayor penetración que con una corriente estable, cosa que resulta útil con metales sensibles al aporte de calor, además de que minimiza la distorsión. Como no hay suficiente tiempo para que fluya una cantidad significativa de calor durante el tiempo de pulso tan corto, los metales con espesores disímiles por lo regular tienen la misma respuesta y es posible lograr una penetración uniforme. Por lo mismo, es posible soldar metales muy delgados con cc a pulsos. Además, es posible usar el mismo conjunto de variables de soldadura para uniones en todas las posiciones, como en la soldadura circunferencial de tubos horizontales. La cc a pulsos también resulta útil para salvar brechas en uniones de raíz abierta.

Aunque se usa principalmente para GTAW mecanizada y automática, el pulsado ofrece ventajas para la soldadura manual. Los soldadores con poca experiencia pronto se dan cuenta de que pueden mejorar su habilidad si cuentan los pulsos (de 1/2 a 2 pulsos por segundo) y los usan para regular el movimiento del soplete y del alambre frío. Los soldadores experimentados pueden soldar materiales más delgados, aleaciones disímiles y espesores disímiles con menos dificultad.

Soldadura a pulsos de alta frecuencia. La cc conmutada de alta frecuencia implica la aplicación de corriente continua que se conmuta desde un nivel bajo hasta otro alto con una frecuencia fija rápida de aproximadamente 20 kHz, como se muestra en la figura 3.11.

El tiempo de "encendido" de la corriente pico se varía a fin de cambiar el nivel de corriente medio. El efecto de la conmutación de alta frecuencia es producir un arco "rígido". La presión del arco es una medida de su rigidez. Como se observa en la figura 3.12, conforme la frecuencia de conmutación se acerca a 10 kHz, la presión del arco se incrementa hasta casi cuatro veces la presión de un arco de cc estable. Al aumentar la presión del arco, se reduce su desplazamiento lateral, como el producido por campos magnéticos (golpe del arco) o por movimiento del gas protector (viento del arco).

La cc conmutada de alta frecuencia es útil en aplicaciones de precisión mecanizadas y automáticas en las que se requiere un

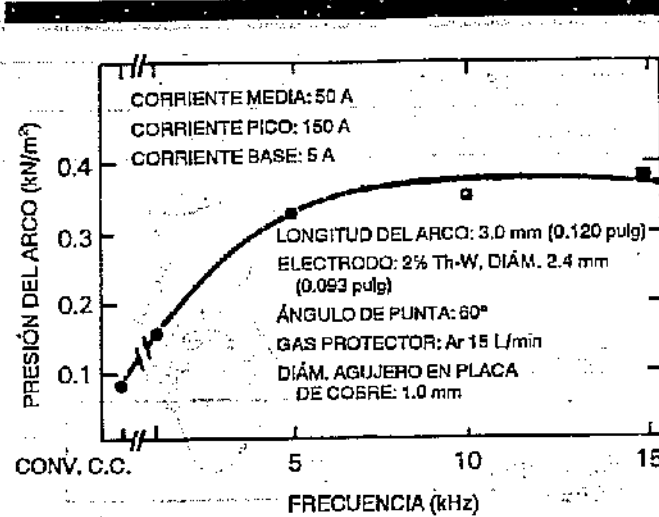


Figura 3.12—Forma de onda de corriente de soldadura de cc a pulsos conmutada de alta frecuencia.

arco con propiedades direccionales y estabilidad excepcionales. También se emplea cuando se necesita un arco estable con niveles de corriente media muy bajos. La desventaja de la cc conmutada de alta frecuencia es que las fuentes de potencia para soldadura son costosas. Además, si la frecuencia de conmutación está en el intervalo audible, el sonido del arco puede ser muy molesto.

Corriente alterna

LA CORRIENTE ALTERNA experimenta una inversión periódica de su polaridad, de electrodo positivo a electrodo negativo. Por tanto, la corriente alterna puede combinar la acción limpiadora del trabajo de la polaridad inversa (electrodo positivo) con la penetración profunda característica de la polaridad directa (electrodo negativo). La soldadura con ca se compara con CCEN y CCEP en la figura 3.9.

Las fuentes de potencia de ca para soldadura convencionales producen una salida de voltaje de circuito abierto senoidal que está defasada cerca de 90° con la corriente. La frecuencia de inversión del voltaje suele estar fija a la frecuencia estándar de 60 Hz de la potencia primaria. El voltaje de arco real está en fase con la corriente de soldadura. El voltaje que se mide es la suma de las caídas de voltaje en el electrodo y el plasma y en el ánodo y el cátodo; todas éstas son resultado del flujo de la corriente.

Cuando la corriente cae a cero, se presentan diferentes efectos, dependiendo de la polaridad. Si el electrodo de tungsteno termoiónico se vuelve negativo, proporciona de inmediato electrones para volver a encender el arco. En cambio, cuando el charco de soldadura se vuelve negativo, no podrá suministrar electrones a menos que el voltaje se eleve lo suficiente para iniciar una emisión de cátodo frío. Sin este voltaje, el arco se vuelve inestable, como se muestra en la figura 3.13 (A).

Si se usan fuentes de potencia sinusoidal convencionales, se requiere algún mecanismo para estabilizar el arco durante la

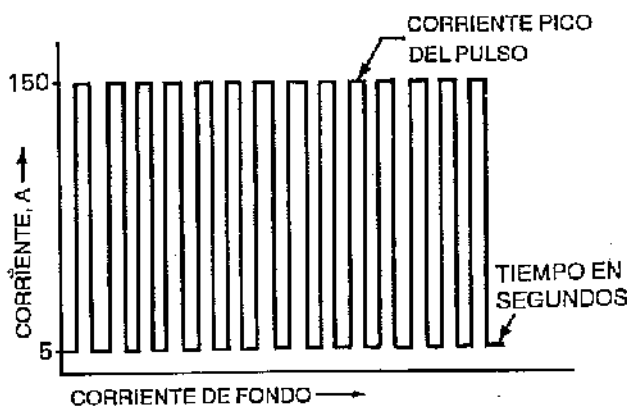


Figura 3.11—Relación entre la presión del arco y la frecuencia de los pulsos

inversión del voltaje. Esto se ha hecho empleando fuentes con voltaje de circuito abierto elevado, descargando condensadores en el momento apropiado durante el ciclo, empleando chispas de alto voltaje y alta frecuencia en paralelo con el arco y utilizando fuentes de potencia con salida de onda cuadrada. Los resultados de semejante estabilización se muestran en la figura 3.13 (B).

El voltaje de circuito abierto del transformador puede incrementarse a fin de mejorar la estabilidad del arco. Si se usa helio como gas protector, se requiere un voltaje de circuito abierto de cerca de 100 V (rms). También puede obtenerse el voltaje necesario añadiendo una fuente de voltaje de alta frecuencia en serie con el transformador. El voltaje de alta frecuencia suele ser del orden de varios miles de volts, y su frecuencia puede ascender a varios megahertz. La corriente es muy baja. El voltaje de alta frecuencia puede aplicarse continuamente o en forma periódica durante la soldadura. En el segundo caso, se hace que cuando la corriente pasa por cero se produzca una ráfaga de alto voltaje.

Las fuente de potencia para soldadura de onda cuadrada pueden cambiar la dirección de la corriente en un lapso muy corto. La presencia de alto voltaje, aunada a una temperatura elevada del electrodo y del metal base en el momento de invertirse la corriente, permite que el arco se vuelva a encender sin necesidad de un estabilizador. Además, la corriente "pico" más baja de la forma de onda cuadrada tiende a ampliar el intervalo de corriente útil del electrodo.

Puesto que es más fácil proporcionar los electrones necesarios para sostener un arco cuando el electrodo es negativo, el voltaje requerido también es menor. El resultado es una corriente de soldadura más alta durante el intervalo de CCEN que durante CCEP. De hecho, la fuente de potencia produce corriente tanto continua como alterna. Esta rectificación puede dañar la fuente de potencia por el sobrecalentamiento o, en algunas máquinas, causar un decaimiento de la salida. La rectificación se elimina con un balanceo de corriente, como se muestra en la figura 3.13 (C).

Las primeras fuentes de potencia de corriente balanceada empleaban condensadores conectados en serie o bien una fuente de voltaje de cc (como una batería) en el circuito de soldadura. Los circuitos de fuente de potencia modernos utilizan balanceo electrónico de la onda. El flujo de corriente balanceado no es indispensable para la mayor parte de las operaciones de soldadura manual, pero sí es deseable para la soldadura mecanizada o automática a alta velocidad. Las ventajas del flujo de corriente balanceado son las siguientes:

- (1) Más completa eliminación de óxidos.
- (2) Soldadura más uniforme y de mayor calidad.

(3) No se requiere reducir la especificación de salida de un tamaño dado de transformador para soldadura convencional (se minimiza la magnetización de núcleo no balanceada producida por el componente de cc de un flujo de corriente no balanceado).

Las que siguen son desventajas del flujo de corriente balanceado:

- (1) Se requieren electrodos de tungsteno más grandes.
- (2) Los voltajes de circuito abierto más elevados que generalmente se asocian a los mecanismos de balanceo de la onda pueden representar un problema de seguridad.

(3) Las fuentes de potencia para soldadura de onda balanceada son más costosas.

Algunas fuentes de potencia de ca de onda cuadrada ajustan el nivel de la corriente durante los ciclos de electrodo positivo y electrodo negativo a la frecuencia estándar de 60 Hz. Las fuentes de mayor costo ajustan el tiempo de cada medio ciclo de polaridad además del nivel de la corriente durante ese medio ciclo. Estas formas de onda variables ajustan la corriente de soldadura adaptándola a una aplicación en particular. Las características de la corriente alterna de onda cuadrada variable se muestran en la figura 3.14.

CONTROL DEL VOLTAJE DE ARCO

EN GTAW MECANIZADA y automática se emplean controladores del voltaje de arco para mantener la longitud del arco. En este caso, el arco mismo es un sensor, ya que convierte una medida de longitud (espacio del arco) en una señal eléctrica (voltaje del arco).

El controlador compara los voltajes de arco medido y deseado para determinar en qué dirección y con qué velocidad debe desplazarse el electrodo de soldadura. Esta determinación, expresada como una señal de error de voltaje, se amplifica para impulsar motores de un soporte deslizante sobre el que está montado el soplete. Se detecta el voltaje cambiante que resulta del movimiento del electrodo de soldadura, y el ciclo se repite para mantener el voltaje de arco deseado.

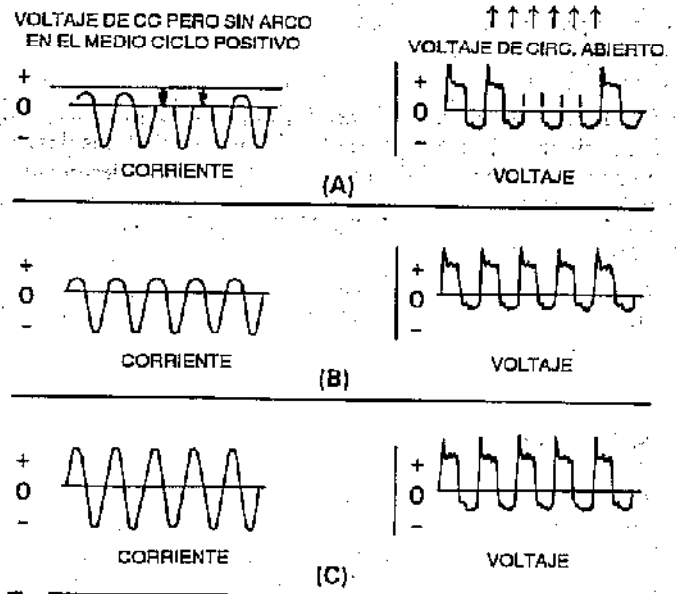


Figura 3.13—Formas de onda de voltaje y corriente para soldadura con ca: (A) Rectificación parcial y completa; (B) con estabilización del arco; (C) con balanceo de corriente

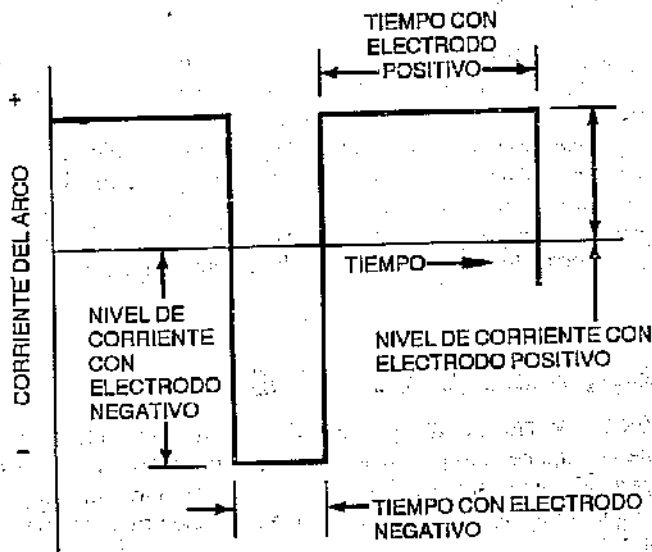


Figura 3.14—Características de la ca de onda cuadrada variable

OSCILACIÓN DEL ARCO

LA ANCHURA DE las soldaduras por arco de tungsteno y gas pueden aumentarse mediante oscilación mecánica. Esto puede efectuarse montando el soplete de GTAW en un soporte deslizante cruzado que permita el movimiento del soplete en dirección transversal respecto a la línea de recorrido. Este equipo ofrece velocidad de alimentación cruzada, amplitud de oscilación y tiempo de cambio de dirección (*dwell*) ajustables a cada lado del ciclo de oscilación.

Con oscilación magnética es posible obtener una mejor fusión de las paredes de la unión y una reducción de los efectos perjudiciales del golpe de arco. Estos osciladores desvían el arco longitudinal o lateralmente sobre el charco de soldadura sin mover el electrodo. Los osciladores consisten en electroimanes situados cerca del arco y energizados por una fuente de potencia de polaridad y amplitud variables. Entre las funciones de control están el ajuste de la frecuencia y la amplitud de oscilación y el ajuste independiente de los tiempos de cambio de dirección.

GASES PROTECTORES

EL SOPLETE DIRIGE el gas protector hacia el arco y el charco de soldadura con el fin de proteger el electrodo y el metal fundido de la contaminación por gases atmosféricos. También puede usarse un gas purgante de respaldo para proteger el lado de abajo de la soldadura y las superficies de metal base adyacentes contra la oxidación durante la soldadura. Hay mayores posibilidades de lograr un perfil uniforme de la franja de raíz, ausencia de socavamiento, y el refuerzo de raíz deseado si se usa respaldo con gas en condiciones controladas. En algunos materiales, el res-

paldo con gas reduce el agrietamiento de la raíz y la porosidad de la soldadura.

Tipos de gases protectores

EL ARGÓN Y el helio, o las mezclas de estos dos, son los tipos más comunes de gases inertes empleados como escudo. En aplicaciones especiales se usan mezclas de argón e hidrógeno.

Dependiendo del volumen utilizado, estos gases pueden suministrarse en cilindros o como líquidos en tanques aislados. El líquido se vaporiza y envía mediante tuberías a distintos puntos de la planta, con lo que se elimina el manejo de cilindros.

Argón. El argón (Ar) es un gas monoatómico inerte con peso molecular de 40. Se obtiene de la atmósfera por separación del aire licuado.

El argón de grado soldadura se refina hasta una pureza mínima del 99.95%. Esto es aceptable para soldar con GTAW la mayor parte de los metales excepto los reactivos y refractarios, para los cuales se requiere una pureza mínima del 99.997%. En muchos casos, estos metales se procesan en cámaras de las que se ha purgado todo el aire antes de iniciarse la operación de soldadura.

El argón se utiliza más ampliamente que el helio porque tiene las siguientes ventajas:

- (1) Acción de arco más uniforme y silenciosa.
- (2) Menor penetración.
- (3) Acción de limpieza al soldar materiales como el aluminio y el magnesio.
- (4) Menor costo y mayor disponibilidad.
- (5) Buena protección con tasas de flujo más bajas.
- (6) Mayor resistencia a ráfagas transversales.
- (7) Más fácil iniciación del arco.

La menor penetración de un arco escudado con argón resulta especialmente útil al soldar a mano materiales delgados, ya que se reduce la tendencia a una perforación excesiva. Esta misma característica representa una ventaja en la soldadura vertical o cenital porque se reduce la tendencia del metal base a pandearse o escurrir.

Helio. El helio (He) es un gas monoatómico inerte muy ligero, con peso atómico de cuatro. Se obtiene por separación a partir del gas natural. El helio de grado soldadura se refina hasta una pureza de por lo menos el 99.99%.

Con valores fijos de corriente de soldadura y longitud del arco, el helio transfiere más calor al trabajo que el argón. El mayor poder de calefacción del arco de helio puede ser ventajoso al soldar metales con elevada conductividad térmica y en aplicaciones mecanizadas de alta velocidad. Además, el helio se usa con mayor frecuencia que el argón para soldar placas gruesas. Las mezclas de helio y argón son útiles cuando se desea un término medio entre las características de ambos gases.

Características del argón y el helio. El factor principal que influye en la efectividad de la protección es la densidad del gas. El argón es aproximadamente una y un tercio veces más denso que el aire y diez veces más denso que el helio. El argón,

después de salir por la boquilla del soplete, forma un manto sobre el área de soldadura. El helio, como es más ligero, tiende a elevarse alrededor de la boquilla. Trabajos experimentales han demostrado consistentemente que, para lograr una efectividad de protección equivalente, el flujo de helio debe ser de dos a tres veces el flujo del argón. La misma relación general se cumple para las mezclas de argón y helio, sobre todo las de alto contenido de helio.

Las características importantes de estos gases son las relaciones voltaje-corriente del arco de tungsteno en argón y en helio que se ilustran en la figura 3.15. En todos los niveles de corriente, con arcos de longitud equivalente, el voltaje de arco que se obtiene con helio es bastante mayor que con argón. Puesto que el calor del arco se mide aproximadamente según el producto de la corriente y el voltaje (potencia de arco), el helio ofrece más calor disponible que el argón. Esto hace que se le prefiera para soldar materiales gruesos y metales con elevada conductividad térmica o punto de fusión relativamente alto.

Sin embargo, cabe señalar que con corrientes bajas las curvas volt-ampere pasan por un mínimo de voltaje, en niveles de corriente separados aproximadamente 90 amperes (A), después del cual el voltaje aumenta al disminuir la corriente. En el caso del helio, este aumento en el voltaje se presenta en el intervalo entre 50 y 150 A, donde se efectúa la mayor parte de los trabajos de soldadura de materiales delgados. Puesto que el incremento de voltaje del argón ocurre por debajo de 50 A, el empleo de este gas en el intervalo de 50 a 150 A ofrece al operador una mayor tolerancia en la longitud del arco para controlar la operación de soldadura.

Es evidente que para obtener la misma potencia de arco se requiere una corriente bastante mayor con argón que con helio. Puesto que el socavamiento con cualquiera de estos gases ocurre más o menos con la misma corriente, el helio producirá soldaduras satisfactorias a velocidades mucho más altas.

La otra característica influyente es la de estabilidad del arco. Ambos gases ofrecen una estabilidad excelente con potencia de corriente continua. Con potencia de corriente alterna, que se usa mucho para soldar aluminio y magnesio, el argón produce un arco mucho más estable y la acción de limpieza que tanto se desea, lo que lo hace muy superior al helio en este aspecto.

Mezclas de argón e hidrógeno. Las mezclas argón-hidrógeno se emplean en casos especiales, como la soldadura mecanizada de tubos de acero inoxidable de calibre delgado, en los que el hidrógeno no tiene efectos metalúrgicos adversos como la porosidad y el agrietamiento inducido por hidrógeno. Es posible aumentar la velocidad de soldadura máxima en proporción casi directa a la cantidad de hidrógeno añadida al argón, en virtud del aumento en el voltaje del arco. Sin embargo, la cantidad de hidrógeno que puede agregarse varía con el espesor del metal y el tipo de unión para cada aplicación específica. Un exceso de hidrógeno causará porosidad. Se han usado concentraciones de hidrógeno de hasta 35% con acero inoxidable de todos los espesores cuando se usa una abertura de raíz de aproximadamente 0.25 a 0.5 mm (0.010 a 0.020 pulg). Las mezclas de argón-hidrógeno sólo pueden usarse con acero inoxidable, níquel-cobre y aleaciones con base de níquel.

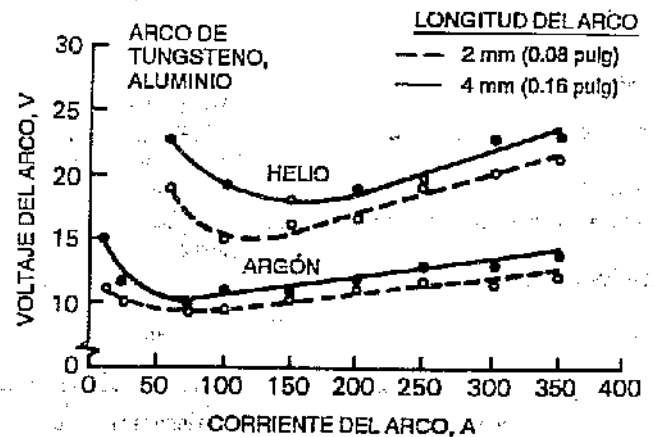


Figura 3.15—Relación voltaje-corriente con escudos de helio y argón

La mezcla de argón-hidrógeno de uso más común contiene 15% de hidrógeno y se usa para soldar mecánicamente uniones a tope estrechas en acero inoxidable de hasta 1.6 mm (0.062 pulg) de espesor a velocidades comparables con las que son posibles con helio (50% más rápido que con argón). También se usa para soldar barriles de cerveza de acero inoxidable, y uniones entre tubos y láminas de tubos en diversos aceros inoxidables y aleaciones de níquel. Para la soldadura manual en ocasiones se prefiere un contenido de hidrógeno del 5% para obtener soldaduras más limpias.

Selección del gas protector. No hay una regla fija para escoger el gas protector para una aplicación en particular. En la mayor parte de las aplicaciones puede usarse con éxito argón, helio o una mezcla de argón y helio, con la posible excepción de la soldadura manual de materiales muy delgados, donde el argón es indispensable. En general, el argón produce un arco que opera de manera más uniforme y silenciosa, se maneja con mayor facilidad y es menos penetrante que un arco escudado con helio. Por añadidura, el menor costo unitario y los requisitos de tasa de flujo más bajos del argón hacen a este gas preferible desde el punto de vista económico. El argón se prefiere en casi todas las aplicaciones, excepto aquellas en las que se requiere la mayor penetración calorífica del helio para soldar secciones gruesas de metales con elevada conductividad térmica, como el aluminio y el cobre. En la tabla 3.4 se da una guía para seleccionar los gases.

Tabla 3.4
Tipos de corriente, electrodos de tungsteno y gases protectores recomendados para soldar diferentes metales

Tipo de metal	Espesor	Tipo de corriente	Electrodo*	Gas protector
Aluminio	Todos	Corriente alterna	Puro o con zirconio	Argón o argón-helio
	Más de 1/8 pulg	CCEN	Toriado	Argón-helio o argón
	Menos de 1/8 pulg	CCEP	Toriado o con zirconio	Helio
Cobre, aleaciones de cobre	Todos	CCEN	Toriado	Argón
	Menos de 1/8 pulg	Corriente alterna	Puro o con zirconio	Argón
Aleaciones de magnesio	Todos	Corriente alterna	Puro o con zirconio	Argón
	Menos de 1/8 pulg	CCEP	Con zirconio o con torio	Argón
		CCEN	Con torio	Argón
Níquel, aleaciones de níquel	Todos	CCEN	Con torio	Argón o argón-helio
Aceros al carbono ordinarios, de baja aleación	Todos	CCEN	Con torio	Argón
	Menos de 1/8 pulg	Corriente alterna	Puro o con zirconio	Argón
		CCEN	Con torio	Argón o argón-helio
Acero inoxidable	Todos	CCEN	Con torio	Argón
	Menos de 1/8 pulg	Corriente alterna	Puro o zirconiado	Argón
Titanio	Todos	CCEN	Toriado	Argón

* En los casos en que se recomiendan electrodos con torio también pueden usarse electrodos con cerio o con lantano.

Tasas de flujo de gas recomendadas

LOS REQUISITOS DE flujo de gas protector se basan en el tamaño de la copa o la boquilla, el tamaño del charco de soldadura y el movimiento del aire. En general, la tasa de flujo aumenta en proporción con el área de sección transversal de la boquilla (considerando la obstrucción que representa el mandril). Se escoge un diámetro de boquilla apropiado para el tamaño del charco de soldadura y la reactividad del metal que se va a soldar. La tasa de flujo mínima está determinada por la necesidad de un chorro rígido que venza los efectos de calentamiento del arco y las corrientes de aire transversales. Con los sopletes de uso más común, las tasas de flujo de gas protector típicas son de 7 a 16 L/min (15 a 35 pies³/h) para argón y de 14 a 24 L/min (30 a 50 pies³/h) para helio. Una tasa de flujo de gas excesiva causará turbulencia en el chorro de gas que puede introducir contaminación atmosférica en el charco de soldadura.

Un viento o corriente de aire transversal con velocidad de ocho o más kilómetros por hora puede romper el escudo de gas protector. Los chorros de gas más rígidos sin turbulencia (con velocidades de flujo elevadas) se obtienen incorporando lentes de gas a la boquilla y empleando helio como gas protector. Sin embargo, para reducir los costos, es preferible usar pantallas protectoras para bloquear el flujo del aire en lugar de aumentar el flujo del gas protector.

Purgante de respaldo

AL EFECTUAR LA pasada de raíz de una soldadura, el aire contenido en el lado de atrás de la pieza de trabajo puede contaminar la soldadura. Para evitar este problema, es preciso purgar el aire de esta región. El argón y el helio son satisfactorios como purgantes de respaldo sea cual sea el material soldado. Se puede

usar con éxito nitrógeno para respaldar soldaduras en acero inoxidable austenítico, cobre y aleaciones de cobre.

La tasa de flujo de gas requerida para el purgante de respaldo va de 0.5 a 42 L/min (1 a 90 pies³/h), dependiendo del volumen que se va a purgar. Como regla empírica, se puede obtener una atmósfera relativamente inerte dejando pasar cuatro veces el volumen que se va a purgar. Una vez purgado el volumen, el flujo de gas de respaldo durante la soldadura deberá reducirse de modo que se mantenga apenas una presión ligeramente positiva en el área purgada. Una vez completada la pasada de raíz y las primeras pasadas de relleno, puede discontinuarse el purgante de respaldo.

Hay varios dispositivos que sirven para contener el gas protector en el lado de atrás de soldamentos de placa y tubería. Uno de ellos se muestra en la figura 3.16. Si desea más información, consulte la edición más reciente de ANSI/AWS C5.5, *Prácticas recomendadas para soldadura por arco de tungsteno y gas*.

Al purgar sistemas de tubería, es importante contar con un respiradero o escape adecuado, como el de la figura 3.17, para evitar que suba demasiado la presión durante la soldadura. El área de los respiraderos por los que el gas de respaldo sale a la atmósfera debe ser por lo menos igual al área de la abertura por la que el gas entra al sistema. Se debe tener cuidado especial de asegurar que la presión del purgante de respaldo no sea excesiva al soldar los últimos centímetros de la pasada de raíz, a fin de evitar que el charco de soldadura burbujee o se forme una concavidad en la raíz.

Si se usa argón o nitrógeno, es preferible que el gas de respaldo entre en el sistema por un punto bajo, para que desplace la atmósfera hacia arriba, y que salga por un punto situado más allá de la unión que se va a soldar. Una vez más, refiérase a la figura 3.17. En sistemas de tuberías con varias uniones, todas excepto la que se está soldando deberán cubrirse con cinta para evitar pérdida de gas.

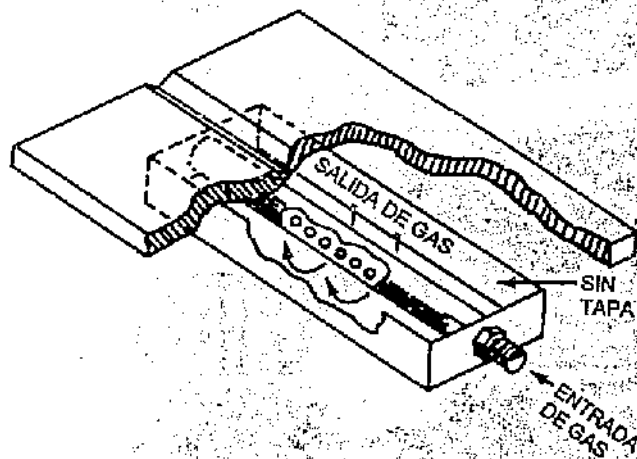


Figura 3.16—Canal de gas purgante de respaldo

Cámara para soldar con atmósfera controlada

SE PUEDE OBTENER el máximo de beneficios al soldar metales reactivos si el objeto entero que se va a soldar puede colocarse en una cámara de atmósfera controlada. Estas cámaras, como la de la figura 3.18, contienen las piezas por soldar, el gas protector y el equipo de soldadura. Una vez colocadas las piezas en la cámara, se inicia la purga y se toman lecturas con instrumentos analizadores de oxígeno, nitrógeno y vapor de agua para asegurar que no se comenzará a soldar hasta que los contaminantes tengan niveles suficientemente bajos, por lo regular menores que 50 ppm.

Escudos de estela

EN EL CASO de algunos metales, como el titanio, se requieren escudos con estela si no están disponibles cámaras u otras técnicas de protección o si no resultan prácticas. El empleo de

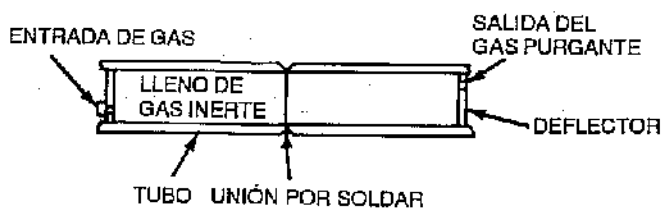


Figura 3.17—Sistema de gas purgante de respaldo para unión circunferencial en tubería (obsérvese el uso de deflectores para contener el gas purgante)

un escudo con estela asegura que el área de soldadura estará cubierta hasta que el metal fundido se haya enfriado hasta el punto en que ya no reacciona con la atmósfera. En la figura 3.19 se muestra un tipo de escudo con estela. Las barreras fijas, como la de la figura 3.20, también ayudan a confinar el gas protector dentro del área inmediata al electrodo.

MÉTODOS DE INICIACIÓN DEL ARCO

Inicio de fricción o toque

CON LA FUENTE de potencia energizada, y el gas protector fluyendo por la copa, el soplete se acerca a la pieza de trabajo hasta que el electrodo de tungsteno hace contacto con ella. De inmediato se retira el soplete una distancia corta para establecer el arco.

La ventaja de este método de iniciación del arco es su sencillez tanto para soldadura manual como mecanizada. La desventaja del inicio de toque es la tendencia del electrodo a pegarse a la pieza de trabajo, con la consiguiente contaminación del electrodo y transferencia de tungsteno al trabajo.

Inicio de alta frecuencia

EL INICIO DE alta frecuencia puede usarse con fuentes de potencia de cc o de ca en aplicaciones tanto manuales como automatizadas. Los generadores de alta frecuencia por lo regular tienen un oscilador de salto de chispa que superpone una salida de ca de alto voltaje a radiofrecuencias en serie con el circuito de soldadura. El circuito se muestra en la figura 3.21. El alto voltaje ioniza el gas entre el electrodo y el trabajo, y el gas ionizado conduce la corriente de soldadura que inicia el arco.

Como las radiaciones del generador de alta frecuencia pueden afectar los equipos de radio, electrónicos y de computación, el empleo de este tipo de sistemas de inicio del arco está regido por los reglamentos de las autoridades de comunicaciones. El usuario deberá seguir las instrucciones del fabricante para instalar y usar el equipo de inicio de arco por alta frecuencia correctamente.

Inicio de pulso

LA APLICACIÓN DE un pulso de alto voltaje entre el electrodo de tungsteno y el trabajo ionizará el gas protector y establecerá el arco de soldadura. Este método generalmente se usa con fuentes de potencia de cc en aplicaciones de soldadura mecanizada.

Inicio con arco piloto

EL INICIO CON arco piloto puede usarse con fuentes de potencia de cc para soldadura. El arco piloto se mantiene entre el electrodo y la boquilla del soplete, y proporciona el gas ionizado que se necesita para establecer el arco de soldadura, como se muestra en la figura 3.22. El arco piloto se alimenta de una pequeña fuente de potencia auxiliar y se inicia con alta frecuencia.

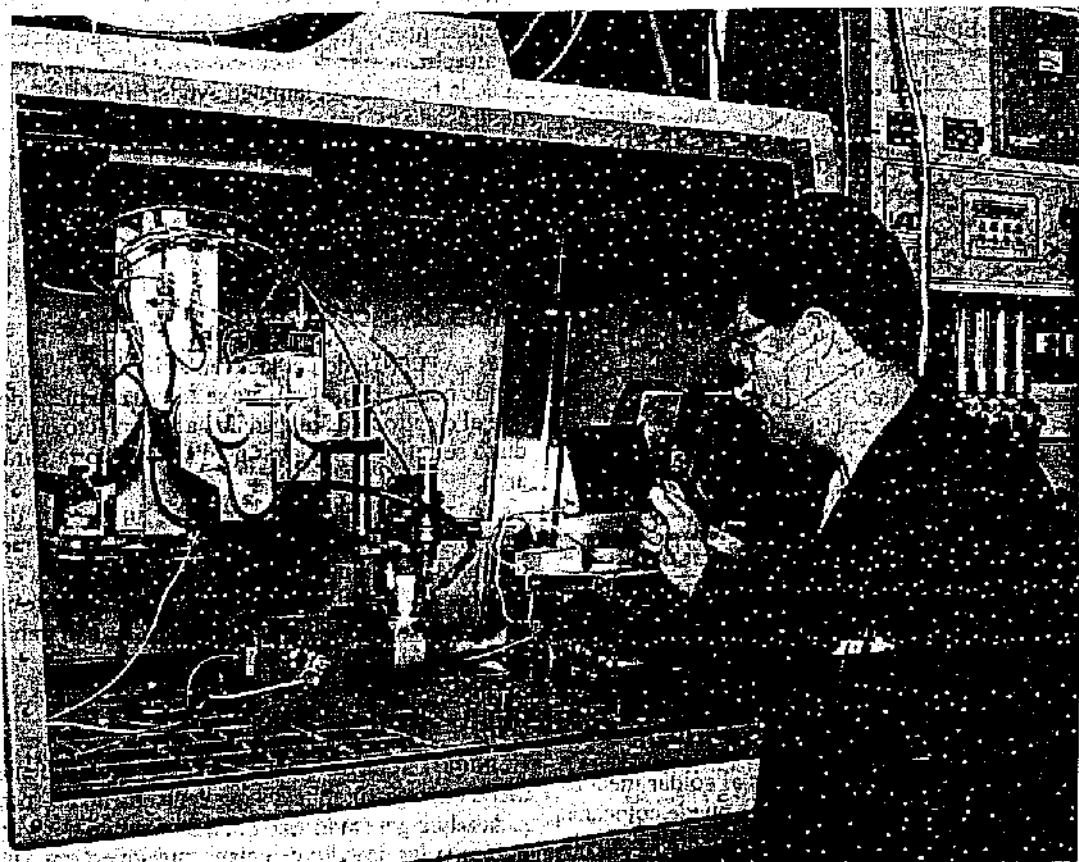


Figura 3.18—Cámara de atmósfera controlada empleada para soldadura por arco de tungsteno y gas de metales reactivos (Nota: El operador vigila el arco a través de una ventana de plexiglas)

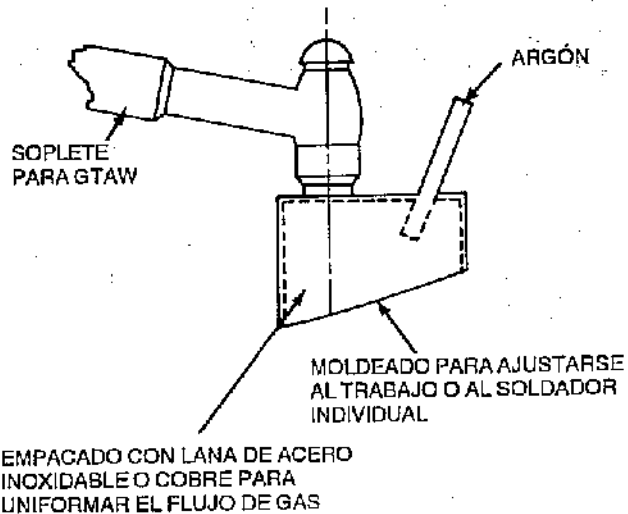


Figura 3.19—Escudo con estela para soplete manual

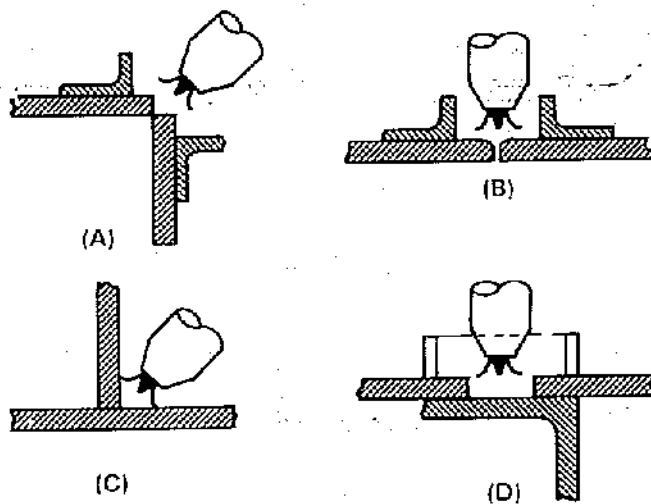


Figura 3.20—Barreras empleadas para contener el gas protector cerca de la unión que se va a soldar

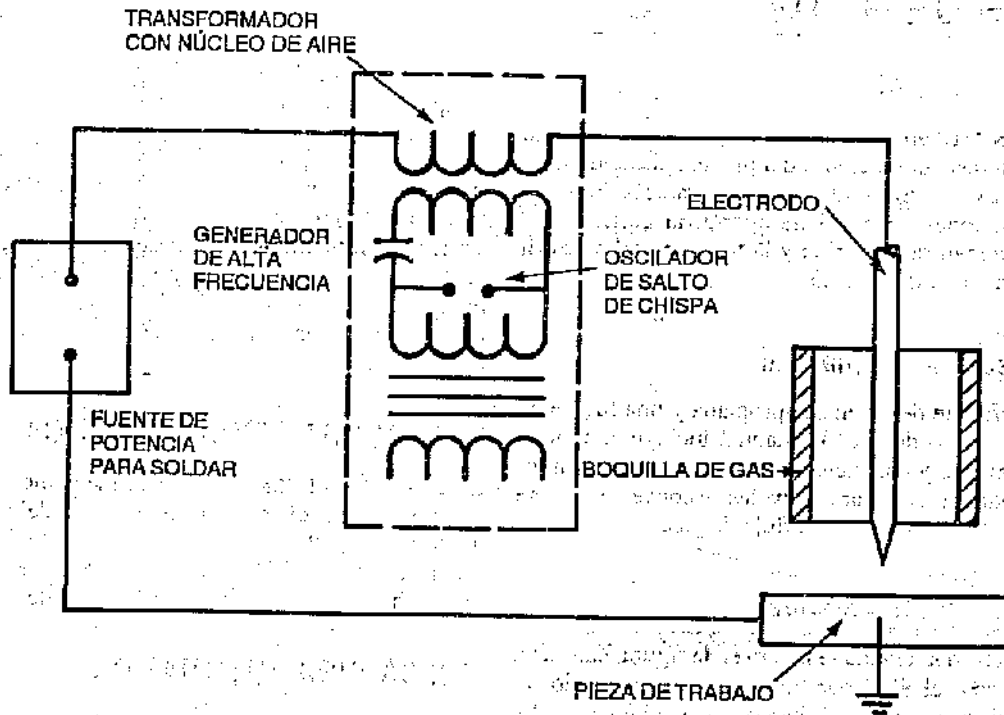


Figura 3.21—Inicio de arco con alta frecuencia

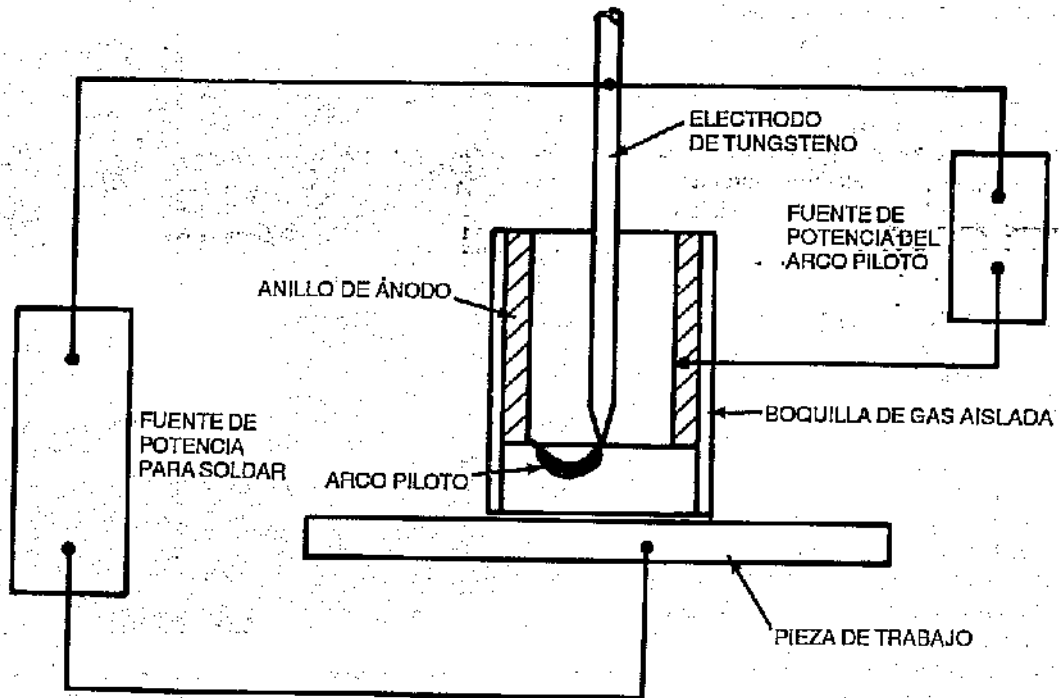


Figura 3.22—Circuito de inicio con arco piloto empleado para la soldadura de puntos por arco de tungsteno y gas

TÉCNICAS DE GTAW

SOLDADURA MANUAL

LA PALABRA "MANUAL" en el proceso GTAW implica que una persona controla todas las funciones del proceso de soldadura. Las funciones incluyen la manipulación del portaelectrodos y el control de las adiciones de metal de aporte, la corriente de soldadura, la velocidad de recorrido y la longitud del arco. El proceso se muestra en la figura 3.23.

