

AISI 1045 강의 인장 및 고주기 피로 특성에 미치는 Cr 도금층 두께의 영향

함기수¹ · 강연지¹ · 김형준² · 윤상훈² · 이기안^{1,*}

¹인하대학교 신소재공학과
²포항산업과학연구원

Effect of Cr Electroplating Layer Thickness on the Tensile and High Cycle Fatigue Properties of AISI 1045 Steel

Gi-Su Ham¹, Yeon-Ji Kang¹, Hyung-Jun Kim², Sang-Hoon Yoon², and Kee-Ahn Lee^{1,*}

¹Department of Materials Science and Engineering, Inha University, Incheon 22212, Republic of Korea
²Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang 37673, Republic of Korea

Abstract: This study investigated and compared the tensile and high-cycle fatigue properties of AISI 1045 steel and Cr electroplated AISI 1045 steel. First, tensile and fatigue specimens were machined from AISI 1045 steel (substrate), and two kinds of Cr electroplating layers with different layer thickness were applied. The substrate, AISI 1045 steel consisted of an a-Fe matrix and pearlite, and the two Cr electroplating layers were measured to have thicknesses of 13.1 μm and 53.9 μm , respectively. The Cr layer did not show signs of peeling from the substrate, but initial micro cracks were present within the Cr electroplating layer. Tensile test results confirmed that the Cr electroplated specimens had similar yield strengths and tensile strengths to those of the substrate AISI 1045 steel, but elongation decreased significantly. High cycle fatigue results confirmed that the fatigue limit ($\sim 10^7$ cycles to fatigue failure) of the substrate steel was 600 MPa, and the fatigue limit decreased significantly to 500 MPa (13.1 μm thickness) and 325 MPa (53.9 μm thickness) as the Cr electroplating layers were formed. This study also observed fracture surfaces of tensile and high cycle fatigue fractured specimens, and the deformation mechanisms of the Cr electroplated steel were suggested in connection with microstructures.

(Received January 4, 2019; Accepted January 28, 2019)

Keywords: Cr plating, AISI 1045 steel, indentation, microstructure, tensile, high cycle fatigue

1. 서 론

AISI 1045, S45C강은 탄소가 약 0.45%가 첨가된 아공석 강으로 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite)의 이상(two phases) 조직을 가지고 있으며 적절한 기계적 특성을 지니고 있다 [1]. 이러한 AISI 1045 강은 안전 케이지, 항공 및 선박의 바디, 축, 변속기 등 고응력, 고 내마모 환경에서 널리 사용되고 있다 [2]. 하지만 이 합금은 Cr과 Ni 등 첨가 원소의 함량이 1% 미만으로 낮아 부식에 매우 취약하며, 이에 사용 환경에 따라 표면처리 공정이 요

구되고 있다.

일반적으로 금속의 표면 처리 공정에는 1. 침탄, 질화과 같은 확산을 이용한 공정 2. plasma, HVOF, cold spray 등과 같은 분말 적층 공정 3. Cr과 Ni원소 등을 표면에 피복하는 전기 도금 공정 4. PVD, CVD와 같은 증기 증착 공정 등이 있다 [3-10]. 이 중 AISI 1045 강에 사용되는 대표적인 표면 처리 공정은 경질 Cr 도금 공정이다. 경질 Cr 도금 공정은 합금 표면에 경한 Cr 도금(700~800 Hv)을 적층하여 기존의 AISI 1045 합금의 단점인 내부식성과 더불어 내마모성도 동시에 향상시킬 수 있다 [11-14]. 이에 경질 Cr 도금을 강의 표면에 약 수~수십 μm 이상 다양한 두께로 도금하여 항공기의 랜딩기어, 액츄에이터, 금형 등 여러 부품으로 사용하고 있다. 현재까지 경질 Cr 도금 소재와 관련하여 많은 연구 결과가 제시된

- 함기수: 박사과정, 강연지: 석사과정, 김형준·윤상훈: 연구원, 이기안: 교수

*Corresponding Author: Kee-Ahn Lee

[Tel: +82-32-860-7532, E-mail: keeahn@inha.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

Table 1. Chemical compositions of AISI 1045 steel and Cr plating layer (wt%)

	Fe	Mn	Si	Cr	Cu	Ni	C	P	S
AISI 1045	Bal.	0.785	0.240	0.191	0.094	0.066	0.447	0.008	0.010
Cr plating	0.002			99.998					

바 있다. J. Pina 등은 [15] Cr 도금 소재의 미세조직과 도금층 직하 영역에서의 잔류 응력 측정 결과를 보고하였으며, M. P. Nascimento 등은 [16] 공정 조건(적층 속도 제어)에 따라 Cr 도금된 AISI 4340 소재의 기계적 특성에 대해 제시하였다. 그 외에도 다양한 연구를 통하여 Cr 도금된 AISI 4340 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 대한 결과가 보고되고 있으나[17-19], 현재까지 AISI 1045 강의 Cr 도금층 두께에 따른 미세조직 및 기계적 특성에 대한 연구는 전혀 보고된 바 없다.

