

레이저 클래딩 중첩도가 표면특성에 미치는 영향

이제훈, 서무홍, 한유희

한국기계연구원 레이저기술연구그룹

The effects of overlapping ratio on surface properties in laser cladding

Jae-Hoon Lee, Moo-Hong Suh, You-Hee Han

Laser Application Group, Korea Institute of Machinery & Materials

ABSTRACT

A 4kW RS840 CO₂ laser with a powder auto-feeding apparatus has been used to deposit multiple overlapping tracks of Ni-base superalloy on to low carbon steel. It was found that the surface roughness(turbulence) of an overlapped cladding layer decreased with the increase of the overlapping ratio in an oscillating manner. When the overlapping ratio had values of 0.62, the surface turbulence was lowest. Overlapping ratio offer significant potential for improvement of materials surface properties such as corrosion performance and wear resistance. This paper reports that the overlapping ratio shows best corrosion resistance. The tensile residual stresses generated at the higher overlapping ratio(>0.45) and the element concentration of Fe increased in the surface layer at the lower overlapping ratio(<0.45) may lead to worse corrosion resistance.

Keywords : CO₂ laser, cladding, Ni-base superalloy, low carbon steel, overlapping ratio, turbulence, polarization, corrosion.

1. 서론

레이저 클래딩은 금속표면에 내식성, 내마모성, 내피로성등을 향상시키기 위하여 클래딩 재료를 기지 상에 자동 공급하면서 레이저 빔을 조사하여 50 μ m~2mm 두께의 후막을 형성하는 기술이다. 레이저를 이용한 클래딩의 특

징은 고속가공에 의한 기지의 열변형 최소, 자동화용이, 국부적 정밀가공, 급냉효과에 의한 결정립 미세화, 준안정상 생성, 균일한 미세조직 그리고 모재와 코팅층간 낮은 희석율과 제어가 용이하며 높은 접합력 등을 들 수 있다¹⁾²⁾. 또한 기계적 특성을 열화시키는 HAZ부분

이 PTA(Plasma Transferred Arc), MIG(Metal Inert Gas Welding)에 비교하여 매우 작다.

위에 언급된 많은 장점에도 불구하고 레이저 빔의 특성상 넓은 면적을 도포하기 위해서는 중첩이 불가피하다. 또한 후가공을 줄이기 위해서는 중첩된 표면의 표면 거칠기가 낮아야 하며, 클래드 재료의 특성을 최대한 살리기 위해서는 클래드 층에서 모재의 희석율을 최소화하여야 한다. 표면 거칠기만을 고려한 중첩도의 증가는 입열량을 증가시켜 변형 및 열영향부의 기계적 성질을 저하시킬 뿐 아니라 생산속도에도 악영향을 미치게 된다.

Yanxiang의 중첩도에 대한 연구결과에 의하면 중첩도의 증가는 진동하는 방식으로 표면 거칠기가 감소한다고 하였으며, Steen은 중첩도 0.7이상에서는 Interrun porosity가 발생할 확률이 급증한다고 보고하였다. 따라서 최적의 중첩도에 대한 연구는 생산성 향상 및 클래드 층의 특성을 향상시키기 위해 필수적이라 하겠다.

본 연구에서는 저탄소강에 내열내식성 재료인 Ni기 초합금을 레이저 클래딩하여 중첩도에 따른 표면거칠기와 내식성에 대한 영향을 고찰하였으며, 가장 우수한 내식성을 나타내는 중첩도를 판별하였다.

강(SS41)을 모재로 내열내식성 재료인 Ni기 초합금 분말을 클래딩 재료로 사용하였다. 화학 조성은 table 1과 같으며 용융 접합성을 향상시키기 위하여 B, Si을 첨가하였다. 보호가스로는 Ar을 사용하였으며 공급량은 분당 1 l/min으로 공급하였다. 가공 레이저는 Rofin-Sinar사의 4kW급 RS840 CO₂ 레이저를 사용하였다. 빔 직경은 2.6mm, 분말은 레이저 빔 2mm후방에 분사하는 방식으로 레이저 클래딩하였다. 분말공급은 회전 disk 방식으로 이 방법은 disk의 회전수를 조절하여 공급량을 조절하며, disk에 의하여 이송된 분말이 자유낙하와 송급 가스에 의하여 노즐로 이송되어 가공 부위에 송급되어진다.

