

アルミニウム合金を用いた熔融金属積層造形物の造形条件最適化に関する研究

東京農工大学 ○朱 小金, 阿部 壮志, 高木 悠貴, ◎笹原 弘之

要 旨

本研究では、アーク放電を用いた熔融金属積層法において、アルミニウム合金を用いて良好な造形物形状が得られる適切な造形条件を明らかにすることを目的とする。また、造形物の内部欠陥を調査し、鋳造物の内部欠陥より少ないことを明らかにした。最後に、造形物の引張強度を測定し、圧延材と同等の強度を有することを示した。

1. 緒言

近年、機械部品や金型における複雑形状を迅速に造形し、製造コストの低減や高機能化を可能にするアディティブ・マニファクチャリング技術への期待が高まっている¹⁾。

本研究では、溶接技術で用いられているアーク放電により金属を溶融・固化させる技術に着目し、熔融金属を積層する。本手法を用いて造形を行う場合、溶接電流やアーク電圧、トーチの送り速度などの積層条件を適切に決定する必要がある。積層条件が不適切な場合、熔融池から金属がこぼれ落ちて造形物が垂れたり、あるいは欠陥が生じるなど良好な造形物形状が得られない。本研究では、アルミニウム合金の最適な積層条件を調査するため、シェル形状を造形後、造形物側面の形状を測定し、積層条件と造形物形状の関係を調査した。また、ソリッド形状を造形後、欠陥観察を行い、欠陥発生を抑制する積層条件を調査した。また、ソリッド形状を造形後、そこから引張試験片を作製して引張試験を行い、造形物の機械的強度を調査した。

2. 実験装置

本研究で使用した熔融金属積層装置を図1に示す。テーブル傾斜軸(B軸)と直進軸(X,Y,Z軸)がそれぞれ制御可能である。Z軸に溶接トーチを取り付け、NC制御によって溶接トーチの動きを制御する。



Fig 1 Direct metal rapid fabrication machine

3. 良好なシェル形状が得られる適切な積層条件の調査

本手法では、電流値を大きく、またはトーチ送り速度を低くすると積層ビード単位長さあたりの入熱量が大きくなる。アーク放電による入熱量が大きいと造形物温度が高くなり、溶融した金属が重力方法に垂れて狙いどおりの形状に積層することができない。そこで、造形可能な条件領域を調査するために、80 mm×20 mm×25 mmの直方体シェル形状を連続的に造形した。

図2にレーザ変位計で測定した造形物側面の形状を示す。電流を変えており、電流値120Aの場合、60A、80Aの場合と比べて造形物の高さが低く、側面が大きく湾曲していることがわかる。これは入熱量が大きく、熔融金属が熔融池から側面に流れているためである。

一方、図3(a)に示すように、電流値が40A以下の場合には良好な側面形状が得られたが、サブストレートと積層部分との接合部に割れが発生した。これは、造形時に局所的な温度上昇・下降を繰り返したことにより、造形物とサブストレート境界部に大きな残留応力が発生したためと考えられる。特に、電流値の小さい条件では、一層目の溶け込み幅及び溶け込み深さが小さく、十分な接合強度が得られなかったと推測される。それに対して、電流値が高くなると入熱量が増加し、母材も同時に溶融しやすくなり、十分な接合強度が得られ、割れは生じなかったと考えられる。従って、割れが発生した低電流条件においても1層目に限りサブストレート間に十分な接合強度を得るために、100A以上の高電流条件を適用し、2層目以降40Aの低電流を適用することで、図3(b)に示すように、割れを発生させず、かつ垂直で良好な造形物形状を得ることができた。

図4速度については原点から離れるに従って値が小となるよう表示している。○で示すのは割れが生じず、垂れずに造形できた条件、×は連続的なビードが成形せず、造形できなかった条件、□は造形物形状が垂れた条件、△は良好な造形物形状が得られたが、サブストレートとの間に割れが生じた条件である。一層目の造形に100A以上の高電流を適用すれば、割れの発生を抑制できるため、2層目以上において△は適切な積層条件とみなすことができる。よって、シェル形状の造形には図4のオレンジ色の領域で示した条件を用いるのが適切である。