Equipo para soldadura manual

ADEMÁS DE UNA fuente de potencia apropiada y una fuente de gas protector, el equipo de GTAW manual incluye el soplete para soldar, mangueras y conductores eléctricos, pedal (o interruptor en el soplete) para regular los niveles de corriente durante el ciclo de soldadura, y controles del flujo de gas.

Técnicas de soldadura manual

LA TÉCNICA PARA soldar a mano se ilustra en la figura 3.24. Una vez iniciado el arco, el electrodo se mueve describiendo un círculo pequeño hasta establecer el charco de soldadura deseado. Luego se sostiene el soplete con un ángulo de 15° respecto a la vertical como se muestra en la ilustración y se mueve a lo largo de la unión para fundir progresivamente las superficies de empalme. El metal de aporte, si se usa, se añade al borde delantero del charco.

El portaelectrodos y la varilla de soldadura se deben desplazar progresivamente y con suavidad para que el charco de soldadura, el extremo caliente de la varilla y la soldadura solidificada caliente no queden expuestos al aire que contaminaría el metal de soldadura o la zona térmicamente afectada. En general una envoltura grande de gas protector evita la exposición al aire.

La varilla de soldadura por lo regular se sostiene con un ángulo de unos 15° respecto a la superficie del trabajo y se alimenta lentamente al charco de soldadura. Durante el proceso, el extremo caliente de la varilla no debe salir de la protección que brinda el escudo de gas inerte.

SOLDADURA MECANIZADA

LA SOLDADURA MECANIZADA se efectúa con equipo que realiza la operación de soldadura bajo la supervisión y control constantes de un operador. El equipo puede o no cargar y descargar las piezas de trabajo.

La GTAW mecanizada ofrece mayor control sobre la velocidad de recorrido y el aporte de calor a la pieza de trabajo. El mayor costo del equipo que proporciona estos beneficios debe justificarse con los requisitos de producción y calidad.

El equipo de GTAW mecanizada, como el soldador orbital de tubos que se muestra en la figura 3.25, va desde sencillos secuenciadores de programas de soldadura y manipuladores mecánicos hasta sistemas de soldadura orbital de tubos y conductos. Los secuenciadores de soldadura operan en modo de control de lazo abierto: las variables se mantienen en niveles preestablecidos y no se intenta ajustarlos para responder a cam-

bios en la calidad de la soldadura. El secuenciador inicia y completa la soldadura automáticamente, pasando de un conjunto de valores de las variables a otro en momentos o lugares previamente determinados a lo largo de la unión que se suelda. Las tolerancias de las piezas deben controlarse estrictamente y las fijaciones deben ser fuertes, ya que el secuenciador no puede compensar movimientos no deseados de las piezas durante la soldadura. Las piezas de alta precisión y las fijaciones robustas incrementan los costos de producción, pero los secuenciadores por lo regular cuestan menos que los controladores automáticos más avanzados.

SOLDADURA SEMIAUTOMÁTICA

LA GTAW SEMIAUTOMÁTICA se define como una soldadura con equipo que controla sólo la alimentación del metal de aporte; el avance del soplete se controla manualmente. Los sistemas semiautomáticos para GTAW se introdujeron alrededor de 1952 pero sólo se han usado en aplicaciones especiales.

SOLDADURA AUTOMÁTICA

LA SOLDADURA CON equipo que lleva a cabo la operación sin que un operador ajuste los controles se denomina *soldadura automática*. El equipo puede o no cargar y descargar las piezas de trabajo. La figura 3.26 muestra una aplicación de GTAW automática típica en la que las piezas se cargan y descargan también en forma automática.

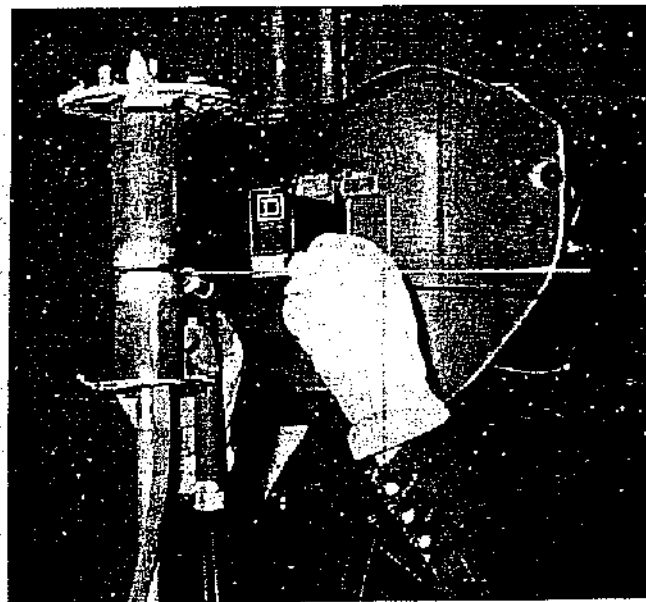


Figura 3.23—Soldadura manual con arco de tungsteno y gas de una unión de tubería. Obsérvese la manguera del gas purgante de respaldo

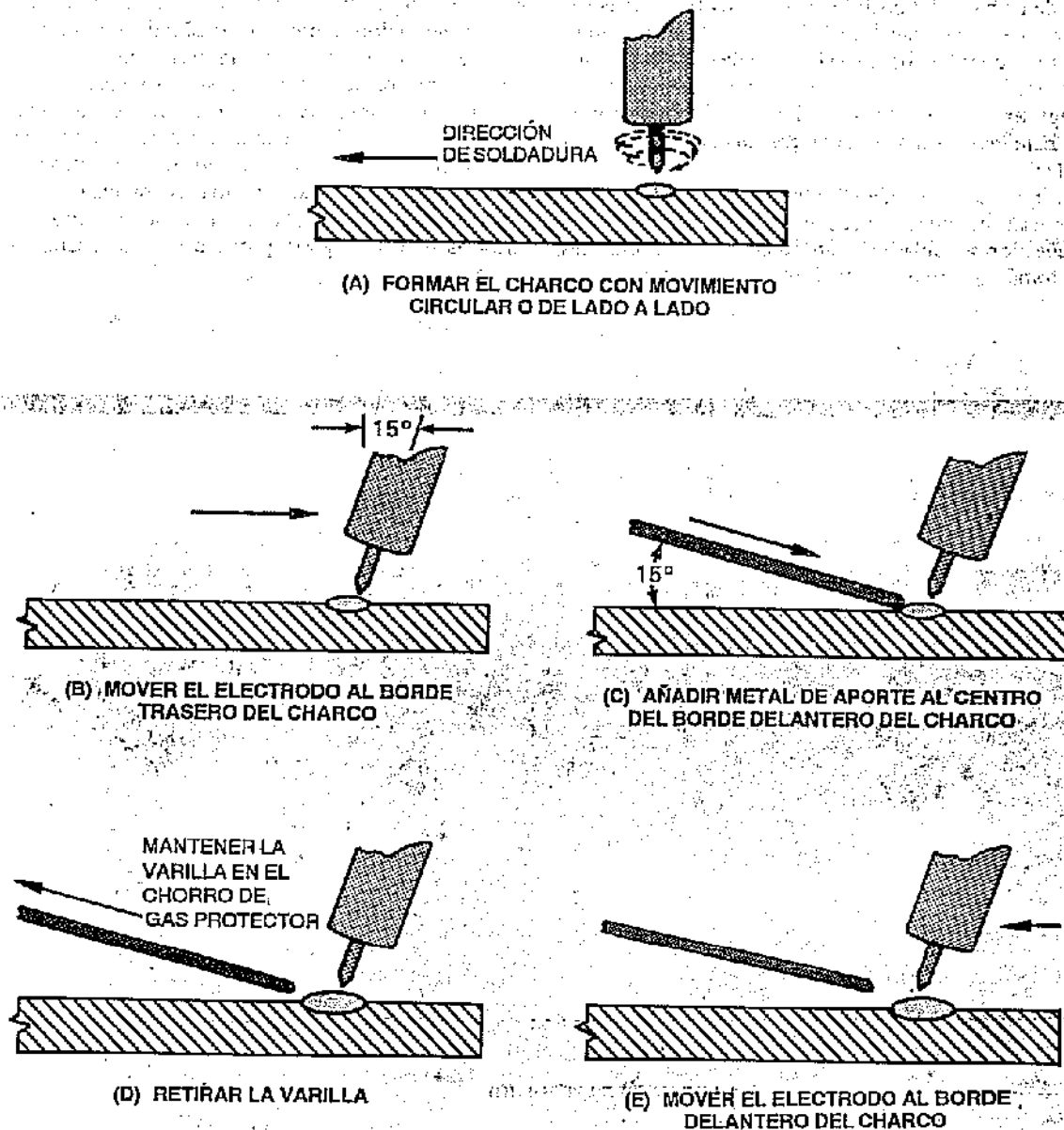


Figura 3.24—Técnica para soldadura por arco de tungsteno y gas manual

Algunos sistemas de soldadura automática modernos (con frecuencia caracterizados como de *control adaptativo* o *por retroalimentación*) corrigen las variables de soldadura basándose en información obtenida durante el proceso. El objetivo es mantener la calidad de la soldadura en un nivel constante a pesar de cambios en las condiciones del proceso. El ajuste automático de las variables de soldadura individuales, como la corriente o la longitud del arco, se hace vigilando una característica de la soldadura, como la anchura del charco. Existen otros sistemas de control por retroalimentación que guían el electrodo y rellenan constantemente la unión.

SOLDADURA DE PUNTOS POR ARCO

LA SOLDADURA DE puntos por arco de tungsteno y gas a menudo se realiza manualmente con un portaelectrodos parecido a una pistola que tiene una boquilla de gas enfriada por agua y con respiraderos, un electrodo de tungsteno situado en posición concéntrica respecto a la boquilla y un interruptor de gatillo para controlar la operación. La figura 3.27 ilustra un sistema de este tipo. También hay portaelectrodos para aplicaciones automáticas de la soldadura de puntos por arco de tungsteno y gas.

La configuración de la boquilla varía para adaptarse al perfil de las piezas de trabajo. Es posible usar dispositivos detectores de bordes para evitar variaciones en la distancia que hay entre los puntos de soldadura y el borde de la pieza de trabajo. En muchos casos se usa la boquilla para presionar contra la pieza de trabajo y asegurar un buen embonamiento de las superficies de empalme. Esta técnica también controla la distancia entre el electrodo y el trabajo.

La soldadura de puntos puede efectuarse con caño CCEN. Generalmente se usan controles de secuencia automáticos porque los ciclos en cuestión son relativamente complejos. Los controles establecen automáticamente el flujo de gas y agua previo a la

soldadura, encienden el arco, miden la duración del arco y suministran el flujo de gas y agua posterior a la soldadura requerido.

La penetración se controla ajustando el nivel de la corriente y el tiempo que fluye. En algunas aplicaciones se prefieren múltiples pulsos de corriente en vez de un pulso largo sostenido. Las variaciones en la resistencia al corte, el diámetro de la pepita y la penetración de la soldadura pueden minimizarse con cronómetros precisos, monitores de corriente y electrodos de tungsteno cuya punta haya sido amolada con precisión.

Un punto fundido en la cara inferior de la pieza de trabajo inferior es una indicación positiva de una buena soldadura de punto.

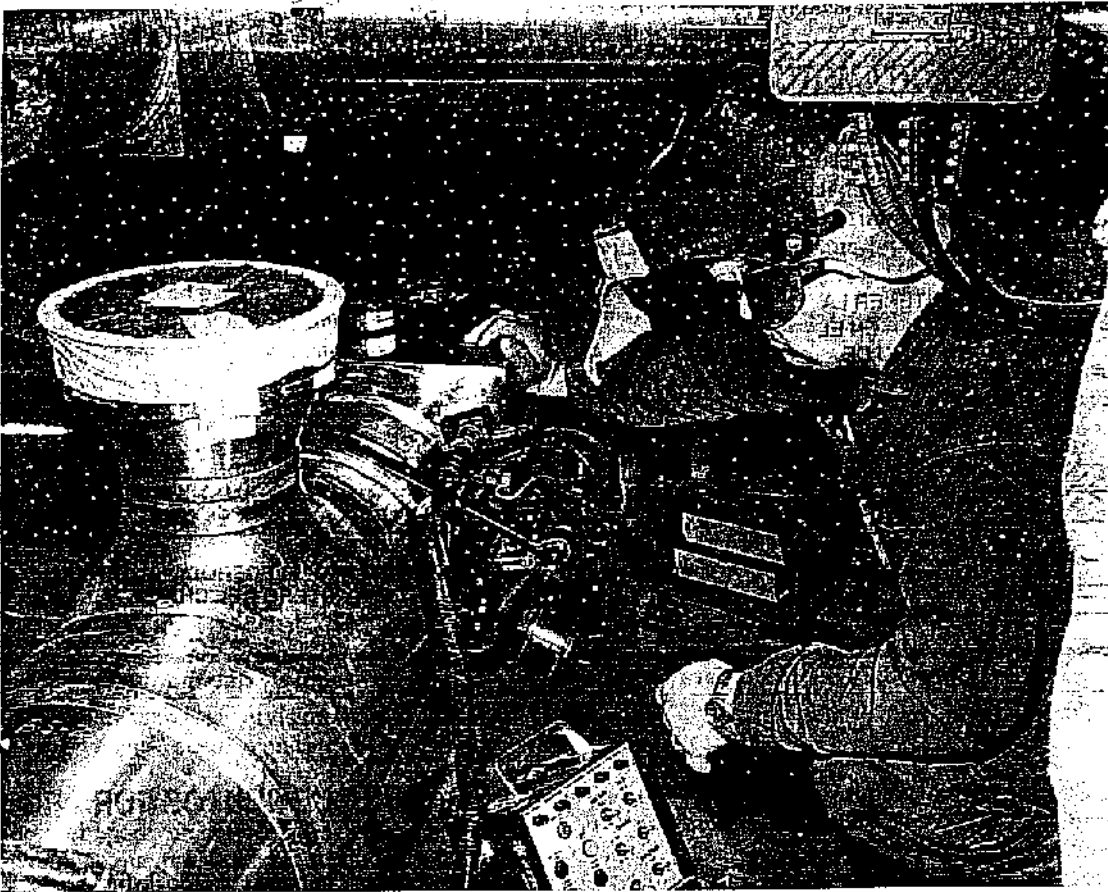


Figura 3.25—Soldadura mecanizada de un ensamble de tuberías empleando una soldadora orbital (Nota: Se pegó un deflector a la boquilla para contener el gas de respaldo)

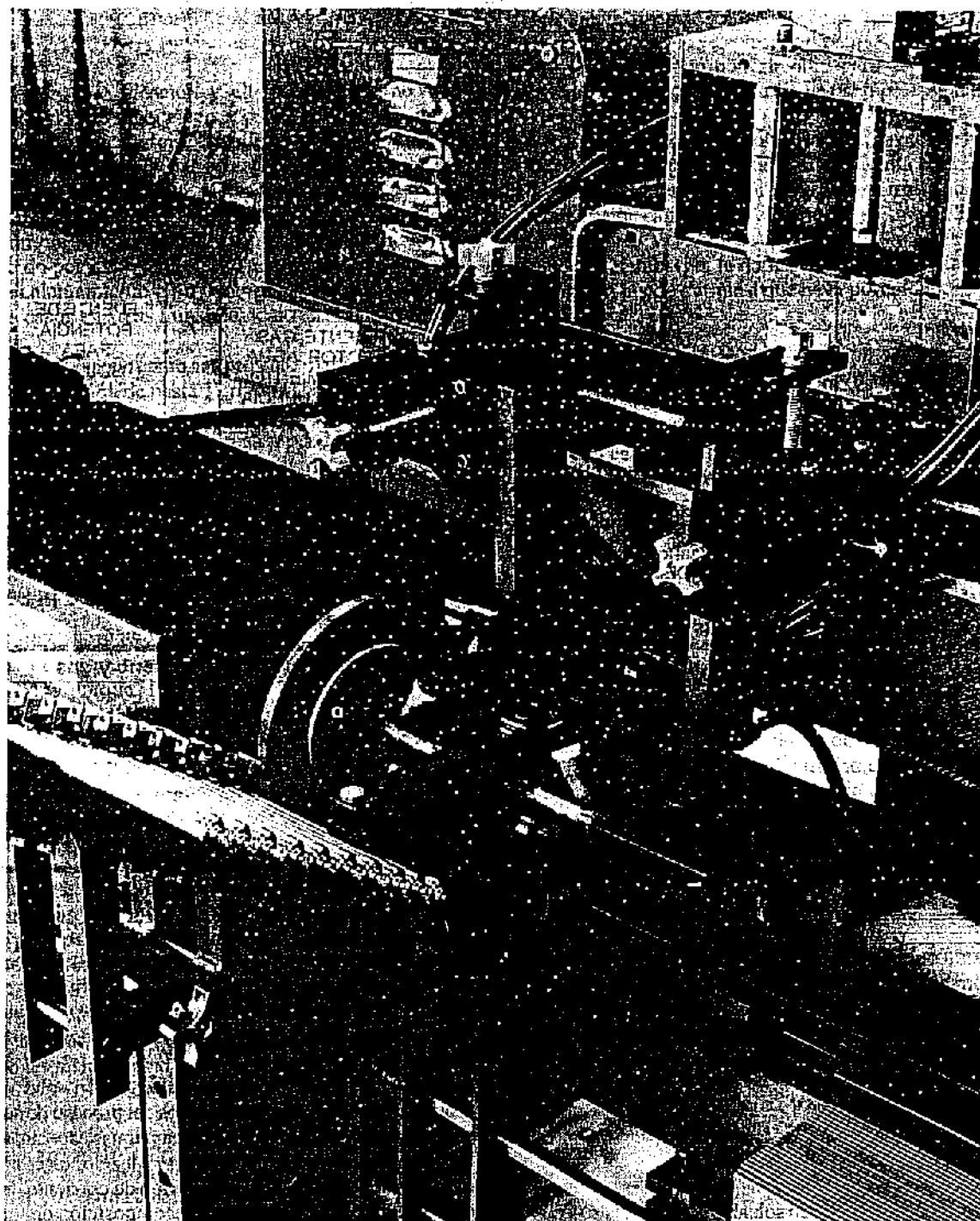


Figura 3.26—Aplicación de GTAW automática en la que las piezas de trabajo se cargan y descargan automáticamente

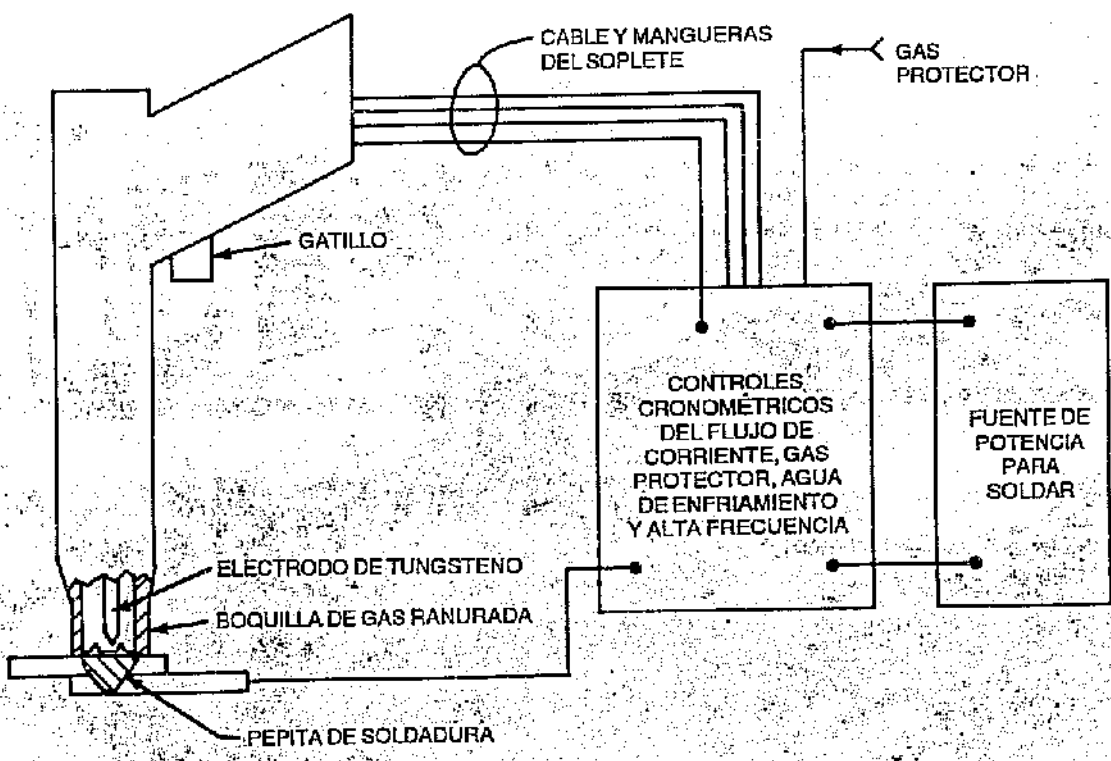


Figura 3.27-Esquema de la soldadura de puntos manual por arco de tungsteno y gas

MATERIALES

EN ESTA SECCIÓN se describen los materiales que pueden soldarse con el proceso GTAW. Las soldadura autógenas se hacen fundiendo sólo el metal base. Si se usa metal de aporte, puede ser en forma de alambre o de inserciones consumibles precocadas.

METALES BASE

CASI TODOS LOS metales pueden soldarse con el proceso GTAW, incluidos varios grados de aceros al carbono, de aleación e inoxidable y otras aleaciones ferrosas; aleaciones resistentes al calor de diversos tipos; aleaciones de aluminio; aleaciones de magnesio; cobre y sus aleaciones, como cobre-níquel, bronce y latones, y aleaciones de níquel. Ciertos metales deben soldarse con el proceso GTAW porque es el que ofrece mayor protección

en cuanto a contaminación por la atmósfera. Este proceso resulta especialmente útil para soldar metales reactivos y refractarios y algunas aleaciones no ferrosas. No se usa para soldar metales como cadmio, estaño o cinc, cuyos líquidos tienen muy baja presión de vapor.

En esta sección se presenta información sobre los posibles problemas metalúrgicos exclusivos del proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas, y las precauciones especiales que deben tomarse al soldar ciertos metales y aleaciones con GTAW. Se incluyen sugerencias respecto al tipo de corriente de soldadura, composición de los electrodos y composición del gas protector que pueden producir soldaduras de calidad óptima. La tabla 3.4 puede servir de guía para la selección de electrodos y gases. En general, los mejores resultados se obtienen con CCEN para casi todos los metales, a menos que se especifique lo contrario. La composición típica del electrodo de tungsteno es la toriada al 2%, si no se indica otra cosa.

Ac
LA
CON
GAS
PROTECTOR
FUENTE DE
POTENCIA
PARA
SOLDAR
CONTROLES
CRONOMETRICOS
DEL FLUJO DE
CORRIENTE, GAS
PROTECTOR, AGUA
DE ENFRIAMIENTO
Y ALTA FRECUENCIA

Aceros al carbono y de aleación

LA CALIDAD DE las soldaduras por arco de tungsteno y gas en aceros al carbono y de aleación acusa mayor influencia del contenido de impurezas del metal base (p. ej., azufre, fósforo, oxígeno) que las soldaduras hechas con SMAW o SAW. Esto se debe a que en GTAW no hay fundentes que eliminen o capturen estas impurezas.

Los aceros de baja aleación y alta resistencia mecánica (HSLA) se sueldan fácilmente con el proceso GTAW, aunque niveles combinados de fósforo y azufre en el metal base en exceso de 0.03% pueden causar agrietamiento de la zona de fusión y de la zona térmicamente afectada. La pérdida de ductilidad por hidrógeno en estas aleaciones es un problema si hay contaminación por hidrocarburos o vapor de agua. El agrietamiento inducido por hidrógeno puede minimizarse con la aplicación de precalentamiento o un tratamiento térmico posterior o, en algunos casos en áreas muy húmedas, usando escudos de gas con estela.

En general se usa argón como gas protector para soldar aceros al carbono y de aleación de hasta 12 mm (1/2 pulg) de espesor, porque el charco de soldadura es más fácil de controlar que si se usa helio. Al soldar secciones más gruesas puede emplearse argón o una mezcla argón-helio, dependiendo del espesor de las uniones.

Aceros inoxidables y aleaciones resistentes al calor

LOS ACEROS INOXIDABLES y las superaleaciones resistentes al calor con base de hierro, níquel y cobalto se sueldan mucho con el proceso GTAW porque el gas inerte los protege de la atmósfera. La composición del metal de soldadura es en esencia idéntica a la del metal base porque se utilizan las mismas aleaciones como metal de aporte y porque el metal de aporte entra en el charco de soldadura sin pasar por el arco, donde podrían esperarse pérdidas de aleaciones volátiles.

Se recomienda argón para soldar a mano espesores de hasta 12 mm (1/2 pulg) porque permite controlar mejor el charco de soldadura. En el caso de secciones gruesas, y en muchas aplicaciones mecanizadas y automáticas, se puede usar mezclas argón-helio o helio puro para aumentar la penetración de la soldadura. En algunas aplicaciones de acero inoxidable se emplean mezclas de argón e hidrógeno para mejorar la forma de la franja de soldadura y reducir su tensión superficial.

Se puede usar corriente alterna para la soldadura automática de las aleaciones resistentes al calor, donde es posible controlar con precisión la longitud del arco.

Aleaciones de aluminio

EL PROCESO GTAW resulta ideal para soldar aleaciones de aluminio de cualquier espesor; la soldadura puede efectuarse con o sin metal de aporte.

Las aleaciones de aluminio forman óxidos superficiales refractarios que dificultan la unión. Por esta razón, el aluminio casi siempre se suelda con corriente alterna (empleando estabilización del arco con alta frecuencia) porque se obtiene la acción de limpieza superficial de CCEP junto con las características de

mayor penetración de CCEN. En ocasiones se usa CCEP para soldar secciones de aluminio delgadas. Para la soldadura automática de secciones mayores que 6 mm (1/4 pulg) se usa CCEN con escudo de helio y corriente elevada. Como la CCEN no tiene acción limpiadora, las piezas de aluminio deben limpiarse minuciosamente antes de soldar.

Se recomiendan los electrodos de tungsteno puro, tungsteno con cerio y tungsteno con zirconio para soldar con ca. Los electrodos de tungsteno con torio se usan para soldar aluminio sólo con cc.

Generalmente se usa argón como gas protector para soldar aluminio con corriente alterna porque facilita el encendido del arco, produce mejor acción limpiadora y permite obtener soldaduras de mejor calidad que el helio. Si se usa CCEN, el helio ofrece mayores velocidades de recorrido y penetración más profunda; sin embargo, la deficiente acción limpiadora de esta combinación puede dar pie a que haya porosidad.

Aleaciones de magnesio

LAS ALEACIONES DE magnesio, a semejanza de las de aluminio, forman óxidos superficiales refractarios. Por lo regular se usa GTAW con corriente alterna para soldar estas aleaciones por la acción de limpieza de óxidos que ofrece. Se puede usar CCEP para soldar secciones de menos de 5 mm (3/16) de espesor, pero la corriente alterna ofrece la mayor penetración que se necesita para soldar secciones más gruesas. Las soldaduras de mejor calidad se obtienen con argón, pero también se usa helio y mezclas de los dos gases. Se puede usar electrodos de tungsteno puro, con cerio y con zirconio.

Berilio

EL BERILIO ES un metal ligero difícil de soldar por su tendencia al agrietamiento y pérdida de ductilidad en caliente. La GTAW de berilio se efectúa en una cámara de atmósfera inerte, casi siempre empleando una mezcla de gas protector de cinco partes de helio y una de argón. Los vapores de berilio son tóxicos.

Aleaciones de cobre

EL PROCESO GTAW se presta para soldar cobre y sus aleaciones porque el intenso calor que genera el arco puede producir fusión con un mínimo de calentamiento del metal base circundante, de elevada conductividad. La mayor parte de las aleaciones de cobre se sueldan con CCEN y helio a causa de la conductividad térmica tan alta. En ocasiones se usa ca para soldar cobres de berilio y bronce de aluminio porque ayuda a disgregar los óxidos superficiales que están presentes.

Aleaciones de níquel

LAS ALEACIONES DE níquel a menudo se sueldan con arco de tungsteno y gas, casi siempre con adiciones de metal de aporte. Se recomienda CCEN para todas las aplicaciones, pero se puede usar ca con estabilización por alta frecuencia para soldadura mecanizada. Los gases protectores más comunes son argón, argón helio y helio. Se prefiere el helio cuando no se va a añadir

metal de aporte. En ocasiones se emplea argón con pequeñas cantidades de hidrógeno (hasta 5%) para soldaduras de una sola pasada.

Las aleaciones de níquel de alta pureza pueden tener variaciones en la penetración de la soldadura causadas por diferencias en el contenido de elementos surfactantes.

Metales refractarios y reactivos

EL ARCO DE tungsteno con gas es el proceso de soldadura más utilizado para unir metales refractarios y reactivos. Los metales refractarios (sobre todo tungsteno, molibdeno, tantalio, niobio y cromo) tienen puntos de fusión muy elevados y, al igual que los metales reactivos (como las aleaciones de titanio, las aleaciones de zirconio y el hafnio) se oxidan con rapidez a altas temperaturas si no se protegen con una capa de gas inerte. La absorción de impurezas como el oxígeno, nitrógeno, hidrógeno y carbono reduce la tenacidad y ductilidad del metal de soldadura.

Para estos metales y aleaciones, GTAW ofrece una alta concentración de calor y máximo control sobre el aporte de calor, al tiempo que proporciona la mejor protección con gas inerte de cualquier proceso de soldadura. Típicamente, estos metales se sueldan en cámaras purgadas que contienen gases inertes de alta pureza. En ocasiones, la soldadura GTAW se efectúa sin cámaras de purgado especiales, proveyendo la atmósfera inerte necesaria con escudos de soplete, de estela y de respaldo.

El argón es el gas que más a menudo se usa para proteger, pero puede usarse helio y mezclas de ambos gases. Son suficientes tasas de flujo de 15 pies³/h para argón y de 40 pies³/h para helio, incluso cuando se recomiendan boquillas de diámetro grande.

Hierros colados

EL HIERRO COLADO se puede soldar con el proceso GTAW porque se puede minimizar la dilución del metal base mediante un control independiente del aporte de calor y de la colocación del metal de aporte. Se requiere mucha habilidad por parte del operador para minimizar la dilución al tiempo que se mantiene una penetración y fusión aceptables.

La GTAW de hierros colados normalmente se limita a la reparación de piezas pequeñas. Se recomiendan metales de aporte con base de níquel y de acero inoxidable austenítico; minimizan el agrietamiento en virtud de su ductilidad y su tolerancia respecto al hidrógeno. También puede minimizarse el agrietamiento precalentando y aplicando tratamiento térmico posterior. Se recomienda CCEN, aunque puede usarse ca.

METALES DE APORTE

SE DISPONE DE metales de aporte para unir una amplia variedad de metales y aleaciones mediante soldadura por arco de tungsteno y gas. Si se usa metal de aporte, debe ser similar, aunque no necesariamente idéntico, al metal que se va a unir. Al unir metales disímiles, el metal de aporte será diferente de uno de los metales base, o de ambos.

En general, la composición de metal de aporte se ajusta tratando de igualar las propiedades del metal base en su condición soldada (colada). Estos metales de aporte se producen con un mayor control sobre su química, pureza y calidad que los metales base. Es frecuente que se les añadan desoxidantes para garantizar la integridad de la soldadura. Algunas composiciones de metales de aporte se ajustan para mejorar la respuesta al tratamiento térmico posterior.

La elección del metal de aporte para cualquier aplicación es un término medio en cuanto a los aspectos de compatibilidad metalúrgica, idoneidad para el servicio propuesto y costo. También es preciso considerar las propiedades de resistencia a la tensión, el impacto y la corrosión, y de conductividad térmica o eléctrica que se requieren en un ensamble soldado en particular. El metal de aporte debe adecuarse tanto a la aleación que se va a soldar como al servicio al que se le piensa destinar.

En la tabla 3.5 se dan las especificaciones de la AWS para metales de aporte aplicables a la soldadura por arco de tungsteno y gas. Las especificaciones establecen clasificaciones de los metales de aporte con base en las propiedades mecánicas o en las composiciones químicas, o en ambas cosas, de cada metal de aporte. También indican las condiciones en las que deben probarse los metales de aporte.

Los apéndices de las especificaciones ofrecen antecedentes útiles sobre las propiedades y usos de los metales de aporte

Tabla 3.5
Especificaciones de la AWS de metales de aporte apropiados para soldadura por arco de tungsteno y gas

Número de especificación	Título
A 5.2	Varillas de hierro y acero para soldadura con gas
A 5.7	Varillas y electrodos para soldadura desnudos de cobre y aleaciones de cobre
A 5.9	Varillas y electrodos para soldadura por arco de acero al cromo y al cromo níquel, resistentes a la corrosión, desnudos y compuestos con núcleo de metal, y trenzados
A 5.10	Varillas y electrodos desnudos para soldadura de aluminio y aleaciones de aluminio
A 5.13	Varillas y electrodos de soldadura para recubrimiento
A 5.14	Varillas y electrodos para soldadura desnudos de níquel y aleaciones de níquel
A 5.16	Varillas y electrodos para soldadura desnudos de titanio y aleaciones de titanio
A 5.18	Electrodos de acero dulce para soldadura por arco de metal y gas
A 5.19	Varillas y electrodos desnudos para soldadura de aleaciones de magnesio
A 5.24	Varillas y electrodos para soldadura desnudos de zirconio y aleaciones de zirconio

dentro de las diferentes clasificaciones. Los catálogos de los fabricantes proporcionan información práctica sobre el uso debido de sus productos. En la última edición de *Filler Metal Comparison Charts* de la AWS se presentan listas de marcas y direcciones de proveedores de metales de aporte.

Los metales de aporte para GTAW están disponibles, para la mayor parte de las aleaciones, en forma de tramos rectos (varillas), por lo regular de 1 m (36 pulg) de largo, para soldadura manual, y en forma de alambre continuo en carretes o rollos para soldadura mecanizada o automática. Los diámetros van desde 0.5 mm (0.020 pulg) para trabajo fino y delicado hasta unos 5 mm (3/16 pulg) para soldadura o recubrimiento manual con corriente elevada.

Se debe tener cuidado especial para mantener los metales de aporte limpios y libres de toda contaminación mientras están almacenados, y también al usarlos. El extremo caliente del alambre o varilla no debe salir del área protegida por el escudo de gas inerte durante la operación de soldadura.

El metal de aporte puede añadirse en forma de inserciones consumibles para las soldaduras de pasada de raíz en ciertas aplicaciones de tubería y placas. Entre las ventajas de este procedimiento están las tolerancias de embonamiento más amplias, menores niveles de habilidad y experiencia de los operadores, fusión de la franja de soldadura más consistente y franjas inferiores más lisas y uniformes.

DISEÑO DE LAS UNIONES

EN VIRTUD DE la diversidad de metales base y de sus características individuales (como tensión superficial, fluidez, punto de fusión, etc.), conviene usar geometrías o diseños de unión que ofrezcan condiciones óptimas para la soldadura. Entre los factores que influyen en el diseño de las uniones están la composición y espesor de los metales, los requisitos de penetración de la soldadura, la restricción de las uniones y los requisitos de eficiencia de las mismas.

CONFIGURACIÓN BÁSICA DE LAS UNIONES

LAS CINCO UNIONES básicas (a tope, traslapada, en "T", de borde y de esquina) que se muestran en la figura 3.28 se pueden usar para prácticamente todos los metales. Hay muchas variaciones derivadas de estas uniones básicas. En todos los casos, el objetivo primordial es minimizar el costo al tiempo que se mantiene la calidad de soldadura y el nivel de rendimiento deseados para el diseño.

Los factores que afectan el costo son el tiempo de preparación de la unión, el área de unión que debe rellenarse y el tiempo de preparación del equipo. Aunque no hay reglas fijas que rijan el

uso de un diseño de unión en particular para un metal dado, ciertos diseños se desarrollaron para fines específicos.

Las variables primarias del diseño de las uniones son la abertura de la raíz, el espesor de la cara de la raíz y el ángulo de bisel. Todas estas variables deben considerarse antes de preparar la unión.

La magnitud de la abertura de raíz y el espesor de la cara de raíz dependen de si el proceso GTAW es manual o automático, de si se añadirá o no metal de aporte durante la pasada de raíz, y de si se usará o no una inserción consumible. En general, no se usan tiras de respaldo debido al costo adicional del material y del embonamiento, así como a la dificultad para interpretar las radiografías.

La magnitud del ángulo de bisel depende del espesor del metal y del espacio que se requiere para el movimiento del arco a fin de asegurar una fusión adecuada en ambos lados de la unión. Estas variables generalmente se determinan soldando uniones de muestra que abarcan diversas configuraciones.

Una consideración importante en el diseño de uniones para GTAW es la accesibilidad. El ángulo del surco debe permitir la manipulación del portaelectrodos a fin de lograr una fusión adecuada de la cara del surco. También hay que tener en cuenta las características del metal de soldadura. Por ejemplo, las aleaciones altas en níquel son muy espesas cuando se funden, y el metal de soldadura no moja bien las caras del surco. Por tanto, los ángulos de surco para aleaciones altas en níquel deben ser más abiertos que en acero al carbono y de aleación, a fin de tener espacio para la manipulación. Por otro lado, al abrirse el ángulo del surco se incrementa la distorsión, el tiempo de soldadura y el costo, de modo que debe limitarse hasta donde sea posible.

Se puede encontrar información específica sobre los diseños de uniones en la literatura de los proveedores de metales.

