- Digimetric NDT 500 and Normalpunkt Monitor When Spot Welding Coated and Uncated Steel Sheet", IIW Doc. III-543-76
- 7) S. Nakata, M. Nishikawa, Y. Kurozumi and H. Okuno: "Quality Control of Spot Welds Formed in Mild Steel sheet—In-Process Monitoring by Measurement of Voltage between Electrode Tips—", IIW Doc. III-570-77
- 8) S. Nakata, M. Nishikawa, Y. Kurozumi and H. Okuno: "Monitoring of Spot Weld Quality by Measurement of Voltage between Electrode Tips", Trans. JWS 10, 1, (1979), 58
- 9) Ozuranyi E, Janota M. and Kuban J.: "VUZ-Autoset-R Automatic Control System of Resistance Spot Welding", IIW Doc. III, G-75-81
- 10) 溶接学会編「溶接便覧」改訂3版, 丸善(株)(1977) 575
- 11) 溶接学会抵抗溶接研究委員会編「抵抗溶接現象とその応用(1) — スポット溶接(上) J溶接学会(1982)

通電初期の溶接部通電路面積計測への チップ間抵抗法の拡張*

—抵抗スポット溶接部の品質保証のための適応制御システムの研究(第2報)—

仲田 周次**, 大谷 忠幸***, 玉田 修****

Enlargement of Real-Time Measurement of Current Path Area to the Spot Welds at the Early Period of Weld Time*

—Adaptive Control Systems for Quality Assurance of Resistance Spot Welds
in Real Time (2nd Report)—

by Shuji Nakata**, Tadayuki Otani*** and Osamu Tamada****

Real-time measurement of the current path area in spot weld by the resistance between electrode tips can be applicable to the welds at the early period of weld time, introducing a new parameter of effective time-integral value of the voltage between electrode tips in the case of mild steel sheet of 0.8–3.2 mm thickness.

The current path area in spot weld is related to the resistance between electrode tips, current path length and average resistivity, which is a function of material compositions and average temperature at the current path part in spot weld, based on Ohm's law. In above factors, the current path length is nearly constant in the case of no splashing, and furthermore, average temperature at current path part can be estimated from effective integral value of the voltage. So, average resistivity is determined only by effective integral value of the voltage. As the result, the current path area can be measured by both the resistance and the effective integral value of the voltage at any period of weld time under certain welding conditions with no splashing.

Furthermore, the new real-time measurement of current path area by the resistance and the effective integral value of the voltage can be adapted to the spot welds with various thickness of 0.8–3.2 mm at any period of weld time under certain welding conditions of no splashing.

*原稿受付 昭和58年7月25日(昭和57年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Eng. Osaka Univ.

***正 員 大阪大学工学部(現在新日本製鉄(株)) Member, Faculty of Eng. Osaka Univ. (Present Address: Nippon Steel Corp.)

****正 員 大阪大学工学部(現在新日本製鉄(株)) Member, Faculty of Eng. Osaka Univ. (Present Address: Shin Nippon Koki Co. Ltd.)

1. はじめに

抵抗スポット溶接部の品質保証の手段の一つとして、適応制御システムによる方法がある。このような制御システムを溶接工程に導入するには、まず溶接品質を規定する因子—たとえば溶接部の通電路面積、通電路での

発熱密度または温度などを溶接工程にリアルタイムに計測する必要がある。そこで、前報¹⁾において、通電の中・後期において、散り発生がないなど特定の条件範囲内では、チップ間抵抗 (r) と通電路面積 (s) との間に $r = \bar{\rho} \cdot l \cdot (1/s)$ なる比例関係が成立し、かつ $\bar{\rho} \cdot l = \text{const}$ であるため、通電の中・後期ではチップ間抵抗のみを測定することによって溶接部通電路面積がリアルタイムに計測できることを明らかにした。

しかし、通電初期—チップ間電圧が最大値に到達するまでの期間においては、通電路部の温度上昇などのため、もはや通電路での平均固有抵抗 $\bar{\rho}$ が一定という前提は成立しないので、上述のような計測方法は適用することはできない。

