

The properties of TiC/Al surface alloy using a high power CO₂-laser

Sundal Song[†]

Department of Physics, Hanseo University, Seosan 356-820, Korea
(Received March 23, 2001)

Abstract The properties of TiC/Al surface alloy prepared using a high power CO₂-laser was investigated. To analyze this process, the physical properties between substrate [Al] and TiC powder were measured. Surface layer size profiles, optical absorption rate and powder efficiency were measured as a function of the laser output in TiC/Al matrix. Regardless of TiC powder existence, the absorption rate in substrate Al was decreased when laser output increased. When the laser output increased in the range of 2kW to 4.5 kW, the powder efficiency increased from 4% to 12%. However, TiC powder were not melted in molten aluminum. As a result, increased powder particles easily penetrated to the surface layer and created a two phase states in the metal matrix.

고출력 이산화탄소 레이저에 의한 TiC/Al 표면합금의 특성

송순달[†]

한서대학교 물리학과, 충남, 356-820
(2001년 3월 23일 접수)

요 약 고출력 이산화탄소 레이저빔에 의한 TiC/Al 표면합금의 특성을 연구하였다. 이 과정을 분석하기 위해 기본금속[Al]과 TiC 분말입자 사이의 물리적 특성을 측정하였다. 표면층의 크기와 모양, 광학적 흡수율 그리고 분말효율을 TiC/Al 행렬에서 레이저출력의 함수로 측정하였다. TiC 분말을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 기본금속내의 흡수율은 레이저 출력이 증가하면 감소하였다. 레이저출력이 2 kW에서 4.5 kW 범위로 증가되면 분말효율은 4%에서 12%까지 증가하였다. 그러나 TiC 분말 입자는 용융된 알루미늄에는 용해되지 않는다. 이 결과 분말입자가 증가되면 쉽게 표면층을 투과하여 금속행렬속에 2개의 위상상태로 생성된다.

1. 서 론

표면합금화 방법은 레이저빔 에너지에 의해 표면층의 깊이가 0.01~5 mm 사이에서 변화가 일어나는 것이 특징적인 현상이다. 이 분야의 연구는 대부분 세라믹과 금속을 사용하며 세라믹은 내열성에 강하고, 물리적인 강도나 특성은 금속특성으로 나타난다. 금속표면에 흡수된 레이저빔 에너지는 결정속에서 열적 에너지로 변환되고, 빔의 세기와 조사시간에 따라 금속의 증발이나 또는 용융상태를 형성한다. 서로 다른 방법에 의해 형성되는 표면합금화 방법의 분류는 그 특성에 따라 마르텐사이트 변형경화, 용해법, 합

금법, 증착법 그리고 확산법 등으로 분류한다.

합금법이나 증착법 그리고 확산법에서는 기본금속에 열처리만 하는 것이 아니라 첨가재료를 표면층에 혼합하여 추가로 화학적 합성에 의해 이루어진다. 이러한 방법들은 첨가재료의 종류나 분량 그리고 가공 과정에 따라 Fig. 1과 같이 서로 분류된다.

용해법은 기본금속의 금속용 용해와 용고과정의 특징으로 이루어지며, 금속에 포함되는 첨가재료가 용융상태로 되어 온도경사와 용고속도에 따라 금속히 용고가 이루어진다. Fig. 1과 같이 합금법에서는 기본금속과 첨가재료가 용융되면서 환류와 확산에 의해 완전히 혼합된다. 첨가재료의 양이나 가공조건을 변화시켜 가공단면을 임의로 크게 할 수 있다. 여기에 비해 증착법은 첨가재료의 특성을 유지하기 위해 가능한 한 순수하고 단단한 층을 입히는 것을 목적으로 한다. 다만 증착층과 기본금속의 경계면에서 기본금속과

[†]Corresponding author
Tel: 82-41-660-1323
Fax: 82-41-660-1323
E-mail: sdsong@hanseo.ac.kr

