다층 레이저 클래딩된 과공정 Al-Si 합금의 미세조직과 내마모 특성

이 형 근^{*,†}

^{*}한밭대학교 공과대학 신소재공학과

Microstructure and Wear Characteristics of Multilayer Laser-cladded Hypereutectic Al-Si Alloys

Hyoung-Keun Lee^{*,†}

^{*}Department of Advanced Materials Engineering, HanBat National University, Daejeon 305-719, Korea

[†]Corresponding author: leehk@hanbat.ac.kr

(Received September 27, 2021; Revised October 5, 2021; Accepted October 21, 2021)

Abstract

In this study, a multilayer laser-cladding method was used to increase the Si content in a hypereutectic Al-Si alloy laser cladding. One-, two-, and three-layer claddings were produced by printing Si powder paste on A1050 aluminum surfaces using 180-, 210-, and 250- μm -thick plastic tape, respectively, and then irradiating laser pulses over them. The two- and three-layer claddings were produced by printing on the one- and two-layer cladding surfaces, respectively. The one-layer cladding had a thickness of approximately 190 μm and was uniform and defectless. The cladding had a chemical composition of Al-20.2 wt.% Si and had a fine eutectic Al-Si microstructure in most regions. By contrast, the two-layer cladding had a thickness of approximately 250 μm and exhibited many pores and some cracks. The cladding had a chemical composition of Al-60.5 wt.% Si and a hypereutectic Al-Si microstructure with many coarse primary Si particles. Finally, the three-layer cladding had a thickness of approximately 280 μm and exhibited many large pores and a few large cracks. The cladding had a chemical composition of Al-72.6 wt.% Si and a hypereutectic Al-Si microstructure with very coarse primary Si particles. Block-on-roll wear tests were then performed on the claddings. The weight losses in the one-, two-, and three-layer claddings following the wear test were 5.5, 7.7, and 8.3 mg, respectively.

Key Words: Multilayer laser cladding, Si paste, Hypereutectic Al-Si alloy, Block-on-roll wear test, Friction coefficient, Wear resistance

1. 서 론

과공정(hypereutectic) Al-Si 합금은 정출된 실리콘(Si) 입자에 의한 내마모성과 윤활성을 동시에 가지고 있다. 따라서 경량과 내마모성이 요구되는 산업분야에 많이 응용되고 있다¹⁾. 그러나 Al-Si 합금은 Si 함량이 증가할수록 내마모성은 증가하나 인성은 감소하는 단점이 있다²⁾. 따라서 인성이 큰 알루미늄(Al) 합금 표면에 내마모성이 우수한 과공정 Al-Si 합금을 클래딩

(cladding)하면, 내마모성과 인성을 동시에 얻을 수 있다.

본 연구에서는 순수한 Si 분말을 유기용제와 혼합하여 페이스트(paste)로 만든 후, Al 합금 모재 표면에 얇게 도포하고, 레이저를 조사하여 모재와 합금화하는 방법을 사용하였다. 이러한 레이저 클래딩 방법의 특징과 장·단점들에 대해서는 이전의 연구에서 기술하였다³⁾. 이 방식에 의한 레이저 클래딩에서 통상 20 wt%Si를 얻을 수 있다. 더 큰 Si 함량을 얻기 위해서는 레이저 출력을 줄이거나, 페이스트 도포 두께를 증가시켜야 한다. 그러나 이러한 방법에 의해 얻어진 클래딩 층은 표

면이 불균일하거나, 일부 Si 입자들의 미용융이나, 위치에 따라 조성의 불균일함이 발생하였다^{3,4)}. 따라서 본 연구에서는 적절한 레이저 출력과 페이스트 층 두께를 사용하는 반면, 다층 레이저 클래딩에 의해 Si 함량을 증가시키는 방법을 시도하였다.

2. 실험 방법

2.1 Si 분말 페이스트 층의 제작

레이저 클래딩을 위한 모재로는 두께 5 mm의 A1050 Al 합금을 사용하였다. 모재의 표면은 #220 사포로 연마한 후 초음파 세척하였다. 클래딩 분말로는 Aldrich사에서 제조한 순도 99.0% 이상, 분말입도 325 mesh 이하(90% 이상이 44 μm 이하)의 순수한 Si 분말을 사용하였다. 클래딩은 단순히 Al-Si 조성을 가지기 때문에 해석이 비교적 간단하다.