本論文は、前報に述べたチップ間抵抗による通電路面積のリアルタイム計測法を通電初期での溶接部へ適用できるように、単位電流路での蓄積エネルギーを表わすパラメータとして新たに実効チップ間電圧積分値を導入して、通電路での平均固有抵抗を測定し、チップ間抵抗による通電路面積の計測法を通電初期での溶接部へ適用できるように拡張することを試みたものである。

本実験に用いた実験装置、チップ間電圧、通電路面積など物理諸量などの測定方法は前報で用いたものと同じである。また、電極チップ先端形状はR形 (50 R) のものの一種類であり、使用材料は板厚 0.8, 1.6, 2.3, 3.2 mm の冷間圧延鋼板 (SPC) である。試験片としては、幅 30 mm, 長さ 100 mm の長方形の板を2枚、重ね代 30 mm で重ね合せ、その中央部をスポット溶接している。

2. 通電路面積のリアルタイム計測

溶接部通電路面積 (s) はオームの法則

$$r = \bar{\rho}(T) \cdot l \cdot (1/s) \quad \dots\dots(1)$$

によってチップ間抵抗 (r) と関係づけられる。ここで、 $\bar{\rho}(T)$: 通電路での平均固有抵抗 (平均温度 T の関係数), l : 通電路長さ (ほぼ試材板厚の2倍)。ここで、材料の組成が与えられている場合、平均固有抵抗 $\bar{\rho}(T)$ は平均温度のみの関数となることを考慮すると、今平均温度をなんらの手段で測定できれば平均固有抵抗が求められ、その結果、通電路面積は(1)式を用い、チップ間抵抗値および平均固有抵抗値より通電初期のみならず全通電期間にわたって溶接中に計測しうると考えられる。

Fig. 1 は、50 R の電極チップを用い、RWMA の A class に相当する溶接条件で溶接した場合のチップ間抵抗と通電路面積の関係を各通電時間毎に5点ずつプロットしたものである。なお、図中の各プロット点に付している数字は通電時間 (サイクル) を表わしている。図に

Fig. 1 Variation of the resistance between electrode tips in early period of weld time under constant welding condition

みられるように、通電時間が約4サイクル以後では、通電路面積 (s) とチップ間抵抗 (r) との間には一定の関係がみられ、 $r = 24(1/s)$ で示される。一方、4サイクル以前の通電初期においては、上述のような一定の関係は成立せず、さらに同一通電時間においても各プロット点は大きく変動している。これらの原因については、(1)式より、勾配 $\bar{\rho}(T) \cdot l$ は主に平均固有抵抗によって支配されさらに、平均固有抵抗は平均温度に左右されるためと考えられる。すなわち、通電初期では、ふつう通電路部の平均温度が時間とともに上昇し、溶接材の板一板間密着状態による発熱度合の差によって通電路部の平均温度が変動することによって平均固有抵抗が変るためと考えられる。

Fig. 2 は、190~400 kg の電極加圧力のもとで、通電路での電流密度がほぼ等しい溶接電流を選定し、溶接した場合のチップ間電圧およびチップ間抵抗の挙動を示したもので、Fig. 3 はその時の溶接部通電路およびナゲットの成長過程を示している。Fig. 2 にみるように、電流路での発熱密度を示すチップ間電圧は、図中の溶接条件によらず、ほぼ同じ値で、かつ時間的にもほぼ似た挙動をしているため、これらの条件下では、通電路部はほぼ同じような発熱過程をたどっているものと理解される。一方、チップ間抵抗は、電極加圧力の増加に伴い、小さい

Fig. 2 Behavior of the voltage and the resistance between electrode tips under various welding conditions

Fig. 3 Growth of current path part and nugget in spot welding process under various welding conditions

値となっていることから、通電路面積は電極加圧力の増大とともに増えていることを示している。

Fig. 4 Relation between the resistance (r) and current path area (s) in spot welds under various welding conditions

