Ti-6Al-4V 레이저 클래딩부에 대한 미세조직 분석

최 병 학^{*,†} · 이 유 철^{**} · 조 재 훈^{***}

^{*}강릉원주대학교 신소재금속공학과

^{**}(주)클래드코리아 원주

^{***}(주)삼성물산

Microstructure Analysis of Ti-6Al-4V Laser Cladding

Byung Hak Choe^{*,†}, You-Cheol Lee^{**}, and Che-Hoon Cho^{***}

^{*}Dept. of Metal and Materials Engineering, Gangneung-wonju National Univ., Gangneung, 25457, Korea

^{**}Clad Korea, Wonju, 26365, Korea

^{***}Samsung C&T Corporation, Seoul, 05288, Korea

[†]Corresponding author: cbh@gwnu.ac.kr

(Received January 30, 2021; Revised February 24, 2021; Accepted March 15, 2021)

Abstract

The microstructure and phase configuration of Ti-6Al-4V laser cladding were investigated in this study. The cladding microstructures were divided into the base metal of the substrate and heat-affected zone (HAZ), and the weld metal of the weld. However, depending on the location, the microstructure shapes were different, owing to heat transfer effects. The final solidification area of the weld metal had a fine structure because of the rapid cooling on contact with the air layer rather than at the center. HAZ also exhibited a relatively fine structure, owing to the rapid cooling of the substrate contact. All microstructure compositions consisted of a lamellar structure of a lean V-content α phase and a rich V-content β phase. The lamellar spacing in the HAZ was 0.5 μm , which was narrower than the 1.5 μm weld metal. However, the average hardness of the HAZ was lower than that of the 500 HV weld metal because of the low alloy content in the HAZ area, as it was welded on a pure Ti substrate. The alloy content of the weld metal welded using Ti-6Al-4V constituent electrodes was high; therefore, the estimated hardness value was high despite the coarse microstructure. In the weld area, cracks were formed in the HAZ because of the pores generated through the separation of oxides and weld residual stresses. The microstructure, phase configuration, and defects of Ti-6Al-4V laser cladding were identified, and the cladding is useful for the cladding process.

Key Words: Ti-6Al-4V, Laser cladding, Heat affected zone, Lamellar structure, α and β phase

1. 서 론

Ti Grade 5로 명칭되는 Ti-6Al-4V 재질의 레이저 용접 또는 클래딩은 기존 Tungsten inert Gas (TIG) 또는 Electron Beam (EB) 용접 방식에 비하여 유리한 측면이 보고되고 있다¹⁻⁴⁾. 보고에 의하면 일반적으로 Ti의 강력한 산화 반응으로 인해 이 재질의 TIG 및 EB 용접 공정은 고진공 분위기에서 수행되어야 한다. 그런데 이에 비해서 레이저 용접 방식은 고출력 레이저

가 사용되어 적절한 쉴딩 가스만으로도 Ti 재질 용접 또는 클래딩이 가능한 것이다. 즉 레이저 사용으로 고에너지 밀도와 저출력 및 고속 용접이 가능한 효과가 창출된다. 이로 인해 열영향부 (heat affected zone, HAZ) 영역을 좁게 하고 전입자 베타 입도 (prior beta grain size)를 미세하게 하며 용접부 잔류응력을 낮추는 장점을 발휘한다^{2,4)}. 또한 고진공 분위기가 아닌 적절한 쉴드 가스 제어만으로 용접/클래딩이 가능하므로 레이저 용접 방식은 자동화를 비롯한 제조 공정의 유연성을 부여한다^{1,5)}.

