アルミニウム合金の鋳造材と展伸材の摩擦圧接

加藤 数良*・時末 光*

Friction welding of cast-to-wrought aluminum alloys

Kazuyoshi KATO* and Hiroshi TOKISUE*

In friction welding of 5052 wrought alloy to high pressure castings of AC4C, several welding conditions and mechanical properties of welds were investigated. The conventional type of friction welding machine was used. On the 5052 alloy, fine grain structure resulting from disappearance of fiber one was observed closely near the weld interface and modified fiber one along the flow direction of burr at the heat-affected zone. While on the side of castings fine grain structure having no sign of cast one was observed closely near the weld interface. The hardness of both the annealed and the as received 5052 alloys at the weld interface had higher values than that of the castings. The highest tensile strength of weld joint could be obtained when friction time was 2 second, but it was lower than that of the base metals. And when friction time was 1 and 2 second the elongation of weld joints showed the similar values to that of castings. The impact values of the joint having a notch at the weld interface were inferior to that of the base metals.

Keywords: friction welding, high pressure casting of aluminum alloys, wrought aluminum alloy, macro and microstructures, mechanical properties.

(Received November 5, 1985)

1. 緒 言

近年、鋳造品は鋳造法や素材の改良などにより高強度の製品が得られ、多方面で使用されているが、その強度はいまだ展伸材のそれには及ばない。しかし、複雑な形状の製品を製作する場合、展伸材を用いると加工工数が多くなるなどの問題点が多々ある。そこで工程の短縮、材料費の節減などを含め、両者の特性を有効に利用するためには、両者を接合して用いることが考えられる。これらの接合には各種の方法が用いられているが、なかでも異種金属の接合には摩擦圧接が有効であり、容易に安定した継手が得られることはよく知られている¹⁾。摩擦圧接による鋳造材と展伸材の接合に関する報告はいくつかあるが、いずれも各種の鋳鉄と炭素鋼の組合せによるものであり^{2)~4)}、アルミニウム合金の鋳造材と展伸材の組合せに関する報告はほとんどない。

本報では、アルミニウム合金の鋳造材と展伸材の組合せによる摩擦圧接の可能性を追求し、適切な圧接条件を選定することを目的として、摩擦圧接継手の諸性質について検討を行った。

2. 試料および実験方法

圧接素材としては、鋳造材にアルミニウム合金鋳物4種C (AC4C) の高圧鋳造材を、展伸材に市販の直径20 mm の5052-H11材を用いた。**Table 1**に素材の化学組成を示す。5052材は受け入れ状態のもの（以下受け入れ材と称す）および焼なまし処理（733 K×2 hr 空冷）を施したもの（以下焼なまし材と称す）を用いた。鋳造材は通常の重力鋳造法によるものでは、鋳造欠陥など接合時に問題となる事項が多いと考えられる。このため著者らの実験結果⁵⁾を参考として、高圧鋳造法の一つであるプランジャ加圧凝固法⁶⁾により、**Table 2**に示す鋳造条件によつて直径60 mm、長さ180 mm の円柱状鋳塊を作成した。得られた鋳塊の**Fig. 1**に示す場所より□40 mm×10 mm の板状の試料を採取して鋳放しのまま（以

Table 1 Chemical compositions of base metals (%)

Materials	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
5052	0.07	0.14	0.01	0.04	2.57	0.01	0.22	0.01	bal.
AC4C	7.11	0.12	—	0.04	0.33	—	—	—	bal.

* 日本大学生産工学部（習志野市）。College of Industrial Technology, Nihon University (Narashino).

