

ワイヤ+アーク放電によるアディティブ・マニファクチャリング を用いた Mg 合金-Al 合金積層における Al 合金 Si 添加量の影響

埼玉大学 ○嶋田大祥, 東京農工大学 永松秀朗, 埼玉大学 ◎阿部壮志, 金子順一, 東京農工大学 笹原弘之

要旨

ワイヤ+アーク放電によるアディティブ・マニファクチャリング (WAAM) を用いた Mg 合金と Al 合金との積層において, 接合界面での凝固割れの発生が大きな課題である. 本研究では, Al 合金の凝固時の収縮に着目し, Si 添加量の異なる 3 種類の Al 合金ワイヤを用いて積層実験を行った. その結果, Si 添加量の多い Al 合金を用いることで凝固割れが抑えられ, 積層が可能であることが分かった.

1. 緒言

近年, 切削加工に比べ材料消費が少なく複雑形状造形が可能な加工法としてアディティブ・マニファクチャリング (Additive Manufacturing : AM) への注目が高まっている. その中でワイヤ+アーク放電によるアディティブ・マニファクチャリング (Wire and arc AM : WAAM) は, 金属ワイヤをアーク放電により溶融させ, 溶融池で溶滴と母材が混合し溶着金属が形成される加工法 (図 1) で, 他の AM 加工法に比べ造形能率が高い, 大型製品の加工が可能, 使用可能な材料が多いという特長を有する.

また近年, 輸送機器のさらなる軽量化を実現するため, 実用金属中最も軽量である Mg 合金の構成部品への適用が期待されている. しかし, Mg 合金は耐食性・加工性・クリープ性が劣り, 溶接・接合性に乏しく, 単体構成部品としてはニーズに応えきれない.

そこで本研究では, WAAM を用いて Mg 合金上に Al 合金を高強度に積層することで, 複合材として機能の向上を目指す. しかし, WAAM を用いた Mg 合金と Al 合金との積層において, 接合界面に凝固割れが発生し, 接合強度が非常に低くなるのが課題である. 原因として, Al 合金の凝固時の収縮により, 2 つの合金間に生成された脆弱な金属間化合物層 (Intermetallic compound : IMC) に応力が加わることが考えられる. 従って, まず Al 合金の凝固時の収縮量が Si 添加量によって変化すること²⁾に着目し, Si 添加量の異なる 3 種類の Al 合金を用いてビードオンプレート試験を行い, 接合界面の状態を調査した. その後, Mg 合金上に Al 合金を多層積層した際の造形壁形状の調査を行い, 引張試験によって機械的特性の調査を行った.

2. 実験方法

2.1. 実験装置

本実験では CMT 方式溶接電源 (Fronius Trans Puls Synergic 5000 CMT MV) の溶接トーチをロボットアーム (FANUC ARC Mate 100iC) の先端に装着し, トーチ先端の軌跡を制御した.

2.2. ビードオンプレート試験

Mg 合金 (AZ31B 圧延材) を母材として, トーチ送り速度を変更することで入熱量を変化させ, 一方向にビードを 1 層積層した. 使用する Al 合金ワイヤは JIS 規格 Z3232 に定められる, Si 添加量の異なる 3 種類 (A4043, A4047, A5356) を使用した. Mg 合金母材, Al 合金ワイヤの化学組成を表 1, 2 に示す.

実験で造形したビードを帯鋸および精密切断機 (ミリオンカッタ) により切断し, 試験片を作製した. エメリー研磨紙, バフ研磨剤 (ダイヤ 3 μm, アルミナ 0.3 μm) で研磨を行った. 走査電子顕微鏡により積層物の界面に亀裂が生じているかを確認することで積層の成否を評価し, エネルギー分散型 X 線分析 (Energy Dispersive X-ray Spectrometry : EDX) により金属間化合物層の厚さを測定した.

2.3. 多層積層実験

引張試験片作製に必要な高さ 90 mm 以上の Al 合金造形壁を Mg 合金上に積層することを目的とし, 多層積層を行ったときの Al 合金造

形壁の形状を調査した. 表 5 の条件下で Mg 合金母材上に A4047 を 1 層, 3 層~31 層まで 4 層毎増加させた造形壁をそれぞれ作製し, ノギスで高さを測定した. その際造形壁の左右で高さが不均一にならないよう, 溶接開始点と溶接終了点を 1 層毎交互に切り替えた.

2.4. 引張試験

引張試験片は造形壁からワイヤ放電加工により作製した. Mg 合金と A4047 の接合界面および A4047 造形壁の強度を調査する為, 積層方向に平行に試験片 (図 2) をそれぞれ 3 個ずつ作製した.

引張試験では, 万能材料試験機 (250 kN) とビデオ式非接触伸び計を使用し, 引張強度, 0.2%耐力, 伸びの測定を行った.