Si 분말은 유기용제와 혼합하여 Si 페이스트로 제작하였다. Si 페이스트를 프린팅(printing)하는 방법은 Fig. 1에서 보여준다. 일정 두께의 단단한 plastic tape를 모재의 양쪽 끝에 부착하였다. Blade를 사용하여 페이스트를 모재 표면에 고르게 프린트하였다. Si 페이스트 층의 두께는 tape의 두께를 달리하여 쉽게 조절할 수 있다.

2.2 레이저 클래딩 방법

페이스트 층의 유기용제는 150 $^{\circ}\text{C}$ 정도로 가열하여 증발시켰다. 남겨진 Si 분말 도포면에 레이저를 조사하여, Si 분말과 모재를 합금화시켜 Al-Si 합금층을 형성시켰다.

레이저로는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 연속형 레이저에 비해 펄스형 레이저를 사용하는 경우 모재에 입열량을 줄일 수 있는 장점이 있다. 레이저 빔은 초점거리 203 mm의 집속렌즈로 집속하였다. 초점에서 측정한 용융 spot의 직경은 약 1.2 mm를 가졌다⁵⁾. 레이저 초점을 Si 분말층 표면에 위치시키고, 넓은 면적을 주사(scanning)하였다. 주사선 간격은 0.5 mm로, 주사속도는 10 mm/s를 사용하였다. 주사선

Fig. 1 A method of printing the Si powder paste

사이의 겹침(overlap)은 약 58%에 해당한다. 시험편 표면의 산화방지를 위하여 Ar 보호가스를 흘렸다. 레이저 출력은 펄핑전압은 260 V, 펄스주파수는 60 Hz, 펄스폭은 1.8 ms를 사용하였다. 이 조건에서 측정한 평균출력은 281.5 W이다.

2.3 다층 레이저 클래딩의 제조

Fig. 2에서는 다층 레이저 클래딩을 제작하는 방법을 설명한다. 1-layer(1층), 2-layer(2층), 3-layer(3층) 클래딩을 제작하였다.

1-layer 클래딩에서는 180 μm 두께의 플라스틱 테이프를 사용하여, A1050 Al 합금표면에 Si 페이스트를 도포한다. 건조 후 Si 페이스트 표면에 레이저를 조사하여 클래딩 층을 제작한다. 2-layer 클래딩은 1-layer 클래딩의 표면에 210 μm 두께의 테이프를 사용하여 Si 페이스트를 도포하고, 그 위에 레이저를 조사하여 클래딩 층을 제작한다. 3-layer 클래딩에서는 2-layer 클래딩의 표면에 250 μm 두께의 테이프를 사용하여 Si 페이스트를 도포한 후, 그 위에 레이저를 조사하여 클래딩 층을 제작한다. 테이프의 두께는 앞의 연구결과를 참고하여 선정하였다^{3,4)}.

각 클래딩에 대해서 단면 미세조직과 성분분석을 위한 시험편과 마모시험을 위한 시험편을 제작하였다. 전자현미경(SEM, EDS)에 의해 미세조직과 화학조성을 분석하였다.

2.4 마모시험 방법

마모시험은 block-on-roll type의 마모시험기를 사용하였다. Fig. 3에서는 마모시험기의 개략도를 보여주며, Table 1에서는 마모시험 조건을 보여준다. 클래딩 표면은 #2000의 사포로 조심스럽게 연마하여 표면 요철을 제거하였다. 상대 마모재로는 직경 50 mm, 폭 7 mm의 어닐링(annealing)된 상태의 SKD11 강으로 제작된 롤(roll)을 사용하였다. 일정한 표면상태를

Fig. 2 A method of multi-layer cladding

Fig. 3 Schematic diagram of the wear tester

Table 1 Block-on-roll wear test conditions

Parameter	Condition
Roll material	SKD 11, Hardness: 226 HV
Rotating Speed	805 rpm
Test time	180 s (Test distance: 379 m)
Test load	0.81 kg on the specimen
Lubricant	Pure water

얻기 위하여, 마모시험 전에 roll 마찰면의 얇은 두께를 선반에서 연삭가공하여 제거하였다. 윤활재로는 물을 사용하였다. 마모시험 동안 시험편에 0.81 kg의 수직하중을 가하였으며, roll은 805 rpm의 속도로 회전시켰다. 이때 접촉표면에서 마찰속도는 2.1 m/s에 해당한다. 180 초(379 m) 동안 마모시킨 후 마모손실량을 측정하였다. 마모손실량은 마모시험 전·후의 무게 차이로 측정하였다. 수직하중은 미리 측정하였으며, 수평하중은 로드셀(load cell)과 데이터 수집 장치를 사용하여 실시간으로 측정하였다. 실시간 마찰계수는 수평하중/수직하중으로 환산하였다.