Table 2 Casting conditions of AC4C

Pouring temperature	(K)	1023
Mold temperature	(K)	523
Plunger speed	(m/s)	0.028
Press pressure	(MPa)	196
Pressure holding time	(sec)	180

Fig. 1 Sampling positions of plate from the AC4C ingot. (unit: mm)

下鑄造材と称す)で実験に供した。各素材の機械的性質を Table 3 に示す。

圧接には制動式摩擦圧接機を使用した。初めに鑄造材と展伸材を圧接し、一旦室温まで空冷した後、鑄造材を中心として対称の位置に展伸材を再度圧接した。このことは板状の鑄造材を使用したことにより、鑄造材を中心としてサンドイッチ状に圧接を行うことによつて各種の試験片を得るのに必要な長さを確保するためである。第1回目の圧接後一旦室温まで空冷したのは、予備実験の結果、第1回目の圧接後直ちに第2回目の圧接を行った継手は、継手強度にバラツキが多く安定した継手が得られなかつたことによつた。圧接条件を Table 4 に示す。

引張試験には鑄造材を試験片平行部中央とした JIS 4 号試験片 (GL=50 mm) を用いて室温で試験を行い、衝撃試験はシャルピー衝撃試験として第1回目および第2回目の接合面に切欠きを付した JIS 3 号試験片を用いて室温で試験を行った。

3. 実験結果および考察

Fig. 2 に圧接継手の接合部の外観の一例として、焼なまし材を用いて摩擦時間2秒で圧接を行った継手を示す。鑄造材には変形はほとんど認められないが、展伸材側は同径の同種材料で圧接を行った場合と同様に外周方

Table 4 Friction welding conditions

Friction speed	(s ⁻¹)	58
Friction pressure	(MPa)	49
Friction time	(sec)	1-4
Forge pressure	(MPa)	98
Forge time	(sec)	5

向に押し出されたバリが明瞭に観察された。第1回目と第2回目の接合部には明瞭な差異は認められなかつた。写真は示さないが、受け入れ材を用いた継手は焼なまし材を用いた継手に比較してバリの発生が若干小さくなる傾向を示した他は大差なかつた。

巨視的および微視的組織の一例として Fig. 2 に示した焼なまし材を用い、摩擦時間2秒で圧接を行った継手の写真を Fig. 3 に示す。巨視的組織においては、展伸材の素材部に観察される軸方向に平行な繊維状組織は接合面に近づくにつれてバリの流出方向に沿つて外周部に押し出されるように変化し、接合面のごく近傍では繊維状組織は消滅している。接合面では展伸材が鑄造材に凸レンズ状にくい込んだ状態であつた。微視的組織は、鑄造材の中央部は高圧鑄造により得られた微細な樹枝状晶組織と同一の組織を呈しており、接合面のごく近傍では展伸材側、鑄造材側のいずれも微細な組織を示し、鑄造

Fig. 2 View of friction welded joint under condition of friction time 2 sec and using annealed 5052 alloy.

Table 3 Mechanical properties of base metals

Materials		Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Impact value (kJ/m ²)	Hardness mHv (load=2.9 N)
5052	annealed	205.0	25.7	1579	65
	as received	339.3	16.2	230	84
AC4C		199.1	7.5	106	61

Fig. 3 Macro and micro structures of friction welded joints under condition of friction time 2 sec and using annealed 5052 alloy.

材側では鋳造組織は認められなかった。巨視的組織、微視的組織ともに第1回目と第2回目の接合部には明瞭な差は見られなかった。受け入れ材を用いた継手の接合部近傍の組織は、焼なまし材を用いた継手と類似した様相を呈した。

Fig. 4 に圧接継手の硬さ分布の一例として、摩擦時間 2 秒で圧接を行った継手の中心部を軸方向に測定した結果を示す。(a)に示す焼なまし材を用いた継手では、第1回目および第2回目の接合面ともに圧接時の熱と加圧力の影響により両素材に比較して硬さは高い値を示し、鋳造材側、展伸材側ともに約 1 mm で素材硬度となった。第1回目の接合面は、第2回目の接合面に比べ、硬さはやや高くなる傾向を示した。(b)に示す受け入れ材を用いた継手の接合面の硬さは、第1回目および第2回目の接合面は共に鋳造材より高い値を示したが、受け入れ材の素材に比べかなり低い値であった。鋳造材側は焼なまし材を用いた場合と類似した様相を示したが、展伸材側は接合面より離れるのに伴い硬さは低下し、接合面より 1 mm の位置では焼なまし材の素材硬度と同程度の値を示した。さらに接合面より離れるのに伴い硬さは回復し、接合面より 12 mm 以上離れた部分では受け入れ

Fig. 4 Hardness distributions of friction welded joints under condition of friction time 2 sec.

