電磁圧接回路におけるインダクタンスの影響

岡川 啓悟* 石橋 正基* 相沢 友勝*

Influence of Inductance on Circuit of Magnetic Pulse Welding

Keigo OKAGAWA*, Masaki ISHIBASHI* and Tomokatsu AIZAWA*

(Received on September 28, 2011)

Magnetic pulse welding is effective for lap-joining similar and dissimilar sheet metals such as Al/Al, Cu/Cu, and Al/Cu. A discharge circuit is used for the seam welding. It is composed of a flat one-turn coil and an energy-storing capacitor bank. The coil is an important component to obtain a high-density magnetic flux, and is made of one copper alloy plate, instead of a winding. The influence of the seam length of a sheet metal has been confirmed by welding an aluminum sheet to another aluminum sheet. It has been clarified that magnetic pulse welding is suitable for joining a sheet metal with increasing seam length, because the effective inductance increases with increasing seam length. As a result of investigating the transfer quantity of the electric energy from a capacitor to a coil, it has been found that magnetic pulse welding with a high energy efficiency can be used to join sheet metals if the transfer coefficient is large. On the basis of the experimental results, the influence of the remaining inductance on the transfer coefficient is calculated. A decrease in the remaining inductance adds to the welding capability of equipment and reduces the electric energy consumption.

Key words: high-energy-rate forming, joining, tension test, aluminum, magnetic pulse welding, inductance, discharge circuit, capacitor bank, seam length, electromagnetic force.

1. 緒言

電磁圧接は、アルミニウムや銅のような高導電率の金属薄板の上に金属板を重ね、衝撃電磁力によって瞬間的にシーム接合する技術である¹⁾。衝撃電磁力は、電磁圧接回路の電気エネルギーの移動に伴って金属薄板に発生する。これまで、間隙の効果と特徴²⁾、引張せん断強さに及ぼすコイル形状の影響³⁾、並列接続したコイルによる圧接⁴⁾など基礎的な研究成果が報告されている。これらの研究に用いられた圧接コイル¹⁾は一枚板で作られているため、巻線形の成形コイル⁵⁾に比べ、コイルインダクタンスは非常に小さく約 1/100 である。そのため、圧接コイルや金属薄板に入るエネルギーは、回路構成などによって生じるいわゆる残留インダクタンスの影響を強く受け、圧接された板の引張せん断強さに影響を及ぼす。エネルギー移動の考え方は示されているが⁶⁾、金属薄板の電磁圧接に関してインダクタンスに着目して整理された例は見あたらない。

電磁圧接の実用化を考えると、圧接に必要な電気エネルギーに及ぼすインダクタンスの影響を明らかにすることは大切である。すなわち電磁圧接装置を製作する場合、放電

音の抑制や放電スイッチの違いなどのため、電磁圧接回路の構成や配線要素は異なる^{6),7)}。したがって、インダクタンスなどの回路定数も異なる。また、インダクタンスは金属薄板のシーム圧接長によっても異なる⁸⁾。

これまで著者らは回路インダクタンスなどの影響について、アルミニウム薄板のシーム圧接長を変え、電気エネルギーの移送係数を調査した結果を報告している⁹⁾。本報告では、その調査をまとめた結果、移送係数と母材破断に必要な単位長さあたりの最小放電エネルギーの関係および残留インダクタンスの影響などを明らかにし、実用化に向けた装置の設計・製作時に注意すべき事項を明らかにする。

2. 圧接原理

平板状の圧接コイル、金属薄板、固定具および電流と磁

Fig.1 Section view of middle of coil for welding with a gap. (Moved sheet is deformed by electromagnetic force and collides with fixed sheet)

* 東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科 〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40
Monozukuri Department, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology
1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011, Japan.

束の断面を Fig.1 に示す。コイルの細長い中央直線部にパルス大電流 (⊗) が流れると、その周辺に高密度磁束が生成され、コイル中央直線部の上面に置かれた可動薄板に交差する。磁束の浸透を妨げるように、可動薄板にパルス大電流と逆方向の渦電流 (⊙) が流れる。この結果、可動薄板は上向きの電磁力によって変形され、高速度で上方の固定薄板に衝突する。続いて加わる電磁力により、2 枚の金属薄板は接合される。