3. 실험 결과 및 검토

3.1 단면의 미세조직과 성분 분석

Fig. 4에서는 각 시험편들의 단면에 대한 저배율에

서의 전자현미경 사진들을 보여준다. Fig. 4(a)의 1-layer 클래딩에서는 전체적으로 두께가 균일하고, 결함이 없는 클래드 층을 형성하였다. 또한 레이저 펄스에 의한 용융-응고의 경계면들을 보여준다. 클래드 층의 두께는 약 190 μm 로 측정되었다. Fig. 4(b)의 2-layer 클래딩에서는 정출된 Si 입자들이 많이 발견되었다. 표면 근처에서는 기공들이 관찰되지 않았으나, 1층과 2층 사이에서 다수의 기공들이 관찰되었다. 또한 일부 지역에서는 큰 균열들이 관찰되었다. 2-layer 클래드 층의 두께는 약 250 μm 로 측정되었다. Fig. 4(c)의 3-layer 클래딩은 2-layer 클래딩과 유사하게 많은 정출된 Si 입자들로 구성되었다. 역시 표면 근처에서는 기공들이 관찰되지 않았으나, 1층과 3층 사이의 지역에서 많은 큰 기공들이 존재하였다. 또한 일부 지역에서 다수의 큰 균열들이 존재하였다. 3-layer 클래드 층의 두께는 약 280 μm 로 측정되었다.

Fig. 5에서는 클래드 층 단면의 고배율에서 전자현미경(SEM) 미세조직과 성분분석(EDS) 결과를 보여준다. SEM 사진은 단면의 표면 근처에서 촬영하였다. EDS 성분분석은 SEM 사진 근처에서 더욱 넓은 면에 대해서 수행하였다. Fig. 5(a)의 1-layer 클래딩에서의 SEM 미세조직은 매우 미세한 Al-Si 공정조직을 보여준다. 지역에 따라 다소 차이는 있으나, 전반적으로 매우 미세한 Al-Si 공정조직을 보여준다. EDS 성분분석 결과 화학조성은 Al-20.2wt%Si로 측정되었다. Al-Si 평형상태도에서 공정반응은 577 $^{\circ}\text{C}$, Al-12.6wt%Si 조성에서 일어난다. 1-layer 클래딩의 화학조성은 Al-20.2wt%Si로 측정되었다. 이 조성은 평형공정조성에서 상당히 벗어나며, 과공정 Al-Si 합금에 해당한다. 그러나 냉각속도가 증가하면 공정조성은 Si 함량이 더 많은 쪽으로 이동하는 것으로 알려져 있다^{4,6)}. 냉각속도가 매우 빠른 경우에는 Al-30wt%Si에까지 이동한다고 알려져 있다⁶⁾. 펄스 레이저에 의한 클래딩은 급냉 응고과정이기 때문에, 공정조성이 Si 함량이 많은 쪽으로 이동한 것으로 보인다. Fig. 5(b)는 2-layer

Fig. 4 SEM microstructures of the clad layers (x200)

(a) 1-layer cladding (Al-20.2wt%Si)

(b) 2-layer cladding (Al-60.5wt%Si)

(c) 3-layer cladding (Al-72.6wt%Si)

Fig. 5 SEM microstructures and EDX surface analysis of the clad layers ($\times 5000$)

클래딩의 미세조직을 보여준다. 매우 큰 초정 Si 입자들을 다량 포함한 과공정 Al-Si 미세조직을 가진다. 큰 초정 Si 입자들 사이로 미세한 공정조직들이 관찰된다. 2-layer 클래딩의 화학조성은 Al-60.5wt%Si로 많은 Si 함량을 가진다. Al-Si 평형상태도를 보면, Al-60.5wt%Si 조성에서 초정 Si 입자들이 정출하기 시작하는 온도는 약 1140 °C로 매우 높다. 따라서 고온에서 정출된 초정 Si 입자들은 냉각과정에서 크게 성장

한 것으로 보인다. Fig. 5(c)의 3-layer 클래딩의 미세조직은 2-layer 클래딩과 유사하나, 초정 Si 입자들의 양과 크기가 더욱 증가하였다. 3-layer 클래딩의 화학조성은 Al-72.6wt%Si로 Si 함량이 더욱 증가하였다. Al-72.6wt%Si 조성에서 초정 Si 입자들이 정출하기 시작하는 온도는 약 1240 °C로 더욱 높다. 따라서 정출한 초정 Si 입자들이 냉각과정에서 더욱 크게 성장한 것으로 보인다.

