ポラスアルミニウムとアルミニウム緻密板材の発泡中のプレス加工による接合

大塚 駿* 半谷 禎彦 三ツ木寛尚 天谷 賢児

群馬大学 大学院理工学府

J. Japan Inst. Met. Mater. Vol. 86, No. 2 (2022), pp. 30-33
© 2022 The Japan Institute of Metals and Materials
Express Rapid Publication

Joining of Porous Aluminum and Aluminum Dense Plate by Press Working during Foaming

Shun Otsuka*, Yoshihiko Hangai, Hironao Mitsugi and Kenji Amagai

Graduate School of Science and Technology, Gunma University, Kiryu 376-8515

In this study, porous ADC12 (Al-Si-Cu alloy) and an A1050 (commercially pure aluminum) dense plate were joined by press working during foaming. The A1050 dense plate was first heated using an optical heating device, and then the ADC12 precursor was placed on the A1050 dense plate. Next, we attempted to join porous ADC12, and the A1050 dense plate by press working during the foaming of porous ADC12. It was shown that porous ADC12 and the A1050 dense plate can be joined by press working during foaming while maintaining the pore shape of porous ADC12. The joined samples exhibited joining strengths higher than the tensile strength of the porous ADC12 itself.

[doi:10.2320/jinstmet.J2021046]

(Received October 15, 2021; Accepted December 3, 2021; Published January 11, 2022)

Keywords: porous aluminum, light heating, press working, joining, foam

1. 緒 言

ポラスアルミニウム (Al) は内部に多数の気孔を持つ多孔質金属材料で、水に浮かぶほど軽量であり、衝撃吸収性、断熱性、吸音性に優れているため、軽量化による燃費の向上と衝撃吸収による安全性の向上などを目的に自動車用構造部材や飛行機用構造部材などへの利用が期待されている¹⁾。一方で、引張強度や曲げ強度が低い材料としての単一の利用が制限されている。そこで緻密な板材と複合化することで、軽量でありながら強度の向上を望むことができる。ポラス Al は一般的に発泡剤を Al に添加したプリカーサと呼ばれるポラス材料の前駆体を加熱発泡することで作製される²⁾。過去の研究ではポラス Al の高強度化のために、緻密な表面材とプリカーサを圧延³⁾や摩擦攪拌接合 (FSW)⁴⁾によって接合し、加熱発泡させることによってポラス Al と表面材との複合部材を作製する方法が提案されている。この方法での利点はポラス Al と表面材で強固な金属接合が可能になることである。しかし、この方法は接合のために圧延や FSW を行う工程を必要とし、また平面状の部材しか作製できないという問題点がある。

そこで本研究では、加熱発泡中の軟化したポラス Al をプレス加工すると同時に Al 緻密板材と接合し、複合化を試みた。過去の研究で、発泡中の軟化した状態であればポー

ラス Al は気孔を維持したままプレス加工できることがわかっている⁵⁾。この方法により、ポラス Al の形状付与のためのプレス加工と同時にポラス Al と Al 緻密板材との接合が実現できるため、生産性の向上が期待できる。また本研究によりプレス加工による表面材とポラス Al の接合が可能になれば、湾曲した板材に発泡したポラス Al が接合できるなど複雑形状にも適用できることが期待される。接合したポラス Al と Al 緻密板材は、X 線 CT 撮像し内部の気孔を観察した。そして、接合強度を評価するために引張試験を行い、ポラス Al 部で母材破断を達成できる高い接合強度が得られるか検討した。

2. 実 験 方 法

2.1 プリカーサ作製方法

ポラス Al の前駆体であるプリカーサは FSW 法⁶⁾を用いて作製した。Fig. 1 にプリカーサの作製方法の概略図を示す。Fig. 1(a)のように、大きさ 210 mm × 80 mm × 3 mm の ADC12 (Al-Si-Cu 系合金) ダイカスト板材 2 枚の間に、発泡剤である TiH₂ 粉末と気孔形態安定剤である Al₂O₃ 粉末の混合粉末を散布した。ADC12 の液相線温度は 580℃、固相線温度は 515℃である⁷⁾。これらの粉末の添加量は攪拌領域質量に対して TiH₂ を 1 mass%, Al₂O₃ を 5 mass% とした。次に Fig. 1(b)のように、粉末散布領域の上に高速回転させた円筒状のツールを走査させることで、材料との間で発生した摩擦熱で軟化した部分に材料流動を生じさせて、2 枚の ADC12 板材の接合

* 群馬大学大学院生 (Graduate Student, Gunma University)