본 연구에서는 AISI 1045 강의 표면에 동일 공정조건으로 적층 시간만 달리하여 두께가 다른 Cr 도금 소재를 제조하고, 제조된 두께가 다른 Cr 도금재의 인장 및 고주기 피로 시험을 수행하였다. 이를 바탕으로 AISI 1045강의 인장 및 고주기 피로 특성과 변형 기구에 미치는 Cr 도금층 두께의 영향에 대해 조사하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 모재는 열간 압연 공정으로 제조 후 어닐링 (annealing, 650 °C/2 hr) 열처리한 AISI 1045 합금 (500 mm × 200 × 20 mm)을 사용하였으며, 먼저 인장 및 고주기 피로 시험의 형상으로 가공을 한 후 표면에 경질 Cr 도금을 수행하였다. 경질 Cr 도금 공정은 H₂SO₄ bath에서 수행하였다. 이때 전류는 31 A, 증착 속도는 25 μm/h로 설정을 하였으며 시간은 각각 30 분과 120 분 도금을 수행하였다. 이제부터 30 분 도금재를 A 도금재, 120 분 도금재를 B 도금재로 표기하고자 한다. 소재의 성분 분석을 위해 ICP(inductively coupled plasma) 분석을 수행하였으며 그 결과를 표 1에 나타내었다. 그 결과, AISI 1045강은 Fe 기지 조직에 탄소가 0.447 wt% 첨가된 아공석 강인 것으로 나타났으며, Mn은 0.785 wt%, Si는 0.240 wt%, Cr은 0.171 wt% 첨가된 합금으로 확인되었다.

미세 조직을 관찰하기 위해 표면을 #2000번까지 SiC paper를 이용하여 연마하였으며 그 후 1 μm 수준으로 다시 미세 연마하였다. 이후 HNO₃ 3 ml + 증류수 97 ml 용액을 이용하여 수 초간 에칭하였다. 상 분석 및 미세조직 관찰을 위해 X-ray 회절 분석(XRD, Ultima IV, Cu Kα, scan step size : 0.05°, scan rate : 2°/min), FE-

SEM(field emission scanning electron microscope, Tescan, MIRA 3)분석을 수행하였다.

기계적 특성을 평가하기 위해 인덴테이션, 인장 및 고주기 피로 시험을 수행하였다. 인덴테이션 시험은 Helmut fisher Co.의 HM 500 장비를 사용하였다. 이때 하중은 30 mN, 가압(loading), 감압(unloading) 시간은 각각 15 sec, 유지 시간(creep time)은 0 sec 로 설정하였다. 인장 및 피로 실험의 경우 ASTM E8와 E466 규격을 따른 시험편을 가공하여 실험을 진행하였다. 상온 인장 실험 및 피로 실험을 위해 INSTRON 8501을 사용하였다. 인장 실험의 경우 상온에서 1 × 10⁻³/s의 초기 변형률 속도로 총 3 번 실시하였다. 고주기 피로 실험 조건은 상온에서 응력비 R = 0.1, 주파수 20 Hz로 수행하였다. 피로한(fatigue limit)은 10⁷cycle에서 파괴가 일어나지 않는 최대 응력 조건으로 설정하였다. 인장 및 고주기 피로 실험 후 미세 조직이 피로 변형 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 FE-SEM (field emission scanning electron microscopy) 을 이용한 파단면 관찰을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 AISI 1045 강과 Cr 도금 소재들의 미세조직

그림 1은 모재로 사용된 AISI 1045 소재의 XRD 분석 결과(a)와 단면 미세조직 관찰 결과(b)이다. XRD 상 분석 결과(그림 1 (a)), 모재인 AISI 1045 강은 주로 페라이트 (α-Fe) 상으로 구성되어 있었다. 본 연구에서 사용된 AISI 1045 강은 0.447 wt%의 탄소를 함유하고 있어 α-Fe이 위의 카바이드(carbide) 상이 존재할 수 있으나 X선 피크의 강도(intensity)는 낮게 얻어졌다. 모재의 단면 미세조직 관찰 결과, AISI1045 강은 앞선 XRD에서 관찰된 α-Fe 기지(어두운 영역)과 함께 펄라이트 조직(밝은 영역)으로 구성되어 있었다. 이미지 분석기(Image analyzer)를 이용하여 측정된 펄라이트 영역(ferrite + Fe₃C)의 분율은 약 39.8%로 확인되었으며, Fe₃C는 약 18.5%로 측정되었다.

