熔接部內의 熱流動

서울大學校工科大學
敎 授 朴 鍾 殷

1. 序 言

용착금속과 열영향부의 야금학적인 고찰을 위해서 용접부내의 온도변화 사실을 알 필요가 있다.

이 온도변화에 관한 사실로는

(1) 용접부에 있어서의 최고온도

(2) 용접부에 있어서의 냉각속도

(3) 용착금속의 응고온도

등을 생각할 수 있다.

다음에 논하는 내용은 주로 수동 아아크용접의 경우에 대해서 설명하나, 일반적인 내용은 다른 용접법에 있어서도 비슷하다. 이 일반적인 내용을, 용접법이나 용접조건을 선택하는데 잘 적용하면 보다 나은 재질의 용접부를 얻을 수 있다.

2. 最高溫度

2.1. 最高溫度方程式

단일패스로서 충분한 용입이 되는 맞대기이음 용접을 할 때 열영향부내의 어떤 점에 있어서의 최고 온도는 다음식으로 주어진다.

$$\frac{1}{T_p-T_o}=\frac{4.139C_tY}{H_{net}}+\frac{1}{T_m-T_o} \quad (1)$$

여기서

T_p : 본드에서 Y_{mm}떨어진 점의 최고온도 °C

T_o : 초기온도 °C

T_m : 용융온도 °C

H_{net} : 실에너지입력 $(=f_1\frac{EI}{V})$

E : volt I : amp V : mm/sec

f_1 : 열전달율

ρ : 밀도, g/mm³

c : 비열, J/g·°C

t : 판두께, mm

이 최고온도방정식은 다음 경우를 포함하여 여러 경우에 사용된다.

(1) 열영향부내 어떤 점의 최고온도

(2) 열영향부 폭의 예측

(3) 예열이 열영향부폭에 미치는 영향

ex. 1. 연강판에 다음 조건으로 용접했을 때

$E=20V$ $\rho c=0.0044J/mm^3\cdot C$

$I=200A$ $t=5mm$

$V=5mm/sec$ $f_1=0.9$

$T_o=25°C$ $H_{net}=720J/mm$

$T_m=1,510°C$

본드에서 3mm떨어진 점의 최고온도

$$\frac{1}{T_p-25}=\frac{4.13(0.0044)5(3)}{720}+\frac{1}{1510-25}$$

$T_p=976°C$

식(1)에 $Y=0$를 대입하면

$T_p=T_m$

이 되어 본드의 온도는 T_m이고, 이것은 사실과 잘 일치한다.

2.2 HAZ의 計算

식(1)을 사용하면 HAZ(Heat Affected Zone)의 폭을 계산할 수 있다.

그러나 이 폭을 계산하기 위하여는 열영향부(HAZ)의 윤곽을 알 필요가 있다. 예를들면 보통강이나 합금강에 있어서는 단면부식시험으로서 730°C의 윤곽을 알 수 있다.

이 730°C 되는 점의 위치를 다음과 같이 구할 수 있다.

식(1)을 이용해서

$$\frac{1}{730-25}=\frac{4.13(0.0044)5Y_z}{720}+\frac{1}{1,510-25}$$

여기서 Y_z : HAZ의 폭 Y_z=5.9mm 또 430°C로 tempering된 quenched and tempered steel을 용접했을 때 430°C이상으로 가열된 부분은 식(1)을 이용하여 계산하면 T_p=430°C이므로

$$Y_z=14.2\text{mm} \qquad (2)$$

이 이내의 부분은 "over-tempering"되고 재질도 변했을 것이다.

또 조질강은 용접전에 예열되는 수가 많은데 이렇게 하면 HAZ의 폭은 넓어진다.

앞 보기에서 200°C로 예열하였다고 가정하면 T_o=200°C이므로

$$Y_z=28.4\text{mm} \qquad (3)$$

식(2)(3)에서 볼 때 HAZ의 폭은 2배로 되었음을 알 수 있다.

또 이 최고온도방정식으로부터 HAZ의 폭은 용접입열에 반비례 함을 알 수 있다. 즉 용접입열이 1080J/mm로 50%증가되면

$$\frac{1}{430-25}=\frac{4.13(0.0044)5Y_z}{1,080}+\frac{1}{1,510-25}$$

에서 Y_z=21.3mm

H_{net}=720J/mm 일때, 식(2)에서 보면 Y_z=14.2mm 였는데 H_{net}=1,080J/mm(50%증가)에서는 Y_z=21.3mm로 50%증가하였다.