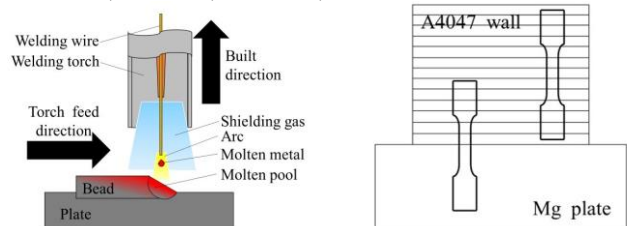


Fig.1 WAAM process

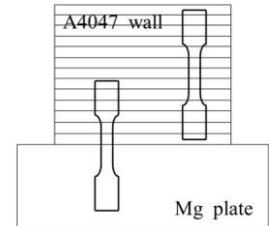


Fig.2 Tensile test pieces

Table 1 Component of Mg plate (mass%)

	Al	Zn	Mn	Si
norm				
	Fe	Cu	Ni	Mg
AZ31B	3.02	0.79	0.35	0.015
	0.0003	0.0002	0.0011	Bal.

Table 2 Component of Al wire (mass%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
norm					
	Cr	Zn	Ti	Be	Al
A4043	4.5~6.5	≤0.8	≤0.30	≤0.05	≤0.05
	-	≤0.10	≤0.20	≤0.0003	Bal.
A4047	11.0~13.0	≤0.8	≤0.30	≤0.15	≤0.10
	-	≤0.20	-	≤0.0003	Bal.
A5356	≤0.25	≤0.40	≤0.10	0.05~0.20	4.5~5.5
	0.05~0.20	≤0.10	0.06~0.20	≤0.0003	Bal.

Table 3 Experimental conditions 1

Welding Current	[A]	76
Welding Voltage	[V]	12.3
Wire feed speed	[m/min]	4.2
Torch feed speed	[mm/min]	100/250/500/1000/3000
Wire diameter	[mm]	1.2
Shielding gas		Ar100%
Shielding gas flow rate	[L/min]	15

3. 実験結果

3.1. ビードオンプレート試験

表 3 の条件下でトーチ送り速度を 100, 250, 500, 1000, 3000 mm/min と変化させ実験を行った。積層の成否を表 4 に示す。○は全体的に接合していること、△は接合しているが部分的に亀裂が生じていること、×は全体的に亀裂が生じており接合していないことを示す。A4043, A5356 については全ての条件において接合界面に沿って亀裂が生じている部分が目視および走査電子顕微鏡で確認できた (図 3)。一方, A4047 では亀裂が確認されない条件がいくつか確認された (図 4)。

入熱量と金属間化合物層厚さの関係を図 5 に示す。金属間化合物層厚さは入熱量が多いと増加することが分かる。Al 合金の種類と金属間化合物層厚さの関係については、A4000 系の 2 種類はほぼ同様な結果が得られた。これより、Al 合金 Si 添加量の差異が界面亀裂の有無に大きな影響を及ぼすことが分かった。A5356 は亀裂の影響で得られた試験片が少なく一概な結果は得られなかったが、トーチ送り速度 250 mm/min (入熱量 224 J/mm) の条件においては A4043, A4047 より薄い金属間化合物層が形成されているのが確認された。

3.2. 多層積層実験

接合界面における亀裂の発生を抑制するため、ビードオンプレート実験の結果 (3.1 節) に準じ、A4047 の Al 合金ワイヤを使用した。結果を図 6, 7 に示す。図 6 は作製したそれぞれの造形壁の高さ、図 7 は 4 層~31 層まで 4 層毎に積層された高さを示している。層数が増えることでビード形状が不均一になり、積層される高さにばらつきが生じることが確認できる。この傾向は母材を Al 合金に変えた場合でも起こることであり³⁾、A4047 の融点が低いことによって溶融池の体積が大きくなり、垂れが発生しやすくなるからであると考えられる。

3.3. 引張試験

Mg 合金-A4047 積層物、A4047 造形壁それぞれの引張強度、突き合わせ伸びを図 8 に示す。Mg 合金-A4047 積層物の引張強度は 80 MPa 前後であり、A4047 造形壁の半分程度の強度が得られた。Mg 合金-Al 合金の金属間化合物層は脆弱なため、突き合わせ伸びは A4047 造形壁が 16%前後なのに対し、Mg 合金-A4047 積層物は 1%前後であった。また、伸びが少なく塑性変形領域が狭いため、0.2%耐力の測定は不可能であった。

4. 結言

Mg 合金母材と Si 添加量の異なる 3 種類の Al 合金ワイヤを用いたビードオンプレート試験、Al 合金 (A4047) 多層積層の際の造形壁形状の調査、Mg 合金-A4047 積層物および A4047 造形壁の機械的性質の調査を行い、以下の結果が得られた。

