

プラズマ方式 WAAM により造形されたチタン合金部材の機械的特性 ～既存部材へ付加造形を行った場合～

東京農工大学 ○三宅 遼太郎, ◎笹原 弘之, ヤマザキマザック株式会社 大内 誠悟, 鈴木 敦,

要旨

WAAM (Wire and arc-based additive manufacturing) はアーク溶接を応用した金属積層造形技術である。中でもプラズマ方式 WAAM はアーク指向性が高く、歪みのない真直なビードを積層造形可能である。本論文ではプラズマ溶接を用いて、サブストレートと造形物が一体となった引張試験片を作製し、付加造形物の引張強さ、0.2%耐力、破断伸びは相当する鍛造材の JIS 規格値より高いことを明らかにした。また、ローカルシールドを用いた有効な造形方法を明らかにした。

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・マニュファクチャリング技術への期待が高まっている¹⁾。本研究ではアーク指向性が高く、歪みのない真直なビードを造形可能なプラズマアークを熱源としワイヤ材料を供給し積層造形する手法(Wire and arc-based additive manufacturing :WAAM)を用いてチタン合金 Ti-6Al-4V 製部材の造形を行う。本手法はニアネットシェイプに造形後、切削加工を施すことで所望の精度や表面粗さを達成することができるため、除去体積を最小限に抑えることができる。難削材であるチタン合金を本手法に適用することで、低コスト・短時間での高強度製品の製造が可能となる。

本手法により補修や既存部材への付加造形が可能となる。本研究では既存部材に付加造形を行った製品の造形部と既存部の境界を含めた部分の機械的特性を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置

テーブル旋回型 5 軸マシニングセンタ (ヤマザキマザック VARIAXIS j-600/5X) にプラズマ溶接トーチを設置し造形を行った。図 1 に造形装置を示す。プラズマ溶接はアーク指向性が高く真直なビードを造形できる。一方で、トーチが進行する前方側からワイヤを供給する必要がある。本研究では X, Y, Z 軸とテーブル旋回軸 C 軸の 4 軸を制御し、それを可能とした。

Ti-6Al-4V は化学的に活性であり、高温時に酸素や窒素と反応しやすいため、密閉チャンバ内に濃度 99.9% のアルゴンガスをパイプから供給しながら造形を行った。酸素濃度は低濃度ジルコニア式酸素濃度計により常にモニタリングし、造形中のチャンバ内の酸素濃度は 1% 以下に管理した。なお、一般的なチタン合金の溶接では、酸素濃度が 1% 以下に管理されていればシールド状態は良好とされている²⁾。

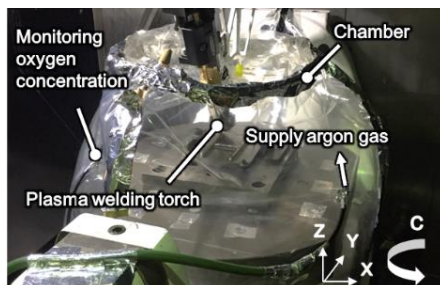


Fig.1 5-axis WAAM machine

3. プラズマ方式 WAAM によるチタン合金製部材の造形

幅 20 mm 程度のチタン合金の鍛造板材 (サブストレート) の端部に、幅 10 mm 程度のビードを付加造形後に引張試験片 (14B 号試験片) を切り出した。その際、板材と付加造形部の界面が

試験部の中央に位置するようにした。造形には直径 1.2 mm の Ti-6Al-4V ワイヤを用い、アーク長 5 mm, トーチ送り速度 270 mm/min, 電流 160 A, シールドガスの供給流量はプラズマ溶接トーチから 0.8 L/min, パイプからは 10 L/min とした。図 2 に造形物を示す。造形壁の高さは約 50 mm である。板材と造形物の界面を矢印で示す。実際には付加造形した材料はこの位置より下方に 3mm 程度溶け込んでいる。造形壁の表面は青く酸化色を呈しているが、切削加工により除去した面は銀白色であった。また Ding³⁾らは Ti-6Al-4V の積層造形物の酸素含有量と機械的特性を調査し、ビッカース硬さが 348 HV 以下では機械的特性への影響は小さいと報告している。本研究では造形壁切削面のビッカース硬さは最大で 347 HV であり、酸化による機械的特性への影響は小さいと考えられる。