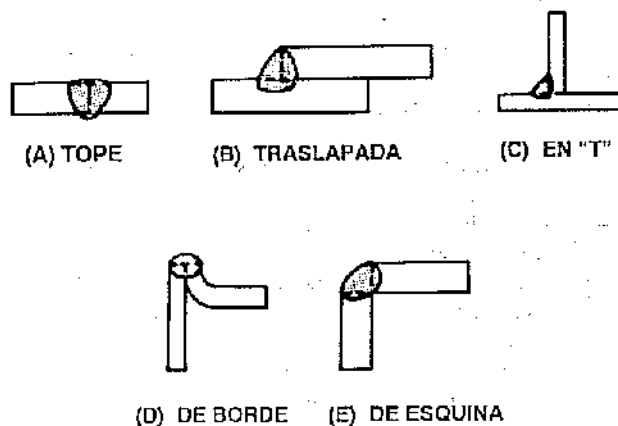


Figura 3.28—Cinco uniones soldadas básicas

PREPARACIÓN DE LA UNIÓN

UNA VEZ SELECCIONADO un diseño de unión en particular, la consideración más importante es el método de preparación de la unión. Hay muchas formas de eliminar metal para preparar una configuración de unión dada; sin embargo, muchos problemas de GTAW, o supuestos problemas, son consecuencia directa del empleo de métodos inadecuados para preparar la unión. El más

notable de éstos es el uso incorrecto de ruedas de amolar para preparar las uniones. Los materiales blandos como el aluminio se impregnan de partículas microscópicas de abrasivo que, si no se eliminan posteriormente, producirán una porosidad excesiva. Las ruedas de amolar deberán limpiarse y dedicarse exclusivamente al material que se va a soldar. La forma ideal de preparar las uniones es con herramientas de corte como los tornos para uniones redondas o cilíndricas o las cortadoras de fresado para preparaciones longitudinales. Se debe tener cuidado al elegir el fluido de corte, en caso de usarse. La limpieza después del corte o torneado debe hacerse con disolventes seguros que no dejen residuos.

El corte con gas oxicom bustible y con arco de plasma también son aceptables a condición de que se elimine toda la escoria mediante un amolado minucioso.

Tolerancia de las uniones

LA TOLERANCIA PERMITIDA para las dimensiones de la unión depende de si la soldadura va a ser manual o mecanizada. Las aplicaciones de soldadura manual pueden tolerar mayores irregularidades en el embonamiento de la unión que las de soldadura mecanizada. La tolerancia específica para una aplicación dada sólo puede determinarse mediante pruebas, y esta tolerancia debe especificarse para trabajos futuros.

Limpieza

LA LIMPIEZA, TANTO de las áreas de unión como del metal de aporte, es una consideración importante cuando se suelda con el proceso de arco de tungsteno y gas. Es preciso eliminar por completo de los bordes de la unión y de las superficies metálicas los aceites, grasas, suciedad, pintura, crayón de marcar y depósitos de óxido o corrosión, hasta una distancia que rebase la zona térmicamente afectada. Su presencia durante la soldadura puede

producir inestabilidad del arco y contaminación de la unión soldada. Dependiendo de la respuesta metalúrgica a estos contaminantes, las soldaduras pueden contener poros, grietas e inclusiones. La limpieza puede efectuarse con medios mecánicos, empleando limpiadores en forma de vapor o líquido, o con una combinación de estos procedimientos.

FIJACIÓN

PUEDE REQUERIRSE FIJACIÓN si las piezas por soldar no pueden sostenerse solas durante la soldadura o si no puede tolerarse ninguna distorsión resultante ni corregirse mediante enderezado. La fijación deberá tener la masa suficiente para soportar el peso de las piezas y del ensamble soldado y resistir los esfuerzos causados por la expansión y contracción térmicas. Las fijaciones también deben resistir el desgaste y maltrato normal que ocurren durante la producción.

La decisión de usar o no fijación para la fabricación de un ensamble soldado depende de los aspectos económicos y de los requisitos de calidad. El empleo correcto de fijaciones, incluidos los disipadores de calor, puede reducir el tiempo de soldadura. Si un ensamble sólo se va a fabricar una vez, quizá no se justifique el costo de la fijación; sin embargo, la fabricación de un gran número de ensambles podría justificar incluso fijaciones complejas. Además, la fijación puede ser imprescindible en trabajos de alta calidad para mantener las estrechas tolerancias requeridas por el diseño o por los requisitos de inspección no destructiva.

Las funciones primarias de la fijación son las siguientes:

- (1) Situar las piezas con precisión dentro del ensamble.
- (2) Mantener la alineación durante la soldadura.
- (3) Minimizar la distorsión del ensamble soldado.
- (4) Controlar la acumulación de calor.

CALIDAD DE LA SOLDADURA

DISCONTINUIDADES Y DEFECTOS

LAS DISCONTINUIDADES SON interrupciones en la estructura típica de un ensamble soldado, y pueden ocurrir en el metal base, en el metal de soldadura o en las zonas térmicamente afectadas. Las discontinuidades que no satisfacen los requisitos del código o especificación de fabricación de una aplicación se clasifican como defectos, y su eliminación es necesaria porque podrían perjudicar el rendimiento del ensamble soldado en servicio.

PROBLEMAS Y CORRECCIONES

Inclusiones de tungsteno

UNA DISCONTINUIDAD QUE se presenta sólo en las soldaduras hechas con arco de tungsteno y gas son las inclusiones de tungsteno. Es posible que se incrusten en una soldadura partículas de tungsteno del electrodo cuando se emplean procedimientos

incorrectos con el proceso GTAW. Las causas más comunes son las siguientes:

- (1) Contacto de la punta del electrodo con el charco de soldadura.
- (2) Contacto del metal de aporte con la punta caliente del electrodo.
- (3) Contaminación de la punta del electrodo por salpicaduras del charco de soldadura.
- (4) Empleo de corriente por encima del límite para un tamaño o tipo de electrodo dado.
- (5) Extensión del electrodo del mandril más allá de su distancia normal (como cuando se usan boquillas largas), lo que causa sobrecalentamiento del electrodo.
- (6) Apretado incorrecto del mandril portaelectrodo.
- (7) Tasa de flujo de gas protector insuficiente o corrientes de aire excesivas, con la consiguiente oxidación de la punta del electrodo.
- (8) Defectos como hendiduras o grietas en el electrodo.

(9) Empleo de gases protectores indebidos, como mezclas argón-oxígeno o argón CO_2 que se usan para soldadura por arco de metal y gas.

Los pasos para corregir este problema son obvios una vez que se reconoce la causa y se capacita debidamente al soldador.

Falta de protección

Las DISCONTINUIDADES RELACIONADAS con la pérdida del escudo de gas inerte son las inclusiones de tungsteno previamente descritas, porosidad, películas e inclusiones de óxido, fusión incompleta y agrietamiento. El grado en que éstas ocurren está muy relacionado con las características del metal que se suelda. Además, las propiedades mecánicas del titanio, aluminio, níquel y aleaciones de acero de alta resistencia pueden sufrir un menos-

cabo importante si se pierde la protección por gas inerte. En muchos casos, la efectividad de la protección por gas puede evaluarse antes de la soldadura de producción realizando una soldadura de punto y continuando el flujo de gas hasta que la soldadura se haya enfriado. Si el escudo fue efectivo, el punto tendrá aspecto plateado brillante.

PROBLEMAS DE SOLDADURA Y SUS REMEDIOS

SON MUCHOS LOS problemas que pueden surgir durante la preparación o realización de una operación de GTAW. Su solución requerirá una cuidadosa evaluación del material, la fijación, el equipo de soldadura y los procedimientos. En la tabla 3.6 se presentan algunos problemas que pueden presentarse y sus posibles remedios.

Tabla 3.6
Guía de localización de problemas para soldadura por arco de tungsteno y gas

Problema	Causa	Remedio
Consumo excesivo del electrodo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Flujo de gas insuficiente. 2. Operación con polaridad inversa. 3. Electrodo del tamaño incorrecto para la corriente requerida. 4. Calentamiento excesivo del portaelectrodos. 5. Electrodo contaminado. 6. Oxidación del electrodo durante el enfriamiento. 7. Empleo de gas que contiene oxígeno o CO_2. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumentar el flujo de gas. 2. Usar electrodo más grande o cambiar a polaridad directa. 3. Usar electrodo más grande. 4. Verificar que el mandril haga buen contacto. 5. Eliminar la porción contaminada. Los resultados seguirán siendo irregulares mientras haya contaminación. 6. Mantener el flujo de gas durante por lo menos 10 o 15 segundos después de apagar el arco. 7. Cambiar al gas correcto.
Arco irregular	<ol style="list-style-type: none"> 1. El metal base está sucio o grasoso. 2. La unión es demasiado angosta. 3. El electrodo está contaminado. 4. El arco es demasiado largo. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Usar limpiadores químicos apropiados, cepillo de alambre o abrasivos. 2. Abrir el surco de la unión; acercar más el electrodo al trabajo; reducir el voltaje. 3. Eliminar la porción contaminada del electrodo. 4. Acercar más el electrodo al trabajo para acortar el arco.
Porosidad	<ol style="list-style-type: none"> 1. Impurezas gaseosas atrapadas (hidrógeno, nitrógeno, aire, vapor de agua). 2. Manguera de gas defectuosa o conexiones flojas. 3. Película de aceite en el metal base. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Purgar el aire de todas las líneas antes de encender el arco; eliminar la humedad condensada en las líneas; usar gas inerte de grado para soldadura (99.99%). 2. Verificar que las mangueras y conexiones no tengan fugas. 3. Limpiar con agente químico sin propensión a descomponerse en el arco; NO SOLDAR SI EL METAL BASE ESTÁ HÚMEDO.
Contaminación de la pieza de trabajo con tungsteno	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contacto al encender con el electrodo. 2. Fusión del electrodo y aleación con el metal base. 3. Contacto entre el tungsteno y el charco fundido. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Usar iniciador de alta frecuencia; usar placa de encendido de cobre. 2. Usar corriente más baja o electrodo más grande; usar electrodo de tungsteno con torio o con zirconio. 3. Mantener el tungsteno fuera del charco fundido.

APLICACIONES

EL PROCESO DE soldadura por arco de tungsteno y gas ofrece ventajas para muchas industrias, desde la alta calidad requerida en las industrias aeroespacial y nuclear y las soldaduras autógenas de alta velocidad que se exigen en la fabricación de tuberías

y productos de lámina metálica, hasta la facilidad y flexibilidad de GTAW que tan apreciada es en los talleres de reparación.

La soldadura por arco de tungsteno y gas ofrece un control preciso del aporte de calor. Por esta razón es el proceso preferido

para unir metales de calibre delgado y para soldar en las inmediaciones de componentes sensibles al calor. También se emplea en trabajos pequeños y reparaciones en muchos talleres de fabricación por la facilidad con que se controla el proceso y la posibilidad de agregar metal de aporte cuando es necesario. La soldadura por arco de tungsteno y gas se usa con o sin metal de aporte para producir soldaduras de alta calidad con perfil liso y uniforme. El proceso GTAW también puede usarse para soldadura de puntos en aplicaciones de lámina metálica.

El proceso puede usarse para soldar casi todos los metales. Tiene especial utilidad en la soldadura de aluminio y magnesio, que forman óxidos refractarios, y de metales reactivos como el

litio y el zirconio, que pueden volverse quebradizos si se exponen al aire en su estado fundido.

Se puede usar GTAW para soldar todo tipo de geometrías de unión y superposiciones en placas, láminas, tuberías, conductos y otras formas estructurales. Es apropiada sobre todo para soldar secciones de menos de 10 mm (3/8 pulg) de espesor. La soldadura de tuberías a menudo se realiza empleando arco de tungsteno y gas para la pasada de raíz y SMAW o GMAW para las pasadas de relleno.

En la figura 3.29 se muestra una aplicación aeroespacial de GTAW. En este caso se emplea corriente a pulsos para soldar una unión bridada entre dos piezas de acero inoxidable colado.

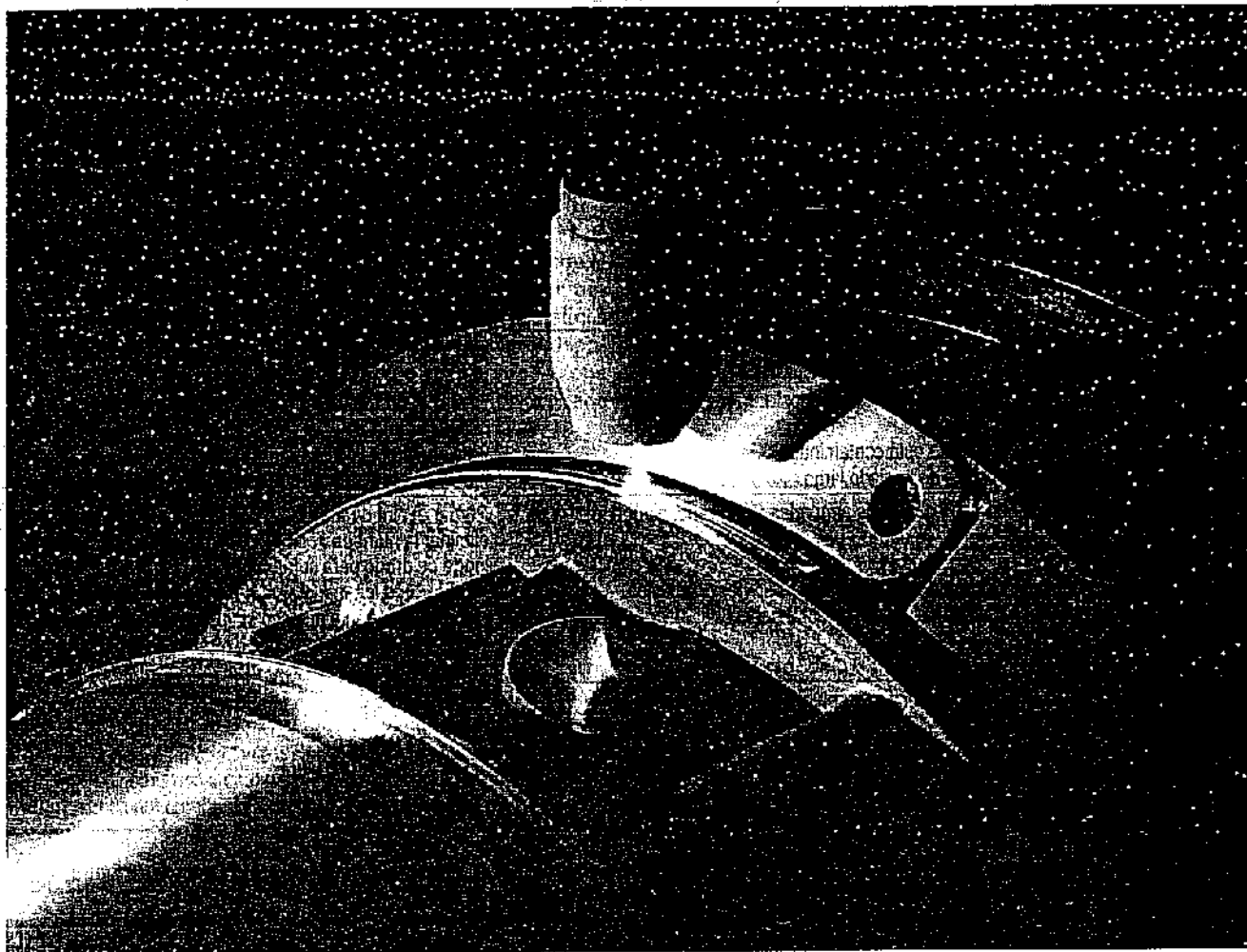


Figura 3.29—Soldadura autógena con arco de tungsteno y gas en dos piezas de acero inoxidable 17-4ph coladas y maquinadas (Nota: Se usó argón como gas protector con esta unión bridada de 180 mm [7 pulg] de diámetro. La velocidad de recorrido fue de 40 cm/min [16 pulg/min] empleando corriente a pulsos de 41 amperes en promedio)

PRÁCTICAS SEGURAS

EL TEMA GENERAL de la seguridad y las prácticas seguras en los procesos de soldadura, corte y similares se trata en ANSI Z49.1, *Seguridad al soldar y cortar*.³ Todo el personal de soldadura debe estar familiarizado con las prácticas seguras descritas en este documento.

El empleo de prácticas seguras al soldar y cortar asegurará que las personas no sufran heridas ni padezcan enfermedades y que las propiedades no sufran daños indeseables. Las áreas de peligro potencial durante la soldadura y el corte con arco incluyen, pero no están limitadas a, el manejo de cilindros y reguladores, gases, humos, energía radiante y choque eléctrico. En esta sección se tratan brevemente las áreas asociadas a GTAW. Las prácticas seguras siempre deben ser la principal preocupación del soldador u operador.

MANEJO SEGURO DE CILINDROS Y REGULADORES DE GAS

LOS CILINDROS DE gas comprimido deben manejarse con mucho cuidado. Los golpes, caídas o maltrato pueden dañar los cilindros, las válvulas o los dispositivos de seguridad y causar fugas o explosiones. Las tapas para proteger las válvulas, si están incluidas, siempre deben estar colocadas (apretadas a mano), excepto cuando los cilindros están en uso o conectados para usarse. Mientras se usan, los cilindros deben estar bien sujetos para evitar que se vuelquen accidentalmente. Si desea mayor información, consulte el folleto P-1 de la CGA, *Manejo seguro de gases comprimidos en recipientes*.⁴

GASES PELIGROSOS

LOS PRINCIPALES GASES tóxicos asociados a GTAW son el ozono, el dióxido de nitrógeno y el gas fosgeno. El fosgeno puede estar presente como resultado de la descomposición térmica o por luz ultravioleta de agentes limpiadores a base de hidrocarburos clorados, como tricloroetileno y percloroetileno, que se encuentran en las inmediaciones de las operaciones de soldadura. Las operaciones de desengrasado y limpieza en que intervengan hidrocarburos clorados deberán efectuarse en sitios donde los vapores de estas operaciones no queden expuestos a la radiación del arco de soldadura.

Ozono

LA LUZ ULTRAVIOLETA que emite el arco de soldadura actúa sobre el oxígeno de la atmósfera circundante para producir ozono. La cantidad de ozono que se produzca dependerá de la intensidad de la energía ultravioleta, la humedad, la acción

filtradora de las emisiones de la soldadura y de otros factores. Los resultados de pruebas basadas en los métodos de muestreo actuales indican que la concentración media de ozono generado en el proceso GTAW no constituye un peligro en condiciones de buena ventilación y empleo de prácticas de soldadura correctas. (Véase en ANSI Z49.1 las condiciones de soldadura que requieren ventilación, sobre todo cuando se suelda en lugares encerrados.)

Dióxido de nitrógeno

LOS RESULTADOS DE algunas pruebas indican que sólo hay concentraciones elevadas de dióxido de nitrógeno a una distancia de 150 mm (6 pulg) del arco o menos. La ventilación natural rápidamente reduce estas concentraciones a niveles seguros en la zona de respiración del soldador. En tanto el soldador mantenga la cabeza fuera de las emisiones, el dióxido de nitrógeno no constituirá un peligro durante GTAW.

Gases protectores inertes

ES PRECISO CONTEMPLAR una ventilación adecuada cuando se emplean gases inertes como protección y purgante. La acumulación de estos gases puede provocar asfixia en el personal de operación e inspección.

Vapores metálicos

LAS EMISIONES GENERADAS por el proceso GTAW pueden controlarse mediante ventilación natural, ventilación general, ventilación de escape local o equipo protector respiratorio, como se describe en ANSI Z49.1. El método de ventilación requerido para mantener el nivel de sustancias tóxicas en la zona de respiración del soldador dentro de límites de concentración aceptables depende directamente de varios factores, entre los que están el material que se suelda, el tamaño del área de trabajo y el grado de encerramiento u obstrucción del movimiento natural del aire en el lugar donde se está soldando. Es preciso evaluar cada operación en forma individual para determinar lo que se requiere.

La Occupational Safety and Health Administration (OSHA) de Estados Unidos ha publicado los niveles aceptables de sustancias tóxicas asociadas a la soldadura, designándolos como valores límite de umbral (TLV) promedio ponderados en el tiempo y como valores máximos permitidos. Las normas OSHA para la industria en general también se conocen como Código de Reglamentación Federal (29CFR 1910) y pueden obtenerse en la U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 20402. El cumplimiento con estos niveles aceptables puede verificarse muestreando la atmósfera dentro de la careta del soldador o en las inmediaciones de la zona de respiración del ayudante. El muestreo debe realizarse de acuerdo con ANSI/AWS F1.1, *Método para muestrear particulados aéreos generados por soldadura y procesos relacionados*.

3. ANSI Z49.1 puede obtenerse de la American Welding Society, 550 N. W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126.

4. CGA P-1 puede obtenerse de la Compressed Gas Association, Inc., 500 Fifth Avenue, New York, New York 10036.

ENERGÍA RADIANTE

LA ENERGÍA RADIANTE es un peligro y puede causar heridas al soldador (o a otras personas expuestas al arco de soldadura) en dos áreas: los ojos y la piel. el tema general de la protección ocular se cubre en ANSI Z49.1, *Seguridad al soldar y cortar* y en ANSI Z87.1, *Prácticas de protección ocupacional y educativa de los ojos y el rostro*. Todo el personal presente en las inmediaciones de una operación de soldadura deba contar con protección adecuada contra la radiación producida por el arco. En general, la energía radiante ultravioleta de máxima intensidad se produce cuando se emplea argón como gas protector y cuando se suelda aluminio o acero inoxidable.

Para proteger los ojos es preciso usar cristales o cortinas con filtros. Los tonos de filtro recomendados en ANSI Z49.1 para GTAW se presentan en la tabla 3.7.

Se sugiere que el soldador emplee el tono más oscuro que no le estorbe, pero nunca más claro que el recomendado.

Para proteger la piel se recomienda ropa de cuero o de lana oscura (para reducir los reflejos que podrían causar quemaduras de ultravioleta en la cara y el cuello debajo de la careta). La radiación ultravioleta de alta intensidad desintegra con rapidez el algodón y algunos materiales sintéticos.

Además, cuando se dedica un área o recinto para GTAW, las paredes deberán recubrirse con pigmentos como dióxido de titanio u óxido de cinc, porque éstos reducen la reflexión de ultravioleta. Si desea información adicional sobre *Reflexión ultravioleta de las pinturas* puede consultarse ANSI Z49.1, disponible en la American Welding Society, que la publica.

CHOQUE ELÉCTRICO

LO QUE SIGUE se tomó de ANSI Z49.1 - 1983, sección 11.4.9: "La prevención de choques eléctricos está en buena parte bajo el control del soldador; por tanto, es de vital importancia que el soldador reciba instrucciones minuciosas y detalladas sobre la forma de evitar los choques. Siempre deben seguirse procedimientos seguros al trabajar con equipo que maneje voltajes nece-

sarios para soldadura por arco. Incluso los choques leves pueden causar contracciones musculares involuntarias, que podrían conducir a heridas por caídas desde lugares altos. La severidad del choque depende en gran medida del trayecto, la duración y la cantidad de corriente que fluye por el cuerpo, lo que a su vez depende del voltaje y de la resistencia de contacto del área de la piel en cuestión. La ropa húmeda por el sudor o condiciones de trabajo húmedas puede reducir la resistencia de contacto y aumentar la corriente hasta un nivel suficiente para causar una contracción muscular de tal violencia que el soldador no pueda soltar la pieza que lleva la corriente."

SEGURIDAD DEL EQUIPO DE SOLDADURA

TODO EL EQUIPO de soldadura debe estar incluido en una lista aprobada por una agencia de pruebas reconocida por la NFPA, como Factory Mutual o Underwriters Laboratory. El equipo dañado debe repararse debidamente antes de usarse. No deberá soldarse en tanto no estén firmes todas las conexiones eléctricas de la fuente de potencia, los cables de soldadura, la máquina soldadora y las abrazaderas del trabajo, o el armazón de la fuente de potencia no esté bien puesto a tierra. La abrazadera del trabajo debe estar bien sujeta y el cable que la une a la fuente de potencia en buenas condiciones. Siempre que se deje sola la fuente de potencia, deberá apagarse. Además, el interruptor de desconexión de la línea deberá colocarse en la posición "OFF" (apagado).

Tabla 3.7
Tonos de lente recomendados para diversos intervalos de corriente de soldadura

Núm. de sombra	Corriente de soldadura, A
8	Hasta 75
10	75 a 200
12	200 a 400
14	Más de 400

LISTA DE LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Baerlack, W. A. III y Banas, C. M. "A comparative evaluation of laser and gas tungsten arc weldments in high temperature titanium alloys", en *Welding Journal* 60(7): 121s-130s; julio de 1981.
- Burgardt, P. y Heiple, C. R. "Interaction between impurities and welding variables in determining GTA weld shape", *Welding Journal* 65(6): 150s-156s; junio de 1986.
- Correy, T. B. et al. "Radio frequency - free arc starting in gas tungsten arc welding", en *Welding Journal* 64(2): 33-37; febrero de 1986.
- Geidt, W. H. et al. "GTA welding efficiency: calorimetric and temperature field measurements", en *Welding Journal* 68(1): 28s-34s; enero de 1989.
- Haberman, R. "GTAW torch performance relies on component materials", en *Welding Journal* 66(12): 55-60; diciembre de 1987.
- Heiple, C. R. et al. "Surface active elements effects on the shape of GTA laser, and electron beam welds", en *Welding Journal* 62(73): 72s-77s; marzo de 1983.
- Kanne, W. R. "Remote reactor repair: GTA weld cracking caused by entrapped helium", en *Welding Journal* 67(8): 33-38; agosto de 1988.
- Katoh, M. y Ken, H. W. "Investigation of heat-affected zone cracking of GTA welds of Al-Mg-Si alloys using the varest-rainst test", en *Welding Journal* 66(12): 360s; diciembre de 1987.

- Key, J. F. "Anode/cathode geometry and shielding gas interrelationships in GTAW", en *Welding Journal* 59(12): 364s-370s; diciembre de 1980.
- Kraus, H. G. "Experimental measurement of stationary SS 304, SS 316L y 8630 GTA weld pool surface temperatures", en *Welding Journal* 68(7): 269s-279s; julio de 1989.
- Kujanpaa, V. P. *et al.* "Role of shielding gases in flaw formation in GTAW of stainless steel strips", en *Welding Journal* 63(5): 151s-155s; mayo de 1984.
- Lu, M. y Kou, S. "Power and current distributions in gas tungsten arcs", en *Welding Journal* 67(2): 29s-36s; febrero de 1988.
- Malinowski-Brodnicka, M., *et al.* "Effect of electromagnetic stirring on GTA welds in austenitic stainless steel", en *Welding Journal* 69(2): 52s; febrero de 1990.
- Metcalf, J. C. y Quigley, M. C. B. "Arc and pool instability in GTA welding", en *Welding Journal* 56(5): 137s-139s; mayo de 1977.
- Oomen, W. J. y Verbeek, P. A. "A realtime optical profile sensor for robot arc welding", en *Robotic Welding*, I. D. Lane. (comp.), Inglaterra, IFS Publications Ltd., 1987.
- Patterson, R. A., *et al.* "Discontinuities formed in Inconel GTA welds", en *Welding Journal* 65(1): 19s-25s; enero de 1987.
- Pearce, C. H. *et al.* "Development and applications of microprocessor controlled systems for mechanized TIG welding", en *Computer Technology in Welding*. W. Lucas (comp.), The Welding Institute, junio de 1986.
- Saeed, H. R. y Unkel, W. "Arc and weld pool behavior for pulsed current GTAW", en *Welding Journal* 67(11): 247s; noviembre de 1988.
- Sicard, P. y Levine, M. D. "IEEE transactions on systems, man, and cybernetics" vol. 18-no. 2; marzo de 1988.
- Smith, J. S., *et al.* "A vision based seam tracker for TIG welding", en *Computer Technology in Welding*. W. Lucas (comp.), W., The Welding Institute, junio de 1986.
- Troyer, W. *et al.* "Investigation of pulsed wave shapes for gas tungsten arc welding", en *Welding Journal* 56(1): 26-32; enero de 1977.
- Voigt, R. C. y Loperl C. R. Jr. "Tungsten contamination during gas tungsten arc welding", en *Welding Journal* 59(4): 99s-103s; abril de 1980.
- Villafuerte, J. C. y Kerr, H. W. "Electromagnetic stirring and grain refinement in stainless steel GTA welds", en *Welding Journal* 69(1): enero de 1990.
- Walsh, D. W. y Savage, W. F. "Technical note: Autogenous GTA weldments bead geometry variations due to minor elements", en *Welding Journal* 64(2): 59s-62s; febrero de 1985.
- Walsh, D. W. y Savage, W. F. "Technical note: Bead shape variance in AISI 8630 steel GTAW weldments". *Welding Journal* 64(5): 137s-139s; mayo de 1985.
- Zacharia, T. *et al.* "Weld pool development during GTA and laser beam welding of type 3 or 4 stainless steel-part 1 and part 2", en *Welding Journal* 68(12): 499s-510s; diciembre de 1989.

CAPÍTULO 4

SOLDADURA POR ARCO DE METAL Y GAS

PREPARADO POR UN COMITÉ INTEGRADO POR:

D. B. Holliday, *Presidente*
Westinghouse Electric

S. R. Carter
Scott Paper Company

L. DeFreitas
College of San Mateo

D. A. Fink
Lincoln Electric Company

R. W. Folkening
FMC Corporation

D. D. Hodson
Tweco Products, Incorporated

R. H. Mann
*Miller Electric Manufacturing
Company*

MIEMBRO DEL COMITÉ DEL MANUAL DE SOLDADURA:

P. I. Temple
Detroit Edison

Introducción	110
Fundamentos del proceso	111
Equipo	123
Consumibles	132
Gases protectores	133
Aplicaciones	136
Aplicaciones especiales	142
Inspección y calidad de la soldadura	146
Localización de problemas	150
Prácticas seguras	152
Lista de lecturas complementarias	154

SOLDADURA POR ARCO DE METAL Y GAS

INTRODUCCIÓN

DEFINICIÓN Y ANTECEDENTES GENERALES

LA SOLDADURA POR arco de metal y gas (*gas metal arc welding*, GMAW) es un proceso de soldadura por arco que emplea un arco entre un electrodo continuo de metal de aporte y el charco de soldadura. El proceso se realiza bajo un escudo de gas suministrado externamente y sin aplicación de presión.

El concepto básico de GMAW surgió en la década de 1920, pero apenas en 1948 estuvo disponible comercialmente. En un principio se le consideraba básicamente un proceso de electrodo de metal desnudo de diámetro pequeño con alta densidad de corriente que empleaba un gas inerte para proteger el arco. La aplicación primaria de este proceso fue en la soldadura de aluminio. Por lo anterior, se acuñó el término *MIG* (metal gas inerte) y todavía algunos lo usan para referirse a este proceso. Entre los avances posteriores del proceso están la operación con bajas densidades de corriente y con corriente continua a pulsos, la aplicación a una gama más amplia de materiales y el empleo de gases y mezclas de gases reactivos (sobre todo CO_2). Este último avance condujo a la aceptación formal del término *soldadura por arco de metal y gas* (GMAW) para el proceso, ya que se usan gases tanto inertes como reactivos.

Una variación del proceso GMAW emplea un electrodo tubular dentro del cual hay un núcleo constituido principalmente por polvos metálicos (electrodo con núcleo de metal). Estos electrodos requieren un escudo de gas para proteger el charco de soldadura de contaminación por parte de la atmósfera.

La American Welding Society considera los electrodos con núcleo de metal como un segmento de GMAW. Algunas asociaciones del ramo en otros países agrupan los electrodos con núcleo de metal junto con los electrodos con núcleo de fundente.

GMAW puede operar en modalidades mecanizada, semiautomática o automática. Todos los metales de importancia comercial, como el acero al carbono, el acero de baja aleación de alta resistencia mecánica, el acero inoxidable, el aluminio, el cobre, el titanio y las aleaciones de níquel se pueden soldar en cualquier

posición con este proceso escogiendo el gas protector, electrodo y variables de soldadura apropiados.

USOS Y VENTAJAS

LOS USOS DEL proceso, desde luego, están regidos por sus ventajas; las más importantes de éstas son:

- (1) Es el único proceso de electrodo consumible que puede servir para soldar todos los metales y aleaciones comerciales.
- (2) GMAW no tiene la restricción de tamaño de electrodo limitado que se presenta con la soldadura por arco de metal protegido.
- (3) Puede soldarse en todas las posiciones, algo que no es posible con la soldadura por arco sumergido.
- (4) Se logran tasas de deposición bastante más altas que con la soldadura por arco de metal protegido.
- (5) Las velocidades de soldadura son más altas que con soldadura por arco de metal protegido gracias a la alimentación continua del electrodo y a las mayores tasas de deposición del metal de aporte.
- (6) Como la alimentación de alambre es continua, es posible depositar soldaduras largas sin parar y volver a comenzar.
- (7) Cuando se usa transferencia por aspersión, es posible lograr mayor penetración que con la soldadura por arco de metal protegido, lo que puede permitir el uso de soldaduras de filete más pequeñas para obtener una resistencia mecánica equivalente.
- (8) Casi no se requiere limpieza después de la soldadura porque no se produce mucha escoria.

Estas ventajas hacen al proceso ideal para aplicaciones de soldadura en alto volumen de producción y automatizadas. Esto se ha hecho cada vez más obvio con la llegada de la robótica, donde GMAW ha sido el proceso predominante.

LIMITACIONES

COMO EN CUALQUIER proceso de soldadura, hay ciertas limitaciones que restringen el uso de la soldadura por arco de metal y gas. Entre ellas están las siguientes:

(1) El equipo de soldadura es más complejo, más costoso y menos transportable que el de SMAW.

(2) GMAW es más difícil de usar en lugares de difícil acceso porque la pistola soldadora es más grande que un portaelectrodos

de arco de metal protegido, y la pistola debe estar cerca de la unión [entre 10 y 19 mm (3/8 y 3/4 pulg)] para asegurar que el metal de soldadura esté bien protegido.

(3) El arco de soldadura debe protegerse contra corrientes de aire que puedan dispersar el gas protector. Esto limita las aplicaciones en exteriores a menos que se coloquen barreras protectoras alrededor del área de soldadura.

(4) Los niveles relativamente altos de calor radiado y la intensidad del arco pueden hacer que los operadores se resistan a utilizar el proceso.

FUNDAMENTOS DEL PROCESO

PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

EL PROCESO GMAW se basa en la alimentación automática de un electrodo continuo consumible que se protege mediante un gas de procedencia externa. El proceso se ilustra en la figura 4.1. Una vez que el operador ha hecho los ajustes iniciales, el equipo puede regular automáticamente las características eléctricas del

arco. Por todo esto, en efecto, los únicos controles manuales que el soldador requiere para la operación semiautomática son los de velocidad y dirección del desplazamiento, así como también el posicionamiento de la pistola. Cuando se cuenta con equipo y ajustes apropiados, la longitud del arco y la corriente (es decir, la velocidad de alimentación del alambre) se mantienen automáticamente.

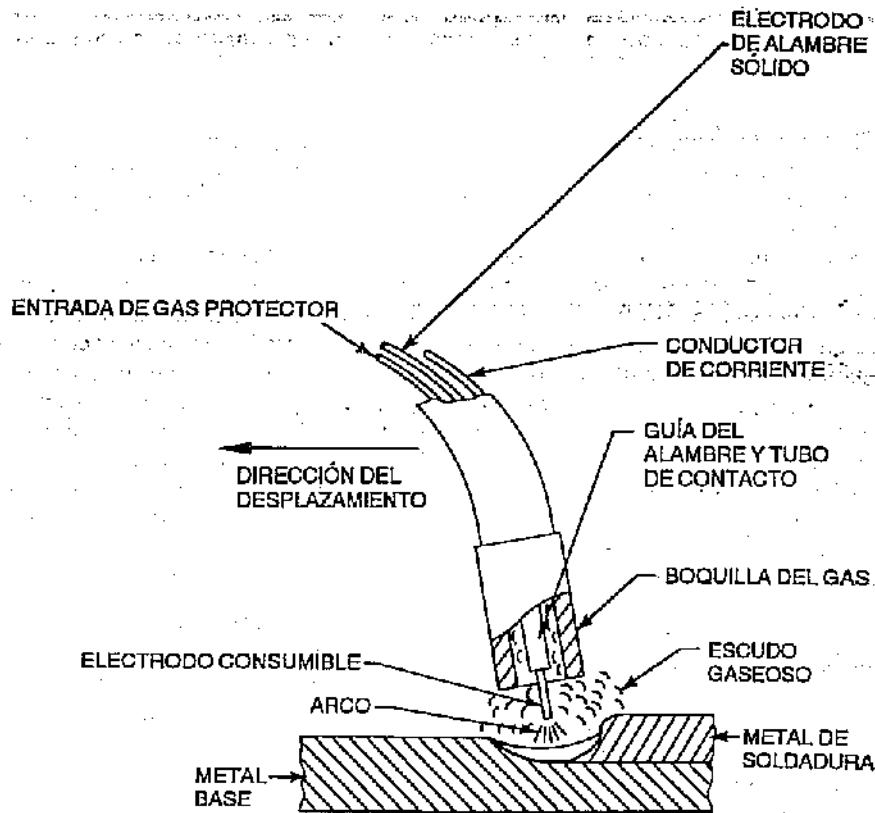


Figura 4.1—Proceso de soldadura por arco de metal y gas

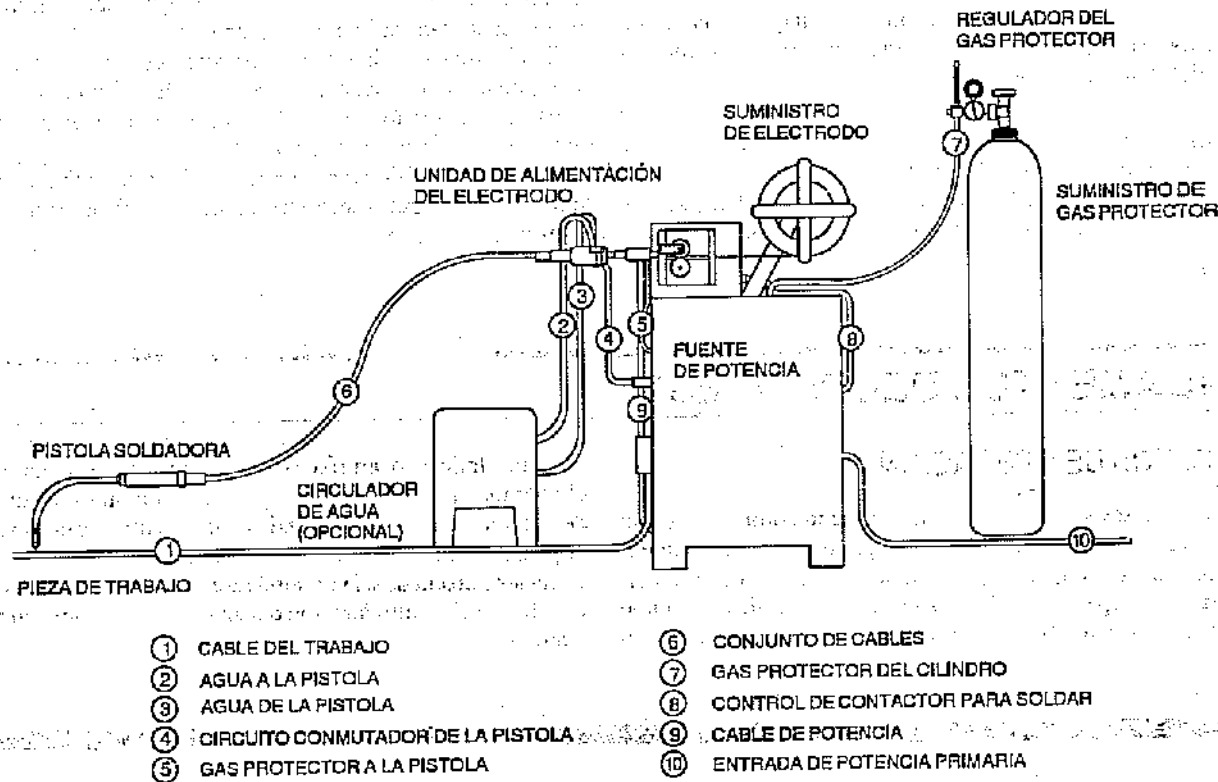


Figura 4.2—Diagrama del equipo para soldadura por arco de metal y gas

El equipo necesario para GMAW se muestra en la figura 4.2. Los componentes básicos del equipo son la unidad de pistola soldadora y cables, la unidad de alimentación del electrodo, la fuente de potencia y la fuente de gas protector.