Ti-6Al-4V 재료는 고강도/고인성 및 내부식성과 안정된 고온 특성으로 항공기 부품 등 다양한 고급 재료로 사용되고 있다^{6,7)}. Ti-6Al-4V는 6Al의 α 상 안정화 원소와 4V의 β 상 안정화 원소가 첨가되어있는 ($\alpha+\beta$)계 합금으로써 용체화 및 시효의 열처리에 의해 기본적인 기계적 특성이 결정되는 재료이다^{8,9)}. Ti-6Al-4V의 레이저 용접에는 응고와 더불어 이와 같은 열처리 공정을 포함하고 있으며, 이에 따라 용접부, 열영향부 및 모재의 미세조직과 경도 분포와 항복/인장강도의 기계적 특성이 결정된다¹⁰⁻¹²⁾.

본 연구에서는 Ti-6Al-4V 재료 ERTi-5 와이어의 레이저 클래딩 제작품에 대한 조직 구성과 기계적 특성을 고찰하고자 하였다. 이를 위해서 마크로 및 마이크로 조직을 관찰하고 경도를 측정하였다. 레이저 클래딩 제품의 미세조직은 응고와 열전달에 의해 구성되고, 경도 분포 등의 특성이 용접 조직 구성에 의존하는 것으로 판단된다. 또한 레이저 클래딩 제품에 발생되는 균열과 기공의 용접 결함을 분석하여¹³⁾, 레이저 용접 공정의 건전성 확보에 기여하고자 한다.

2. 실험 방법

WPS에서 Ti-6Al-4V 레이저 클래딩 시제품 용접봉은 지름 2.4mm 와이어 ERTi-5 [Ti-6Al-4V] 재료이며 5 layer 이상 적층으로 클래딩 하도록 명시된다. Ti 소재는 300°C부터 산화되므로 200°C 이상에서 아르곤 쉴딩 가스로 산화 억제를 수행해야 한다. WPS로부터 예상된 클래딩 제품은 그림과 같이 W(10) × L(50) × T(10)이며, 이를 통해 순수 Ti 기판 위에 레이저 클래딩 시제품을 제작하였다.

클래딩 코리아 자체 조립 제작의 레이저 용접 장비를 이용하여 클래딩 시제품이 제작되었는데, 적용된 전력은 1.0~1.5kW, 전압은 25~30V, 전류는 40~50A이다. 쉴딩 가스는 15L/min으로 설정하였으며, 용접 속도는 2m/min으로 작업하였다.

Ti-6Al-4V 레이저 클래딩 시제품 단면에 대하여 광학현미경으로 마크로 조직 및 마이크로 미세조직을 관찰하였다. 여기에 사용된 에칭액은 증류수(100ml) + 질산(2ml) + 불산(1ml)을 사용하였다. 그리고 미세조직은 광학 (OLYMPUS BX51M) 및 주사전자현미경 (JEOL JP/JSM-7500F)을 이용하여 관찰하였고 성분은 EDS (AMETEK EDAX ELITE)로 분석하였다. 또한 시편 용접부, 열영향부 및 기판 모재에 대한 비커스 경도를 (Future Tech JP-FM-7)으로 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 마크로 조직 및 경도

순수 Ti 기판 위에 Ti-6Al-4V 용접 와이어의 레이저 클래딩 시제품은 Fig. 1과 같다. Fig. 2는 마크로 조직을 보여 주는 것으로서 기판을 관통한 1st layer로부터 5th layer 적층 클래딩으로 구성된다. 용접 클래딩 부위는 용접부 (weld metal, WM)와 용접 열영향부 (heat affected zone, HAZ)으로 구분되는데, Fig. 2에서 1번~12번이 WM이며 13번~16번이 HAZ 부위이며 17번은 기판 모재에 해당된다.