그림 2는 Cr 도금 소재들의 단면 미세조직 관찰 결과이다. 먼저 도금재 A의 도금층 두께는 약 13.1 μm로 측정되었으며, B 도금재의 두께는 약 53.9 μm로 측정되었다. 두 소재 모두 공통적으로 Cr 도금층과 모재의 경계영역에서

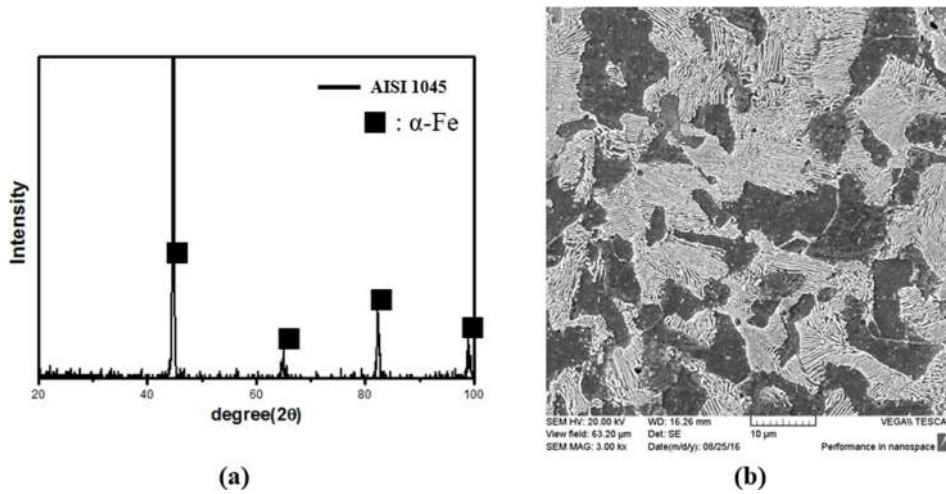


Fig. 1. (a) XRD analysis results and (b) microstructure of substrate AISI 1045 steel

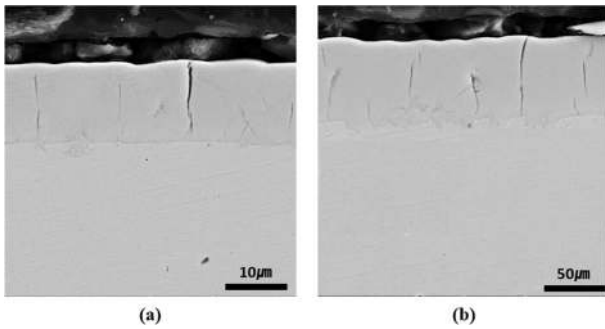


Fig. 2. Cross sectional microstructures of Cr plated AISI 1045 steels; (a) Cr plating - A (13.1 mm) and (b) Cr plating - B (53.9 mm)

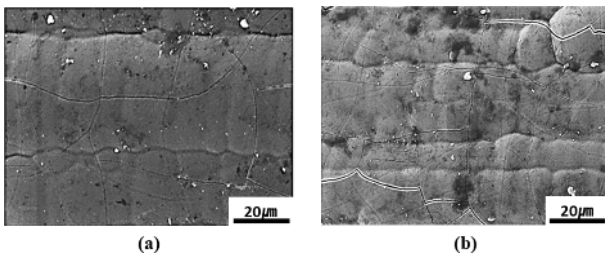


Fig. 3. Surface observation results of Cr plated AISI 1045 steels; (a) Cr plating - A, (b) Cr plating - B

의 균열 및 박리는 관찰되지 않았으며 이에 높은 결합력을 가지고 있음을 추측할 수 있었다. 두 소재 모두 도금층에서 관통형 균열(도금층 표면부터 모재 경계 영역까지 연결된)의 존재를 확인할 수 있었으며, 도금층 내부의 미세 균열 역시 추가로 관찰할 수 있었다. 또한 도금층의 두께가 더 두꺼운 B 도금재의 도금층에서 더 많은 미세 균열이 존재하고 있는 것으로 나타났다. 두 도금재의 균열 밀도

(crack density)를 측정하였을 때, A 도금재의 경우 미세 균열 밀도 : 1240 cracks/cm, 관통형 균열 밀도: 310 cracks/cm로 측정되었으며, B 도금재는 미세 균열 밀도 : 2170 cracks/cm, 관통형 균열 밀도 : 930 cracks/cm로 확인되었다. 즉 미세 균열과 관통형 균열은 Cr 도금층 두께가 13 μm에서 53 μm로 증가함에 따라 미세 균열의 경우 약 1.75배, 관통형 균열의 경우 약 3배 정도 균열의 밀도가 더 높아지는 것으로 얻어졌다.