3. 実験装置と等価回路

3.1 実験装置

圧接コイルは E 字形ワンターンコイルを用いた。その一部を Fig.2 に示す⁹⁾。コイルは二つの隙間によって狭められた中央直線部と広い両側部に分けられている。コイルの外形幅は 145mm、中央直線部の幅 (コイル幅) は 5mm、長さ (コイル長さ) は 70, 120, 220, 320mm、板厚は 3mm であり、ほかに長さ 520mm のコイルを使用した。圧接はこの中央直線部上で行われる。コイル長さに合わせて 2 枚のアルミニウム薄板の長さ (シーム圧接長) を 50, 100, 200, 300, 500mm の 5 段階に変え、圧接実験を行った。実験装置の概略断面図を Fig.3 に示す。圧接前に、スペーサーで 2 枚のアルミニウム薄板に 1.0mm の間隙を設けてコイル上面に置き、固定具とコイルとともに締付け金具で固定した。金属間は 0.125mm 厚のポリイミドフィルムで絶縁した。アルミニウム薄板は A1050-H24 で、板厚は 1.0mm である。コンデンサ電源 C—放電ギャップスイッチ G—コイル L は放電回路を構成し、電源容量は 100μF である。

3.2 等価回路

Fig.3 の実験装置で、可動薄板のみが圧接コイルと電磁結合している場合の等価回路を Fig.4 に示し、インダクタンスなどについて検討する。放電回路の V は充電電圧、 I はコイル電流 (放電電流)、 L_1 と R_1 はコイルのインダクタンスと抵抗である。 I_1 は可動薄板に流れる渦電流、 L_2 と R_2 は

Fig.2 Flat one-turn coils

Fig.3 General outline of apparatus with magnetic pulse welding circuit (section view)

Fig.4 Equivalent circuit for magnetic pulse welding

Fig.5 Simplified equivalent circuit

可動薄板のインダクタンスと抵抗である。 L_r と R_r はコンデンサ電源 C、放電ギャップスイッチ G および配線板により生じる残留インダクタンスと残留抵抗である。残留インダクタンスは Fig.3 の圧接コイル部を短絡したときの放電電流から求められ、 $L_r = 0.023\mu\text{H}$ であった。 M は相互インダクタンスであり、可動薄板の変形に伴って減少する。

Fig.4 の電磁圧接回路は、一般に抵抗 R_1 , R_2 が低く振動性が強い場合、Fig.5 の簡単な等価回路で扱うことができる。 L_e と R_e は実効的な回路インダクタンスと回路抵抗であり、圧接コイルと可動薄板を含む回路定数である。圧接コイル部を短絡して得られる L_r , R_r および C を電源部、 L_e と R_e を負荷部と見なすことができる。 L_e と R_e は、結合係数 k を $k^2 = M^2/L_1L_2$ として式(1)、式(2)で表される。

$$L_e = L_1 (1 - k^2) \quad (1)$$

$$R_e = R_1 + k^2 R_2 \quad (2)$$

放電電流 I は、線形近似すると式(3)で表される。

$$I = \frac{V}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega = 2\pi \frac{1}{T} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

α および ω は減衰定数および角周波数である。 L および R は回路インダクタンスおよび回路抵抗であり、式(4)、式(5)で表される。

$$L = L_e + L_r \quad (4)$$

$$R = R_e + R_r \quad (5)$$

振動性が強く抵抗 R が非常に小さい場合、式(3)の ω から、回路インダクタンス L は周期 T の 2 乗に比例する。

3.3 エネルギーの移送効率

Fig.5 の等価回路で、コンデンサ電源 C の充電エネルギー W_c は実効インダクタンス L_e に移送される。エネルギー移送の割合は移送効率 η で表され、式(6)で示される⁶⁾。

$$\eta = \frac{w_e}{W_c} = \frac{L_e}{(L_e + L_r)} \left[1 - \frac{\int_0^t R I^2 dt}{\frac{1}{2} C V^2} - \left(\frac{v_e}{V} \right)^2 \right] \quad (6)$$

右辺の分母 Wc はコンデンサ電源 C の充電エネルギーであるが、回路内に放電するので放電エネルギー Wc とも呼ぶ。分子 w_e は実効インダクタンス Le に移送されるエネルギーである。 v_c はコンデンサ残留電圧である。 w_e , I および v_c は時間とともに変化する。回路抵抗 R が零の場合、 I および v_c が減衰しないので、移送効率 η の最大値 η_m は、式(7)に示されるようにインダクタンス比になる。

$$\eta_m = \frac{Wc}{Wc} = \frac{Le}{(Le + Lr)} = \frac{Le}{L} \quad (7)$$

右辺第2項の大文字 Wc は、 η の最大値における w_e である。 η_m を移送係数と呼び、エネルギー移動の評価基準とする。なお、残留インダクタンスが零になることは現実にはありえないため、 $\eta_m < 1.0$ である。

