電解蓄電器を応用して Al 板を溶接する際の放電波形

ANALYSIS OF A DISCHARGE WAVE FORM OF THE ELECTROLYTIC CAPACITOR TYPE SPOT WELDER WHEN ALUMINUM PLATES ARE WELDED

宮 田 聰*
AKIRA MIYATA

We have been studying the electrolytic capacitor these many years, and recently have completed that of 30,000 μF in capacitance. When this capacitor is employed to discharge, we can get easily an instantaneous current of as much as 120,000A which enables the satisfactory welding of aluminum plates, several mm. in thickness. In this paper we have dealt with the discharge wave at the welding carried out in that way. The analysis gave the magnitude of both initial and final contact resistances between the electrodes and the aluminum sheets to be welded, leakage inductance, and resistance change of aluminum during welding. We may classify the welding process into three stages; namely (1) The beginning stage when the contact resistance develop much heat, (2) the mid stage when aluminum melts and made weld, and (3) the final stage when welded material is forged under pressure. In our case, the first stage finished in 2/10,000 sec., and the second stage finished in 4/1,000 sec. These are considered to be for quicker than the sequence taken place in any other type of welder in the similar case.

1. 溶接回路

我々の研究室で大容量の電解蓄電器を試作した。30,000 μF 位の蓄電器を充電して放電させると、容易に120,000A 位の瞬時電流が得られる。之を利用すると厚さ数 mm の Al 板を簡単に点溶接する事が出来る。第1図に於て、C を電解蓄電器とし、開閉器を通つて巻数比 n を色々変化させる事の出来る変圧器につなぐ。変圧器の二次側は単巻で、直ちに適当な電極から、被溶接 Al 板に導く。変圧器の巻線比 n を変える事により、下の等価回路にある様に実効的に蓄電器の容量を増加させる事が出来る。例えば $n=10$ とすれば、30,000 μF も 3F として動作する。溶接期間中は漏洩インダクタンス L_s は一定で

あるが、溶接部の抵抗 R_s は溶接の進行と共に変化する。けれども今推論を容易にする為に、或期間これが略々一定で変化しないと仮定する事が出来れば、その期間中の電流は周知の微分方程式から $i = A\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + B\lambda_2 e^{-\lambda_2 t}$ で表わされる。実際実験をやつてみると、溶接の全期間を一つの抵抗で押し通す事は無理である。尠くも三段階に分けて考えるのが妥当と思われる。例えば第2図に示す様に、(1)溶接の開始部で最初の接触抵抗そのままと考えられる期間、(2)溶接の最盛部で、接触抵抗が変化するばかりでなく、被溶接部の Al も溶融によつて抵抗の変化を来す期間、(3)溶接の終止部で、大体抵抗の変化におさまりのついた期間である。電流の時間的経過を直接オシログラムに撮るのが望ましいが、何分にも非

第 1 図

第 2 図

第 3 図

* (株) 科学研究所, 工博
Chief Research Fellow, Scientific Research Inst., Tokyo, Japan.

第 4 図

第 5 図

第 6 図

常な大電流であり、又抵抗の極めて低い回路に測定器具を挿入するとその為に電流が狂つて来るので、一先づ簡単に溶接部の端電圧をオツシログラムにとる事にした。回路は等価回路で考えれば、容量 n^2C と漏洩インダクタンス L_s と溶接部の抵抗 R_s とを直列につないだ短絡回路で、蓄電器上の電荷を Q とすれば、

$$\frac{Q}{n^2C} - \frac{d}{dt} (L_s i) = R_s i$$

$$\text{或は } L_s \frac{d^2 Q}{dt^2} + R_s \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{n^2C} = 0$$

$$\text{従つて } Q = A e^{-\lambda_1 t} + B e^{-\lambda_2 t}$$

此処に A, B は常数、 λ_1, λ_2 は $L_s X^2 + R_s X + \frac{Q}{n^2C} = 0$ の二根である。従つて電流は次の如くなる。

$$i = -\frac{dQ}{dt} = A \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + B \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}$$

此の電流は C, L_s, R_s, n の関係で或は振動型になり或はクリチカルダンピングになり、或はオーバードンピングになる。その条件は第3図に示す通りである。けれどもこの様に色々な型になるといつても、オツシログラムでは結局終止部の波形で判断するのであるから、先づ溶接の終止部を考察する。