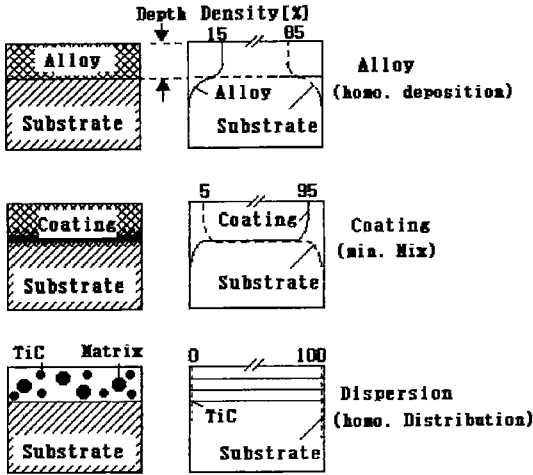


Fig. 1. Density profiles at surface layers by surface alloy, surface coating and surface dispersion method

첨가 재료 사이에 하나의 금속결합을 생성할 수 있는 혼합이 요구된다. 증착법에 있어 기본금속과 첨가재료의 체적비율은 Fig. 1에서 알 수 있듯이 전형적으로 5% 이내 이다.

합금법이나 증착법에 의하면 첨가재료는 한 단계 혹은 두 단계의 가공과정을 거쳐 기본금속내로 용융되어진다. 첫 번째의 한 단계 방법은 용융될 첨가재료가 도선 형태[1]나, 기체 형태[2] 혹은 분말형태[3]로 직접 기본금속에 공급된다. 이에 반해 두단계 방법[4]은 먼저 가공과정에서 첨가재료를 열적인 분사방법으로 기본금속에 증착시키고, 두 번째 가공과정에서 증착층을 레이저 빔으로 가공한다.

확산법은 첨가재료인 강입자가 기본금속의 용융물에 농축될 때 첨가재료가 기본금속 행렬사이에 Fig. 1과 같이 균일하게 분포된 위상상태로 생성되는 것을 목적으로 한다. 용융과정 동안에 첨가재료의 용해는 저지되어야 하고 그리하여 부식과 마모가 일어나지 않는 표면층이 형성된다. 두 단계 가공과정에선 대부분 고온에 의한 첨가재료의 용해를 방지할 수 없으므로 확산법은 한 단계 가공과정으로 수행된다. 전형적인 첨가재료로는 크롬카바이드, 탄타늄카바이드, 티타늄카바이드, 그리고 텅스텐카바이드 등이다.

이 첨가재료들의 용해온도는 기본금속보다도 상당히 높을 수 있으며, 확산법에 의하면 레이저 빔은 기본금속에 용융층을 생성하고, 분사구에서 분사된 기체를 따라 첨가입자들이 용융층내부로 주입된다. 이런 가공과정은 용융온도와 표면장력에도 영향을 주게되며, 용융상태의 지속동안에 용융층에서 첨가재료의 분해가 일어나지 않도록 가공조건이 조절되어야 한다. 분사된 첨가재료의 운동에너지에 의해 입자는 용융층의 표면을 투과하게 되고, 환류에 의해 균일하게 확산이 이루어진다. 본 연구에서는 Al(기본금속)에 TiC(첨가재료)분말을 사용하여 표면층의 물리적 특성을 측

정하였다. 실험에 요구되는 이산화탄소 레이저 빔의 세기는 일반적으로 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 범위에 도달한다. TiC의 광학적 특성외에도 Al의 흡수율은 표면의 연마도에 관계되며, 확산법에 주로 사용되는 파장 $10.06 \mu\text{m}$ 인 이산화탄소 레이저빔의 경우 연마된 Al 표면에서 반사율은 90% 이상이다. 표면에 입사된 레이저빔은 광학적 투과깊이 범위에서 소멸되며, 사용된 금속두께가 cm 영역이므로 광학적 투과깊이보다는 대단히 커서 레이저빔의 투과율은 $T = 0$ 이다. 이산화탄소 레이저의 광학적 투과깊이 τ 는 $\tau = 10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm}$ 에 이른다[5]. 레이저빔 에너지는 오직 광학적 투과깊이 범위내에서 흡수가 일어나고 그리고 흡수된 에너지는 표면층을 가열하게 된다. 그러므로 에너지 보존법칙에 의해 흡수율(A), 반사율(R) 그리고 투과율(T)의 관계는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$A + R + T = 1, A \approx 1 - R$$

$$R = I_r/I_0, I_r: \text{반사빔 세기}, I_0: \text{입사빔 세기}$$

표면층에서 일어나는 전자기파의 흡수에 관한 고전적인 혹은 양자 역학적인 모델[6, 7]은 본 실험에서는 고려하지 않았다.

