溶接熱影響部の結晶粒粗大化に関する研究(第2報)*

井川 博** 新 成夫** 大重 広明**
山根 伸*** 山中 菊雄****

Study on the Grain Growth in Weld-Heat Affected Zone (Report 2)*

by Hiroshi Ikawa**, Shigeo Shin**, Hiroaki Oshige**,
Shin Yamane** and Kikuo Yamanaka****

Abstract

In Report 1 of this study, the authors showed that grain growth during thermal cycles can be calculated using the grain growth equation during isothermal heating.

It is considered that weld thermal cycles consist of heating cycle, isothermal holding and cooling cycle. Therefore, in this report, grain growth during these cycles under various conditions was examined using commercial-purity nickel.

The effect of the initial grain size (the grain size before the thermal cycle) on grain growth during thermal cycles was also examined.

It was found that the method to estimate the grain size during linear thermal cycles could be obtained, giving the level of initial grain size.

Results obtained are as follows;

- 1) Grain growth during heating cycle, isothermal holding and cooling cycle under various conditions can be calculated using the method proposed in the Report 1 of this study.
- 2) Grain growth during various thermal cycles are as shown in Figs. 2, 4 and 6.
- 3) The effect of initial grain size on grain size after thermal cycles varies according to the condition of the thermal cycles, as shown in Fig. 10.
- 4) The effect of multiple thermal cycle on the grain size can be calculated as shown in Fig. 12.
- 5) If the condition of thermal cycle is given and the thermal cycle can be considered as a linear form at near the peak temperature, grain size after this thermal cycle can be obtained using Figs. 13, 14 and 15.

1. 緒 言

溶接熱影響部における結晶粒の粗大化は溶接部の強度, じん性, 高温われならびに応力除去焼鈍われ感受性などに種々の影響を与える。この粗粒化現象を基礎的に追求するためにはまず溶接熱サイクル時における結晶粒の成長を定量的にとらえる必要がある。よって著者らは第1報¹⁾において, 工業用の純金属を用い恒温における結晶粒成長のデータを基礎にして熱サイクル過程の結晶粒の成長を算出しうることを確かめた。

このような方法を実際の溶接熱影響部に適用するための次の段階として, 溶接熱影響部において想定される種々の条件下の熱サイクルにおける結晶粒の成長が第1報において示したような方法で算出しうるかどうかを確かめる必要がある。溶接熱影響部における熱サイクルは加熱サイクル, 一定温度における保持ならびに冷却サイクルの三つの要素から構成される。したがって, 本報においてはまずこれらのおのおのあるいはこれらを組合せた熱サイクルを与えた場合に第1報に述べた方法が適用できるかどうかを確かめた。いっぽう結晶粒粗大化を防止する方法の一つとして溶接前の結晶粒を細かくしておくことが考えられるので, これについても実験, 検討を行なった。

さらに初期結晶粒の大きさならびに熱サイクル条件が与えられた場合の熱サイクル後の結晶粒の大きさの推定方法について検討を行なった。

*原稿受付 昭和47年12月25日(45年度春季全国大会に発表)

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

***正 員 三井造船(株) Member, Mitsui Shipbuilding and Engineering Co.

****正 員 三菱化工機(株) Member, Mitsubishi Kakoki Kaisha Ltd.

2. 供試材料ならびに実験方法

第 1 報における結果を応用する意味ならびに実験の容易さなどを考慮し、実験はすべて工業用純ニッケルを用いて行なった。しかし他の純金属においても現象は基本的には同一であると考えられるので、本報に示すような方法はニッケルだけでなく他の純金属にも応用できるものと考えられる。実験に用いた板厚 5 mm の工業用純ニッケルの化学組成を Table 1 に示す。これは第 1 報で用いたものと同一の材料である。熱サイクル前の結晶粒の大きさを変化させる場合をのぞき、冷間加工後再結晶させることにより第 1 報と同様結晶粒の大きさが 3×10^{-2} mm の試料を製作し、これを基準材とした。熱サイクル、その他の実験方法は第 1 報と同様である。