2. 溶接の終止部

溶接の終止部が振動型か、クリチカルダンピングか、オーバードンピングかは、オツシログラムをみてすぐ判断が出来る。例えば厚さ 1mm の純 Al 板を2枚重ねて溶接の調子のよい所をみると、オ4図の様になり、終止部は必ずクリチカルダンピングになる。これよりどちらに傾いても溶接部の力が弱く出る。第4図をみると、初期の二個所において不連続段階が出来ている。最初の段階は溶接の始まろうとする約 $2/10,000$ 秒の所で、次の段階は大体溶接の終つた $4/1,000$ 秒の所である。この実験では蓄電器の端電圧は 4.5V、荷重（溶接部に加えた）は 158kg、蓄電器の実効容量は 60F である。

さて終止部における端電圧のオツシログラムの解析に移ろう。前述の様にうまく溶接の出来る場合は、必ずク

リチカルダンピングの場合であるから、溶接の終つた時の溶接部抵抗 R_s と静電容量 C と漏洩インダクタンス L_s との間には

$$R_s^2 - \frac{4 L_s}{n^2 C} = 0 \quad (1),$$

が成立しなければならぬ。オ2図の(3)の部分に相当するので、その時の微分方程式の解は

$$Q = (A + Bt) e^{-\frac{R_s}{2L_s} t}$$

となる。この現象だけ切り離して考えると、この現象は恐らく、開閉器を入れた瞬間とに別の或時間 t_0 を起点としているであろう。その想定起点 t_0 のときに蓄電器の荷電が Q_0 で、電流を当然そうである様に $i=0$ とおけば、

$$t=t_0, Q=Q_0, i=0$$

$$Q_0 e^{-\frac{R_s}{2L_s} t_0} = A + B t_0 \quad (2),$$

$$0 = \frac{R_s}{2L_s} A + \left(\frac{R_s}{2L_s} t_0 - 1 \right) B \quad (3),$$

(2)に $\frac{R_s}{2L_s}$ を乗じると

$$\frac{R_s}{2L_s} Q_0 e^{-\frac{R_s}{2L_s} t_0} = \frac{R_s}{2L_s} A + \frac{R_s}{2L_s} B t_0 \quad (4),$$

(4)-(3)

$$\frac{R_s}{2L_s} Q_0 e^{-\frac{R_s}{2L_s} t_0} = B \quad (5),$$

然るに

$$\begin{aligned} i &= -\frac{dQ}{dt} = -B e^{-\frac{R_s}{2L_s} t} \\ &\quad + \frac{R_s}{2L_s} (A + Bt) e^{-\frac{R_s}{2L_s} t} \\ &= \left(A \frac{R_s}{2L_s} - B + B \frac{R_s}{2L_s} t \right) e^{-\frac{R_s}{2L_s} t} \end{aligned}$$

之に(3)を代入して

$$i = \left(-\frac{R_s}{2L_s} B t_0 + B \frac{R_s}{2L_s} t \right) e^{-\frac{R_s}{2L_s} t}$$

$$= \frac{R_s}{2L_s} B (t - t_0) e^{-\frac{R_s}{2L_s} t}$$

之に(5)を代入して

$$i = \left(\frac{R_s}{2L_s} \right)^2 Q_0 (t - t_0) e^{-\frac{R_s}{2L_s} (t - t_0)} \dots\dots\dots (6),$$

従つて溶接部だけの抵抗を R_c とすれば、その端電圧 E は

$$E = i R_c = R_c \left(\frac{R_s}{2L_s} \right)^2 Q_0 (t - t_0) e^{-\frac{R_s}{2L_s} (t - t_0)} \dots\dots\dots (7),$$

双方の対数をとれば

$$\ln E = \ln R_c \left(\frac{R_s}{2L_s} \right)^2 Q_0 + \ln(t - t_0) - \frac{R_s}{2L_s} (t - t_0)$$

或は

$$\ln \frac{E}{t - t_0} = \ln R_c \left(\frac{R_s}{2L_s} \right)^2 Q_0 - \frac{R_s}{2L_s} (t - t_0)$$

$$= A - B (t - t_0) \dots\dots\dots (8),$$

但し $A = \ln R_c \left(\frac{R_s}{2L_s} \right)^2 Q_0$, $B = \frac{R_s}{2L_s}$ である。