Ti-6Al-4V의 레이저 클래딩과 GTAW 공정으로 제작된 시험편의 마크로 조직 비교는 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)에서 마크로 에칭으로부터 레이저 용접부 (WM)의 입도 (결정립 크기)는 최대 수 mm에 이르지만, 직

Fig. 1 Prototype of Ti-6Al-4V laser cladding

Fig. 2 Macrostructure and hardness values of Ti-6Al-4V laser cladding; 1st (#1), 2nd (#2~#4), 3rd (#5~#7), 4th (#8~#10) and 5th (#11)

Fig. 3 Macrostructure comparison of (a) laser and (b) GTAW cladding for Ti-6Al-4V

선법으로 구한 평균 입자 크기는 0.5mm 정도인 것을 알 수 있다. 그런데 Fig. 3(b)에서 GTAW 클래딩의 경우 결정립은 방향성을 가지고 성장하는데, 이것의 용접부 입도는 레이저 클래딩보다 훨씬 크게 평균 10mm (길이) × 2mm(폭) 정도로 측정된다. 즉 레이저 용접의 경우 GTAW 용접보다 작은 입도 조직으로 구성되는 것이 확인된다.

또한 Fig. 2에서 용접부 (WM) 경도는 1st layer (11번) 부근은 466HV로 비교적 낮지만 2nd layer (8번~10번)과 3rd layer (5번~7번)은 평균 501HV 정도로 높게 측정된다. 그리고 4th layer (2번~4번)과 5th layer (1번) 지역의 평균 경도는 490HV로 중간층에 비해 약간 감소한다.

이에 비해 열영향부 (HAZ) 입도는 마크로 에칭에서 확인하기 어려울 정도로 미세하며, HAZ인 13번~16번 지역의 평균 경도는 464HV로 인근의 WM 경도에 비하여 감소한다. 또한 Ti64 기판의 경도는 평균 194HV로 WM 및 HAZ 부위 경도에 비하여 크게 낮은 것을 알 수 있다.

3.2 미세조직

Fig. 4는 용접부 (1번 6번)와 열영향부 (13번) 및 기판 모재부 (17번)의 대표적인 미세조직을 보여 주는 것이다. Fig. 4에서 최종 클래딩 5th layer 1번의 경우 다른 WM 부위에 비하여 입도가 작게 관찰되는데, 이것은 최종 응고의 표면층에서 열전달이 빨랐기 때문이다. 이에 비해 2nd~4th layer 조직은 Fig. 4의 6번과 같이 비교적 조대한 입도 및 α 상과 β 상이 적층된 라멜라 구조로 구성된다. 이것은 클래딩 중간층의 경우 열전달이 느려서 이와 같이 최종 응고의 표면층 (5th layer)보다는 조대한 구조로 응고되는 것으로 보여진다.

Fig. 4 Microstructures of (a), (b) WM, (c) HAZ and (d) substrate

또한 열영향부 (HAZ)의 미세조직은 용접부 (WM)과 마찬가지로 라멜라 구조로 관찰된다.

α 상과 β 상의 라멜라 적층 간격은 WM의 경우 평균 1.5 μ m로 HAZ의 평균 0.5 μ m에 비하여 3배 정도 크게 측정된다. 이것은 HAZ 부위의 열전달 속도가 커서 라멜라 간격이 WM보다 작은 것으로 판단된다. 그런데 라멜라 적층 간격이 조대한 WM의 평균 경도가 500HV 정도로 HAZ의 464HV 보다 높게 측정되는 것은 용접 와이어에 강도/경도 보강을 위한 성분이 첨가되었기 때문으로 보여 진다.

Ti-6Al-4V 클래딩의 기판은 순수 Ti를 사용하였으며 이것의 모재 (BM) 미세조직은 Fig. 4 (d)의 17번과 같이 위의 용접부 (WM) 및 열영향부 (HAZ) 미세조직과 다르게 관찰된다. 이것은 기판 판재의 압연과 어닐링 열처리 제조 공정에 기인하여 구성된 조직으로써 $\alpha/\beta/\alpha/\beta$ 적층의 라멜라 구조 대신에 평균 입도가 25 μ m인 입상 형태의 α 상 결정립 구조인 것으로 확인된다.