최고온도분포식의 사용상의 주의

이 최고온도분포식은 소위 박판에 적합하도록 세워진 식이다. 즉 열의 흐름 방향이 용접선을 포함하는 평면에 직각일 때에 적합하다. 단일패스로서 용접이나 절단이 가능할 때는 판두께에 관계없이 적용된다. 아아크용접에 적용할 때 4패스 이내에서 이음이 완성되는 경우에는 적용해서 좋은 결과가 얻어진다.

3. 冷却速度

용접부내의 열유동에 대하여 다음으로 고려할 또하나의 중요한 사실은 냉각속도이다. 용접부의 어떤 점이 최고온도에 도달한 후 냉각될 때 그 냉각속도는 그 재료의 조직및 성질을 변화시키며, 열영향부 모재의 건전성도 바꾸어 놓는다 이 사실은 특히 열처리가 가능한 강철에 있어서 더욱 중요하다.

3-1 冷却速度式

용접부에 있어서 냉각속도는 위치와 시간에 따라 다르다.

특히 용접선상에서 어떤 특수한 온도 T_c에 있어서의 냉각속도가 갖은 뜻을 갖는다. T_c=550°C는 대부분의 강에 있어서 뜻이 깊다.

냉각속도식은 실제에 있어서는 예열온도를 계산하는데 주로 사용된다. 다음식은 6패스 이상을 용접해야하는 "후판용냉각속도식"이다.

$$R=\frac{2\pi k(T_c-T_o)^2}{H_{net}} \qquad (4)$$

여기서

R : 용접중심선상의 T_c를 지날 때의 냉각속도, c/sec

k : 금속의 열전도도, J/mm·sec·°C

냉각속도는 용접중심선상에서 제일 크다. 그러나 본드 근처에서는 용접중심선보다 몇% 낮을 뿐이고, 따라서 이 식(4)는 전용착금속과 그에 가까운 열영향부에 적용된다.

판이 얇을 때(4패스이하)는 다음 냉각속도식을 적용하여야 한다.

$$R=2\pi k\rho c\left(\frac{t}{H_{net}}\right)^2(T_c-T_o)^3 \qquad (5)$$

위 두식을 적용함에 있어서 후판이란 용접열의 흐름이 3차원으로 볼 수 있을 때이고 박판은 2차원으로 볼 수 있을 경우이다. 보다 더 정확한 적용은 다음 식(6)에 의한다.

$$\tau=t\sqrt{\frac{\rho c(T_c-T_o)}{H_{net}}} \qquad (6)$$

$\tau \geqq 0.9$: 후판용냉각속도식

$\tau \leqq 0.6$: 박판용냉각속도식

$0.9>\tau>0.6$: 검토해서 결정

3-2 豫熱溫度 및 臨界冷却速度

냉각속도식에서 알 수 있는바와 같이 T_o를 증가시키면 냉각속도를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 그래서 예열은 용접하면 경화되는 강을 용접할 때 이 목적으로 이용된다. 각 성분의 강은 임계냉각속도를 소유한다. 만일 이 임계냉각속도를 넘으면 열영향부에는 경도가 큰 말텐사이트조직이 생기고, 수소가 존재하면 열응력에

의하여 균열을 발생시킬 우려가 있다.

이래서 냉각속도식은

(1) 임계냉각속도의 결정과

(2) 예열온도의 계산

에 이용된다.

ex.2. 어떤 강재를 다음 조건으로서 용접속도를 여러가지로 바꾼 비이드 온 플레이트 용접을 하고 경도시험을 하여 8mm/sec까지는 경화되지 않았다고 한다.

$E=25V$ $f_1=0.9$

$I=300A$ $T_o=25°C$

$t=6mm$ $T_c=550°C$

이 때

$$H_{net}=\frac{25(300)0.9}{8}=843.75J/mm$$

이 때

$$\tau=\sqrt{\frac{0.0044(550-25)}{843.75}}=0.31<0.6$$

따라서 박판냉각속도식을 적용하여

$$\frac{R}{2\pi k}=0.0044\left(\frac{6}{843.75}\right)^2(550-25)^3=32.2$$

$$R=2\pi(0.028)32.2=5.7°C/sec$$

이 계산결과는 6°C/sec가 이 강에 대한 이상의 용접조건하에서 안전임계냉각속도임을 알 수 있고 이 냉각속도를 넘어서는 안됨을 알 수 있다

실제 용접에서는 냉각속도를 6°C/sec 이하로 하기 위하여 예열을 하는 수가 있다.

ex.3. 같은 재료를 다음 조건으로 용접하여 냉각속도가 안전임계냉각속도인 6°C/sec를 넘지 않는 예열온도 T_o를 구한다.

