

용사법을 이용한 강 및 흑연 재료에 대한 변수들의 영향
Effect of Variables on AISI 4130 and ATJ Graphite Materials
Using Plasma Arc Spray Process

김 원훈* , 나 석주**
 * 국방과학 연구소
 ** 한국과학 기술원

1. 서론

플라즈마 아크 용사법(plasma arc thermal spraying)은 여러 종류의 용착기법중 매우 신뢰성 있는 공정으로 금속, 비금속, 세라믹 등 거의 모든 재료에 용사할 수 있는 특징을 갖고 있다. 프랑스 르몽 대학의 연구조사에 의하면 코팅의 품질에 영향을 끼치는 공정 변수는 약 50개 이상이 있기 때문에 최적의 용사 공정 조건을 얻기는 매우 어려울 뿐만 아니라, 각 변수를 적절히 통제 제어하기는 매우 어려운 점이 많음을 지적하였다[1]. 따라서 본 연구에서는 2^{n-1} 팩토리얼(factorial) 실험방법을 적용하여 시편 실험한후 그 결과를 분석하였으며 실험 결과를 토대로 내열용 부품에 적용을 위한 최적 용사조건 선정에 그 목적을 두고있다.

2. 실험

2.1 실험 및 시험 공정

본 연구에 사용된 모재는 가로 70mm, 세로 70mm, 두께 4mm의 AISI 4130 합금강 판재와 직경 70mm, 두께 10mm의 ATJ 그래파이트이며, 사용된 코팅 분말은 용융온도가 높으며, 열충격 저항 및 내마모성이 좋아 로켓트 및 항공 부품등에 널리 사용되는 ZrO_2 (Zirconium Oxide composite ceramic;METCO 201B-NS-1)와 텅스텐(W;METCO 61NS)을 선정하였으며, ATJ 그래파이트에는 탄탈륨(Ta;METCO 62)을 본드 코팅 분말로 선정 하였다[2].

2.2. 2^{n-1} 팩토리얼 시험

본 연구에서는 2^{n-1} 팩토리얼 실험 방법을 적용하여 코팅 품질에 영향을 끼치는 변수를 조사하였으며[3], 이방법은 n개의 변수에 대한 영향력을 알아보기 위해 2^{n-1} 개의 실험조건을 설정하여 실험한 후 그 결과를 분석하는 방법으로 본 실험에서는 5개의 제어 변수(controlling variables)로 아크 전류(X_1), 플라즈마 건의 이송 속도(X_2), 분말 공급 속도(X_3), 모재와 건과의 거리(X_4) 및 모재의 예열 온도(X_5)를 채택하였다.

작업조건(working point)을 기준으로 하위 레벨(low level)변수는 - 로, 상위 레벨(high level)변수는 + 로 하였으며, 이에대한 각 제어 변수들을 Table 1에 제시하고 있다. 편의상 모재 AISI 4130 판재에 코팅 분말 ZrO_2 를 용사한 시편 그룹을 Set I, 모재 AISI 4130 판재에 코팅 분말 텅스텐을 용사한 시편 그룹을 Set II_A, 모재 ATJ 그래파이트에 본드 코팅용 분말 로 탄탈륨을 용사한후(Set III) 최종 코팅 분말로 텅스텐을 용사한 시편 그룹을 Set II_B로 나타내기로 한다. 실험의 공정성을 위해 실험 순서는 임의로 하였으며, 시도 번호 1(trial no.1)에서 조정 변수 X_5 는 X_1, \dots, X_4 의 곱으로 즉

$$X_5 = (X_1) \cdot (X_2) \cdot (X_3) \cdot (X_4) = (-) \cdot (-) \cdot (-) \cdot (-) = (+)$$

