la soldadura eléctrica por resistencia en la construcción de estructuras metálicas

RAFAEL DE HEREDIA, ingeniero industrial

sinopsis

El procedimiento de soldeo por resistencia por puntos se ha venido aplicando desde hace mucho tiempo en la ejecución de elementos ligeros de construcción metálica. Actualmente se ha comenzado con éxito su utilización para unir sumas de espesores de 40 ó 50 mm. De esta manera se ha dado entrada a este medio de unión en la construcción de estructuras metálicas. A lo largo del artículo se hace un estudio de los principios de la soldadura por puntos, así como también de las máquinas que se emplean en esta modalidad aplicada al soldeo de espesores grandes. Se pasa revista también a la disposición que deben adoptar las costuras y a las condiciones que han de cumplir los materiales en cuanto a su soldabilidad. Por último, se presentan algunas realizaciones obtenidas con esta técnica.

1. El procedimiento de soldeo eléctrico por resistencia por puntos se ha venido aplicando desde hace mucho tiempo en la construcción de elementos ligeros de construcción metálica, en donde los espesores a unir eran relativamente pequeños. Pero su aplicación a elementos principales de estructuras, soldando una suma de espesores de 40 ó 50 mm es relativamente nueva, y el éxito obtenido permite asegurar una gran difusión de este método de unión, a causa, fundamentalmente, de las grandes velocidades de soldeo que con él se pueden alcanzar. Sustituye con gran ventaja a la unión por roblones, con notable economía en peso con relación a los elementos formados por ese medio de unión, y compite, asimismo, con las piezas fabricadas por soldadura al arco debido a la mayor rapidez de ejecución y necesitar de una mano de obra menos cualificada.

Como es natural, la soldadura eléctrica por resistencia sólo puede aplicarse para la construcción en taller y no para las uniones en obra.

Las primeras aplicaciones industriales de este procedimiento datan del año 1934. Desde entonces, el camino recorrido ha sido lento a causa de la infinidad de problemas que plantea el soldeo de fuertes espesores. Por una parte, exige grandes potencias eléctricas (300 a 1.000 kVA), que al darlas mediante máquinas monofásicas desequilibran la red y producen un factor de potencia muy bajo, aumentando con ello la demanda total de energía; además, se requiere una gran presión de trabajo para mantener estrechamente unidas las piezas a soldar, y, por último, los controles de tiempo, intensidad de soldeo, etc., han de ser muy precisos para así evitar, o bien que se destruya la estructura metalúrgica del metal, o bien que no llegue a producirse una verdadera soldadura y sí sólo una «pegadura». Por consiguiente, para el desarrollo de esta técnica fue preciso contar primero con equipos electrónicos de control para lograr así uniones de calidad, y, además, disponer de máquinas trifásicas, con lo que la red se equilibra y el factor de potencia se aumenta.

Hoy en día existen ya indicaciones precisas sobre cómo realizar correctamente soldaduras por puntos en espesores fuertes. Concretamente, existen las normas suizas VSM 14102 y 14103, que se refieren a uniones en chapas de hasta 12 mm, y en Alemania se ha estudiado la cuestión para preparar la norma DIN correspondiente y se han editado unas recomendaciones provisionales.

En cuanto a su empleo en España, está expresamente permitido, y así la Instrucción de Estructuras Metálicas que este Instituto tiene en prensa, dice textualmente a este respecto:

«Art. 6.71. Pueden utilizarse los puntos de soldadura obtenidos por resistencia eléctrica para las costuras de simple acoplamiento y para las de fuerza que transmitan simplemente esfuerzo cortante. Este método es el único recomendable para la unión de perfiles ligeros de chapa plegada, con el fin de constituir elementos secundarios, de poco peso, para forjados, viguetas, cabios, correas, etcétera.

Los pasos y líneas de gramil de puntos de soldadura se ajustarán a las mismas normas dadas para los roblones y tornillos.»

2. Los principios en los que se basa la soldadura por puntos son bien conocidos. No obstante, se van a recordar a continuación.

