

Ni/Co 基超合金傾斜機能材料の WAAM による付加造形

東京農工大学 ○小林 蓮, ◎笹原 弘之, 三菱日立パワーシステムズ株式会社 藤田 直也

要旨

本論文では、表面を Co 基超合金、内部を Ni 基超合金から構成される成分傾斜肉盛層を造形する技術の開発を目的として、TIG 溶接とアーク内に 2 本のワイヤを同時に送給するシステムを開発し、それぞれのワイヤ供給速度の比率を変化させることにより肉盛層内部の化学組成を制御できることを明らかにした。

1. 緒言

近年、発電用ガスタービンの更なる高効率化が求められている。そのために燃焼ガスの温度を上昇させ熱効率を向上させることが必要不可欠である。燃焼ガスの温度上昇は、タービン翼に対して酸化・減肉などの損傷発生の原因となる。その損傷に対して、2, 3 年おきに検査を実施し補修の必要な箇所には Ni 基超合金である In625 を用いて肉盛補修が施されている。しかし、今後の温度上昇が進む環境では、強度は十分なものの、耐酸化性が低いことが懸念されている。

そこで本研究では、従来の In625 のみによる肉盛補修から、表層を高温下でも耐酸化性、耐摩耗性に優れた Co 基超合金の Stellite No.6, 内部を In625 よりも高温強度の優れた In718 で構成される成分傾斜肉盛層として造形することを目的とする。ワイヤ材料をアーク放電で熔融し積層する Wire Additive Manufacturing(WAAM)を採用し、上述の 2 種類のワイヤ同時にアーク内送給するシステムを開発した。その際に、それぞれのワイヤの送給速度の比率を変化させ肉盛層内部の化学組成を制御、傾斜させる。これにより、従来よりも高能率に、かつ機械的特性が優れた補修技術を開発する。

2. 実験装置

図 1 に本研究で使用した AM 装置、図 2 にアーク内に 2 本のワイヤを同時に供給するシステム概要図を示す。AM 装置は Z 軸に TIG 溶接トーチと MIG 溶接トーチを取り付け、直進軸(X, Y, Z 軸)と回転軸(A 軸)の運動を NC 制御により運動を制御し造形を行う。TIG 溶接の原理により造形を行うものであり、タングステン電極先端でアークを発生させ、アーク内に溶接ワイヤを挿入し、下層共に熔融・固化することにより積層する。アーク内に 2 本のワイヤを供給するシステムは、阿部ら⁽¹⁾の研究を参考に、図 2 のようなシステムを構築した。手順として、アーク発生と同時に NC 制御された TIG ワイヤフィーダーからワイヤが送給される。その際、MIG ワイヤ供給リモコンから MIG トーチにワイヤ供給の指令を送り、アーク内に 2 本のワイヤを同時に供給する。

表 1, 2 に本研究で使用した Ni 基超合金の In718 相当の M-NIC-718 と Co 基超合金の Stellite No.6 のワイヤ材料の化学組成をそれぞれ示す。

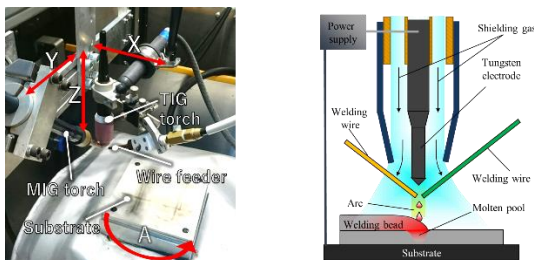


Fig.1 AM machine

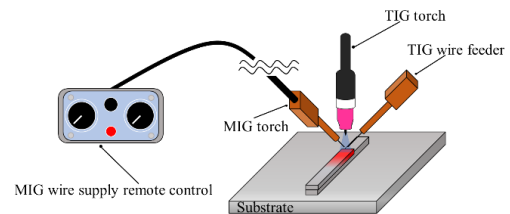


Fig.2 Sistem overview

Table.1 Chemical composition of M-NIC-718 (wt%)

Ni	Cr	Mo	Ti	Mn	Si
50.0~55.0	17.0~21.0	2.8~3.3	0.7~1.1	≤035	≤0.35
Al	Cu	C	S	Fe	Nb
0.2~0.8	≤0.30	≤0.08.	≤0.015	≤24	4.8~5.5

Table.2 Chemical compotion of Stellite No.6 (wt%)