그림 3은 A, B 두 도금재들의 표면을 관찰한 결과이다. 두 소재 모두 표면에서도 미세한 균열과 더불어 조대한 균열의 존재가 확인되었다. J. Pina 등은 [15] Cr 도금재에서 도금층의 두께가 10 μm에서 100 μm로 두꺼워짐에 따라 균열 밀도가 증가한다고 보고한 바 있으며 이는 본 연구 그림 2와 그림 3의 결과와 동일한 경향성을 나타내는 것이다.

3.2 AISI 1045 강과 Cr 도금 소재들의 인덴테이션 시험 결과

Cr 도금 공정을 수행할 경우 일반적으로 도금층 직하영역에서 잔류 응력이 존재한다고 알려져 있다 [20]. 잔류 응력은 인장 잔류 응력과 압축 잔류응력으로 구분되며, 각각의 잔류 응력은 기계적 특성(인장 및 피로)에 서로 다른 영향을 준다. 따라서 Cr 도금재에서의 잔류 응력의 존재에 대한 확인과 더불어 잔류 응력의 구분이 필요하다. 인장 시험 전 소재의 잔류 응력을 확인하기 위해 인덴테이션 시험을 수행하였으며, 그 결과를 그림 4와 표 2에 도시하였다. 인덴테이션은 각 소재의 중심 영역(잔류 응력이 존재하지 않을 것으로 생각되는 모재 영역)와 표면 영역(잔류

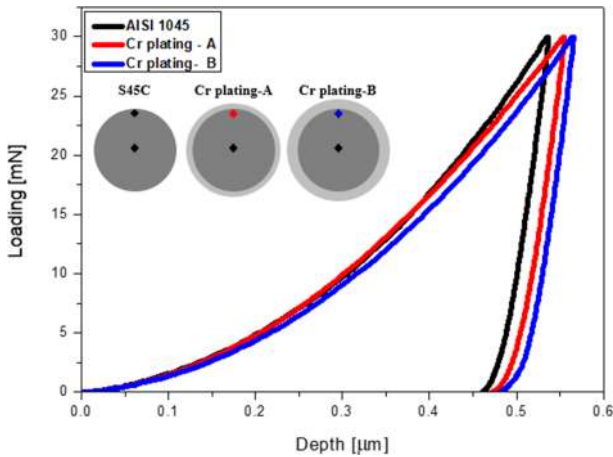


Fig. 4. Load-depth curves of indentation tests of AISI 1045 steel and Cr plated AISI 1045 steels

Table 2. Indentation results of AISI 1045 steel and Cr plated AISI 1045 steels

	AISI 1045	Cr plating - A	Cr plating - B
EIT [GPa]	223.3	228.2	207.4
Hv	397.3	368.5	357.3
Residual stress [MPa]	-	210.3	376.0

응력이 존재할 것으로 생각되는)에서 시험을 수행하였다. 검은 선은 모재인 AISI 1045강의 중심 및 표면 영역과, Cr 도금층의 모재 중심 영역에서의 얻은 하중-변위 (load-depth) 곡선 결과이며, 붉은 선과 푸른 선은 각각 13 μm 도금층과 53 μm 도금층의 모재 표면 영역에서 얻은 하중-변위 곡선들이다. 잔류 응력이 존재하지 않는 AISI1045 강과 Cr 도금층들의 모재 중심부 영역에서는 유사한 하중-변위 곡선들을 얻을 수 있었다. Cr 도금이 수행되고, 도금층의 두께가 두꺼워짐에 따라 하중-변위 곡선이 검은 선을 기준으로 오른쪽으로 점차 이동하는 것으로 나타났다. 인덴테이션 결과를 통해서 잔류 응력의 존재를 확인할 때 기준 선을 기준으로 하중-변위 곡선이 왼쪽에 위치 할 경우 압축 잔류 응력이, 오른쪽에 위치 할 경우 인장 잔류응력이 존재한다고 보고되고 있다 [20]. 상기 하중-변위 곡선 결과를 바탕으로 도출한 EIT(indentation modulus)와 Hv 값 또한 Cr 도금이 수행되고, 도금층의 두께가 두꺼워짐에 따라 점차 감소하는 것으로 확인되었다. S. Suresh 등은 [20] indentation을 이용하여 잔류 응력을 조사하였으며, 아래 식 1을 이용하여 정량화 한 바 있다.

$$\frac{A_{app,Free}}{A_{0,apparent}} = \left(1 - \frac{\sigma_R}{H}\right) \quad (1)$$