El punto de soldadura se forma por fusión de las superficies de las chapas en contacto entre sí, producido por el efecto Joule al paso de una corriente eléctrica. La cantidad de calor que se aporta es:

$$Q = 0,238 I^2 R t$$

y, por consiguiente, es función de los parámetros intensidad, resistencia y tiempo. Como parámetro, la resistencia queda reemplazada por la presión que ejercen los electrodos, ya que ésta hace variar la magnitud de las resistencias de contacto. En la figura 1 se expone, esquemáticamente, el circuito eléctrico equivalente en la formación de un punto de soldadura. En él se ve que las resistencias R_1 y R_7 son las propias de los electrodos, y que las R_3 y R_5 son las propias del material a soldar y, por lo tanto, son valores constantes. Sin embargo, las R_2 y R_6 , así como la R_4 , son las resistencias de contacto entre electrodo-chapa y entre chapas, respectivamente, y su valor depende, además, del estado de las superficies, de la presión que se ejerce sobre las mismas para facilitar su contacto. La mayor resistencia de éstas es la R_4 , y es allí donde se genera la mayor cantidad de calor y, por consiguiente, donde se produce la fusión del metal, dando lugar al punto de soldadura (figs. 2 y 3).

1

2

acero Thomas efervescente – espesores: 6+10+6 mm (preparación con muela de esmeril)
rotura de la chapa de 10 mm a 30.000 kg
diámetro del punto: 17 mm

En el caso que nos ocupa de soldeo de fuertes espesores, es natural que, además de ser necesarias grandes intensidades de soldeo, sea precisa también una presión elevada que reduzca el valor de la resistencia R_4 .

El proceso que se ha descrito se produce normalmente utilizando máquinas monofásicas, que presentan los inconvenientes apuntados en el párrafo 1. Con la puesta a punto, por una firma comercial, de un transformador de soldeo con alimentación trifásica, se ha hecho posible de manera industrial el soldeo de espesores, tales como dos veces 25 mm o tres veces 20 mm. En la figura 4 se da el esquema del transformador, en el que los tubos electrónicos representados son ignitrones. Con él se obtienen, en el secundario, impulsos de corriente de baja frecuencia que se pueden regular.

Los tres devanados I_1 , I_2 y I_3 están sobre el mismo núcleo de un circuito magnético acorazado, y están montados en paralelo y acoplados a los de-

Esquema de transformador trifásico para soldeo por resistencia.

5

Oscilograma de la corriente.

vanados primarios que son los alimentados por los grupos de ignitrones.

La operación comienza haciendo conductores los ignitrones de orden impar. Al encenderse éstos, se ajustan los amperios-vuelta y se establece la corriente secundaria—que toma un valor exponencial—, que queda interrumpida cuando los ignitrones cesan de ser conductores, y entonces comienza de nuevo el ciclo con los ignitrones de orden par, siguiendo así sucesivamente y obteniéndose una serie de impulsos en la corriente secundaria, tal como se muestra en el oscilograma de la figura 5.

Se ve que la corriente se establece de manera progresiva, al contrario de lo que ocurre en las máquinas con alimentación monofásica, en las que, normalmente, la intensidad máxima se produce en el primer período. De esta forma, la operación metalúrgica del soldeo se ve-

rifica de forma más racional y los electrodos no están sujetos a un régimen de trabajo tan fuerte, con lo que se aumenta su duración.

La potencia necesaria es también menor que con una máquina monofásica de la misma intensidad de soldeo, debido, principalmente, a que el factor de potencia es de 0,85 en lugar de 0,5, que es el valor normal en máquinas monofásicas, y, a que la relación de transformación es mejor en máquinas trifásicas. Además, en la red de alimentación, la carga se reparte por igual sobre las tres fases, y no se produce desequilibrio de las mismas.

También se tiene que las pérdidas por calentamiento del secundario, debidas a corrientes de Foucault, son menores, ya que son proporcionales al cuadrado de la frecuencia, y las impulsiones de la corriente secundaria son de baja frecuencia (3 a 6 períodos/seg.). Asimismo, las variaciones u oscilaciones de la intensidad secundaria al introducir las piezas de acero entre los electrodos, son despreciables, debido a que las variaciones de impedancia son asimismo pequeñas cuando se introducen masas magnéticas en el circuito.

