銅とアルミニウムの摩擦圧接継手の衝撃強度向上*

伊藤 義 康^{*1}, 新 藤 尊 彦^{*1}
安 藤 秀 泰^{*2}, 永 田 晃 則^{*3}Improvement of Impact Strength for Copper/Aluminium
Friction Welded JointYoshiyasu ITOH, Takahiko SHINDOH,
Hideyasu ANDOH and Kohsoku NAGATA

The friction welding for copper and aluminum is useful to minimize the diffusion thickness at the interface between copper and aluminium. The minimization of diffusion thickness is required for maintaining the joint strength. However, it is generally difficult to maintain the joint strength. Because brittle intermetallic compounds are necessarily formed at the friction weld interface between copper and aluminium. The improvement techniques on joint strength characteristics have not fully been clarified. In this study, stress singularities at the intersection of free surfaces and the interface between copper and aluminium were investigated using finite element analysis. It was informed that the no free-edge stress singularities existed below an apex angle of 59° and between angles of 98° and 126° . In this experiment, copper and aluminium friction welded joints were fabricated as to minimize ($>1\mu\text{m}$) the welding condition of the diffusion thickness at the interface between copper and aluminium. It was confirmed that the good tensile strength could be observed in all cases tested. However, the Charpy impact energy became comparatively low in case of an apex angle of 90° , and showed a remarkable high impact energy can be obtained in case of no free edge stress singularities.

Key Words: Tensile Strength, Charpy Impact Energy, Interface, Copper, Aluminium, Friction Weld, Intermetallic Compound, Free-Edge Stress Singularity, Stress Concentration, Impact Strength

1. 結 言

導電率が高い Cu は電気機器に不可欠な材料であり、軽量の Al との接合は実用上、重要な技術である。一般に Cu と Al の接合にはろう付けが使われているが、信頼性の高い直接接合が可能となれば、高導電性、低コスト化など電気産業分野への波及効果は大きい。ところで、摩擦圧接は、基本的に塑性流動と固相接合に基づくプロセスであり、低い接合温度での局部発熱による接合が可能である。Cu と Al のような異種金属の組合せでは、接合面での脆性層の形成が問題となるが、摩擦圧接ではこの金属化合物層の制御が比較的容易である⁽¹⁾。既に、Cu と Al の組合せについては、アプセット圧力の影響⁽²⁾を始めとして摩擦圧接条件が継手強度に及ぼす影響など多くの研究⁽¹⁾が行われている。種々の条件で摩擦圧接試験が行われた結果、接合界面が 821 K 以上に加熱されると共晶点組成の融液を生じ、この共晶点組成の凝固層と、これに隣接し

て生じる θ 相(CuAl_2 金属間化合物)が脆いため、継手強度を低下⁽³⁾させる。さらに、Cu と Al の摩擦圧接継手は、723 K 以上の焼なまし処理により接合界面には CuAl_2 (θ 相)以外にも、 CuAl (η_2 相)や Cu_9Al_4 (γ_2 相)の生成が確認されており、継手強度が低下⁽⁴⁾する。このように摩擦圧接継手強度の改善には、接合界面に形成される金属間化合物層厚さの成長抑制が重要である。著者らはこのような観点から、前報⁽⁵⁾において Cu と Al の摩擦圧接継手の界面に形成される金属間化合物層の、成長挙動について明らかにした。さらに Cu と Al の接合界面に形成される金属化合物層の厚さは、継手の衝撃強度特性に大きな影響を及ぼすことを明らかにした⁽⁶⁾。その結果、Cu と Al の摩擦圧接継手の実用化には、継手界面の衝撃強度特性の改善が最重要課題と考えられた。

