

# PTA법에 의한 TiC분말 표면강화 Al합금층의 제조 및 마모특성에 관한 연구

## A Study on the Preparation and Wear Characteristics of TiC Hardfaced Layers on Aluminium Alloy by PTA Method

민준원\*, 유승을\*  
Joonwon Min, Seungeul Yoo

### ABSTRACT

Surface hardening of AC4C aluminium alloy with TiC powders was obtained by plasma transferred arc (PTA) method. Bead appearance, microstructure and wear behavior were characterized in relation to the torch current, powder feed rate and wear condition. The width and the depth of bead were mainly increased with increasing torch current. The comparison of wear behavior between AC4C alloy and PTA treated AC4C alloy showed the remarkable enhancement of wear resistance.

주요기술용어 : Plasma Transferred Arc (플라즈마 이행 아크), Aluminium Metal Matrix Composite (알루미늄 금속기 복합재료), Titanium Carbide (티타늄 카바이드), Wear (마모)

### 1. 서 론

최근 선진국의 공업화 및 개발도상국의 경제성장 등으로 인한 에너지 수요의 급증으로 화석연료의 소비가 계속 증가하고 있다. 그 중에서도 자동차는 석유소비량의 1/3을 차지 하면서 에너지 소비 및 대기오염의 큰 요인으로 작용하고 있다. 이에 따라 연료의 소모와 배기가스를 저감시키는 방법으로 경량화를 통한 연비의 향상이 널리 추진되고 있는 상황이다.

알루미늄은 철강재료에 비해 비중이 1/3

정도로 작고 내식성, 열전도성, 전기전도성 등이 우수하며 소성가공, 표면처리와 같은 2차가공에 대해서도 양호한 특성을 나타낸다. 또한 재활용율이 90% 이상 되므로 경량화를 위한 자동차용 소재로 널리 각광을 받고 있다.

그러나 알루미늄은 철강재에 비해 연성이 커서 내구성이 요구되는 부품에는 적용의 제한을 받는 경우가 있고 내마모성 등이 요구되는 부위에는 알루미늄을 기지로 하는 금속기 복합재료가 사용되고 있다.

알루미늄을 기지로 하는 복합재료의 제조 방법으로는 분말야금법, 교반주조법 (Stir

\* 정희원, 자동차부품연구원

casting), Squeeze casting법 등이 이용되고 있다. 한편 PTA(Plasma Transferred Arc)법<sup>1)</sup>은 표면용융용접법의 일종으로 Plasma arc 열원을 이용하여 모재 표면에 수 mm 깊이의 표면 경화층을 형성시키는 제조법으로 다른 제조법에 비해 복합화층과 모재 계면의 결합강도가 높고, 필요한 부위에 선택적 복합화가 가능하며 또한 자동화에 의한 생산성 향상이 기대되는 방법이다.<sup>1)~7)</sup>

따라서 본 연구에서는 PTA법을 이용하여 알루미늄합금 모재의 표면을 TiC 세라믹 입자로 강화처리하여 제조하고, 이에 따라 얻어진 표면 복합화층의 특성을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 장치구성 및 원리

본 실험에 사용한 PTA장치는 전원공급장치, 토치, 분말공급장치, 가스공급장치, 냉각장치 등으로 구성되어 있다.

토치(Torch)는 본 장치의 핵심으로 전극과 모재 사이에 수냉된 동제 노즐(Cu nozzle)에 의해 아크가 구속되어 에너지밀도가 높은 플라즈마 아크를 발생시키고, 보호가스와 강화재 분말을 일정하게 용융지에 공급한다.

한편 가스공급장치는 플라즈마 생성에 필요한 파일럿가스(Pilot gas)와 PTA처리시 모재상의 용융지를 외부 분위기로부터 차단시켜 용융금속의 산화를 방지하는 보호가스(Shield gas)를 레귤레이터(Regulator)를 통해 정확히 제어하여 공급할 수 있도록 되어 있다. 본 실험에서는 아크의 안정을 위해 파일럿가스는 아르곤(Ar)을 사용하였고 보호가스 및 분말공급 가스는 헬륨(He)을 사용하였다.