La pistola guía el electrodo consumible y conduce la corriente eléctrica y el gas protector al trabajo, de modo que proporciona la energía para establecer y mantener el arco y fundir el electrodo, además de la protección necesaria contra la atmósfera del entorno. Se emplean dos combinaciones de unidad de alimentación de electrodo y fuente de potencia para lograr la autorregulación de la longitud del arco que se desea. Generalmente, esta regulación se efectúa con una fuente de potencia de voltaje (potencial) constante (que por lo regular tiene una curva volt-ampere prácticamente plana) en conjunción con una unidad de alimentación de electrodo de velocidad constante. Como alternativa, una fuente de potencia de corriente constante proporciona una curva volt-ampere de caída, y la unidad de alimentación del electrodo se controla por medio del voltaje del arco.

Con la combinación de potencial constante/alimentación de alambre constante, los cambios en la posición del soplete originan un cambio en la corriente de soldadura que coincide exactamente con el cambio en la extensión (protrusión) del electrodo, de modo que la longitud del arco no se modifica. Por ejemplo, si se aumenta la extensión del electrodo al retirar el soplete, la salida de corriente de la fuente de potencia se reduce, con lo que se mantiene el mismo calentamiento por resistencia del electrodo.

En el sistema alternativo, la autorregulación se efectúa cuando las fluctuaciones del voltaje de arco reajustan los circuitos de control del alimentador, los cuales modifican de manera apropiada la velocidad de alimentación del alambre. En algunos casos (como cuando se suelda aluminio), puede ser preferible apartarse de estas combinaciones estándar y acoplar una fuente de potencia de corriente constante con una unidad de alimentación del electrodo de velocidad constante. Esta combinación no tiene mucha capacidad de autorregulación, y por tanto requiere operadores más hábiles en operaciones de soldadura semiautomática. Pese a ello, algunos usuarios opinan que esta combinación ofrece un grado de control sobre la energía del arco (corriente) que puede ser importante para resolver el problema que implica la elevada conductividad térmica de los metales base de aluminio.

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DEL METAL

LA MEJOR FORMA de describir las características del proceso GMAW es en términos de los tres mecanismos básicos empleados para transferir metal del electrodo al trabajo:

- (1) Transferencia en cortocircuito.
- (2) Transferencia globular.
- (3) Transferencia por aspersión.

El tipo de transferencia está determinado por varios factores. Entre los más influyentes de éstos están:

- (1) Magnitud y tipo de la corriente de soldadura.
- (2) Diámetro del electrodo.
- (3) Composición del electrodo.
- (4) Extensión del electrodo.
- (5) Gas protector.

Transferencia en cortocircuito

ESTE TIPO DE transferencia abarca el intervalo más bajo de corrientes de soldadura y de diámetros de electrodo asociados al proceso GMAW. La transferencia en cortocircuito produce un charco de soldadura pequeño, de rápida solidificación, que generalmente es apropiado para unir secciones delgadas, soldar fuera de posición y tapar aberturas de raíz anchas. El metal se transfiere del electrodo al trabajo sólo durante el período en que el primero está en contacto con el charco de soldadura; no se transfiere metal a través del espacio del arco.

El electrodo hace contacto con el charco de soldadura a razón de 20 a más de 200 veces por segundo. La secuencia de sucesos durante la transferencia de metal, y la corriente y el voltaje correspondientes, se muestran en la figura 4.3. Cuando el alambre toca el metal de soldadura, la corriente aumenta [(A), (B), (C), (D) en la figura 4.3]. El metal fundido en la punta del alambre se estrangula en (D) y (E), iniciando un arco como se aprecia en (E) y (F). La rapidez con que aumenta la corriente debe ser suficiente para calentar el electrodo y promover la transferencia de metal, pero lo bastante baja como para minimizar las salpicaduras causadas por la separación violenta de la gota de metal. Esta tasa de aumento de la corriente se controla ajustando la inductancia de la fuente de potencia.

El ajuste de inductancia óptimo depende tanto de la resistencia eléctrica del circuito de soldadura como del punto de fusión del electrodo. Una vez que se establece el arco, la punta del alambre se funde al tiempo que el alambre se alimenta hacia el siguiente cortocircuito en (H) de la figura 4.3. El voltaje de circuito abierto de la fuente de potencia debe ser tan bajo que la gota de metal derretido en la punta del alambre no pueda transferirse hasta que toque el metal base. La energía para el mantenimiento del arco proviene en parte de la energía almacenada en el inductor durante el período de cortocircuito.

Aunque sólo hay transferencia de metal durante el cortocircuito, la composición del gas protector tiene un efecto drástico sobre la tensión superficial del metal fundido. Los cambios en la composición del gas protector pueden afectar notablemente el tamaño de las gotas y la duración del cortocircuito. Además, el tipo de gas influye sobre las características de operación del arco y la penetración en el metal base. El dióxido de carbono generalmente produce niveles de salpicadura elevados en comparación con los gases inertes, pero el CO_2 también promueve la penetración. Para lograr un buen término medio entre salpicaduras y penetración, a menudo se usan mezclas de CO_2 y argón al soldar aceros al carbono y de baja aleación. Las adiciones de helio al argón incrementan la penetración en metales no ferrosos.

Transferencia globular

CON UN ELECTRODO positivo (CCEP), hay transferencia globular cuando la corriente es relativamente baja, sea cual sea el gas protector empleado. Sin embargo, con dióxido de carbono y helio este tipo de transferencia ocurre con todas las corrientes de soldadura útiles. La transferencia globular se caracteriza por un tamaño de gota mayor que el diámetro del electrodo. La grave-

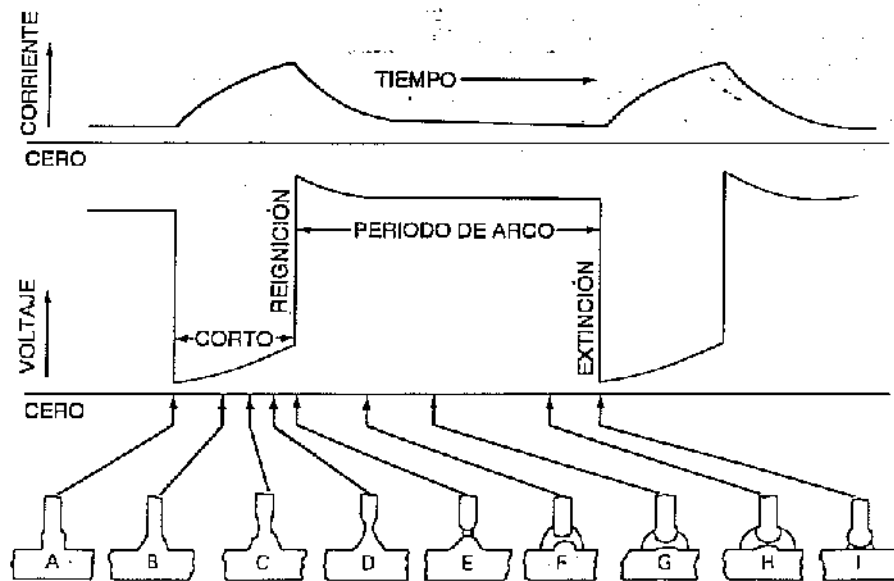


Figura 4.3—Representación esquemática de la transferencia de metal en cortocircuito

dad actúa fácilmente sobre esta gota grande, por lo que en general sólo hay transferencia útil en la posición plana.

Con corrientes medias, sólo un poco mayores que las empleadas para la transferencia en cortocircuito, es posible lograr transferencia globular en dirección axial con un escudo de gas más o menos inerte. Si el arco es demasiado corto (bajo voltaje), la gota en crecimiento puede hacer corto con la pieza de trabajo, sobrecalentarse y desintegrarse, produciendo una buena cantidad de salpicaduras. Por tanto, el arco debe tener la longitud suficiente para asegurar que la gota se suelte antes de que haga contacto con el charco de soldadura. Sin embargo, una soldadura hecha empleando el voltaje más alto probablemente resulte inaceptable a causa de la falta de fusión, la insuficiente penetración y el excesivo refuerzo. Esto limita considerablemente el empleo de la modalidad de transferencia globular en aplicaciones de producción.

La protección con dióxido de carbono produce transferencia globular en dirección aleatoria cuando la corriente y el voltaje de soldadura están bastante por encima del intervalo para la transferencia en cortocircuito. La desviación respecto a la transferencia axial está regida por fuerzas electromagnéticas, generadas por la corriente de soldadura al actuar sobre la punta fundida, como se muestra en la figura 4.4. Las más importantes de estas fuerzas son la fuerza de estrangulamiento electromagnético (P) y la fuerza de reacción del ánodo (R).

La magnitud de la fuerza de estrangulamiento es función directa de la corriente de soldadura y del diámetro del alambre,

y por lo regular es la que causa la separación de las gotas. Con protección de CO_2 , la corriente de soldadura se conduce a través de la gota fundida y el plasma del arco no envuelve la punta del electrodo. Con fotografías de alta velocidad se ha visto que el arco se mueve sobre la superficie de la gota fundida y la pieza de trabajo, porque la fuerza R tiende a sustentar la gota. La gota fundida crece hasta que se separa por cortocircuito [figura 4.4 (B)] o por gravedad [figura 4.4 (A)], ya que P por sí sola nunca vence a R . Como se aprecia en la figura 4.4 (A), es posible que la gota se suelte y se transfiera al charco de soldadura sin romperse. La situación más probable se muestra en la figura 4.4 (B), donde puede verse que la gota pone en cortocircuito la columna del arco y explota. Por ello, las salpicaduras pueden ser severas, lo que limita el empleo del escudo de CO_2 en muchas aplicaciones comerciales.

No obstante, el CO_2 sigue siendo el gas más utilizado para soldar aceros dulces. La razón es que el problema de la salpicadura puede reducirse de manera significativa "enterrando" el arco. Cuando se hace esto, la atmósfera del arco se convierte en una mezcla del gas y de vapor de hierro, lo que permite una transferencia casi por aspersion. Las fuerzas del arco bastan para mantener una cavidad que atrapa una buena parte de las salpicaduras. Esta técnica requiere una corriente de soldadura más alta y produce mayor penetración. Sin embargo, a menos que la velocidad de recorrido se controle con mucho cuidado, la excesiva tensión superficial (mojado deficiente) puede dar como resultado un refuerzo excesivo de la soldadura.

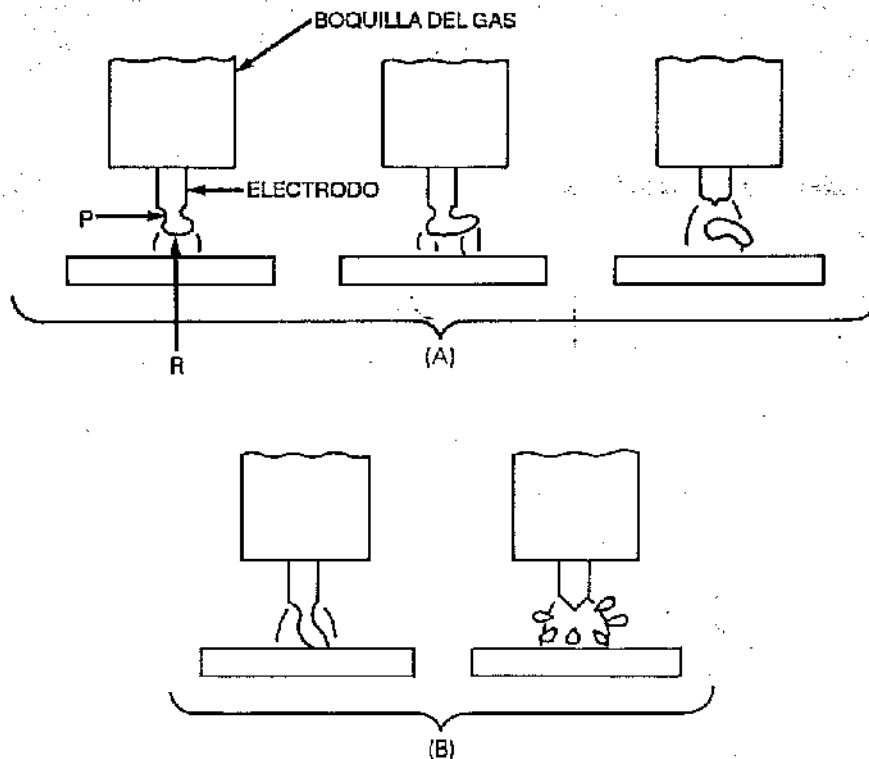


Figura 4.4—Transferencia globular no axial

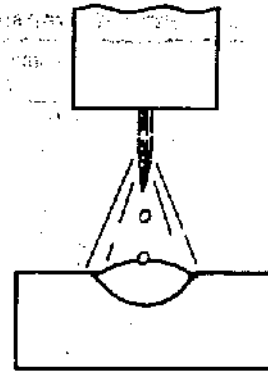
Transferencia por aspersión

CON UN ESCUDO rico en argón, es posible producir una modalidad de transferencia de "rocío axial" muy estable y libre de salpicaduras, como el que se ilustra en la figura 4.5. Para esto es preciso usar corriente continua con el electrodo positivo (CCEP) y un nivel de corriente por encima de un valor crítico conocido como *corriente de transición*. Por debajo de este nivel, la transferencia se realiza en la modalidad globular antes descrita, a razón de unas cuantas gotas por segundo. Por encima de la corriente de transición, la transferencia se efectúa en forma de gotas muy pequeñas que se forman y sueltan a razón de centenares por segundo. Se aceleran axialmente a través del espacio del arco. La relación entre la tasa de transferencia y la corriente se representa gráficamente en la figura 4.6.

La corriente de transición, que depende de la tensión superficial del metal líquido, es inversamente proporcional al diámetro del electrodo y, en menor grado, a la extensión del electrodo. Varía con el punto de fusión del metal de aporte y la composición del gas protector. En la tabla 4.1 se dan las corrientes de transición típicas para algunos de los metales más comunes.

El modo de transferencia por aspersión produce un flujo altamente direccional de gotas discretas aceleradas por las fuerzas del arco hasta alcanzar velocidades que vencen los efectos de la gravedad. Por esta razón, y en ciertas condiciones, el proceso puede usarse en cualquier posición. Como las gotas son más pequeñas que la longitud del arco, no hay cortocircuitos y las salpicaduras son insignificantes, si es que no se eliminan del todo.

Otra característica de la modalidad de aspersión es la penetración de "dedo" que produce. Aunque el dedo puede ser profundo, acusa el efecto de los campos magnéticos, los cuales



TRANSFERENCIA POR ASPERSIÓN AXIAL

Figura 4.5—Transferencia por aspersión axial

deben controlarse para que siempre esté situado en el centro del perfil de penetración de la soldadura.

La modalidad de transferencia por arco de rocío puede servir para soldar casi cualquier metal o aleación gracias a las características inertes del escudo de argón. Sin embargo, puede ser difícil aplicar el proceso a láminas delgadas por las corrientes tan altas que se necesitan para producir el arco de rocío. Las fuerzas de arco que resultan pueden perforar láminas relativamente delgadas en vez de soldarlas. Además, la tasa de deposición característicamente alta puede producir un charco de soldadura demasiado grande para sostenerse exclusivamente con la tensión superficial en la posición vertical o cenital.

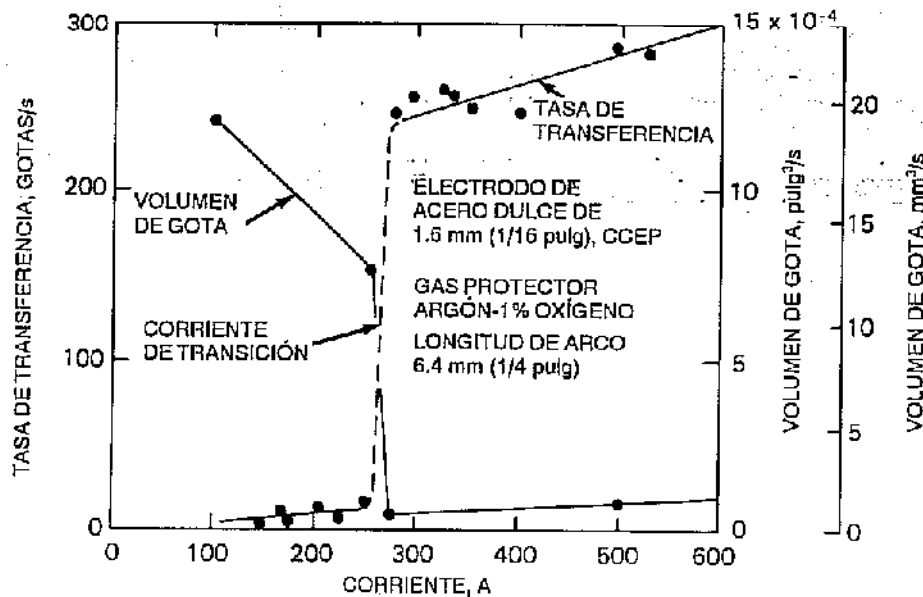


Figura 4.6—Variación en el volumen y la tasa de transferencia de las gotas con la corriente de soldadura (electrodo de acero)

Tabla 4.1
Corrientes de transición de globular a aspersion para diversos electrodos

Tipo de electrodo de alambre	Diámetro del electrodo de alambre		Gas protector	Corriente de arco de rocío mínima, A
	pulg	mm		
Acero dulce	0.030	0.8	98% de argón, 2% de oxígeno	150
Acero dulce	0.035	0.9	98% de argón, 2% de oxígeno	165
Acero dulce	0.045	1.1	98% de argón, 2% de oxígeno	220
Acero dulce	0.062	1.6	98% de argón, 2% de oxígeno	275
Acero inoxidable	0.035	0.9	98% de argón, 2% de oxígeno	170
Acero inoxidable	0.045	1.1	98% de argón, 2% de oxígeno	225
Acero inoxidable	0.062	1.6	98% de argón, 2% de oxígeno	285
Aluminio	0.030	0.8	Argón	95
Aluminio	0.045	1.1	Argón	135
Aluminio	0.062	1.6	Argón	180
Cobre desoxidado	0.035	0.9	Argón	180
Cobre desoxidado	0.045	1.1	Argón	210
Cobre desoxidado	0.062	1.6	Argón	310
Bronce al silicio	0.035	0.9	Argón	165
Bronce al silicio	0.045	1.1	Argón	205
Bronce al silicio	0.062	1.6	Argón	270

Las limitaciones de la transferencia por arco de rocío en cuanto al espesor del trabajo y la posición de soldadura se han superado en gran medida mediante el empleo de fuentes de potencia de diseño especial. Estas máquinas producen formas de onda y frecuencias cuidadosamente controladas que "pulsan" la corriente de soldadura. Como puede verse en la figura 4.7, suministran dos niveles de corriente; una corriente de fondo baja y constante que mantiene el arco sin proporcionar energía suficiente para hacer que se formen gotas en la punta del alambre, y una corriente a pulsos superpuesta cuya amplitud es mayor que la corriente de transición necesaria para la transferencia por aspersion. Durante este pulso, se forman y transfieren una o más gotas. La frecuencia y amplitud de los pulsos controlan el nivel de energía del arco, y por tanto la rapidez con que se funde el alambre. Al reducir la energía media del arco y la rapidez de fusión del alambre, los pulsos permiten aprovechar las caracte-

ísticas deseables de la transferencia por aspersion en la soldadura de láminas y de metales gruesos en cualquier posición.

Existen muchas variaciones de estas fuentes de potencia. Las más sencillas producen pulsos de una sola frecuencia (60 o 120 pps) con control independiente de los niveles de corriente de fondo y de pulso. Las fuentes de potencia más avanzadas, a veces llamadas sinérgicas, proporcionan automáticamente la combinación de corriente de fondo y de pulso apropiada para la velocidad de alimentación del alambre escogida.

VARIABLES DEL PROCESO

LAS QUE SIGUEN son algunas de las variables que afectan la penetración de la soldadura, la geometría de la franja y la calidad global de la soldadura:

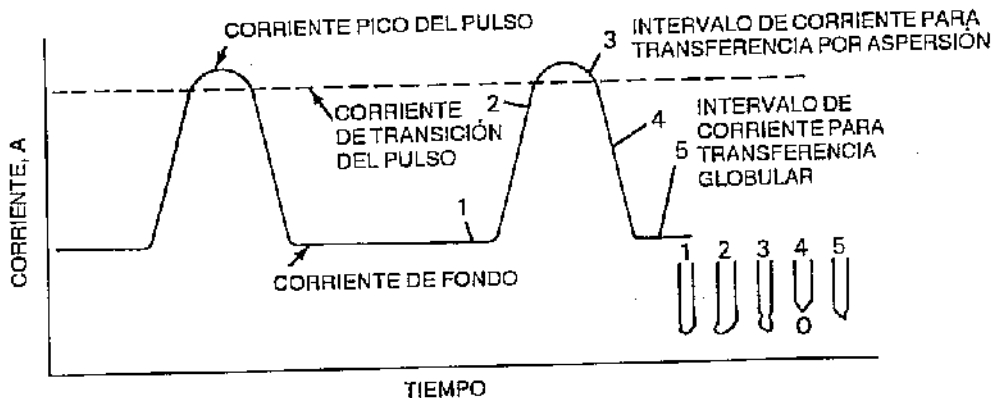


Figura 4.7—Característica de corriente de soldadura de arco de rocío a pulsos

- (1) Corriente de soldadura (velocidad de alimentación del electrodo).
- (2) Polaridad.
- (3) Voltaje del arco (longitud del arco).
- (4) Velocidad de recorrido.
- (5) Extensión del electrodo.
- (6) Orientación del electrodo (ángulo respecto a la dirección de desplazamiento).
- (7) Posición de la unión que se va a soldar.
- (8) Diámetro del electrodo.
- (9) Composición y tasa de flujo del gas protector.

El conocimiento y control de estas variables es indispensable para producir consistentemente soldaduras de buena calidad. Estas variables no son del todo independientes, y cuando se modifica una casi siempre es necesario modificar una o más de las otras para obtener los resultados que se buscan. Se requiere considerable habilidad y experiencia para seleccionar los valores óptimos para cada aplicación. Estos valores óptimos son afectados por (1) el tipo de metal base, (2) la composición del electrodo, (3) la posición en que se suelda y (4) los requisitos de calidad. Por tanto, no hay un conjunto único de parámetros que produzca resultados óptimos en todos los casos.

Corriente de soldadura

SI TODAS LAS demás variables se mantienen constantes, el amperaje de soldadura varía con la velocidad de alimentación del electrodo o con la rapidez de fusión siguiendo una relación no lineal. Al variarse la velocidad de alimentación, el amperaje de soldadura varía de manera similar si se emplea una fuente de po-

tencia de voltaje constante. Esta relación entre la corriente de soldadura y la velocidad de alimentación del alambre se muestra en la figura 4.8 para electrodos de acero al carbono. En los niveles de baja corriente para cada tamaño de electrodo, la curva es casi lineal, pero con corrientes de soldadura altas, sobre todo si los electrodos son de diámetro pequeño, las curvas dejan de ser lineales y su pendiente aumenta al incrementarse el amperaje de soldadura. Esto se atribuye al calentamiento por resistencia de la extensión del electrodo que sobresaale del tubo de contacto. Las curvas pueden representarse aproximadamente por medio de la ecuación

$$WFS = aI + bI^2 \quad (4.1)$$

donde

WFS = velocidad de alimentación del electrodo, mm/s (pulg/s)

a = constante de proporcionalidad para el calentamiento anódico o catódico. Su magnitud depende de la polaridad, la composición y otros factores, mm/(s · A) [pulg/(min · A)]

b = constante de proporcionalidad para el calentamiento por resistencia eléctrica, s⁻¹ A⁻² (min⁻¹ A⁻²)

L = extensión o protrusión del electrodo, mm (pulg)

I = corriente de soldadura, A

Como puede verse en las figuras 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11, cuando se aumenta el diámetro del electrodo (manteniendo la misma velocidad de alimentación) se requiere una corriente de soldadura más alta. La relación entre la velocidad de alimentación del electrodo y la corriente de soldadura depende de la composición

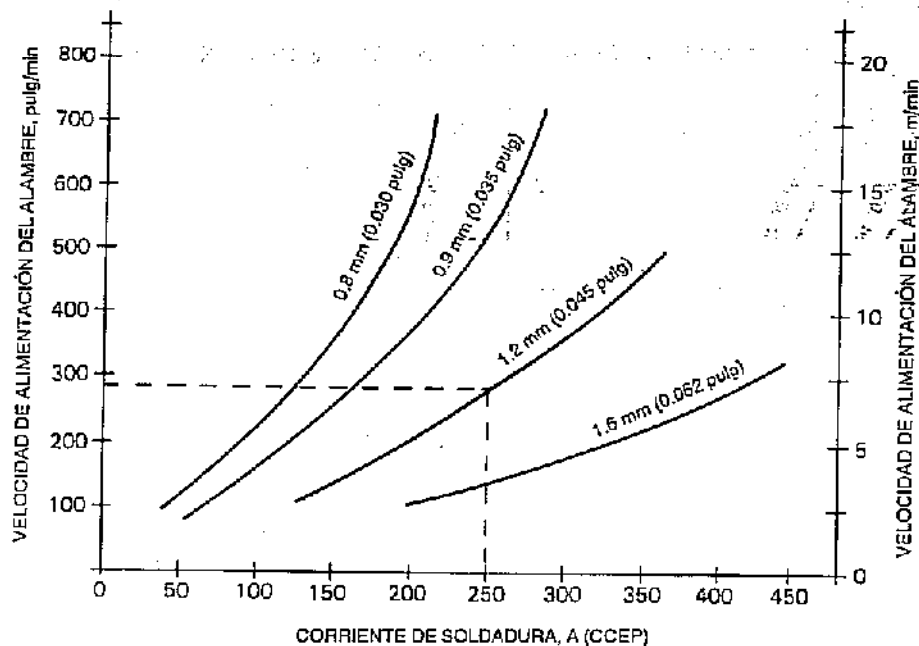


Figura 4.8—Corrientes de soldadura típicas contra velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero al carbono

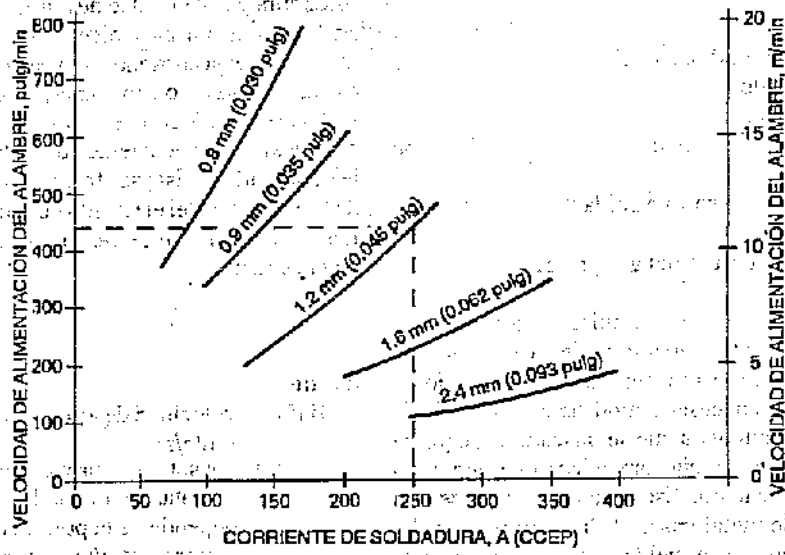


Figura 4.9—Corriente de soldadura contra velocidad de alimentación del alambre para electrodos de aluminio ER4043

química del electrodo. Este efecto puede verse comparando las figuras 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11, que corresponden a electrodos de acero al carbono, aluminio, acero inoxidable y cobre, respectivamente. Las diferentes posiciones y pendientes de las curvas se deben a diferencias en los puntos de fusión y resistividades eléctricas de los metales. La extensión del electrodo también afecta las relaciones.

Si todas las demás variables se mantienen constantes, un aumento en la corriente de soldadura (velocidad de alimentación del electrodo) producirá lo siguiente:

- (1) Un aumento en la profundidad y anchura de penetración de la soldadura.
- (2) Un incremento en la tasa de deposición.
- (3) Un aumento en el tamaño de la franja de soldadura.

La soldadura por aspersión a pulsos es una variación del proceso GMAW en la que la corriente se pulsa con el fin de disfrutar de las ventajas de la modalidad de transferencia de metal por aspersión con una corriente promedio igual o menor que la corriente de transición de globular a por aspersión.

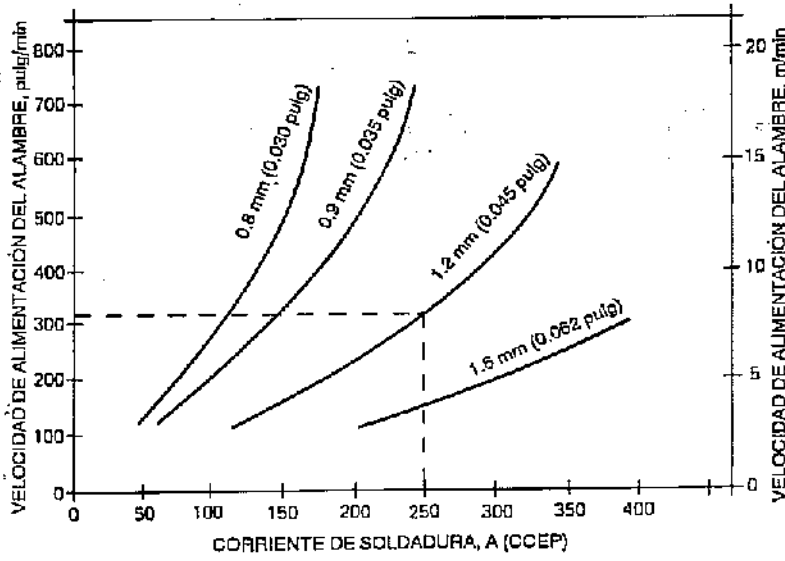


Figura 4.10—Corrientes de soldadura típicas contra velocidades de alimentación del alambre para electrodos de acero inoxidable de la serie 300

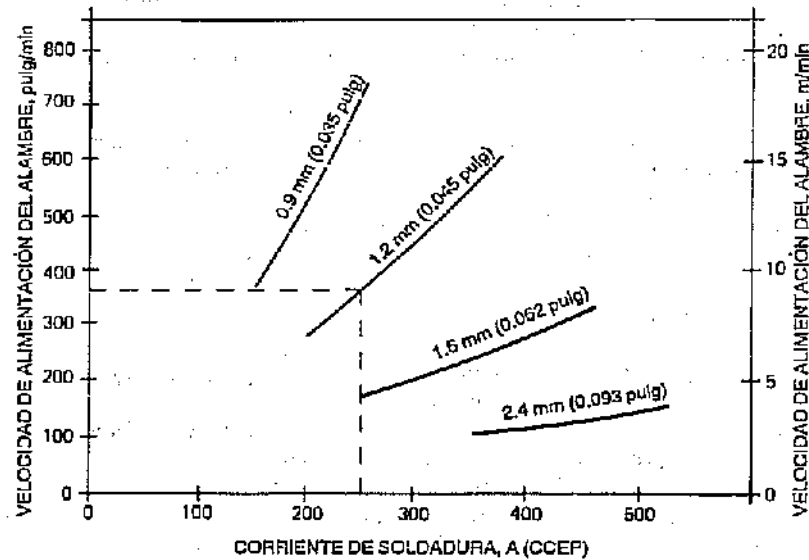


Figura 4.11—Corriente de soldadura contra velocidad de alimentación del alambre para electrodos de cobre ECu

Puesto que la fuerza del arco y la tasa de deposición dependen en forma exponencial de la corriente, cuando se opera por encima de la corriente de transición, las fuerzas del arco a menudo se vuelven incontrolables en las posiciones vertical y cenital. Al reducir la corriente promedio con los pulsos, es posible reducir tanto las fuerzas del arco como las tasas de deposición para poder soldar en cualquier posición y en secciones delgadas.

Si se usa alambre sólido, otra ventaja de la soldadura con potencia a pulsos es que se puede usar alambre de mayor diámetro [1.6 mm (1/16 pulg)]. Aunque las tasas de deposición en general no son más altas que aquellas con alambre de menor diámetro, la ventaja reside en el menor costo por unidad de metal depositado. También hay un incremento en la eficiencia de deposición porque se reducen las pérdidas por salpicadura.

Si se usa alambre con núcleo de metal, la potencia a pulsos produce un arco que es menos sensible a los cambios en la extensión (protrusión) del electrodo y en el voltaje, en comparación con los alambres sólidos. Esto hace al proceso más tolerante respecto a las fluctuaciones de la conducción por parte del operador. La potencia a pulsos también minimiza las salpicaduras en una operación que ya de por sí salpica muy poco.

Polaridad

EL TÉRMINO *polaridad* describe la conexión eléctrica de la pistola soldadora en relación con las terminales de una fuente de potencia de corriente continua. Si el cable de potencia de la pistola se conecta a la terminal positiva, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo positivo (CCEP), y se le ha dado arbitrariamente el nombre de *polaridad inversa*. Cuando la pistola se conecta a la terminal negativa, la polaridad se designa como corriente continua con el electrodo negativo (CCEN), que originalmente se llamó *polaridad directa*. Casi todas las aplicaciones de GMAW emplean corriente continua

con el electrodo positivo (CCEP). Esta condición produce un arco estable, una transferencia de metal uniforme, relativamente pocas salpicaduras, buenas características de la franja de soldadura y profundidad máxima de penetración para una amplia gama de corrientes de soldadura.

La corriente continua con el electrodo negativo (CCEN) raras veces se usa porque no puede obtenerse transferencia por aspersión axial sin efectuar modificaciones que no han gozado de mucha aceptación comercial. CCEN ofrece una clara ventaja de velocidades de fusión altas que no puede explotarse porque la transferencia es globular. En el caso de los aceros, la transferencia puede mejorarse añadiendo un mínimo de 5% de oxígeno al escudo de argón (lo que requiere aleaciones especiales para compensar las pérdidas por oxidación) o tratando el alambre para hacerlo termoiónico (lo que eleva el costo del metal de aporte). En ambos casos, las tasas de deposición decaen, con lo que desaparece la única ventaja real de cambiar la polaridad. Sin embargo, en virtud de la alta tasa de deposición y la menor penetración, CCEN se ha usado ocasionalmente en aplicaciones de recubrimiento.

Los intentos por usar corriente alterna con el proceso GMAW casi nunca han tenido éxito. La forma de onda cíclica hace inestable el arco porque éste tiende a extinguirse cuando la corriente pasa por cero. Aunque se han desarrollado tratamientos especiales de la superficie del alambre para resolver este problema, el costo de su aplicación ha hecho que la técnica no resulte económica.

Voltaje del arco (longitud del arco)

VOLTAJE DEL ARCO y *longitud del arco* son términos que con frecuencia se usan indistintamente. Pese a ello, cabe señalar que si bien están relacionados entre sí, son diferentes. En GMAW, la longitud del arco es una variable crítica que debe controlarse cuidadosamente. Por ejemplo, en la modalidad de arco de rocío

con escudo de argón, un arco que es demasiado corto experimenta cortocircuitos momentáneos que causan fluctuaciones de la presión, mismas que bombean aire hacia el chorro del arco y producen porosidad y pérdida de ductilidad por absorción de nitrógeno. Si el arco es demasiado largo, tiende un movimiento lateral aleatorio que afecta tanto la penetración como el perfil de la superficie de la franja. Además, un arco largo puede romper el escudo de gas. En el caso de arcos enterrados con escudo de dióxido de carbono, un arco largo produce salpicaduras excesivas y también porosidad; si el arco es demasiado corto, la punta del electrodo hará cortocircuito con el charco de soldadura, causando inestabilidad.

La longitud del arco es la variable independiente. El voltaje del arco depende de la longitud del arco así como de muchas otras variables, como la composición y dimensiones del electrodo, el gas protector, la técnica de soldadura y, dado que a menudo se mide en la fuente de potencia, incluso la longitud del cable de soldadura. El voltaje del arco permite expresar en forma aproximada la longitud física del arco (véase la figura 4.12) en términos eléctricos, aunque el voltaje del arco también incluye la caída de voltaje en la extensión del electrodo que sobresale del tubo de contacto.

Si todas las variables se mantienen constantes, el voltaje del arco se relaciona directamente con la longitud del arco. Aunque la variable que interesa y que debe controlarse es la longitud del arco, es más fácil vigilar el voltaje. Por esta razón, y por el requisito normal de que en el procedimiento de soldadura se especifique el voltaje del arco, éste es el término que se usa con mayor frecuencia.

Los niveles establecidos de voltaje del arco varían dependiendo del material, el gas protector y la modalidad de transferencia. En la tabla 4.2 se presentan valores típicos. Se requieren series de prueba para ajustar el voltaje del arco a fin de producir las características de arco y el aspecto de franja de soldadura más

favorables. Estas pruebas son indispensables porque el voltaje de arco óptimo depende de diversos factores, incluidos el espesor del metal, el tipo de unión, la posición de soldadura, el tamaño del electrodo, la composición del gas protector y el tipo de soldadura. A partir de cualquier valor específico de voltaje del arco, un incremento en el voltaje tiende a aplanar la franja de soldadura y aumentar la anchura de la zona de fusión. Un voltaje excesivo puede causar porosidad, salpicaduras y socavamiento. Si se reduce el voltaje se obtendrá una franja de soldadura más angosta con una corona más alta y penetración más profunda. Un voltaje demasiado bajo puede hacer que el electrodo se embote.

Velocidad de recorrido

LA VELOCIDAD DE recorrido o de desplazamiento es la tasa de movimiento lineal del arco a lo largo de la unión que se va a soldar. Si todas las demás condiciones se mantienen constantes, la penetración de la soldadura es máxima a una velocidad de recorrido intermedia.

Cuando se reduce la velocidad de recorrido, se incrementa la deposición del metal de aporte por unidad de longitud. A velocidades muy bajas, el arco actúa sobre el charco de soldadura, no sobre el metal base, con lo que se reduce la penetración efectiva. Otra consecuencia es una franja de soldadura ancha.

Al incrementarse la velocidad de recorrido, en un principio se incrementa también la cantidad de energía térmica que se transmite del arco al metal base, porque el arco actúa de manera más directa sobre el metal base. Si continúa el aumento en la velocidad de recorrido, se impartirá al metal base menos energía térmica por unidad de longitud de la soldadura. Por tanto, al incrementarse la velocidad de recorrido, la fusión del metal base primero aumenta y luego disminuye. Si se aumenta todavía más la velocidad de recorrido, aparecerá una tendencia al socavamiento a lo largo de los bordes de la franja de soldadura, porque no se depositará suficiente metal de aporte para rellenar el trayecto fundido por el arco.

Extensión del electrodo

LA EXTENSIÓN DEL electrodo es la distancia entre el extremo del tubo de contacto y la punta del electrodo, como puede verse en la figura 4.12. Un aumento en la extensión del electrodo produce un aumento en su resistencia eléctrica. El calentamiento por resistencia, a su vez, hace que se eleve la temperatura del electrodo, lo que aumenta ligeramente la tasa de fusión del electrodo. La mayor resistencia eléctrica hace que aumente la caída de voltaje entre el tubo de contacto y el trabajo, cosa que es detectada por la fuente de potencia, la cual compensa este aumento reduciendo la corriente. Esto de inmediato reduce la tasa de fusión del electrodo y permite que se acorte la longitud física del arco. En consecuencia, a menos que haya un incremento de voltaje en la máquina soldadora, el metal de aporte se depositará en una franja de soldadura angosta y de corona alta.

La extensión de electrodo deseable generalmente está entre 6 y 13 mm (1/4 y 1/2 pulg) para la transferencia en cortocircuito y entre 13 y 25 mm (1/2 y 1 pulg) para los demás tipos de transferencia de metal.