2. 실험장치 및 방법

실험을 하기위해 두축-CNC-시스템에 연속 최대출력 5.5 kW의 고티출력 이산화탄소 레이저가 Fig. 2와 같이 장치되었다.

초점거리 $f = 200 \text{ mm}$ 인 포물면경(parabolic mirror)과 빔 우회거울로 구성된 광학장치는 가공속도 v 로 움직이는 표면층에 레이저 빔을 집중시킨다. 레이저빔의 열에너지에

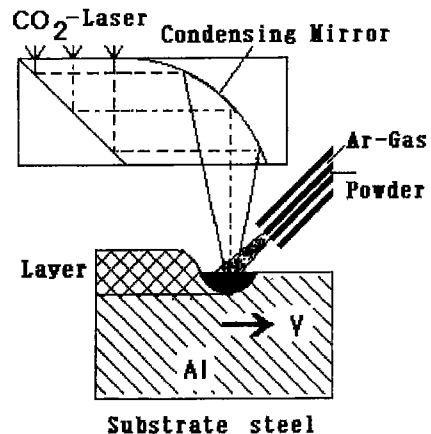


Fig. 2. Schematic diagram of dispersion method by the laser experimental apparatus.

의해 생성된 Al99.99의 용융층위에 분사구로부터 TiC 분말(size: 12~26 μm)을 분사해 준다. 여기서는 보호기체로 아르곤기체를 사용하였으며, 기체흐름의 양을 조절하여 분사된 분말의 양을 계산할 수 있는 구조로 되어 있다. 동축형으로 보호기체를 흘려주므로써 표면층에 일어나는 산화를 방지할 수 있다. 두 거울은 물로 냉각시켜 광학부품의 열적인 손상을 방지하고, 초점거리에서 빔직경의 편차를 감소시킬 수 있다. 거울밀의 분사장치는 표면층을 향해 분사각도(55°)를 조절할 수 있게 되었다. 비교적 먼 거리에선 기체의 확산때문에 분말의 부분적인 손실이 일어 나므로 여기서는 분사구의 중심에서 부터 표면층과의 간격을 1 cm로 하였다. 이보다 적은 간격에서는 분사구에 레이저 빔에 의한 열적인 영향이 많이 발생하였다. 위의 실험장치는 압력 1~5 Pa의 진공속에 장치되고, 레이저빔의 세기분포는 사각형 가우스분포를 나타낸다. Al 샘플(크기 : 100×50×15 mm³)의 광학적 흡수율 측정은 칼로리미터를 사용하였다. 레이저를 이용한 표면확산법에서 실험의 중요한 파라미터는 레이저 출력, 가공체의 이동속도, 재료의 종류, 가열온도, 분말의 크기와 분사각도 들이다. 또한 형성된 층을 재현할 수 있는 점이 중요하다.

3. 실험결과 및 고찰

일정한 실험조건하의 가공과정에서 오직 레이저 출력의 증가는 표면층의 온도상승 효과를 가져온다. 이 결과 용융층의 표면장력이 감소되며, 분말입자는 쉽게 용융층의 표면을 파고들 수 있다. 그러므로 고출력하에서 TiC 입자를 Al금속내에 균일하게 분포시킬 수 있다. 레이저 출력 $I = 8 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 로는 SEM 분석에서 TiC 분말의 확산층은 관측되지 않았으며, 분말입자들은 표면층의 표면장력에 의해 표면을 투과하지 못하고 쌓이기 시작한다. 레이저 출력이 $I = 1.8 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ (4 kW)에 도달했을때 비로서 Al 용융층내에 TiC 입자들의 균일한 분포가 형성되기 시작했다. 왜냐하면 고출력하에서는 표면장력이 감소하므로 용융된 금속표면에 분말입자들의 투과가 쉽게 일어나고, 분말입자들은 전 공간에 걸쳐 일정한 분포를 이룬다. 실험결과에 의하면 빔의 흡수율은 레이저 출력의 함수로 나타난다. 용융된 표면층이나 확산영역에서도 이와 같다. 분말을 사용하지 않는 경우 표면층의 흡수율은 레이저 출력범위 2 kW < P < 4 kW에서 23%에서 11%로 감소되었다. 그 이유는 에너지 결합에 의한 산화에 그 원인이 있다고 볼 수 있다. 저출력(p = 2 kW)하에서는 표면에 폐쇄된 산화층이 생성되고, 산화층은 금속의 표면층보다 레이저빔에 대해 높은 흡수율을 나타내므로 에너지 결합이 상대적으로 높다(23%). 고출력(p = 4 kW)에선 반대로 산화층이 파괴되고, 레이저빔은