Fig. 1에 본 PTA장치 (Lincon Co., PSM-2)의 핵심인 토치의 단면을 나타내었다. PTA법의 원리는 텅스텐 전극(-)과 모재(+)) 사이에 플라즈마 아크를 발생시키고 모재의 표면 위를 일정속도로 이동하면서 표면의 일부를 용융합

과 동시에 분말 공급장치로부터 토치내부를 통해 금속 또는 세라믹분말을 플라즈마 아크 내로 통과시켜 용융지에 공급하는 것이다. 이때 공급된 분말과 모재를 플라즈마 아크 열원에 의해 용융, 복합화시키는 원리이다. 여기서 복합화층 형성시 실험변수로는 전류, 토치 이동속도, 보호가스 종류, 첨가되는 강화재 분말의 조성·입경 및 형상 등이 있다. 따라서 이러한 변수들을 적절히 선택하면 모재 표면의 원하는 부위에 다양한 기능의 복합화층을 형성시킬 수 있다.

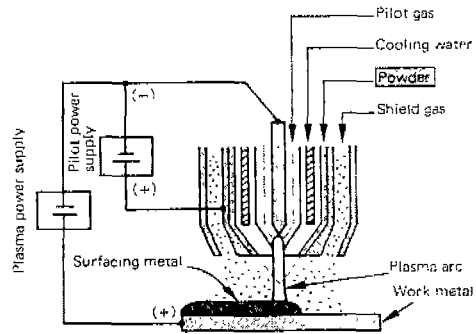


Fig. 1 Schematic illustration of plasma transferred arc torch

### 2.2 실험방법

실험에 사용한 모재는 AC4C 주조용 알루미늄합금을 사용하였다. Table 1에 제조사에서 제시한 화학조성을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of AC4C aluminium alloy base metal

Chemical composition (wt%)					
Si	Mg	Cu	Fe	Ti	Al
6.906	0.3313	0.0107	0.1314	0.0075	bal.

합금모재는 213x74x17 (mm<sup>3</sup>)의 크기로 사형 주조한 후 최종두께를 10 mm로 밀링 가공하여 시편으로 사용하였다.

강화재 분말은 경도가 높고 내마모성이 우수한 탄화물계 세라믹스인 TiC 분말을 사용하였다. TiC는 일본신금속의 TiC-M (75~150  $\mu\text{m}$ ) 분말을 사용하였으며, XRD (Rigaku, D/max-1400)에 의한 분석결과 TiC 단일 결정상인 것으로 확인되었으며, XRF (Rigaku, RIX 2000)에 의해서는 Ti와 C 이외의 성분은 존재하지 않았다. 한편, 광학현미경 및 SEM (Philips, XL30)에 의해 입자형상을 관찰하였다. Table 2에 본 실험에 사용한 복합화 분말의 물리적 성질을 나타내었고 Fig. 2에 분말의 형상을 각각 나타내었다.

Table 2 Physical properties of TiC ceramic powder used for reinforcement

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Melting point (°C)	Micro Vickers Hardness (kg/mm <sup>2</sup> )
4.94	~3100	~ 2,700



Fig. 2 Morphology of TiC powder.

복합화층 형성조건은 다음의 Table 3과 같이 설정하였다.

Table 3에서와 같이 복합화층의 형성조건은 기타 다른 변수를 일정하게 하고 플라즈마 아크전류, 분말공급량에 따라 시편을 제작하였다.

제작된 복합화층의 표면은 저배율 확대경을 사용하여 비드의 외관, 기공, 크랙 등의 결

함 유무를 비교 관찰하였다.

복합화층의 미세조직 관찰은 단면을 광학현미경, SEM/EDS을 사용하여 관찰하였다. 조직관찰을 위해 단면으로 절단한 시편을 연마지 (Sand paper #1200)로 연마하고 1  $\mu\text{m}$  Diamond spray로 최종 경면연마처리 하였다.