今(8)式にオ4図から得る端電圧 e の実験値を、 $t = 10^{-2}$, 2×10^{-2} , 3×10^{-2} に当てはめて、 A , B をその三式から消去して得る式から t_0 を求めると

$$t_0 = 0.648 \times 10^{-2} \dots\dots\dots (9),$$

となる。試みに此の t_0 の値を使つて $\ln \frac{E}{t - t_0}$ と、 $t - t_0$

とをプロットしてみるとオ5図の様な綺麗な直線が得られる。図中の小円は実測点で、大体終止部に於ては直線関係が成立すると考えてよい。この直線の傾きから B が求められる。

$$B = \frac{R_s}{2L_s} = 2.45 \times 10^2 \dots\dots\dots (10),$$

(1)より

$$\frac{R_s}{2} \frac{R_s}{2L_s} = \frac{1}{n^2 C} \dots\dots\dots (11),$$

(10)を之に代入して

$$R_s = \frac{2}{n^2 C B} = \frac{2}{782 \times 10^{-2} \times 2.45 \times 10^2}$$

$$= 1.352 \times 10^{-4} \Omega \dots\dots\dots (12),$$

即ち溶接が終つた後の溶接部の抵抗値 R_s が求められた事になる。之が判れば(10)式から回路の漏洩インダクタンス L_s が計算される。このインダクタンスは溶接の初めから終りまで終始変らないもので、此の実験の場合では

$$L_s = 2.74 \times 10^{-7} \text{ H}$$

となつた。斯様にして溶接の終止部を解析することに依り、溶接が終つた後の溶接部の抵抗と、回路のインダク

タンスを求める事が出来た。今度はこの変らぬインダクタンスを利用して、溶接開始部の溶接部の抵抗を求める事にする。

3. 溶接の開始部

溶接の開始部では、恐らく C と L_s とは終止部と同じである。けれども溶接部の抵抗 R は未知であるから、どんな形式の放電をしているのか予め断ずることが出来ない。従つて一般解を考えてそのどれでも差支えない様にして行く。回路の一般解は

$$Q = A e^{-\lambda_1 t} + B e^{-\lambda_2 t}$$

先づ微分して電流を求める。

$$i = -\frac{dQ}{dt} = A \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + B \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \dots\dots\dots (14),$$

開閉器を入れた途端は、電荷はすでに蓄電器に或電圧まで充電されたもので一定の既知量、電流は零である。

従つて

$$t = 0 \text{ の時、} Q = Q_0 = A + B, \dots\dots\dots (15),$$

$$i = 0 = A \lambda_1 + B \lambda_2 \dots\dots\dots (16),$$

電流の時間的变化を考えると

$$\frac{di}{dt} = -A \lambda_1^2 e^{-\lambda_1 t} - B \lambda_2^2 e^{-\lambda_2 t}$$

$$= -A \lambda_1 (\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 e^{-\lambda_2 t})$$

故に

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{t=0} = -A \lambda_1 (\lambda_1 - \lambda_2)$$

$$= Q_0 \lambda_1 \lambda_2$$

$$= Q_0 \frac{1}{n^2 C L_s} \dots\dots\dots (17),$$

此の式は回路の抵抗 R_s や、溶接部の抵抗 R_c に無関係である。従つて、電流の $t = 0$ に於ける立上りは、回路抵抗に無関係に Q_0 , C , L_s , n だけで定められる。而も之等の Q_0 , C , L_s , n の値は全て既知である。だから溶接部の端電圧の立上りを実測すれば、それは

$$\left(\frac{de}{dt} \right)_{t=0} = R_c \frac{Q_0}{n^2 C L_s} \dots\dots\dots (18),$$

となり、溶接が始まる前の溶接部の抵抗 R_c —大部分は接触抵抗—は簡単に求める事が出来る。我々の実験では

$$R_c = 6.110 \times 10^{-4} \Omega$$

となつた。これは溶接後の抵抗に比べると4, 5倍高い値である。

4. 溶接の途中部

事柄を簡単にする為に、非常に細かい漏洩インダクタンス L_s を此の際省略して考える。CR 回路で放電が行われている途中で急に R だけが減少したらどうなるか？オ6図に於て、 t_1 より前の抵抗は R_1 で、之が t_1 の

第 7 図

第 8 図

第 9 図

時に急に R_2 に減少したとしよう。勿論電荷の減少率はその点から今迄よりは大となる。併し電荷の変化は連続である。故に

$$Q_1 e^{-\frac{t_1}{R_1 C}} = Q_2 e^{-\frac{t_1}{R_2 C}} \dots\dots\dots (19),$$