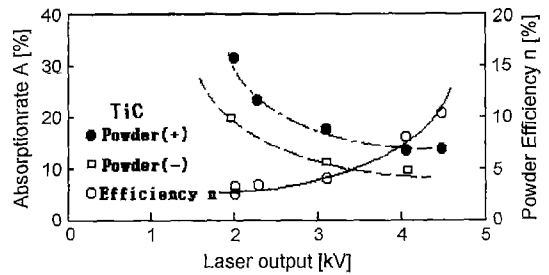


Fig. 3. Absorption rate A and powder efficiency n as the function of the laser output by the TiC/Al99.99. Beam cross section: 1.9×1.2 mm², Velocity: 500 mm/min. Powder feed rate: 2.1 g/min.

용융층으로 입사되어 흡수율은 전반적으로 작아진다(11%).

확산된 TiC층에서 흡수율에 미치는 입자의 영향은 Al 용융층에서 보다 4%~8% 높음을 알 수 있다. 레이저빔의 일부는 TiC 분말에 흡수가 일어나고, 분말은 용융층으로 확산되어 진다. Al의 용융층 표면에 TiC 입자가 투사될때 표면에 생성되는 요철이 흡수율에 영향을 준다. 표면확산법[TiC/Al99.99]에 의한 레이저 출력변화에 따른 표면층의 흡수율(A)변화와 분말효율(n)을 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 초점의 단면적은 1.9×1.2 mm², 가공속도 500 mm/min 그리고 분말의 질량은 2.1 g/min로 일정하게 고정하고 측정된 값들이다.

분말효율은 분사된 분말의 질량(m)과 표면층에 증착된 분말의 질량(Δm)과의 질량비($\Delta m/m$)로 정의하고, Δm 은 실험하기 전의 Al 샘플의 질량과 증착한 후의 샘플의 질량차이로 측정한다. 분사된 분말의 질량(m)은 다음과 같이 계산된다.

$$m = m_p \times t, \quad t = l/v$$

여기서 m_p 는 분당 분사된 분말의 질량(g/min), t는 용융시 속시간, l은 분말이 확산된 표면층의 길이(mm) 그리고 v는 분당 가공속도(mm/min)이다. Fig. 3에서 레이저빔의 출력증가에 따른 분말효율은 4%에서 12%까지 증가하였다. 저출력 p = 2 kW하에서는 Al 용융점의 온도가 900°C로 높지 않으므로 표면장력이 상대적으로 높아 분말입자가 표면층이나 산화층을 투과할 수가 없다. 그러므로 분말입자들은 표면에 쌓이게 되고 분말효율은 약 4% 정도가 된다.

레이저 출력이 p = 4.5 kW에 도달하면 표면장력은 상당히 감소되어, TiC 입자는 용융층표면을 투과하게 되고, 표면층의 전 체적에 균일한 분포가 형성된다. 이때 분말효율은 약 12%에 도달한다. 그의 고출력하에서는 표면층의 크기가 확대되면서 사용된 분말이 더 넓은 표면적에 분산되고, 더욱더 많은 분말이 전체적으로 확산되면서 분말효율

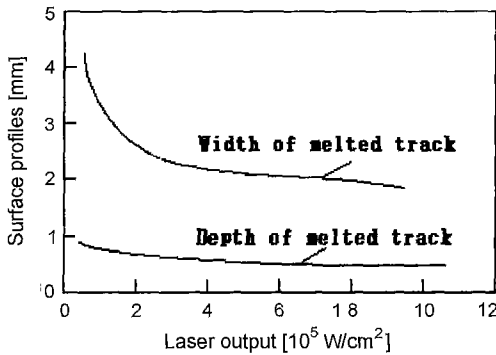


Fig. 4. Surface layer size profiles as the function of the laser output by the TiC/Al99.99. P = 4 kW, V = 500 mm/min.