Fig. 4 は、電極加圧特性の異なる二種類の溶接装置を用い、図中に示す種々の溶接条件で溶接した場合のチップ間抵抗 (r) と通電路面積 (s) との関係を示したもので、再録したものである。なお、図中の各プロット点に付記してある数字は通電時間 (サイクル) を示している。図にみるように、通電の中・後期では、 $r=24(1/s)$ なる関係が成立しているが、通電初期では、いずれの条件下でも上述のような関係は成立せず、ただ、電極加力か小さくなるに伴い、通電路面積が小さく、かつチップ間抵抗が大きくなる方向に移行していく傾向にある。

上記の結果より、通電初期において、通電路面積をリアルタイムに計測するには、チップ間抵抗の他、通電路での平均固有抵抗をなんらかの方法で計測する必要がある。この平均固有抵抗は一般に材料の組成と通電路での平均温度に依存するが、今、被溶接材料は与えられているので、材料の組成については考える必要はなく、ただ平均温度のみが問題となる。したがって、通電路面積の計測には平均温度を何らかの手法で測定する必要がある。

溶接部通電路での平均温度に関連するパラメータとしては通電路部へ蓄積される熱的ポテンシャルである実効チップ間電圧積分値が適当であろうと考えられる^{2,3)}。

時刻 t における実効チップ間電圧積分値 $q(t)$ は次式で定義される*).

$$q(t) = \int_0^t (v - V_0) dt \quad \dots\dots(2)$$

ここで, v : チップ間電圧 (RMS), V_0 : 基準電圧値 (RMS)**).

なお, 実効チップ間電圧積分値の物理的意味は次のように理解される. チップ間電圧 v は, 前報¹⁾に述べたように, 通電路内の各点における発熱密度 q と固有抵抗 ρ との積の平均根 ($\rho \cdot q$)^{1/2} を測定点間の電流路に沿って積分したものである. したがって, チップ間電圧積分値 $\int v dt$ は主に通電路での単位電流路の発熱量に関係する量であり, 一方, 基準電圧値の積分 $\int V_0 dt$ は, 基準電圧値の決定方法から理解されるように, 定常状態における電流路における電極チップなどへ散逸した熱損失量にほぼ相当する量である. よって実効チップ間電圧積分値 q は, 溶接中に単位電流路に蓄積される熱量すなわち温度上昇に関与する物理量であり, 通電路面積には関係しない量である.

上述のような実効チップ間電圧積分値の物理的意味を考慮するとき, 通電期間中における通電路の平均固有抵抗と実効チップ間電圧積分値との間には一定の関係が存在するものと推定される.

Fig. 5 は通電初期0.5~5サイクルにおける通電路での平均固有抵抗 $\bar{\rho}$ と実効チップ間電圧積分値 q との関係を示したものである. なお, ここでの溶接条件では溶接電流密度がほぼ一定となっている. ここで, 平均固有抵抗 $\bar{\rho}$ は, 図に示すように, チップ間抵抗値 r , 通電路面積 s , 通電路長さ l より算出されたものである. これにみるように, 図中に示した溶接条件の如何 (とくに通電路面積) にかかわらず, 平均固有抵抗は実効積分値とともに増加し, $q \geq 5$ においては約 $150 \mu\Omega$ と定常値に達する. (なお, この時 $\bar{\rho} \cdot l = 24$ となり, Fig. 4 中で示された比例定数値に一致している.) また, 平均固有抵抗と実効積分値との間には一定の関係が成立し, ほぼ電

Fig. 5 Dependence of average resistivity ($\bar{\rho}$) at current path part on effective integral value of the voltage (q)

流密度を一定とする特定の溶接条件のもとではこの関係に通電面積は関係しない.

上記の結果, 予め平均固有抵抗値と実効チップ間電圧積分値との関係を求めておけば, 溶接中に実効チップ間電圧積分値を測定することによって, 平均固有抵抗を計測することができる. かくして, 通電初期のみならず中・後期においても, 通電路面積は, 実効チップ間電圧積分値より求められる平均固有抵抗値とチップ間抵抗値を測定することにより, リアルタイムに計測できることとなる. なお, この時の計測誤差は通電経で最大約9%であり, この程度の誤差は実用上制御システムを構成する上で充分であろうと考えられる.

3. 板厚が変化した場合の溶接部通電路面積のリアルタイム計測

次に, 前項での結果をもとに, 板厚が変わった場合, 通電路面積を全通電時間にわたってリアルタイムに計測することの可能性について検討する.