여기서 $A_{app,Free}$ 는 apparent contact area of stress-free sample, $A_{app,R}$ 는 apparent contact area of the sample under a residual stress, H 는 Hardness, σ_R 는 잔류 응력이다. Suresh 모델과 indentation 측정 결과를 이용하여 Cr 도금층 직하 영역의 잔류 응력을 계산하였을 때, A 도금층은 210.3 MPa, B 도금층은 376.0 MPa의 인장 잔류 응력이 존재하고 있는 것으로 확인되었다. 이상의 결과에서 Cr 도금 공정이 수행됨에 따라 도금층 직하의 모재 영역에서는 인장 잔류 응력이 존재함을 확인하였고, 도금층의 두께가 두꺼워짐에 따라 잔류 응력이 더 커지는 결과를 얻을 수 있었다.

일반적으로 Cr 도금층의 균열은 Cr 도금 공정 조건 (current, bath temperature 등)과 모재의 잔류 응력에 의해 생성된다고 알려져 있다. 본 연구에서는 두 소재 모두 동일 공정(도금 시간 제어)으로 제조되었다. 따라서 도금층의 두께가 증가함에 따라 증가하는 Cr 도금층의 균열은 B 도금층에서의 인장 잔류 응력이 더 크기 때문으로 생각할 수 있다.

3.3 AISI 1045 강과 Cr 도금 소재의 인장 특성

그림 5는 AISI 1045강과 두 도금층의 인장 응력 변형률(stress-strain) 곡선들이다. 인장 시험 결과, AISI 1045 강은 항복 강도 : 794.3 MPa, 인장 강도 : 923.9 MPa, 연신율 : 7.5%로 측정되었으며, A 도금층은 항복강도 : 794.1 MPa, 인장강도 : 921.8 MPa, 연신율 : 2.0%, B 도금층은 항복강도 : 789.9 MPa, 인장강도 : 926.6 MPa, 연신율 : 1.0%로 확인되었다. 응력-변형률 곡선들을 보다 면밀히 살펴보면 Cr 도금 소재들은 인장강도

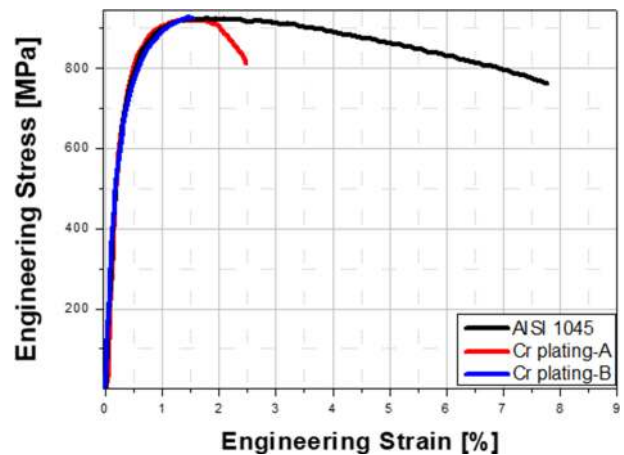


Fig. 5. Tensile curves of AISI 1045 steel and Cr plated AISI 1045 steels

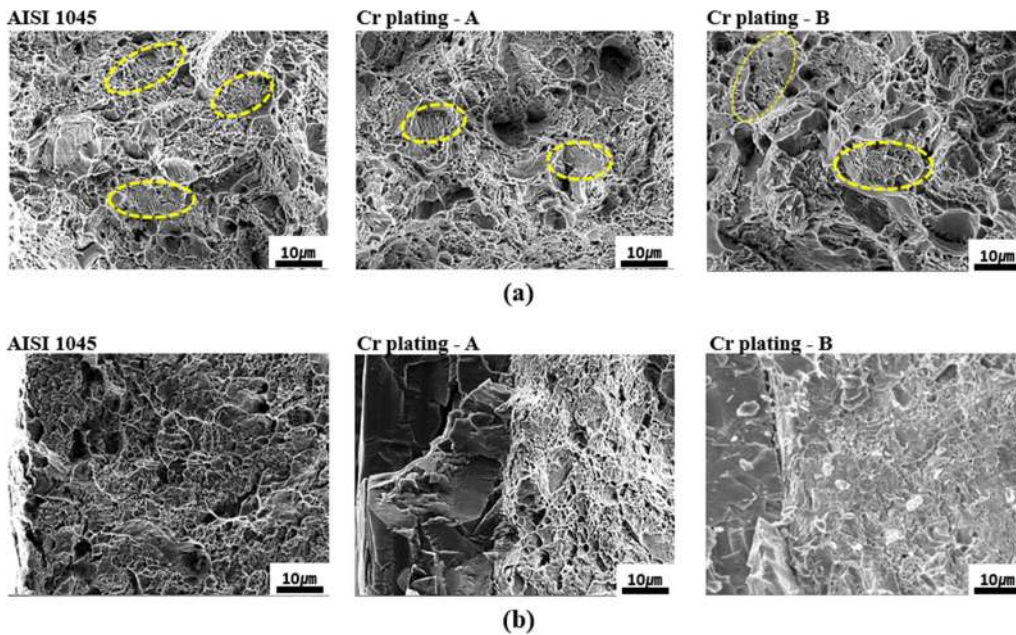


Fig. 6. Tensile fracture surfaces of AISI 1045 steel and Cr plated AISI 1045 steels; (a) Inside area, (b) surface area