Table 1 Chemical compositions of commercial-purity nickel used (wt %)

C	Si	Mn	S	Fe	Ni
0.005	0.05	0.23	0.002	0.17	99.52

3. 実験結果ならびに考察

3.1 種々の熱サイクルにおける結晶粒成長

3.1.1 加熱速度の影響

Fig. 1 は基準材を Fig. 1 中に示すように、ほぼ直線的に種々の加熱速度で 1400°C まで加熱したときの結晶粒の大きさを示す。Fig. 1 中の曲線は第 1 報で述べたように、熱サイクルを階段状の熱サイクルに細分し、そのおのこの段階において恒温における結晶粒成長式を適用して積み重ねていくという方法により算出した結果である。すなわち、

$$(D_{i-1})^a = k_0 \sum_{i=1}^{i-1} \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i) + (D_0)^a \dots (1)$$

Fig. 1 Effect of heating rate on grain growth.

ただし、 D_{i-1} : 熱サイクル時の温度 T_i における結晶粒の大きさ

D_0 : 熱サイクルを与える前の結晶粒の大きさ

Δt_i : 熱サイクルを階段状に分割したときの温度 T_i における保持時間

a, k_0, Q : 材料によって定まる定数

R : ガス定数

加熱速度は約 150~550°C/sec の範囲で変化させたが、この範囲では実測値と計算値はほぼ一致している。このような結果から、加熱速度がこれより非常に大きい場合には問題となるかもしれないが、通常のアーク溶接のような場合を想定すると、溶接熱サイクルの加熱過程での結晶粒成長は上記のような計算により表わすことができると考えられる。Fig. 2 は熱サイクル前の結晶粒の大きさ（以後、初期粒の大きさと記す） $D=3 \times 10^{-2}$ mm の純ニッケルを種々の加熱速度で加熱したときを想定した場合の熱サイクル中の結晶粒の成長を計算した結果である。これによるといずれの加熱速度においても約 1000°C まではほとんど結晶粒は成長せず、その後は各加熱速度に応じて結晶粒は急激に成長する。

3.1.2 ピーク温度における保持の影響

つぎに、実際の溶接においては加熱サイクルからただちに冷却サイクルには移らず、あるピーク温度で保たれた後冷却されるから、そのような熱サイクルを想定した

Fig. 2 Effect of heating rate on grain growth. (Calculated on model cycles)

実験を行なった。Fig. 3 は図中に示すように 1400°C まで約 6 sec で加熱し種々の時間保持したときの結晶粒の大きさを示す。横軸の零点は加熱サイクルによ

で 1400°C に達した時点にとってある。Fig. 3 中の曲線は計算値であるが、計算値と実測値はかなりよく一致している。したがってこのような、ピーク温度において短時間保持されるような熱サイクルにおいても第1報に述べた方法で結晶粒の成長を算出しようことがわかる。

Fig. 3 Effect of isothermal holding at 1400°C on grain growth.

したがって、Fig. 3 と同様の加熱サイクルの途中種々の温度で短時間保持するような熱サイクルを想定し、結晶粒の成長を計算した結果を Fig. 4 に示す。ピーク温度に保持した後は結晶粒は第1報で述べた本材料における恒温結晶粒成長式である次式にしたがって成長する

$$D^4 - D_0^4 = k_0 \cdot t \cdot \exp(-Q/RT) \quad \cdots \cdots (2)$$

$$(k_0 = 9.514 \times 10^{10} \text{ mm}^4/\text{min}, Q = 90.1 \text{ Kcal/g-atm})$$

ただし、 D : 温度 T (°K) において t (min) 保持したときの結晶粒の大きさ (mm)