Table 3 PTA conditions for the preparation of TiC hardfaced layers

Variables		Applied condition
Polarity		Direct current straight polarity
Gas	Pilot	Ar gas
	Shield	He gas
	Powder	He gas
Distance from electrode to base		10 mm
Line speed		250 mm/min
Current		120, 150, 180 A
Powder feeding rate		5, 10, 15 g/min

복합화층의 내마모성은 Fig. 3과 같은 오고시방식(Ogoshi type)의 신속마모시험기(동경시험기제작소, OAT-U)를 사용하여 평가하였다.<sup>3), 8)</sup>

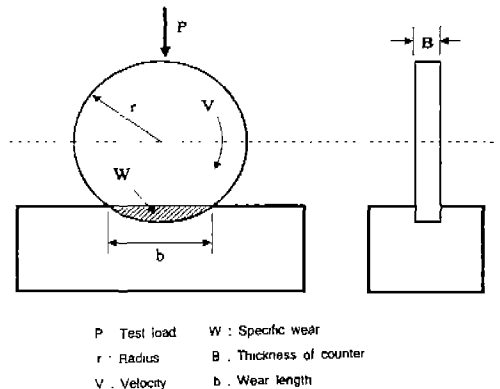


Fig. 3 Schematic illustration of the abrasion wear test principle

상대재는 SCM440 재질의 원형 로터를 사용하였고 시험전 시험편과 상대재의 표면을 연마지(Sand paper #800)로 균일하게 연마하여 표면조도를 일정하게 하였다. 시험조건은 마모하중 31.4 N, 마모거리 200 m로 일정하게 하고, 마모속도를 0.94, 2.88, 4.39 m/sec로 변화시켜 비마모량의 변화를 관찰하였다. 비마모량(W)은 다음식에 의해 계산하였다.<sup>8)</sup>

$$W = \frac{Bb^3}{8rpl} \quad (\text{mm}^3/\text{Nm}) \quad (1)$$

- B : 상대재 로터(Rotor)의 두께(mm)
- r : 상대재 로터(Rotor)의 반경(mm)
- b : 마모흔 길이(mm)
- p : 시험하중(N)
- l : 마모거리(m)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 비드의 외관 및 단면형상

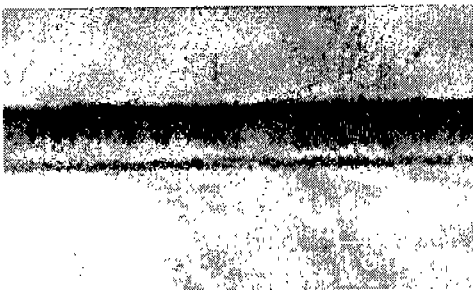


Fig. 4 Typical bead appearance formed with TiC powder feeding rate of 10 g/min. at 150 A

전류 150 A, 분말공급량 10 g/min의 조건에서 형성된 전형적인 비드(Bead)의 외관상태를 Fig. 4에 나타내었다. 복합화부위는 TiC 강화재 침투에 의한 부피증가에 따라 돌출된 형상을 나타내고 있다. 본 실험의 모든 조건에서 비드의 외관은 이와 유사한 형태를 가지고 있었으며 특히 모재로부터 복합화층의 박리나 균열등은 관찰되지 않았다.

Fig. 5에 분말공급량 및 전류 변화에 따른 비드 단면의 모습을 그리고 Fig. 6에는 비드 폭과 깊이의 변화를 전류에 따라 나타낸 결과이다.