2.2 중첩실험

클래딩 기초실험을 통하여 얻은 결과를 바탕으로 건전한 클래드층이 얻어진 영역에서 중첩실험을 행하였다. 중첩도가 표면특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 table 2와 같이 P=3.0kW, F=8.04~15.04g/min, V=0.5m/min(P=Power, F=Powder Feed Rate, V=Traverse Speed)와 P=2.85kW, F=9.06g/min, V=0.7m/min에서 중첩도를 0.12에서 0.73까지 변화시켰다. 중첩도와 표면 거칠기 측정은 Fig. 1과 같다. 표면거칠기

Elements	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	S	P	B
Ni-base Superalloy	3.5	15	Bal	-	-	4.3	0.075	-	-	3.1
SS41	Bal	0.075	< 0.032	0.665	0.055	0.045	0.055	< 0.011	< 0.006	-

Table 1 Chemical composition(wt%) of Ni-base superalloy and substrate(SS41).

2. 실험방법

2.1 레이저 클래딩 재료 및 실험

본 실험에서는 50x200x8 mm 치수의 저탄소

(Turbulence)는 클래드층의 최고 높이(T)에서 최저 높이(H)를 빼 값을 단일 클래드층의 높이(h)로 나눈 값((T-H)/h)으로 정의하였다.

Sample No.	Power (kW)	Powder feed rate (g/min)	Traverse speed (m/min)	Overlapping ratio (k)
A	3.0	8.04	0.5	0.73 ~ 0.12
B	3.0	15.04	0.5	0.73 ~ 0.12
C	2.85	9.62	0.7	0.73 ~ 0.12

Table 2 The condition of overlapping test.

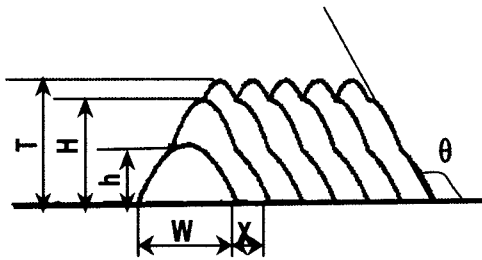


Fig. 1 The definition of overlapping test parameters; (a) Overlapping ratio(k) = $(W-X)/W$, (b) Overlapping angle = θ , (c) Turbulence = $(T-H)/h$ (d) $\Delta H = T-H$.

2.3 양극분극실험

중첩실험으로 얻어진 재료를 클래딩한 면이 평평하도록 중첩된 클래드층의 최저 높이(H)로 가공하였다. 가공한 시편을 30mm x 15mm 크기가 되도록 절단한 다음 클래딩한 면의 반대쪽에 지름 3mm의 동선을 점용접하였다. 이 시편을 마운팅한 후 표면을 0.3 μ m까지 연마하였다. 실험장비는 EG&G 263A Corrosion Measurement System을 이용하였다. 시편을 가동전극(Working Electrode)으로, 포화감홍전극을 표준전극(Reference Electrode)으로, 그리고 탄소봉을 대전극(Counter Electrode)으로 하여 부식 셀에 장착하였다. 부식용액으로는 25°C의 0.11M H₂SO₄ 용액을 사용하였으며, 용존산소의 영향을 저감하기 위해 질소를 용액에 실험중 계속해서 1 l/min으로 흘려주었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 중첩도가 표면거칠기에 미치는 영향