以上より、本研究では Cu と Al の摩擦圧接継手を対象に、接合界面端部の応力集中を低減させることにより、衝撃強度特性の向上を計ることを目的とする。

2. 接合界面端部の応力分布特性

2・1 解析方法 異種材料間の接合部の力学的状態は、接合部の強度に大きな影響を及ぼす。特に、異種材料の接合界面端部においては、自由縁特異性と呼

* 原稿受付 1998 年 2 月 23 日。

^{*1} 正員, (株)東芝電力・産業システム技術開発センター (〒210 0862 川崎市川崎区浮島町 2 1)。^{*2} (株)東芝電力・産業システム技術開発センター。^{*3} 正員, (株)東芝電力・産業システム技術開発センター (〒230 0045 横浜市鶴見区末広町 2 4)。

ばれる応力とひずみの特異性が生じる。すなわち、接合界面端部からの距離を r とすると、接合界面端部近傍の応力場 σ_{ij} は次式で表される。ただし、 p は応力特異性指数である。

$$\sigma_{ij} \propto 1/r^p \quad \dots\dots\dots (1)$$

しかし、この自由縁応力特異性は、接合界面端部の幾何学的形状の適正化を計ることにより消失させることが可能である⁽⁷⁾。このような接合界面端部の自由縁応力特異性に注目し、セラミックスと金属⁽⁸⁾、あるいは金属と高分子材料などの異種材料間の接合強度向上に関する研究が進められている。二次元異種材料接合界面端部の応力特異性を決める特性方程式は、Bogy⁽⁹⁾により導かれている。図1は平面ひずみ状態で、CuとAlの接合界面端部の応力特異性指数 p を摂動法により計算した結果を示す。すなわち、自由縁を直線とし、この自由縁とCu/Al接合界面のなす角度である θ_1 を変えた場合の結果である。計算に用いたCuとAlの材料定数は図中に示す。図1から明らかなように $\theta_1 \leq 58^\circ$ 、 $98^\circ \leq \theta_1 \leq 126^\circ$ の範囲において、自由縁応力特異性の消失が認められる。また、通常の摩擦圧接継手のように、自由縁と接合界面のなす角度が $\theta_1 =$

90° の場合には $p=0.03$ 程度の応力特異性指数が認められる。

以上の平面ひずみ状態での解析結果を実験的に検証するために、本研究では接合界面近傍で平面ひずみ状態に近いと考えられる丸棒継手試験片を用いる。そこで、Cu/Al摩擦圧接継手の応力解析を有限要素法により実施した。有限要素法解析には汎用の弾性解析プログラム(軸対称四角形要素)を用いた。すなわち、半径 R のCuとAl丸棒の端面同士が摩擦圧接され、一様引張応力を受ける場合とした。接合界面形状は、自由縁と接合界面のなすAl側の角度が $\theta_1=90^\circ$ の場合、すなわちType A継手について解析を行った。また、図1から自由縁応力特異性の消失が認められる条件として $\theta_1=40^\circ$ (Type B継手)、 110° (Type C継手)を選び、接合部は円すい形状の凹凸のはめあいとなる場合について解析を行った。解析に用いたCuとAlの材料定数は、図1中に示す値を用いた。なお、後章で組織観察結果を示すが、本研究では接合界面には明りょうな金属間化合物層は観察されないことから、解析においては考慮しなかった。

2.2 解析結果

図2には、Type A継手、すなわち自由縁と接合界面のなす角度が $\theta_1=90^\circ$ の場合の接合界面近傍の応力分布を示す。図2の右端に応力分布の表示領域を斜線で示すが、いずれも自由縁は右側である。ただし、各応力成分は一様引張応力 σ_n により無次元化して示す。図2から明らかなように、接合界面端部において自由縁応力特異性が確認される。特に、引張軸方向応力成分 σ_z と、せん断応力成分 τ_{rz} に関しては接合界面端部で比較的大きな応力集中を生じている。

図3には、Type B継手、すなわち自由縁と接合界面のなすAl側の角度が $\theta_1=40^\circ$ の場合の、接合界面近傍の応力分布を示す。接合界面端部における自由縁

Fig. 1 Intensity of stress singularity for free-edge of copper/aluminium interface

Fig. 2 Stress distribution near free-edge of Cu/Al interface (Type A: $\theta_1=90^\circ$)