Fig. 4 において、高温で保持した場合ピーク温度に達した時点において結晶粒がかなり成長しているので上記(2)式における D_0 の値は大きい。しかし温度がじゅう分が高く温度の因子が大きく作用して短時間でも結晶粒は急速に成長するものと考えられる。低温度で保持したときはピーク温度に達した時点において D_0 の値は小さいが温度の因子がほとんど作用しないので結晶粒はあまり成長しない。このことから、溶接熱影響部のとくにボンド近傍の結晶粒の成長を考える場合は融点直下に保持される時間に留意しなければならないことがわかる。

3.1.3 冷却速度の影響

Fig. 5 は図中に示すように室温から 5 sec で 1400°C

Fig. 4 Effect of isothermal holding at various temperatures during heating cycles on grain growth. (Calculated on model cycles)

まで直線的に加熱し、ただちに種々の冷却速度で室温まで直線的に冷却した後の結晶粒の大きさを示す。Fig. 5 中の曲線は計算値であるが、測定値と計算値はよく一致している。このように冷却サイクルにおいても上述の方法により結晶粒の大きさを算出しようことがわかったので、種々の冷却速度の冷却サイクルを想定した場合の冷却中の結晶粒の大きさを算出した。その結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 によると、とくに冷却速度の小さい場合には冷却サイクルに移った直後の高温における結晶粒の成長はいちじるしい。しかしいずれの冷却速度においても結晶粒の成長がいちじるしいのは冷却途中約 1300°C までで、それ以下の温度においてはほとんど成長しなく

Fig. 5 Effect of cooling rate on grain growth.

なっている。このように冷却速度のいかにかわらず
ほぼ 1300°C 以下で結晶粒の成長がほとんど生じなくなる
理由は次のように考えられる。

Fig. 6 Effect of cooling rate on grain growth.
(Calculated on model cycles)

すなわち、本材料における結晶粒成長は(2)式で表わ
されるとすると結晶粒成長速度式は(3)式ようになる

$$\frac{dD}{dt} = \frac{k_0}{4D^3} \exp(-Q/RT) \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)式からわかるように結晶粒成長速度は温度に関する
項 $\exp(-Q/RT)$ に比例し、その時点での結晶粒の大き
さ D の 3 乗に逆比例する。Fig. 7 は Fig. 6 より冷
却サイクル中の D の値を求め(3)式によって各温度に
おける結晶粒成長速度を計算した結果である。いずれの
冷却速度においても温度の低下とともに結晶粒成長速度
は急激に低下している。たとえば、冷却速度が非常に小
さい場合 (1°C/sec) には 1300°C において結晶粒成長
速度はほとんど無視しうるほど小さな値となる。また冷
却速度が大きいほど(3)式において D の値が小さいの
で Fig. 7 に示す結晶粒成長速度は大きくなっている。
したがって、冷却速度が非常に大きい場合 (500°C/sec)
にはたとえば 1300°C における結晶粒成長速度 (約 2.3×10^{-2} mm/sec) は冷却速度が非常に小さい場合 (1°C/
sec) の成長速度 (6.3×10^{-4} mm/sec) の約 40 倍である。
しかしながら冷却速度が 500 倍であるから結晶粒の成長
量は冷却速度が小さい場合よりさらに少なく無視しうる
程度になる。このようなことから、いずれの冷却速度に
おいても 1300°C 以下の温度において結晶粒はほとんど
成長しなくなるものと考えられる。もちろん、実際の溶
接では冷却速度は一定でなく、通常温度の低下とともに
小さくなるので Fig. 6 に示したような直線的な冷却
サイクルにおけるよりも結晶粒成長が完了する温度は
少し低温度側に移行すると考えられる。Fig. 8 は図中に

Fig. 7 Rate of grain growth during cooling cycles.
(Calculated)

示したようにピーク温度を 1400°C とし、加熱、冷却速
度の大きいサイクル A ならびに加熱、冷却速度の小さい
サイクル B を想定し、それぞれの熱サイクルにおいて
1200°C ならびに 1100°C まで冷却して、その温度で保
持したときの結晶粒の成長を算出したものである。Fig.
8 からわかるように、加熱、冷却の速いサイクル A にお
いては 1200°C において少し結晶粒は成長するが、1100°C
で保持した場合には結晶粒の成長はごくわずかである。
加熱、冷却の遅いサイクル B においては 1200°C に保持
しても結晶粒はほとんど成長していない。

