溶接熱影響部の結晶粒粗大化に関する研究 (第7報)*

—溶接熱影響部の結晶粒径分布式—

井川 博** 大重広明** 野井伸悟*** 伊達洋彦**** 内川啓****

Study on the Grain Growth in Weld-Heat Affected Zone (Report 7)*

—Equation to Calculate Grain Size in HAZ—

by Hiroshi Ikawa**, Hiroaki Oshige**, Shingo Noi***,
Hirohiko Date**** and Kei Uchikawa****

In this report, the equation representing grain size in weld-heat affected zone (HAZ) of two-dimensional bead was derived using grain growth equation and heat conduction equation.

Furthermore, relation between heat input and grain size in HAZ was clarified using the equation obtained above.

Main results obtained are as follows.

- (1) Grain size in HAZ is represented by Eq. (13) for commercial-purity nickel and by Eq. (14) for steels used.
- (2) Maximum value for austenite grain size in HAZ of steels used is proportional to the square root of heat input.
- (3) Coarse grain zone in HAZ of steels used can be estimated using Eq. (17) or Eq. (18).

1. 緒 言

第6報¹⁾においては、著者らが誘導した熱サイクル過程における結晶粒成長式と溶接熱伝導式とを組み合わせることにより溶接熱影響部(以下 HAZ と記す)の結晶粒径が計算できることを明らかにした。

しかしながら、実用上は、より簡便に HAZ の結晶粒径が推定できることが望ましいと考えられる。

このような観点から、本報においては前報における結果をふまえ、溶接熱伝導式を利用して2次元ビード HAZ の結晶粒径分布式を導き、その結果を用いて溶接入熱と HAZ の結晶粒径の関係について検討した。

なお、前報と同様、まず変態のない材料として第1報²⁾に化学組成を示した工業用純ニッケル(Ni)、ついで変態のある材料として鋼について検討を行なった。

鋼は第6報¹⁾に述べた理由により第4報³⁾に化学組成を示した 80 kg/mm² 級高張力鋼(HT80)によって代表させた。

2. 溶接熱影響部の結晶粒径分布式の誘導

2.1 工業純ニッケル

前報まで¹⁻⁶⁾に明らかにしたように、溶接熱サイクル過程における結晶粒成長は(1)式により表わすことができる。

$$D^a - D_0^a = k_0 \sum_i \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

D : 熱サイクル過程の結晶粒径 (mm)

D_0 : 初期結晶粒径 (mm)

Δt_i : 熱サイクルを階段状に細分する際の i 番目の時間間隔 (min)

T_i : Δt_i に対応する温度 (°K)

a, k_0 (mm^a/min), Q (cal/g·atom) : 材料定数

熱サイクルが変化すれば(1)式において $\sum_i \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i)$ の値が変化する。よって、この項を便宜上「熱サイクル項」と名づける。

まず、瞬間平面熱源を仮定した溶接熱伝導式(第6報¹⁾(3)式)を用いて計算した溶接熱サイクルに結晶粒成長式を適用して「熱サイクル項」の値を求め、この結果を溶接入熱をパラメータとしてピーク温度の逆数に対してプロットした結果を Fig. 1 に示す。Fig. 1 によると、おのおのの溶接入熱において、ピーク温度を絶対温度で表わした値の逆数と「熱サイクル項」の値との間

*原稿受付 昭和51年9月17日(昭和51年8月溶接冶金研究委員会にて発表)

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

***正 員 (株)新潟鉄工所 Member, Niigata Engineering Co., Ltd.

****学 生 員 大阪大学大学院 Student Member, Graduate School, Osaka University

Fig. 1 Relation between $1/T_m$ and $\log \sum dt_i \exp(-Q/RT_i)$ in Ni (Calculated using heat conduction equation, T_m : Peak temperature)

には一定の傾きの直線関係があることがわかる。すなわち、(2)式が成り立つ。

$$\log \sum dt_i \exp(-Q/RT_i) = \log A - \frac{B}{T_m} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 T_m : ピーク温度 (°K)

A, B : 定数

(2)式における B の値は Fig. 1 の直線の傾きより $1.83 \times 10^4 (\text{°K}^{-1})$ と求められた。(2)式の形から、この B の値は結晶粒成長式におけるみかけの活性化エネルギー Q に関する量であると考えられる。

そこで、(2)式を(3)式のように書きかえる。

$$\ln \sum dt_i \exp(-Q/RT_i) = \ln A' - \frac{B'}{RT_m} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 A', B' : 定数