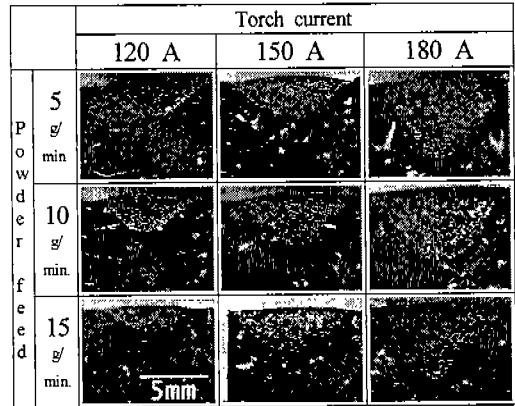


Fig. 5 Crosssections of TiC added bead fabricated at various conditions

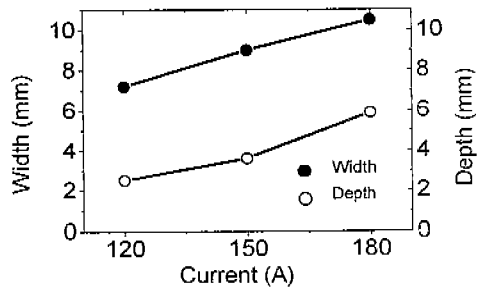
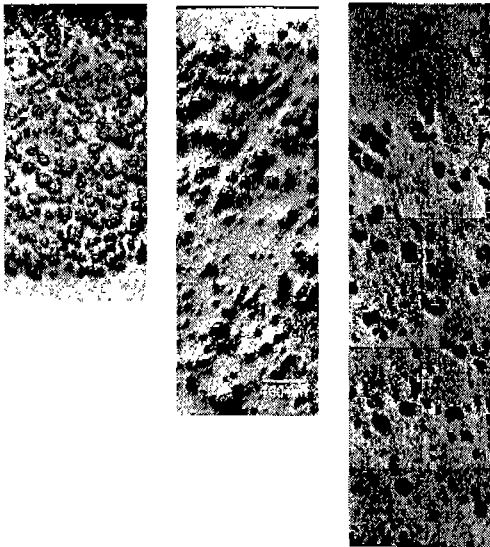


Fig. 6 Variations of bead width and penetration depth according to PTA current

Fig. 5에 나타난 것과 같이 전류가 증가함에 따라 용입 열량이 늘어나게 되고 그 결과 용융지의 크기가 확대됨을 알 수 있다. 한편 분말공급량에 따른 비드의 크기는 실험 범위 내에서 특별한 상관관계를 나타내지 않았다. 비드의 기하학적인 형상에 대한 전류의 영향은 폭보다는 용입 깊이에 더 민감하게 작용하였으며 120 A에서 180 A로 전류가 증가함에 따라 폭은 7.3 mm에서 10.5 mm로 약 44%, 깊이는 2.5 mm에서 5.9 mm로 약 136%의 증가를

나타냈다(Fig. 6). 복합화층 내의 강화재 함량은 공정조건에 따른 일정한 경향성은 관찰되지 않았으나 비드 단면에 대해 Image analyzer를 이용한 분석 결과 전류 150 A, 토치이동속도 250 mm/min, 분말공급량 5 g/min의 조건에서 최대 39 vol.%의 강화재 부피분율을 갖는 복합화층을 형성시킬 수 있었다. 한편 고전류 쪽에서는 용융지의 확대에 따라 동일한 분말공급량의 조건에서 강화재 부피분율이 상대적으로 낮은 경향을 나타내었다.

### 3.2 미세조직 특성



(a) 120 A (b) 150 A (c) 180 A

Fig. 7 Optical microstructures of TiC powders reinforced zone according to current at constant powder feed of 10 g/min

분말공급량 10 g/min의 일정한 상태에서 전류변화에 따른 복합화층 단면의 조직을 Fig. 7에 나타내었다.

TiC 분말은 모재인 알루미늄합금 내에서 용융되지 않고 비교적 균일하게 분포되어 있다. 복합강화층의 깊이는 앞서 언급했듯이 전류량에 비례해 증가하는 양상을 보이고 있다. 복합화층 내부의 강화재 분포형태는 비교적

균일하나 150 A 및 180 A의 경우에는 표면에서 약 200~500  $\mu\text{m}$  이내에 강화재 밀도가 낮은 부분이 존재하고 있다. 이는 용융지의 응고시 TiC 비중이 약 4.9 g/cm<sup>3</sup>로 모재인 Al 합금의 2배 수준이어서 용융지 내에서 비중차이에 의해 하부로 침강한 때문으로 판단된다.

그러나 강화재의 침강은 복합화층의 표면가공시 유리한 영향을 줄 수 있으므로, 침강량의 적절한 조절이 바람직하다고 생각된다.

### 3.3 내마모성

AC4C 모재 및 표면 복합화시편에서 마모속도에 따른 비마모량의 변화를 Fig. 8에 나타내었다.