このような結果から、溶接熱サイクルの冷却過程にお
いても融点近くの高温における冷却速度のみが熱サイ
クル後の結晶粒の大きさに影響をおよぼし、少なくとも
1100°C 以下における冷却速度はほとんど影響をおよぼ

Fig. 8 Effect of isothermal holding during cooling
cycles on grain growth. (Calculated on
model cycles)

さないと考えられる。

以上, 加熱サイクル, 一定温度保持ならびに冷却サイクルにおける結晶長粒の成は(1)式によって算出しようことを確かめたが, (1)式が適用できるのは(1)式を導くための基礎式とした(2)式が成り立つ温度範囲である。この温度範囲は第1報に示したように $900 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ である (第1報 Fig. 5)。しかし 1400°C までの熱サイクルにおいても(1)式により結晶粒の成長を表わすことを実験的に確かめし, 溶接熱サイクルにおいては 900°C 以下ではほとんど結晶粒は成長しないので本材料においてはほぼすべての温度範囲において(1)式を適用しようと考えられる。

3.2 熱サイクル過程の結晶粒成長におよぼす初期粒の大きさの影響

材料ならびに溶接条件が一定の場合には溶接熱サイクル後の結晶粒の大きさを調整する方法として母材の結晶粒の大きさを調整するということが考えられる。したがってここでは熱サイクル後の結晶粒の大きさにおよぼす初期粒の大きさの影響について検討を行なった。

まず 5 mm 厚のニッケル板を 2 mm 厚まで冷間加工した後種々の温度で再結晶させて結晶粒の大きさの異なる試料を作製し, これに熱サイクルを与えた。

Fig. 9 は初期粒の大きさがそれぞれ約 $5, 15, 20, 25 \times 10^{-2}\text{ mm}$ の試料に図中に示すような加熱サイクルを与えた場合の熱サイクル過程における結晶粒の大きさを示したものである。Fig. 9 中の曲線は(1)式により算出した値である。Fig. 9 によると初期粒の大きさが小さい場合は熱サイクル中に急激な成長がおこるが, 初期粒の大きさが大きくなるにつれて成長は緩慢になり, 初期粒の大きさが $25 \times 10^{-2}\text{ mm}$ の場合には 1400°C まで加熱してもほとんど成長は生じない。また, Fig. 9 をみると初期粒の大きさが約 $5, 15$ および $20 \times 10^{-2}\text{ mm}$ の場合は 1400°C まで加熱されると結晶粒の大きさがほぼ同一になる。

このような現象を明確にするため 1400°C までの加熱サイクルを与えた後の結晶粒の大きさを初期粒の大きさに対してプロットした結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 中の破線は与えた熱サイクルにおいて, 実線は種々の加熱速度で 1400°C まで直線的に加熱するような模式サイクルにおいてそれぞれ(1)式を用いて算出したものである。この図から次のことがわかる。すなわち初期粒の大きさを大きくしていくと曲線は対角線 (熱サイクル中に結晶粒がまったく成長しない場合を表わす) に近づく。逆に初期粒の大きさを小さくしていくと熱サイクル後の結晶粒の大きさは, 初期粒の大きさがある程度大きい場合には小さくなっていくが, やがてほぼ一定値をとるよ

Fig. 9 Grain growth of the commercial-purity nickel having various initial grain size during heating cycles.