3.3 용접부 (WM) SEM 미세조직 및 성분 분석

용접부 (WM) 부위에 대한 SEM 미세조직은 그림과 같이 $\alpha/\beta/\alpha/\beta$ 적층의 라멜라 구조이다. 그리고 각 상에 대한 성분을 EDS로 분석한 결과 Fig. 5과 같이 V 성분의 차이를 보인다. Fig. 5 a와 b에서 돌출된 위치의 V 함량은 2.22%/ 3.72%로 바닥 위치의 4.0%/ 4.88% V 함량에 비하여 낮게 측정된다. 이를 통해 Fig. 5의 V 함량이 낮은 돌출 부분은 α 상이고 V 함량이 높은 기저 부분은 β 상인 것을 알 수 있다.

그리고 Fig. 6(a)에서 피트 지역은 V 및 Al 성분 거의 없는 순수 Ti 성분으로 구성된 것을 알 수 있다. 이는 가스 트랩에 의한 기공 형성에 기인한 것으로 보여 진다.

Fig. 5 SEM/EDS analysis of WM for Ti-6Al-4V laser cladding, (a), (b) SEM microstructures

Fig. 6 SEM/EDS analysis of pits for Ti-6Al-4V laser cladding, (a), (b) SEM microstructures and (c), (d) EDS analyses

3.4 열영향부 (HAZ) SEM 미세조직 및 성분 분석

용접 열영향부 (HAZ) 부위에 대한 SEM 미세조직은 Fig. 7과 같이 마르텐사이트 래스 구조이다. 이것은 용접부 4V와 모재 순수 Ti의 경계인 열영향부에 조성된 1.8V 정도의 함량은 빠른 냉각 속도에서 마르텐사이트를 유발시키는 합금 성분이기 때문이다. 즉 HAZ의 1.8V 함량과 빠른 냉각 속도로 인해 이 지역이 마르텐사이트 래스 구조로 구성되는 것이다.

그림에서 요철 부위는 서로 성분 차이를 보이지 않았는데, 이것으로부터 HAZ 지역의 라멜라 구조는 $\alpha/\beta/\alpha/\beta$ 적층이라기보다는 Ti-6Al-4V 합금의 마르텐사이트 래스에 기인한 요철 구조인 것을 알 수 있다. 즉 V 함량이 상대적으로 적은 HAZ 지역의 냉각 속도가 빨라서 확산에 의한 $\alpha/\beta/\alpha/\beta$ 적층이 억제되고 마르텐사이트 래스가 유도된 것으로 판단된다.

이러한 결과를 종합하면 순수 Ti 기판 위에 용접된 Ti-6Al-4V 레이저 클래딩의 WM/HAZ/BM 미세조직

Fig. 7 SEM/EDS analysis of HAZ for Ti-6Al-4V laser cladding, (a) SEM microstructure and (b), (c), (d) EDS analyses

Fig. 8 SEM/EDS analysis of WM/HAZ/BM for Ti-6Al-4V Laser cladding, (a) SEM microstructure and (b), (c), (d) EDS analyses

은 $\alpha/\beta/\alpha/\beta$ 적층과 마르텐사이트 래스 경계로 구성되는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서 WM의 성분은 Ti-Al-3V 정도인 것에 비하여 HAZ는 Ti-1Al-1V 수준으로 낮아지고, BM은 Ti-0Al-1V 성분으로 특히 Al 함유량이 극단적으로 감소한 것으로 측정된다. 여기에서 HAZ와 BM에 일부 Al과 V 성분이 검출된 것은 WM으로부터 확산에 기인한 것으로 판단된다.

3.5 열영향부 (HAZ) 균열 결함 분석

용접부 균열은 그림과 같이 두 곳에서 관찰된다. Fig. 9에서 1번 균열은 HAZ 인근의 용접부위 발생 균열인데 균열은 칼로 자른 듯한 직선 형태로 재질의 용접 열 팽창 또는 수축에 의한 열균열로 추정된다.