$E=25V$ $V=7mm/sec$

$I=250A$ $t=9mm$ $f_1=0.9$

풀이,

$$H_{net}=\frac{25(250)0.9}{7}=804J/mm$$

박판용냉각속도식을 적용해 본다.

$$\left(\frac{R}{2\pi k}\right)_{max}=32.2$$

$$=0.0044\left(\frac{9}{804}\right)^2(550-T_o)^3$$

$$\therefore T_o=162°C$$

T_o를 얻었으므로 박판용냉각속도식을 적용한 것이 타당한가를 점토해 본다.

$$\tau=9\sqrt{\frac{0.0044(550-162)}{804}}=0.41<$$

$\tau<0.6$이므로 박판용의 적용은 타당하고, 162°C로 예열하면 냉각속도는 6°C/sec 이하가 되고 여린 말텐사이트를 열영향부에 형성하지 았는다.

다음 같은 용접입열로서 같은 재질인 25mm 두께의 판을 용접한다고 가정하여 예열온도를 구한다.

박판식을 적용하여

$$\left(\frac{R}{2\pi k}\right)_{max}=32.2$$

$$=0.0044\left(\frac{25}{804}\right)^2(550-T_o)^3$$

$$\therefore T_o=354°C$$

$$\tau=25\sqrt{\frac{0.0044(550-354)}{804}}=0.82>0.6$$

∴박판식의 적용은 부적합하다.

후판용냉각속도식을 적용해 본다.

$$\left(\frac{R}{2\pi k}\right)max=32.2=\frac{(550-T_o)^2}{804}$$

$$T_o=389°C$$

$$\tau=25\sqrt{\frac{0.0044(550-389)}{804}}=0.74>0.6$$

후판식의 적용도 부적합하다.

이상에서 계산된 두 값은 다 부적합하다. (즉 하나는 너무 높고, 하나는 너무 낮다.) 그러나 이 두 값의 차이는 실제에 있어서는 중요한 문제는 아니다. 이 경우에는 신중을 기하기 위해서 높은 예열온도를 취한다.

다음 같은 용접입열로서 같은 재료 50mm 두께에 대해서 계산해 본다. 후판용냉각속도식을 적용해 본다. 마찬가지로 계산해서

$$T_o=389°C$$

때로는 예열이 불필요할 때도 있다. 즉 같은 재료, 같은 용접입열로서 5mm 두께에 적용하면

$$\left(\frac{R}{2\pi k}\right)_{max}=32.2$$

$$=0.0044\left(\frac{5}{804}\right)(550-T_o)^3$$

$$\therefore T_o=-24°C$$

이것은 예열이 불필요함을 뜻하고 있다.

용접이음형태(butt, T이음등)의 변화에 따른

수정적용에 대해서 고려하기로 한다.

같은 용접입열이 같은 재료 9mm T이음에 적용되었다고 하면, 열의 유동로가 2에서 3이 되었으므로

$$H_{net}=\frac{2}{3}(804)=536\text{J/mm}$$

$$\left(\frac{R}{2\pi k}\right)_{max}=32.2$$

$$=0.0044\left(\frac{9}{536}\right)^2(550-T_o)^3$$

$$T_o=254°C$$

$$\tau=9\times\sqrt{\frac{0.0044(550-254)}{536}}=0.44<0.6$$

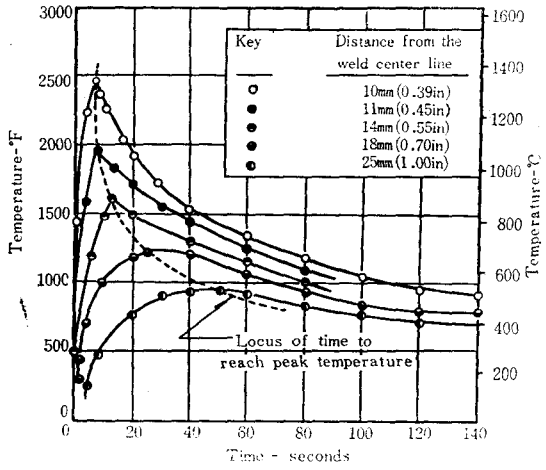
∴박판용냉각속도식의 적용은 타당하다.