4. 結果と考察

4.1 放電電流

回路インダクタンス L の影響は電流波形に現れると考えられる。そこで、コイルに流れる放電電流（コイル電流）を、Fig.3の放電ギャップスイッチGの周囲に取り付けた市販のログスキーコイルで検出し、オシロスコープで観測した。放電電流の例を Fig.6(a),(b)に示す。Fig.6(a)はシーム圧接長 50mm の放電電流であり、放電エネルギー Wc は 0.9kJ である。放電の開始から約 $3\mu s$ で最大値 179kA に達し、振動しながら減衰した。振動の周期は $13.9\mu s$ 、流れた期間は約 $50\mu s$ であった。シーム圧接長 50mm の波形は式(3)の線形の放電電流に近い。Fig.6(b)はシーム圧接長 500mm の放電電流であり、放電エネルギー Wc は 1.9kJ である。放電の開始から約 $4\mu s$ で最大値 147kA に達した。この 500mm の波形は、傾きの絶対値が最初の電流最大値前後で異なっていて非線形成分を有するが、振動の周期は $23.7\mu s$ であり約 1.7 倍になった。周期 T は式(3)の ω より回路定数 L , C , R で表されるが、振動性が強いので、 R の影響は小さい。また、 C は $100\mu F$ 一定であるため、 T は回路インダクタンス L によって変化すると考えてよい。

シーム圧接長を変えた圧接実験において放電エネルギーも変えているため、回路インダクタンス L に及ぼす放電エネルギーの影響を確認しなければならない。Fig.7 に周期 T

Fig.6 Waveforms of discharge current

Fig.7 Relationship between period and discharge energy

と放電エネルギー Wc の関係を示す。シーム圧接長 50mm で、 Wc に対して T は $13.85\mu s$ から $13.95\mu s$ になり、約 1% 増加した。500mm では、 Wc が高くなると T は $23.2\mu s$ から $23.8\mu s$ になり、約 3% 増加した。 Wc による T の変化が小さいため、周期 T は放電エネルギー Wc に関係なく一定と近似してよい。したがって、シーム圧接長のみによって回路インダクタンス L が決まると考えてよい。シーム圧接長を変えた電磁圧接のエネルギー移動は、式(7)のインダクタンス比で表される移送係数 η_m で検討できる。

4.2 引張せん断強さに及ぼすシーム圧接長の影響

Fig.8 は放電エネルギー Wc を変えた場合の引張せん断強さである⁹⁾。引張せん断強さは引張せん断荷重 P で評価した。試験片は、圧接された試料の両端から約 10mm を除いて、約 10mm 幅で切り出した。シーム圧接長 50mm では中央部 3 片を、100mm では中央部 2 片、両端部 1 片ずつの計 4 片を、200~500mm では中央部 2 片、両端部 2 片ずつの計 6 片を引張せん断試験し、得られた最大荷重を平均して引張せん断荷重 P とした。せん断荷重 P は未接合および切断中にはく離の 0 kN、接合面はく離 (●, ■, ▲, ◆), 母材破断 (○, □, △, ◇) へと大きくなる。圧接に要する放電エネルギー Wc は、シーム圧接長 l が大きくなると高くなった。Fig.8 の白抜き印の最小値は母材破断に必要な最小放電エネルギー Wr である。以下、このエネルギーを母材破断エネルギーと呼ぶ。母材破断エネルギー Wr およびその単位長さあたりの母材破断エネルギー Wr/l に及ぼすシーム圧接長 l の影響を Fig.9 に示す。 l が 50mm から 500mm に大きくなると、 Wr は 0.9kJ から 1.9kJ へと高くなった。しかし、 Wr/l

Fig.8 Relationship between shearing load and discharge energy

Fig.9 Influence of seam length on discharge energy per unit length and discharge energy with rupture

は指数関数的に減少し、18kJ/m から 3.8kJ/m になり、約 21% に減少した。エネルギー利用効率の観点から、電磁圧接はシーム圧接長が大きい金属薄板の接合に適している。

4.3 シーム圧接長と回路定数および移送係数の関係

電磁圧接の電気エネルギーは、Fig.5 の等価回路のコンデンサ電源 C から実効インダクタンス L_e に移動する。 C から L_e への移動を検討するには、シーム圧接長によって変わる放電電流の周期や回路定数などを知る必要がある。Fig.9 の母材破断エネルギー W_r における放電電流（コイル電流）の周期 T 、放電電流と式(4)で求めたインダクタンス L 、 L_e および式(7)で求めた移送係数 η_m を Table 1 に示す⁹⁾。回路インダクタンス L は、Fig.6(b)の放電電流を式(3)の線形の放電電流と見なして計算したため、平均値である。