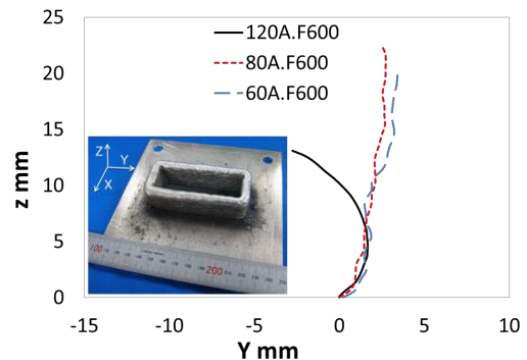


Fig 2 Side shape

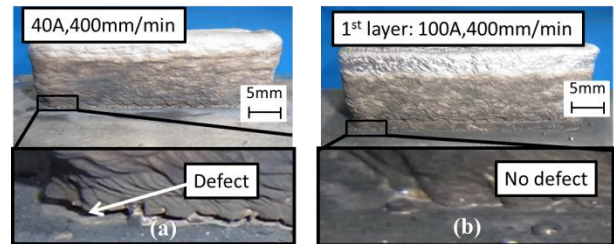


Fig 3 Effect of current on defect between substrate and shaped object

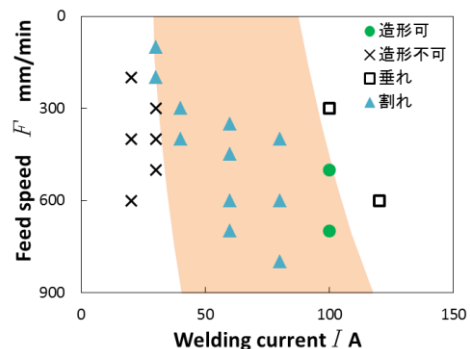


Fig 4 Optimized fabricating conditions

4. 良好なソリッド形状が得られる適切な積層条件調査

ソリッド形状の造形においては、クロスフィード量も重要な積層条件である。クロスフィードが小さいと、後続ビードのアーク点が基板上でなく先行ビード上となってしまうため、先行して積層したビード上に後続するビードが積層され、正常に積層造形ができない状況になる。したがって、ある程度以上のクロスフィード量とし、隣接する先行ビードと前の層の両方を溶融させ融け合

う必要がある。一方、クロスフィードが過大となると、隣接のビードの間に大きな間隙が生じ、積層を続けると加えると、造形物に欠陥が生じる。

そこで、積層条件及びクロスフィード量を変化させて造形後、CTスキャンにより造形物内部の欠陥の調査を行った。まず、入熱量が異なる3つの条件、40A, 600mm/min; 80A, 400mm/min; 100A, 400mm/minに対し、クロスフィード量をビード幅の半分からビード幅まで1mmずつ変化させ、4層のソリッド構造物の造形を行った。次に、サブストレートの面に垂直するz方向に撮影ピッチ0.1mmで母材を含む造形物全体をCTスキャンで撮影した。

サブストレートと造形物の境界面 $z=0$ のCTスキャンの結果を図5に示す。全ての条件で欠陥が大量に直線的に生じている。これはサブストレート表面に存在する酸化膜の影響と考えられる²⁾。実用的に、欠陥が発生しやすい造形物の一層目とサブストレートの接合部を除去する必要があると考えられる。

図6にz方向2,3,4mmの断面における0.4mm以上の欠陥数を示す。全ての条件において、造形物の上層へ行くほど、欠陥が少なくなっている傾向がある。これは上層に行くほど冷却速度が低くなるため³⁾だと考えられる。積層を連続して行くと、造形物全体が高温となり、熔融金属の凝固速度が小さくなり、ブローホールがより多く放出されたためだと考えられる⁴⁾。また、電流40Aの場合、入熱量が小さいため溶けこみ不足となり欠陥が多く生じた。電流値の小さい条件はソリッド形状の造形に適さないことがわかる。一方、電流値が大きすぎると、造形物が垂れやすいので、欠陥が少なくかつ良好な造形物形状が得られる適切な電流条件は80A~100Aの間に存在する。

適切な電流条件において、クロスフィード量がビード幅の80%程度以上の場合には、欠陥が多く生じた。一方、クロスフィード量がビード幅の60%程度以下の場合、先行して積層したビード上に後続するビードが積層され、平坦な上面が得られない。よって、良好なソリッド形状が得られる適切な積層条件は電流80A~100Aで、クロスフィード量がビード幅の60~80%程度となる図7に示す緑色の領域にあると推測できる。

次に、熔融金属積層造形物と他の造形方法による造形物との比較を行う。欠陥の少ない積層条件の電流値100A、トーチの送り速度400mm/min、クロスフィード量5.0mmでソリッド構造物を造形後、 $\Phi 15\text{mm} \times 130\text{mm}$ の丸棒を切り出し、0.02mmの撮影ピッチでCTスキャンを行った。CTスキャンの結果により造形物の密度を計算し、アルミニウム合金A536の鋳造品⁵⁾、低圧ダイカストホイール⁶⁾及びアルミニウム合金AlSi10Mgを用いた選択的レーザー焼結(SLM)造形物⁷⁾と内部欠陥を比較した。本稿では、造形物の密度 $=1$ -(ボイドの体積/試験片の体積)とする。