Fig. 6 は, 板厚 0.8~3.2 mm の冷間圧延鋼板を用いて, ほぼ同一の溶接条件で溶接した場合のチップ間電圧の挙動を示したものである. 図にみるように, 板厚の増加に伴い, チップ間電圧曲線は一般により高い値へ移行し, かつその最大値に達する時間もおそくなる傾向にある. この時, 各板厚での基準電圧値 V_0 を図中に示す値 2.2, 1.8, 1.4, 1.0 V に採用するとき, 基準電圧値 V_0 と通電路長さ l (板厚の2倍) との間に,

$$V_0 = V_i + A \cdot l \quad \dots\dots(3)$$

なる関係が成立っている. ここで, V_i : 板厚に無関係な一定電圧 0.6 V, A : 比例定数 0.25 V/cm, l : 通電路長さ.

Fig. 7 は板厚が 0.8~3.2 mm におけるチップ間抵抗

*) 溶接電流が正弦波の場合実効チップ間電圧積分値の具体的な求め方は次のとおりである. まず, 注目しているチップ間電圧波形曲線において, 各半サイクル毎にそのピーク値 (v_p) をサンプリング・測定し, これら各測定値 (v_p) より基準電圧値 (V_0) を差し引き, 各半サイクル毎に差電圧値 ($v_p - V_0$) を算出, さらに, これらを実効値 ($v_{eff} - V_0$) に換算する. 次に, これらの値の時間積分を求めるために, 上記の各半サイクル毎の差電圧値 ($v_{eff} - V_0$) にサンプリング周期 (120 Hz) から算出される時間間隔 $\Delta t (= 1/120 \text{ sec})$ を乗じた値 ($(v_{eff} - V_0) \cdot \Delta t$) を求め, これらの値を注目している時刻 t まで加算する. すなわち, 実効チップ間電圧積分値 q は $q = \sum_{i=0}^t (v_{eff} - V_0) \cdot \Delta t$ として求められている.

**) 基準電圧値 V_0 としては, 簡便のため, 通電時間が充分長くてナゲットが飽和した状態にある時点でのチップ間電圧値を採用している. しかし, 厳密には, 電流路における熱損失量に関係する物理量としての基準電圧値 V_0 は必ずしも通電時間と無関係に一定ではないと考えられる. これらの点の詳細は今後の課題の一つである.

Fig. 6 Behaviour of the voltage between electrode tips in the case of welding the sheet with various thickness

Fig. 7 Relation between the resistance (r) and current path area (s) in spot welds of sheets with various thickness

Fig. 8 Dependence of average resistivity ($\bar{\rho}$) at current path part on normalized effective integral value of the voltage (q/l) in the case of welding the sheets with various thickness

と通電路面積との関係を示したものである。図にみるように、板厚が 3.2 mm と厚い場合を除いて、ある通電時間以降でチップ間抵抗 (r) と通電路面積 (s) との間に $r = k(1/s)$ なる関係が成立し、比例定数 $k (= \bar{\rho} \cdot l)$ は、板厚 0.8, 1.6, 2.3 mm の場合、各々 24, 48, 70 である。これらの値より、板厚での平均固有抵抗値を算出すると、150~152 となり、板厚による比例定数 k の差は通電路長さ l の差によるものであることを示している。なお、3.2 mm の板の場合、通電時間 20 サイクルの範囲では、平均固有抵抗は定常値に到達していないため、チップ間抵抗が単に通電路面積に比例関係することがなくなると考えられる。

Fig. 8 は板厚 0.8~3.2 mm の溶接部に対して平均固有抵抗 $\bar{\rho}$ と板厚で規準化した実効チップ間電圧積分値 q/l (*) との関係を示したものである。なお、平均固有抵抗 $\bar{\rho}$ はチップ間抵抗値 r 、通電路面積 s および通電路長さ l の測定値を用いて算出した値であり、規準化した実効チップ間電圧積分値 q/l は実効チップ間積分値 q を通電路長さ l で割ったものである。また、実効チップ間電圧積分値の算出において、基準電圧値 V_0 は前述の(3)式を用いて算出した値を用いている。