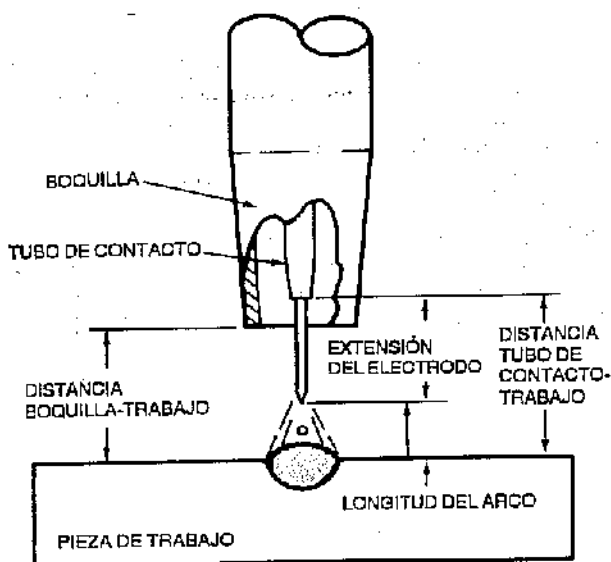


Figura 4.12—Terminología de soldadura por arco de metal y gas

Tabla 4.2
Voltajes de arco típicos para soldadura por arco de metal y gas de diversos metales^a

Metal	Transferencia globular/por aspersión ^b Electrodo de 1.6 mm (1/16 pulg) de diámetro					Transferencia en cortocircuito Electrodo de diámetro			
	Argón	Helio	25% Ar- 75% He	Ar-O ₂ (1-5% O ₂)	CO ₂	Argón	Ar-O ₂ (1-5% O ₂)	75% Ar- 25% CO ₂	CO ₂
Aluminio	25	30	29	—	—	19	—	—	—
Magnesio	26	—	26	—	—	16	—	—	—
Acero al carbono	—	—	—	28	30	17	18	19	20
Acero de baja aleación	—	—	—	28	30	17	18	19	20
Acero inoxidable	24	—	—	26	—	28	19	21	—
Níquel	26	30	28	—	—	22	—	—	—
Aleación cupro-níquel	26	30	28	—	—	22	—	—	—
Aleación níquel-cromo-hierro	26	30	28	—	—	22	—	—	—
Cobre	30	36	33	—	—	24	22	—	—
Aleación cobre-níquel	28	32	30	—	—	23	—	—	—
Bronce de silicio	28	32	30	28	—	23	—	—	—
Bronce de aluminio	28	32	30	—	—	23	—	—	—
Bronce fosforado	28	32	30	23	—	23	—	—	—

a. Más o menos aproximadamente 10%. Los voltajes bajos normalmente se usan con materiales ligeros y bajo amperaje; los voltajes altos se usan con materiales pesados y alto amperaje.

b. En la variación a pulsos de la transferencia por aspersión, el voltaje del arco estará entre 18 y 28 volts, dependiendo del intervalo de amperaje empleado.

Orientación del electrodo

COMO EN TODOS los procesos de soldadura por arco, la orientación del electrodo con respecto a la unión por soldar afecta la forma y la penetración de la franja de soldadura, y este efecto sobre la franja es mayor que el del voltaje del arco o el de la velocidad de recorrido. La orientación del electrodo se describe de dos maneras: (1) por la relación entre el eje del electrodo y la dirección de desplazamiento (el ángulo de desplazamiento) y (2) con el ángulo entre el eje del electrodo y la superficie adyacente del trabajo (ángulo de trabajo). Cuando el electrodo apunta en dirección opuesta a la dirección del desplazamiento, la técnica se denomina *soldadura de revés con ángulo de arrastre*. Cuando el electrodo apunta en la dirección del desplazamiento, la técnica es *soldadura de derecha con ángulo de ataque*. La orientación del electrodo y su efecto sobre la anchura y la penetración de la soldadura se ilustran en las figuras 4.13 (A), (B) y (C).

Cuando el electrodo se saca de la perpendicular dándole un ángulo de ataque, y todas las demás condiciones se mantienen sin alteración, la penetración disminuye y la franja de soldadura se hace más ancha y plana. La penetración máxima en la posición plana se obtiene con la técnica de arrastre, empleando un ángulo de arrastre de unos 25 grados respecto a la perpendicular. Esta técnica también produce una franja más convexa y angosta, un arco más estable y menos salpicaduras en la pieza de trabajo. Para todas las posiciones, el ángulo de desplazamiento que se usa normalmente es un ángulo de arrastre del orden de 5 a 15 grados, ya que así se controla y protege mejor el charco de soldadura.

En algunos materiales, como el aluminio, se prefiere una técnica de ataque. Esta técnica produce una "acción limpiadora"

adelante del metal de soldadura fundido que reduce su tensión superficial y la oxidación del metal base.

Si se desea producir soldaduras de filete en la posición horizontal, el electrodo deberá colocarse a unos 45° respecto al miembro vertical (ángulo de trabajo), como se ilustra en la figura 4.14.

Posición de la unión por soldar

CASI TODAS LAS soldaduras con GMAW en la modalidad de aspersión se efectúan en las posiciones plana u horizontal, pero si el nivel de energía es bajo, la GMAW a pulsos y en cortocircuito se puede usar en todas las posiciones. Las soldaduras de filete hechas en la posición plana con transferencia por aspersión suelen ser más uniformes, menos propensas, tener un perfil asimétrico o convexo y menos susceptibles al socavamiento que soldaduras de filete similares hechas en la posición horizontal.

A fin de vencer la atracción de la gravedad sobre el metal de soldadura al soldar en las posiciones vertical y cenital, por lo regular se usan electrodos de diámetro pequeña, con transferencia de metal en cortocircuito o bien por aspersión con corriente continua a pulsos. Los electrodos con diámetros de 1.1 mm (0.045 pulg) o menos son los más apropiados para soldar fuera de posición. El bajo aporte de calor permite al charco de soldadura solidificarse rápidamente. Cuando se suelda lámina en la posición vertical, la dirección de soldadura más efectiva casi siempre es hacia abajo.

Si se suelda en la posición "plana", la inclinación del eje de soldadura respecto al plano horizontal influirá en la forma de la franja de soldadura, en la penetración y en la velocidad de

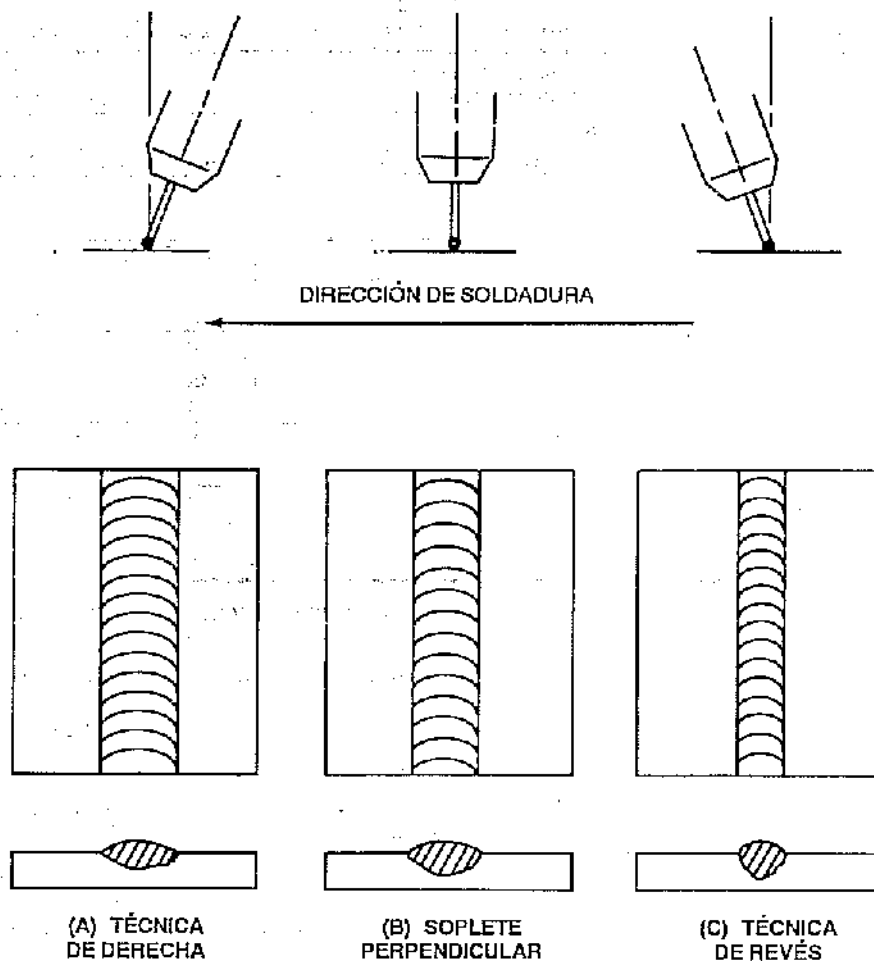


Figura 4.13—Efecto de la posición del electrodo y de la técnica de soldadura

recorrido. En la soldadura circunferencial en posición plana, el trabajo gira debajo de la pistola soldadora y la inclinación se obtiene moviendo la pistola en cualquier dirección que la aparte del centro muerto superior.

Si las uniones lineales se colocan con el eje de soldadura a 15 grados respecto a la horizontal y se suelda cuesta abajo, es posible reducir el refuerzo de la soldadura en condiciones que producirían un refuerzo excesivo si se colocara el trabajo en la posición plana. Además, con el desplazamiento cuesta abajo casi siempre es posible aumentar la velocidad. Al mismo tiempo, la penetración es menor, lo que resulta benéfico cuando se sueldan piezas de lámina.

La soldadura cuesta abajo afecta el perfil y la penetración de la soldadura, como se observa en la figura 4.15 (A). El charco de soldadura tiende a fluir hacia el electrodo y precalienta el metal base, sobre todo en la superficie. Esto produce una zona de fusión de forma irregular, llamada *depósito secundario*. Al aumentar el ángulo de inclinación, la superficie media de la soldadura adquiere una depresión, la penetración disminuye y la anchura de la franja aumenta. En el caso del aluminio, esta téc-

nica cuesta abajo no es recomendable porque se pierde acción limpiadora y el escudamiento es insuficiente.

La soldadura cuesta arriba afecta el perfil de la zona de fusión y de la superficie de la soldadura, como se ilustra en la figura 4.15 (B). La fuerza de la gravedad hace que el charco de soldadura fluya hacia atrás y se retrase respecto al electrodo. Los bordes de la soldadura pierden metal, el cual fluye hacia el centro. Al aumentar el ángulo de inclinación, aumentan también el refuerzo y la penetración, y la anchura de la franja disminuye. Los efectos son exactamente opuestos a los de la soldadura cuesta abajo. Si se emplean corrientes de soldadura elevadas, se reducirá el ángulo máximo que puede usarse.

Tamaño del electrodo

EL TAMAÑO (DIÁMETRO) del electrodo influye en la configuración de la franja de soldadura. Un electrodo de mayor tamaño requiere una corriente mínima más alta que un electrodo pequeño con las mismas características de transferencia de metal. Las

Tabla 4.2
Voltajes de arco típicos para soldadura por arco de metal y gas de diversos metales^a

Metal	Transferencia globular/por aspersión ^b Electrodo de 1.6 mm (1/16 pulg) de diámetro					Transferencia en cortocircuito Electrodo de diámetro			
	Argón	Helio	25% Ar- 75% He	Ar-O ₂ (1-5% O ₂)	CO ₂	Argón	Ar-O ₂ (1-5% O ₂)	75% Ar- 25% CO ₂	CO ₂
Aluminio	25	30	29	—	—	19	—	—	—
Magnesio	26	—	28	—	—	16	—	—	—
Acero al carbono	—	—	—	28	30	17	18	19	20
Acero de baja aleación	—	—	—	28	30	17	18	19	20
Acero inoxidable	24	—	—	26	—	28	19	21	—
Níquel	26	30	28	—	—	22	—	—	—
Aleación cupro-níquel	26	30	28	—	—	22	—	—	—
Aleación níquel-cromo-hierro	26	30	28	—	—	22	—	—	—
Cobre	30	36	33	—	—	24	22	—	—
Aleación cobre-níquel	28	32	30	—	—	23	—	—	—
Bronce de silicio	28	32	30	28	—	23	—	—	—
Bronce de aluminio	28	32	30	—	—	23	—	—	—
Bronce fosforado	28	32	30	23	—	23	—	—	—

a. Más o menos aproximadamente 10%. Los voltajes bajos normalmente se usan con materiales ligeros y bajo amperaje; los voltajes altos se usan con materiales pesados y alto amperaje.

b. En la variación a pulsos de la transferencia por aspersión, el voltaje del arco estará entre 18 y 28 volts, dependiendo del intervalo de amperaje empleado.

Orientación del electrodo

COMO EN TODOS los procesos de soldadura por arco, la orientación del electrodo con respecto a la unión por soldar afecta la forma y la penetración de la franja de soldadura, y este efecto sobre la franja es mayor que el del voltaje del arco o el de la velocidad de recorrido. La orientación del electrodo se describe de dos maneras: (1) por la relación entre el eje del electrodo y la dirección de desplazamiento (el ángulo de desplazamiento) y (2) con el ángulo entre el eje del electrodo y la superficie adyacente del trabajo (ángulo de trabajo). Cuando el electrodo apunta en dirección opuesta a la dirección del desplazamiento, la técnica se denomina *soldadura de revés con ángulo de arrastre*. Cuando el electrodo apunta en la dirección del desplazamiento, la técnica es *soldadura de derecha con ángulo de ataque*. La orientación del electrodo y su efecto sobre la anchura y la penetración de la soldadura se ilustran en las figuras 4.13 (A), (B) y (C).

Cuando el electrodo se saca de la perpendicular dándole un ángulo de ataque, y todas las demás condiciones se mantienen sin alteración, la penetración disminuye y la franja de soldadura se hace más ancha y plana. La penetración máxima en la posición plana se obtiene con la técnica de arrastre, empleando un ángulo de arrastre de unos 25 grados respecto a la perpendicular. Esta técnica también produce una franja más convexa y angosta, un arco más estable y menos salpicaduras en la pieza de trabajo. Para todas las posiciones, el ángulo de desplazamiento que se usa normalmente es un ángulo de arrastre del orden de 5 a 15 grados, ya que así se controla y protege mejor el charco de soldadura.

En algunos materiales, como el aluminio, se prefiere una técnica de ataque. Esta técnica produce una "acción limpiadora"

adelante del metal de soldadura fundido que reduce su tensión superficial y la oxidación del metal base.

Si se desea producir soldaduras de filete en la posición horizontal, el electrodo deberá colocarse a unos 45° respecto al miembro vertical (ángulo de trabajo), como se ilustra en la figura 4.14.

Posición de la unión por soldar

CASI TODAS LAS soldaduras con GMAW en la modalidad de aspersión se efectúan en las posiciones plana u horizontal, pero si el nivel de energía es bajo, la GMAW a pulsos y en cortocircuito se puede usar en todas las posiciones. Las soldaduras de filete hechas en la posición plana con transferencia por aspersión suelen ser más uniformes, menos propensas, tener un perfil asimétrico o convexo y menos susceptibles al socavamiento que soldaduras de filete similares hechas en la posición horizontal.

A fin de vencer la atracción de la gravedad sobre el metal de soldadura al soldar en las posiciones vertical y cenital, por lo regular se usan electrodos de diámetro pequeño, con transferencia de metal en cortocircuito o bien por aspersión con corriente continua a pulsos. Los electrodos con diámetros de 1.1 mm (0.045 pulg) o menos son los más apropiados para soldar fuera de posición. El bajo aporte de calor permite al charco de soldadura solidificarse rápidamente. Cuando se suelda lámina en la posición vertical, la dirección de soldadura más efectiva casi siempre es hacia abajo.

Si se suelda en la posición "plana", la inclinación del eje de soldadura respecto al plano horizontal influirá en la forma de la franja de soldadura, en la penetración y en la velocidad de

con escudo de argón, un arco
ta cortocircuitos momen
presión, mismas que
producen porosidad
nitrógeno. Si el ap
lateral aleatorio
la superficie
el escudo
dióxido
vas y
del

RO DE METAL Y GAS 121

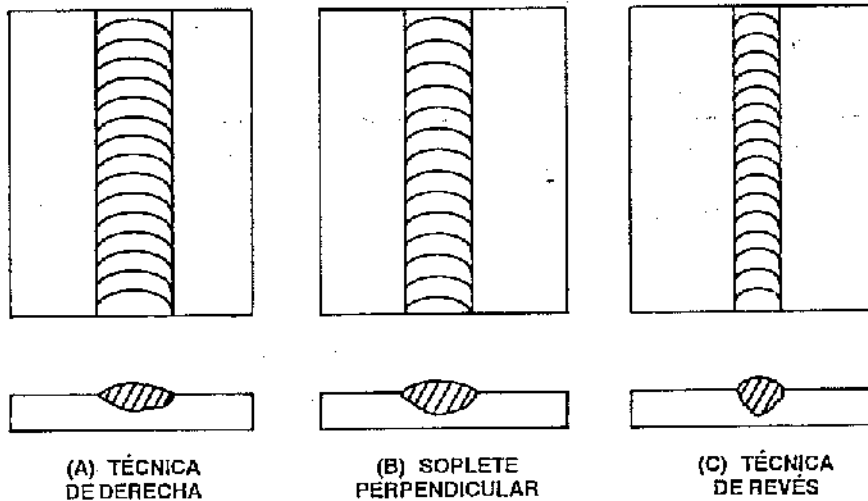
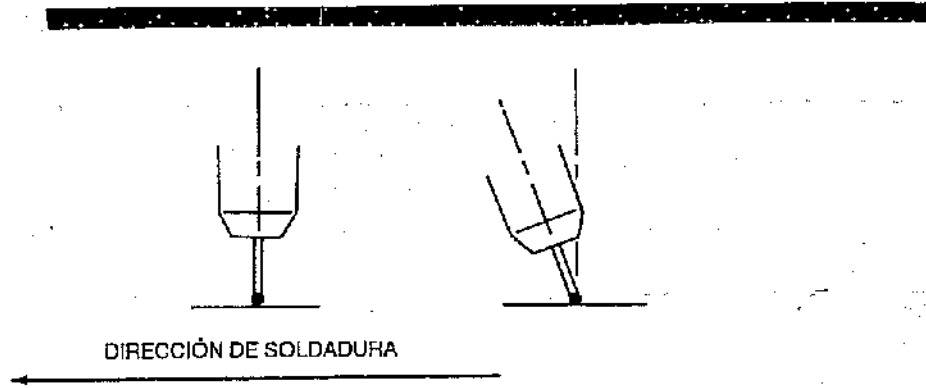


Figura 4.13—Efecto de la posición del electrodo y de la técnica de soldadura

recorrido. En la soldadura circunferencial en posición plana, el trabajo gira debajo de la pistola soldadora y la inclinación se obtiene moviendo la pistola en cualquier dirección que la aparte del centro muerto superior.

Si las uniones lineales se colocan con el eje de soldadura a 15 grados respecto a la horizontal y se suelda cuesta abajo, es posible reducir el refuerzo de la soldadura en condiciones que producirían un refuerzo excesivo si se colocara el trabajo en la posición plana. Además, con el desplazamiento cuesta abajo casi siempre es posible aumentar la velocidad. Al mismo tiempo, la penetración es menor, lo que resulta benéfico cuando se sueldan piezas de lámina.

La soldadura cuesta abajo afecta el perfil y la penetración de la soldadura, como se observa en la figura 4.15 (A). El charco de soldadura tiende a fluir hacia el electrodo y precalienta el metal base, sobre todo en la superficie. Esto produce una zona de fusión de forma irregular, llamada *depósito secundario*. Al aumentar el ángulo de inclinación, la superficie media de la soldadura adquiere una depresión, la penetración disminuye y la anchura de la franja aumenta. En el caso del aluminio, esta téc-

nica cuesta abajo no es recomendable porque se pierde acción limpiadora y el escudamiento es insuficiente.

La soldadura cuesta arriba afecta el perfil de la zona de fusión y de la superficie de la soldadura, como se ilustra en la figura 4.15 (B). La fuerza de la gravedad hace que el charco de soldadura fluya hacia atrás y se retrase respecto al electrodo. Los bordes de la soldadura pierden metal, el cual fluye hacia el centro. Al aumentar el ángulo de inclinación, aumentan también el refuerzo y la penetración, y la anchura de la franja disminuye. Los efectos son exactamente opuestos a los de la soldadura cuesta abajo. Si se emplean corrientes de soldadura elevadas, se reducirá el ángulo máximo que puede usarse.

Tamaño del electrodo

EL TAMAÑO (DIÁMETRO) del electrodo influye en la configuración de la franja de soldadura. Un electrodo de mayor tamaño requiere una corriente mínima más alta que un electrodo pequeño con las mismas características de transferencia de metal. Las

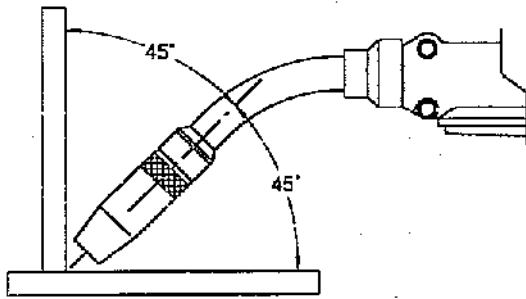


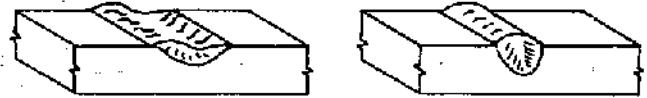
Figura 4.14—Ángulo de trabajo normal para soldaduras de filete

corrientes altas, a su vez, producen mayor fusión del electrodo y depósitos de soldadura más grandes y fluidos. Otra consecuencia de las corrientes altas es el aumento en la tasa de deposición

y en la penetración. No obstante, la soldadura en posición vertical o cenital por lo regular se efectúa con electrodos de menor diámetro y con corrientes más bajas.

Gas protector

Las características de los diversos gases y su efecto sobre la calidad de la soldadura y las características del arco se analizan en la sección sobre consumibles del presente capítulo.



(A) CUESTA ABAJO

(B) CUESTA ARRIBA

Figura 4.15—Efecto de la inclinación del trabajo sobre la forma de la franja de soldadura

EQUIPO

EL PROCESO GMAW se puede usar en forma semiautomática o automática. El equipo básico para cualquier instalación de GMAW consiste en lo siguiente:

- (1) Pistola soldadora (enfriada por aire o agua).
- (2) Unidad de alimentación del electrodo.
- (3) Control de soldadura.
- (4) Fuente de potencia para soldadura.
- (5) Suministro regulado de gas protector.
- (6) Suministro de electrodo.
- (7) Cables y mangueras para interconexión.
- (8) Sistema de circulación de agua (para sopletes enfriados por agua).

En las figuras 4.2 y 4.16 se ilustran los componentes típicos para operación semiautomática y mecanizada.

PISTOLAS SOLDADORAS

SE HAN DISEÑADO diversos tipos de pistolas soldadoras para obtener el máximo de eficiencia sea cual sea la aplicación, y van desde pistolas de trabajo pesado para trabajos de producción de alto volumen con corriente elevada hasta pistolas ligeras para soldadura fuera de posición con corriente baja.

Se pueden conseguir boquillas enfriadas por aire o por agua, curvadas o rectas, tanto para pistolas ligeras como de trabajo pesado. Las pistolas enfriadas por aire suelen ser más pesadas que las enfriadas por agua para el mismo amperaje y ciclo de trabajo especificados, porque la pistola enfriada por aire requiere más masa para compensar la menor eficiencia del enfriamiento.

Los componentes básicos de las pistolas para soldadura por arco son los siguientes:

- (1) Tubo de contacto (o punta).
- (2) Boquilla para el escudo de gas.
- (3) Conducto para el electrodo y forro.
- (4) Manguera de gas.
- (5) Manguera de agua.
- (6) Cable de potencia.
- (7) Interruptor de control.

Estos componentes se ilustran en la figura 4.17.

El tubo de contacto, que por lo regular es de cobre o de una aleación de cobre, transfiere la corriente de soldadura al electrodo y dirige a este último hacia el trabajo. El tubo de contacto se conecta eléctricamente a la fuente de potencia de soldadura mediante el cable de potencia. La superficie interior del tubo de contacto debe ser lisa para que el electrodo se alimente con facilidad a través del tubo sin dejar de mantener un buen contacto eléctrico. El instructivo que acompaña a la pistola indica el tamaño de tubo de contacto correcto para cada tamaño y material del electrodo.

En general, el agujero del tubo de contacto debe ser entre 0.13 y 0.25 mm (0.005 y 0.010 pulg) mayor que el alambre empleado, aunque se podrían requerir agujeros más grandes en el caso del aluminio. El tubo de contacto debe sostenerse firmemente en el soplete y centrarse dentro de la boquilla del escudo de gas. El posicionamiento del tubo de contacto en relación con el extremo de la boquilla puede ser una variable que dependa de la modalidad de transferencia empleada. Si la transferencia es en corto-circuito, el tubo por lo regular estará en el mismo nivel o

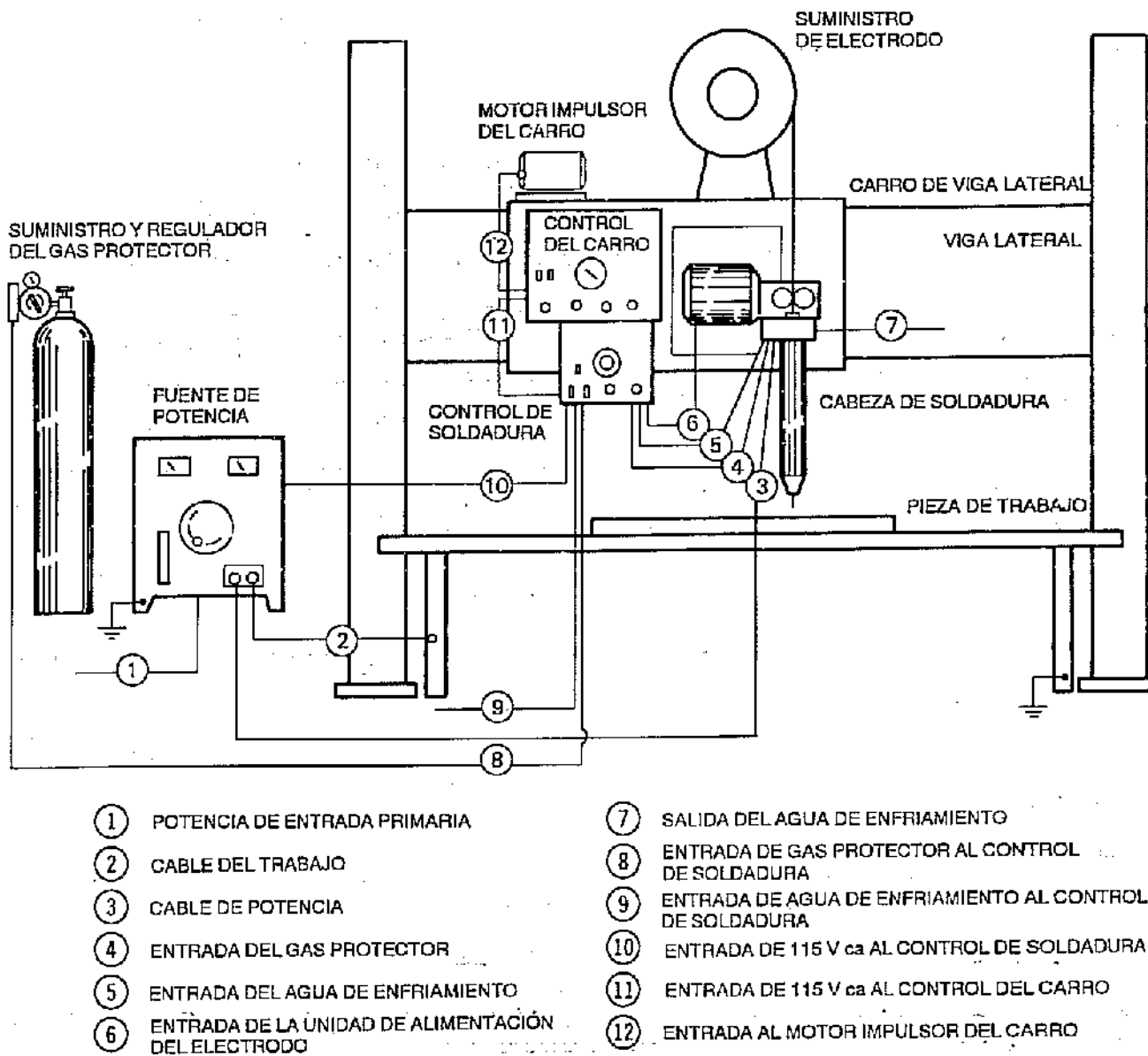


Figura 4.16—Instalación para soldadura por arco de metal y gas mecanizada

extendido más allá de la boquilla, pero si se usa arco de rocío estará retraído aproximadamente 3 mm (1/8 pulg). Durante la soldadura, deberá examinarse periódicamente y reemplazarse si el agujero se ha dilatado por un desgaste excesivo o si se ha taponado con salpicaduras. El empleo de una punta desgastada o taponada puede perjudicar el contacto eléctrico y producir un arco con características irregulares.

La boquilla dirige una columna de gas protector de flujo uniforme hacia la zona de soldadura. Es en extremo importante que el flujo sea uniforme para asegurar que el metal de soldadura fundido esté bien protegido contra contaminación por los gases

de la atmósfera. Hay boquillas de diferentes tamaños que deben elegirse de acuerdo con la aplicación; esto es, boquillas grandes para trabajos con corriente elevada en los que el charco de soldadura es grande, y boquillas pequeñas para soldadura de baja corriente y en cortocircuito. Las boquillas para aplicaciones de soldadura de puntos cuentan con aberturas que permiten al gas escapar cuando la boquilla se presiona contra la pieza de trabajo.

El conducto del electrodo y su forro se conectan a una menzula adyacente a los rodillos de alimentación del motor que alimenta el electrodo. El conducto sustenta, protege y dirige el electrodo desde los rodillos de alimentación hasta la pistola y el tubo

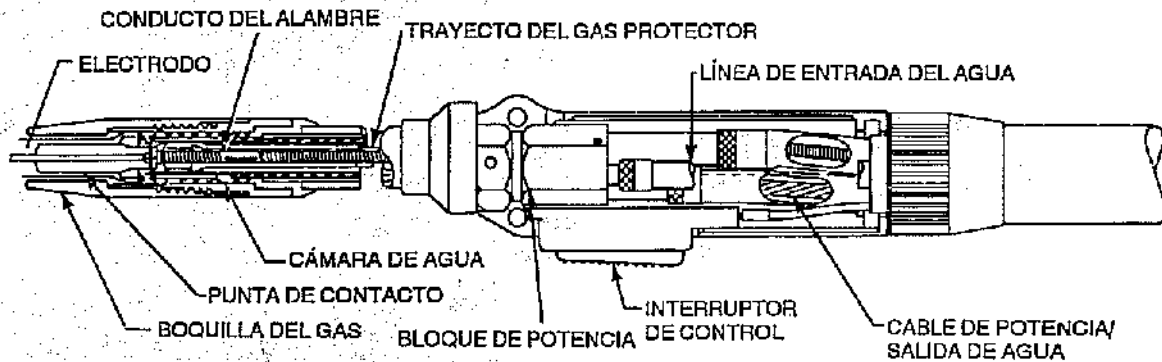


Figura 4.17—Vista en corte seccional de una pistola para soldadura por arco de tungsteno y gas típica

de contacto. Se necesita una alimentación ininterrumpida del electrodo para asegurar un arco estable. Es preciso evitar que el electrodo se doble o se pandee. Si el electrodo no está bien sustentado en todos los puntos entre los rodillos y el tubo de contacto, tenderá a atascarse.

El forro puede ser una parte integral del conducto o adquirirse por separado. En cualquier caso, el material y el diámetro interior del forro son importantes. Es preciso dar mantenimiento periódico a los forros para asegurar que estén limpios y en buenas condiciones, a fin de que la alimentación del alambre sea consistente.

Se recomienda un forro helicoidal de acero si se usan electrodos de un material duro como el acero o el cobre. Los forros de nailon sirven para materiales de electrodo blandos como el aluminio y el magnesio.

Hay que tener cuidado de no estrangular o flexionar excesivamente el conducto aunque, como es usual, su superficie exterior tenga un refuerzo de acero. El instructivo que acompaña a cada unidad por lo regular incluye una lista de los conductos y forros recomendados para cada tamaño y material de electrodo.

Los accesorios restantes llevan el gas protector, el agua de enfriamiento y la potencia de soldadura a la pistola. Estas mangueras y cables pueden conectarse directamente a los suministros correspondientes o al control de soldadura. Hay escudos de gas con estela que pueden ser obligatorios para proteger el charco de soldadura en operaciones de alta velocidad.

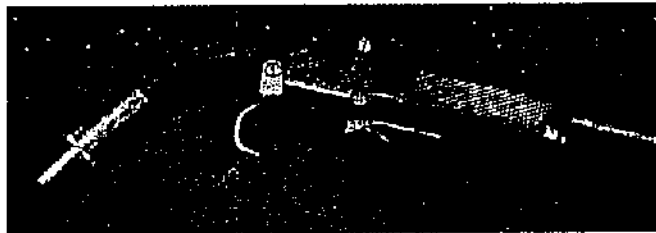


Figura 4.18—Pistola comercial para soldadura por arco de metal y gas

La pistola básica (figura 4.18) se conecta a una unidad alimentadora del electrodo que empuja el electrodo desde una posición remota para hacerlo pasar por el conducto. Existen otros diseños, como la unidad de la figura 4.19 que cuenta con un pequeño mecanismo de alimentación del electrodo integrado. Esta pistola tira del electrodo en el suministro, donde puede haber un impulsor adicional que al mismo tiempo empuje el electrodo hacia el conducto (es decir, un sistema de "empuje-tracción"). Este tipo de pistola también resulta útil para alimentar electrodos suaves (como los de aluminio) o de diámetro pequeño, pues si se empujaban el alambre podría pandearse. Otra variación es la de "carrete en la pistola" que se ilustra en la figura 4.20, en la que el mecanismo de alimentación del electrodo y el suministro del electrodo están integrados.

UNIDAD DE ALIMENTACIÓN DEL ELECTRODO

LA UNIDAD DE alimentación del electrodo (alimentador de alambre) consiste en un motor eléctrico, rodillos impulsores y accesorios para mantener la alineación y la presión sobre el electrodo. Estas unidades pueden incorporarse al control de velocidad o ubicarse en una posición remota. El motor de alimentación del electrodo por lo regular es de corriente continua, y empuja el electrodo a través de la pistola hacia el trabajo. El motor debe tener un circuito de control que varíe su velocidad dentro de un intervalo amplio.

Los alimentadores de alambre de velocidad constante normalmente se usan en combinación con fuentes de potencia de voltaje

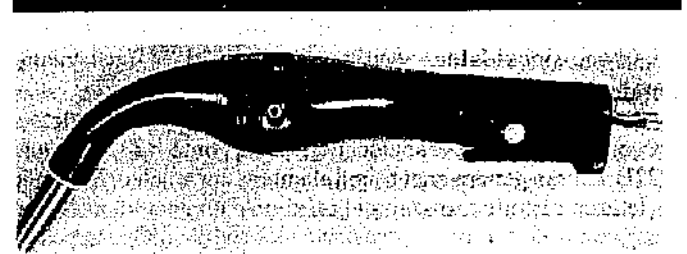


Figura 4.19—Pistola de GMAW del tipo de tracción

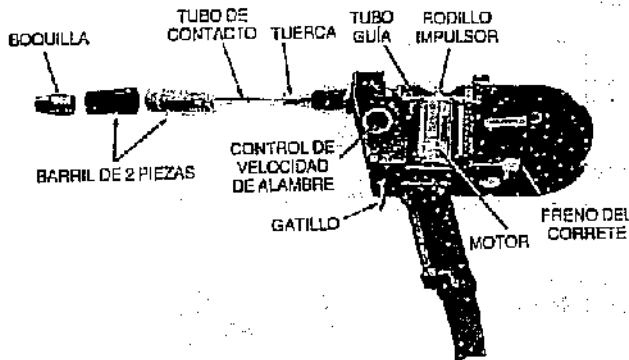


Figura 4.20—Vista explotada de un soplete del tipo de carrete en la pistola

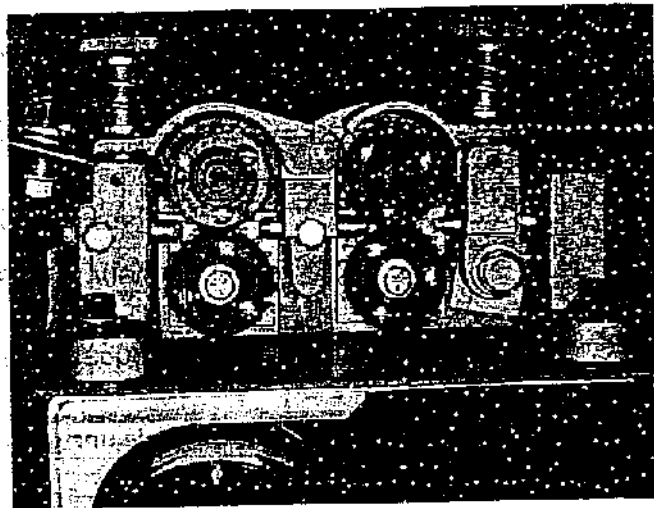


Figura 4.21—Unidad de alimentación de alambre de cuatro rodillos típica

constante. Pueden usarse con fuentes de potencia de corriente constante si se añade un circuito de "ensarte" lento del electrodo.

Si se emplea una fuente de potencia de corriente constante, se requiere un control automático detector de voltaje. Este control detecta cambios en el voltaje del arco y ajusta la velocidad de alimentación del alambre a modo de mantener una longitud de arco constante. Esta combinación de alimentador de alambre de velocidad variable y fuente de potencia de corriente constante está limitada a alambres de diámetro grande [mayor que 1.6 mm (1/16 pulg)] con los que se usan velocidades de alimentación más bajas. Si la velocidad de alimentación del alambre es alta, la velocidad de motor normalmente no podrá ajustarse con la rapidez suficiente para mantener la estabilidad del arco.

El motor de alimentación se conecta a un conjunto de rodillos impulsores que transmiten la fuerza al electrodo; lo sacan del suministro de alambre y lo meten a la pistola soldadora. Las unidades de alimentación de alambre pueden tener un sistema de dos o de cuatro rodillos. En la figura 4.21 se muestra una unidad de cuatro rodillos típica. El ajuste de presión de los rodillos permite aplicar una fuerza variable al alambre, dependiendo de sus características (por ejemplo sólido o con núcleo, duro o blando). Las guías de entrada y de salida alinean debidamente el alambre con los rodillos y le dan soporte para evitar que se doble.

En la figura 4.22A se muestra el tipo de rodillos que suelen usarse con alambre sólido: un rodillo provisto de un surco se combina con un rodillo de respaldo liso. Se emplea un surco con forma de "V" para alambres sólidos duros, como los de aceros al carbono e inoxidable, y un surco en forma de "U" para alambres blandos como el de aluminio.

Los rodillos de alimentación con dientes de sierra o moleteados, con un rodillo de respaldo moleteado, como los de la figura 4.22B, se usan generalmente con alambres con núcleo. El diseño moleteado permite transmitir el máximo de fuerza impulsora al alambre con el mínimo de presión de los rodillos. Estos tipos de rodillos no se recomiendan para alambres blandos, como el de aluminio, porque tienden a formar hojuelas del metal del alambre que pueden llegar a taponar la pistola o el forro.

Control de soldadura

EN APLICACIONES SEMIAUTOMÁTICAS, el control de soldadura y el motor de alimentación del electrodo pueden estar integrados en una sola unidad. La función principal del control de soldadura es regular la velocidad del motor de alimentación del electrodo, por lo regular mediante un gobernador electrónico. Si aumenta la velocidad de alimentación del alambre, el operador incrementará la corriente de soldadura. Una disminución en la velocidad de alimentación produce corrientes de soldadura más bajas. El control también regula el arranque y la detención de la alimen-



Figura 4.22A—Rodillo de alimentación amolado con respaldo plano empleado para alimentar alambres sólidos

tación del electrodo a través de una señal procedente del interruptor de la pistola.

También están disponibles funciones de control de alimentación del electrodo que permiten usar un "arranque de toque" (la alimentación del electrodo se inicia cuando el electrodo toca el trabajo) o un "ensarte lento" (la tasa de alimentación inicial se reduce hasta que se enciende el arco y luego se incrementa hasta la requerida para soldar). Estas dos funciones se emplean primordialmente en conjunción con fuentes de potencia de corriente constante, y son especialmente útiles para la soldadura por arco de metal y gas de aluminio.

Normalmente, el gas protector, el agua de enfriamiento y la potencia de soldadura se suministran a la pistola a través del control, para lo que se requiere una conexión directa del control con estos recursos y con la fuente de potencia. El flujo de gas y de agua se regulan mediante válvulas de solenoide de modo que coincidan con el inicio y la detención de la acción de soldar. El control también puede determinar el inicio y la detención del flujo de gas, y energizar el contactor de la fuente de potencia. Puede ser que el control permita cierto flujo de gas antes de comenzar a soldar (prepurga) y después de terminar (postpurga) con el fin de proteger el charco de soldadura. El control por lo regular tiene una alimentación independiente de 115 V de ca.