Fig. 3 Stress distribution near free-edge of Cu/Al interface (Type B: $\theta_1=40^\circ$) Fig. 4 Stress distribution near free-edge of Cu/Al interface (Type C: $\theta_1=110^\circ$)

応力特異性が消滅している様子が明らかである。特に、破壊の発生に大きな影響を及ぼす引張軸方向応力成分 σ_z に関しては、接合界面端部において応力低下を生じている様子がわかる。一方、中心軸上の界面端には異材埋込み形の応力特異性⁽¹⁰⁾が生じており、Type B 継手では、この応力集中が強度上問題になると考えられる。

図4には、Type C 継手、すなわち $\theta_1=110^\circ$ の場合の、接合界面近傍の応力分布を示す。接合界面端部近傍においては、Type A 継手と類似した応力分布特性が認められる。自由縁応力特異性の有無については、接合界面端部のより詳細な解析が必要である。中心軸上の界面端にも応力集中が生じているが、Type B 継手ほど顕著ではない。

以上より、引張軸方向の応力成分 σ_z に注目し、接合界面端部の詳細な解析結果を図5にまとめて示す。図5から明らかのように、Type A 継手では $r/R \leq 0.05$ の範囲で、ほぼ自由縁応力の特異性指数 $p=0.03$ に従った応力集中傾向が認められる。Type B 継手では前述のように、接合界面端部に向けて σ_z 応力の低下傾向が明らかである。また、Type C 継手では σ_z 応力はほぼ一定値を示し、自由縁応力特異性の存在は認めら

Fig. 5 Axial stress distribution along Cu/Al interface near free-edge

れないことが、詳細解析により明らかである。

3. 実験方法

3.1 供試材料 実験には市販材である直径 11.5 mm の無酸素 Cu 丸棒 (JIS H 3250 C 1020 BDH) と、直径 13 mm の純 Al 丸棒 (JIS H 4040 A 1050 BE) を用いた。使用した素材の化学組成と機械的性質を表1にまとめて示す。本研究では Cu 丸棒の端面を図6で示すように Type A, Type B, Type C の各形状に機

械加工で仕上げた後、摩擦圧接を行った。これは、最終接合界面形状は融点の高い Cu の端面形状により決定されることを予備試験で確認したためである。また、Type B、Type C 継手に関しては 2 章の解析により中心軸上の界面端にも、異材埋込み形の応力特異性に起因する応力集中傾向が見られたため、接合界面形状を円弧状として異材埋込み形の応力特異性を回避することとした⁽¹¹⁾。摩擦圧接には、ブレーキ式摩擦接合機を用いた。接合条件は図 6 中に示す各継手形状ともに同じとした。摩擦圧接後は、特に熱処理を施さずに機械加工により、直径 10 mm、長さ 55 mm の丸棒継手シャルピー衝撃試験片と、図 7 に示す丸棒継手引張試験片を作製した。

Table 1 Chemical composition and mechanical properties

	Chemical composition (mass %)					Mechanical properties			
	Al	Fe	Si	Cu	Ti	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (% G.L.25mm)	Reduction of area (%)
JIS H4040 A1050BE	99.58	0.29	0.11	0.1	0.1	39.5	65.5	52.1	94.0
JIS H3250 C1020BDH	Cu : 99.99					-	321.0	19.6	75.8

Fig. 6 Specimen configuration for friction welding and welding condition

試験片を作製した。

3・2 実験方法 摩擦圧接部材はファインカットで中心軸に沿って切断し、鏡面研磨後に金属顕微鏡と走査形電子顕微鏡(SEM)で断面マクロ組織観察、接合界面のミクロ組織観察を行った。

摩擦圧接継手の丸棒引張試験は、室温においてクロスヘッド速度 0.5 mm/min で実施し、最大引張強さ、伸び(標点距離: 35 mm)、破断絞りの測定を行った。引張試験は Type A、Type B、Type C、いずれも各 2 本ずつ試験に供した。衝撃試験では、室温において切欠きのない丸棒継手試験片の Cu/Al 接合界面にシャルピー衝撃試験機(294 J)を用いて打撃を与え、吸収エネルギーを測定した。衝撃試験は Type A が 8 本、Type B、Type C は 9 本ずつを試験に供した。