図にみるように、測定された平均固有抵抗 ($\bar{\rho}$) は、どの板厚においても規準化された実効チップ間電圧積分値 (q/l) とともに増加し、 $q/l \geq 30$ で定常値 $150 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ に到達する。なお、板厚 3.2 mm の場合のみ、平均

*) 一般にチップ間電圧 v は $v = \int_{-l/2}^{l/2} \rho \cdot j \cdot dx$ で表わされる。ここで平均固有抵抗 $\bar{\rho}$ 、平均電流密度を j とすると、 $v/l \approx \bar{\rho} \cdot j^2$ となる。一方 V_0 には板厚に関係しない量 V_i が含まれているが、今この量を考えないと、実効チップ間電圧実効値 q は板厚で規準化されうることとなる。

固有抵抗は定常値に到達していない。この結果は、平均固有抵抗と規準化された実効チップ間電圧積分値の関係を予め求めておけば、板厚に関係なく、平均固有抵抗を溶接中にリアルタイムに計測できることを示している。ただ上述のような関係が成立する条件範囲については今後の検討をまたねばならない。

4. 結 論

板厚 0.8~3.2 mm の冷間圧延鋼板 (SPC) を用い、チップ間抵抗法による溶接部通電路面積のリアルタイム計測法を通电初期での溶接部に適用できるように拡張するとともに、その方法が板厚が変わった場合の溶接部通電路面積の計測へ適用可能かどうかについて検討した。主な結論は次のとおりである。

1) 通电初期における溶接部通電路面積のリアルタイム計測には、通電路での平均固有抵抗の温度依存性を考慮する必要がある。ある条件範囲で、平均固有抵抗と通電路での温度上昇パラメータである実効チップ間電圧積分値との間には一定の関係が存在し、この関係を用いる

と、通電路面積はチップ間抵抗および実効チップ間電圧積分値を溶接中に測定することによって、通电初期のみならず中・後期もリアルタイムに計測することが可能となる。

2) 板厚が変化した場合も、平均固有抵抗と板厚で規準化した実効チップ間電圧積分値の間には一定の関係が成立している。かくして、この規準化した実効チップ間電圧積分値を測定することによって、板厚とは関係なく平均固有抵抗を計測することが可能となる。

参 考 文 献

- 1) 仲田, 西村, 大谷, 玉田「電極チップ間抵抗による溶接部通電路面積のリアルタイム計測—抵抗スポット溶接部の品質保証のための適応制御システムの研究 (第1報)」溶学誌, 2 (1984) 53
- 2) S. Nakata, M. Nishikawa, Y. Kurozumi and H. Okuno, "Monitoring of Spot Weld Quality by Measurement of Voltage between Electrode Tips" Trans. JWS, 10 (1979) 1, 57
- 3) S. Nakata, M. Nishikawa, J. Horie and M. Juri, "In-Process Quality Control of Spot Weld by Detecting Voltage between Electrode Tips" Proc. Inter. Conf. Weld. Research in the 1980's. Session B, 251 (1980)

高電流密度・短時間スポット溶接法によるアルミニウム合金板と軟鋼板の接合 (第2報)*

—電流方向の溶接性におよぼす効果—

仲田 周次**, 前川 仁**, 加柴 良裕***

Impulsive High Current Density Spot Welding of Aluminum Alloy to Mild Steel (Report 2)*

—Effect of Current Direction on Weldability—

by Shuji Nakata**, Hitoshi Mackawa** and Yoshihiro Kashiba***

Effect of welding current direction on tensile shear strength (TSS) of joints has been studied in the weld of aluminum alloy (0.8t 5052) to mild steel (0.8t SPCC). In this welding, uni-directional discharge current from capacitors is utilized as welding current. Therefore the polar effect, the difference of weldability caused by current direction relative to the position of dissimilar metals to be joined, has been inves-

*原稿受付 昭和58年3月24日 (昭和56年度秋季全国大会にて発表)

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Eng., Osaka Univ.

***学生員 大阪大学工学部 (現在三菱電機 (株)) Student Member, Faculty of Eng., Osaka Univ. (Present Address : Mitsubishi Electric Corp.)