アルミニウムと異種金属の爆発圧接材の Transition Piece への適用性について (第1報)*

福井利安** 難波圭三** 杉山禎彦**

On the Applicability of Explosively Bonded Materials of Aluminum-Other Metal to Transition Piece for Joining Dissimilar Metals (Report 1)*

by Toshiyasu Fukui**, Keizo Namba** and Yoshihiko Sugiyama**

Abstract

A study has been made of the properties of explosively bonded interface between aluminum and dissimilar metals such as copper and mild-steel.

Tests were carried out on the effect of heat-cycle on the structures and mechanical properties of bonds in order to clarify the applicability to the transition pieces.

In the explosive bonding of Al-Cu, alloying layers were considerably formed in the interface, and their constitution was θ (CuAl_2) phase mainly. By heat-cycle, the growth of another alloying layers which seemed to be γ_2 (Cu_9Al_4) phase was observed between Cu-matrix and θ (CuAl_2) phase.

Alloying layers observed in explosively bonded Al-Fe seemed to be composed of the eutectic of α (Al) and θ (FeAl_3) phase. By heat-cycle, θ (FeAl_3) phase grew to exist by itself for the most part. However, there was some possibility of existing of another intermetallic compounds such as η (Fe_2Al_5).

The shear strength of the explosive bonds in Al-Cu and Al-Fe lowered with raise of temperatures of heat-cycles and there was observed a change in their fracture mode. This resulted from the influence of the formation or growth of intermetallic compounds by heat-cycle.

But by heat-cycle of 3 pass welds the growth of an alloying layer was not so often observed as that by $550^\circ\text{C} \times 3$ min. From this result, there can be confirmed the applicability of these bonded materials to transition piece. However, it was necessary to pay full attention to selection of explosive conditions, since the cracks and voids which seemed to reduce the properties of explosive bonds were observed in the alloying layer of bonds.

1. 緒 言

アルミニウムと異種金属の接合は化学機器、船舶、特殊車輛、電導機器あるいは熱交換器などの分野で重要な問題として注目されているが、この接合方法としては直接法あるいは間接法による溶融接合、圧接法、拡散法あるいは超音波法による固相接合、ロウ付けあるいはハンダ付けによる半溶融接合などがある^{1)~4)}。

これらの接合法は用途に応じ、種々使い分けられているが、比較的工業的にも適用し易く、かつ継手性能の信頼性が高いものの一つとして異種金属の爆発圧接材を溶接継手の transition piece として用いる方法がある。

アルミニウムと異種金属の爆発圧接あるいはこれらの

圧接境界における溶融層の形成についてはすでに種々報告されているが^{5)~9)}、これらの爆着材を溶接継手の transition piece として用いた場合の性能あるいは溶接熱サイクルを受けた場合の組織変化などについてはまだ不明な点も多いように思われる。

本研究は transition joint として工業用純アルミニウムとタフパッチ銅および工業用純アルミニウムと軟鋼の爆着材を選び、これらを溶融溶接における transition piece として用いた場合の継手部の性能を明らかにしようとするものであるが、まず本報では、これらの接合でもっとも問題となる接合境界での合金層の形成および溶接熱サイクルによるこれらの成長について報告する。

2. 供試材および実験方法

供試材には工業用純アルミニウムとタフピッチ銅および工業用純アルミニウムと軟鋼の 20 mm (10 mm + 10

* 原稿受付 昭和45年7月14日 (昭和45年度春季全国大会に発表)