또 2 변수 상호영향 즉, $X_{12}, X_{13}, \dots, X_{45}$ 는 조정 변수의 곱으로 얻어진다. 시도 번호 1에 대해서

$$X_{12} = (X_1) \cdot (X_2) = (-) \cdot (-) = (+)$$

$$X_{45} = (X_4) \cdot (X_5) = (-) \cdot (+) = (-) \quad -80-$$

각 변수들에 대한 실험 결과를 H 라고 할때 그 영향력 E는 아래와 같이 계산된다.

$$E_{ij} = \Sigma \frac{1}{8} (X_{ij} \cdot H)$$

계산된 변수의 영향력 E 는 그 절대값이 큰 것이 영향력이 크고, 부호가 + 일때는 변수값이 증가함에 따라 결과치의 증가를 나타내며, - 일때는 감소함을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

시편 용사후 시험 결과로는 코팅두께는 H₁으로 경도는 H₂로 선택하였다. 코팅 두께에 대한 결과는 Table 2에 제시하였다. 측정된 코팅 두께로부터 각 변수들의 영향력을 계산하여 Table 3에 나타내었는데 코팅 두께에 큰 영향을 끼치는 주요변수는 AISI 4130 판재에 ZrO₂를 코팅하였을때 이송속도, 예열 온도, 분말 공급속도가 또 텅스텐을 코팅하였을때는 예열 온도, 분말 공급속도, 이송 속도를 들수있다. ATJ 그라파이트의 경우에는 분말 공급속도, 거리가 주요 변수로 나타났다.

측정된 경도로부터 각 변수들의 영향력을 계산하여 Table 4에 제시하였으며 경도에 큰 영향을 끼치는 주요변수는 AISI 4130 판재에 ZrO₂를 코팅하였을때 이송속도, 예열 온도, 전류가 그리고 텅스텐을 코팅할경우 전류, 예열 온도, 거리를 들수있다. ATJ 그라파이트의 경우에는 예열 온도와 거리가 주요 변수로 나타났다.

4. 결론

플라즈마 아크 용사공정에 2ⁿ⁻¹ 팩토리얼 실험 방법을 적용하여 내열 코팅 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 2ⁿ⁻¹ 팩토리얼 실험 방법을 적용하여 코팅 품질중 두께와 경도에 영향을 끼치는 공정 변수들의 기여 순서를 확인하였다.
- 코팅 두께에 큰 영향을 주는 변수로는 AISI 4130 합금강에 ZrO₂또는 텅스텐을 코팅 하였을때는 이송속도, 예열 온도, 분말 공급속도가 그라파이트에 탄탈륨과 텅스텐을 코팅하였을 경우에는 분말 공급속도와 거리가 주요 변수였다.
- 코팅층의 경도에 큰 영향을 주는 변수로는 AISI 4130 합금강에 ZrO₂또는 텅스텐을 코팅 하였을때는 전류와 예열 온도가 그라파이트에 탄탈륨과 텅스텐을 코팅하였을 경우에는 예열 온도와 거리가 주요 변수로 나타났다.

참고문헌

1. Edward J. Kubel Jr. "Thermal Spraying Technology: From Art to Science", Metal Progress, Dec. 1987, pp. 69 ~ 80
2. " METCO Technical Bulletin"
3. D. A. J. Stegner, S. M. Wu and N. R. Braton, "Prediction of Heat Input for Welding", Welding Journal, Mar. 1967, pp. 122-s ~ 128-s

Table 1. High and low levels chosen about working point

Variables	High level			Working point			Low level			Range(±%)		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Current , A	550	550	550	500	500	500	450	450	450	10	10	10
Travel speed, mm/min	880	880	880	800	800	800	720	720	720	10	10	10
Powder feed, kg/hr	3.0	8.0	4.0	2.7	7.3	3.6	2.4	6.6	3.2	10	10	10
Distance , mm	69	115	127	60	100	110	51	85	94	15	15	15
Preheat temper., °C	218	120	230	190	105	200	162	90	170	15	14	15