까지 모재와 거의 유사한 곡률(curvature)을 보였다. 모재인 AISI 1045강의 경우 인장강도 이후 유동 응력이 서서히 감소하였다. 반면, A 도금재는 인장강도 이후 급격한 응력 감소를 보였으며, B 도금재는 인장강도에서 파괴가 일어난 것으로 확인되었다. 일반적으로 표면에 경한 표면 처리를 수행할 경우 소재의 기계적 강도가 올라갈 것으로 쉽게 생각할 수 있으나, 본 연구의 결과에서는 Cr 도금층은 소재의 강도에는 큰 영향을 주지 않았으며 연신율의 감소를 야기하는 것으로 확인되었다.

상기 세 소재의 독특한 인장 변형 거동을 확인하기 위해 인장 파단면을 관찰하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. AISI 1045강과 두 Cr도금재 모두 인장 파단면의 중심부 영역에서는 딴플(dimple)로 대표되는 연성 파괴 모드를 보였다. 딴플 내부에는 펄라이트가 존재하고 있는 것으로 관찰(yellow circles)되어 펄라이트가 인장 변형 시 강화상으로 작용한 것을 알 수 있었다. 인장 파단면의 내부 영역에서는 AISI 1045강과 두 Cr 도금층들의 변형 거동의 뚜렷한 차이는 관찰되지 않았다. 이와 관련하여 코팅층 표면 영역의 파단면을 함께 조사하였다. AISI 1045강은 내부뿐만 아니라 표면에서도 딴플의 존재를 쉽게 관찰할 수 있었다. 그러나 Cr 도금 소재들의 경우, 두 소재 모두 공통적으로 Cr 도금층은 인장 변형 후에도 모재와 조대한 박리는 관찰되지 않아 도금층과 AISI 1045강의 결합력이 높다는 것을 유추할 수 있었다. Cr 도금재들의 도금층 직하 영역을 살펴보면 A 도금재(13µm)의 경우, 일부 딴플들

이 관찰되었으나 AISI 1045강과 비교해보았을 때 딴플이 덜 발달된 것으로 확인되었다. B 도금재(53µm)의 경우 도금층 직하의 모재영역에서는 딴플이 전혀 발달하지 않은 것으로 나타났다.

즉, Cr 도금을 수행하고 도금층 두께가 두꺼워짐에 따라 감소하는 연신율은 초기 Cr 도금층 내의 균열(관통형 crack)의 응력 집중 효과와 더불어 도금층 직하 영역에서의 인장 잔류 응력 효과에 기인하는 것으로 판단된다.

3.4 AISI1045 강과 Cr 도금 소재의 고주기 피로 특성

AISI 1045강과 두께가 다른 Cr 도금재들의 피로 시험 결과인 S-N 곡선들을 그림 7에 나타내었다. 모든 응력 조건에서 모재인 AISI 1045강의 피로 수명이 Cr 도금재보다 높은 것으로 확인되었으며, Cr 도금을 수행하고, 도금층의 두께가 두꺼워짐에 따라 피로 수명이 현저히 감소되는 것으로 얻어졌다. S-N 곡선에서 피로한(fatigue limit) 보다 조금 높은 피로 응력 범위 영역을 살펴보면, AISI 1045강과 A도금재(13 µm)는 특정 임계 응력에서 피로 파괴가 일어나지 않았으나 (응력 감소에 따른 갑작스러운 피로한의 출현), B 도금재(53 µm)의 경우 비철 금속과 같이 다소 완만한 곡률(curvature)를 보이는 것으로 나타났다. 일반적인 강(steel)의 고주기 피로 특성은 항복 강도의 약 65~80%의 응력에서 피로한이 나타난다고 알려져 있다. 본 연구에서 얻어진 피로한(fatigue limit)은, AISI1045 강에서