いっぽう、恒温加熱時の結晶粒成長は第1報²⁾において示したように(4)式で表わすことができる。すなわち、温度 T (°K) で時間 t (min) 加熱した場合、

$$D^a - D_0^a = k_0 t \cdot \exp(-Q/RT) \dots\dots\dots (4)$$

前述の(1)式と(4)式とを比較して明らかなように、熱サイクル時における「熱サイクル項」に相当する量は恒温加熱時には $t \cdot \exp(-Q/RT)$ である。そこで、この項の自然対数をとると(5)式になる。

$$\ln \{t \cdot \exp(-Q/RT)\} = \ln t - Q/RT \dots\dots\dots (5)$$

(3)式を(5)式と対応させると、ピーク温度が T_m である溶接熱サイクルはそのピーク温度で時間 A' 保持の恒温加熱に相当することがわかる。したがって、(3)式における A' すなわち(2)式における A の値は、溶接熱サイクルをそのピーク温度における恒温加熱におきかえた場合の保持時間に関する量である。

Fig. 1 からわかるように、一定溶接入熱においては(2)式における A の値、すなわち溶接熱サイクルをそのピーク温度での恒温加熱におきかえた場合の保持時

Fig. 2 Relation between heat input and $\log A$ in Eq. (2) in Ni (Calculated using heat conduction equation)

間は熱サイクルのピーク温度にかかわらず一定である。

溶接入熱が変化すれば A の値は当然変化する。そこで、Fig. 1 より(2)式における $\log A$ の値を求め、溶接入熱の対数に対してプロットした結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 をみると、 A の値の対数と溶接入熱の対数との間には直線関係がある。すなわち、

$$\log A = \log E + F \log \eta'q \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 q : 溶接入熱 (cal/cm²)

η' : 換算係数 (第6報¹⁾ 参照)

E, F : 定数

Fig. 2 より E の値は $1.660 \times 10^{-10} (\text{cm}^4 \text{min}/\text{cal}^2)$ 、 F の値は2と求められる。そこで、(6)式を書きかえると(7)式になる。

$$A = E \times (\eta'q)^2 \dots\dots\dots (7)$$

前述のように、 A の値は溶接熱サイクルをそのピーク温度における恒温加熱過程におきかえたときの加熱時間に比例する量である。(7)式によると、これは溶接入熱の2乗に比例している。これは、瞬間平面熱源による熱伝導を考えた場合、同一ピーク温度の熱サイクルで比較すると、ある温度に達するまでの時間が溶接入熱の2乗に比例するという事に関連しているものと考えられる。

(6)式を(2)式に代入すると、「熱サイクル項」の値は結局(8)式の形で表わせる。

$$\log \sum dt_i \exp(-Q/RT_i) = \log E + F \log \eta'q - \frac{B}{T_m} \dots\dots\dots (8)$$

(8)式の右辺における E, F ならびに B の値は上

記のプロットより求められているので, T_m を溶接入熱 $\eta'q$ および溶融線からの距離 l の関係で表わせば「熱サイクル項」の値は $\eta'q$ ならびに l の関数として表わすことができる。

第6報¹⁾においても示したように, 瞬間平面熱源を用いた場合のピーク温度は初期温度を 0°C と仮定すると(9)式で表わせる。

$$\theta_m = 0.242 \frac{\eta'q}{c\rho} \cdot \frac{1}{y} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ただし, θ_m : ピーク温度 ($^\circ\text{C}$)

y : 溶接線からの距離 (cm)

ρ : 密度 (g/cm^3)

c : 比熱 ($\text{cal}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$)

いま, 溶融温度を θ_{mp} ($^\circ\text{C}$) として y を溶融線からの距離 l (cm) でおきかえるとピーク温度 T_m ($^\circ\text{K}$) は(10)式で表わされる。

$$T_m = \frac{0.242\theta_{mp}\eta'q}{0.242\eta'q + c\rho\theta_{mp}l} + 273 \quad \dots\dots\dots(10)$$

(10)式を(8)式に代入すると, 「熱サイクル項」は(11)式のようになる。

$$\log \sum_i \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i) = \log E + F \log \eta'q - \frac{B(0.242\eta'q + c\rho\theta_{mp}l)}{0.242\eta'q(\theta_{mp} + 273) + 273c\rho\theta_{mp}l} \quad \dots\dots\dots(11)$$