중첩도는 생산속도와 직접적으로 관련이 있다. 생산속도를 증가시키기 위해서는 중첩도를 최소화하는 방향으로 진행되어야 한다. 그러나 중첩도의 감소는

표면특성향상에 직접적인 영향을 미치므로 최적의 중첩도를 선택하는 것이 필수적이다. Fig. 2의 결과에서 보는 바와 같이 중첩도가 증가할수록 표면거칠기는 진동하는 방식으로 감소하는 것을 알 수 있다. 여기에서 ΔH 는 단일 클래드층의 폭(Width)과는 무관하며, 단일 클래드층의 높이(Height)와 중첩도(k)에 의존하는 것으로 분석되었다. $P=3.0$ kW, $F=8.04$ g/min, $V=0.5$ m/min의 조건에서 양호한 표면거칠기를 나타내는 중첩도는 0.62, 0.45, 0.21이었으며, 레이저 출력과 조사속도는 동일하고 분말공급량이 15.06g/min인 조건에서도 양호한 표면거칠기를 나타내는 중첩도는 분말공급량이 8.04g/min일 때의 값과 동일하였다. Yanxiang은 중첩도가 감소함에 따라 표면거칠기의 변화 곡선이 $\Delta H=h(1-k)$ 와 $\Delta H=0.24h(1-k)$ 사이에서 점차 감소한다고 하였다³⁾. 본 연구에서는 $\Delta H=0.1h(1-k)$ 와 $\Delta H=0.36h(1-k)$ 사이에서 진동하는 방식으로 감소하여 유사한 결과를 나타내었으며, 중첩도가 약 0.62일 때 3가지 경우 모두에서 가장 낮은 값의 표면 거칠기를 보이고 있다(Fig. 3). 중첩도가 증가함에 따른 표면거칠기변화는 변곡점을 갖는 곡선과 같이 표면거칠기의 감소현상이 임계 중첩도를 기점으로 증가하였다. 중첩도 0.62이상에서 표면거칠기가 오히려 증가하는 현상이 나타나는데 이는 공급되는 분말이 인접한 클래드 층의 상단 측면에 낙하되어 용융접합되므로 클래드 층이 사선방향으로 증축된 결과로 판단된다. 중첩도가 계속 증가하면

클래드 재료의 접합강도는 점차 저하되며, 중첩도가 1이 되면 사선방향으로 적층되는 클래드층 기울기가 증가하여 단을 쌓는 것과 같은 모양을 나타낼 것이다.

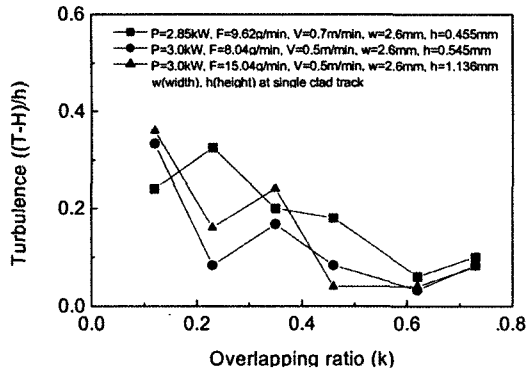


Fig. 2 Variation of turbulence as a function of overlapping ratio in laser cladding of Ni-base superalloy on low carbon steel.



Fig. 3 Cladding layer sections of Ni-base superalloy on mild steels : (a) P=2.85kW, F=9.62g/min, V=0.7m/min, k=0.62 (b) P=3.0kW, F=8.04g/min, V=0.5m/min, k=0.62.

3.2 중첩도가 내식성에 미치는 영향

P=2.85kW, F=9.06g/min, V=0.7m/min의 조건에서 중첩도를 0.12~0.73으로 변화시킨 재료를 가지고 25°C의 0.11M H₂SO₄ 용액에서 양극분극 실험을 행하였다.