うになり, それよりもいくらか初期粒の大きさを小さくしても熱サイクル後の結晶粒の大きさを小さくすることができなくなる。そして初期粒の大きさを零と仮定しても熱サイクル後の結晶粒の大きさはそれぞれの熱サイクルに対応したある一定値をとる。これは(3)式において結晶粒の成長速度は D^{-3} に比例するので, 初期粒の大きさが小さい方が結晶粒成長のための駆動力が大きく, 1400°C というような高温に加熱される間にそれよりも大きな初期粒の大きさをもつものに追いついてしまうためである。また熱サイクル過程における結晶粒の算出式である(1)式を用いて考えると次のようになる。すなわち(1)式において右辺の第1項は熱サイクル中の成長量, 第2項は初期粒の大きさの影響を示すので熱サイクル中に結晶粒が成長する度合いは第1項と第2項の相対

Fig. 10 Relation between initial grain size and grain size after heating cycles under various heating rates.

的な大きさによってきまる。初期粒の大きさが小さいときは温度が上昇すると第1項が支配的になり結晶粒はよく成長するが、初期粒の大きさが大きい場合には高温になっても第2項が支配的であるので結晶粒はあまり成長しないものと考えられる。

つぎに加熱速度を変化させた場合(溶接熱影響部においては溶接条件を変化させることに対応すると考えられる)について考える。加熱速度が大きいほど(1)式の右辺の第1項が小さくなり、相対的に第2項すなわち初期粒の大きさによる影響が大きくなるので、Fig. 10 から明らかなように熱サイクル後の結晶粒の大きさはより強く初期粒の大きさに影響される。すなわち初期粒の大きさを小さくすることによって熱サイクル後の結晶粒の大きさを小さくしうる初期粒の大きさの範囲が大きくなる。このような結果から、入熱が大きい溶接を行なうときには溶接前の結晶粒を細かくしておいても溶接熱影響部の細粒化にはあまり効果がなく、入熱の小さな溶接を行なうことの方が細粒化には効果的であるということが確かめられた。もちろん入熱が大きい場合でも Fig. 10 において熱サイクル後の結晶粒の大きさが対角線に近づく(すなわち熱サイクル中に結晶粒がほとんど成長しない)ような初期粒の大きさの範囲においては初期粒の大きさを小さくしておくことの効果がある。

このような初期粒の大きさと熱サイクル後の結晶粒の大きさの関係から多重サイクルにおける結晶粒の成長を推定することができる。このことを確かめるために初期粒の大きさが 3×10^{-2} mm の試料に Fig. 11 に示すような、ピーク温度を1400, 1300, 1200, 1100ならびに1000°Cと変化した加熱、冷却サイクルを次のように組み合わせた多重熱サイクルを与えた。すなわち、Type I としてはピーク温度が1400°Cの同一サイクルを1~5回与えたもの、Type II としてはピーク温度が1400

°C+1300°C+……と順次低温の熱サイクルを与えていったものである。

Fig. 12 (A) 中の曲線は Fig. 11 に示したような、各ピーク温度をもつ熱サイクルにおいて初期結晶粒の大きさと熱サイクル後の結晶粒の大きさを(1)式を用いて算出した結果である。多重熱サイクルを与えた場合、第1回目の熱サイクルを与えた後の結晶粒の大きさが第2回目の熱サイクルにおける初期粒の大きさになる。したがって、Fig. 12 においてたとえば Type I の多重熱サイクルにおいては第1回目の熱サイクルにおける成長量が $\overline{ab}$ 、第2回目の熱サイクルにおけるそれが $\overline{cd}$ というぐあいに多重熱サイクル後の結晶粒の大きさを求めることができる。このようにして Type I ならびに II の多重熱サイクルにおいて熱サイクル後の結晶粒の大きさを Fig. 12(A) 中の曲線より求めた結果を Fig. 12(B) 中の折れ線で示す。Fig. 12(B) 中には実測した結果も示してある。

Fig. 12(B) より次のことがわかる。Type I のように

Fig. 12 Grain size after multiple thermal cycles.