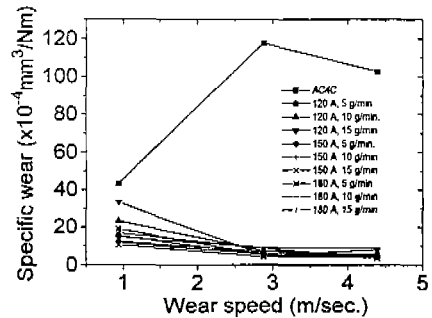


Fig. 8 Specific wear properties of AC4C Al alloy and TiC hardfaced layer

모재인 AC4C의 경우 마모속도가 0.94 m/sec에서 2.88 m/sec로 증가함에 따라 비마모량도 급격한 증가를 나타내며 최고속도인 4.39 m/sec에서는 다소 감소하는 경향을 나타내고 있다. TiC 복합화층의 경우 AC4C와는 달리 마모속도의 증가에 따라 비마모량의 변화는 큰 차이가 없으며 다소 감소하는 경향을 나타내고 있다. 마모속도 2.88 및 4.39 m/sec에서 TiC가 철가된 복합화층들의 평균 비마모량은 각각  $6.3 \times 10^{-4}$ ,  $5.3 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/Nm로 AC4C의  $117.5 \times 10^{-4}$  및  $102.4 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup>/Nm에 비교하여 약 5% 수준으로 감소하는 것을

관찰할 수 있다. 따라서 복합화층의 경우는 모재인 AC4C보다 상대적으로 내마모성이 매우 우수함을 알 수 있다.

		AC4C					TiC hardfaced				
		Al	Si	Ti	Fe	Cr	Al	Si	Ti	Fe	Cr
W e a r S p e e d	0.94 m/s										
		3	7	-	84	6	23	6	4	62	5
	2.88 m/s										
		96	4	-	-	-	75	5	6	14	-
	4.39 m/s										
		96	4	-	-	-	90	4	3	3	-

Fig. 9 Optical micrographs of wear debris and chemical composition by EDS analysis (wt%)

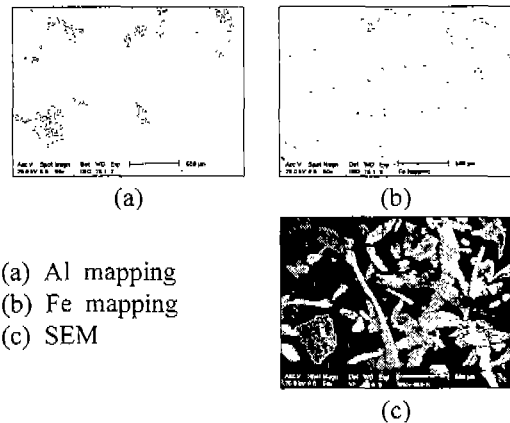
Fig. 9는 150 A, 10 g/min의 조건에서 형성된 복합화 시편 및 AC4C 모재에 대하여 마모 속도별 마모시험 후 생성된 마모입자(wear debris)의 외관 및 EDS에 의한 조성분석결과이며, 한편 동일시편에 대하여 마모시험 후 형성된 마모트랙의 형상을 Fig. 10에 나타내었다. 또한 AC4C 모재의 경우 마모속도 0.94 m/sec에서 발생한 마모입자에 대한 EDS mapping 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

0.94 m/sec의 속도에서는 두 종류의 시편에서 모두 길다란 형태의 마모입자가 주로 발생되고 있으며, 이는 Fig. 9의 EDS에 의한 조성분석 결과 및 Fig. 11의 (b)에서 보듯이 주로 상대재로 사용한 Steel 로터로부터 발생한 마모입자로 판단된다. 한편 마모속도가 2.88,

4.39 m/sec로 증가하면서 AC4C 모재시편에서 발생한 마모입자의 형상은 마모속도 0.94 m/sec의 경우와는 달리 덩어리형태의 입자상으로 되며 Fig. 9 및 Fig. 11의 EDS 분석결과로부터 이는 Al의 마모입자가 주종을 이루고 있음을 보여주고 있다. 본 실험조건에서 마모 속도변화에 따른 마모입자의 재질변화는 특이한 현상으로 향후 이에 대한 깊이 있는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

		AC4C		TiC hardfaced	
		Image	Image	Image	Image
W e a r S p e e d	0.94 m/s				
	2.88 m/s				
	4.39 m/s				

Fig. 10 Optical micrographs of wear tracks



(a) Al mapping  
(b) Fe mapping  
(c) SEM

Fig. 11 SEM photograph and EDS analyses of wear debris for AC4C at the wear speed of 0.94 m/s

한편, 마모트랙의 외관은 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 AC4C의 경우 2.88 및 4.39 m/sec의 마모속도에서 비마모량의 급격한 증가와 함께 Fig. 9에서 관찰된 500~1000  $\mu\text{m}$  크기의 마모입자의 탈락부위가 관찰되고 있으며, TiC복합화층의 경우는 마모양상의 변화가 없이 일정한 마모트랙의 형상을 나타내고 있다.