Fig. 4, 5, 6에서 보여주는 바와 같이 중첩도가 감소할수록 입계전류밀도가 증가하였다. 중첩도(k)가 0.73, 0.62의 실험결과에 대하여 알아보면, 7.08×10^{-5} , 9.54×10^{-5} A/cm² 정도의 낮은 입계전류밀도 값을 가진다. 또한 합금에서 많이 관찰되는 2, 3차 최대전류밀도 현상이 나타나며, 3차 전류밀도 이상의 전위에서는 전위가 증가할수록 전류밀도가 계속해서 증가하는 결과를 보이고 있다. 이와 같이 중첩도가 높은 시편(k=0.73, 0.62)에서 부식 저항성이 좋지 않은 것으로 평가되었는데 이는 중첩도가 높을수록 입열량이 증가하여 레이저빔 조사 방향의 수직방향으로 형성된 조밀한 중첩영역의 잔류인장응력이 그 원인인 것으로 사료된다. 중첩도가 증가함에 따라 i) 입열량 증가에 따른 잔류인장응력 증가 ii) 미세조직변화(입계의 조대화, 미세편석) iii) 성분변화(회석율 감소)현상이 복합적으로 발생한다. 이상과 같은 세가지 현상을 자세히 설명하면 다음과 같다.

첫째, 중첩도가 증가할수록 입열량이 증가하여 내부 에너지가 증가하게 된다. 따라서 높은 중첩도(k>0.45)에서는 상대적으로 높은 잔류인장응력이 내재하게 되어 부식 저항성이 현저히 감소되는 것으로 사료된다⁵⁾⁶⁾.

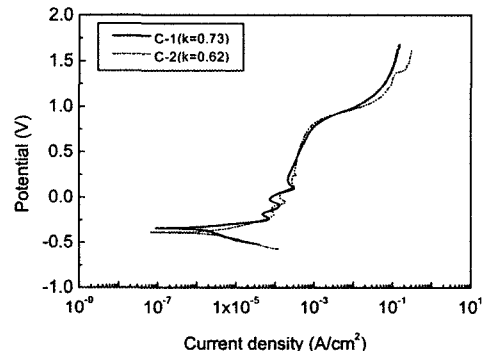


Fig. 4 Polarization curves for C-1, 2 in the solution of 0.11M H₂SO₄ at 25°C.

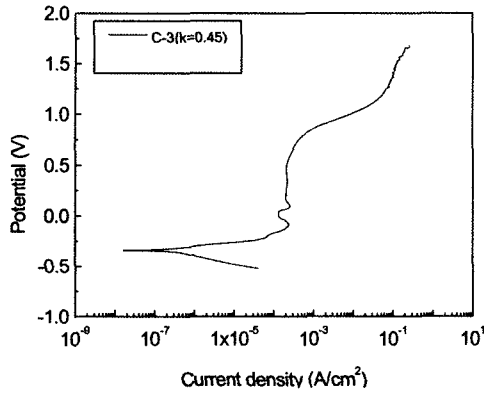


Fig. 5 Polarization curves for C-3 in the solution of 0.11M H_2SO_4 at 25°C.

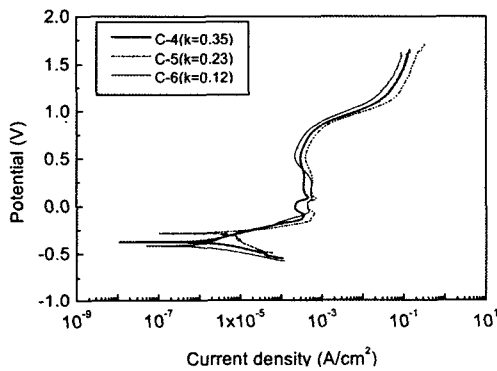


Fig. 6 Polarization curves for C-4, 5, 6 in the solution of 0.11M H_2SO_4 at 25°C.