이상에서 알 수 있는바와 같이 예열온도는 재질이 같드래도 경우에 따라 다르다. 예를들면 용접함으로서 경화되는 강은 200°C로 예열하면 좋다고 하는 것은 위험하다. 200°C는 경우에 따라서는 너무 높던가 너무 낮다.

어떤 강에 대한 예열상의 성질로서는 예열온도보다도 오히려 임계냉각속도가 중요하다.

4. 熔接熱사이클

Fig. 1에 아아크용접때의 HAZ내의 지정된 점에 있어서의 용접열사이클을 표시한다.



모재 : 13mm$t$강판, 아아크용접입열 : 3,940J/mm, 모재온도 : 27°C

Fig. 1. 아아크용접에서 HAZ내의, 표시된 점에 있어서의 열사이클

이 그림에서 다음 3가지 사실을 알 수가 있다.

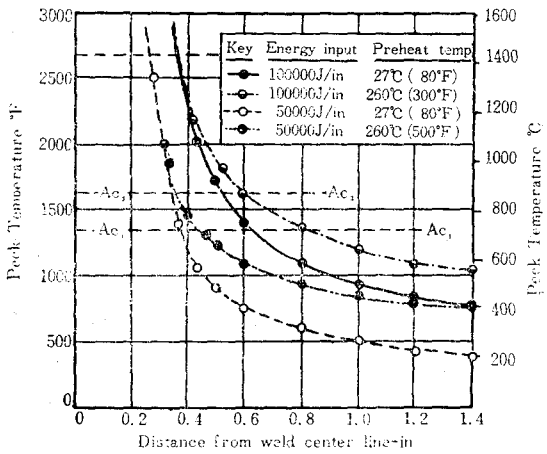
(1) 최고온도는 용접중심선에서의 거리가 멀수록 급격히 감소한다.

(2) 최고온도에 도달하는 시간은 용접중심선에서의 거리가 증가할수록 증가한다.

(3) 용접중심선에서의 거리가 멀어질수록 가열속도 및 냉각속도는 다같이 감소한다.

4-1 熔接入熱과 豫熱溫度의 影響

Fig. 2는 용접입열과 예열온도가 HAZ내의 최고온도 분포에 미치는 영향을 표시한다.



모재 : 13mm$t$강판, 아아크용접

Fig. 2 용접입열과 예열온도의 최고온도 분포에의 영향

이 그림에서 다음 사실을 알 수 있다.

(1) 용접입열이나 예열온도중 어느쪽을 감소시켜도 HAZ내의 최고온도분포는 급격한 감소를 나타낸다.

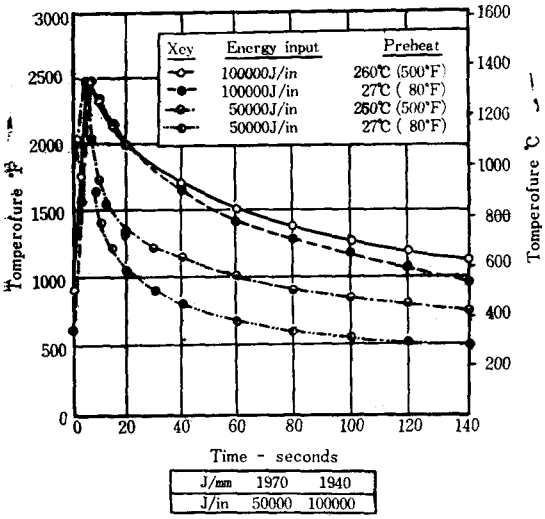
(2) 용접입열을 증가시키면 고온부위의 폭을 증가시킨다.

(3) 예열온도를 증가시켜도 고온부위의 폭을 증가시킨다.

Fig. 3은 예열온도와 용접입열이 용접열사이클에 미치는 영향을 표시하고 있다.

이 그림에서 다음 사실을 알 수 있다.