** 正 員 住友軽金属工業・研究部 Member, Research Dept.,
Sumitomo Light Metal Industries, Ltd.

mm) 厚の爆着材をそれぞれ用いた。これらの爆着材はいずれも旭化成工業㈱で製造されたものであるが、薬種、薬量、間隙、配地などの起爆条件の詳細は不明である。

実験は爆着材の機械的性質および接合境界における合金層の確認と種々の熱サイクルによるこれらの変化について行なった。

熱サイクルとしては加熱による等時焼鈍 ($300\sim 600^{\circ}\text{C} \times 2\text{ min}$ および $300\sim 600^{\circ}\text{C} \times 3\text{ min.}$) ならびに等温焼鈍 ($400^{\circ}\text{C} \times 1\sim 60\text{ min.}$ および $500^{\circ}\text{C} \times 1\sim 60\text{ min.}$) および実際の MIG 溶接 (アルミニウム側) による 1~4 層 bead-on-plate の溶接である。なお、等時および等温焼鈍の加熱はすべて塩浴炉で行なった。所定温度への到達時間は 5 秒以内である。Bead-on-plate の溶接の状況は Fig. 1 に示す。

機械的性質は主として剪断強度について行なったが、試験片および試験方法は Fig. 2 に示す。

Fig. 1 Schematic cross-sections of bead-on-plate welds of explosive-bonded transition pieces with aluminum-copper and aluminum-mild steel.

Fig. 2 Shear test specimen and its measuring apparatus.

3. 実験結果

3.1 Al-Cu 接合境界の組織と硬さ

Photo. 1 および 2 に Al-Cu 接合境界の組織を示す。ただし、Photo. 1 は研磨のまま (no etching) であり、Photo. 2 は同じ部分の etching 後の組織である。これ

Photo. 1 Micro-structures of explosive-bonded layer in aluminum-copper. Not etched. $(\times 100) \times \frac{1}{3}$

Photo. 2 Micro-structures of explosive-bonded layer in aluminum-copper. Etched. $(\times 100) \times \frac{1}{3}$

より明らかなごとく爆着された時点ですでにかなりの合金層 (no etching で白, etching 後は黒く見える) が形成されており、この合金層は 3 層溶接あるいは 500 および $550^{\circ}\text{C} \times 2\text{ min}$ の熱サイクルを与えても変化しない。ただし、 550°C で加熱した場合は Photo. 2 よりも明らかなごとく、この合金層と銅マトリックスの間に別の薄い合金層が形成されている。

Photo. 3 に凹凸のある接合境界および比較的平坦な接合境界の組織を示すが、上述の加熱による新しい合金層の形成が明確に認められる。この合金層は 2~3 つの層よりなっている。またアルミニウム・マトリックスでは銅の拡散層と思われる領域も認められる。すなわち、Al-Cu の爆発圧接境界にはかなり大きい合金層 (溶融層) が形成されているが熱サイクルを与えると別の合金層や拡散層も形成されてくる。

Fig. 3 に Al-Cu 接合境界における硬さ分布を示す。爆着されたままの状態ではアルミニウム・マトリックスは $\text{MVH}=37.1\sim 43.8$ 、銅マトリックスは $\text{MVH}=84.1$

Photo. 3 Effect of short time annealing on formation of intermetallic compounds and their growth in explosive-bonded interface of aluminum-copper. Etched. ($\times 400$) $\times \frac{1}{2}$

Fig. 3 Micro Vickers hardness of explosive-bonded layer in aluminum-copper.

～118, 合金層は $MVH=362\sim 441$ となっている。しかし $550^{\circ}\text{C}\times 2\text{min}$ の加熱をしたものではアルミニウム・マトリックスが $MVH=30.7\sim 32.1$, 銅マトリックスが $MVH=80.2\sim 93.4$ と軟化しているが, 合金層は $MVH=303\sim 412$, $MVH=420\sim 464$ および $MVH=514\sim 643$ の 3 種が認められ, この内後の 2 つは加熱によって形成されたものである。(これらの合金層の組成については 3.3. 項を参照のこと。) また $MVH=134\sim 137$ の拡散層も認められる。この拡散層はアルミ・マトリックス中へ銅が拡散して出来たものであろう。

$550^{\circ}\text{C}\times 2\text{min}$ の加熱材に比べて爆着されたままのものではアルミニウム・マトリックスおよび銅マトリックスの硬さが高い値でかつ広範囲にわたってばらついているが, これは爆発圧接境界ではかなりの強加工による硬化と同時に温度の上昇による軟化が起っているためであると思われる。