이러한 현상은 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 3차 전류밀도 이상의 전위에서 전위가 증가할 때 전류밀도가 계속해서 증가하는 것으로 나타난다. Van Brussel과 De Hosson은 레이저 다중 열처리시 잔류응력은 인장응력을 나타내며, 기존에 열처리된 층의 잔류압축응력이 다음 열처리에 의해 잔류인장응력으로 변화된다고 보고하였다. 이렇게 증가된 잔류인장응력이 균열을 유도하며, 부식환경에 놓였을 때 응력 부식을 유발하여 부식을 가속화시키는 것으로 판단된다. Fig. 7과 8은 중첩도가 각각 0.73과 0.35에서 양극분극 실험 후의 조직사진으로 Fig. 7은 표면 전체적으로 균일한 부식 현상을

보이고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 높은 중첩도에서 형성된 인장응력이 표면 전체적으로 균일하게 분포한 결과로 판단된다.

둘째, 중첩도가 증가할수록 조직변화 즉, 입계의 균질화 및 미세편석 현상이 일어난다. 세립은 조립보다 입계의 면적이 넓고 따라서 입계 에너지의 총계가 크므로 불안정하다. 결정립이 작으면 입내의 면적에 비하여 입계의 면적 비율이 커진다. 또 특정 성분이 입계에 편석하는 경우에도 세립쪽이 입계의 면적이 크기 때문에 편석의 영향은 희박해진다. 이러한 이유에 의해서 세립은 조립보다 입계부식을 일으키기 어렵다. 그러나 레이저를 이용한 재료가공시 편석이 거의 없는 균질한 조직을 얻을 수 있다는 장점이 있어 조립쪽이 세립보다 부식 저항성이 우수하다고 할 수 있으나 그 영향은 크지 않은 것으로 사료된다.

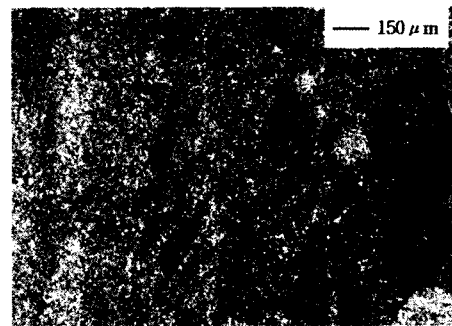


Fig. 7 Microstructure of C-1 after potentiodynamic test at 0.11M H_2SO_4



Fig. 8 Microstructure of C-4 after potentiodynamic test at 0.11M H_2SO_4

셋째, 중첩도가 증가할수록 희석율이 감소하여 클래딩 층에 Ni, Cr 농도가 증가하며, Fe 농도 증가가 억제된다. Fig. 9는 표면에서부터 200 μ m 떨어진 거리에서 레이저 클래딩 중첩방향으로 EPMA를 통하여 수평 농도를 측정하였다. 중첩도가 높은 (a)는 Fe 농도에 비하여 Cr 농도가 높으나 중첩도가 낮은 (b)는 희석율이 증가함에 따라 Fe 농도가 증가하고 상대적으로 Cr 농도는 감소한 것을 보여주고 있다. 따라서 상대적으로 부식 저항성이 약한 Fe 농도가 감소함에 따라 양극분극 곡선에서 임계전류밀도 값이 증가하는 방향(우측방향)으로 이동하는 결과를 나타내고 있는데 이는 Tong의 결과와 일치한다. 높은 중첩도에서 내식성에 강한 Ni 및 Cr의 농도가 낮은 중첩도에 비해서 상대적으로 높은데도 불구하고 부식 저항성이 약한 것으로 나타나는 결과는 중첩도의 증가에 따른 잔류인장응력의 증가의 영향이 성분에 대한 영향보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