4. 摩擦圧接部材の機械的特性と考察

4・1 接合界面の組織 図 8 には Type A、Type B、Type C の各試験体の摩擦圧接部のマクロ組織観察結果を示す。摩擦圧接後で、バリの付いたままの状態である。図 8 から明らかなように、Al 側の変形が大きく、融点の高い Cu 側にはほとんど変形は認められない。また、各試験体ともに接合界面にはマクロに欠陥は認められなかった。ただし、Type A 試験体では接合界面の Al 側の厚さ 2 mm 程度の無特長の白色

Fig. 7 Specimen configuration for tension test

Fig. 8 Macrostructure of Cu/Al interface after friction welding

領域が観察される。無特徴領域には Al 本来の組織が観察されないことから、摩擦圧接時に再結晶温度以上に加熱された領域と考えられる。無特徴領域は Type B 試験体においては、1/5 以下の薄い領域に限定されており、バリの出やすさと関係があると思われる。逆に、バリの出にくい Type C 試験体においては、無特徴領域は Type A よりも広がる傾向を示した。

図 9, 10, 11 は、それぞれ試験体の Cu/Al 接合界面の詳細な組織観察を SEM により行った結果である。いずれも接合界面に割れなどの顕著な欠陥は認められなかった。また、摩擦圧接継手の中心軸 ($r=5\text{ mm}$) 近傍には明りょうな Cu/Al 界面が認められ、自由縁 ($r=0\text{ mm}$) 近傍には界面から Al 側へ Cu の飛び出し

が観察された。この飛び出し現象は、Type C 試験体の場合には観察されなかった。さらに、接合界面には $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上の顕著な金属間化合物層は認められなかった。

4・2 継手部の静的引張強度特性 図 12 には、摩擦圧接試験体の継手部の静的引張強度特性をまとめて示す。図 12 から明らかなように、Type A, Type B, Type C のいずれの試験体の引張強度も、Al の引張強度の 65.5 MPa と同等か、それ以上の値を示した。破断絞りについても、Al の絞りの 94.0% と同等以上の値を示した。破断伸びに関しては、Cu/Al 継手部の Al のみが伸びたと仮定し、Al の伸びの 52.1% の半分 26% と比較すると、同等か、それ以上の値を示した。

Fig. 9 Scanning electron micrographs of Cu/Al friction weld interface (Type A)

Fig. 10 Scanning electron micrographs of Cu/Al friction weld interface (Type B)

Fig. 11 Scanning electron micrographs of Cu/Al friction weld interface (Type C)

図13には、各摩擦圧接試験体の引張破壊状況を示す。図13から明らかなように、Type A, Type B, Type Cのいずれの試験体も、破断位置は接合界面ではなく、Al部分であることがわかる。すなわち、各摩擦圧接試験体の接合界面強度は、Alの引張強度以上である。

以上より、接合界面形状をType A, Type B, Type Cと変えることによる継手部の静的引張強度特性に差は認められなかった。

4.3 継手部の衝撃強度特性

図14には、Type

Fig. 12 Tension test results of Cu/Al friction welds

Fig. 13 Fracture appearance of tension test specimen

A, Type B, Type Cの各摩擦圧接継手試験体の、常温におけるシャルピー衝撃吸収エネルギーのワイブルプロットの結果を示す。従来より、摩擦圧接継手部の静的強度に関しては、接合界面での破断を生じないように、摩擦圧接条件の最適化を計ることが可能である。しかし、その場合でも衝撃値に関しては極端に低い値を示すことが知られている。サブサイズの2 mmV ノッチ・シャルピー衝撃試験片を用いて測定したCuの吸収エネルギーが $110 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ 、Alは $65 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ である⁽⁶⁾ことを考慮すると、Type A試験体の平均吸収エネルギー $38 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ は、ノッチがないことも考慮に入れて相当に低い値であることがわかる。さらに、実験データのバラツキも著しいことがわ