材の素材硬度を示した。同様の傾向が2017合金摩擦圧接継手⁷⁾にも認められており、加工硬化した状態や時効硬化した状態などの素材硬度の高い場合に軟化域が認められるものと考えられる。接合面の硬さは、受け入れ材に比較して焼なまし材を用いた継手の方がやや高い値を示した。

Fig. 5 に圧接時の温度変化を測定した結果の一例として受け入れ材を用いて摩擦時間2秒で第1回目の圧接を行った時のものを示す。測定位置は図中に示すように、いずれも圧接時に固定側とした鋳造材の部分であり、接合面より1 mm (A点) および5 mm (B点：鋳造材の

Fig. 5 Relation between friction time and temperature under condition of friction time 2 sec and using as received 5052 alloy.

Fig. 6 Relation between friction time and total upset.

中央)の軸心を通る線上とした。A点では摩擦圧力が付加された直後より急激に温度は上昇し、摩擦過程終了時の2秒後に最高温度(883 K)に達し、以後急激に温度は低下して全工程終了時(圧接開始より7秒後)には約450 Kとなった。B点ではA点に比較して温度勾配はやや緩やかであり、最高温度に達するまでの時間はわずかではあるが遅くなる傾向が認められた。また最高到達温度は663 Kであり、A点に比べ低い値を示した。最高温度に到達後の冷却の状態はA点と類似した経過を示しており、全工程終了時にはA点と同一温度となった。図は示さないが第2回目の圧接時も第1回目の圧接時とほぼ同様の傾向を示した。

Fig. 6 に摩擦時間と全寄りしろの関係を示す。使用した素材の種類に関係なく摩擦時間が長くなるのに伴い、全寄りしろは大きくなる傾向を示した。受け入れ材を用いた継手の全寄りしろは摩擦時間の長短に関係なく、焼なまし材を用いた継手に比べ約2 mm 小さい値を示した。Fig. 3 に示した巨視的組織で明らかのように、鋳造材側からはバリの発生は認められず、展伸材が鋳造材にわずかにくい込んだ状態である。このため全寄りしろはそのほとんどが展伸材がバリとして押し出されたために生じたものと考えられる。

Fig. 7 に引張試験結果を示す。摩擦時間2秒で圧接した継手は、使用した素材に関係なく引張強さは最も高い値を示したが、それぞれの素材の引張強さに比べ低い値であった。伸びは摩擦時間の増加に伴い、いずれの継手も低下する傾向が認められた。焼なまし材を用いた継手では、摩擦時間1秒および2秒、受け入れ材を用いた継手では摩擦時間1秒で圧接を行ったものが、鋳造材の素材と同等以上の伸びを示したが、他は鋳造材に比べ低い値を示した。破断場所は素材の種類に関係なく、摩擦時間4秒で圧接した継手は接合面で破断し、摩擦時間2秒および3秒で圧接を行った継手および受け入れ材の摩擦時間1秒で圧接した継手は、鋳造材の部分で破断した。焼なまし材を用いた摩擦時間1秒の継手は、鋳造材あるいは焼なまし材のいずれかの熱影響部で破断した。このため図中の焼なまし材を使用し摩擦時間1秒で圧接した継手の測定値は、破断場所に関係なく両者の平均値で示した。また引張強さには破断場所による明瞭な差は認められなかったものの、伸びは展伸材側の熱影響部で破断した継手は約24%、鋳造材側の熱影響部で破断した継手は約8%とかなりの差が認められた。焼なまし材を用い摩擦時間1秒で圧接した継手の破断場所に相違が認められたのは、他の圧接条件に比べ熱影響を受ける範囲が狭いことによるものと考えられる。

Fig. 8 に引張試験後の破断面の一例として焼なまし材を用いて摩擦時間2秒で圧接を行った継手について示

Fig. 7 Results of tension tests.