Fuente de potencia

LA FUENTE DE potencia para soldadura suministra energía eléctrica al electrodo y a la pieza de trabajo a fin de producir el arco. En casi todas las aplicaciones de GMAW se emplea corriente continua con el electrodo positivo (CCEP); por tanto, la terminal positiva se conecta a la pistola y la negativa a la pieza de trabajo. Los tipos principales de fuentes de potencia de corriente continua son generadores impulsados por motor (rotatorias) y transformadores-rectificadores (estáticas). Los inversores están incluidos en la categoría estática. Generalmente se prefieren las

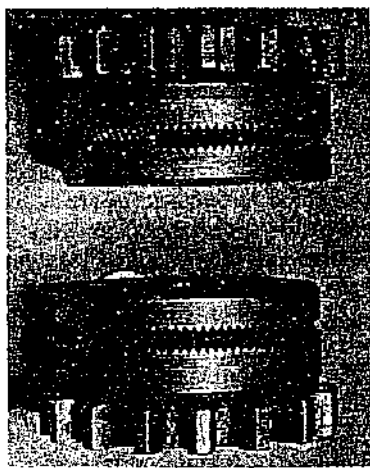


Figura 4.22B—Rodillos de alimentación moleteados generalmente utilizados con alambres con núcleo

fuentes de transformador-rectificador para fabricación dentro de un taller donde se dispone de una fuente de 230 V o 460 V. Este tipo de fuentes de potencia responde con mayor rapidez que las de generador impulsado por motor cuando cambian las condiciones del arco. El generador impulsado por motor se usa cuando no se dispone de otra fuente de energía eléctrica, como en lugares remotos.

Ambos tipos de fuentes de potencia pueden diseñarse y construirse de modo que suministren corriente constante o bien potencial constante. Las primeras aplicaciones de GMAW empleaban fuentes de potencia de corriente constante (a menudo conocidas como fuentes *de caída*). Estas fuentes mantienen un nivel de corriente relativamente fijo durante la soldadura, sin importar las variaciones en la longitud del arco, como se ilustra en la figura 4.23. Estas máquinas se caracterizan por voltajes de circuito abierto elevados y niveles de corriente en cortocircuito limitados. Como suministran una salida de corriente prácticamente constante, el arco mantendrá una longitud fija sólo si la distancia entre el tubo de contacto y el trabajo permanece constante, con una velocidad de alimentación del electrodo también constante.

En la práctica, como esta distancia varía, el arco tiende a "arder hacia atrás" con el tubo de contacto o a "embotarse" dentro de la pieza de trabajo. Esto puede evitarse empleando un sistema de alimentación del electrodo controlado por el voltaje. Cuando el voltaje (longitud del arco) aumenta o disminuye, el motor se acelera o se frena a fin de mantener constante la longitud del arco. El sistema de control modifica automáticamente la velocidad de alimentación del electrodo. Este tipo de fuente de potencia generalmente se usa para soldar con transferencia por aspersión, ya que la corta duración del arco en la transferencia en cortocircuito hace que el control por regulación del voltaje no resulte práctico.

Al aumentar el número de aplicaciones de GMAW, se vio que una fuente de potencia de voltaje (potencial) constante mejoraba la operación. Si se emplea junto con un alimentador de alambre de velocidad constante, mantiene un voltaje casi constante durante la operación de soldadura. La curva volt-amperes de este tipo de fuente de potencia se ilustra en la figura 4.24. El sistema de potencial constante compensa las variaciones en la distancia entre la punta de contacto y la pieza de trabajo que ocurren durante las operaciones de soldadura normales incrementando o decrementando instantáneamente la corriente de soldadura, a fin de contrarrestar los cambios en la extensión del electrodo debidos a los cambios en la distancia entre la pistola y el trabajo.

La longitud del arco se establece ajustando el voltaje de soldadura en la fuente de potencia. Una vez fijada, no se requieren más modificaciones durante la soldadura. La velocidad de alimentación del alambre, que además se convierte en el control de corriente, la establece el soldador u operador antes de comenzar a soldar. Se puede ajustar dentro de un intervalo considerable antes de que el arco se embote dentro de la pieza de trabajo o arda hacia el tubo de contacto. Los soldadores y operadores de inmediato aprenden a ajustar los controles de alimentación del alambre y de voltaje con un mínimo de capacitación.

El mecanismo de autocorrección de una fuente de potencia de voltaje constante se ilustra en la figura 4.25. Al aumentar la distancia entre la punta de contacto y el trabajo, el voltaje del arco y la longitud del mismo tenderían a crecer; sin embargo, la

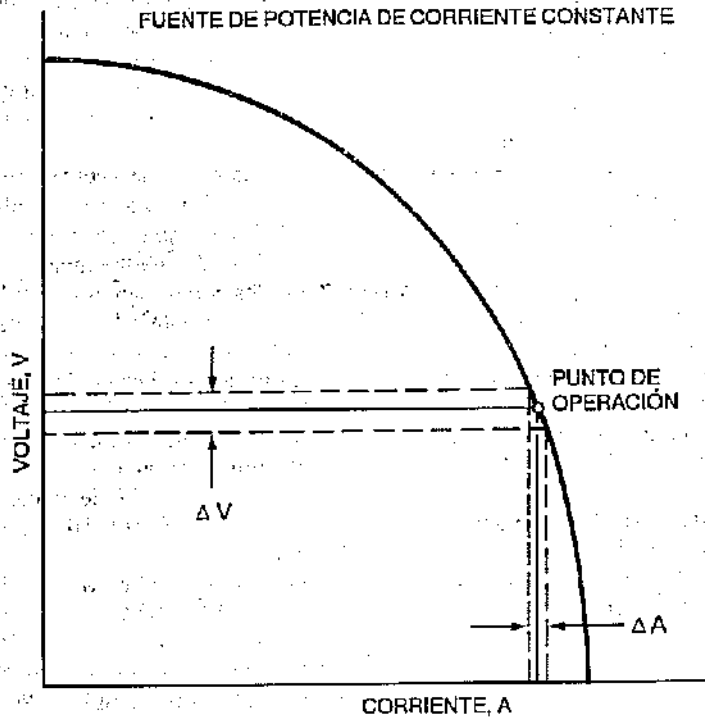


Figura 4.23—Relación volt-ampere para una fuente de potencia de corriente constante

corriente de soldadura disminuye con este ligero aumento en voltaje, lo que compensa el incremento en la extensión del electrodo. Por otro lado, si la distancia se acorta, el menor voltaje irá acompañado por un aumento en la corriente que compensará la reducción en la extensión.

La función de autocorrección de la fuente de potencia de voltaje constante es importante para producir condiciones de soldadura estables, pero hay otras variables que contribuyen a un rendimiento óptimo, sobre todo cuando la transferencia se realiza en cortocircuito.

Además del control del voltaje de salida, puede ser deseable cierto grado de control sobre la pendiente y la inductancia. El soldador u operador debe entender el efecto de estas variables sobre el arco de soldadura y su estabilidad.

Voltaje. El voltaje de arco es el potencial eléctrico entre el electrodo y la pieza de trabajo. Este voltaje es menor que el que se mide directamente en la fuente de potencia a causa de las caídas de voltaje en las conexiones y a lo largo del cable de soldadura. Como ya se dijo, el voltaje del arco está relacionado

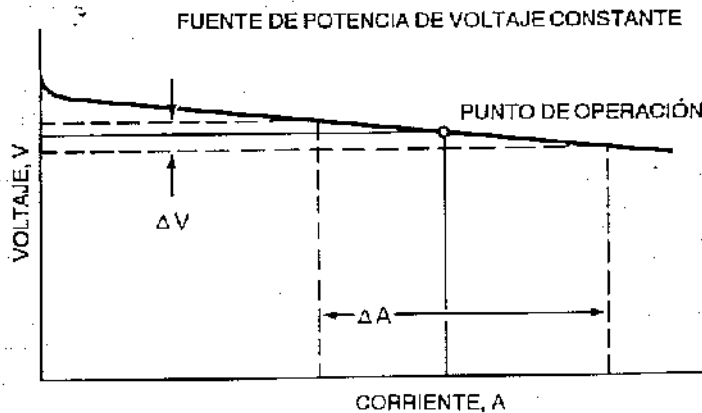


Figura 4.24—Relación volt-ampere para una fuente de potencia de voltaje constante

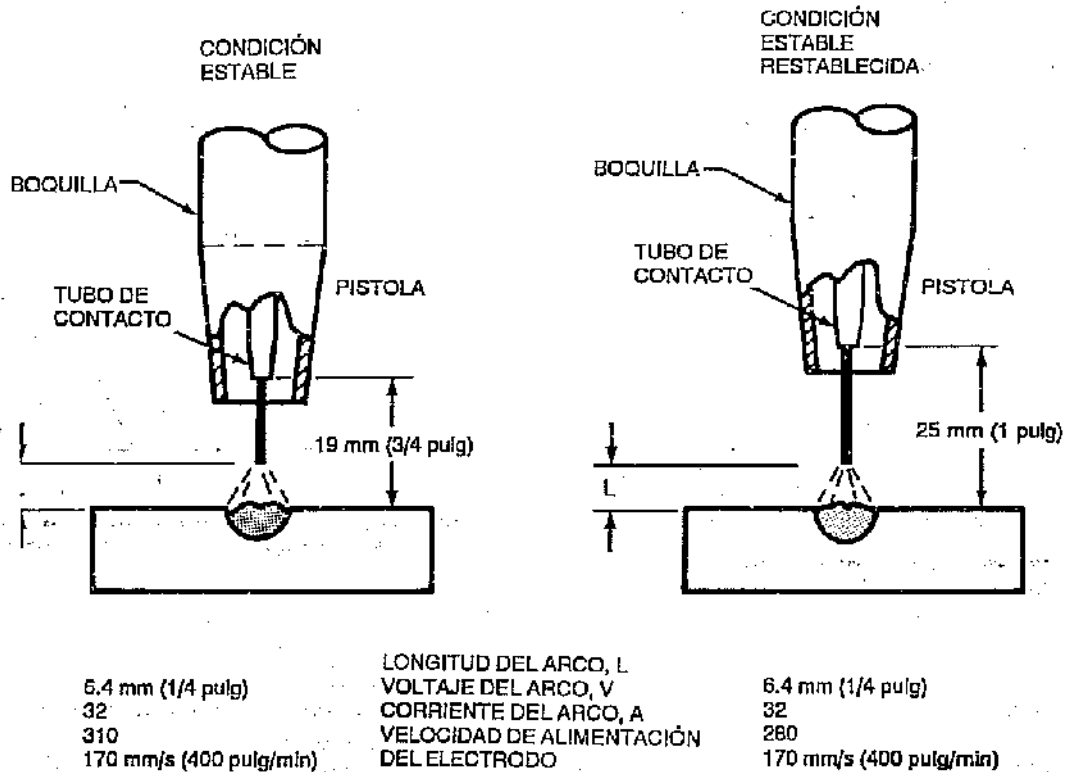


Figura 4.25—Regulación automática de la longitud del arco en el proceso GMAW

directamente con la longitud del arco; por tanto, un aumento o reducción en el voltaje de salida de la fuente de potencia producirá un cambio similar en la longitud del arco.

Pendiente. Las características volt-amperé estáticas (salida estática) de una fuente de potencia de voltaje constante se ilustran en la figura 4.24. La pendiente de la salida es la pendiente algebraica de la curva volt-amperé y se acostumbra citarla como la caída de voltaje por 100 amperes de aumento en la corriente.

La pendiente de la fuente de potencia, según la especificación del fabricante, se mide en sus terminales de salida y no es la pendiente total del sistema de soldadura por arco. Cualquier cosa que añada resistencia al sistema de soldadura (por ejemplo cables de potencia, conexiones deficientes, terminales flojas, contactos sucios, etc.) hará crecer la pendiente. Por tanto, en un sistema de soldadura dado lo mejor es medir la pendiente en el arco. Se requieren dos puntos de operación para calcular la pendiente de un sistema de soldadura del tipo de potencial constante, como se muestra en la figura 4.26. No conviene usar el voltaje de circuito abierto como uno de los puntos, porque en algunas máquinas hay una marcada caída de voltaje a corrientes bajas. Esto se indica en la figura 4.24. Se deben escoger dos condiciones de arco estables en niveles de corriente que abarquen el intervalo que probablemente se usará.

La pendiente tiene una función preponderante en la modalidad de transferencia en cortocircuito de GMAW en cuanto a que

controla la magnitud de la corriente de cortocircuito, que es el amperaje que fluye cuando el electrodo está en corto con la pieza de trabajo. En GMAW, la separación de gotas de metal fundido del electrodo se controla por un fenómeno eléctrico conocido como *efecto de estrangulación electromagnética*. La estrangulación es la fuerza de "constricción" que la corriente ejerce sobre un conductor al fluir por él. En la figura 4.27 se ilustra este efecto para la transferencia en cortocircuito.

La corriente en cortocircuito (y por tanto la fuerza del efecto de estrangulación) es función de la pendiente de la curva volt-amperé de la fuente de potencia, como se ilustra en la figura 4.28. El voltaje de operación y el amperaje de las dos fuentes de potencia son idénticos, pero la corriente en cortocircuito de la curva A es menor que la de la curva B. La curva A tiene una pendiente más pronunciada, o una mayor caída de voltaje por cada 100 amperes, en comparación con la curva B; por tanto tiene una corriente en cortocircuito menor y un efecto de estrangulación menos intenso.

En la transferencia en cortocircuito, la magnitud de la corriente de cortocircuito es importante porque el efecto de estrangulación resultante determina la forma cómo una gota fundida se desprende del electrodo. Esto, a su vez, afecta la estabilidad del arco. Si hay poca o ninguna pendiente en el circuito de la fuente de potencia, la corriente de cortocircuito subirá con rapidez hasta un nivel elevado. El efecto de estrangulación será intenso, y la gota fundida se separará violentamente del alambre. El excesivo efecto de estrangulación hará a un lado abruptamente el metal

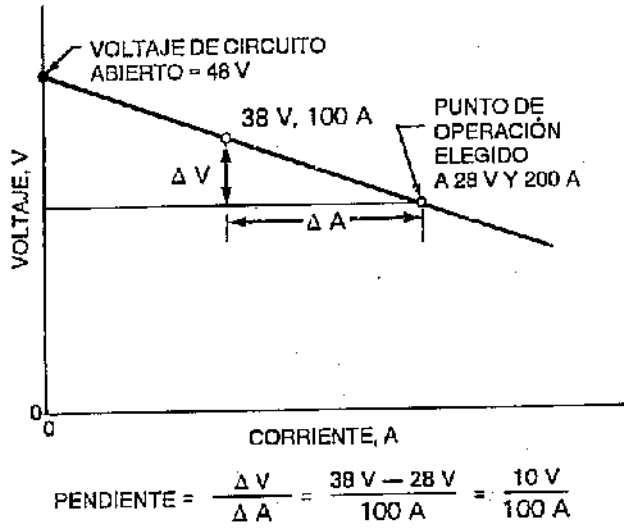


Figura 4.26—Cálculo de la pendiente para una fuente de potencia

fundido, despejará el cortocircuito, y producirá demasiadas salpicaduras.

Si la corriente de cortocircuito disponible de la fuente de potencia se limita a un nivel bajo mediante una pendiente pronunciada, el electrodo transportará la corriente completa, pero es posible que el efecto de estrangulamiento sea demasiado leve

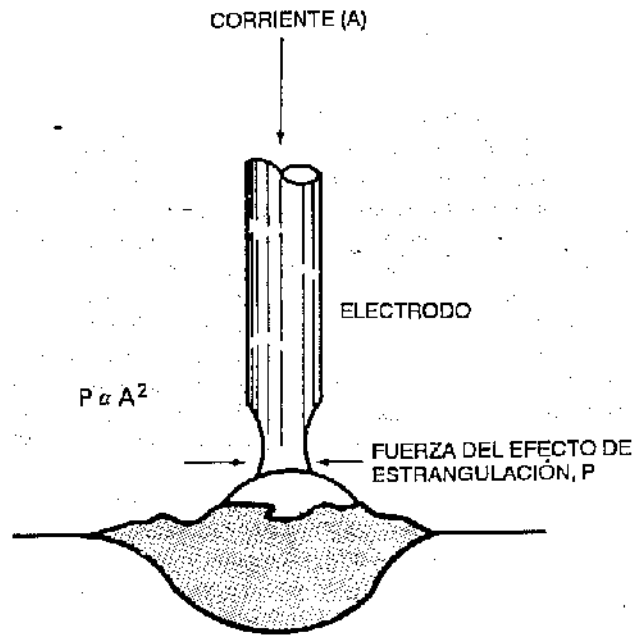


Figura 4.27—Ilustración del efecto de estrangulación durante la transferencia en cortocircuito

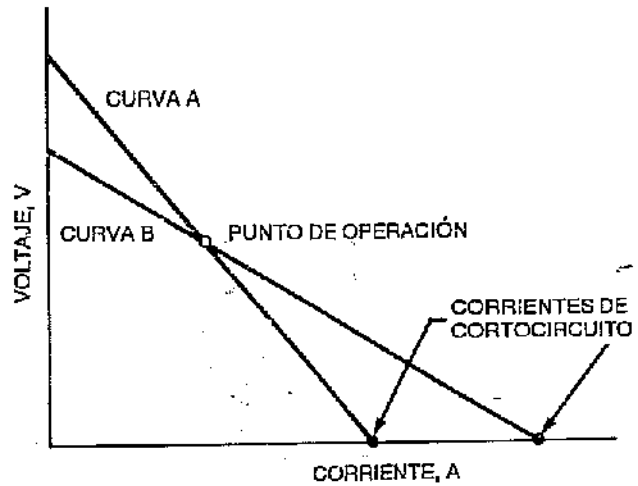


Figura 4.28—Efecto de un cambio de pendiente

para separar la gota y restablecer el arco. En esas condiciones, el electrodo chocará contra la pieza de trabajo o se congelará en el charco. Si la corriente de cortocircuito tiene un valor aceptable, la separación de la gota fundida del electrodo será suave con muy poca salpicadura. En la tabla 4.3 se dan las corrientes de cortocircuito típicas requeridas para la transferencia de metal con un arco lo más estable posible.

Muchas fuentes de potencia de voltaje constante están equipadas con un ajuste de pendiente. Pueden ajustarse por pasos o continuamente para suministrar los niveles deseados de corriente de cortocircuito para la aplicación de que se trate. Algunos tienen pendiente fija que se ha establecido previamente para las condiciones de soldadura más comunes.

Inductancia. Cuando el electrodo hace corto con el trabajo, la corriente sube rápidamente a un nivel elevado. La característica del circuito que afecta la rapidez de este aumento es la inductancia, que por lo regular se mide en henrys. El efecto de la inductancia se ilustra con las curvas de la figura 4.29. La curva A es un ejemplo de curva corriente-tiempo inmediatamente después de un cortocircuito cuando hay cierta inductancia en el circuito. La curva B ilustra el camino que habría seguido la corriente si no hubiera inductancia en el circuito.

Tabla 4.3
Corrientes de cortocircuito típicas necesarias para transferir metal en la modalidad en cortocircuito

Material del electrodo	Diámetro del electrodo		Corriente de cortocircuito, amperes (CCEP)
	pulg	mm	
Acero al carbono	0.030	0.8	300
Acero al carbono	0.035	0.8	320
Aluminio	0.030	0.8	175
Aluminio	0.035	0.9	195

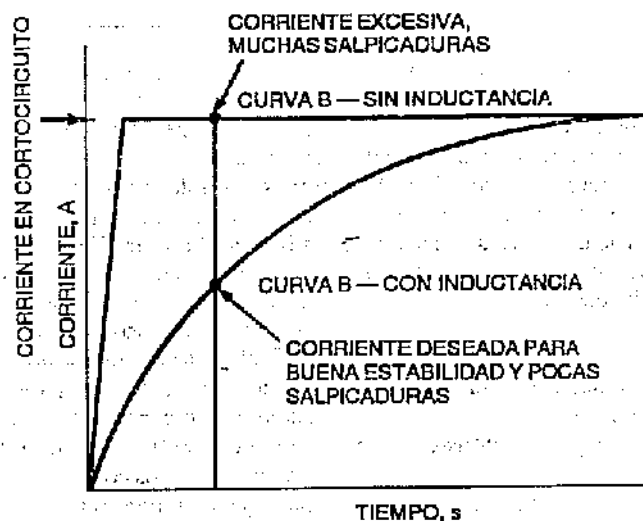


Figura 4.29—Cambio en la rapidez de elevación de la corriente debido a la adición de inductancia

La magnitud máxima del efecto de estrangulación está determinada por el nivel de corriente de cortocircuito final. El efecto de estrangulación instantáneo está bajo el control de la corriente instantánea, y por tanto la forma de la curva corriente-tiempo es significativa. La inductancia del circuito controla la rapidez de elevación de la corriente. Sin inductancia, el efecto de estrangulación se aplica con rapidez y la gota fundida será "cercnada" violentamente del electrodo, con un exceso de salpicadura. Una inductancia mayor produce una reducción en el número de cortocircuitos por segundo y una aumento en el tiempo de "arco encendido". Esto último hace al charco más fluido y produce una franja de soldadura más plana y lisa.

En la transferencia por aspersión, la adición de inductancia a la fuente de potencia producirá un inicio de arco más suave sin afectar las condiciones de soldadura de estado estable. Los ajustes a la fuente de potencia requeridos para obtener condiciones de salpicadura mínima varían con el material y el diámetro del electrodo. Por regla general, se requieren corrientes de cortocircuito e inductancias más altas para electrodos de mayor diámetro.

Hay fuentes de potencia con niveles de inductancia fijos o ajustables por pasos o continuamente.

Reguladores de gas protector

SE REQUIERE UN sistema que proporcione una tasa de flujo de gas protector constante a presión atmosférica durante la soldadura. Un regulador de gas reduce la presión del gas fuente a una presión de trabajo constante sin importar las variaciones en la fuente. Los reguladores pueden ser de una o dos etapas y pueden tener un medidor de flujo integrado. Los reguladores de dos etapas suministran gas a una presión más consistente que los de una etapa cuando la presión de la fuente varía.

La fuente de gas protector puede ser un cilindro de alta presión, un cilindro lleno de líquido o un sistema de líquido de alto volumen. Es posible conseguir mezclas de gases en un solo cilindro. Cuando se emplean dos o más fuentes de gas o líquido, las proporciones correctas se obtienen por medio de dispositivos mezcladores. El usuario debe determinar el tamaño y el tipo de la fuente donde estará almacenado el gas, con base en el volumen de gas que se consuma al mes.

Suministro del electrodo

EL PROCESO GMAW emplea un electrodo de alimentación continua que se consume con relativa rapidez. Por tanto, el suministro de electrodo debe proveer una gran cantidad de alambre que pueda alimentarse con facilidad a la pistola para elevar al máximo la eficiencia del proceso. Por lo regular, esta fuente es un carrete o rollo que contiene entre 4.5 y 27 kg (10 y 60 lb) de alambre, enrollado para que la alimentación esté libre de dobleces y nudos. También hay carretes más grandes de hasta 114 kilogramos (250 lb), y se puede conseguir alambre en tambores de 340 a 450 kilogramos (750 a 1000 lb). Se emplean carretes pequeños [de .45 a .9 kg (1 a 2 lb)] con el equipo de "carrete en la pistola". La especificación de la AWS o militar aplicable define los requisitos de empaque estándar. Si el usuario tiene requerimientos especiales, normalmente puede llegar a un acuerdo con el proveedor.

El suministro de electrodo puede estar ubicado muy cerca del alimentador de alambre, o colocarse a cierta distancia y conducirse por medio de un equipo de entrega especial. Normalmente, el suministro de electrodo deberá estar lo más cerca posible de la pistola para minimizar los problemas de alimentación, pero lo bastante lejos para dar flexibilidad y accesibilidad al soldador.

CONSUMIBLES

ADEMÁS DE LOS componentes del equipo, como las puntas de contacto y los forros del conducto, que se desgastan y deben reemplazarse, los consumibles del proceso GMAW son los electrodos y los gases protectores. La composición química del electrodo, del metal base y del gas protector determinan la composición del metal de soldadura. A su vez, esta composición determina en gran medida las propiedades químicas y mecánicas del ensamble soldado. Los que siguen son factores que influyen en la selección del gas protector y del electrodo:

- (1) Metal base.
- (2) Propiedades que debe tener el metal de soldadura.
- (3) Condición y limpieza del metal base.
- (4) Tipo de servicio o requisito de especificación aplicable.
- (5) Posición de soldadura.
- (6) Modalidad de transferencia de metal que se piensa usar.

ELECTRODOS

LOS ELECTRODOS (METALES de aporte) para la soldadura por arco de metal y gas están cubiertos por diversas especificaciones de la AWS para metal de aporte. Otras asociaciones que redactan normas también publican especificaciones de metal de aporte para aplicaciones específicas. Por ejemplo, la SAE redacta especificaciones para materiales aeroespaciales. En la tabla 4.4 se muestran las especificaciones de electrodos de la AWS, designadas como normas A5.XX, aplicables a GMAW. Definen requisitos de tamaño y tolerancias, empaque, composición química y en algunos casos propiedades mecánicas. La AWS también publica cartas de comparación de metales de aporte (*Filler Metal Comparison Charts*) en las que los fabricantes pueden incluir sus marcas para cada una de las clasificaciones de metal de aporte.

En general, para aplicaciones de unión, la composición del electrodo (metal de aporte) es similar a la del metal base. La composición de metal de aporte puede alterarse un poco para compensar las pérdidas que ocurren en el arco o para desoxidar el charco de soldadura. En algunos casos, esto apenas requiere modificación de la composición del metal base, pero en ciertas aplicaciones se requiere un electrodo con una composición química muy diferente de la del metal base con el fin de obtener características de soldadura y propiedades del metal de soldadura satisfactorias. Por ejemplo, el mejor electrodo para soldar por GMAW bronce de manganeso, una aleación de cobre y zinc, es uno de bronce de aluminio o de una aleación de cobre-manganeso-níquel-aluminio.

Los electrodos más apropiados para soldar las aleaciones de aluminio y acero de más alta resistencia mecánica a menudo tienen una composición diferente de la de los metales base con los que se van a usar. Esto se debe a que las aleaciones de aluminio como la 6061 no son apropiadas como metales de aporte. Por ello, las aleaciones de electrodo se diseñan de modo que produzcan las propiedades de metal de soldadura deseadas con características de operación aceptables.

Aparte de cualesquier otras modificaciones que se hagan a la composición de los electrodos, casi siempre se agregan desoxi-

dantes u otros elementos limpiadores. Esto se hace para minimizar la porosidad de la soldadura o para asegurar que el metal de soldadura tenga propiedades mecánicas satisfactorias. La adición de desoxidantes apropiados en las cantidades correctas es indispensable para producir soldaduras íntegras. Los desoxidantes más utilizados en los electrodos de acero son manganeso, silicio y aluminio. El titanio y el aluminio son los principales desoxidantes que se emplean con los electrodos de aleación de níquel. Los electrodos de aleación de cobre pueden desoxidarse con titanio, silicio o fósforo.

Los electrodos que se usan para GMAW son de diámetro muy pequeño si se les compara con los de la soldadura por arco sumergido o por arco con núcleo de fundente. Son comunes los diámetros de 0.9 a 1.6 mm (0.035 a 0.062 pulg), pero pueden usarse electrodos con diámetro tan pequeño como 0.5 mm (0.020 pulg) y tan grande como 3.2 mm (1/8 pulg). Como los diámetros de electrodo son pequeños y las corrientes relativamente altas, las velocidades de alimentación del alambre en GMAW son altas; desde unos 40 hasta 340 mm/s (100 a 800 pulg/min) para la mayor parte de los metales, excepto el magnesio, con el que pueden requerirse velocidades de hasta 590 mm/s (1400 pulg/min).

Con tales velocidades de alimentación, los electrodos se proveen en forma de hilos continuos largos de alambre debidamente templado que pueden alimentarse de manera suave y uniforme a través del equipo de soldadura. Normalmente, los alambres están enrollados en carretes de tamaño conveniente, o en bobinas.

Los electrodos tienen razones superficie/volumen altas por su tamaño relativamente pequeño. Cualesquier compuestos o lubricantes de estiramiento que hayan penetrado en la superficie del electrodo durante el proceso de fabricación pueden afectar adversamente las propiedades del metal de soldadura. Estos materiales extraños producen porosidad en aleaciones de aluminio y acero, y agrietamiento del metal de soldadura o de la zona térmicamente afectada en aceros de alta resistencia mecánica. Por tanto, los electrodos deben fabricarse con una superficie de alta calidad para evitar la acumulación de contaminantes en las costuras o traslajos.

Además de usarse en aplicaciones de unión, el proceso GMAW se utiliza ampliamente para recubrir en los casos en que

Tabla 4.4
Especificaciones para diversos electrodos para GMAW

Tipo de material base	Especificación de la AWS
Acero al carbono	A5.18
Acero de baja aleación	A5.28
Aleaciones de aluminio	A5.10
Aleaciones de cobre	A5.7
Magnesio	A5.19
Aleaciones de níquel	A5.14
Acero inoxidable de la serie 300	A5.9
Acero inoxidable de la serie 400	A5.9
Titanio	A5.16

un depósito de soldadura superpuesto puede conferir una resistencia al desgaste o a la corrosión deseable, u otras propiedades. Los recubrimientos normalmente se aplican a aceros al carbono o al manganeso y deben someterse a una ingeniería y evaluación cuidadosas para garantizar resultados satisfactorios. En las operaciones de recubrimiento, la dilución del metal de soldadura con el metal base se convierte en una consideración importante; es función de las características del arco y de la técnica. Con

GMAW pueden esperarse tasas de dilución del 10 al 50% dependiendo de la modalidad de transferencia. Por esta razón, lo normal es que se requieran múltiples capas para obtener una química apropiada del depósito en la superficie. La mayor parte de los recubrimientos de metal de soldadura se depositan automáticamente a fin de controlar con precisión la dilución, la anchura y el espesor de la franja, y el traslapeo al colocar cada franja junto a la franja precedente.

GASES PROTECTORES

GENERALIDADES

LA FUNCIÓN PRIMARIA del gas protector es impedir que la atmósfera entre en contacto con el metal de soldadura fundido. Esto es necesario porque la mayor parte de los metales, al calentarse hasta su punto de fusión en aire, presentan una marcada tendencia a formar óxidos y, en menor grado, nitruros. Además, el oxígeno reacciona con el carbono del acero fundido para formar monóxido y dióxido de carbono. Estos diversos productos de reacción pueden causar deficiencias de la soldadura, como escoria atrapada, porosidad y pérdida de ductilidad del metal de soldadura. Los productos de reacción mencionados se forman con facilidad en la atmósfera si no se toman precauciones para excluir el oxígeno y el nitrógeno.

Además de proporcionar un entorno protector, el gas protector y la tasa de flujo tienen un efecto importante sobre lo siguiente:

- (1) Características del arco.
- (2) Modalidad de transferencia del metal.
- (3) Penetración y perfil de la franja de soldadura.
- (4) Velocidad de soldadura.
- (5) Tendencia al socavamiento.
- (6) Acción limpiadora.
- (7) Propiedades mecánicas del metal de soldadura.

En la tabla 4.5 se muestran los principales gases que se usan con GMAW. Casi todas son mezclas de gases inertes que también pueden contener pequeñas cantidades de oxígeno o CO_2 . El empleo de nitrógeno al soldar cobre es una excepción. En la tabla 4.6 se da una lista de los gases que se emplean para GMAW con transferencia en cortocircuito.

LOS GASES PROTECTORES INERTES: ARGÓN Y HELIO

EL ARGÓN Y el helio son gases inertes. Éstos dos y sus mezclas se emplean para soldar metales no ferrosos y aceros inoxidable, al carbono y de baja aleación. Las diferencias físicas entre el argón y el helio son la densidad, la conductividad térmica y las características del arco.

El argón es aproximadamente 1.4 veces más denso que el aire, en tanto que la densidad del helio es de alrededor de 0.14 veces la del aire. El argón, al ser más pesado, es más efectivo

para proteger el arco y cubrir el área de soldadura en la posición plana. El helio requiere tasas de flujo unas dos o tres veces mayores que las usadas con argón para proporcionar una protección equivalente.

El helio tiene mayor conductividad térmica que el argón y produce un plasma de arco en el cual la energía del arco está distribuida de manera más uniforme. El plasma de arco del argón, en cambio, se caracteriza por un núcleo de alta energía y una zona exterior de menor energía. Esta diferencia afecta sobremanera el perfil de la franja de soldadura. Un arco protegido con helio produce una franja profunda, ancha, parabólica. Un arco protegido por argón produce un perfil de franja caracterizado por una penetración tipo "dedo". En la figura 4.30 se ilustran los perfiles de franja típicos para argón, helio, mezclas argón-helio y dióxido de carbono.

El helio tiene un potencial de ionización más alto que el del argón y, en consecuencia, un voltaje de arco más alto si todas las demás variables son iguales. Además, el helio puede presentar problemas de iniciación del arco. Los arcos protegidos exclusivamente con helio no presentan transferencia por aspersión axial verdadera en ningún nivel de corriente. El resultado es que los arcos protegidos con helio producen más salpicaduras y tienen franjas con superficies más ásperas que los protegidos con argón. La protección con argón (incluidas las mezclas con un contenido de argón tan bajo como 80%) producen transferencia por aspersión axial cuando la corriente está por encima del nivel de transición.

MEZCLAS DE ARGÓN Y HELIO

LA PROTECCIÓN CON argón puro se usa en muchas aplicaciones de soldadura de materiales no ferrosos. El empleo de helio puro generalmente está restringido a áreas más especializadas porque un arco en helio tiene estabilidad limitada. Pese a ello, las características de perfil de la franja de soldadura deseables (profundo, ancho y parabólico) que se obtienen con el arco de helio muchas veces son el objetivo al usar mezclas de argón y helio como gas protector. El resultado, que se ilustra en la figura 4.30, es un mejor perfil de franja aunado a la característica de transferencia de metal por aspersión axial deseable del argón.

En la transferencia en cortocircuito se usan mezclas argón-helio con entre 60 y 90% de helio a fin de obtener un mayor aporte de calor al metal base y mejorar las características de fusión. Con algunos metales, como los aceros inoxidables y de baja

Tabla 4.5
Gases protectores para transferencia por aspersión en GMAW

Metal	Gas protector	Espesor	Ventajas
Aluminio	100% argón	0 a 25 mm (0 a 1 pulg)	Transferencia de metal y estabilidad del arco óptimas; mínimo de salpicaduras.
	35% argón -65% helio	25 a 76 mm (1 a 3 pulg)	Más alto aporte de calor que sólo con argón; mejores características de fusión con aleaciones Al-Mg de la serie 5XXX.
	25% argón -75% helio	Más de 76 mm (3 pulg)	Máximo aporte de calor; minimiza la porosidad.
Magnesio	100% argón	—	Excelente acción limpiadora.
Acero al carbono	95% argón + 3.5% oxígeno	—	Mejora la estabilidad del arco; produce un charco de soldadura más fluido y controlable; buena coalescencia y perfil de franja; minimiza el socavamiento; permite velocidades más altas que el argón puro.
	90% argón + 8/10% dióxido de carbono	—	Soldadura mecanizada de alta velocidad; soldadura manual de bajo costo.
Acero de baja aleación	98% argón -2% oxígeno	—	Minimiza el socavamiento; confiere buena tenacidad.
Acero inoxidable	99% argón -1% oxígeno	—	Mejora la estabilidad del arco; produce un charco de soldadura más fluido y controlable; buena coalescencia y perfil de franja; minimiza el socavamiento en aceros inoxidables gruesos.
	98% argón -2% oxígeno	—	Ofrece mejor estabilidad de arco, coalescencia y velocidad de soldadura que la mezcla con 1% de oxígeno para piezas de acero inoxidable delgadas.
Níquel, cobre y sus aleaciones	100% argón	Hasta 3.2 mm (1/8 pulg)	Ofrece buen mojado; reduce la fluidez del metal de soldadura.
	Argón -helio	—	Mayor aporte de calor que con mezclas con 50 y 75% de helio, lo que compensa la elevada disipación de calor de los calibres más gruesos.
Titanio	100% argón	—	Buena estabilidad del arco; contaminación mínima de la soldadura; se requiere respaldo con gas inerte para evitar la contaminación con aire de la parte de atrás del área de soldadura.

Tabla 4.6
Gases protectores para transferencia en cortocircuito en GMAW

Metal	Gas protector	Espesor	Ventajas
Acero al carbono	75% argón + 25% CO ₂	Menos de 3.2 mm (1/8 pulg)	Altas velocidades de soldadura sin perforación; mínimo de distorsión y salpicaduras.
	75% argón + 25% CO ₂	Más de 3.2 mm (1/8 pulg)	Mínimo de salpicaduras; aspecto limpio de la soldadura; buen control del charco en las posiciones vertical y cenital.
	Argón con 5-10% de CO ₂	—	Penetración más profunda; más altas velocidades de soldadura.
Acero inoxidable	90% helio + 7.5% argón + 2.5% CO ₂	—	Ningún efecto sobre la resistencia a la corrosión; zona térmicamente afectada pequeña; sin socavamiento; mínima distorsión.
Acero de baja aleación	60-70% helio + 25-35% argón + 4.5% CO ₂	—	Reactividad mínima; excelente tenacidad; excelentes estabilidad del arco, características de mojado y perfil de franja; pocas salpicaduras.
	75% argón + 25% CO ₂	—	Buena tenacidad; excelentes estabilidad del arco, características de mojado y perfil de franja; pocas salpicaduras.
Aluminio, cobre, magnesio, níquel y sus aleaciones	Argón y argón + helio	Más de 3.2 mm (1/8 pulg)	El argón es satisfactorio para lámina; se prefiere argón-helio para material base.

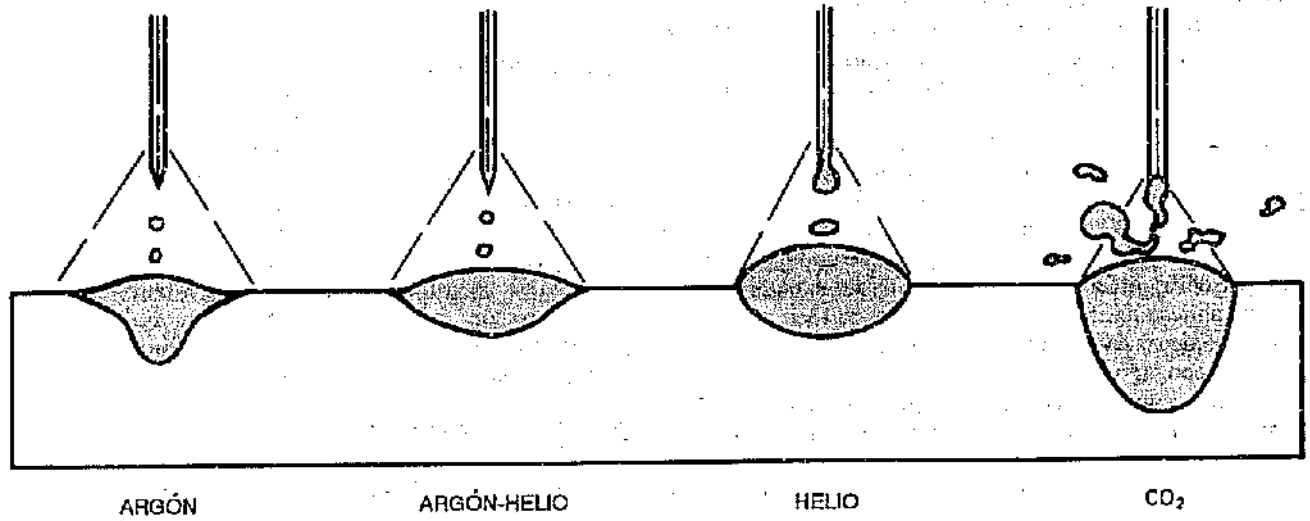


Figura 4.30—Perfil de franja y patrones de penetración para diversos gases protectores

aleación, se escogen adiciones de helio en lugar de las de CO_2 porque este último puede afectar adversamente las propiedades mecánicas del depósito.

Las mezclas de argón y 50 a 75% de helio aumentan el voltaje del arco (para la misma longitud de arco) con respecto a la del argón puro. Estos gases se emplean para soldar aluminio, magnesio y cobre porque el mayor aporte de calor (gracias al voltaje más alto) reduce el efecto de la elevada conductividad térmica de estos metales base.

