再結晶式による溶接熱影響部の硬さ分布の計算*

—溶接熱影響部の再結晶軟化現象の定量的研究 (第1報)—

井川 博** 大重 広明*** 伊達 洋彦****

Calculation of the Hardness Distribution in Weld-Heat Affected Zone by Recrystallization Equation*

—Quantitative Study of Recrystallization in Weld Heat Affected Zone (1)—

by Hiroshi Ikawa**, Hiroaki Oshige*** and Hirohiko Date****

The method to calculate the hardness distribution in weld-heat affected zone of cold rolled materials was examined using commercial-purity nickel and aluminum.

That is, the method to calculate the fraction of recrystallization during thermal cycle was proposed, based on isothermal recrystallization equation. Then, the validity of this method in calculation of hardness distribution in weld-heat affected zone was confirmed experimentally.

1. 緒 言

冷間加工材を溶接すると溶接熱影響部 (HAZ) が溶接熱により軟化し, 継手効率が低くなる. この問題に関しては従来から主としてアルミニウムを用いて二, 三の検討がなされている. たとえば, 現象的には難波ら¹⁾の検討があり, 溶接入熱との関係については尾崎²⁾が若干の定量的取扱を行っている. さらに秋田ら³⁾は軟化幅と継手強さの関係について理論的ならびに実験的検討を行い, TIG, MIG などにおける通常の溶接条件においては, 十分な継手強さを得ることはかなり困難であるとしている.

このような問題を解決する方向としては, 電子ビーム溶接などの熱集中のよい溶接法を用いる方法, 材料面から溶接熱サイクル過程において再結晶を生じにくい材料を開発する方法などが考えられる. これらの場合, 継手強さを予測したり, 適切な材料や溶接条件を選定するためには, 材料因子や溶接条件と HAZ の軟化幅との関係をできるだけ正確に予測する必要がある.

この観点から, 本研究では材料因子や溶接条件の影響が簡単に導入でき, かつ正確に再結晶現象を表示できる再結晶式に基づいて HAZ の軟化現象を定量的に検討した. 本報では定量化の方法とその妥当性について述べる.

2. 供試材料ならびに実験方法

実験に供した工業用純ニッケルならびにアルミニウム (以後それぞれ Ni, Al と記す) の化学組成を Table 1 に示す. 圧下率は Ni の場合67%, Al の場合75%とそれぞれ一定とした.

Table 1 Chemical compositions of materials used (wt%)

Commercial-purity nickel								
C	Si	Mn	S	Fe	Ni			
0.005	0.05	0.23	0.002	0.17	99.52			
Commercial-purity aluminum								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.09	0.30	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	99.58

小試片に恒温加熱ならびに加熱, 冷却熱サイクルを高周波誘導加熱装置により与えた. Ni については濃硝酸, Al についてはフッ酸10:塩酸15:水90の溶液により腐食することにより結晶粒界を現出させ, 再結晶率を点算法により測定した.

ほぼ2次元ビードとなる条件で溶加材を用いずTIGアークを走らせ, 板裏面の HAZ において溶接熱サイクルを測定した. 溶接条件は, Ni の場合は板厚 2mm, アーク電圧 $E=14.5$ V, 溶接電流 $I=88$ A, 溶接速度 $V=20$ cm/min および溶接入熱 $H=3.8$ kJ/cm, Al の場合は板厚 4 mm, アーク電圧 $E=22$ V, 溶接電流 $I=164$ A, 溶接速度 $V=34$ cm/min および 溶接入熱 $H=6.3$ kJ/cm である.

*原稿受付 昭和54年3月28日 (昭和52年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 大阪工業大学 Member, The Osaka Institute of Technology

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

****正 員 日産自動車(株) Member, Nissan Motors Co. Ltd.

3. 実験結果ならびに考察

3.1 恒温加熱過程の再結晶

通常、再結晶率を顕微鏡写真上で点算法により測定することにより再結晶現象の定量化が行われている。いっぽう、HAZ の再結晶現象を検討する最大の目的はそれが継手強さに及ぼす影響を知ることであり、この観点からは硬さ測定の方がより現実的である。この観点から本研究では、あらかじめ再結晶率と硬さとの関係を求めておき、測定した硬さをこの関係を用いて再結晶率に換算して定量化を行い、その結果を必要に応じて硬さに逆算するという方法を用いた。

たとえば、Ni について点算法により求めた再結晶率と硬さとの関係を Fig. 1 に示す。加工材の硬さは Hv 260 であったが、これが Hv 226 になるまでは顕微鏡組織上は再結晶粒が現れなかった。すなわち、この間はいわゆる回復現象により硬さが低下する。しかし、再結晶が開始すると硬さと再結晶率の間にはほぼ直線関係が成立し、完全軟化したときの硬さは Hv 89 であった。よって、この場合硬さと再結晶率の間には (1) 式が成立する。

Fig. 1 Relation between hardness and fraction of recrystallization (Ni)

$$f = (226 - Hv) / (226 - 89) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 f : 再結晶率である。