3.2 Al-Fe 接合境界の組織と硬さ

Photo. 4 に Al-Fe 接合境界の組織を示す。これより明らかなごとく, 爆着された時点ですでにかなりの合金層が形成されている。この合金層は Photo. 4 で白く見えるが, アルミニウム・マトリックスおよび鉄マトリックス以外の白い領域(主として鉄マトリックス中に混在している。)がすべて合金層とは限らず, アルミニウムの一部が合金層を形成しないでそのマトリックスより逸脱し鉄マトリックス中に混在しているものもある。

Photo. 4 Micro-structures of explosive-bonded layer in aluminum-mild steel. Etched. ($\times 100$) $\times \frac{1}{2}$

3 層溶接および 500°C , $550^{\circ}\text{C}\times 2\text{min}$ の加熱による熱サイクルを与えることにより, 接合境界に形成されている合金層はやや成長する。しかし Al-Cu に見られたように新しく別の合金層が形成されているような様子はない。

Photo. 5 に凹凸のある接合境界および比較的平坦な接合境界の組織を示すが, 加熱により合金層がかなり成長していることがわかる。またアルミニウム・マトリックスの端部に鉄の拡散層も形成されていることがわかる。

Fig. 4 に Al-Fe 接合境界における硬さ分布を示す。爆着されたままの状態ではアルミニウム・マトリックスは $MVH=42.3\sim 47.9$, 鉄マトリックスは $MVH=210\sim 244$ であり, 合金層は $MVH=232\sim 286$ および $MVH=623\sim 766$ の 2 種がある。 $550^{\circ}\text{C}\times 2\text{min}$ の加熱をしたものではアルミニウム・マトリックスは $MVH=27.8\sim$

Photo. 5 Effect of short time annealing on formation of intermetallic compounds and their growth in explosive-bonded interface of aluminum-mild steel. Etched. ($\times 400$) $\times \frac{1}{3}$

30.7, 鉄マトリックスは MVH=186~208, 合金層は MVH=221~322 および MVH=460~549 である。

これらより明らかなごとく, 550°C の加熱によっても生成される合金層の種類にはとくに変化はなく, 硬さの値が大きい合金層の形成量が少し増加しているだけであると思われる。しかし, 硬さの値には, かなりのバラツキが認められ, このことは, 別の合金層が形成されている可能性があることも示している。しかし, この詳細は不明である。

3.3 Al-Cu および Al-Fe 接合境界における合金層の確認

Al-Cu および Al-Fe の接合境界において形成されている合金層の組成を EPMA で調べ, いかなる金属間化合物が形成されているかを推定した。

一般に2成分系の合金層の組成は, その合金層中の試

Fig. 4 Micro Vickers hardness of explosive-bonded layer in aluminum-mild steel.

料電流と両方の単独金属の試料電流を測定することによりかなり正確に推定することができる。本実験において Al-Cu および Al-Fe の接合境界における合金層中のアルミニウム量は次式より求めた。

$$W_{Al}(wt\%) = \frac{C_I - C_{Cu,Fe}}{C_{Al} - C_{Cu,Fe}} \times 100$$

Table 1 に Al-Cu および Al-Fe の爆着材および 550°C $\times$ 2 min 加熱材についてこれらの測定結果とこの組成より推定される金属間化合物を示す。

これより明らかなごとくまず Al-Cu では爆着時に形成される多量の合金層は θ ($CuAl_2$) 相であり, 550°C

Table 1 Estimation of intermetallic compounds in alloying layer of explosive-bonded specimens. (EPMA)