求めた密度を表1に示す。アルミニウム合金を用いた熔融金属積層造形物は一般的な鋳造品、ダイカスト、選択的レーザー焼結の造形部より内部欠陥が少ないことがわかる。

5. 造形物の引張強度

アルミニウム合金を用いた積層造形物の常温での引張試験を行った。CTスキャンに用いた丸棒試験片から、JIS Z2241によって規定されている14A号引張試験片(平行部径:10mm, 標点間距離:50mm)を切り出した。

すべての試験片は通常のバルク材の引張試験と同様に、試験片が均一に伸びた後、ある所にひずみが集中してくびれ、破断に至った。JIS Z2241によって規定されている方法で、0.2%耐力・引張強さ・破断伸びを求めた。これらの結果とJIS H4000に定められる圧延板材A5052P(熔融金属積層造形物の母材)の機械的性質を比較した結果を表2に示す。表2の質別H112とは加工硬化を加えずに機械的性質の保証するものである。表2より、熔融金属積層による造形物の引張強度は圧延材のJIS規格を上回る値であることがわかる。

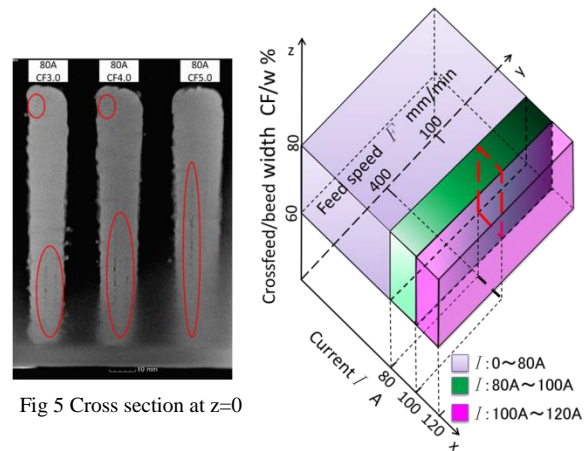


Fig 5 Cross section at $z=0$

Fig 7 Optimized fabricating conditions for solid structure

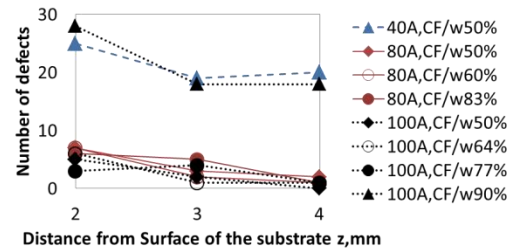


Fig 6 Result of CT scan

Table 1 Density

Material	Processing method	Density
A5356	Direct metal lamination	99.98%
A536	Casting	98.50%
	Die casting	99.83%
AlSi10Mg	Selective laser melting	99.77%

Table 2 Mechanical property

Material	Quality	Thickness mm	Tensile strength.Mpa	0.2% proof stress.Mpa	Break elongation,%
A5052P	H112	4.0-6.5	Min. 195	Min. 110	Min. 9
		6.5-13.0	Min. 195	Min. 110	Min. 7
		13.0-50.0	Min. 175	Min. 65	Min. 12
		50.0-75.0	Min. 175	Min. 65	Min. 16
		A5356		274	106

6. 結言

アルミニウム合金を用いた熔融金属積層造形物の適切な造形条件、内部欠陥、引張強度について検討し、以下の点を明らかにした。

- (1) 熔融金属積層にシェル構造物を連続的に造形するために必要な電流、送り速度、クロスフィード量の組み合わせ条件を明らかにした。
- (2) 熔融金属積層法において適切な条件下で造形された造形物の内部欠陥はダイカスト品などより少ない。
- (3) 熔融金属積層法において適切な条件下で造形された造形物は、常温条件下において相当する一般的なアルミニウム合金圧延材と同等以上の引張強度を持つ。

参考文献

- 1) Terry Wohlers, Wohlers Report 2013, Wohlers Associates Inc., (2013)
- 2) 川瀬, 他: アルミニウムブレイジングハンドブック, 社団法人軽金属溶接構造協会, (1992), 17.
- 3) 笹原弘之, 田中敬三, 吉丸玲欧, 熔融金属積層における造形条件と強度・金属組織に関する研究, 精密工学会誌, 78, 5, (2012), 418.
- 4) 社団法人溶接学会編, 溶接・接合技術特論, 株式会社精興社, (2003), 184.
- 5) M. K Akbari, et.al, Tensile and fracture behavior of nano/micro TiB₂ particle reinforced casting A356 aluminum alloy composites, Materials and Design, 66 (2015) 150-161.
- 6) M.Merlin, et.al, Impact behaviour of A356 alloy for low-pressure die casting automotive wheels, J. of Mat. Proc. Tech., 209 (2009) 1060-1073.
- 7) T Nesma, et.al., Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting, ScienceDirect, Additive Manuf. 1-4 (2014) 77-86.