Co	Cr	W	Ni	Fe	Si	Mo	Other
Bal.	32	12	≤3.0	≤3.0	≤2.0	≤2.0	≤0.50

3. In718 上への Stellite No.6 肉盛層の造形

まず、In718 と Stellite No.6 の溶接性を予備的に確認するために、ワイヤ供給速度 2.0 m/min, パルス電流値 250 A, ベース電流値 200 A, 周波数 3.0 Hz, トーチ送り速度 150 mm/min, シールドガス供給量を 20 L/min, アーク長を 5.0 mm, 母材を In718 とし、その上に Stellite No.6 を 5 層造形、断面観察をした。実験条件は Madai⁽²⁾らの調査結果と予備実験を元に決定した。

図 2 に造形物の外観と断面図を示す。5 層造形後、空冷中に割れが発生した。Stellite 系合金を Ni 基合金への溶接時に、層間毎の温度を 200~250 °C に管理することが推奨されている。今回の実験では層間毎の温度を管理せず造形をした。そのため推奨温度以下で造形をしたことにより残留応力が生じ、割れが発生したと考えられる。また、断面観察では内部欠陥は確認されなかった。

図 3 に硬さ試験結果を示す。Stellite No.6 の硬さが 450 HV なのに対して、肉盛層ではそれよりも低い値であった。これは実験条件がパルス電流値 250 A, ベース電流値 200 A と入熱量が過剰であったために Stellite No.6 に含まれる炭化物が粗大化し硬さの低下を招いたと考えられる。また、サブストレート底部から 2.5~3.5 mm の領域で硬さの変化が認められた。これは、母材である In718 と Stellite No.6 の境界層と考えられる。

そこで、EDS 分析による線分析を行った。図 4 に In718 と Stellite No.6 で大きく含有量に差が出ると考えられる Ni, Fe, Co の線分析結果を示す。母材底部から 0.5 mm の領域では Ni 含有量が 50~55%, Fe が 10~20%, Co がほぼ 0% であることから母材である In718 であると考えられる。0.5~4.5 mm の領域では Ni が母材から遠ざかるほど減少、Co は逆に増加している。また、Fe も Ni と比較して変化は小さいが減少している。4.5~6.0 mm の領域では Ni と Co の質量パーセントが交互に入れ替わり、6.0 mm 以降の領域では Co が Ni を完全に上回っている。

Fe は 4.5 mm 以降、減少を続け最終的に 10~15 %程になっている。硬さ試験の結果から予想していた境界層は確認できなかった。これは硬さ試験同様に入熱過剰が原因で Stellite No.6 が大きく母材の In718 に大きく希釈し境界層が形成されず、その代わりに In718 と Stellite No.6 の混合した層が形成されたと考えられる。