す。微視的破面はいずれも破面中央部のものである。巨視的破面は、焼なまし材の素材はカップアンドコーン状の破面であるが、鋳造材の素材は局部収縮のほとんどない平坦な破面であった。圧接継手では鋳造材の部分で破断したために鋳造材と類似した様相を示した。微視的破面は、焼なまし材の素材は全面ディンプル破面であるが、鋳造材の素材および圧接継手ではディンプルと脆性的な破面が混在した破面を呈した。圧接継手は、鋳造材の素材に比べてディンプルが破面上に占める割合がやや多くなる傾向が認められた。

Fig. 9 に衝撃試験結果の一例として引張強さが最大で

あつた摩擦時間 2 秒で圧接したものについて示す。圧接継手の衝撃値は受け入れ材を用いた継手に比べ焼なまし材を用いた継手が切欠きの位置に関係なく高い値を示したが、両者の素材の衝撃値に比較して低い値であった。第 1 回目の接合面に切欠きを付した継手に比べ、第 2 回目の接合面に切欠きを付した継手は、使用した素材の種類に関係なく、衝撃値はやや低い値を示した。

Fig. 10 に衝撃試験後の破面の一例として、焼なまし材を用いて摩擦時間 2 秒で圧接を行ったものについて示す。微視的破面は、いずれも破面の中央部のもので写真の上方が切欠き部である。圧接継手の第 1 回目と第 2 回

Fig. 9 Results of Charpy impact tests.

Fig. 8 Macro and micro fractographs of tension test specimens under condition of friction time 2 sec and using annealed 5052 alloy.

Fig. 10 Micro and micro fractographs of Charpy impact test specimens under condition of friction time 2 sec and using annealed 5052 alloy.

目の接合面に切欠きを付したものは、巨視的にも微視的にも大差なく、巨視的には圧接時の回転により生じたと考えられる渦巻き状の模様が観察された。微視的には切欠き位置に関係なく大小のディンプルが混在した状態が多く認められ、鋳造材の素材の一部に観察された脆性的な破面は圧接継手にはほとんど認められなかった。この

ことは、接合面の微視的組織で明らかのように、接合面の組織は鋳造材の素材に比べ微細な組織を呈したことによるものとする。

4. 結 論

アルミニウム合金の展伸材と高圧鋳造材を組合せた摩

擦圧接継手の諸性質を検討した結果、次の結論を得た。

(1) 微視的組織は、展伸材側では接合面のごく近傍で繊維状組織が消滅した微細な組織を示し、熱影響部ではバリの流出方向に沿って繊維状組織が変化することが認められた。鋳造材側では接合面のごく近傍で鋳造組織の認められない微細な組織があつた。

(2) 圧接継手の硬さ分布は、接合面は鋳造材の素材に比べ高い値を示した。焼なまし材を用いた継手では熱影響による硬さの変化が認められる範囲はわずかであつたが、受け入れ材を用いたものでは、接合面から約12 mmの範囲にわたり軟化域が認められ、接合面の硬さは受け入れ材の素材に比較してかなり低い値であつた。

(3) 圧接継手の引張強さは、摩擦時間2秒のものが最も高い値を示したが、いずれの素材に比べても低い値であつた。伸びは展伸材の素材には及ばなかつたが、圧接時間1秒と2秒では鋳造材の素材と同程度の値が得られ

た。

(4) 圧接継手の衝撃値は、いずれの素材を用いた継手も第1回目の接合面に切欠きを付したものは、第2回目の接合面に切欠きを付したものに比べやや高い衝撃値を示したが、素材の衝撃値には及ばなかつた。

参 考 文 献

- 1) 摩擦圧接研究会編：摩擦圧接，コロナ社（1979），8.
- 2) 蓮井，小川，岡田：溶接学会誌，**46**（1977），258.
- 3) 高岡，細江：摩擦圧接協会研究発表会資料，No. 50，（1970）.
- 4) 田中，戸川，藤本，武良：摩擦圧接協会研究発表会資料，No. 77（1972）.
- 5) 時末，青木：軽金属，**25**（1975），200.
- 6) 鈴木：金属学会報，**7**（1971），464.
- 7) 加藤，時末：軽金属，**34**（1984），325.