Fig. 14 Weibull distribution for impact energy of Cu/Al friction welds

Fig. 15 Fracture appearance of impact test specimen in case of Type A

Fig. 16 Fracture appearance of impact test specimen in case of Type B and C

かる。図 15 には、Type A 試験体の代表的な衝撃破壊状況を示す。衝撃吸収エネルギーのバラツキは、破壊状況の顕著な差からも明らかである。高い吸収エネルギーの試験体は Al 部分での曲げ変形が顕著で、低い場合にはほとんど塑性変形を示さずに接合界面で破断している。

一方、Type B, Type C 試験体の平均吸収エネルギーは、それぞれ $84 \times 10^4 \text{ J/m}^2$, $85 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ であり、実験データのバラツキもほとんど認められない。図 16 には Type B, Type C 試験体の代表的な衝撃破壊状況を示すが、いずれの試験体も Al 部分での曲げ変形による顕著な破壊状況を示した。

以上より、接合界面形状を通常の Type A から、接合界面端部の自由縁応力特異性を消失させた Type B, あるいは Type C と変えることにより、摩擦圧接継手部の衝撃強度特性を著しく向上させることができる。

5. 結 論

(1) 平面ひずみ状態の Cu と Al の接合界面端部

において、自由縁と接合界面のなす Al 側の角度が $\theta_1 \leq 58^\circ$, $98^\circ \leq \theta_1 \leq 126^\circ$ の範囲において、自由縁応力特異性の消失が認められた。また、 $\theta_1 = 90^\circ$ の場合には $p = 0.03$ の応力特異性指数が得られた。

(2) 有限要素法解析より、引張軸方向応力成分 σ_z は $\theta_1 = 90^\circ$ 継手の場合、 $r/R \leq 0.05$ の範囲で自由縁応力の特異性指数 $p = 0.03$ に従った応力集中傾向が認められた。 $\theta_1 = 40^\circ$ 継手では接合界面端部に向け σ_z 応力の低下傾向が認められた。また、 $\theta_1 = 110^\circ$ 継手では σ_z 応力はほぼ一定で自由縁応力特異性は認められなかった。

(3) $\theta_1 = 90^\circ$, $\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_1 = 110^\circ$ と接合界面形状を変えて作製した摩擦圧接継手試験体において、静的引張破断位置は接合界面ではなく、Al 部分であり、静的引張強度、伸び、絞りもほぼ Al と一致し、接合界面形状による差は認められなかった。

(4) 接合界面端部の自由縁応力特異性を消失させた $\theta_1 = 40^\circ$, $\theta_1 = 110^\circ$ の摩擦圧接継手試験体においては、Al 部分での曲げ変形が顕著な衝撃破壊挙動を示し、 $\theta_1 = 90^\circ$ 試験体と比較して継手部の衝撃吸収エネルギーを著しく向上させることが可能となった。

文 献

- (1) 篠田剛, 溶接学会誌, 60-2(1991), 115-120.
- (2) 有年雅敏・沖田耕三・圓城敏男・池内建二・松田福久, 溶接学会論文集, 9-4(1991), 467-474.
- (3) 摩擦圧接研究会編, 摩擦圧接, (1979), 75, コロナ社.
- (4) 諸住正太郎・菊地勉夫, 軽金属, 32-4(1982), 195-201.
- (5) 伊藤義康・新藤尊彦・斉藤正弘・手塚勝, 機論, 64-618, A (1998), 494-499.
- (6) 伊藤義康・新藤尊彦・斉藤正弘・手塚勝, 機論, 64-624, A (1998), 2197-2202.
- (7) 久保司郎・大路清嗣, 機論, 57-535, A(1991), 632-636.
- (8) 古口日出男・日野利文・菊地義光・矢田敏夫, 機論, 59-560, A(1993), 1114-1119.
- (9) Bogy, D. B., *J. Appl. Mech.*, 38(1971), 377-386.
- (10) 陳玳珩・西谷弘信, 機論, 57-534, A(1991), 366-371.
- (11) 大路清嗣・久保司郎・中井善一・井岡誠司, 材料, 41-468(1992), 1389-1395.