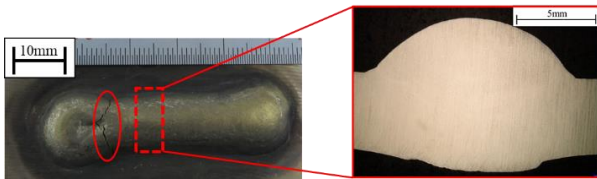


Fig.2 Model appearance and cross-section view

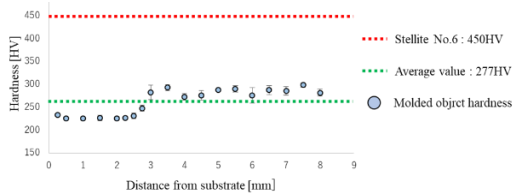


Fig.3 Hardness test result

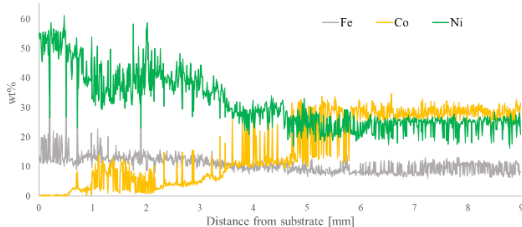


Fig.4 Weight percent EDS analysis

4. 成分制御した肉盛層の造形

3 項で調査した溶接性をもとに、サブストレートを SUS304 とし、SUS304 上に下地として In718 のみで 10 層造形後、2 本のワイヤを用いて成分制御した層を 5 層造形した。表 3 に成分制御した際に予想される化学組成を示す。表 3 より No.1 のワイヤ供給速度は In718 が 1.2 m/min, Stellite No.6 が 0.6 m/min, No.2 は In718, Stellite No.6 ともに 0.9 m/min, No.3 は In718 が 0.6 m/min, Stellite No.6 が 1.2 m/min とした。対象とした元素は 3 項と同様の理由で Ni, Fe, Co とした。実験条件は下地の In718 はパルス電流値 160 A, ベース電流値 80 A, 周波数 30 Hz, トーチ送り速度 150 mm/min, シールドガス供給量を 20 L/min, アーク長を 5.0 mm とし、成分制御した層はパルス電流値 180 A, ベース電流値 90 A, 周波数 3.0 Hz, トーチ送り速度 100 mm/min, ワイヤ供給速度 1.8 m/min, シールドガス供給量とアーク長は In718 と同条件とした。

Table 3 Components of each condition (wt%)

	Element		
	Ni	Fe	Co
No.1	33~37	8~16	19~22
No.2	24~29	7~12	28~33
No.3	16~20	5~8	37~44

肉盛層内の化学組成が予想した一致するか確認するため、EDS 分析による線分析をした。図 5 より図 5(a)に表 3 より No.1, 図 5(b)に No.2, 図 5(c)に No.3 の分析結果を示す。

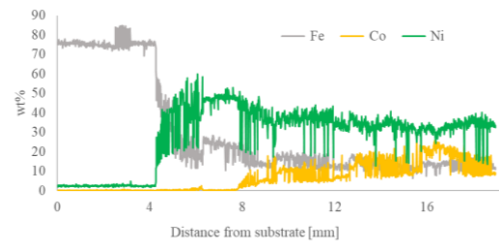


Fig.5(a) No.1

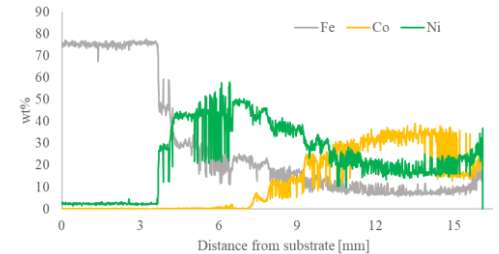


Fig.5(b) No.2

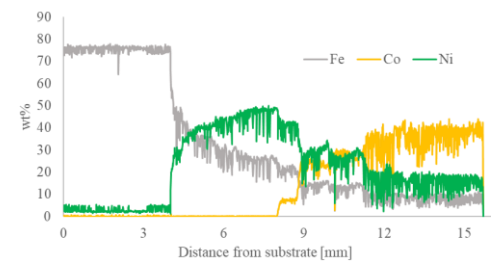


Fig.5(c) No.3

Fig.5 Weight percent EDS analysis

図 5(a)より、サブストレート底部から 10 mm 以降の領域で、表 3 で予想した化学組成とほぼ一致する結果となった。図 5(b)は 12 mm 以降、図 5(c)は 11 mm 以降のそれぞれの領域でも、表 3 で記述した化学組成とほぼ一致した。また、下地としての In718 部分も図 5(a)は 6~8 mm, 図 5(b)は 6.5~7 mm, 図 5(c)は 7~7.5 mm の領域で表 1 より In718 の Ni が 50~55%, Fe が 24% 以下となっていることから下地として In718 が形成され、SUS304 の成分が成分制御部分に混在していないことがわかる。

5. 結言

TIG 溶接とアーク内に 2 本のワイヤを供給するシステムにより、Stellite No.6 に In718 の造形と、2 本のワイヤの供給速度比率を変化させて成分制御した肉盛層の造形をした。Stellite No.6 に In718 の造形では、層間毎の温度管理をせず造形をしたため割れが発生したが、内部では欠陥は発生せず、上述のワイヤを組み合わせた造形は可能であることを明らかにした。成分制御した肉盛層の造形では、ワイヤ供給速度の比率を変化させることにより肉盛層内部の化学組成が制御可能であることを明らかにした。

文献

- 1) F.Madai, F.Ashrafizadeh, M.Shamania, Optimization of pulsed TIG cladding process of stellite alloy on carbon steel using RSM, Journal of Alloys and Compounds, 510(2012), pp71-77.
- 2) Takeyuki Abe, et al. Control of the chemical composition distribution in deposited metal by wire and arc-based additive by manufacturing, Precision Engineering, 55(2019), pp231-239