La presión que se puede ejercer con las máquinas actuales llega hasta 15 toneladas. Esta presión ha de ser regulable entre ciertos límites, ya que mediante su ajuste adecuado se puede evitar toda clase de deformación.

3. Las chapas que se sueldan están, normalmente, cubiertas de una película de óxido, incluso después de efectuada una limpieza normal. Para ejecutar la soldadura en buenas condiciones es necesario quitar el óxido antes de proceder a la formación del punto de soldadura. Para ello, las modernas máquinas, después de ejercer una determinada presión durante un tiempo dado, pasan a introducir una corriente que al calentar las piezas, ayuda al proceso de desoxidación. Esta fase de la operación, así como las demás que completan el ciclo de soldeo, están representadas en la figura 6, en la que se dan tres ciclos en los que la presión se mantiene constante o es variable. Es de hacer notar que para restaurar la estructura metalúrgica del metal de base, así como para afinar la del propio punto de soldadura, el ciclo de soldeo contiene una operación de recocido. La secuencia de operaciones que se muestra se verifica de una manera automática; los parámetros se seleccionan previamente según el trabajo y el espesor a soldar. En la tabla I se dan, a título de ejemplo, valores de los parámetros de soldeo para unir determinados espesores.

4. Los puntos de soldadura obtenidos por este procedimiento tienen una resistencia superior a los roblones del mismo diámetro. Esto se ha puesto de manifiesto mediante ensayos, en los que se ha visto que la capacidad resistente de un elemento así soldado es mayor que la del equivalente roblonado, conduciendo con ello a una economía en peso que puede ser del orden del 20 por 100.

En cuanto a la dimensión y disposición de la costura de puntos, en la tabla I se dan las que corresponden a distintos espesores de chapas a unir. Es importante conocer que el diámetro del punto es igual que el de la extremidad de los electrodos que se empleen, así como también que las limitaciones en el paso son absolutamente mínimas. En general se toma como paso (o distancia entre dos puntos consecutivos) mínimo,

$$p = 4d$$

A : Presion previa
Des : Desoxidacion
Pre : Precalentamiento
S. : Soldeo
R.p.c.: Retardo a presion contraria
Tem. : Temple
R.c.t. : Tiempo de recocido
R : Intervalo antes de la repeticion del ciclo
Tra : Tiempo en trabajo

F : Faja
T.m. : Tiempo en parada
P.i. : Presion inicial
P.c. : Presion contraria
P.c.r. : Presion contraria de recocido
I.pre. : Intensidad de precalentamiento
I.s. : Intensidad de soldeo
I.r.c.t. : Intensidad de recocido

Ejemplos de secuencias de soldeo utilizados en construcción metálica con máquinas trifásicas.

TABLA 1. VALORES DE LOS PARAMETROS DE SOLDEO EN MAQUINAS TRIFASICAS

(Soldadura del primer punto o de otros sin efecto de derivación).

ACERO SUAVE

Espesor — mm	Diámetro de la punta del electrodo — mm	Presión durante el aprieto inicial y la forja (P_1 y P_2) — kg	Presión durante el soldeo (P_3) — kg	Intensidad de precalentamiento — Amperios	Intensidad de soldero — Amperios	Tiempo total de paso de corriente (desoxi- dación + precalenta- miento + soldero) — Segundos
5+5	15	3.500	1.700	10.000	22.000	4
8+8	20	6.200	3.100	16.000	34.000	8
10+10	24	9.000	4.500	20.000	42.000	13
15+15	30	14.000	7.000	24.000	47.000	19
20+20	30	14.000	7.000	28.000	52.000	28

- OBSERVACIONES:
1. El diámetro del punto puede considerarse igual al del electrodo.
 2. La presión de aprieto inicial P_1 = presión de forja P_2 = 20 kg/mm².
 3. La presión de soldeo P_3 = presión de forja P_2 = 10 kg/mm².
 4. Los valores dados corresponden a aceros con superficies oxidadas. En chapas bien preparadas:
 - se suprime la desoxidación;
 - la intensidad de precalentamiento es más alta;
 - el tiempo total de paso de corriente es menor.
 5. La frecuencia de los impulsos es generalmente la siguiente:
 - duración de un impulso = 5 periodos;
 - intervalo entre dos impulsos = 2 periodos.