은 증가된다.

빔세기를 높이기 위해 레이저 출력을 증가시킬 때 빔의 단면적은 작아진다. 그러므로 표면층에서 고온이 형성되고 그로 인해 표면장력의 감소가 일어나며, TiC 입자가 쉽게 표면층으로 투과된다. Al에 TiC 분말을 확산하는데 있어 다른 실험조건은 전과 동일하게 유지하고 단지 빔 직경만을 작게 하면, 빔세기가 증가되고 그 결과 표면층의 깊이와 폭은 Fig. 4처럼 감소된다. Fig. 4는 레이저출력 4 kW, 분당 가공속도 500 mm 그리고 분당 분말질량을 3.0 g으로 고정하고 빔세기 증가에 따른 표면층의 깊이와 폭을 나타낸다.

빔세기를 증가시키면 빔 단면적이 3×1.9 mm²에서 0.8×0.5 mm²으로 감소하기 때문에 확산된 표면층의 체적이 감소한다. 이는 흡수율의 빔세기 의존도에 의해 설명이 된다. Table 1은 레이저 출력값에 따라 변하는 표면층에서 빔세기와 흡수계수를 나타낸다.

빔세기가 약할 때(I = 9×10⁴ W/cm²) 용융층의 온도는 900°C에 도달한다. 용융층의 온도가 빔 세기에 비례하므로 빔세기(I = 10×10⁵ W/cm²)가 증가하면 표면은 용융층을 형성하게 되고 기본물질(Tv(Al))의 용융점인 2470°C에 도달한다[8]. 용융층 표면의 두께 중 약 1~2 μm의 극소부분의 층은 증발이 이루어진다. 그러므로 빔세기의 일부분은

Table 1

Beam intensity and optical absorption coefficients for various laser outputs by TiC/Al99.99

Laser output P [kW]	Intensity I [W/cm ²]	Absorption coefficient A [%]
2.0	8.8×10 ⁴	34.0
2.3	10.1×10 ⁴	23.2
3.2	14.0×10 ⁴	18.5
4.0	17.5×10 ⁴	14.7
4.7	20.6×10 ⁴	13.1

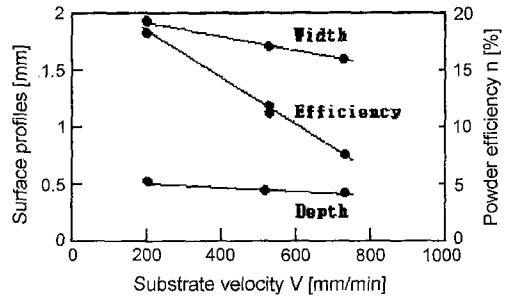


Fig. 5. Surface layer size profiles and powder efficiency as the function of the substrate velocity V

Al 매질의 증발에 소모되고, 표면층의 형태는 어느 한계 빔세기(5×10⁵ W/cm²) 이상에서는 깊이와 폭이 거의 일정한 값을 나타낸다.