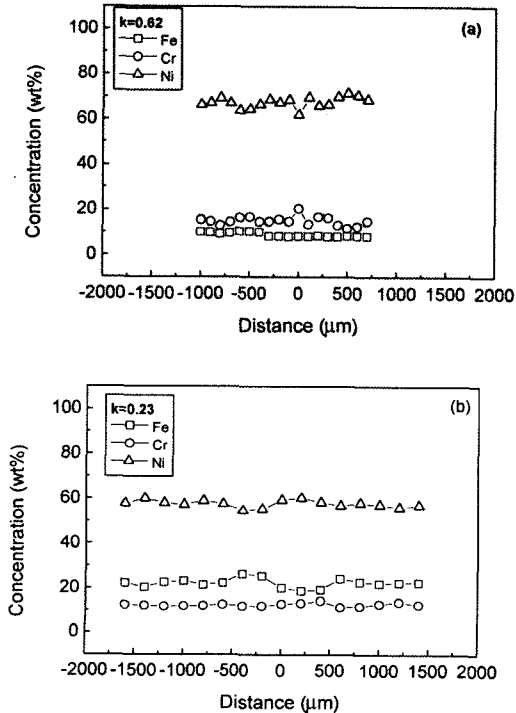


Fig. 9 Variation of element concentration of 200 μ m from the surface in laser clad layer: (a) $k=0.62$ (b) $k=0.23$

중첩도가 0.36이하에서는 중첩도가 감소할수록 부동태 현상이 뚜렷하게 나타나고 있다. 특히 중첩도가 가장 낮은 $k=0.12$ 의 분극곡선에서 그 현상을 쉽게 관찰할 수 있다. 이는 낮은 중첩도에서는 성분이 미치는 영향이 증가되어 나타나는 결과로 분석된다. 이상과 같이 중첩도에 따른 양극분극 실험결과에서 중첩도(k)가 0.45일 때 가장 안정한 양극분극곡선을 나타내고 있다(Fig. 5). 임계전류밀도 $2.42 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ 이상에서 2차 최대전류밀도가 나타나지만 그 이후에는 안정한 분극곡선을 그리고 있다.

Fig. 10은 중첩도 0.45에서 가장 우수한 내식성을 보이며, 중첩도 0.45를 기준으로 중첩도가 증가 또는 감소할수록 내식성 저하의 원인에 대하여 간략하게 나타내고 있다. 이외에도 중첩도에 따른 내식성에 미칠 수 있는 요인으로 결함 등이 있으나 이는 미약한 것으로 판단된다.

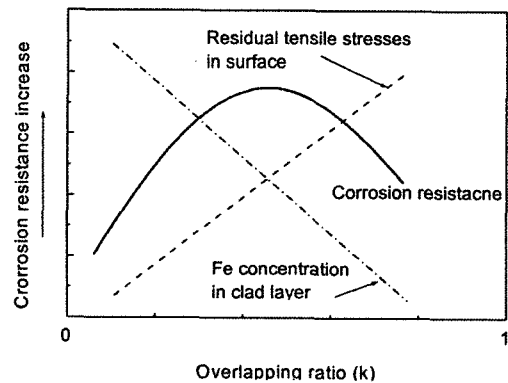


Fig. 10 Schematic diagram of corrosion resistance as a function of overlapping ratio (k).

Fig. 4와 Fig. 11을 비교하여 보면, 중첩도가

0.73인 시편에 대하여 용액 온도를 각각 25°C 그리고 40°C로 했을 경우의 양극분극 실험결과이다. 온도가 증가함에 따라 3차 최대전류밀도 현상은 사라지나 최대전류밀도값이 $7.08 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 에서 $2.09 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 으로 증가하며 전체적인 분극곡선이 우측방향으로 이동하여 부식 저항성이 감소하는 결과를 보이고 있다. 이러한 원인은 온도가 높아지면 부동태 형성이 방해되며, 부동태화 임계전류밀도가 온도와 함께 증가하기 때문이다. 또한 재부동태화 속도에서 입내보다 입계쪽이 느리기 때문에 일반부식과 함께 입계부식의 활성화에 기인한 것으로 사료된다. 이러한 현상은 낮은 중첩도에서도 나타나고 있으며 중첩도에 따른 부식 경향은 전체적으로 25°C 용액에서의 실험 결과와 유사하게 관찰되었다.