(1) 일정한 예열온도에서 용접입열을 증가시

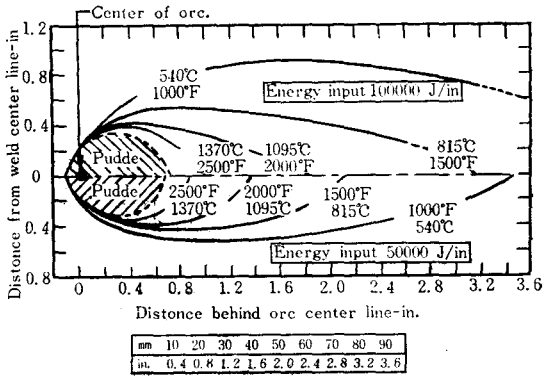


모재 : 13mm*t*, 아아크용접

Fig. 3 예열온도와 용접입열의 용접열사이클에 미치는 영향

키면 고온에 있어서의 유지시간을 증가시키고 냉각속도를 감소시킨다.

(2) 일정한 용접입열에서 예열온도를 증가시키면 냉각속도를 감소시키나 고온에서의 유지시간에는 현저한 영향을 주지 않는다.



모재 : 13mm*t*, 아아크용접

Fig. 4. 용접입열이 등온선에 미치는 영향

이 그림에서 보면, 용접입열을 감소시키므로서 HAZ의 폭을 감소시킬 수 있고 어떤 온도(예 : 815°C)이상으로 가열된 금속량을 적게 할 수 있다.

4-2 板두께와 이음形式의 影響

Fig. 5에서 보면, 판두께가 증가함에 따라 냉각속도는 증가하고, 고온으로 유지하는 시간은

표 1. 용접중심선에서의 거리와 온도 관계

Welding Conditions Energy Input J/mm	J/in	Preheat Temperature °C	°F	Distance from weld center line to point heated to: 1,480°C 2,700°F (liquidus) mm	in	870°C 1,600°F (Ac_3) mm	in	705°C 1,300°F (Ac_1) mm	in
3,940	100,000	27	80	9.4	0.37	13.2	0.52	15.5	0.61
3,940	100,000	260	500	9.4+	0.37+	15.2	0.60	20.6	0.81
1,970	50,000	27	80	7.4	0.29	9.1	0.36	9.4	0.37
1,970	50,000	260	500	7.4+	0.29+	9.4	0.37	10.7	0.42

감소한다. 용접열의 흐름은 판두께가 얇으면 2차원적이고 두꺼우면 3차원이 되기 때문에 두께의 영향은 대단히 복잡하다.

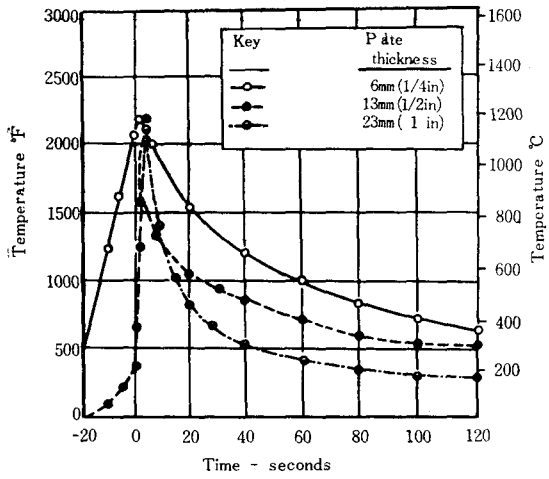
4-3 材料의 熱的性質의 影響

아직까지 재료의 열적성질이 용접열사이클에 미치는 영향에 대한 정량적인 자료는 없으나 다음과 같은 일반적인 결론은 얻을 수 있다.

(1) 재료의 열확산율이 작으면 최고온도 분포는 급격하다.

(2) 재료의 열확산율이 크면 어떤 최고온도에서의 냉각속도는 크다.

(3) 재료의 열확산율이 크면 어떤 최고온도에 머무는 시간이 짧다.



용접입열 : 1,850J/mm, 최고온도 : 1,205°C, 이음 : butt

Fig. 5. 판두께가 용접열사이클에 미치는 영향

4-4 HAZ幅의 調節

HAZ의 폭은 최고온도의 분포를 바꾸므로서 조절할 수 있다. 일반적으로 용접입열의 에너지 밀도가 클수록 최고온도 분포는 급격해지고 HAZ의 폭은 좁아진다. 에너지 밀도가 10MW/mm²나 되는 전자빔용접에서는 최고온도 분포가 대단히 급격하고 HAZ가 거의 없을 정도이다. 그러나 산소아세틸렌용접법은 온도가 낮고, 최고온도 분포도 완만하여 넓은 HAZ를 갖는다.