TABLA 2. FORMA DE LAS UNIONES

Unión de dos chapas — mm	Unión de tres chapas — mm	Diámetro del electrodo d — mm	Paso mínimo P_1 — mm	Distancia al extremo P_2 — mm	Distancia al borde P_3 — mm
5+5	5+5+5 a 5+10+5	15	60	30	22,5
8+8	8+8+8 a 8+16+8	20	80	40	30
10+10	10+10+10 a 10+20+10	24	96	48	36
15+15	15+15+15 a 15+30+15	30	120	60	45
20+20		30	120	60	45

d = diámetro de la punta del electrodo que está en contacto con las piezas a soldar.

P_1 = distancia entre dos puntos consecutivos = paso. El paso mínimo es $4d$.

P_2 = distancia del eje de los puntos al borde más cercano de la pieza en el sentido del esfuerzo que solicita la unión. El mínimo = $2d$.

P_3 = distancia del eje de los puntos al borde más cercano de la pieza en sentido normal al esfuerzo que solicita la unión. El mínimo = $1,5d$.

TABLA 3. LIMITES MAXIMOS EN LA COMPOSICION QUIMICA DE LOS ACEROS QUE AFECTAN A LA SOLDABILIDAD

Los contenidos están expresados en %

	C	C+Cr	C+Mo	C+V	C+Mn	C+Ni	Si	Cu	P+S	C+Cr+Mo+V
Aceros grupo a	0,25	0,35	0,50	0,40	1,40	3,00	0,40	0,60	0,10	0,60
Aceros grupo b	0,40	1,60	0,70	0,60	1,60	4,00	1,00	0,60	0,10	1,60

siendo d el diámetro del punto. La razón de esta limitación es impedir pérdidas de energía por corrientes que se derivan por los otros puntos. Este efecto de derivación es, en general, imposible de evitar, de forma que se hace necesario reglar la máquina una vez obtenido el primer punto de la costura.

En las condiciones de soldabilidad del material a soldar, intervienen, tanto la composición del material como el estado de sus superficies.

En general son soldables todas las calidades normales de aceros de bajo contenido en carbono empleados en la construcción. Sobre este particular se encuentran indicaciones específicas en la norma suiza VSM 14100, que distingue las calidades:

- a)** Completamente soldables por puntos.
- b)** Soldables por puntos.
- c)** Soldables sólo en determinadas condiciones.
- d)** No soldables por puntos.

En esta norma se recomienda utilizar en construcciones metálicas únicamente los aceros de los grupos a) y b). Las características que definen a estos grupos son:

Grupo a) Un acero es completamente soldable por puntos cuando, sin tomar precauciones especiales, el punto obtenido no tiene dureza mayor de 300 Brinell ni se producen en él fisuras, defectos internos o superficie irregular.

Grupo b) Un acero es soldable por puntos cuando, después de un precalentamiento y un recocido posterior al soldeo, efectuados en la propia máquina, reúne las condiciones de los aceros del grupo a).

Grupo c) A este grupo pertenecen aquellos aceros que para cumplir con las condiciones exigidas a los del grupo a) requieren, además de tratamientos térmicos dados en la máquina de soldar, otro de recocido fuera de la misma.

Limitándonos a los aceros de los grupos a) y b), la misma norma suiza da las indicaciones contenidas en la tabla 3 en cuanto a la composición química.

Respecto a los aceros del tipo 37 y 52, normalmente empleados en las estructuras metálicas, están encuadrados en los grupos a) y b), respectivamente, teniendo siempre especial cuidado en vigilar los contenidos de S y P.

7

8

9

a **b****c**

5. Con el fin de comprobar si los puntos de soldadura se han ejecutado de forma correcta o no, se emplean ensayos destructivos y no destructivos.

Entre los primeros, el más empleado es el método de Jومات, que consiste en someter al punto de soldadura a una torsión ejercida mediante una llave (fig. 7). Además, se realizan macrografías o micrografías del punto para así estudiar su estructura.