所が電流の方はその点で不連続になる。

$$i_1 = \frac{Q_1}{R_1 C} e^{-\frac{t_1}{R_1 C}}; i_2 = \frac{Q_2}{R_2 C} e^{-\frac{t_1}{R_2 C}} \dots\dots\dots (20),$$

(20) 式の条件を入れて、溶接後の電流の比をとると、

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{Rcct + Rc'}{Rcct + Rc}$$

溶接部の端電圧の比をとると

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{i_1 Rc'}{i_2 Rc} = \frac{Rcct + Rc}{Rcct + Rc'} \cdot \frac{Rc'}{Rc} \dots\dots\dots (21).$$

此の値は実測され、我々の実験では 1.152 となる。尚溶接部以外の回路の抵抗即ち導線、変圧器巻線の抵抗は二次側に換算した総計が $Rcct = 9.60 \times 10^{-5} \Omega$ である。従つて溶接終止部抵抗から之を差引けば、溶接部自体の抵抗 Rc は $3.92 \times 10^{-5} \Omega$ となる。従つて溶接を終る不連続点の直前の溶接部の抵抗は、 $Rc' = 4.81 \times 10^{-5} \Omega$ となる。

我々の実験では第 7 図に見る様に半径 2mm、厚さ 2mm の円筒 Al が被溶融部となつている。その抵抗を数値から求めて見ると次の様になる。

$$658^\circ\text{C (流体)} \quad 0.432 \times 10^{-4} \Omega$$

$$658^\circ\text{C (固体)} \quad 0.190 \times 10^{-4} \Omega$$

$$20^\circ\text{C (固体)} \quad 0.0425 \times 10^{-4} \Omega$$

溶接が終つた瞬間には、被溶融部はまだ 658°C の温度にあるが、外部の電極に接触する所は 20°C の水で冷却されているので、 20°C となつてはいるはずである。従つて Al 部分の抵抗は 658°C の 20° との抵抗値の平均 $0.116 \times 10^{-4} \Omega$ と見てよからう。従つて端電圧測定の対象になる溶接部の抵抗は之に電極の接触抵抗を加えたものである。而も此の値は前述の計算により $Rc = 3.92 \times 10^{-5} \Omega$ として知られている。従つて溶接の終止部に於ける電極の接触抵抗は $(3.92 \times 10^{-5} - 0.116 \times 10^{-4}) \Omega = 0.276 \times 10^{-4} \Omega$ となる。かくして電極の接触抵抗が求められると、被溶融 Al 部分の不連続点の前後の抵抗比が次の様に計算される。

$$\text{抵抗比} = \frac{Rc' - 0.276 \times 10^{-4}}{Rc - 0.276 \times 10^{-4}} = 1.765 \dots\dots (22),$$

溶接最中は、Al 部の抵抗は無論溶接終止部よりは高い。これを未だ固まらない溶融している金属があるものと考え、電流路に沿い何割の中心部分が溶けていたら実測の電圧比になるかを逆算してみる。才 8 図に於て、未溶融部の抵抗を ρ 、溶融部の抵抗を ρ' とし、中央の影線を引きいた x の部分だけが溶融していたとすれば

$$\text{抵抗比} = \frac{(1-x)\rho + x\rho'}{\rho} = 1.765 \dots\dots (23),$$

$$\rho \propto 0.116 \times 10^{-4} \Omega; \rho' \propto 0.432 \times 10^{-4} \Omega$$

を代入して x を解くと

$$x = 0.48$$

となる。後から断面を磨いて顕微鏡で検査したら才 9 図の如くなり、 $1.06/2.17 = 0.489$ となり略上の計算と一致する事が判つた。

5. 結 論

我々は大容量の電解蓄電器を放電する事により Al 板を点溶接する実験を試みている。オー着手として、簡単な電磁オツシログラムにより、溶接過程を解析して見た。或程度其の溶接の進行状況を推知する事が出来たのでそれを此処に報告した。溶接の過程を三段階に分けて考えると、才一段階の接触抵抗部の発熱は $2/10,000$ 秒位で始まり、溶融して接着する才二過程は $4/1,000$ 秒位で終る。最後の段階は保持の状態で適当な圧力が加えられているだけである。此の静電容量放電形式の溶接が従来の孰れよりも極めて短時間に終る事が判り、此処に又その特色が発揮せられるものと思われる。