Materials	Heat treatment after exp. bond.	Alloying layers	$\frac{C_I - C_{Cu,Fe}}{C_{Al} - C_{Cu,Fe}}$ *	Average contents, wt. % (at. %)	Estimation of compounds in alloying layer	Remarks (X-ray diffraction pattern)
Al-Cu	As bonded	I	$\frac{42.3 \sim 50.1}{101 \sim 107}$	Al: 44.4(65.4) Cu: 55.6(34.6)	θ ($CuAl_2$)	θ ($CuAl_2$)
	550°C $\times$ 2min.	I	$\frac{79.1 \sim 89.9}{186 \sim 188}$	Al: 45.2(66.2) Cu: 54.8(33.8)	θ ($CuAl_2$)	θ ($CuAl_2$)
		II	$\frac{31.3 \sim 38.3}{187}$	Al: 18.6(35.0) Cu: 81.4(65.0)	γ_2 (Cu_9Al_4)	$\gamma_2(Cu_9Al_4)$?
Al-Fe	As bonded	I	$\frac{101 \sim 113}{148 \sim 152}$	Al: 71.1(83.4) Fe: 28.9(16.6)	$\alpha(Al) + \theta(FeAl_3)$	θ ($FeAl_3$)?
	550°C $\times$ 2min.	I	$\frac{97.0 \sim 109}{150}$	Al: 68.5(82.5) Fe: 31.5(17.5)	$\alpha(Al) + \theta(FeAl_3)$	θ ($FeAl_3$)
		II	$\frac{86.5 \sim 94.5}{153}$	Al: 59.2(75.2) Fe: 40.8(24.8)	θ ($FeAl_3$)	

* $W_{Al}(wt\%) = \frac{C_I - C_{Cu,Fe}}{C_{Al} - C_{Cu,Fe}} \times 100$.

W_{Al} : Content of aluminum in alloying layer.

C_I : Sample current through alloying layer.

C_{Al} : Sample current through aluminum.

$C_{Cu,Fe}$: Sample current through copper or mild steel.

×2 min の加熱で γ_2 (Cu_9Al_4) 相が形成されてくることがわかる。この内 θ (CuAl_2) 相についてはX線回折でも確認できた。

いっぽう Al-Fe では爆着時に形成されている合金層は θ (FeAl_3) 相であり多くの場合 α (Al) + θ (FeAl_3) の共晶となっている。550°C×2min の加熱では θ (FeAl_3) 相が成長し単独で存在しているのが多く認められる。X線回折の結果でも θ (FeAl_3) 相は認められている。

3.4 Al-Cu および Al-Fe 接合境界の剪断強度

Fig. 5 に Al-Cu および Al-Fe 接合境界の剪断強度におよぼす加熱の影響を示す。これより明らかなごとく、Al-Cu、Al-Fe とも加熱温度の上昇にともない剪断強度は低下している。剪断強度は爆着方向に対して剪断方向が平行である場合と直角である場合で少し異なるが、温度の上昇とともに剪断強度が低下する傾向は同様である。

Fig. 5 Effect of short time (3 min.) annealing on shear strength of explosive-bonded interfaces in aluminum-copper and aluminum-mild steel.

Photo. 6 に Al-Cu および Al-Fe 接合境界の剪断試験後の破面を示す。Al-Cu では加熱温度が上昇しても破面はあまり変わらないが、Al-Fe では著しい変化が認められる。すなわち、加熱温度が上昇すれば剪断試験材の破面に爆着時の波形 (wavy interface) が現われてくる。これは破断が合金層で生じていることを示すものであり、しかもこの破断に関連するのは、爆着時に形成される合金層ではなく、その時の加熱によって成長してく

Photo. 6 Fractures of shear test specimens in explosive-bonded aluminum-copper and aluminum-mild steel.

る合金層であると思われる。(なぜならば、Photo 1, 2 および 4 より明らかなごとく、爆着のままで、すでにかんりの合金層-溶融層が形成されているが、Fig. 5 に示すごとく、剪断強度は非常にすぐれている。しかしながら、爆着後、熱サイクルを与えると、ごくわずかの新しい合金層が形成されるだけで、爆着時に形成された合金層はほとんど変化していないにもかかわらず、剪断強度はかなり低下しているからである。またこれらは、破断部の断面検査でもある程度確認された。)

4. 考 察

異種金属の接合で最も問題となるのは接合境界における合金層の形成であり、このため異種金属の直接溶融溶接するのは一部の例外を除いて不可能な場合が多い。しかしながら、すでに何らかの形で接合された異種金属を transition piece として用いる間接法による溶融接合では実用的にもかなりの期待がもてる。

Fig. 6 Several joint designs for welding dissimilar metals using explosive-bonded transition pieces.