同じ熱サイクルを何回もうける場合には熱サイクルごと結晶粒はかなり成長するが、その増加の度合いはしだいに減少していく。Type II のようにピーク温度が順次低下していくような場合には第2回目以後の熱サイクルによる成長量は急激に小さくなり、熱サイクル後の結晶粒の大きさはほぼ一定値に達する。もちろん Type II の逆、すなわちピーク温度が順に高くなるような多重熱サイクルにおいては結晶粒は逆に急激に成長していく。これらの現象は Fig. 10 において行なったのと同様の考え方により説明することができる。

このようなことから溶接熱影響部においても同じピーク温度の熱サイクルをうけると結晶粒は熱サイクルごとにしだいに大きくなっていくが、ピーク温度が順次低くなるか高くなるような多重熱サイクルをうける場合には

Fig. 11 Applied multiple thermal cycles.

結晶粒の大きさはほとんどピーク温度がもっとも高い熱サイクルのみによって決定されると考えてよいことがわかる。

3.3 初期粒の大きさならびに熱サイクルが与えられた場合の結晶粒の推定

3.1では加熱サイクル, 一定温度保持ならびに冷却サイクル過程の結晶粒の成長は(1)式を用いて計算しうることを示し, 3.2では種々の初期粒の大きさをもつ試料においても熱サイクル過程における結晶粒の成長は(1)式を用いて計算しうることを示した。ここでは初期粒の大きさならびに熱サイクルが与えられた場合の熱サイクル後の結晶粒を簡単に推定する方法について考える。

熱サイクル中の結晶粒の成長は(1)式によって計算できることがわかっている。(1)式における右辺第1項は熱サイクルによって定まり, 第2項は初期粒の大きさによって定まる。したがってまず熱サイクル条件と右辺第1項中の $\sum \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i)$ の値の関係を求め, つぎに右辺第1項ならびに第2項と熱サイクル後の結晶粒の大きさの関係を求める。

Fig. 13 は種々の速度で直線的に加熱ならびに冷却した時の温度と $\sum \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i)$ の関係を示す。この場合, 熱サイクルを 5°C ごとに分割して計算を行なった。したがって加熱, 冷却速度によって Δt の値は変

Fig. 13 The value of $\sum \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i)$ during heating and cooling cycles under various rates.

化している。Fig. 13 において加熱サイクルの場合には加熱速度と温度が与えられれば $\sum \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i)$ の値が求められる。冷却サイクルの場合には冷却中の目的とする温度における縦軸の値からその熱サイクルのピーク温度におけるそれを差し引くことによって冷却サイクル中の $\sum \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i)$ の値が求められる。なお実際には縦軸の値が小さな部分では結晶粒はほとんど成長しないためあまり正確な値は必要でないが, 縦軸の値が大きな部分ではその値が少し変化するだけで結晶粒の大きさに大きく影響するのでこのような部分の正確な拡大図が必要である。

Fig. 14 は種々の温度で恒温保持した場合の $t \cdot \exp(-Q/RT)$ の値を示す。この値は熱サイクルにおける $\sum \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i)$ と等価な値である。

Fig. 14 The value of $t \cdot \exp(-Q/RT)$ during isothermal holding at various temperatures.

したがって加熱, 恒温保持, 冷却を組み合わせた熱サイクルが与えられれば, それぞれの熱サイクル部分における Fig. 13 および 14 の縦軸の値を加え合わせることで熱サイクル全体における $\sum \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i)$ の値を求めることができる。

Fig. 15 は種々の初期粒の大きさにおいて $\sum \Delta t_i \cdot \exp(-Q/RT_i)$ の値と熱サイクル後の結晶粒の大きさ D の関係を(1)式を用いて計算した結果である。Fig. 15 中の測定値は初期粒の大きさが $3 \times 10^{-2} \text{ mm}$ の場合において第1報ならびに本報の3.1で種々の熱サイクル条件において求めた値を Fig. 13 および 14 を用いてプロットした結果である。測定値はほぼ Fig. 15 の初期粒の

大きさが 3×10^{-2} mm の場合の曲線上にある。このことから Fig. 13, 14 および 15 を用いることによって任意の初期粒の大きさをもつ試料の加熱、恒温保持ならびに冷却部分を含む任意の直線的な熱サイクル後の結晶粒の大きさを推定しうることが明らかとなった。

Fig. 15 Relation between the value of $\sum \Delta t_i \exp(-Q/RT_i)$ and grain size after thermal cycles.