Al 합금의 주조나 용접과정에서 기공의 발생은 대부분 수소 때문에 발생한다^{8,9)}. Al 액상에서 수소의 용해도는 온도가 감소하면 급격히 감소한다. 또한 Al은 응고과정에서 수소의 용해량이 급격히 감소한다. 만약 냉각-응고과정에서 과포화된 수소로부터 발생한 기포를 밖으로 배출하지 못하면 기공으로 남는다. 여기서 가장 큰 수소의 발생원은 페이스트의 제작과정에서 사용한 유기용제에 흡수된 수분이나 유기용제의 분해 때문인 것으로 보인다. 1-layer 클래딩에서는 용융층의 두께가 크지 않기 때문에, 응고과정에서 발생한 수소기포는 쉽게 밖으로 배출된 것으로 보인다. 그러나 2-layer와 3-layer 클래딩에는 다량의 Si를 포함하며, 상당히 큰 기공들이 존재한다. 고온의 Al 액상에 Si를 첨가하더라도 액상에서 수소의 용해량은 큰 변화가 없다¹⁰⁾. 또한 고상 Si 내에 수소의 용해량은 매우 작다¹¹⁾. 따라서 과공정 Al-Si 액상용액의 냉각-응고 과정에서 수소의 용해거동은 Al 액상과 비슷할 것으로 보인다. 그러나 2-layer와 3-layer 클래딩과 같이, 다량의 Si를 포함하는 과공정 Al-Si 액상용액으로부터 고상 Si의 정출은 매우 높은 온도에서 일어난다. 고온에서 고상 Si의 정출과정에서 수소가 Al-Si 액상용액으로 배출된다. 표면 근처에서 발생한 수소기포는 쉽게 밖으로 배출되어, 표면 근처에서는 큰 기공들이 관찰되지 않는다. Al-Si 상태도를 참고하여 Al-60.5wt%Si의 액상이 최종적으로 응고하는 온도인 577 °C(공정온도) 바로 위에서 고상과 액상의 비율을 계산하였다. 즉 액상용액의 깊은 부분인 모재에 접하여 응고하는 Si 고상과 이들 사이에 존재하는 Al-12.6wt%Si(공정조성) 액상의 비율을 계산하였다. Si 고상은 55 %이며, 액상은 45 %가 Si 고상들 사이에 존재한다. 따라서 모재에 접한 액상 내에 발생한 수소기포들이 Si 고상들 사이에 갇혀서 표면으로 빠져 나오기 어렵기 때문에 큰 기공으로 남은 듯 보인다. 따라서 표면에서 깊은 지역에 위치한 1층-2층/3층 경계에서 발생한 수소기포는 밖으로 배출되지 못하고 큰 기공으로 남은 것으로 보인다. 또한 2-layer와 3-layer 클래딩은 다량의 큰 초정 Si 입자들로 인하여 취성을 가지며, 냉각-응고과정에서 열응력에 의해 균열이 발생한 것으로 보인다.

3.2 마모시험 결과

Fig. 6은 마모시험 동안 실시간으로 측정된 마찰계수의 변화를 보여준다. 1-layer 클래딩에서는 마모시험 내내 거의 일정한 마찰계수를 유지하였다. 2-layer 클래딩에서 마찰계수는 약간의 변동이 존재하지만, 거의 일정하게 유지하였다. 반면 3-layer 클래딩에서는 마모시험동안 마찰계수의 불규칙한 변동이 발생하였다.

Table 2에는 마모시험 결과를 수록하였다. 평균마찰계수는 50 ~ 350 m 사이에서 평균값을 취하였다. 평균 마찰계수는 1-layer 클래딩에서는 0.46이며, 2-layer 클래딩과 3-layer 클래딩에서는 0.44로서 약간 더 낮았다. 마모시험 후 마모손실량은 1-layer 클래딩에서는 5.5 mg, 2-layer 클래딩에서는 7.7 mg, 3-layer 클래딩에서는 8.3 mg이 발생하였다. 마모깊이를 계산하면, 1-layer 클래딩에서는 99 μm , 2-layer 클래딩에서는 116 μm , 3-layer 클래딩에서는 126 μm 이었다. 모든 경우에 마모는 클래딩 층 내에서 일어났으며, 마모시험은 적합하게 수행되었다. Si 함량이 적은 과공정 Al-Si 합금에서는 Si 함량이 증가하면 내마모성이 증가하였으나⁴⁾, 그러나 여기서는 Si 함량이 증가하면 오히려 내마모성이 감소하였다. 이것은 2-layer와 3-layer 클래딩에서 과다한 Si 입자들로 인한 취성과 큰 균열들과 큰 기공들이 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 2-