を行うと同時に発泡剤と気孔形態安定剤を ADC12 板材中に均一に攪拌した。使用したツールは工具鋼製でプローブにはねじが付いており、ショルダ径 17 mm, プローブ径 5 mm, プローブ長さ 4.8 mm である。走査は、プローブ径と同じ 5 mm ずつずらしながら 4 列を行い、それを 2 往復行った。それぞれの箇所は 4 回ツールが通過するため、発泡剤や気孔形態安定剤の粉末を均一に母材中に分散させることができる。摩擦攪拌接合の条件として、ツール回転数は 1000 rpm, ツール走査速度は 100 mm/min, 前進角 3° とした。ツール走査は日立設備エンジニアリング(株)の摩擦攪拌接合装置を用いて行った。以上の手順で作製した積層板の攪拌領域内から Fig. 1(c) のように機械加工によって 15 mm × 15 mm × 6 mm に切り出し、本実験で使用するプリカーサとした。

2.2 ポーラス ADC12 と Al 緻密板材のプレス加工による接合

Fig. 2 にプリカーサを発泡させたポーラス ADC12 と Al 緻密板材とのプレス加工による接合手順について示す。Al 緻密板材として A1050(工業用純アルミニウム)圧延板材を用い

Fig. 1 Schematic illustration of fabrication of ADC12 precursor.

た。A1050 の液相線温度は 657°C, 固相線温度は 646°C である⁷⁾。Fig. 2(a) に示すようにセラミックハニカム板の上に 40 mm × 40 mm × 3 mm の A1050 板材を置いて、光加熱装置を用いて加熱した。加熱には 3 本のハロゲンランプを使用し、ランプの出力は 1 本あたり 1620 W(電流 9 A, 電圧 180 V)になるようにして加熱を行った。板の下の部分の温度を熱電対を用いて計測し、温度が 550°C になったところで、Fig. 2(b) のように ADC12 プリカーサを A1050 板材上に置いた。ハロゲンランプとプリカーサ上面の距離は 40 mm とした。プリカーサが加熱によって少し発泡し始め、柔らかくなったところで、Fig. 2(c) のようにロボットアームを挿入し、金網をプリカーサの真上に移動させた。そして発泡したプリカーサと A1050 板材を合わせた厚さが 9 mm になるように 1 mm/s でプレス加工を行った。その後、Fig. 2(d) のように、プリカーサの発泡中に金網を振幅 5 mm 程度で左右に動かすと同時に、セラミックハニカム板を振幅 15° 程度で円弧上に回転させながら加熱し続けた。なお、金網を動かす条件は A1050 板材からポーラス Al がはみ出さないように設定し、台の動かす条件は A1050 板材の下に熱電対が外れないように設定した。Fig. 2(e) のようにプリカーサが A1050 板材と同じ 40 mm × 40 mm 程度に発泡したときにハロゲンランプを消灯した。この試験を 8 回行った。

2.3 ポーラス ADC12 の気孔形状の観察

得られたすべての接合体に対して、X 線 CT 撮像による気孔形状の観察を行った。X 線 CT 撮像は、マイクロフォーカス X 線 CT システム SMX-225CT(株島津製作所)を使用し、X 線管電圧 80 kV, X 線管電流 30 μA で行った。

2.4 接合体の引張試験

プレス加工によって接合したポーラス ADC12 と A1050 板

Fig. 2 Schematic illustration of light heating and press working.

材の接合強度を調べるために引張試験を行った。引張試験は接合体のほぼ中心から $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ の長方形に放電加工したものを T 字の治具に取り付け、治具を引張試験機でつかみ、室温・大気中、引張速度を 1 mm/min として行った。なお引張用治具は構造用接着剤を用いて接合体に接着した。

3. 実験結果および考察

Fig. 3 に光加熱およびプレス加工の様子を示す。Fig. 3(a) は A1050 板材の加熱開始直後の様子、Fig. 3(b) はプリカーサを置いたときの様子、Fig. 3(c) はプレス加工開始直前の様子、Fig. 3(d) はプレス加工開始直後の様子、Fig. 3(e) は加熱終了時の様子である。Fig. 3(c) と Fig. 3(d) のプレス加工は金網で行うため、金網を透過した光によりプリカーサは加熱し続けられている。Fig. 3(d) では、プリカーサは加熱して発泡中の軟化している状態のため、プレス加工ができています。また Fig. 3(e) では、プリカーサが十分に発泡して A1050 板材に接合している。プリカーサを投入する前に A1050 板材を加熱することで、プレス加工時にポーラス ADC12 と A1050 板

材の間に材料流動が生じやすくなり、酸化被膜が破壊され接合されたと考えられる。なお、プリカーサを置く前に A1050 板材を加熱しない場合と金網と台を動かさない場合は接合することができず、金網だけを動かす場合は、接合が不十分なものもあり再現性がなかった。