그리고 용접 열영향부 (HAZ)에 또 다른 균열이 관찰된다. 균열은 Fig. 10과 같이 지그재그 형태의 나뭇가지 타입 (branched type)이다. 이것은 오스테나이트계 스테인레스강의 응력부식균열(stress corrosion crack, SCC)과 유사한 균열 형태이다. 균열은 기판과 용접부 사이의 예각 부위에서 발생하고 초기에는 두꺼운 α 상 경계를 따라 진전하다가 일부는 지속적으로 α 상 경계로 진전하다가, 후기에는 α 상과 β 상을 전단하는 입내 전파 (trans-granular) 형태로 전파하는 것을 알 수 있다. 즉 균열의 70% 정도는 화살표 방향으로 구성된 α 상 경계로 전파하지만 나머지 30% 정도는 α 상과 β 상을 가로지르는 입내 전파 형태를 보이는 것이다.

Fig. 9 Cracks in HAZ of Ti-6Al-4V laser cladding, (a) full and (b) micro structure

Fig. 10 Stress corrosion crack (SCC) in HAZ of Ti-6Al-4V laser cladding

이와 같이 레이저 클래딩의 열영향부에 발생된 응력 부식균열 형태의 균열 결함은 클래딩 공정에서 유발된 잔류응력이 기판과 용접부 예각 부위에 집중하였고, 여기에 미세조직 에칭 용액에 의한 부식 분위기에서 균열이 시작하고 진전한 것으로 추정된다. Liu는 특정 부식 분위기가 적용된 Ti-6Al-4V 용접에서 노치 부위의 잔류응력은 응력부식균열의 높은 감도를 제공하는 것으로 보고 한다¹⁴⁾. 이것에 비하여 Ti-6Al-4V 레이저 분말적층용융 적층제조 방식 (PBF, powder bed fusion)은 빠른 냉각 속도로 인하여 가늘고 긴 침상의 마르텐사이트 조직 형성이 보고 된다¹⁵⁾. 이 경우에도 그림 10과 같은 응력부식균열의 위험성을 고려해야 할 것으로 보여 진다.

4. 결 론

1) Ti-6Al-4V 레이저 클래딩에서 용접부 (WM) 미세조직은 확산에 의한 V-rich α 상과 V-lean β 상이 적층된 라멜라 조직으로 구성된다. 이에 비해 용접 열영향부 (HAZ) 미세조직은 빠른 냉각에 의한 무확산 변태로 성분 차이가 없는 마르텐사이트 래스의 요철 구조로 구성된다.

2) Ti-6Al-4V 레이저 클래딩에서 라멜라 간격은 $1.5\mu\text{m}$ 폭의 WM 보다 $0.5\mu\text{m}$ 폭의 HAZ 지역이 미세하게 관찰되었는데, 이것은 HAZ 냉각속도가 WM 보다 빨라서 HAZ 지역에 마르텐사이트 래스 형성에 기인한 것으로 판단된다.

3) 레이저 클래딩 WM 및 HAZ 지역에 피트 또는 기공이 발생하였는데, 여기에서 관찰된 성분은 Ti-(0.5~2.6)V 성분으로 Al 성분이 포함되어 있지 않은 특징을 보인다. 이는 Ti-6Al-4V 합금 클래딩 용융 중에 용접

부에 Al_2O_3 와 같은 알루미나 산화 개재물이 생성되고 이것이 시편 연마 중에 이탈하여 기공이 형성되었기 때문이다.

4) 레이저 클래딩 경도 측정에서 WM/HAZ/ BM 경도는 500/464/194HV 로 측정되는데, 여기에서 WM 경도값이 HAZ보다 큰 것은 BM 에 접촉한 HAZ의 합금 성분량이 WM의 Ti-6Al-4V 보다 작기 때문이다.

후 기

이 논문은 2020년도 강릉원주대학교 전임교원 연구년 지원에 의하여 수행되었음.