前述のように、これはあくまで再結晶率と硬さとの関係であり、再結晶が生じるまでの硬さ変化はこの式により表示できない。

さて、恒温加熱過程の再結晶過程を表わす式として従来次に示す二つのタイプが用いられてきた。

$$\log \ln(1/(1-f)) = \log k + n \log t \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\log(f/(1-f)) = \log k' + n' \log t \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 t : 加熱時間、 k , k' , n , n' : 定数である。

(2) 式は通常の Jhonson-Mehl の式であり、(3) 式は Speich⁵⁾ により求められた式である。これらの式は核生成、界面移動速度、衝突効果等により意味づけが

試みられているが、基本的には実験式と見なせる。

いま、Ni を種々の温度で種々の時間加熱して硬さを測定した結果を Fig. 2 に示す。つぎに、この結果を (1) 式により再結晶率に変換した値を用いて (2) 式の左辺を計算して $\log t$ に対してプロットした結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 によると両者には一定の傾きの直線関係がある。すなわち、(2) 式を用いると一定温度における定数の値は一定とみなすことができるため、熱サイクル過程の f の変化を計算するのに好都合である。これに対し、実験結果を (3) 式により整理すると一定の傾きの直線関係は得られなかった。以上のような結果は Al についても同様であった。よって、以後 (2) 式を用いて検討を行った。

Fig. 2 Change of hardness during isothermal heating (Ni)

Fig. 3 Relation between heating time and $\log \ln(1/(1-f))$ during isothermal heating (Ni)

Fig. 3 から明らかなように、(2) 式における n の値は加熱温度にかかわらず一定である。つぎに、定数 k の値の温度依存性をみるため、Fig. 3 の結果から各温度における k の値を求め、絶対温度の逆数に対してプロットした結果を Fig. 4 に示す。この結果より (4) 式が成り立つ。

$$k = k_0 \cdot \exp(-Q/RT) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 T : 絶対温度、 k_0 : 定数、 R : ガス定数である。Fig. 4 の直線から定数 Q (みかけの活性化エネルギー) な

Fig. 4 Relation between reciprocal absolute temperature and log k in Eq. (2) (Ni)

Table 2 Constants in equations (2) and (4)

Material	n	Q (Kcal/mol)	k_0 (sec ⁻ⁿ)
Ni	2.1	160.0	1.5×10^{34}
Al	1.3	70.0	1.2×10^{22}

らびに k_0 の値を求めることができる。

以上のようにして Ni ならびに Al について求めた (2) ならびに (4) 式の定数値を Table 2 に示す。

3.2 熱サイクル過程の再結晶率の計算方法

(2) ならびに (4) 式を用いて恒温加熱過程の再結晶現象を表せることが明らかになったため、これを用いて熱サイクル過程の再結晶率を定量的に表すことを考える。

まず、(2) ならびに (4) 式を (5) 式のように変形する。

$$\{\ln(1/(1-f))\}^{1/n} = k_0^{1/n} t \cdot \exp(-Q/nRT) \quad \dots\dots\dots (5)$$

いま、Fig. 5 に示すように、熱サイクルを階段状に分割し、おのこのステップにおいて恒温加熱過程の再結晶式が成り立つと考える。この場合、(5) 式の左辺の量は時間に正比例するため、一定温度においては、一定時間間隔でその変化量は常に一定である。たとえば、温度 T_1 における変化量は (6) 式で表せる。

$$\Delta \{\ln(1/(1-f))\}^{1/n} \Big|_{T=T_1} = k_0^{1/n} \Delta t_1 \exp(-Q/nRT_1) \quad \dots\dots\dots (6)$$

そこで、各ステップにおけるこれらの変化量を加え合せ、初期状態における再結晶率をゼロとすると、P' 点における再結晶率 f_i は (7) 式ようになる。

$$\{\ln(1/(1-f_i))\}^{1/n} = k_0^{1/n} \sum_{i=1}^{i-1} \Delta t_i \cdot \exp(-Q/nRT_i) \quad \dots\dots\dots (7)$$

すなわち、熱サイクルが与えられれば、その熱サイクルについて $\sum \Delta t_i \cdot \exp(-Q/nRT_i)$ の値を計算することにより熱サイクル過程の再結晶率の変化は (7) 式を用いて算出することができる。

Fig. 5 Schematic thermal cycle for calculation

Fig. 6 Change of the fraction of recrystallization on heating (Comparison of calculated value with measured value (Ni))

Fig. 7 Change of the fraction of recrystallization on heating (Comparison of calculated value with measured value (Al))

3.3 熱サイクル過程の再結晶率ならびに硬さ変化の計算の妥当性

Figs. 6 ならびに 7 は、それぞれ Ni ならびに Al を一定速度で加熱し、種々の温度から水冷した試料の硬さを測定し、その結果を 3.1 で求めたような関係を用いて再結晶率 f に換算した結果である。図中の実線は 3.2 で求