(11)式で与えられる「熱サイクル項」を前述の熱サイクル過程における結晶粒成長式((1)式)に代入すると, HAZ における結晶粒径分布式が得られる。これを整理して示すと(12)式になる。

$$\log(D^4 - D_0^4) = \log k_0 + \log E + F \log \eta'q - \frac{H\eta'q + L}{J\eta'q + Li} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ただし, $H = 0.242B$

$$I = Bc\rho\theta_{mp}$$

$$J = 0.242(\theta_{mp} + 273)$$

$$L = 273c\rho\theta_{mp}$$

ここで, 第1報²⁾で求めた Ni の結晶粒成長に関する材料定数 a および k_0 , 第6報¹⁾で用いた熱伝導に関する定数 c および ρ , 熱サイクル実験より求めた溶融温度 θ_{mp} ($=1430^\circ\text{C}$) ならびに Figs. 1, 2 より求めた B, E, F の値を(12)式に代入し, さらに溶接入熱を $\eta'q$ (J/cm^2), 溶融線からの距離を l' (mm) で表わし, 整理すると(13)式になる。

$$\log(D^4 - D_0^4) = -65.96 + 2 \log \eta'q + \frac{1.442 \times 10^{-1}}{(l'/\eta'q) + 2.604 \times 10^{-3}} \quad \dots\dots\dots(13)$$

ただし, $q' = 60EI/Vh$ (J/cm^2) (I : 溶接電流 (A),

E : アーク電圧 (V), V : 溶接速度 (cm/min), h : 板厚 (cm))

l' : 溶融線からの距離 (mm)

η' : 換算係数

すなわち, 溶接入熱 ($\eta'q$) が与えられると, (13)式により HAZ の溶融線からの距離と結晶粒径との関係が求められる。

Fig. 3 は(13)式の関係を図示したものであり, さらに Fig. 4 は(13)式における $D^4 - D_0^4$ の値と D との関係を種々の初期粒径 (D_0) について計算した結果である。このように, Fig. 3 と Fig. 4 とを対応させることにより種々の初期粒径ならびに溶接入熱における HAZ の結晶粒径分布を読みとることができる。

Fig. 3 Relation between heat input and distributions of grain size in HAZ of Ni

Fig. 4 Relation between $D^4 - D_0^4$ and D with various values for D_0

2.2 鋼のオーステナイト結晶粒

鋼についても, 上記 Ni の場合と同様にして HAZ のオーステナイト結晶粒径分布式を求めた。

Fig. 5 に溶接熱サイクルのピーク温度と「熱サイク

ル項」の値との関係、Fig. 6 に (2) 式における $\log A$ の値と溶接熱との関係をそれぞれ溶接熱伝導式を用いて計算した結果を示す。Figs. 5 ならびに 6 より、この場合も前記 Ni の場合と同様の関係、(8) 式、が成り立っていることがわかる。そこで、Figs. 5 ならびに 6 より求めた (8) 式における E, F ならびに B の値は下記のようにであった。

$$E = 2.754 \times 10^{-10} \text{ (cm}^4\text{min/cal}^2\text{)}$$

$$F = 2$$

$$B = 2.65 \times 10^4 \text{ (}^\circ\text{K}^{-1}\text{)}$$

Fig. 5 Relation between $1/T_m$ and $\log \sum_i dt_i \exp(-Q/RT_i)$ in steels used (Calculated using heat conduction equation, T_m : Peak temperature)

Fig. 6 Relation between heat input and $\log A$ in Eq. (2) in steels used (Calculated using heat conduction equation)

これらの値、第 4 報³⁾ で求めた結晶粒成長に関する材料定数 a, k_0 の値、第 6 報¹⁾ で用いた c, ρ の値ならびに熱サイクル実験より求めた供試材 (HT80) の溶融

温度 (1410°C) を用いて Ni の場合と同様にして式の変形を行なった。

このようにして導いた HAZ における HT80 のオーステナイト結晶粒径分布式は (14) 式のようなのである。

$$\log(D^4 - D_0^4) = -92.64 + 2 \log \eta' q' + \frac{1.291 \times 10^{-1}}{(V/\eta' q') + 1.587 \times 10^{-3}} \dots (14)$$