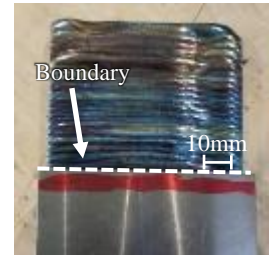


Fig.2 Fabricated objects

4. 引張試験結果

図 3 に真応力真ひずみ線図を、表 1 に各試験片の引張強さ、破断伸び、0.2%耐力を示す。表 1 に示される赤文字は Ti-6Al-4V の鍛造材規格 JIS H4657 を満たしている値であり、青文字は下回っている値である。図 3 において弾性域ではすべての試験片が同等の特性を示しているが、試験片 No.1 の引張強さが試験片 No.2, No.3 よりも高くなっている。これは試験片 No.1 の破断伸びが試験片 No.2, No.3 に比べ高いため、加工硬化したため高くなったと考えられた。また、表 3 より試験片 No.1 は JIS 規格値をすべて満たしているが、試験片 No.2, No.3 は破断伸びが基準値を下回っている。

そこで、光学顕微鏡を用いて破断面の観察を行った。図 4 は破断状況を示しており、試験片 No.1 は造形物・サブストレート界面で破断し、試験片 No.2, No.3 は造形物側で破断している。また、図 5 は破断面の写真で、試験片 No.1 は一般的な延性破壊による破断面なのに対し、試験片 No.2, No.3 には赤丸に示す範囲内に欠陥が観察された。試験片 No.2, No.3 の試験片の破断伸びが試験片 No.1 の破断伸びを下回っているのは、造形時に発生した欠陥が原因であると考えられる。

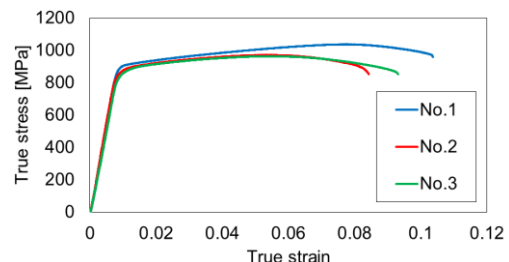


Fig.3 True stress-true strain curve of fabricated object

Table 1 Result of tensile test

		No.1	No.2	No.3	JIS H4657
Tensile strength	MPa	963	923	915	895 ≤
Elongation	%	10.9	8.8	9.8	10 ≤
0.2 % proof strength	MPa	896	876	856	825 ≤

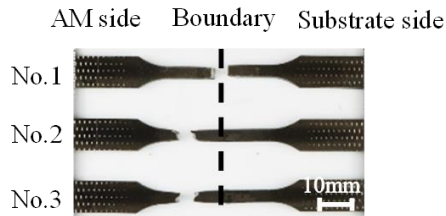


Fig.4 Tensile test pieces after fracture

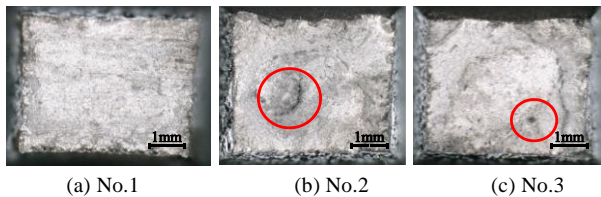


Fig. 5 Fracture surface

5. 積層方向と引張方向の違いによる機械的特性の変化

次にトーチ送り方向に対する引張方向が機械的特性に及ぼす影響を調べた。トーチ送り方向と引張方向が同じ場合⁴⁾と、トーチ送り方向と直交する方向に引張試験をした場合とを比較した。また、サブストレート単体の引張試験を行い、造形時の熱履歴や溶け込みによるサブストレートの機械的特性への影響も調べた。それぞれの試験片の引張強さ、0.2%耐力、破断伸びを表2に示す。比較には欠陥なく造形された試験片 No.1、瀧澤らの引張試験片⁴⁾、サブストレートから切り出した試験片の3種類を用いた。