ORCID: Byung Hak Choe: <https://orcid.org/0000-0002-2859-6489>

References

1. A. S. H. Kabir, X. Cao, J. Gholipour, P. Wanjara, J. Cuddy, A. Briur, and M. Medraj, Effect of Postweld Heat Treatment on Microstructure, Hardness, and Tensile Properties of Laser-Welded Ti-6Al-4V, *Metallur. Mat. Trans. A*, 43 (11) (2013) 4171-4184.
<https://doi.org/10.1007/s11661-012-1230-5>
2. E. Akman, A. Demir, T. Canel, and T. Sinmazcelik, Laser Welding of Ti6Al4V Titanium alloys, *J. Mat. Proc. Tech.* 209 (8) (2009) 3705-3713.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.026>
3. F. Caiazzo, F. Curcio, G. Daurelio, and F. M. C. Micutolo, Ti6Al4V Sheet Lap and Butt Joints Carried Out by CO_2 Laser : Mechanical and Morphological Characterization, *J. Mat. Proc. Tech.* 149 (1-3) (2004) 546-552.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.12.026>
4. L. W. Tsay, Y. P. Shan, Y. H. Chao, and W. Y. Shu, The Influence of Porosity on the Fatigue Crack Growth Behavior of Ti-6Al-4V Laser Welds, *J. Mat. Sci.* 41 (22) (2006) 7498-7505.
<https://doi.org/10.1007/s10853-006-0833-x>
5. B. Mehdi, R. Badji, V. Ji, B. Allili, D. Bradai, F. Deschaux-Beaume, and F. Soulie, Microstructure and Residual Stresses in Ti-6Al-4V Alloy Pulsed and Unpulsed TIG Welds, *J. Mat. Proc. Tech.* 231 (2016) 441-448.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.018>
6. G. Lutjering and J. C. Williams, Titanium, 2nd Edition, Springer, Berlin, Germany (2007) 442.
7. C. Leyen and M. Peters, Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, Germany (2003) 532.
8. ASTM B265, Grade 23 Titanium Specification, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, (2015).
9. X. Cao and M. Jahazi, Effect of Welding Speed on Butt Joint Quality of Ti-6Al-4V Alloy Welded Using a High-

- power ND: YAG Laser, *Optics and Laser in Eng.* 47 (11) (2009) 1231-1241.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.05.010>
10. S. L. Campanelli, G. Casalino, M. Mortello, A. Angelastro, and A. D. Ludovico, Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Ti6Al4V Alloy Fiber Laser Welds, *Procedia CIRP*, 33 (2015) 428-433.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.098>
11. S. Chen, M. Zhang, J. Huangm, C. Cui, H. Zhang, and X. Zhao, Microstructures and Mechanical Property of Laser Butt Welding of Titanium Alloy to Stainless Steel, *Mater. Des.* 53 (2014) 504-511.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.044>
12. A. Lisiecki, Welding of Titanium Alloy by Disk Laser, *Tenth Symposium on Laser Technology*, Szczecin, Poland (2012) 12.
<https://doi.org/10.1117/12.2013431>
13. B. Chang, Z. Yuan, H. Pu, H. Li, H. Cheng, D. Du, and J. Shan, A Comparative Study on the Laser Welding of Ti6Al4V Alloy Sheets in Flat and Horizontal Positions, *Appl. Sci.* 7 (4) (2017) 376.
<https://doi.org/10.3390/app7040376>
14. Y. Liu, J. Feng, S. Tan, Y. Cheng, and J. Hu, Investigation of Inhibition of Stress Corrosion Cracking of Welded Ti-6Al-4V Alloy using Electrochemical Noise, *Int. J. Electrochem. Sci.* 15 (2020) 9204-9222.
<https://doi.org/10.20964/2020.09.102>
15. C. K Chun and S. W Kim, The Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Behaviors of Laser Direct Energy Deposited Ti-6Al-4V Plate, *J. Weld. Join.* 36(5) (2018) 75-80.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.5.10>