Table 1 Transfer coefficients and inductances with circuits

Seam length l / mm	Period T / μs	Inductance L / μH	Effective inductance L_e / μH	Transfer coefficient $\eta_m = L_e/L$
50	13.9	0.048	0.025	0.52
100	15.3	0.058	0.035	0.60
200	17.6	0.077	0.054	0.70
300	19.8	0.097	0.074	0.76
500	23.7	0.139	0.116	0.83

シーム圧接長 l が 50mm から 500mm に大きくなると、周期 T は 13.9 μs から 23.7 μs に増加し、回路インダクタンス L は 0.048 μH から 0.139 μH に増加した。 l の増加量 10 倍に比べ、 L の増加量は約 2.9 倍と少ない。また、 L は T の 2 乗に比例しており、この電磁圧接回路の振動性は強い。

実効インダクタンス L_e は、式(4)から回路インダクタンス L から残留インダクタンス L_r を引いて求められる。 L_r はシーム圧接長 l にかかわらず 0.023 μH 一定であるため、 l が 50mm から 500mm に大きくなると、 L_e は 0.025 μH から 0.116 μH に増加した。 l の増加に伴って L_r の影響が小さくなり、式(7)の移送係数 η_m は 0.52 から 0.83 に増加した。

4.4 移送係数と母材破断エネルギーの関係

Fig.10 は Fig.9 の単位長さあたりの母材破断エネルギー W_r/l と Table 1 の移送係数 η_m との関係を表している。 η_m が大きくなると、 W_r/l は反比例的に減少する。 η_m から W_r/l を知ることができ、移送係数 η_m が大きい装置ならば、エネルギー利用効率の高い電磁圧接実験が可能になる。

Fig.10 Relationship between energy per unit length and transfer coefficient

Fig.11 Relationship between effective energy and seam length

残留インダクタンス L_r が異なる回路では、Fig.5 の実効インダクタンス L_e に入る母材破断時の電気エネルギー W_e が分かっているれば、回路のエネルギー移動を調査できる。式(7)の W_e を W_r とおいて、 W_e は式(8)で表される。

$$W_e = \eta_m W_r \quad (8)$$

Fig.9 の W_r と Table 1 の η_m を代入して得られた W_e を Fig.11 に示す。シーム圧接長 l が 50mm ならば約 0.47kJ、500mm ならば約 1.58kJ である。残留インダクタンス L_r が変わっても、この電気エネルギー W_e を実効インダクタンス L_e に入れると、得られる電磁圧接板は母材破断する接合強さを持つ。

5. 電磁圧接装置の設計・製作時の注意事項

残留インダクタンスが移送係数とコンデンサ電源の最小充電エネルギーへ及ぼす影響を述べ、設計・製作時の注意事項を示す。

5.1 残留インダクタンスの影響

電磁圧接装置の構成や配線要素が変わると、回路の残留インダクタンス L_r も変わる。そのとき、移送係数 η_m は L_r が 0.023 μH の Table 1 の数値ではない。式(7)の移送係数 η_m に及ぼす残留インダクタンス L_r の影響を Fig.12 に示す。図中の大きな印の η_m は L_r が 0.023 μH における Table 1 の数値である。 L_r が零と仮定すれば、すべてのシーム圧接長 l で η_m が 1.0 であるため、コンデンサ電源の充電エネルギー W_c は回路抵抗 R で消費されるエネルギーを除き、実効インダクタンス L_e に移送される。しかし L_r が大きくなると、 η_m は指数関数的に減少する。 l が 50mm の短いシーム接合の場合、 L_r が 0.2 μH ならば η_m は約 0.1 になる。Fig.10 から単位長さあたりの母材破断エネルギー W_r/l が急激に大きくなってエネルギー利用効率が低下するため、装置の

Fig.12 Influence of remaining inductance on transfer coefficient

圧接能力は著しく低下する。残留インダクタンスの低減は大切であり、シーム圧接長が短い接合ではできる限り小さくしなければならない。

残留インダクタンスの発生要因はコンデンサ電源、配線板、放電スイッチなどである。電磁圧接装置には、低インダクタンスの放電用コンデンサ2台以上を並列接続する⁶⁾、配線には太い同軸ケーブルもしくは幅広の銅板を用いる、低インダクタンスの放電スイッチを使用する、および配線のループ面積を小さくするなどの対策が必要である。