- (1) トーチ送り速度 250 mm/min (入熱量 224 J/mm) によって積層した A5356, A4043, A4047 の IMC 厚さはそれぞれ 90, 140, 156 μm であったが、A4047 のみ接合界面に亀裂が発生しなかった。これより、Mg 合金-Al 合金の積層の成否は Al 合金 Si 添加量による影響が大きい。
- (2) A4047 を多層積層する際、およそ 20 層目以降でビードの形状が不均一になる。
- (3) WAAM を用いた Mg 合金-Al 合金の積層は Al 合金に A4047 を使用することで可能であるが、脆弱な金属間化合物の影響で引張強度は 80 MPa、突き合わせ伸びは 1%程度である。

参考文献

- 1) 松本二郎, “アルミニウム合金およびマグネシウム合金の溶接” 溶接学会誌, 63 巻 2 号 (1994), pp.76-87
- 2) 大平五郎, 小林俊雄, 坂本昭, “アルミニウム合金の凝固, 冷却時の収縮について”, 鋳物, 34 巻 3 号 (1962), pp.160-168
- 3) Markus Kohler, Sierk Fiebig, Jonas Hensel, Klaus Dilger, “Wire and Arc Additive Manufacturing of Aluminum Components”, Metals 2019, 9 (5), 608

Table 4 Bead-on-plate experimental results

Torch feed speed [mm/min]		100	250	500	1000	3000
Heat input [J/mm]		561	224	112	56	19
Experimental results	A5356 (Si : ≤0.25%)	×	△	×	×	△
	A4043 (Si: 4.5~6.5 %)	△	△	△	△	△
	A4047 (Si: 11.0~13.0 %)	○	○	△	○	△

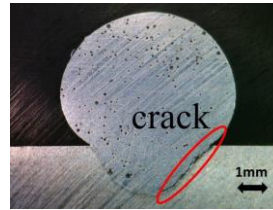


Fig.3 A5356 bead 250 mm/min

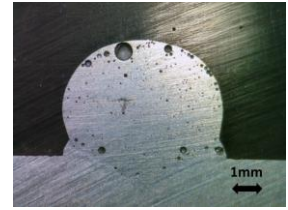


Fig.4 A4047 bead 250 mm/min

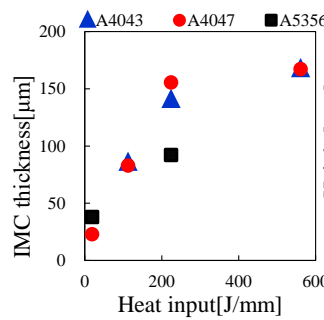


Fig.5 IMC thickness

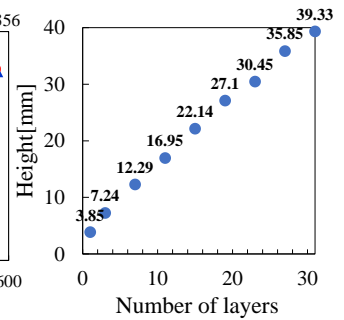


Fig.6 Fabricated-wall height

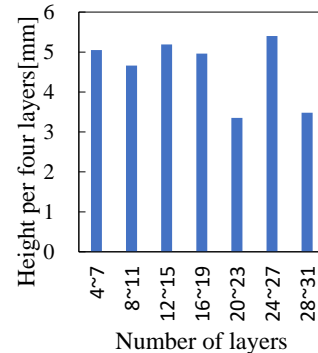


Fig.7 Fabricated-wall height per four layers

Table 5 Experimental conditions 2

	1st layer	After the 2nd layer
Welding Current [A]	76	
Welding Voltage [V]	12.3	
Wire feed speed [m/min]	4.2	
Torch feed speed [mm/min]	250	500
Wire diameter [mm]	1.6	
Shielding gas	Ar100%	
Shielding gas flow rate [L/min]	20	
Z pitch [mm]	1.6	
Waiting time for each layer [s]	30	

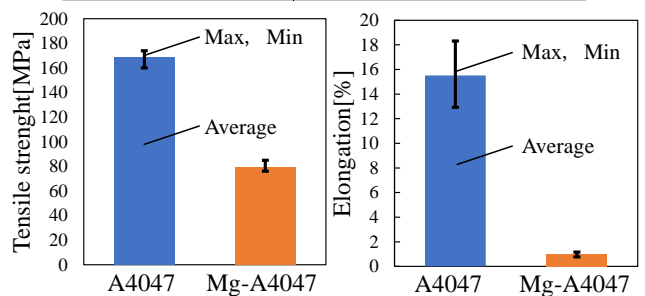


Fig.8 Mechanical properties