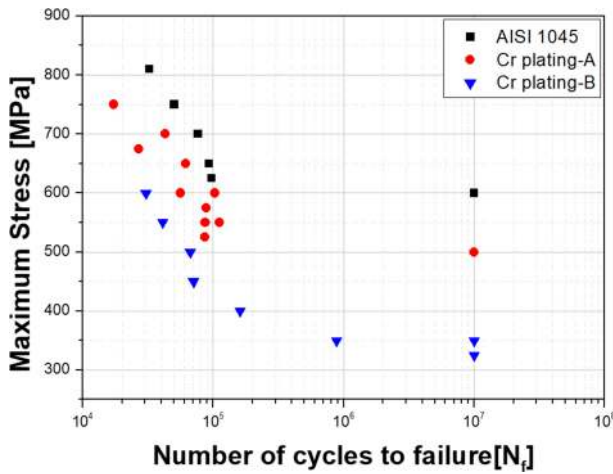


Fig. 7. High cycle fatigue properties of AISI 1045 steel and Cr plated AISI 1045 steels

600 MPa, A 도금재(13 μm)는 500 MPa, B 도금재(53 μm) 325 MPa로 확인되었다. AISI1045 강 의 $\sigma_{\text{피로한}}/\sigma_{\text{항복강도}}$: 0.75로 나타나 일반적인 $\sigma_{\text{피로한}}/\sigma_{\text{항복강도}}$ 범주에 들어가는 수준이다. 반면, A 도금재의(13 μm) 경우 $\sigma_{\text{피로한}}/\sigma_{\text{항복강도}}$ 는 0.62, B 도금재의(53 μm) $\sigma_{\text{피로한}}/\sigma_{\text{항복강도}}$ 는 0.41로 확인되어 Cr 도금 공정이 수행되고, 도금층의 두께가 증가함에 따라 고주기 피로 특성이(N_f 와 피로한) 매우 큰 폭으로 감소하는 것으로 확인되었다.

그림 8 (a)는 AISI 1045 강과 두께가 다른 Cr 도금재의 고주기 피로 파단면의 균열 진전(propagation)영역을 관

찰한 결과이다. 균열 진전 영역의 경우 AISI 1045강과 두 Cr도금재 모두 pearlite근처에서 이차 균열(secondary crack)이 형성되어 펄라이트가 균열 진전 영역에서 효과적인 강화상 역할을 수행한 것으로 확인되었다. 도금 소재들 내부의 모재 영역(전파 영역에 해당되는)에서의 고주기 피로 변형 특징은 AISI 1045 강과 유사한 것으로 생각된다. 고주기 피로 시험의 경우 균열 진전(crack propagation) 수명보다 생성(initiation) 수명이 파단 사이클의 대부분을 차지하여 피로 균열 생성에 대한 중요성이 더 크다. 일반적으로 금속에서 피로 균열 생성의 생성 원인으로는 고집성 슬립밴드(persistent slip band), 주조 결함(gas pore), 개재물(inclusion), 상의 파괴 및 탈락 등 다양한 미세조직학적 요인들이 있다 [21-25]. AISI 1045강과 Cr 도금재들의 고주기 피로 변형 거동을 확인하기 위해 균열 생성 영역(crack initiation area)을 관찰하였으며, 그 결과를 그림 8 (b)에 도시하였다. AISI 1045강은 생성 지점에서 앞서 언급한 주조 결함, 개재물, 상의 파단 등이 관찰되지 않았으며, 시편 표면의 한 영역에서 균열이 시작되어 전파, 파단되는 가장 일반적인 고주기 피로 파면을 보였다. Cr 도금재들은 Cr 도금층의 표면이 아닌 모재의 영역부터 균열이 시작되어 전파, 파단 되었으며, AISI 1045강과는 다르게 균열의 시작이 한 영역에서 시작되지 않았다. 즉 초기 Cr 도금층에 존재하는 관통형 균열의 선단에 응력이 집중되고 피로 균열이 시작되었음을 예상할 수 있었다. 이를 보다 명확히 확인하기 위해 Cr 도금재들의 피로 파단 시