この transition joint の方法としてはその用途により Fig. 6 に示すような継手形状が考えられる。しかしながらこのような接合方法でも transition joint 自体の性能と溶接熱サイクルによる接合境界での合金層の成長が問題となることが多い。

Photo. 1~3 および Table 1 よりも明らかなごとく Al-Cu の接合では爆着によりかなりの θ (CuAl_2) 相が接合境界に形成され、その後の加熱によって τ_2 (Cu_9Al_4) 相が成長している。石井ら⁸⁾は爆発圧接により形成される溶融層は θ (CuAl_2) 相よりむしろ τ_2 (Cu_9Al_4) 相の方が支配的であるとしている。Ryabov¹⁰⁾ らは Al-Cu クラッド板の加熱でまず最初 θ (CuAl_2) 相が形成され、より高温になると θ (CuAl_2) 以外に τ_2 (Cu_9Al_4) 相が成長してくるとしている。本実験の結果は石井らの結果と少し異なり、部分的ではあるが Ryabov らの結果と一致している。

しかしながら爆着時に形成されるこれらの金属間化合物はその条件により当然変化しうるものであり、 θ (CuAl_2) 相が形成されても τ_2 (Cu_9Al_4) 相が形成されてもなんら不思議ではない。

Photo. 7 は比較的低エネルギーで爆着された Al-Cu 接合境界であるが、爆着のままでは Photo. 1~3 に認められたような合金層はあまり形成されていない。しかも 550°C の加熱で認められる合金層は MVH=119~129 であり、これはアルミニウム・マトリックスへの銅の拡散層である。すなわち、爆着の条件により溶融層の形成量は著しく異なり、また形成される金属間化合物も異なってくると思われる。

Photo. 7 Effects of short time annealing and weld heat input on formation and growth of alloying layer in explosive-bonded aluminum-copper. Etched. ($\times 100$) $\times \frac{1}{3}$

いっぽう Al-Fe の接合では爆着により θ (FeAl_3) 相が形成され、その多くは $\alpha(\text{Al}) + \theta(\text{FeAl}_3)$ の共晶とな

っているが加熱による θ (FeAl_3) 相の成長は著しい。石井ら⁸⁾は η (Fe_2Al_5) 相と θ (FeAl_3) 相のいずれか、あるいはこの両方が形成されるとしており、Rabkin ら¹¹⁾や Rjabov ら¹²⁾ もほぼ同様の結果を得ている。本実験では EPMA による組成の推定より、 θ (FeAl_3) 相としたが、Fig. 4 に示した硬さでかなりのバラツキが認められ、これは形成されている金属間化合物が一種類でないことを示唆している。

Fig. 5 および Photo. 6 より Al-Cu および Al-Fe 接合境界の剪断強度は加熱により著しく影響されているが、これは実際の transition joint で溶接熱サイクルを受けた場合、同様な挙動を示す可能性があることを示している。しかしながら、Photo. 1, 2 および 4 よりも明らかなごとく 3 層溶接の熱サイクルを与えても 550°C $\times$ 2 min の加熱材に見られるほどの合金層の成長は認められず、この点より溶接熱サイクルによる接合境界の性能の劣化は少ないのではないかとと思われる。

Photo. 8 に Al-Cu および Al-Fe 接合境界における合金層での欠陥を示す。Al-Cu の合金層では割れが生じており Al-Fe では空洞が形成されている。これらはいずれも爆着時に形成あるいは導入されたものであると思われるが、接合境界の性能の劣化の原因になると思われるので爆着時のじゅうぶんな配慮が望まれる。

Photo. 8 Defects observed in intermetallic compounds of explosive-bonded layers in aluminum-copper and aluminum-mild steel. ($\times 100$) $\times \frac{1}{3}$