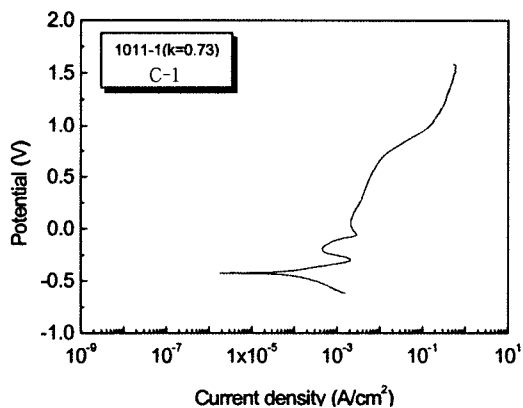


Fig. 11 Polarization curves for C-1 in the solution of 0.11M H_2SO_4 at 45 °C

4. 결론

일반구조용 탄소강 재료에 내식성을 향상시킬 목적으로 SS41을 모재로 하여 표면에 Ni기 초합금분말을 레이저 클래딩하였다. 클래딩 공정에서 필수적인 중첩도가 표면 특성에 미치는 영향을 분석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

1. 중첩도가 증가할수록 표면거칠기는 진동하는 방식으로 감소하였다.
2. 중첩도 증가에 따른 표면거칠기는 임계중첩도($k=0.62$)를 기점으로 감소하다가 증가하는 것으로 나타났다.
3. 중첩도가 0.45일 때 가장 좋은 우수한 부식 저항성을 보였다.
4. 높은 중첩도에서는 중첩부에 내재된 인장응력이 부식 저항성을 감소시키는 원인이 되었으며, 낮은 중첩도에서는 클래드층에 희석된 Fe 농도 증가에 의하여 부식 저항성이 감소한 것으로 사료된다.
5. 최적의 표면거칠기와 내식성을 나타내는 중첩도는 중첩도 0.62와 0.45사이에 존재하는 것으로 생각된다.

참고문헌

1. V. W. Weerasinghe, W. M. Sten, in Proc. 1st Int. Conf. on Laser manufacturing, 13 Nov. Brighton, U.K., p. 125-132, (1983)
2. J. M. Pelletier, M. C. Sahour, M. Pilloz, A. B. Vannes, J. Material Science, 28, p. 5184-5188, (1993)
3. Y. Li, J. Ma, Surface Coating Technology, 90, p.1-5, (1997)
4. W. M. Steen, V. W. Veerasinghe, P. Monson, in Proc. Int. Conf. on High Powder Laser and Their Industrial Appliation, SPIE, vol. 650, 15 · 18 April, Innsbruck, Austria, p.226-234, (1986)
5. C. Chabrol and A. B. Vannes, "Residual stresses induced by laser surface treatment", in Laser Surface Treatment of Metals, edited by C. D. Draper and P. Mazzoldi (Nijhoff, Dordrecht), Vol 115, p.435-450, (1986)
6. M. Pilloz, J. M. Pelletier, Journal of Materials Science, vol. 27, p.1240-1244,

- (1992)
7. E. Unsitalo, Current Corrosion Researchs in Scandinavia, p.239, Kemian Keskus Iiitto, r. y., H
 8. B. A. Van Vrusse, J. Th. M. De Hosson : Residual stresses in the surface layer of laser-treated steels, Materials Science and Engineering, A161, p.83-89, (1993)
 9. E. Ciompi, A. Lanciotti, Engineering Fracture Mechanics, 62, p.463-476, (1999)
 10. K. G. Watkins, Z. Liu, M. McMahon, R. Vila, M.G.S. Ferreira, Materials Science and Engineering, A252, p.292-300, (1998)
 11. 임우조외 3, 부식과 방식, 원창출판사, p.127-130.
 12. Tong., H. S., American Society for Testiong and Materials, p.96-109, (1981)
 13. Tong., H. S., unpublished results, (1978)