ただし、(14) 式中の記号は (13) 式の場合とまったく同様である。

(14) 式を導くにあたっては、溶接熱伝導式により求めた溶接熱サイクルの 0°C から計算を行なっているの、(14) 式中の D_0 は 0°C における値をとる必要がある。しかしながら、第 4 報³⁾ で述べたように、溶接熱サイクル過程においては 0°C から計算を行なっても、加熱過程でオーステナイト初期粒が形成される時点から計算を行なっても、最終的なオーステナイト結晶粒径はほぼ同一となる。よって、実際には、(14) 式における D_0 の値としては加熱過程で形成されるオーステナイト初期粒径を用いばよい。

第 4 報³⁾ で述べたように、本報で用いている鋼においては D_0 を 0.015 mm と考えることができる。よって、 $D_0 = 0.015$ mm とした場合の (14) 式の関係を図示すると Fig. 7 のようになる。

Fig. 7 Relation between heat input and distributions of austenite grain size in HAZ of steels used

さらに、第 4 報³⁾ で述べたように、溶融線近傍のオーステナイト結晶粒径を求める際には D_0 を零と仮定して計算を行なうことができる。この場合には、(14) 式はさらに簡略な (15) 式になる。

$$\log D = -23.16 + \frac{1}{2} \log \eta' q' + \frac{3.227 \times 10^{-2}}{(V/\eta' q') + 1.587 \times 10^{-3}} \dots (15)$$

式の誘導過程から明らかなように、以上のようにして求めた HAZ の結晶粒径分布式 (13) 式、(14) 式あるいは (15) 式の右辺の第 2 項は時間に関する項、第 3 項はピーク温度に関する項である。

3. 溶接入熱と HAZ の結晶粒径との関係

HT80 において D_0 の影響が無視できる場合を例にとり, (15) 式を用いて HAZ の結晶粒径分布について検討する。

まず, 溶融線上の結晶粒径は (15) 式において $l'=0$ とおくことにより次のように求められる。

$$D_m = 1.487 \times 10^{-3} \sqrt{\eta' q'} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ただし, D_m : 溶融線上の結晶粒径 (mm)

すなわち, 結晶粒径は溶接入熱の平方根に比例する。このことは, 前述のように「熱サイクル項」の値は同一ピーク温度の溶接熱サイクルにおいては溶接入熱の 2 乗に比例すること, ならびに結晶粒成長式において $D_0=0$ とした場合, 結晶粒径が「熱サイクル項」の 4 乗根に比例することによるものである。すなわち,

$$(8) \text{ 式より } \sum \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i) \propto (\eta' q')^2$$

$$(1) \text{ 式より } D_m^4 \propto \sum \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i)$$

$$\text{ゆえに} \quad D_m \propto \sqrt{\eta' q'}$$

(16) 式における D_m はほぼ HAZ の最大の結晶粒径を表わすと考えられる。

Fig. 8 は (16) 式の関係を図示したものである。Fig. 8 には TIG 溶接ならびにサブマージアーク溶接において溶融線のごく近傍で測定した HAZ の最大の結晶粒径も記している。このような関係も少なくとも結晶粒径を実測した溶接入熱範囲で成り立っている。

Fig. 8 Relation between heat input and austenite grain size at fusion line (HT 80)

このように, HAZ の最大結晶粒径は溶接入熱の平方根に比例するので, これを微細化するには溶接入熱を大幅に減少させる必要があるといえる。

つぎに, HAZ の結晶粒径分布について検討した。いま溶融線上の結晶粒径に対する結晶粒径の比を相対結晶粒径 (D^* で表わす) とし, 一定相対結晶粒径における

溶接入熱と溶融線からの距離との関係を (15) 式ならびに (16) 式より求めると (17) 式になる。

$$l' = \frac{-1.587 \log D^*}{\log D^* + 20.33} \times \eta' q' \quad \dots\dots\dots (17)$$

ただし, $D^* = D/D_m$

すなわち, 相対結晶粒径が一定値をとる溶融線からの距離は溶接入熱に比例する。二, 三の D^* に対する (17) 式の関係を図 9 に示す。

Fig. 9 Relation between heat input and distance from fusion line at which the ratio of grain size to the grain size at fusion line is constant (HT 80)

さらに, (15) 式を用いてある一定の結晶粒径 (D) とする溶融線からの距離と溶接入熱との関係を求めると (18) 式になる。

$$l' = \eta' q' \left(\frac{6.454 \times 10^{-2}}{2 \log D + 46.32 - \log \eta' q'} - 1.587 \times 10^{-3} \right) \quad \dots\dots\dots (18)$$

二, 三の結晶粒径について (18) 式の関係を図 10 に示す。

Fig. 10 Relation between heat input and distance from fusion line at which grain size is constant (HT 80)