ADICIONES DE OXÍGENO Y CO_2 AL ARGÓN Y EL HELIO

EL ARGÓN Y, en menor medida, el helio puros producen excelentes resultados cuando se sueldan metales no ferrosos. No

obstante, la protección de aleaciones no ferrosas con argón puro produce un arco irregular y una tendencia al socavamiento. Las adiciones de 1 a 5% de oxígeno o de 3 a 25% de CO_2 producen una notable mejora en la estabilidad del arco y ausencia de socavamiento al eliminar las divagaciones del arco causadas por el chisporroteo en el cátodo.

La cantidad óptima de oxígeno o CO_2 que se añade al gas inerte es función de la condición de la superficie del trabajo (presencia de incrustaciones de forja u óxidos), la geometría de la unión, la posición o técnica de soldadura y la composición del metal base. En general, 2% de oxígeno u 8 a 10% de CO_2 se considera un buen término medio para cubrir un intervalo amplio de estas variables.

Las adiciones de dióxido de carbono al argón también pueden mejorar la apariencia de la franja de soldadura al producir un perfil "en forma de pera" de más fácil definición, como se

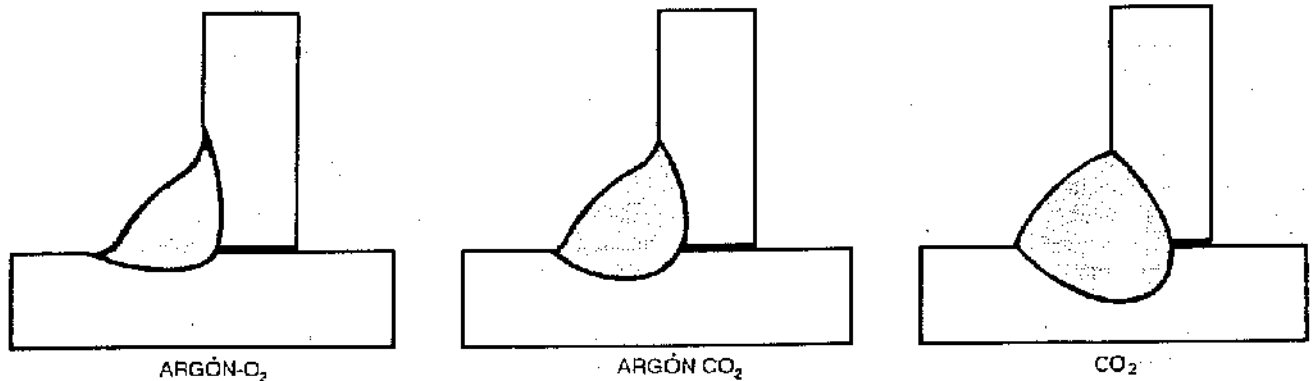


Figura 4.31—Efecto relativo de las adiciones de oxígeno y de dióxido de carbono al escudo de argón

aprecia en la figura 4.31. La adición de entre 1 y 9% de oxígeno al gas mejora la fluidez del charco de soldadura, la penetración y la estabilidad del arco. El oxígeno también reduce la corriente de transición. La tendencia al socavamiento disminuye, pero hay una mayor oxidación del metal de soldadura con una pérdida apreciable de silicio y manganeso.

Las mezclas argón-dióxido de carbono se usan con acero al carbono y de baja aleación, y en menor grado con aceros inoxidable. Las adiciones de dióxido de carbono de hasta el 25% elevan la corriente de transición mínima, aumentan las pérdidas por salpicadura y la profundidad de penetración, y reducen la estabilidad del arco. Las mezclas argón-CO₂ se usan primordialmente en aplicaciones de transferencia en cortocircuito, pero también pueden servir para soldadura con transferencia por aspersión y con arco pulsado.

Se ha usado ampliamente una mezcla de argón con 5% de CO₂ para soldar con arco pulsado y alambres sólidos de acero al carbono. Las mezclas de argón, helio y CO₂ son las favoritas para soldar con arco pulsado y alambres sólidos de acero inoxidable.

MEZCLAS DE MÚLTIPLES GASES PROTECTORES

Argón-oxígeno-dióxido de carbono

Las mezclas de argón con hasta 20% de dióxido de carbono y 3 a 5% de oxígeno son versátiles. Proveen una protección adecuada y características de arco deseables para soldar en las modalidades de aspersión, cortocircuito y a pulsos. Las mezclas con 10 a 20% de dióxido de carbono no son comunes en Estados Unidos pero sí gozan de popularidad en Europa.

Argón-helio-dióxido de carbono

Las mezclas de argón, helio y dióxido de carbono se usan para soldar aceros al carbono, de baja aleación e inoxidables en cortocircuito o con arco pulsado. Las mezclas en las que el argón es el constituyente primario sirven para soldadura con arco

pulsado, y aquellas en las que el helio predomina se emplean para soldar en cortocircuito.

Argón-helio-dióxido de carbono-oxígeno

Esta mezcla, conocida comúnmente como *quad-mix*, es popular para GMAW de alta deposición empleando el tipo de arco de transferencia de metal con elevada densidad de corriente. Esta mezcla ofrece buenas propiedades mecánicas y operabilidad dentro de un intervalo amplio de tasas de deposición. Su aplicación principal es en la soldadura de materiales base de baja aleación y buena resistencia a la tensión, pero también se ha usado con acero dulce en soldadura de alta producción. Los aspectos económicos son una consideración importante para usar este gas en la soldadura de acero dulce.

DIÓXIDO DE CARBONO

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas reactivo ampliamente utilizado en su forma pura para la soldadura por arco de metal y gas de aceros al carbono y de baja aleación. Es el único gas reactivo que puede usarse solo como escudo en el proceso GMAW. La mayor velocidad de soldadura, la penetración más profunda en la unión y el bajo costo son características generales que han promovido el uso del CO₂ como gas protector.

Con un escudo de CO₂, la modalidad de transferencia de metal es en cortocircuito o bien globular. La transferencia por aspersión axial requiere un escudo de argón y no puede lograrse con uno de CO₂. Con la transferencia globular, el arco es muy brusco y produce abundantes salpicaduras, lo que exige fijar las condiciones de soldadura de modo que produzcan un "arco enterrado" muy corto (la punta del electrodo está por debajo de la superficie del trabajo) a fin de minimizar las salpicaduras.

En una comparación general con el arco protegido por una mezcla rica en argón, el arco protegido por CO₂ produce una franja de soldadura con excelente penetración y un perfil superficial más áspero, con una acción de "mojado" muy inferior en los bordes de la franja de soldadura gracias al arco enterrado. Se logran depósitos de soldadura muy íntegros, pero las propiedades mecánicas pueden sufrir menoscabo por la naturaleza oxidante del arco.

APLICACIONES

EL PROCESO GMAW puede usarse con una amplia variedad de metales y configuraciones. El éxito en su aplicación depende de la elección correcta de lo siguiente:

- (1) Electrodo - composición, diámetro y empaque.
- (2) Gas protector y tasa de flujo.
- (3) Variables del proceso, incluidos amperaje, voltaje, velocidad de desplazamiento y modalidad de transferencia.
- (4) Diseño de las uniones.
- (5) Equipo, incluida la fuente de potencia, la pistola y el alimentador de alambre.

SELECCIÓN DEL ELECTRODO

EN LA INGENIERÍA de ensamblajes soldados, el objetivo es seleccionar los metales de aporte que producirán un depósito de soldadura con dos características básicas:

- (1) Un depósito que se asemeja mucho al metal base en sus propiedades mecánicas y físicas o que lo mejora, por ejemplo confiriéndole resistencia a la corrosión o al desgaste.
- (2) Un depósito de soldadura íntegro, libre de discontinuidades.

En el primer caso, el depósito de soldadura, aunque tenga una composición casi idéntica a la del metal base, tiene características metalúrgicas únicas. Esto depende de factores tales como el aporte de energía y la configuración de la franja de soldadura. La segunda característica generalmente se logra empleando un electrodo de metal formulado, por ejemplo uno que contenga desoxidantes para producir un depósito relativamente libre de defectos.

Composición

EL ELECTRODO DEBE satisfacer ciertas demandas del proceso en cuanto a estabilidad del arco, comportamiento de transferencia de metal y características de solidificación. También debe producir un depósito de soldadura compatible con una o más de las siguientes características del metal base:

- (1) Química.
- (2) Resistencia mecánica.
- (3) Ductilidad.
- (4) Tenacidad.

Es preciso considerar también otras propiedades como la resistencia a la corrosión, la respuesta al tratamiento térmico, la resistencia al desgaste y la igualación de colores. Sin embargo, todas estas consideraciones tienen importancia secundaria en comparación con la compatibilidad metalúrgica del metal base y el metal de aporte.

La American Welding Society ha establecido especificaciones para los metales de aporte de uso común. La tabla 4.7 ofrece una guía básica para seleccionar los tipos de metal de aporte apropiados para los metales base que se listan, junto con todas las especificaciones AWS de metal de aporte aplicables.

Alambres tubulares

EN EL PROCESO GMAW se usan alambres tanto sólidos como tubulares. Estos últimos tienen un núcleo de polvo metálico que incluye pequeñas cantidades de compuestos estabilizadores del arco. Estos alambres producen un arco estable y tienen eficiencias de deposición similares a las de los alambres sólidos. El enfoque tubular permite fabricar electrodos metálicos de baja escoria y alta eficiencia con composiciones que no sería fácil fabricar como alambres sólidos.

SELECCIÓN DEL GAS PROTECTOR

COMO SE APUNTÓ en secciones anteriores, el gas protector que se emplea para el proceso de arco de metal y gas puede ser inerte (argón o helio), reactivo (CO_2) o una mezcla de ambos tipos. Se puede agregar un poco de oxígeno y en ocasiones de hidrógeno a fin de lograr otras características de arco y geometrías de franja de soldadura deseadas.

La selección del mejor gas protector se basa en la consideración del material que se va a soldar y del tipo de transferencia de metal que se empleará. Para la transferencia por arco de rocio, la tabla 4.5 presenta los gases protectores de uso más común para diversos materiales. La tabla 4.6 presenta los gases que se emplean con la modalidad de transferencia en cortocircuito. Estas

tablas no listan todas las combinaciones especiales de gases que están disponibles.

ESTABLECIMIENTO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO

LA SELECCIÓN DE los parámetros del proceso (amperaje, voltaje, velocidad de desplazamiento, tasa de flujo del gas, extensión del electrodo, etc.) requiere una estrategia de prueba y error para determinar un conjunto de condiciones aceptable. Esto se dificulta aún más por la interdependencia de muchas de las variables. Se han establecido intervalos típicos de siete variables, mismos que se listan en las tablas 4.8 a 4.13 para diversos metales.

SELECCIÓN DEL DISEÑO DE LA UNIÓN

EN LA FIGURA 4.32 se muestran diseños y dimensiones de uniones de soldadura típicos para el proceso GMAW. Las dimensiones indicadas generalmente producen una penetración completa en la unión y un refuerzo aceptable si se emplean los procedimientos de soldadura correctos.

Es posible usar configuraciones de unión similares con otros metales, aunque los tipos con mayor conductividad térmica (p. ej., aluminio y cobre) deben tener ángulos de surco más amplicios a fin de minimizar los problemas por fusión incompleta.

Las características de penetración profunda de la GMAW con transferencia por aspersión pueden permitir el empleo de ángulos incluidos más pequeños. Esto reduce la cantidad de metal de aporte y las horas de mano de obra requeridas para fabricar los ensambles soldados.

SELECCIÓN DEL EQUIPO

AL SELECCIONAR EQUIPO, el comprador debe considerar los requerimientos de la aplicación, el intervalo de potencia de salida, las características estáticas y dinámicas y las velocidades de alimentación del alambre. Por ejemplo, si una parte importante de la producción implica el uso de alambre de aluminio de diámetro pequeño, el fabricante deberá considerar la adquisición de un alimentador de alambre del tipo de empuje-tracción. Si se contempla soldadura fuera de posición, el usuario deberá investigar las máquinas soldadoras de potencia a pulsos. Si se desea soldar acero inoxidable de calibre pequeño, podría considerarse una fuente de potencia con pendiente e inductancia ajustables.

Si se piensa adquirir equipo nuevo, conviene pensar un poco en la versatilidad del equipo y en la estandarización. La selección de equipo para producción de un solo propósito o de alto volumen por lo general puede basarse únicamente en los requisitos de esa aplicación en particular. En cambio, si se piensa realizar un gran número de trabajos distintos (como en un taller), muchos de los cuales tal vez no se conozcan en el momento de hacer la selección, la versatilidad es muy importante.

Hay que considerar el resto del equipo que ya se está usando en la instalación. La estandarización de ciertos componentes y la complementación del equipo existente minimizará los requerimientos de inventario y aumentará al máximo la eficiencia de la operación global. En secciones anteriores del capítulo se dieron ya los detalles de los componentes del equipo.

Tabla 4.7
Electrodos recomendados para GMAW

Material base		Clasificación de electrodo	Especificación de electrodo de la AWS (use la última edición)
Tipo	Clasificación		
Aluminio y aleaciones de aluminio (normas ASTM volumen 2.02)	1100	ER4043	A5.10
	3003, 3004	ER5356	
	5052, 5454	ER5554, ER5556 o ER51B3	
5083, 5086	ER5556 o ER5356		
5456			
6061, 6063	ER4043 o ER5356		
Aleaciones de magnesio (normas ASTM volumen 2.02)	AZ10A	ERAZ61A, ERAZ92A	A5.19
	AZ31B, AZ61A, AZ80A	ERAZ61A, ERAZ92A	
	ZE10A	ERAZ61A, ERAZ92A	
	ZK21A	ERAZ92A	
	AZ63A, AZ81A		
	AZ91C	EREZ33A	
	AZ92A, AM100A	EREZ33A	
	HK31A, HM21A		
	HM31A	EREZ33A	
LA141A	EREZ33A		
Cobre y aleaciones de cobre (normas ASTM volumen 2.01)	Comercialmente puro	ERCu	A5.7
	Latón	ERCuSi-A, ERCuSn-A	
	Aleaciones Cu-Ni	ERCuNi	
	Bronce de manganeso	ERCuAl-A2	
	Bronce de aluminio	ERCuAl-A2	
	Bronce	ERCuSn-A	
Níquel y aleaciones de níquel (normas ASTM volumen 2.04)	Comercialmente puro	ERNi	A5.14
	Aleaciones Ni-Cu	ERNiCu-7	
	Aleaciones Ni-Cr-Fe	ERNiCrFe-5	
Titanio y aleaciones de titanio (normas ASTM volumen 2.04)	- Comercialmente puro	ERTI-1, -2, -3, -4	A5.16
	Ti-6Al-4V	ERTI-6Al-4V	
	Ti-0.15 Pd	ERTI-0.2Pd	
	Ti-5Al-2.5 Sn	ERTI-5Al-2.5Sn	
	Ti-13V-11Cr-3Al	ERTI-13V-11Cr-3Al	
Aceros inoxidables austeníticos (normas ASTM volumen 1.04)	Tipo 201	ER308	A5.9
	Tipos 301, 302, 304 y 308	ER308	
	Tipo 304L	ER308L	
	Tipo 310	ER310	
	Tipo 316	ER316	
	Tipo 321	ER321	
	Tipo 347	ER347	
Aceros al carbono	Aceros al carbono ordinario rodados en caliente y en frío	E70S-3, o E70S-1	A5.18
		E70S-2, E70S-4	
		E70S-5, E70S-6	

Tabla 4.8
Condiciones típicas para la soldadura por arco de metal y gas de acero al carbono y de baja aleación en la posición plana

Espesor del material		Tipo de soldadura	Diámetro del alambre		Corriente y voltaje ¹		Velocidad de alimentación del alambre		Gas protector ²	Flujo de gas	
pulg	mm		pulg	mm	amps	volts	pulg/min	mm/s		pies ³ /h	L/min
.062	1.6	A tope ³	.035	0.9	95	18	150	64	Ar 75%, CO ₂ -25%	25	12
.125	3.2	A tope ³	.035	0.9	140	20	250	106	Ar 75%, CO ₂ -25%	25	12
.187	4.7	A tope ³	.035	0.9	150	20	265	112	Ar 75%, CO ₂ -25%	25	12
.250	6.4	A tope ³	.035	0.9	150	21	265	112	Ar 75%, CO ₂ -25%	25	12
.250	6.4	A tope ⁴	.045	1.1	200	22	250	106	Ar 75%, CO ₂ -25%	25	12

1. Corriente continua con el electrodo positivo.
2. También puede usarse CO₂ grado soldadura.
3. Abertura de raíz de 0.8 mm (0.03 pulg)
4. Abertura de raíz de 1.6 mm (0.062 pulg)

Tabla 4.9
Condiciones típicas para la soldadura por arco de metal y gas de aluminio en la posición plana

Espesor del material		Tipo de soldadura	Diámetro del alambre		Corriente y voltaje*		Velocidad de alimentación del alambre		Gas protector	Flujo de gas	
pulg	mm		pulg	mm	amps	volts	pulg/min	mm/s		pies ³ /h	L/min
.062	1.6	A tope	.030	0.8	90	18	365	155	Argón	30	14
.125	3.2	A tope	.030	0.8	125	20	440	186	Argón	30	14
.187	4.8	A tope	.045	1.1	160	23	275	116	Argón	35	16
.250	6.4	A tope	.045	1.1	205	24	335	142	Argón	35	16
.375	9.5	A tope	.063	1.6	240	26	215	91	Argón	40	19

- * Corriente continua con el electrodo positivo.

Tabla 4.10
Condiciones típicas para la soldadura por arco de metal y gas de acero inoxidable austenítico empleando un arco de rocío en la posición plana

Espesor del material		Tipo de soldadura	Diámetro del alambre		Corriente y voltaje ¹		Velocidad de alimentación del alambre		Gas protector	Flujo de gas	
pulg	mm		pulg	mm	amps	volts	pulg/min	mm/s		pies ³ /h	L/min
.125	3.2	Unión a tope con respaldo	.062	1.6	225	24	130	55	Ar 98%, O ₂ 2%	30	14
.250(1)	6.4	Unión a tope en V con ángulo inc. de 60°	.062	1.6	275	26	175	74	Ar 98%, O ₂ 2%	35	16
.375(1)	9.5	Unión a tope en V con ángulo inc. de 60°	.062	1.6	300	28	240	102	Ar 98%, O ₂ 2%	35	16

1. Corriente continua con el electrodo positivo.
2. Se requieren dos pasadas.

Tabla 4.11
Condiciones típicas para la soldadura por arco de metal y gas de acero inoxidable austenítico empleando un arco en cortocircuito

Espesor del material		Tipo de soldadura	Diámetro del alambre		Corriente y voltaje*		Velocidad de alimentación del alambre		Gas protector	Flujo de gas	
pulg	mm		pulg	mm	amperes	volts	pulg/min	mm/s		pies ³ /h	L/min
.062	1.6	Unión a tope	.030	0.8	85	21	185	78	He 90%, Ar 7.5% CO ₂ 2.5%	30	14
.093	2.4	Unión a tope	.030	0.8	105	23	230	97	He 90%, Ar 7.5% CO ₂ 2.5%	30	14
.125	3.2	Unión a tope	.030	0.8	125	24	280	118	He 90%, Ar 7.5% CO ₂ 2.5%	30	14

* Corriente continua con el electrodo positivo.

Tabla 4.12
Condiciones típicas para la soldadura por arco de metal y gas de aleaciones de cobre en la posición plana

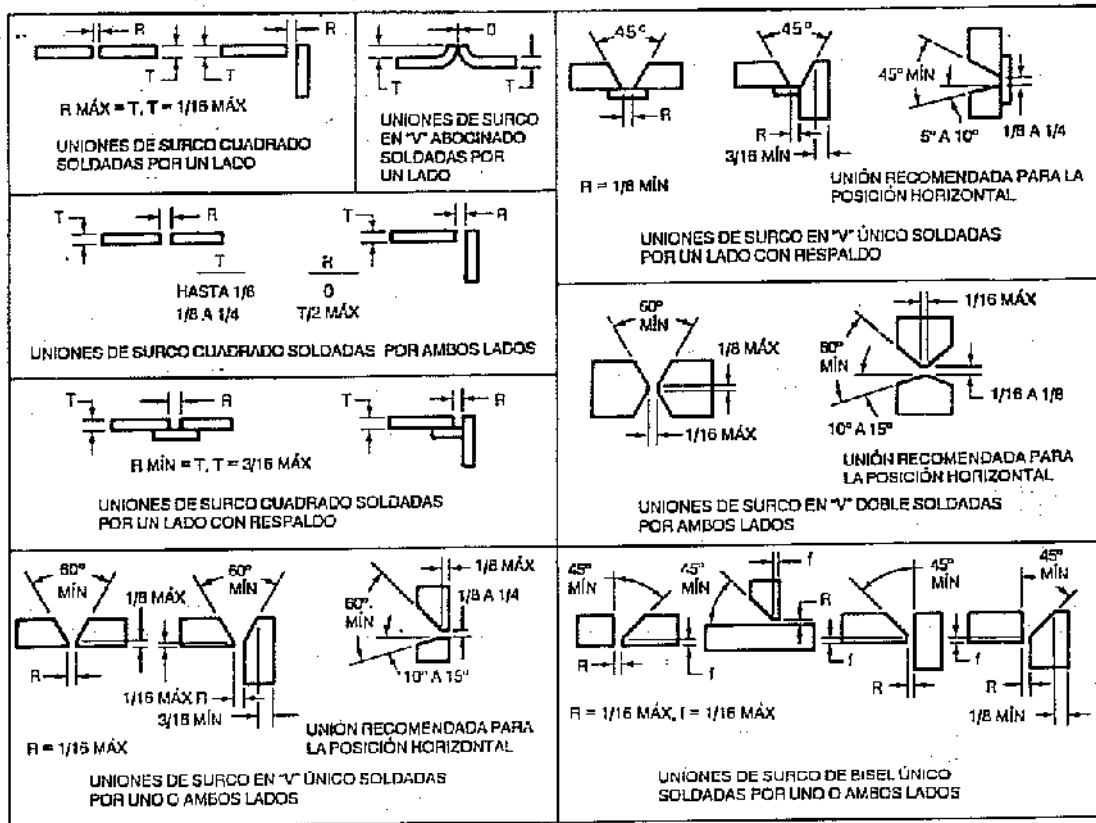
Espesor del material		Tipo de soldadura	Diámetro del alambre		Corriente y voltaje*		Velocidad de alimentación del alambre		Gas protector	Flujo de gas	
pulg	mm		pulg	mm	amperes	volts	pulg/min	mm/s		pies ³ /h	L/min
.125	3.2	A tope	.035		175	23	430	182	Argón	25	12
.187	4.8	A tope	.045		210	25	240	101	Argón	30	14
.187	6.4	A tope, espaciada	.062		365	26	240	101	Argón	35	16

* Corriente continua con el electrodo positivo.

Tabla 4.13
Valores típicos de variables para la soldadura por arco de metal y gas de magnesio

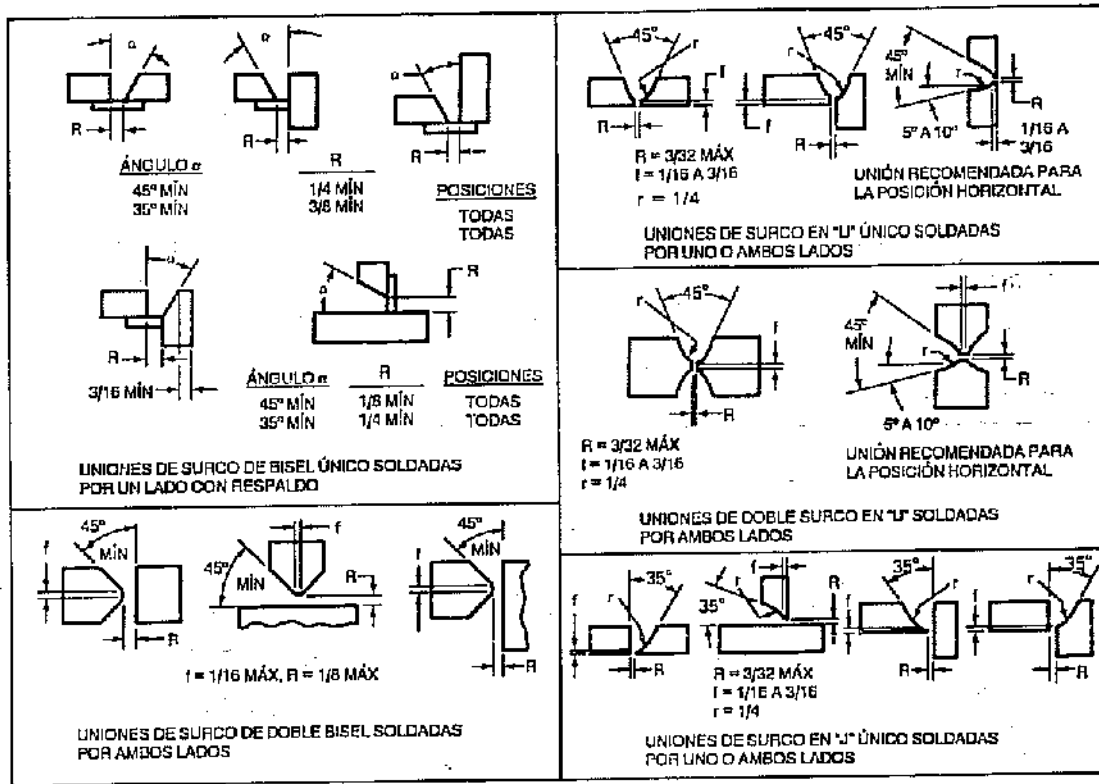
Espesor del material		Tipo de soldadura	Diámetro del alambre		Corriente y voltaje*		Velocidad de alimentación del alambre		Flujo de gas	
pulg	mm		pulg	mm	amperes	volts	pulg/min	mm/s	pies ³ /h	L/min
.062	1.6	Surco cuadrado o filete	.062	1.6	70	16	160	68	50	24
.090	2.3	Surco cuadrado o filete	.062	1.6	105	17	245	104	50	24
.125	3.2	Surco cuadrado o filete	.062	1.6	125	18	290	123	50	24
.250	6.4	Surco cuadrado o filete	.062	1.6	265	25	600	254	60	28
.375	9.5	Surco cuadrado o filete	.094	2.4	335	26	370	157	60	28

* Corriente continua con el electrodo positivo.



(A) TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS EXCEPTO LOS ÁNGULOS

Figura 4.32—Diseños y dimensiones de uniones típicas para el proceso de soldadura por arco de metal y gas



(B) TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS EXCEPTO LOS ÁNGULOS

Figura 4.32-(Continuación)-Diseños y dimensiones de uniones típicas para el proceso de soldadura por arco de metal y gas

APLICACIONES ESPECIALES

SOLDADURA DE PUNTOS

LA SOLDADURA DE puntos por arco de metal y gas es una variación de la GMAW continua en la que dos piezas de lámina se fusionan mediante penetración completa a través de una pieza hasta llegar a la otra. Se ha usado este proceso para unir materiales de calibre pequeño, hasta unos 5 mm (3/16 pulg) de espesor, en la producción de carrocerías, aparatos domésticos y gabinetes eléctricos. No se requiere más preparación de la unión que una limpieza de las áreas de traslape. También es posible soldar por puntos secciones más gruesas empleando esta técnica si se taladra o troquela un agujero en la pieza superior y se dirige un arco a través de él para lograr la unión con la pieza subyacente. Esto se conoce como *soldadura de tapón*.

En la figura 4.33 se compara una soldadura de punto hecha con arco de gas y metal y una hecha por resistencia. Las soldaduras de puntos por resistencia se efectúan mediante el calentamiento por resistencia y la presión de un electrodo que funden los dos componentes en su interfaz y los fusionan. En la soldadura por arco de metal y gas, el arco penetra de lado a lado el miembro superior y fusiona el componente inferior con su charco de soldadura. Una ventaja importante de la soldadura de

punto por arco de metal y gas es que sólo se requiere acceso a un lado de la unión.

La variación de soldadura de puntos requiere cierta modificación del equipo de GMAW convencional. Se emplean boquillas especiales con aberturas que permiten al gas protector escapar cuando el soplete se presiona contra el trabajo. También son necesarios controles del tiempo y de la velocidad de alimentación del alambre, a fin de regular el tiempo de soldadura real y un periodo de decaimiento de la corriente para llenar el cráter de soldadura y dejar un perfil de refuerzo adecuado.

Diseño de las uniones

LA SOLDADURA POR arco de metal y gas puede usarse para soldar uniones traslapadas en acero al carbono, aluminio, magnesio, acero inoxidable y aleaciones que contengan cobre. Es posible soldar metales con espesores iguales o distintos, pero la lámina más delgada siempre debe ser el miembro superior si se sellan espesores desiguales. La soldadura de puntos por arco de metal y gas normalmente está restringida a la posición plana, pero si se modifica el diseño de la boquilla puede adaptarse a uniones de traslape-filete, filete y esquina en la posición horizontal.

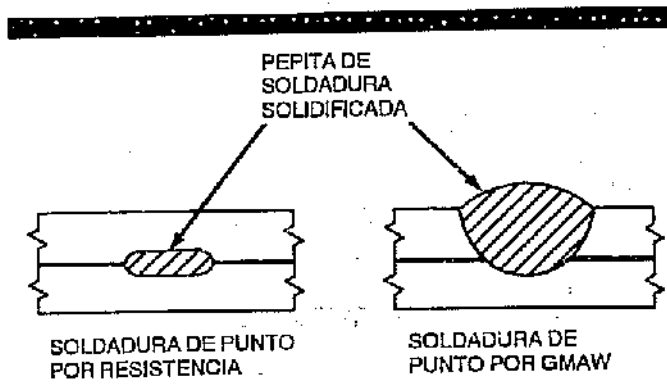


Figura 4.33—Comparación de soldaduras de puntos hechas por arco de gas metal y por resistencia

Operación del equipo

LA PISTOLA SOLDADORA de puntos por GMAW se coloca en posición, prensando las dos piezas de trabajo, y se acciona el gatillo para iniciar el arco. El cronómetro del arco arranca mediante un dispositivo que detecta el flujo de la corriente de soldadura. El arco es mantenido por el electrodo consumible alimentado continuamente hasta que la lámina superior se funde de lado a lado y se fusiona con la lámina inferior sin que se haya desplazado lateralmente la pistola. El ciclo de tiempo se ajusta de modo que se mantenga un arco hasta completar la secuencia de fusión, es decir, hasta haber formado una soldadura de punto. El electrodo se sigue alimentando durante el ciclo del arco y deberá producir un refuerzo en la superficie de la lámina superior.

Efecto de las variables del proceso sobre las características de soldadura

EL DIÁMETRO DE la soldadura en la cara interna y el refuerzo son las dos características de una soldadura de punto por GMAW que determinan si la soldadura satisfará o no los requisitos de servicio propuestos. Tres variables principales del proceso —corriente de soldadura, voltaje y tiempo de arco— afectan una de estas características, o ambas.

Corriente. La corriente tiene el efecto más marcado sobre la penetración. Ésta aumenta si se usan corrientes más elevadas (con un aumento correspondiente en la velocidad de alimentación del alambre). El aumento en la penetración generalmente produce una soldadura de mayor diámetro en la superficie.

Voltaje del arco. El voltaje del arco es lo que más afecta la forma de la soldadura de punto. En general, si la corriente se mantiene constante, un aumento en el voltaje del arco hará crecer el diámetro de la zona de fusión, aunque también causará una pequeña disminución en la altura del refuerzo y en la penetración. Las soldaduras hechas con voltajes de arco demasiado bajos presentan una depresión en el centro del refuerzo. Si el voltaje de arco es excesivo, se crearán condiciones de fuerte salpicadura.

Tiempo de soldadura. Se recomienda elegir condiciones que produzcan una soldadura satisfactoria en un lapso de 20 a 100 ciclos de una corriente de 60 Hz (0.3 a 1.7 s) al unir metal base de hasta 3.2 mm (0.125 pulg) de espesor. Puede requerirse un tiempo de arco de hasta 300 ciclos (5 segundos) en materiales más gruesos para lograr una resistencia mecánica adecuada. La penetración, el diámetro de la soldadura y la altura del refuerzo generalmente aumentan con el tiempo de soldadura.

Como sucede con la GMAW convencional, los parámetros de la soldadura de puntos son muy interdependientes. La modificación de uno por lo regular exige ajustar uno o más de los otros. Se requiere cierto tanteo para encontrar un conjunto o conjuntos de condiciones para una aplicación en particular. En la tabla 4.14 se muestran parámetros de "arranque" para la soldadura de puntos por arco de metal y gas en acero al carbono.

SOLDADURA DE SURCO ANGOSTO

LA SOLDADURA DE surco angosto es una técnica de múltiples pasadas para unir materiales de sección gruesa en los que la unión tiene una configuración a tope casi cuadrada con anchura de surco mínima [aproximadamente 13 mm (1/2 pulg)]. En la figura 4.34 se muestra una configuración de unión de surco angosto típica. Esta técnica se emplea con muchos de los procesos de soldadura convencionales, incluido GMAW, y es un método eficiente para unir aceros al carbono y de baja aleación gruesos con un mínimo de distorsión.

El empleo de GMAW para soldar uniones con la configuración de surco angosto requiere precauciones especiales para asegurar que la punta del electrodo se coloque en el punto exacto en el que se obtiene una fusión correcta de las paredes del surco. Se han inventado muchos métodos de alimentación de alambre para lograr esto, y se han empleado con éxito en entornos de producción. En la figura 4.35 se muestran algunos ejemplos.

Se usan en tándem dos alambres de forma controlada y dos tubos de contacto, como se aprecia en la figura 4.35 (A). Cada arco se dirige hacia una de las paredes, produciendo una serie de soldaduras de filete traslapadas.

El mismo efecto puede lograrse con un alambre empleando una técnica de zigzagueo, oscilando el arco a través del surco durante la soldadura. Esta oscilación puede crearse mecánicamente moviendo el tubo de contacto en sentido transversal sobre el surco [figura 4.35 (B)] pero, debido a la distancia tan corta entre el tubo y la pared, esta técnica no resulta práctica y casi nunca se usa.

Otra técnica mecánica emplea un tubo de contacto doblado con un ángulo de unos 15 grados [figura 4.35 (C)]. Al tiempo que se desplaza hacia adelante durante la soldadura, el tubo de contacto describe un arco hacia un lado y hacia el otro, impartiendo al arco un movimiento zigzagueante.

En la figura 4.35 (D) se ilustra una técnica más avanzada. El mecanismo de alimentación del electrodo da a éste una forma ondulada mediante la acción flexionadora de una "placa batidora" y de los rodillos alimentadores al girar. Continuosamente, el alambre se somete a deformación plástica para adquirir esta forma ondulada, conforme los rodillos alimentadores lo presionan contra la placa de flexión. El electrodo se endrece en buena medida al atravesar el tubo de contacto y la punta, pero recupera su ondulación al salir otra vez. El consumo continuo

del electrodo ondulado oscila el arco de un lado del surco al otro. Esta técnica produce un arco oscilante incluso en un surco muy angosto, manteniendo el tubo de contacto centrado en la unión.

La técnica de electrodo trenzado, figura 4.35 (E), es otro método que se ha inventado para mejorar la penetración en las paredes laterales sin mover el tubo de contacto. El electrodo trenzado consiste en dos alambres entrelazados que, al alimentarse al surco, generan arcos en sus puntas. Gracias al trenzado, los arcos describen una trayectoria rotatoria continua que incrementa la penetración en las paredes sin necesidad de un dispositivo de zigzagueo especial.

Dado que estas técnicas de oscilación del arco a menudo requieren equipo de alimentación especial, se ha desarrollado un método alternativo en el que un electrodo de mayor diámetro [por ejemplo 2.4 a 3.2 mm (.093 a .125 pulg)] se alimenta directamente al centro del surco desde una punta de contacto situada por encima de la superficie de la placa. Con esta técnica, la colocación del alambre sigue siendo crítica, pero hay una probabilidad menor de que se establezca un arco entre la punta de contacto y el trabajo, y es posible usar equipo de soldadura estándar. La desventaja es que sólo puede aplicarse a espesores limitados y normalmente sólo en la posición plana.

Los parámetros para la soldadura de surco angosto (*narrow groove welding, NGW*) son muy similares a los que se usan para la GMAW convencional. En la tabla 4.15 se presenta un resumen de algunos valores típicos. Sin embargo, en la aplicación de surco angosto la calidad de los resultados es sensible a cambios pequeños en estos parámetros, de los cuales el voltaje tiene especial importancia. Un voltaje de arco (longitud de arco) excesivo puede socavar las paredes del surco y causar atrapamiento de óxidos o falta de fusión en pasadas subsecuentes. El voltaje alto puede hacer que el arco suba por la pared del surco y dañe el tubo de contacto. Por esta razón es que se ha popularizado el uso de fuentes de potencia a pulsos en esta aplicación, pues son

capaces de mantener un arco de rocío estable con voltajes de arco bajos.

Se han usado diversos gases protectores con la técnica de separación angosta, al igual que con la GMAW convencional. La mezcla más usada consiste en argón con 20 a 25% de CO₂, pues ofrece una buena combinación de características de arco, perfil de franja y penetración en las paredes. El suministro del gas al área de soldadura no es fácil en la configuración de surco angosto, y se han desarrollado numerosos diseños de boquilla.

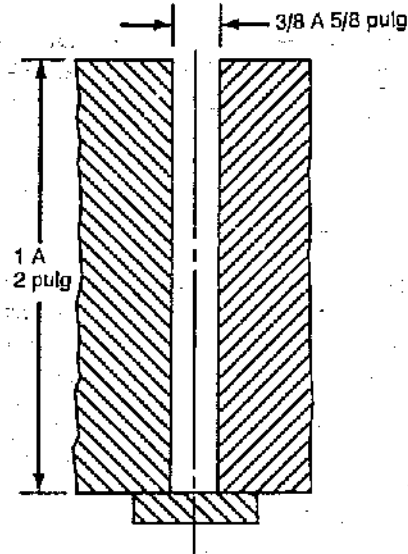


Figura 4.34—Configuración de unión típica para soldadura de separación angosta

Tabla 4.14

Ajustes variables para la soldadura de puntos por GMAW de acero al carbono en la posición plana [gas protector CO₂ con pepita de 6.4 mm (1/4 pulg) de diámetro]

Tamaño del electrodo		Calibre	Espesor		Tiempo de arco s	Corriente y voltaje*	
pulg	mm		pulg	mm		A	B
0.030	0.8	24	0.022	0.56	1	90	24
		22	0.032	0.81	1.2	120	27
		20	0.037	0.94	1.2	120	27
0.035	0.9	18	0.039	0.99	1	190	27
		16	0.059	1.50	2	190	28
		14	0.072	1.83	5	190	28
0.045	1.2	14	0.072	1.83	1.5	300	30
		12	0.110	2.79	3.5	300	30
		11	0.124	3.15	4.2	300	30
0.063	1.6	11	1/8	3.15	1	490	32
			5/32	4.0	1.5	490	32

* Corriente continua con el electrodo positivo.