5. 結 言

Al-Cu および Al-Fe 爆着材の接合境界の組織や機械的性質と熱サイクルによるこれらの変化について調べた結果、次の点が明らかとなった。

(1) Al-Cu の爆着材ではその接合境界にかなりの合金層が形成されており、これらは主として θ (CuAl_2)

相である。加熱するとさらに別の合金層が成長するがこれは γ_2 (Cu_9Al_4) 相である。

(2) Al-Fe の爆着材の接合境界に形成されている合金層は α (Al) + θ (FeAl_3) の共晶である。加熱すると θ (FeAl_3) 相が成長し、単独で存在する量が多くなる。しかし他の金属間化合物—たとえば η (Fe_2Al_6) 相が混在している可能性もある。

(3) Al-Cu および Al-Fe 爆着材の接合境界の剪断強度は加熱により著しく低下し、破面も変化してくる。これは加熱によって形成あるいは成長した金属間化合物の影響が強いことを示している。

(4) 3 層溶接程度の溶接熱サイクルでは $550^\circ\text{C} \times 2$ min の加熱で認められる程の合金層の成長はなく、この点より transition joint としてかなり期待がもてる。

(5) しかし爆着材の圧接境界の合金層には割れや空洞も認められる。これらは圧接境界の性能を低下させると思われるので爆着条件の選定に際してじゅうぶんに注意しなければならない。

謝辞：本研究を進めるに際し、EPMA の測定にご協力戴いた住友軽金属工業・研究部・直江正久氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) M.A. Miller: "Joining Aluminum to Other Metals", W.J., Vol. 32 (1953), No. 8, 730~740
- 2) R.R. Irving: "Joining Dissimilar Metals", Iron Age, (1965), April 1, 51~66
- 3) 杉山: "アルミニウムと異種金属の溶融溶接", 溶接法研究委員会資料, No. SW-C-3-65
- 4) F.R. Baysinger: "Welding Aluminum to Steel Using Transition Insert Piece", W.J., Vol. 48 (1969), No. 2, 95~101
- 5) C.S. Smith: "Metallographic Studies of Metals after Explosive Shock", Trans. Met. Soc. AIME, Vol. 212 (1958), Oct. 574~589
- 6) 石井: "爆発圧接", 溶接学会誌, Vol. 36 (1967), No. 12, 1287~1300
- 7) 石井, 恩沢, 生沼, 村越: "爆発圧接境界の溶融層の研究 (第1報)", 溶接学会誌, Vol. 38 (1969), No. 6, 601~607
- 8) 石井, 恩沢, 生沼: "爆発圧接境界の溶融層の研究 (第2報)", 溶接学会誌, Vol. 38 (1969), No. 12, 1371~1378
- 9) D.J. Rockenbach and T.J. Enright: "Design and Fabrication of Welded Anode Assemblies For a Prebake Aluminum Potline", Light Metal Age, Vol. 27 (1969), No. 6, 10~12
- 10) V.R. Ryabov, A.V. Lozovskaya and V. Ya. Markiv: "Phase Composition of Welded Joints between Aluminum and Copper", Svar. Proiz., (1968), No. 4, 9~12
- 11) D.M. Rabkin et al.: "Research into the Structure of the Diffusion Layer in Welded Clad Metal", Avt. Svarka, (1968), No. 3, 8~12
- 12) W.R. Rjabow und A.W. Losowskaja: "Untersuchung der Schmelzzonen zwischen Aluminium und Stahl", Schweißtechnik, Vol. 18 (1968), Heft 9, 399~403

IIW/JIW

— 1971年度 IIW 年次大会 —

1971年6月6日より12日までの一週間、スエーデン、ストックホルムにて、1971年度、IIW 年次大会が開催されます。

本大会に、出席、および、論文の提出を希望されます方は、早急に、本会事務局まで、ご連絡下さい。

連絡先：社団法人 溶 接 学 会

東京郎千代田区神田佐久間町 1-11

電 話 03-253-0488