表2より引張方向がいずれの場合でも各試験片はチタン合金の鍛造材規格 JIS H4657 を満たしている。また、本手法では試験片の積層方向と引張方向が同じでも異なっても差はほとんど見られない。サブストレートと比較すると造形物の機械的特性はどの値に関しても 10%程度低くなっていることがわかる。この差は造形時の熱によるものではなく、サブストレートが圧延材であるのに対し、造形物には応力除去焼鈍のみしか施していないため生じたと考えられた。

Table 2 Comparison of fabricated object and substrate

		Tensile direction		Substrate	JIS H4657
		Height direction	Feed direction		
Tensile strength	MPa	957	963	990	895 ≤
Elongation	%	10.6	10.9	12.8	10 ≤
0.2 % proof strength	MPa	895	896	985	825 ≤

6. ローカルシールドを用いたチタン合金製部材の造形

5節までは密閉可能なチャンバを用い、酸素濃度 1%以下に管理することで Ti-6Al-4V の造形を行った。しかし、チャンバを用いて造形した場合、造形範囲はチャンバ内に収まるものに限られ、大型造形は難しい。また、チャンバ内は高温となるため測定機器をチャンバ内に装備することは難しい。そのため、

ローカルシールドというアフターシールドジグを用いて Ti-6Al-4V の造形することで上記の問題点を解決する。

ローカルシールド形状は Birmingham ら⁵⁾の論文を参考に図6のようにすることで、シールドガスが均一に造形後のビードに供給されるようにした。また、本手法ではローカルシールド下部にスカート形状を取り付けた。これをプラズマ溶接トーチ後方に取り付け Ti-6Al-4V の造形を行った結果、造形条件がアーク長 5 mm、トーチ送り速度 270 mm/min、電流 160 A、シールドガスの供給流量はプラズマ溶接トーチから 0.8 L/min、ローカルシールドからは 20 L/min の場合、ローカルシールド直下の酸素濃度が 4000 ppm 程度となり、図7に示す酸化の少ない立壁形状の造形が可能となった。

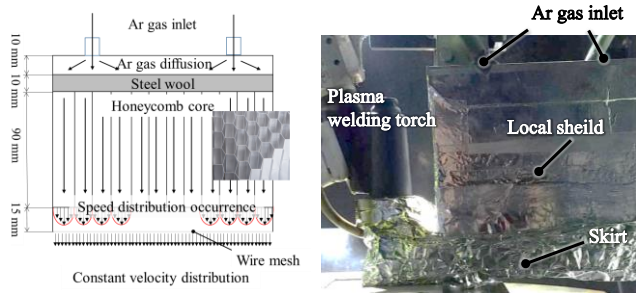


Fig.6 Appearance of Local shield

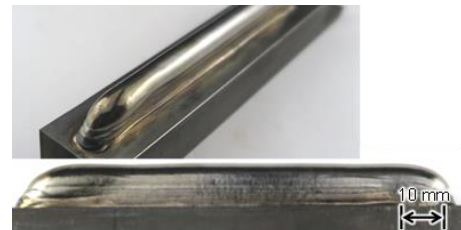


Fig.7 Vertical wall shape

7. 結言

プラズマ方式 WAAM により板材端部に Ti-6Al-4V の付加造形を行った。酸素濃度 1%以下の状態では表面に酸化層が生じたが、切削加工により除去可能である。欠陥なく付加造形されたチタン合金部材の引張強さや破断伸び、0.2%耐力は鍛造材と同等であり、機械的特性は引張方向に依らないことを明らかにした。また、ローカルシールドを用いた Ti-6Al-4V の造形条件を明らかにした。

文 献

- 1) Terry Wohlers, "Wohlers Report2018", (2018), Wohlers Associates Incorporated, pp.142-143
- 2) チタニウム協会, "チタンの加工技術", 日刊工業新聞社, (1992), pp.114-135
- 3) Ding Junhui, et.al, "Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.226, (2015), pp.99-105
- 4) 瀧澤周平, 三宅達太郎, 堀部和也, 大内誠悟, 鈴木敦, 笹原弘之, "プラズマ方式 WAAM によるチタン合金製部材の造形", 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (2018), pp.420-421
- 5) Birmingham, et.al, "Sensitivity of Ti-6Al-4V components to oxidation during out of chamber Wire + Arc Additive Manufacturing", *Journal of Materials Processing Technology*, (2018), pp.1-28