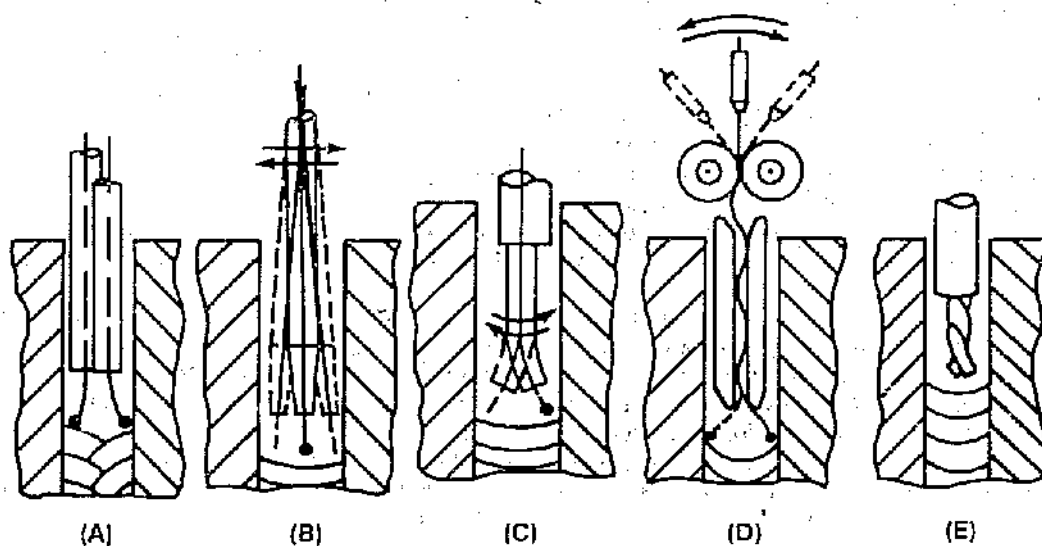


Figura 4.35—Técnicas de alimentación del alambre típicas de la soldadura por arco de metal y gas de separación angosta

Tabla 4.15
Condiciones de soldadura típicas para el proceso GMAW de surco angosto

Técnica, posición de soldadura	Anchura del surco		Corriente Amperes	Voltaje Volts ¹	Velocidad de desplazamiento		Escudo de gas
	pulg	mm			pulg/min	mm/s	
NGW-I horiz.	0.375	9.5	260-270	25-26	40	17	Ar-CO ₂
NGW-I horiz.	0.4-0.5	10-12	220-240	24-28 ²	13	6	Ar-CO ₂
NGW-I plana	0.375	9.5	280-300	29 ²	9	4	Ar-CO ₂
NGW-II plana	0.5	12.5	450	30-37.5	15	6	Ar-CO ₂
NGW-II plana	0.47-0.55	12-14	450-550	38-42	20	8	Ar-CO ₂

1. Corriente continua con el electrodo positivo.

2. Potencia pulsada a 120 pulsos por segundo.

INSPECCIÓN Y CALIDAD DE LA SOLDADURA

INTRODUCCIÓN

LOS PROCEDIMIENTOS DE control de calidad para las uniones de GMAW son muy similares a los que se usan para otros procesos. De acuerdo con las especificaciones aplicables, los procedimientos de inspección deberán servir para determinar si es apropiado el desempeño del soldador o del operador, para calificar un procedimiento de soldadura satisfactorio y para realizar un examen completo del producto final soldado.

La inspección de la soldadura del producto terminado se limita a los métodos de examen no destructivos como la inspección visual, con líquido penetrante, con partículas magnéticas, radiográfica y ultrasónica. Las pruebas destructivas (de tensión, corte, fatiga, impacto, flexión, fractura, pelado, sección transversal o dureza) por lo regular se limitan al desarrollo de ingeniería, la calificación de procedimientos de soldadura y la calificación del rendimiento de los soldadores y operadores.

POSIBLES PROBLEMAS

Pérdida de ductilidad por hidrógeno

ES IMPORTANTE ESTAR conscientes de los problemas de pérdida de ductilidad que pueden presentarse a causa del hidrógeno, si bien no es muy probable que esto suceda con GMAW porque no se usan fundentes o recubrimientos higroscópicos. No obstante, es recomendable tener en cuenta otras fuentes de hidrógeno. Por ejemplo, el gas protector debe tener un contenido de humedad suficientemente bajo. El proveedor del gas debe controlar bien este aspecto, pero quizá convenga verificarlo. El aceite, la grasa y los compuestos de estiramiento presentes en el electrodo o el metal base pueden convertirse en fuentes potenciales de absorción de hidrógeno en el metal de soldadura. Los fabricantes de electrodos están conscientes de lo necesaria que es la limpieza y normalmente se preocupan mucho por suministrar un electrodo limpio. Es posible introducir contaminantes durante la manipulación en las instalaciones del usuario. Los usuarios que están conscientes de esta posibilidad toman medidas para evitar problemas graves, sobre todo al soldar aceros endurecibles. Las mismas precauciones son necesarias al soldar aluminio, excepto que el problema potencial es la porosidad causada por la relativamente baja solubilidad del hidrógeno en el aluminio solidificado, más que la pérdida de ductilidad por hidrógeno.

Contaminación con oxígeno y nitrógeno

EL OXÍGENO Y el nitrógeno pueden representar problemas más graves que el hidrógeno en el proceso GMAW. Si el gas protector no es totalmente inerte o no protege debidamente, estos elementos se pueden absorber con facilidad de la atmósfera. Tanto los óxidos como los nitruros pueden reducir la tenacidad de muesca del metal de soldadura. El metal depositado por GMAW no es tan tenaz como el depositado por soldadura por arco de tungsteno y gas. Sin embargo, cabe señalar que es posible añadir

al gas protector oxígeno en proporciones de hasta el 5% o más sin afectar adversamente la calidad de la soldadura.

Limpieza

LA LIMPIEZA DEL metal base cuando se usa GMAW es más crítica que cuando se usa SMAW o SAW (soldadura por arco sumergido). Los compuestos fundentes presentes en SMAW y SAW capturan impurezas y limpian el depósito de metal fundido eliminando óxidos y compuestos que forman gases. Estas escorias fundentes no están presentes en GMAW, y esto hace crecer la importancia de limpiar minuciosamente el área de soldadura antes de soldar y entre cada pasada, sobre todo cuando se suelda aluminio; en este caso es preciso aplicar procedimientos minuciosos de limpieza química o eliminación mecánica de los óxidos metálicos.

Fusión incompleta

EL MENOR APOORTE de calor característico de la modalidad de GMAW en cortocircuito da como resultado una penetración somera en el metal base. Esto es deseable en materiales de calibre delgado y al soldar fuera de posición, pero si la técnica de soldadura no es la apropiada, el resultado puede ser una fusión incompleta, sobre todo en el área de la raíz o a lo largo de las caras del surco.

DISCONTINUIDADES DE SOLDADURA

EN LOS PÁRRAFOS que siguen se analizan algunas de las discontinuidades de soldadura más comunes que pueden ocurrir con el proceso GMAW.

Socavamiento

LAS SIGUIENTES SON posibles causas de un socavamiento, y las medidas que pueden tomarse para corregirlo (véase la figura 4.36):

<i>Posibles causas</i>	<i>Acciones correctivas</i>
(1) Velocidad de desplazamiento excesiva.	Reducir la velocidad de desplazamiento.
(2) Voltaje de soldadura demasiado alto.	Reducir el voltaje.
(3) Corriente de soldadura excesiva.	Reducir la velocidad de alimentación del alambre.
(4) Insuficiente permanencia.	Prolongar la permanencia en el borde del charco de soldadura.
(5) Ángulo de la pistola.	Cambiar el ángulo para que la fuerza del arco ayude a colocar el metal.

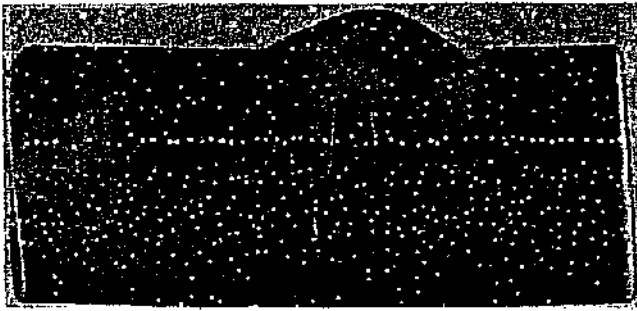


Figura 4.36—Socavamiento en la base de la soldadura

Porosidad

LAS QUE SIGUEN son posibles causas de porosidad, y las medidas que pueden tomarse para corregirla:

<i>Posibles causas</i>	<i>Acciones correctivas</i>
(1) Cobertura de gas protector insuficiente (véase la figura 4.37)	Optimizar el flujo de gas. Aumentar el flujo hasta desplazar todo el aire de la zona de soldadura. Reducir el flujo excesivo para evitar turbulencia y el atrapamiento de aire en la zona de soldadura. Eliminar fugas de las líneas de gas. Eliminar corrientes de aire (de ventiladores, puertas abiertas, etc.) que incidan sobre el arco de soldadura. Restaurar por medio de calentadores los reguladores congelados (taponados) cuando se suelda con CO ₂ . Reducir la velocidad de soldadura. Reducir la distancia boquilla-trabajo. Defender la pistola al final de la soldadura hasta que se solidifique el metal fundido.
(2) Contaminación por gas.	Usar gas protector grado soldadura.
(3) Contaminación del electrodo.	Usar sólo electrodos limpios y secos.
(4) Contaminación de la pieza de trabajo.	Quitar de la superficie de trabajo toda la grasa, aceite, humedad, orin, pintura y suciedad antes de soldar. Usar un electrodo más desoxidante.
(5) Excesivo voltaje de arco.	Reducir el voltaje.
(6) Tubo de contacto demasiado alejado del trabajo.	Reducir la extensión.

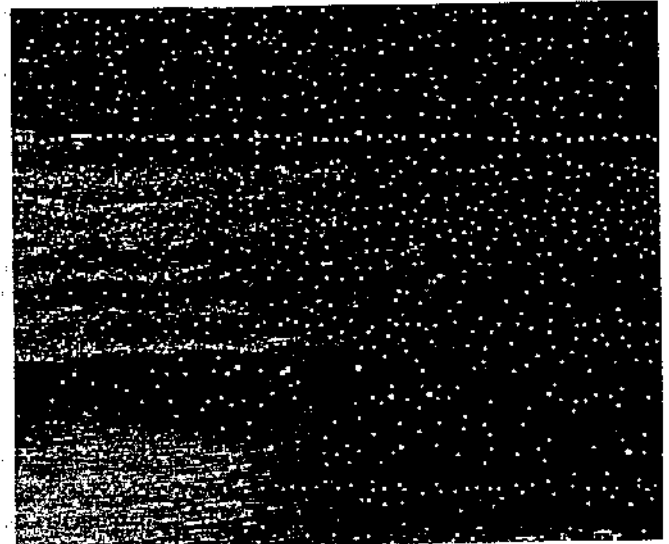


Figura 4.37—Porosidad causada por una cobertura inadecuada con gas protector

Fusión incompleta

LAS SIGUIENTES SON posibles causas de una fusión incompleta, y las acciones que pueden emprenderse para corregirla:

<i>Posibles causas</i>	<i>Acciones correctivas</i>
(1) Las superficies de la zona de soldadura no están libres de películas o de exceso de óxido.	Limpiar todas las caras de los surcos y las superficies de la zona de soldadura, eliminando todas las impurezas de forja antes de soldar.
(2) Insuficiente aporte de calor.	Aumentar la velocidad de alimentación del alambre y el voltaje del arco. Reducir la extensión del electrodo.
(3) Charco de soldadura demasiado grande.	Minimizar el zigzagueo excesivo a fin de producir un charco más controlable. Aumentar la velocidad de recorrido.
(4) Técnica de soldadura inadecuada.	Si se usa una técnica de zigzagueo, permanecer momentáneamente en las paredes del surco. Mejorar el acceso a la raíz de las uniones. Mantener el electrodo dirigido hacia el borde delantero del charco.
(5) Diseño incorrecto de las uniones (véase la figura 4.38).	Usar un ángulo de surco suficiente para permitir el acceso al fondo del surco y a

Posibles causas

Acciones correctivas

las paredes con la extensión de electrodo correcta, o usar un surco en "J" o en "U".

(6) Velocidad de recorrido excesiva.

Reducir la velocidad de recorrido.

Penetración incompleta en la unión

LAS QUE SIGUEN son posibles causas de una penetración incompleta en las uniones, y las acciones que pueden emprenderse para corregirla:

Posibles causas

Acciones correctivas

(1) Preparación incorrecta de la unión.

El diseño de la unión debe proveer acceso apropiado al fondo del surco y al mismo tiempo mantener la extensión de electrodo correcta. Reducir la cara de raíz si es excesivamente grande. Aumentar la separación en la raíz en uniones a tope, y aumentar la profundidad del bisel trasero.

(2) Técnica de soldadura incorrecta.

Mantener el ángulo del electrodo normal a la superficie del trabajo a fin de lograr penetración máxima. Mantener el arco en el borde delantero del charco.

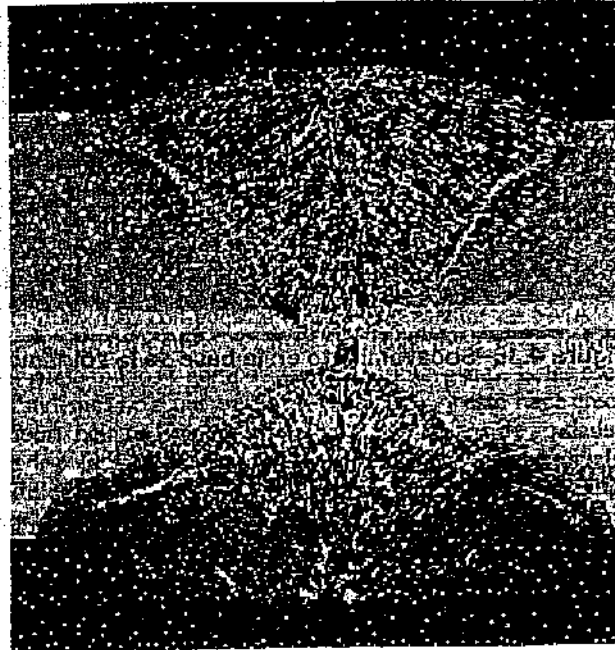


Figura 4.39—Penetración incompleta

(3) Corriente de soldadura insuficiente (véase la figura 4.39).

Aumentar la velocidad de alimentación del alambre (corriente de soldadura).

Excesiva perforación por fusión

LAS SIGUIENTES SON posibles causas de una excesiva perforación por fusión, y las medidas que pueden tomarse para corregirla:

Posibles causas

Acciones correctivas

(1) Excesivo aporte de calor.

Reducir la velocidad de alimentación del alambre (corriente de soldadura) y el voltaje. Aumentar la velocidad de desplazamiento.

(2) Preparación incorrecta de las uniones.

Reducir la abertura de raíz. Aumentar la dimensión de la cara de la raíz.

Grietas en el metal de soldadura

TODAS LAS QUE SIGUEN son posibles causas de que se agriete el metal de soldadura, y sus acciones correctivas:

Posibles causas

Acciones correctivas

(1) Diseño incorrecto de las uniones.

Mantener las dimensiones de surco correctas para que sea posible depositar sufi-

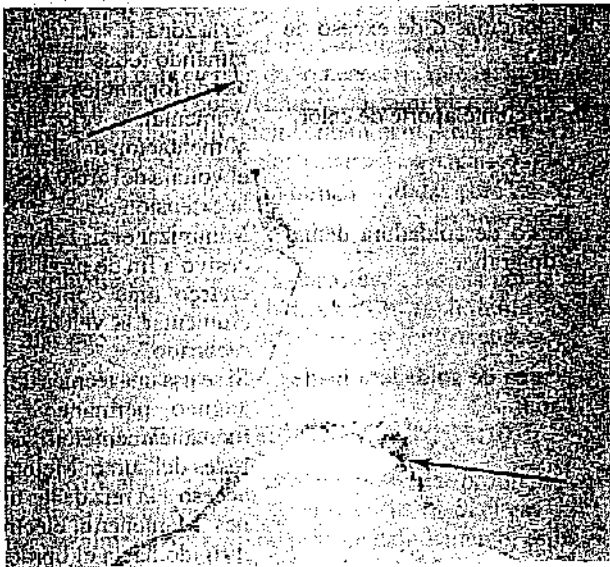


Figura 4.38—Fusión incompleta debida a un surco angosto

<i>Posibles causas</i>	<i>Acciones correctivas</i>
(2) Razón profundidad/anchura de la soldadura demasiado alta (véase la figura 4.40).	Reduce el aporte de metal de aporte y someterse a condiciones de restricción.
(3) Franja de soldadura demasiado pequeña (sobre todo en franjas de filete y de raíz).	Aumentar el voltaje o reducir la corriente, o ambas cosas, a fin de ensanchar la franja de soldadura o reducir la penetración.
(4) Excesivo aporte de calor, que causa demasiado encogimiento y distorsión.	Reducir la velocidad de desplazamiento para aumentar el área seccional del depósito.
(5) Friabilidad en caliente.	Reducir la corriente o el voltaje, o ambas cosas. Aumentar la velocidad de desplazamiento. Usar electrodo con mayor contenido de manganeso (usar arco más corto para minimizar la pérdida de manganeso en el arco). Ajustar el ángulo del surco para que pueda añadirse suficiente metal de aporte. Ajustar la secuencia de pasadas para reducir la restricción sobre la soldadura durante el enfriamiento. Cambiar a otro metal de aporte que confiera las características deseadas.
(6) Fuerte restricción de los miembros de la unión.	Usar precalentamiento para reducir la magnitud de los esfuerzos residuales.

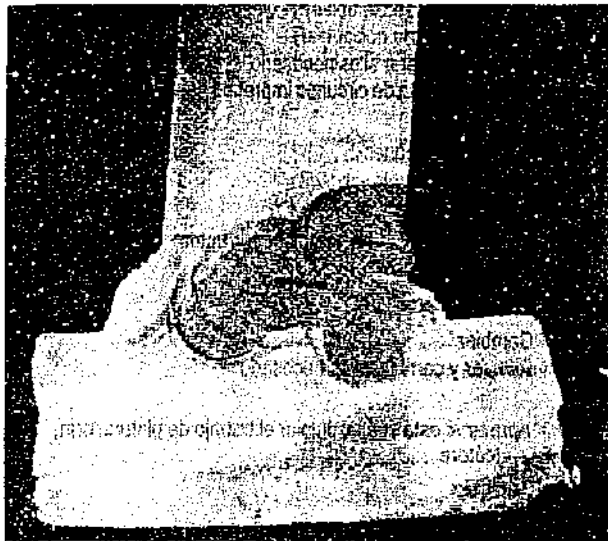


Figura 4.40—Razón profundidad/anchura de la soldadura demasiado alta

<i>Posibles causas</i>	<i>Acciones correctivas</i>
(7) Enfriamiento rápido en el cráter del extremo de la unión (véase la figura 4.41).	Ajustar la secuencia de soldadura a fin de reducir las condiciones de restricción. Eliminar los cráteres con la técnica de paso hacia atrás.

Grietas en la zona térmicamente afectada

EL AGRIETAMIENTO DE la zona térmicamente afectada casi siempre está asociado a los aceros endurecibles.

<i>Posibles causas</i>	<i>Acciones correctivas</i>
(1) Endurecimiento en la zona térmicamente afectada.	Precalentar para hacer más lenta la tasa de enfriamiento.
(2) Excesivos esfuerzos residuales.	Utilizar tratamiento térmico para liberación de tensiones.
(3) Pérdida de ductilidad por hidrógeno.	Usar electrodos limpios y gas protector seco. Eliminar contaminantes del metal base. Mantener la soldadura a temperaturas elevadas durante varias horas antes de enfriar (la temperatura y el tiempo necesarios para eliminar el hidrógeno varían dependiendo del tipo de metal base).



Figura 4.41—Agrietamiento del metal de soldadura en el cráter al final de una soldadura

LOCALIZACIÓN DE PROBLEMAS

LA LOCALIZACIÓN DE problemas en cualquier proceso requiere un conocimiento exhaustivo del equipo y de la función de los diversos componentes, de los materiales que intervienen y del proceso mismo. En el caso de la soldadura por arco de metal y gas ésta es una tarea más complicada que en el de procesos manuales como SMAW y GTAW en virtud de la complejidad del equipo, el número de variables y las interrelaciones de dichas variables.

Por conveniencia, los problemas pueden clasificarse de acuerdo con estas tres categorías: eléctricos, mecánicos y de proceso.

Las tablas 4.16 a 4.18 señalan algunos de los problemas que pueden presentarse e indican cuáles podrían ser sus causas y posibles remedios. Éstos son problemas que ocurren durante la operación de soldadura o que impiden la formación de la soldadura, en contraposición con los que se descubren como resultado de inspeccionar el producto final. Los problemas de este último tipo se cubrieron en la sección "Inspección y control de calidad" del presente capítulo.

Tabla 4.16
Localización de problemas eléctricos que pueden presentarse al soldar por arco de metal y gas

Problema	Posible causa	Remedio
Dificultad para iniciar el arco	Polaridad equivocada Mala conexión con el trabajo	Verificar la polaridad; invertir las terminales si es necesario Fijar bien la conexión del cable del trabajo
Alimentación de alambre irregular y retroquemado	Fluctuaciones en el circuito de potencia Polaridad equivocada	Verificar el voltaje de línea Comprobar la polaridad; invertir las terminales si es necesario
Sobrecalentamiento de los cables	Cables demasiado delgados o demasiado largos	Verificar los requerimientos de transporte de corriente cambiar o acortar si es necesario
No hay control sobre la velocidad de alimentación del alambre	Conexiones de cables flojas	Apretar
Arco inestable	Alambres rotos o flojos en el circuito de control Tarjeta de circuitos impresos defectuosa en el gobernador	Revisar y reparar si es necesario Cambiar tarjeta de circuitos impresos
Falta de alimentación del electrodo	Conexiones de cables flojas Fusible quemado en el circuito de control Fusible quemado en la fuente de potencia Interruptor de gatillo de la pistola defectuoso o terminales rotas	Apretar conexiones Cambiar fusible Cambiar fusible Verificar conexiones, cambiar interruptor
El alambre avanza pero no fluye gas	Motor impulsor quemado Falla del solenoide de una válvula de gas Alambres al solenoide de una válvula de gas rotos o flojos	Revisar y cambiar Cambiar Revisar y cambiar si es necesario
El alambre avanza pero no recibe corriente (no hay arco)	Conexión deficiente con la pieza de trabajo Conexiones de cable flojas Bobina o platinos del contactor primario defectuoso Terminales de control del contactor rotas	Apretar si está suelta; limpiar el trabajo de pintura, óxido, etcétera Apretar Reparar o cambiar Reparar o cambiar
Porosidad en la soldadura	Alambres al solenoide de una válvula de gas rotos o flojos	Reparar o cambiar

Tabla 4.17
Localización de problemas mecánicos que pueden presentarse al soldar por arco de metal y gas

Problema	Posible causa	Remedio
Alimentación irregular del alambre y retroquemado	Insuficiente presión de los rodillos impulsores Tubo de contacto taponado o desgastado Alambre de electrodo con dobleces Cable de la pistola enrollado Forro del conducto sucio o desgastado Conducto demasiado largo	Ajustar Limpiar o reemplazar Recortar, cambiar de carrete Enderezar cables, colgar el alimentador de alambre Limpiar o reemplazar Acortar o usar sistema de impulso de empuje-tracción
El alambre de electrodo se enrolla en el rodillo impulsor ("nido de pájaro")	Excesiva presión de los rodillos de alimentación Forro del conducto o punta de contacto incorrectos Rodillos impulsores o guías de alambre mal alineados Restricción en la pistola o en su cable	Ajustar Usar forro y punta de contacto del tamaño correspondiente al electrodo Revisar y alinear debidamente Quitar la restricción
Depósito de soldadura muy oxidado	Fugas de aire/agua en la pistola y los cables Flujo de gas protector restringido	Comprobar que no haya fugas y reparar o reemplazar si es necesario Revisar y limpiar la boquilla
El alambre de electrodo deja de avanzar durante la soldadura	Presión de rodillos impulsores excesiva o insuficiente Rodillos impulsores del alambre mal alineados o desgastados Forro o tubo de contacto taponado	Ajustar Alinear y/o reemplazar Limpiar o reemplazar
El alambre avanza pero no fluye gas	El cilindro de gas está vacío La válvula del cilindro de gas está cerrada El medidor de flujo no está ajustado Restricción en la línea de gas o en la boquilla	Reemplazar y purgar las líneas antes de soldar Abrir válvula del cilindro Ajustar hasta obtener el flujo especificado en el procedimiento Revisar y limpiar
Porosidad en la franja de soldadura	Falla en el solenoide de una válvula de gas Válvula del cilindro de gas cerrada Insuficiente flujo de gas protector Fugas en las líneas de suministro del gas (incluida la pistola)	Reparar o reemplazar Abrir la válvula Comprobar que no haya restricciones en la línea de gas o en la boquilla; corregir Comprobar que no haya fugas (sobre todo en las conexiones); corregir
El motor alimentador del alambre funciona pero el alambre no avanza	Insuficiente presión de los rodillos impulsores Rodillos alimentadores de alambre incorrectos Presión excesiva sobre el freno del carrete de alambre Restricción en el forro del conducto o en la pistola Forro o tubo de contacto incorrecto	Ajustar Usar rodillos impulsores diseñados para el tamaño y tipo de alambre empleado Reducir la presión del freno Revisar el forro y la punta de contacto Limpiar y/o reemplazar Revisar y reemplazar con componentes del tamaño correcto
La pistola soldadora se sobrecalienta	Línea de refrigerante estrangulada o taponada Nivel de refrigerante bajo en el depósito de la bomba La bomba de agua no funciona correctamente	Revisar y corregir Revisar y agregar refrigerante si es necesario Revisar y reparar o reemplazar

Tabla 4.18
Localización de problemas de proceso que pueden presentarse al soldar por arco de metal y gas

Problema	Posible causa	Remedio
Arco inestable	Área de soldadura sucia	Limpiar para eliminar incrustaciones, orín, etcétera
Depósito de soldadura muy oxidado	Ángulo de la pistola incorrecto	Usar ángulo de ataque o arrastre de unos 15°
	Distancia boquilla-trabajo excesiva	Reducir. Debe estar entre 13 y 19 mm (1/2 y 3/4 pulg)
Porosidad en la franja de soldadura	Corrientes de aire	Proteger de las corrientes el área de soldadura
	Tubo de contacto no centrado en la boquilla de gas	Centrar el tubo de contacto
El alambre del electrodo se embota en la plaza de trabajo	Material base sucio	Limpiar para eliminar incrustaciones, orín, etcétera
	Velocidad de alimentación del alambre excesiva	Reducir
	Humedad en el gas protector	Cambiar cilindro de gas
	Electrodo contaminado	Mantener protegido el alambre durante el uso. Limpiar el alambre antes de que entre en el alimentador
Exceso de salpicaduras	Velocidad de alimentación del alambre excesiva	Reducir la velocidad
	Voltaje de arco demasiado bajo	Aumentar el voltaje
	Se fijó una pendiente excesiva en la fuente de potencia (para transferencia en cortocircuito)	Restablecer para reducir la pendiente
La pistola soldadora se sobrecalienta	Voltaje de arco excesivo	Reducir el voltaje
	Se fijó una pendiente insuficiente en la fuente de potencia (para transferencia en cortocircuito)	Ajustar hacia arriba la pendiente
	Tubo de contacto demasiado retraído en la boquilla	Ajustar o cambiar por uno más largo
	Tasa de flujo de gas excesiva	Reducir el flujo
La pistola soldadora se sobrecalienta	Amperaje demasiado alto para la pistola	Reducir el amperaje o cambiar a pistola de mayor capacidad

PRÁCTICAS SEGURAS

INTRODUCCIÓN

LA SEGURIDAD EN la soldadura, el corte y procesos afines se trata en ANSI Z49.1, *Seguridad al soldar y cortar*,¹ y en ANSI Z49.2, *Prevención de incendios durante el empleo de procesos de soldadura y corte*.²

El personal debe estar familiarizado con las prácticas seguras que se describen en estos documentos.

En la soldadura y el corte por arco hay ciertas áreas de peligro potencial (incluidos humos, gases, energía radiante, ruido, manejo de cilindros y reguladores y choque eléctrico) que ameritan consideración. En este capítulo se describirán brevemente aquellas áreas que pueden estar asociadas al proceso GMAW.

MANEJO SEGURO DE CILINDROS DE GAS Y REGULADORES

LOS CILINDROS DE gas comprimido deben manejarse con cuidado y fijarse firmemente cuando estén almacenados o en uso. Los golpes, las caídas y el mal trato pueden dañar los cilindros, las válvulas y los tapones de fusibles, y causar fugas o un accidente. Si se cuenta con tapas para proteger las válvulas, hay que mantenerlas en su lugar (apretadas a mano) a menos que se conecte un regulador al cilindro. (Véase el folleto P-1 de la CGA, *Manejo seguro de cilindros de gas comprimido*).³

Se recomienda tomar las siguientes precauciones al instalar y usar los cilindros de gas protector:

- (1) Asegurar debidamente el cilindro.
- (2) Antes de conectar un regulador a la válvula del cilindro, se debe abrir y cerrar momentáneamente la válvula para dejar

1. ANSI Z49.1 puede obtenerse de la American Welding Society, 550 N. W. LeJeune Road, Miami, 33135.

2. ANSI Z49.2 puede obtenerse del American National Standards Institute, 1430 Broadway, Nueva York, NY 10018.

3. CGA P-1 puede obtenerse de la Compressed Gas Association, Inc., 500 Fifth Avenue, Nueva York, 10036.

escapar una cantidad muy pequeña de gas, a fin de despejar cualquier polvo o suciedad que pueda haber en la válvula y que de otra manera podría introducirse en el regulador. El operador de la válvula deberá pararse a un lado de los manómetros del regulador, nunca frente a ellos.

(3) Una vez conectado el regulador, el tornillo de ajuste de la presión deberá soltarse dándole vuelta en sentido antihorario (contrario al del giro de las manecillas del reloj). A continuación se deberá abrir la válvula del cilindro con lentitud para evitar la entrada repentina de gas a alta presión en el regulador. Luego se dará vuelta al tornillo de ajuste en sentido horario hasta obtener la presión correcta.

(4) Cuando no se esté usando, la fuente del suministro de gas (en este caso, la válvula del cilindro) deberá cerrarse, y el tornillo de ajuste se deberá soltar.

GASES

LOS PRINCIPALES GASES tóxicos asociados al proceso GMAW son el ozono, el dióxido de nitrógeno y el monóxido de carbono. También puede estar presente gas fosgeno como resultado de la descomposición térmica o por luz ultravioleta de agentes limpiadores con base en hidrocarburos clorados que se encuentren en las inmediaciones de las operaciones de soldadura. Dos de estos solventes son el tricloroetileno y el percloroetileno. Las operaciones de desengrasado y limpieza en que intervengan hidrocarburos clorados deberán efectuarse en sitios donde los vapores de estas operaciones no queden expuestos a la radiación del arco de soldadura.

Ozono

LA LUZ ULTRAVIOLETA que emite el arco de GMAW actúa sobre el oxígeno de la atmósfera circundante para producir ozono. La cantidad de ozono que se produzca dependerá de la intensidad y longitud de onda de la energía ultravioleta, de la humedad, de la acción filtradora de las emisiones de la soldadura y de otros factores. En general, la concentración de ozono aumenta al incrementarse la corriente de soldadura, al usar argón como gas protector y al soldar metales muy reflejantes. Si no es posible reducir el ozono a un nivel seguro mediante ventilación o variaciones del proceso, será necesario suministrar aire fresco al soldador ya sea con un respirador conectado a un tanque de aire o por otros medios.

Dióxido de nitrógeno

LOS RESULTADOS DE algunas pruebas indican que sólo hay concentraciones elevadas de dióxido de nitrógeno a una distancia de 150 mm (6 pulg) del arco o menos. La ventilación normal rápidamente reduce estas concentraciones a niveles seguros en la zona de respiración del soldador, siempre que éste mantenga la cabeza fuera de la nubecilla de emisiones (y por tanto fuera de la nubecilla de gases generados por la soldadura). El dióxido de nitrógeno no se considera un peligro durante GMAW.

Monóxido de carbono

EL CALOR DEL arco disocia el escudo de dióxido de carbono que se emplea con el proceso GMAW, con la formación de monóxido de carbono. El proceso de soldadura sólo crea cantidades pequeñas de dióxido de carbono, pero se pueden generar temporalmente concentraciones relativamente elevadas en la nubecilla de emisiones. El monóxido de carbono caliente se oxida a dióxido de carbono, así que las concentraciones del primero se reducen a niveles insignificantes a distancias de más de 75 o 100 mm (3 o 4 pulg) de la nubecilla de emisiones.

En condiciones de soldadura normales, esta fuente de monóxido de carbono no deberá representar un peligro. Si el soldador se ve obligado a colocarse encima del arco, o si la ventilación natural lleva la nubecilla de emisiones hacia su zona de respiración, o si se suelda en un espacio encerrado, se deberá suministrar ventilación suficiente para desviar la nubecilla o eliminar los humos y gases (véase ANSI Z49.1, *Seguridad al soldar y cortar*).

VAPORES METÁLICOS

LAS EMISIONES GENERADAS por el proceso GMAW pueden controlarse mediante ventilación general, ventilación de escape local o equipo protector respiratorio, como se describe en ANSI Z49.1. El método de ventilación requerido para mantener el nivel de sustancias tóxicas en la zona de respiración del soldador por debajo de las concentraciones de umbral depende directamente de varios factores, entre los que están el material que se suelda, el tamaño del área de trabajo y el grado de encerramiento u obstrucción del movimiento natural del aire en el lugar donde se está soldando. Es preciso evaluar cada operación en forma individual para determinar lo que se requiere.

La American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) y la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) de Estados Unidos ha establecido los niveles aceptables de exposición a sustancias asociadas a la soldadura, designándolos como valores límite de umbral (TLV) promedio ponderados en el tiempo y como valores máximos permitidos. El cumplimiento con estos niveles de exposición aceptables puede verificarse muestreando la atmósfera dentro de la careta del soldador o en las inmediaciones de su zona de respiración. El muestreo debe realizarse de acuerdo con ANSI/AWS F1.1, *Método para muestrear particulados aéreos generados por soldadura y procesos relacionados*.

ENERGÍA RADIANTE

LA ENERGÍA RADIANTE total producida por el proceso GMAW puede ser más alta que la generada por SMAW, en virtud de la mayor energía de su arco, la menor producción de humos y el hecho de que el arco está más expuesto. En general, la energía radiante ultravioleta de máxima intensidad se produce cuando se emplea argón como gas protector y cuando se suelda aluminio.

Las sombras de filtro de vidrio recomendados en ANSI Z49.1 para GMAW se presentan como una guía en la tabla 4.19. La mejor sombra para una aplicación puede determinarse seleccionando primero una sombra muy oscura. Si es difícil ver bien la

Tabla 4.19
Tonos de filtro de vidrio sugeridos para GMAW

Corriente de soldadura, A	Número de tono mínimo	Núm. de tono cómodo
Menos de 60	7	9
60-160	10	11
160-250	10	12
250-500	10	14

operación, se debe seleccionar sombras sucesivamente más claras hasta que sea posible ver la operación con la claridad suficiente para tener un buen control. Sin embargo, nunca debe escogerse un número de sombra más clara que la recomendada, en su caso.

Para GMAW se recomienda ropa de cuero o de lana oscura (para reducir los reflejos que podrían causar quemaduras de

ultravioleta en la cara y el cuello debajo de la careta). La radiación ultravioleta de alta intensidad puede desintegrar con rapidez la ropa de algodón.

RUIDO; PROTECCIÓN DEL OÍDO

EL PERSONAL DEBE protegerse contra la exposición al ruido generado por los procesos de soldadura y corte de acuerdo con el párrafo 1910.95 "Exposición ocupacional al ruido" de la Occupational Safety and Health Administration del Departamento del Trabajo de Estados Unidos.

CHOQUE ELÉCTRICO

LOS VOLTAJES DE línea que se alimentan a las fuentes de potencia y equipo auxiliar empleados en GMAW van de 110 a 575 volts. Los soldadores y el personal de servicio deben tomar medidas para no entrar en contacto con estos voltajes. Véanse las precauciones descritas en ANSI Z49.1, *Seguridad al soldar y cortar*.

LISTA DE LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- Aldenhoff, B. J., Stearns, J. B. y Ramsey, P. W. "Constant potential power sources for multiple operation gas metal arc welding", en *Welding Journal* 53(7): 425-429; julio de 1974.
- Althouse, A. D., Turnquist, C. H., Bowditch, W. A. y Bowditch, K. E. *Modern welding*, en South Holland, The Goodheart Willcox Company, Inc., 1984.
- American Welding Society. *Recommended safe practices for gas shielded arc welding, AWS A6.1*. American Welding Society Miami, Florida: 1966.
- Baujet, V. y Charles, C. "Submarine hull construction using narrow-groove GMAW", en *Welding Journal* 69(8): 31-36; agosto de 1990.
- Butler, C. A., Meister, K. P. y Randall, M. D. "Narrow gap welding—a process for all positions", en *Welding Journal* 48(2): 102-108; febrero de 1969.
- Cary, Howard B. *Modern welding technology*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, Inc., 1979.
- DeSaw, F. A. y Rodgers, J. E. "Automated welding in restricted areas using a flexible probe gas metal arc welding torch", en *Welding Journal* 60(5): 17-22; mayo de 1981.
- Dillenbeck, V. R. y Castagno, L. "The effects of various shielding gases and associated mixtures in GMA welding of mild steel", en *Welding Journal* 66(9): 45-49; septiembre de 1987.
- Hilton, D. E. y Norrish, J. "Shielding gases for arc welding", en *Welding and Metal Fabrication* 189-196; mayo-junio de 1988.
- Kaiser Aluminum and Sales. *Welding kaiser aluminum*, 2ª ed. Oakland, California, Kaiser Aluminum and Sales, Inc., 1978.
- Kimura, S. et al. "Narrow-gap gas metal arc welding process in flat position", en *Welding Journal* 58(7): 44-52; julio de 1979.
- Kiyolara, M., et al. "On the stabilization of GMA welding of aluminum", en *Welding Journal* 56(3): 20-28; marzo de 1977.
- Lesnewich, A. "MIG welding with pulsed power". Bulletin 170. Nueva York; Welding Research Council, 1972.
- . "Control of melting rate and metal transfer in gas shielded metal-arc welding", en *Welding Journal* 37(8): 343-353; agosto de 1958.
- Lincoln Electric Company. *The procedure handbook of welding*, 12ª ed., Cleveland, Lincoln Electric Company, 1973.
- Liu, S. y Stewart, T. A. "Metal transfer in gas metal arc welding: Droplet rate", en *Welding Journal* 68(2): 52s; febrero de 1989.
- Lu, M. J. y Kou, S. "Power inputs in gas metal arc welding of aluminum. Part 1 and Part 2", en *Welding Journal* 68(9 y 11): 382s y 452s; septiembre y noviembre de 1989.
- Lytle, K. A. "GMAW - A versatile process on the move", en *Welding Journal* 62(3): 15-23; marzo de 1983.
- . "Reliable GMAW means understanding wire quality, equipment and process variables", en *Welding Journal* 61(3): 43-48; marzo de 1982.
- Malin, V. Y. "The state-of-the-art of narrow gap welding" Part I, en *Welding Journal* 62(4): 22-30; abril de 1983.
- . "The state-of-the-art of narrow gap welding". Part II, en *Welding Journal* 62(6): 37-46; junio de 1983.

- Manz, A. F. "Inductance vs. slope for control for gas metal arc power", en *Welding Journal* 48(9): 707-712; septiembre de 1969.
- . *The welding power handbook*. American Welding Society, Miami, 1973.
- Morris, R. W. "Application of multiple electrode gas metal arc welding to structural steel fabrication", en *Welding Journal* 47(5): 379-385; mayo de 1968.
- Pan, J. L. *et al.* "Adaptive control GMA welding - a new technique for quality control", en *Welding Journal* 68(3): 73; marzo de 1989.
- Pierre, Edward R. *Welding processes and power sources*, 3^a ed., Minneapolis, Burgess Publishing Company, 1985.
- Shackleton, D.N. y Lucas, W. "Shielding gas mixtures for high quality mechanized GMA welding of Q & T steels", en *Welding Journal* 53(12): 537s-547s; diciembre de 1974.
- Tekriwal, P. y Mazumder, J. "Finite element analysis of three-dimensional transient heat transfer in GMA welding", en *Welding Journal* 67-(7): 150s; julio de 1988.
- Tsao, K. C. y Wir, C. S. "Fluid flow and heat transfer in GMA weld pools", en *Welding Journal* 67(3): 70s; marzo de 1988.
- Union Carbide Corporation. *MIG welding handbook*. Danbury, Connecticut, Union Carbide Corporation, Linde Div., 1984.
- Waszink, J. H. y Van Den Heuvel, G. J. P. M. "Heat generation and heat flow in the filler metal in GMA welding", en *Welding Journal* 61(8): 269s-282s; agosto de 1982.

SOLDADURA POR ARCO CON NÚCLEO DE FUNDENTE

PREPARADO POR UN
COMITÉ INTEGRADO POR:

G. C. Barnes, *Presidente*
Alloy Rods

K. E. Banks
Teledyne McKay

J. E. Hinkle
Consultor

G. H. MacShane
Consultor

M. T. Merlo
Tri-Mark Incorporated

L. Soisson
Welding Consultants,
Incorporated

MIEMBRO DEL COMITÉ DEL
MANUAL DE SOLDADURA:

R. M. Walkosak
Westinghouse Electric
Corporation

Fundamentos del proceso	158
Equipo	162
Materiales	168
Control del proceso	175
Diseños de uniones y procedimientos de soldadura	181
Calidad de la soldadura	187
Seguridad	190
Lista de lecturas complementarias	190