De los métodos no destructivos se emplean los ultrasonidos y la radiografía.

6. Las máquinas que se emplean para la aplicación de este procedimiento están estudiadas de manera que su funcionamiento sea fácil y el tiempo de movimiento de las piezas a soldar sea mínimo. Por esta razón, además de existir máquinas fijas en su lugar de instalación, se dispone de otras que pueden trasladarse mediante un puente-grúa u otro medio. Ejemplos de estos dos tipos se dan en las figuras 8 y 9.

Para realizar con más facilidad el movimiento de traslación de las máquinas, el equipo de control suele ir en un armario blindado separado de la máquina de soldadura en sí.

12

13

Sección compuesta por puntos.

Con el fin de introducir entre los electrodos las piezas que normalmente se utilizan para la constitución de un perfil armado, los dos electrodos son retráctiles, de forma que después de dejar paso vuelvan a la posición de soldeo, tal como se muestra en la figura 10.

Ejemplos típicos de realizaciones conseguidas con estas máquinas se dan en las figuras 11 a 13.

La información gráfica que ilustra el artículo ha sido amablemente facilitada por la firma Sciaky.

bibliografía

TH. KRIMIANIS: *Soudage par points des Charpentes Métalliques*; publicado por "Sciaky".

J. M. LABESSOULHE: *Quelques exemples d'application du soudage électrique par résistance dans le domaine de la charpente métallique*, "Soudage et Techniques Connexes", Nov-Déc., 1957.

G. BIERETT y O. STEINHARDT: *Untersuchungen zur Anwendung der elektrischen Widerstandspunktschweissung im allgemeinen Stahlbau*; publicación de "Berichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbau", 1960.

La soudure électrique par résistance aux structures métalliques

Rafael Heredia, Ingé. industriel.

Le procédé de soudure par résistance par points est depuis longtemps appliqué par l'exécution d'éléments légers de construction métallique. Actuellement on a commencé, avec succès, son utilisation pour unir des épaisseurs de 40 ou 50 mm. Ainsi ce mode de soudure est entré dans la construction de structures métalliques. Tout au long de l'article sont étudiés les principes de la soudure par points ainsi que des moyens employés dans cette technique appliquée à la soudure de grandes épaisseurs. Sont passées également en revue les dispositions que doivent adopter les soudures et les conditions que doivent remplir les matériaux en ce qui concerne leur disposition à la soudure. Enfin sont présentées quelques réalisations obtenues à l'aide de cette technique.

Resistance welding in the construction of metal structures

Rafael Heredia, Industrial Engineer.

Spot resistance welding procedure has been used for a long time for the construction of light weight elements in metal structures. Very recently, this procedure has begun to be successfully used for joining thicknesses adding up to 40 or 50 mm. Thus a new joining method has appeared in the fabrication of steel structures.

In this paper, the author studies the principles of spot resistance welding as well as those of the welding machines which are employed in this technique when used for large thicknesses. A thorough review is also presented on the welded seam layout and the weldability conditions for the steels. The paper describes also some constructions where resistance welding has been used.

Die elektrische Widerstandspunktschweissung bei Metallkonstruktionen

Rafael Heredia, Industrie-Ing.

Das Verfahren der Widerstandspunktschweissung wurde seit langem in der Ausführung der leichten Elemente der Metallkonstruktion angewendet. Gegenwärtig hat man mit Erfolg begonnen, sie zu benutzen, um Dicken von 10 oder 50 mm zu vereinen. Auf diese Weise hat man diesem Mittel der Vereinigung Eingang in den Stahlbau gewährt. In dem Artikel wird ein Studium über die Anfänge der Punktschweissung, sowie auch über die Maschinen, die für die Schweissung grosser Dicken angewendet werden, durchgeführt. Auch betrachtet man die Anordnung, die die Schweissnähte anzunehmen haben, und die Bedingungen, die die Materialien bezüglich ihrer Schweissbarkeit zu erfüllen haben. Schliesslich werden einige erreichte Durchführungen dieser Technik angeführt.