5.2 コンデンサ電源の最小充電エネルギー

残留インダクタンス L_r が異なる場合、母材破断に必要なコンデンサ電源 C の最小充電エネルギー W_i は、Fig.11 の W_e を Fig.12 の同じシーム圧接長の η_m で除して求められる。Fig.13はこの最小充電エネルギー W_i に及ぼす残留インダクタンス L_r の影響を示している。 L_r が $0.023\mu\text{H}$ の大きな印の W_i は Fig.9 の W_r に等しい。 L_r が大きくなると、 W_i は一次直線的に高くなる。大きな印の W_i (W_r) に比べ、 L_r が $0.1\mu\text{H}$ の W_i は、シーム圧接長 l が 50mm では2.6倍の 2.3kJ 、 500mm では1.6倍の 3.0kJ と高くなる。 L_r は小さいほどよいが、実用的な装置を製作する場合、放電音の抑制や放電スイッチの違いなどのため、 L_r が大きくなることが予想される。より放電エネルギーを必要とする銅薄板などの電磁圧接を考慮すると、残留インダクタンス L_r は、最小充電エネルギー W_i を大きな印の W_i の2倍以内に抑える数値が望ましい。 l が 50mm の圧接実験では L_r は $0.07\mu\text{H}$ 以下が、 500mm では $0.16\mu\text{H}$ 以下が望ましい。

また、残留インダクタンスの低減は最小充電エネルギー W_i を低くするため、使用電力量を抑制する。電磁圧接は省エネルギー技術である。たとえば、 5.0kJ の電磁圧接実験は、

Fig.13 Influence of remaining inductance on discharge energy

100ワットの電球を50秒間連続点灯することとほぼ等価である。Fig.3の実験装置のほかに高圧充電装置やトリガ発生装置などが必要であり、数倍の電力を消費するが省エネルギー効果は高い。圧接能力および省エネルギー効果の向上の観点から、装置の残留インダクタンスを低減する工夫および設計・製作が大切である。

6. 結 言

シーム圧接長を変えたアルミニウム薄板の電磁圧接実験を行って引張せん断強さと放電エネルギーの関係を調べた。そして、移送係数 η_m および単位長さあたりの母材破断エネルギー W_r/l を評価基準とし、等価回路の電気エネルギーの移動を調べて以下の結論を得た。

- (1) シーム圧接長が大きくなると、単位長さあたりの母材破断エネルギー W_r/l は小さくなる。したがって、電磁圧接はシーム圧接長が大きい金属薄板の接合に適している。
- (2) シーム圧接長が大きくなると、放電電流の周期は長くなる。圧接コイルと可動薄板を表す実効インダクタンスが大きくなるため、移送係数 η_m は大きくなる。
- (3) 移送係数 η_m と単位長さあたりの母材破断エネルギー W_r/l は反比例的なので、移送係数 η_m が大きいと、エネルギー利用効率の高い電磁圧接が可能になる。したがって、装置の圧接能力の推定は移送係数 η_m を調べればよい。
- (4) シーム圧接長が短いシーム接合の場合、残留インダクタンスの大きい装置の圧接能力は著しく低下する。したがって、残留インダクタンスを低減することは大切であり、その発生要因であるコンデンサ電源、配線板、放電スイッチなどのインダクタンス分を抑制すればよい。
- (5) 残留インダクタンスの低減は装置の圧接能力を向上させるばかりでなく、使用電力量を抑制できるため、省エネルギー効果を高める。

本研究について、ご指導とご支援を賜りました千葉大学、広橋光治名誉教授に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 相沢友勝・岡川啓悟：塑性と加工，**52**-603 (2011)，424-428。
- 2) 岡川啓悟・相沢友勝：塑性と加工，**48**-555 (2007)，323-327。
- 3) 岡川啓悟・相沢友勝・広橋光治・石橋正基：塑性と加工，**50**-585 (2009)，936-940。
- 4) 相沢友勝・岡川啓悟・石橋正基・カシヤニ メハダッド：平成 23 年度塑性加工春季講演会講演論文集，(2011)，225-226。
- 5) 日本塑性加工学会編：塑性加工便覧，(2006)，802-803，コロナ社。
- 6) 日本塑性加工学会編：高エネルギー速度加工，(1993)，165-167，コロナ社。
- 7) 松田正文：溶接学会東海支部第51回溶接研究会，(2003)，1-10。
- 8) 相沢友勝・熊谷正樹・岡川啓悟：軽金属溶接，**48**-5 (2010)，158-162。
- 9) 石橋正基・岡川啓悟・相沢友勝・辺見信夫：第60回塑性加工連合講演会講演論文集，(2009)，135-136。