Fig. 6 Friction coefficient during wear tests of the cladding layers

Table 2 Average friction coefficient and wear weight loss

	1-layer	2-layer	3-layer
Average friction coefficient	0.46	0.44	0.44
Wear weight loss (mg)	5.5	7.7	8.3

layer와 3-layer 클래딩에서는 마찰계수의 변동이 존재하는 것은 아마 마모과정에서 Si 입자들이 떨어져 나간 때문으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 A1050 알루미늄 모재 위에 Si 분말 페이스트의 도포와 레이저 조사에 의해 과공정 Al-Si 합금 클래딩 층을 제조하였다. 클래딩 층의 Si 함량을 증가시키는 위하여, 다층 레이저 클래딩 방법을 시도하였다.

1) 1-layer 클래딩에서는 두께가 $\sim 190 \mu\text{m}$ 이며, 큰 기공들이 없는, 균일한 클래딩 층을 형성하였다. 화학조성은 Al-20.2wt%Si이며, 미세한 공정 Al-Si 미세조직을 가진다.

2) 2-layer 클래딩에서는 두께가 $\sim 250 \mu\text{m}$ 이며, 큰 기공들과 일부지역에서 큰 균열들이 존재하였다. 화학조성은 Al-60.5wt%Si이며, 다량의 큰 초정 Si 입자들을 가진 과공정 Al-Si 미세조직을 가진다.

3) 3-layer 클래딩에서는 두께가 $\sim 280 \mu\text{m}$ 이며, 다수의 큰 기공들과 큰 균열들을 가진다. 화학조성은 Al-72.6wt%Si이며, 다량의 매우 큰 초정 Si 입자들을 가진 과공정 Al-Si 미세조직을 가진다.

4) 클래딩에 대한 block-on-roll 마모시험을 수행하였다. 1-layer 클래딩에서는 5.5 mg, 2-layer 클래딩에서는 7.7 mg, 3-layer 클래딩에서는 8.3 mg의 마모손실이 발생하였다.

ORCID: Hyoung-Keun Lee: <http://orcid.org/0000-0001-7606-4180>

References

1. J. R. Davis, Aluminium and Aluminium Alloys, *ASM International*, Ohio, USA (1993) 532-541.
2. S. Tomida, K. Nakata, S. Shibata, I. Zenkouji, and S. Saji, Improvement on Wear Resistance of Hyper-eutectic Al-Si Cast Alloy by Laser Surface Remelting, *Surf. Coat. Tech.* 169(170) (2003) 468-471. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00100-2)
3. H. K. Lee, Laser Cladding by Printing Si Powder Paste on A1050 Al Alloy Surface, *J. Weld. Join.* 36(1) (2018) 57-64. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.1.7>
4. H. K. Lee, Effects of Heat Treatment Temperature on Wear Characteristics of Hyper-Eutectic Al-Si Alloy Laser Clad Layer, *J. Weld. Join.* 37(3) (2019) 262-267. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.3.10>
5. H. K. Lee, Effects of the Cladding Parameters on the Deposition Efficiency in pulsed Nd:YAG Laser Cladding, *J. Mater. Process. Technol.* 202(3) (2008) 321-327. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.024>

6. M. Pierantoni, M. Gremaud, P. Magnin, D. Stoll and W. Kurz, The Coupled Zone of Rapidly Solidified Al-Si Alloys in Laser Treatment, *Acta Metall. Mater.* 40(7) (1992) 1637-1644.
[https://doi.org/10.1016/0956-7151\(92\)90106-O](https://doi.org/10.1016/0956-7151(92)90106-O)
7. N. Apaydin and R. W. Smith, Microstructural Characterization of Rapidly Solidified Al-Si Alloys, *Mat. Sci. Eng.* 98 (1988) 149-152.
[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90144-9](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90144-9)
8. G. Mathers, The Welding of Aluminium and its Alloys, *Woodhead Publishing Ltd*, Cambridge, England (2002) 18-22.
9. M. Tiryakioglu, The Effect of Hydrogen on Pore Formation in Aluminum Alloy Castings: Myth Versus Reality, *Metals*, 10(3) (2020) 368.
<https://doi.org/10.3390/met10030368>
10. M. Tiryakioglu, A Simple Model to Estimate Hydrogen Solubility in Liquid Aluminium Alloys, *Intl. J. Cast Met. Res.* 33 (2020) 120-122.
<https://doi.org/10.1080/13640461.2020.1767838>
11. T. B. Massalski, Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd Edition, *ASM International*, Ohio, USA (1990) 2057-2060.