다음 표 2에 몇가지 용접법을 최고온도 분포가 급격한 순위로 배열했으며 아울러 최고온도 분포의 구배를 바꾸는 방법도 제시하였다.

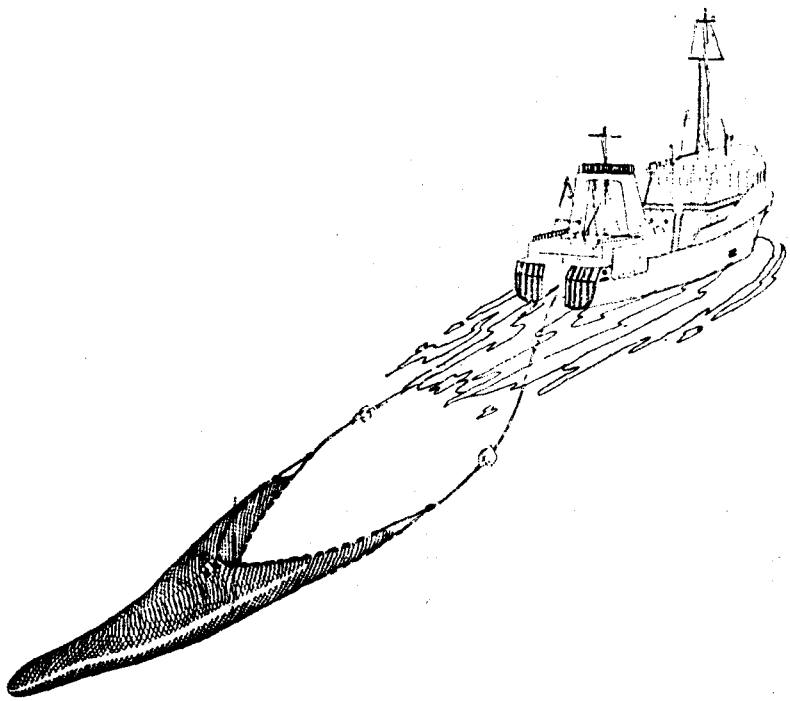
또 최고온도 분포가 급격할수록 냉각속도는 증가한다. 냉각속도를 줄이려면 표 2의 방법을 반대로 이용하여야 한다.

표 2. 최고온도 구배

Process	Method for increasing the steepness of the distribution of peak temperatures
Electron beam welding(EBW)	Decrease the effective diameter of the beam or increase the beam power and the welding speed.
Plasma are welding(PAW)	Use smaller orifice or increase power and speed
Resistance spot welding(RSW)	Decrease the weld time with an appropriate increase in weld current or employ electrodes of higher conductivity.
Resistance seam welding(RSEW)	Decrease the one-time with an appropriate increase in weld current or flush cool the work.
Flash welding(FW)	Increase the rate of acceleration of the platens during flashing, decrease the clamping distance or, in some cases, increase the upset distance to extrude more of the heat-affected material from the weld region.
Upset welding(UW)	Decrease the heating time by an appropriate increase in heating current or decrease the clamping distance.
Arc welding(AW)	Decrease the energy input by increasing welding speed, use stringer beads, or use lower preheat temperatures.
Oxyacetylene welding(OAW)	Use a larger torch and a faster welding speed.

표 3. 기호설명

Guide to mathematical symbols

Symbol	Definition	Unit of Measurement
T_p	The peak or maximum temperature at a particular	T_p=°C
Y	distance, Y, from the weld fusion boundary, Y_z is	Y, Y_z=mm
Y_z	the width of the heat-affected zone	

T_o	The uniform initial temperature of the sheet or plate	°C
T_m	Melting temperature(specifically, liquidus temperature of the metal being welded)	°C
ρ	Density of material	g/mm³
C	Specific heat of solid metal	J/g·°C
ρC	Volumetric specific heat	J/mm³·°C
t	Thickness of sheet or plate	mm
$H_{net}=\frac{f_1 EI}{V}$	Net energy input	J/mm
f_1	Heat transfer efficiency	—
E	Volts	V
I	Amperage	A
V	Travel velocity of heat source	mm/s
R	The cooling rate at a point on the weld center line	R=°C/s
T_c	at just that moment when the point is cooling past the temperature of interest, T_c	T_c=°C
k	Thermal conductivity of the metal	J/mm·s°C
γ	Relative plate thickness	Dimensionless
S_1	Solidification time, the time lapec from beginning to end of solidification at a fixed point in the weld metal	s
L	Heat of fusion	J/mm³