上記の Fig. 9 ならびに Fig. 10 をみると、溶接入熱を減少させることにより HAZ の粗粒化域の幅はかなり減少させることができるといえる。

以上に示したように、HAZ の結晶粒径分布式をもとにした (16) 式により HAZ の最大結晶粒径、(17) 式あるいは (18) 式により HAZ が粗粒化する幅を推定することができる。

なお、これらの場合は HT80 について検討した結果である。しかしながら、第4報³⁾において用いた 35C, HT60 ならびに HT100 においても、第4報³⁾で示したように結晶粒成長に関する定数値がほぼ同一であること、熱伝導に関する定数もほぼ同一であると考えられること、ならびに溶融温度を測定した結果もほぼ同一であったことなどから、ほぼ (14)~(18) 式を用いることが可能であると考えられる。

なお、以上に示した2次元ビードの HAZ の結晶粒径分布式を用いる際の換算係数 (η') の値としては実験により求めた値を使用すればよい (第6報¹⁾ Table 5 参照)。

このような結晶粒径分布は少なくとも第6報¹⁾の実験で確認した範囲、すなわち換算係数を乗じない単位板厚あたりの溶接入熱 ($60EI/Vh$) が Ni の TIG 溶接では $43\sim 55 \text{ KJ/cm}^2$ 、鋼の TIG 溶接では $32\sim 44 \text{ KJ/cm}^2$ 、鋼のサブマージアーク溶接では $44\sim 75 \text{ KJ/cm}^2$ の範囲で適用が可能である。

ただし、本研究では結晶粒径分布式を求めるにあたって瞬間平面熱源を使用しているので、第6報¹⁾で示したように、あまり溶接速度が遅くなると ($< 12 \text{ cm/min}$) 誤差が大きくなる。

5. 総 括

本報においては、第6報¹⁾で得られた結果にもとづき結晶粒成長式と溶接熱伝導式とを組み合わせる2次元ビード HAZ の結晶粒径分布式を導き、その結果を用いて溶接入熱と HAZ の結晶粒径との関係を明らかにした。

得られた結果を要約すると次のようである。

(1) 溶接熱サイクル過程における結晶粒成長はそのピーク温度の恒温加熱過程における結晶粒成長におきかえることができる。このような置きかえをした場合の恒温加熱時間は溶接入熱の2乗に比例する。

(2) (1) で述べた関係ならびに溶接熱伝導式から求められる HAZ のピーク温度分布を用いることにより、HAZ の結晶粒径分布式が工業用純ニッケルの場合は (13) 式、供試鋼のオーステナイト結晶粒の場合は (14) 式のように求められた。(14) 式における D_0 の値としては加熱過程に形成されるオーステナイト初期粒径を用いればよい。さらに、溶融線近傍のオーステナイト結晶粒径分布を求める場合には、(14) 式における D_0 を零とおいた (15) 式を用いることができる。

(3) 供試鋼の溶融線におけるオーステナイト結晶粒径 (HAZ の最大オーステナイト結晶粒径にほぼ対応する) と溶接入熱との間には (16) 式の関係がある。すなわち、溶融線におけるオーステナイト結晶粒径は溶接入熱の平方根に比例する。

(4) HAZ の粗粒化域の幅は (17) 式あるいは (18) 式 (すなわち、Fig. 9 あるいは Fig. 10) を用いることにより推定することができる。

(5) 溶接速度がきわめて遅くなると、このような関係式を使った場合の誤差は大となるが、溶接速度が少なくとも約 12 cm/min 以上ではじゅう分使用できる。

おわりに、本実験の遂行に際し終始熱心に協力された大阪大学技官毛利敬三氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 井川, 大重, 野井, 神田: “溶接熱影響部の結晶粒粗大化に関する研究 (第6報)”, 本誌, 投稿中
- 2) 井川, 新, 大重: “同上 (第1報)”, 本誌, 42巻 (1973), 2号, 135—145
- 3) 井川, 新, 大重, 馬久地: “同上 (第4報)”, 本誌, 46巻 (1977), 5号, 270—278
- 4) 井川, 新, 大重, 山根, 山中: “同上 (第2報)”, 本誌, 42巻 (1973), 8号, 791—797
- 5) 井川, 新, 大重, 野井: “同上 (第3報)”, 本誌, 44巻 (1975), 2号, 161—167
- 6) 井川, 大重, 野井: “同上 (第5報)”, 本誌, 46巻 (1977), 7号, 395—402