Fig. 4(a) に得られた接合体、Fig. 4(b) に得られた接合体のポーラス部中心部の横断面の X 線 CT 画像、Fig. 4(c) に得られた接合体の中心部の縦断面の X 線 CT 画像を示す。X 線 CT 画像のピクセル当量長は約 $110\text{ }\mu\text{m}$ であった。引張試験の試料は Fig. 4(a) を点線で囲った部分を $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ に放電加工して治具に取り付け作製した。Fig. 4(b) と Fig. 4(c) を見ると、ポーラス ADC12 部はプレス加工しているにもかかわらず気孔が潰れていないことがわかる。また、発泡直後の液相線温度を超えている軟化したポーラス Al であれば、形状付与した場合のポーラス Al の気孔形態には影響を与えないことが示唆されている^{5,8)}。このことからポーラス ADC12 の衝撃吸収などの特性は失われずにプレス加工や接合が可能だと考えられる。Fig. 4(c) のポーラス ADC12 と A1050 板材の接合面では、ポーラス ADC12 と A1050 板材の間に亀裂や空洞が見られず、ポーラス ADC12 と A1050 板材が接合してい

Fig. 3 Photographs of light heating and press working processes.

Fig. 4 (a) Test piece after light heating corresponding to Fig. 3(e). Black dotted box indicates sampling location of tensile test specimen. (b) Cross-sectional X-ray CT image of obtained porous ADC12 in traverse direction. (c) Cross-sectional X-ray CT image of obtained porous ADC12 in longitudinal section. Upper part is porous ADC12 and lower part is A1050 dense plate.

Fig. 5 Photographs of joined sample of porous ADC12 and A1050 dense plate (a) during tensile test and (b) fracture surfaces of porous ADC12 side and A1050 dense plate side after tensile test.

と考えられる。

A1050 板材の板厚の変化を調べるために、Fig. 4 の接合体に対して Fig. 4(c) のような縦断面の X 線 CT 画像の中から等間隔に 7 枚の X 線 CT 画像を抽出し、左端、中央、右端の 3 点の板厚を計測した。接合後の板厚の平均値は、2.66 mm であった。この減肉はプレス加工によって材料流動が生じた際、塑性変形が生じて板厚が薄くなったと考えられる。

Fig. 5(a) に引張試験の様子を示す。A1050 板材とポーラス ADC12 の接合部ではなく、ポーラス ADC12 部で母材破断していることがわかる。Fig. 5(b) に引張試験後の破断面を示す。破断面に気孔があり、ポーラス ADC12 部で破断していることがわかる。このことから A1050 板材とポーラス ADC12 の接合強度はポーラス ADC12 自体の引張強度よりも高いことがわかる。はじめに加熱した A1050 板材上で金網と台を動かすことで、材料流動によって酸化被膜を破壊し接合したと考えられる。引張試験を行った 8 個の試験片のうち 7 個がポーラス ADC12 部で破断した。残りの 1 個は大部分がポーラス ADC12 部での破断であったが、一部で A1050 板材

とポーラス ADC12 の界面で破断した。この原因として、プレス加工時の金網と台を手動で動かしているため、接合部分に偏りが生じたためと考えられるが、今後さらなる検討を行う予定である。

4. 結 言

本研究では発泡中のポーラス ADC12 と A1050 板材の接合を試みた。以下に得られた結果を示す。

(1) A1050 板材をはじめに加熱し、その上で ADC12 プリカーサを発泡させ、発泡中にプレス加工し金網や台を動かすことで材料流動を生じさせ、酸化被膜を破壊して接合できることがわかった。

(2) 得られたポーラス ADC12 はプレス加工後も気孔形態を維持できていることがわかった。

(3) ポーラス ADC12 と A1050 板材の接合体を引張試験すると、ポーラス ADC12 部で母材破断し、A1050 板材とポーラス ADC12 の接合強度はポーラス ADC12 自体の引張強度よりも高いことがわかった。

本研究の一部は、公益財団法人軽金属奨学会の課題研究の助成、および JST 未来社会創造事業 JPMJMI19E5 のもとで行われた。ここに厚く感謝いたします。

文 献

- 1) F. García-Moreno: *Materials* **9** (2016) 85.
- 2) F. Baumgärtner, I. Duarte and J. Banhart: *Adv. Eng. Mater.* **2** (2000) 168-174.
- 3) J. Banhart and H.-W. Seeliger: *Adv. Eng. Mater.* **10** (2008) 793-802.
- 4) Y. Hangai, H. Kamada, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru and N. Yoshikawa: *J. Mater. Process. Technol.* **214** (2014) 1928-1934.
- 5) Y. Hangai, D. Kawato, M. Ando, M. Ohashi, Y. Morisada, T. Ogura, H. Fujii, R. Nagahiro, K. Amagai, T. Utsunomiya and N. Yoshikawa: *Mater. Charact.* **170** (2020) 110631.
- 6) Y. Hangai, T. Utsunomiya and M. Hasegawa: *J. Mater. Process. Technol.* **210** (2010) 288-292.
- 7) The Japan Institute of Light Metals: *Structures and Properties of Aluminum*, (1991).
- 8) Y. Hangai, M. Ohashi, R. Nagahiro, K. Amagai, T. Utsunomiya and N. Yoshikawa: *Mater. Trans.* **60** (2019) 2464-2469.