Fig. 15 において初期粒の大きさが零の場合の直線は与えられた熱サイクル後の結晶粒の大きさをそれ以下にすることができない限界値を示している。たとえば、溶接を行なった場合、溶接条件が決まると熱影響部の熱サイクルすなわち Fig. 15 の横軸の値が定まるのでそれに対応したこの直線の縦軸の値以下に結晶粒の大きさをおさえることができないことになる。

また実際の溶接では加熱、冷却が直線的ではないので上記のように簡単には熱影響部における結晶粒の大きさを推定することはできないかもしれない。しかし、Fig. 2 や 6 などからわかるように熱サイクルにおいて結晶粒がいちじるしく成長するのは本材料の場合は約 1200°C 以上の温度にほぼ限られる。したがって溶接熱サイクル、とくにボンド近傍におけるそれにおいて高温部分の加熱サイクル、ピーク温度での保持ならびに高温部分の冷却サイクルをそれぞれ直線で近似することができれば、その部分の結晶粒の成長は Fig. 13, 14 および 15 を用いて推定しうるものと考えられる。

本実験においては実験の容易さのため工業用の純ニッケル板を用いて実験、検討を行なったが、鋼の場合にも基本的には現象は同一であるので上記の方法で熱影響部の結晶粒の成長を推定することは可能であろう。ただ、この場合には初期粒の大きさをどのように考えるかが問題となると考えられる。

4. 総括

溶接熱影響部における結晶粒の成長を推定する目的で工業用純ニッケルを用いて実験した結果を次に要約する。

1. 次のような条件の範囲における加熱、恒温保持ならびに冷却サイクル後の結晶粒の大きさは第1報において得た(1)式を用いて算出できることが実験的に確かめられた。(Figs. 1, 3, 5)

加熱速度 150~550°C/sec

冷却速度 15~150°C/sec

恒温保持時間 0~8 sec

2. 加熱サイクルにおいては、加熱速度が小さい場合(たとえば 100°C/sec)は約 1100°C から、大きい場合(たとえば 1500°C/sec)は約 1200°C から結晶粒の成長はいちじるしくなる。(Fig. 2)

3. 加熱サイクル後、とくに高温において保持された場合、数秒間で結晶粒は急速に成長する。(Fig. 4)

4. 冷却サイクルにおいては、冷却途中約 1300~1200°C で結晶粒の成長はほぼ完了する。したがってこれより高温における冷却速度のみが重要となる。(Fig. 6, 8)

5. 初期粒の大きさと熱サイクル後の結晶粒の大きさの関係は Fig. 10 のようになり、入熱が小である場合は初期粒を小さくすればするほどその効果が大きであるが、入熱が大である場合は初期粒調整の効果の少ないことが確かめられた。

6. 多重熱サイクルの場合、ピーク温度が同一の熱サイクルを数回与えた場合には結晶粒は徐々に大きくなっていくが、ピーク温度が変化するような熱サイクルを与えた場合には最高のピーク温度の熱サイクルで結晶粒の大きさはほぼ定まってしまう。(Fig. 12)

7. 初期粒の大きさが与えられた場合、任意の直線的な加熱、恒温保持、直線的な冷却サイクル後の結晶粒の大きさは Fig. 13, 14 および 15 を用いて簡単に推定しうる。

おわりに、実験材料をご提供いただいた三菱重工業株式会社広島研究所、化学分析をしていただいた日本金属工業株式会社、熱サイクル実験においてご協力いただいた鉄鋼短期大学溶接構造工学科ならびに実験実施に際し協力いただいた馬久地裕工学修士の各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 井川, 新, 大重: 溶接熱影響部の結晶粒粗大化に関する研究 (第1報), 本誌, 42-2 (1973), 134-145