TiC 복합화 시편과 AC4C 시편에 대한 마모시험 후의 마모입자 및 마모트랙을 비교하여 보면 AC4C의 경우 마모속도가 빨라질수록 마모입자가 조대하며 또한 마모트랙에서 발생된 균열을 관찰할 수 있다 (Fig. 10의 화살표 참조). 이는 AC4C의 경우 마모속도가 증대하면서 마모면의 온도가 상승하게 되므로 회전하는 상대재에 의해 재료 표면의 일부가 밀리게 되고 이것이 모재표면위로 상승, 응착되며 이후 계속 상대재로부터 압력을 받아 응착된 아래쪽 끝부분에 전단응력이 발생하여 결국 마모방향의 직각으로 균열이 발생, 파단되어 모재로부터 이탈되는 것으로 사료된다.

한편, 비마모량과 마모입자의 형상, 크기 및 마모트랙의 외관상태를 종합하여 볼 때 TiC 복합화층의 경우는 첨가된 미용융 탄화물 분말입자들이 Al 매트릭스층에 분산되어 있으며, 경도가 높아서 재료내에서 작은 돌기 역할을 해 상대재인 Steel 로터가 기지층인 알루미늄층과의 직접적인 접촉을 피하는 일종의 완충작용과 마모된 작은 부스러기가 상대재와 마찰면 사이에서 윤�활작용으로 인해 응착이 발생하기 어려워 비마모량의 감소를 가져온 것으로 사료된다. 따라서 TiC 복합화층에서의 마모는 AC4C의 경우와는 달리 연삭마모 기구에 의한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

- 1) 주조용 알루미늄합금인 AC4C 합금을 모재로 하고 고경도 세라믹재료인 TiC분말을 강화재로 사용하여 PTA법에 의해 결합력

및 내마모성이 우수한 표면 복합화층을 형성시킬 수 있었다.

- 2) TiC를 강화재로 사용한 경우 용융지의 크기는 실험범위내에서 전류에 크게 의존하며 특히 용입깊이는 전류량 50% 증가에 따라 약 136% 증가하였다.
- 3) 복합화층의 마모시험결과 모재에 대비하여 현격한 마모량의 감소를 나타냈으며, 시험된 마모속도에서 모두 안정한 마모트랙을 나타냈다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단의 에너지특정과제 연구비 지원으로 이루어진 것으로, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 今井 實, "粉體 Plasma 肉盛溶接", 溶接技術, No. 5, pp. 127-134, 1997.
2. T.Tomita, et al., "Preparation of Titanium Overlay Weld Alloy with Dispersed TiC Particles by Plasma Powder Welding Process", J.Jap. Inst. Metals, Vol. 57, No.1, pp. 68-74, 1993.
3. S.Shimizu, et al., "Carbide Addition on Aluminium Alloy Surface by Plasma Transferred Arc Welding Process", 輕金屬, Vol. 40, No. 10, pp. 761-767, 1990.
4. R.L.Deuis, et al., "Aluminium Composite Coating Produced by Plasma Transferred Arc Surfacing Technique", Mat. Sci. and Tech., Vol.13, pp. 511-522, 1997.
5. F.Matsuda, et al., "Hardening Characteristics and Wear Resistance of Composite Layer", 日本 溶接學會全國大會講演概要 Vol. 50, No. 4, pp. 80-81, 1992.
6. 松田 福久 外, "プラズマ粉體肉盛溶接法に

よるアルミニウム表面複合金化”, 溶接技術, No. 8, pp. 82-86, 1990.

7. F.Matsuda, et al., "Surface Alloying of Aluminium Using Plasma Transferred Arc Welding with Powder Addition", Welding Int., Vol. 5, No. 10, pp. 823-827, 1991.
8. 大越式磨耗試験機取扱説明書, 東京試験機製作所.