めた方法ならびに Table 2 の定数値を用いた計算値である。これらの図において、実測値と計算値とはほぼ一致している。

つぎに、計算により熱サイクル過程の硬さ変化をどのように予測できるかを示したのが Figs. 8 ならびに 9 である。すなわち、これらの図における測定値は加熱途中の種々の温度から水冷したときの硬さを示し、計算値は Figs. 6 ならびに 7 に示した再結晶率の計算結果を 3.1 に示した方法により硬さに逆算した結果である。Figs. 8 ならびに 9 によると、回復による初期の硬さ低下は計算により表わすことができないが、その後の急激な硬さ変化は計算によりほぼ求めることができることがわかる。

Fig. 8 Change of hardness on heating (Comparison of calculated value with measured value (Ni))

Fig. 9 Change of hardness on heating (Comparison of calculated value with measured value (Al))

Fig. 10 は Ni を二、三のピーク温度まで加熱し、その後種々の冷却速度で室温まで直線的に冷却したときの再結晶率を実測値と計算値とで比較した結果である。この場合も実測値と計算値とはほぼ一致している。

以上の結果から、加熱、冷却を含む熱サイクル過程における硬さの変化が再結晶式に基づいてほぼ計算できることが明らかになった。

Fig. 10 Relation between cooling rate and fraction of recrystallization (Comparison of calculated value with measured value (Ni))

Fig. 11 Fraction of recrystallization in HAZ of Ni (Comparison of calculated value with measured value)

Fig. 12 Fraction of recrystallization in HAZ of Al (Comparison of calculated value with measured value)

つぎに、このことを HAZ の溶接熱サイクルについて確かめた。Ni ならびに Al の HAZ の種々の位置で実測した溶接熱サイクルを微小時間間隔に細分し、これに (7) 式を適用して計算した再結晶率を実測値と比較して Figs. 11 ならびに 12 にそれぞれ示す。この場合、実測値は HAZ で測定した硬さを再結晶率に換算した値である。なお、これらの図において実測値は白丸で、計算値

は黒丸を曲線で結んで示している。計算値にややなめらかさを欠く部分があるのは、溶接熱サイクルの測定位置の測定に際して多少の誤差が生じたためである。Figs.11ならびに12によると、実測値と計算値とはかなりよく一致している。

このような結果ならびに前述の熱サイクル過程の再結晶率の変化が再結晶式に基づいて計算できるという結果より、溶接熱サイクル過程の再結晶率の変化ならびにその結果としての溶接熱サイクルが与えられた後の再結晶率は再結晶式に基づいて計算し得ると結論できる。

このように、再結晶式により HAZ の再結晶率はかなり正確に計算し得るが、前述のように再結晶式では回復段階の硬さ変化は予測し得ない。よって、再結晶式を用

いた計算により HAZ の硬さ変化をどの程度予測できるかをみるため、HAZ の硬さ分布を実測値と再結晶式を測定した溶接熱サイクルに適用することにより得た計算値とで比較した結果を Figs. 13 ならびに14に示す。この場合の計算値は Figs. 11 ならびに12に示した再結晶率の計算値を硬さに換算したものである。これらの図からわかるように、HAZ において再結晶が生じる領域よりピーク温度の低い領域で回復によるゆるやかな硬さ低下が生じるが、この領域の硬さ低下は再結晶式によっては表現し得ない。しかし、再結晶による急激な硬さ変化は十分に計算し得る。

4. 結 言

工業用純ニッケルならびにアルミニウムを用い、HAZ の再結晶軟化現象を定量的に明確にするための基礎的検討を行い、次のような結果を得た。

- (1) 恒温加熱過程の再結晶率の変化は Johnson-Mehl の式により表示できた。
- (2) (1)の結果に基づき熱サイクル過程の再結晶率の計算式 ((7) 式) を誘導した。
- (3) 溶接熱サイクル過程に上記の計算式を適用することにより HAZ の再結晶率が算出できることを確認した。
- (4) 同一材料、加工度では再結晶率と硬さ間には一定の関係があるため、(3)の結果を用いて HAZ の硬さ分布が計算できる。ただし、回復による初期のゆるやかな軟化はこの方法では計算できない。

おわりに、材料面で御援助いただいた三菱重工業㈱ならびに住友軽金属工業㈱、実験遂行に際して御協力いただいた森本喜典工学修士に対し深甚なる謝意を表します

参 考 文 献

- 1) 難波, 福井, 杉山: 工業用純アルミニウムの溶接熱影響部の再結晶挙動について, 本誌, 43巻 (1974), 3号, 274-281
- 2) 尾崎: 耐食アルミニウム合金加工硬化材の MIG 溶接における軟化域, 本誌, 34巻 (1965), 3号, 342-347
- 3) 秋田, 簗田: 耐食アルミニウム合金加工硬化材の軟化部をもつ溶接継手の強度に関する研究, 造船協会論文集, 第118号 (1965), 221-233
- 4) J. Burke (平野, 堀沢): 金属相変態速度論入門, 共立出版 (1972), 47
- 5) G. R. Speich and R. M. Fisher: Recrystallization, Grain Growth and Textures, ASM, (1966), 563-598

Fig. 13 Distribution of hardness in HAZ of Ni (Comparison of calculated value with measured value)

Fig. 14 Distribution of hardness in HAZ of Al (Comparison of calculated value with measured value)