- Note

Set I : Powder → ZrO₂ , Substrate → AISI 4130 steel sheet

Set II : Powder → W , Substrate → AISI 4130 steel sheet (II_A)
ATJ Graphite (II_B)

Set III : Powder → T_a , Substrate → ATJ Graphite

Table 2. Coating thickness and hardness test results

Trial No.	Set I		Set II _A		Set III+II _B	
	Thickness (mm)	Hardness (Scale:A)	Thickness (mm)	Hardness (Scale:A)	Thickness (mm)	Hardness (Scale:B)
1	0.13	43.30	0.11	44.54	0.04	21.18
2	0.48	63.16	0.15	49.42	0.07	20.72
3	0.14	44.80	0.16	47.06	0.03	20.64
4	0.13	45.92	0.09	50.40	0.06	20.88
5	0.42	60.46	0.14	45.16	0.08	21.36
6	0.16	45.84	0.15	50.24	0.08	20.42
7	0.15	46.08	0.13	47.60	0.11	21.46
8	0.14	45.00	0.12	48.42	0.08	20.18
9	0.52	60.82	0.15	45.14	0.08	19.70
10	0.11	43.78	0.09	49.76	0.08	20.94
11	0.12	47.04	0.10	45.08	0.07	21.04
12	0.28	42.44	0.12	44.80	0.10	19.78
13	0.16	45.04	0.13	49.20	0.09	20.46
14	0.33	64.62	0.11	47.40	0.07	20.38
15	0.12	41.76	0.11	44.86	0.09	20.60
16	0.16	48.78	0.09	50.26	0.08	21.34

Table 3. Variable effects for coating thickness

Effect	Set I		Set II _A		Set III+ II _B	
	Magnitude	Rank	Magnitude	Rank	Magnitude	Rank
E ₁	0.01	15	-0.11	4	0.03	9
E ₂	-1.07	2	-0.11	4	0.03	9
E ₃	-0.27	6	0.01	12	0.15	1
E ₄	0.05	13	-0.15	3	0.11	4
E ₅	-1.31	1	-0.17	2	0.01	13
E ₁₂	0.33	5	-0.05	6	0.01	13
E ₁₃	-0.15	9	0.03	10	-0.15	1
E ₁₄	-0.11	10	-0.05	6	-0.03	9
E ₁₅	-0.03	14	0.01	12	-0.05	6
E ₂₃	0.07	12	-0.05	6	0.05	6
E ₂₄	0.19	8	-0.01	12	0.01	13
E ₂₅	1.06	3	-0.03	10	0.03	9
E ₃₄	-0.25	7	-0.05	6	-0.15	1
E ₃₅	0.55	4	0.21	1	0.07	5
E ₄₅	-0.09	11	0.01	12	-0.05	6

Table 4. Variable effects for hardness

Effect	Set I		Set II _A		Set III+ II _B	
	Magnitude	Rank	Magnitude	Rank	Magnitude	Rank
E ₁	10.24	5	22.06	1	-1.80	7
E ₂	-65.20	2	-2.38	13	0.76	14
E ₃	6.32	7	6.94	6	1.32	9
E ₄	-0.28	15	-6.34	9	-2.60	4
E ₅	-57.28	3	14.82	2	4.36	1
E ₁₂	-5.32	9	-3.50	11	-1.32	9
E ₁₃	11.56	4	-3.06	12	-1.32	9
E ₁₄	-0.32	14	-6.18	10	3.08	2
E ₁₅	-4.52	11	6.42	8	0.68	15
E ₂₃	-3.48	12	0.66	15	1.16	13
E ₂₄	-3.28	13	-10.62	3	1.80	7
E ₂₅	84.92	1	1.58	14	2.68	3
E ₃₄	5.92	8	6.94	6	1.32	9
E ₃₅	5.08	10	8.10	5	-2.04	6
E ₄₅	7.28	6	9.38	4	2.28	5