분당 가공속도는 Al 표면에 레이저빔이 조사되는 동안의 용융 지속시간(t)과 에너지 (E)로 조절된다. Fig. 5에서 다른 실험조건은 일정하게 하고 단지 가공속도의 함수로 표면층의 깊이와 폭 그리고 분말효율의 변화를 나타낸다. 가공속도가 증가하면 표면층의 폭이 깊이보다 많은 감소를 나타내고 분말효율도 급격히 감소한다. 분당 800 mm의 가공속도에서는 빔에너지에 의한 용융 지속시간이 짧아진다. 이러한 효과의 양적인 면을 나타내기 위해서는 기본금속의 온도분포를 계산함으로써 알 수 있다. 가공속도의 방향으로 일어나는 온도분포를 그래프화 하여, 표면층의 길이와 근사적으로 용융상태의 지속시간을 정의할 수 있다. 가공속도가 빠르면 용융 지속시간이 감소하므로 TiC 분말이 Al 내에 적게 확산된다. 분말효율은 Fig. 5에서 18%에서 7%로 감소된다. 분말효율(n = 18%)이 높을때 표면층의 두께는 700 μm에 이른다. 실험조건을 일정하게 하고 분사되는 분말의 양을 증가시키면 더 많은 분말이 표면에 쌓이게 된다. TiC/Al에서 분말의 양을 증가시키면 표면층 부위에 탄소부분의 양이 많아 짐을 SEM으로 관찰할 수 있으며 분말효율은 10~12%로 감소한다.

4. 결 론

고출력 이산화탄소 레이저로 표면확산법에 의해 제조한 TiC/Al 표면층의 물리적 특성을 조사하기 위해 레이저출력 증가에 따른 분말효율과 흡수율의 상관관계 그리고 표면층의 깊이와 폭을 측정하였으며, 또한 빔세기와 흡수계수의 변화를 조사하였다. 그의 가공속도의 증가에 의한 표면층의 폭과 깊이 그리고 분말효율의 변화를 측정하였다. 레이저출력이 증가할 경우 TiC 분말을 사용한 경우와 사용하지 않는 경우 빔세기가 증가하면 흡수율은 감소한 반면 분말효

율은 증가하였다. 빔세기를 증가시키면 빔단면적이 감소하므로 표면층의 폭은 4 mm에서 2 mm로 급격히 작아지며 두께는 1 mm에서 0.5 mm로 작아지고 빔세기가 $5 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 이상에서는 폭과 두께는 거의 일정한 값을 나타낸다. 가공속도가 200 mm/min에서 800 mm/min으로 증가하면 분말효율은 18 %에서 7 %로 감소하며, 표면층의 폭과 깊이도 감소한다.

레이저빔의 세기와 가공속도는 표면층의 온도와 표면장력에 영향을 주므로, 이 조건에 따라 TiC 분말이 쉽게 표면층에 혼합되어 균일한 확산을 형성할 수 있었다. TiC 분말의 양을 증가시키면 운동에너지가 증가되어 더욱 쉽게 표면층으로 투입된다. 표면에서 TiC 입자의 형태는 용융된 알루미늄에 용해가 일어나지 않으므로 표면확산법의 특징적인 현상인 첨가재료와 금속행렬의 두 위상상태로 형성되어 마모와 부식에 강한 경계층이 형성되었다.

감사의 글

이 논문은 한국 과학재단과 Deutsche Forschungs Gemeinschaft의 국제 공동연구의 일부분으로 Dr. C. Zografou의 도움에 감사드린다.

참 고 문 헌

- [1] D. Burchards, A. Hinse and B.L. Mordike, Laserdrahtbeschichten Math.-Wiss. u. Werkstofftech 20 (1989) 405.
- [2] H.W. Bergmann, Lasergaslegieren von Titanwerkstoffen Fachberichte fuer Metallbearbeitung 63 (1986) 5/6.
- [3] J.D. Ayers, T.R. Tucker and R.J. Schaefer, Wear resisting surfaces by carbide particle injection, Proceedings Rapid Solidif. Processing, Principles and Techn (2), Reston (VA) (1980).
- [4] W. Amende, Die Veredelung metallischer Randschichten mit dem CO₂-laser, Laser & Optoelektronik 2 (1988).
- [5] B. Ollier, Untersuchungen zur Anwendbarkeit von dreidimensionalen Waerme leitungsmodellen auf das Umschmelzen mit CO₂-laser, RWTH Aachen (1990).
- [6] F. Abeles, Optical properties of solids (North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1972).
- [7] R.E. Hummel, Optische Eigenschaften von Metallen und Legierungen (Springer Verlag, Heidelberg, 1971).
- [8] J.E. Hatch, Aluminium Properties and Physical Metallurgy, American Society for Metals, Metals Park, Ohio (1984).