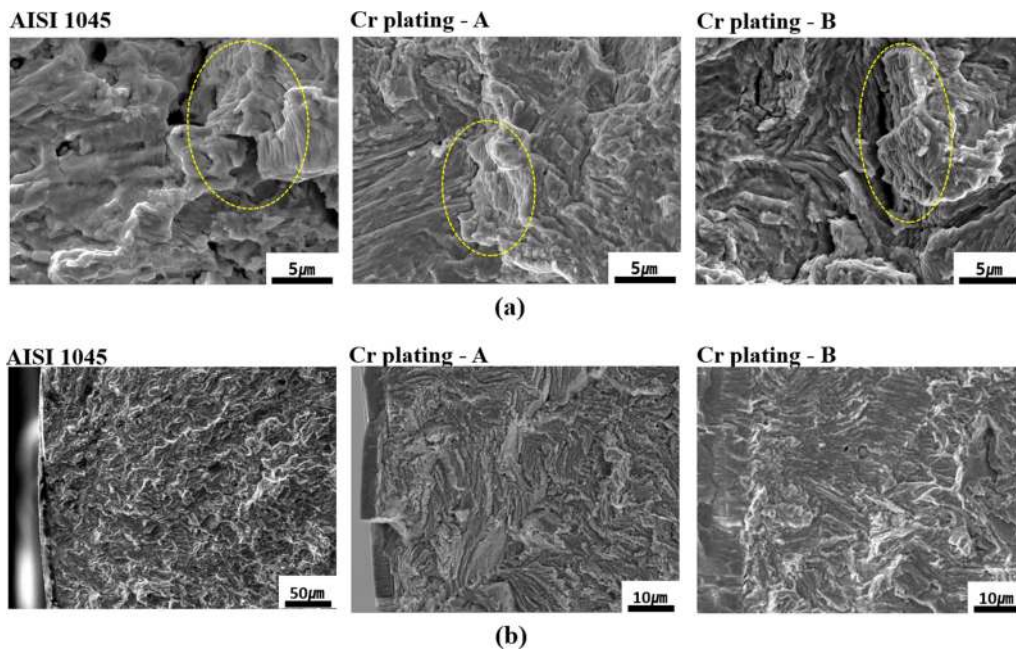


Fig. 8. High cycle fatigue fracture surfaces of AISI 1045 steel and Cr plated AISI 1045 steels; (a) propagation area, (b) initiation area

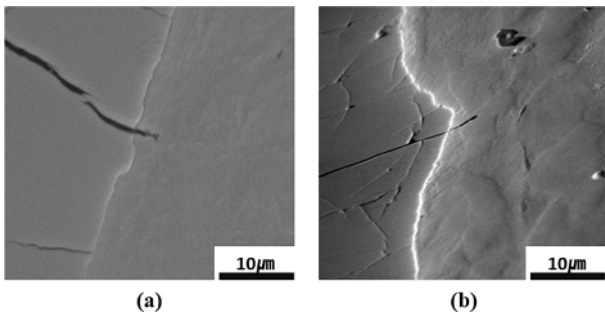


Fig. 9. Cross-sectional observation microstructures for the high cycle fatigue fractured specimens of Cr plated AISI 1045 steels; (a) Cr plating - A, (b) Cr plating - B

편의 단면(cross sectional) 미세조직을 관찰하였으며, 이를 그림 9에 나타내었다. 그 결과 Cr 도금재들에서 공통적으로 Cr도금층의 관통형 균열에서 균열이 시작되어 모재로 균열이 전파되는 것을 확인할 수 있었다.

Cr 도금재의 낮은 고주기 피로 특성은 먼저 초기 Cr 도금층 내에 존재하는 관통형 균열의 선단에 응력이 집중되어 쉽게 모재의 피로 균열 생성으로 발달하는데 기인한다. 또한 도금층 두께가 두꺼워짐에 따라 균열의 밀도가 높아져 피로 균열이 시작될 수 있는 장소(site)가 증가하고, 추가로 도금층 직하 모재에 생성되는 인장 잔류 응력으로 인해 더 큰 폭으로 피로 특성이 감소하는 것으로 이해될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 AISI 1045강의 인장 및 고주기 피로 특성에 미치는 Cr 도금층 두께의 영향에 대해 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

모재인 AISI 1045강은 페라이트(α -Fe) 상과 펄라이트 상으로 구성되어 있으며, 제조된 Cr 도금층의 두께는 각각 A도금재 : 13.1 μm , B 도금재의 두께는 약 53.9 μm 로 측정되었다. Cr 도금층과 모재의 경계 영역에서는 균열과 박리가 관찰되지 않았다. 두 도금 소재 모두 도금층 내에 도금층 표면부터 모재 경계 영역까지 연결되는 관통형 균열과 함께 도금층 내에 미세 균열도 존재하고 있었다. 도금층의 두께가 더 두꺼운 소재에서 더 많은 미세 균열과 관통형 균열이 관찰되었다.

인텐테이션 시험 결과, AISI 1045강의 내부 영역과 표면 영역, Cr 도금재들의 내부 영역은 유사한 하중-변위 곡선들을 보였다. 하지만 Cr 도금을 수행하고, 도금층의 두께가 더 두꺼워짐에 따라 모재 표면 영역에서 하중-변위

곡선이 기준 곡선(AISI1045 강의 곡선)보다 오른쪽으로 이동하여 더 큰 인장 잔류 응력이 존재하는 것으로 확인되었다. 얻어진 하중 변위 곡선을 바탕으로 얻어진 EIT와 Hv 값들 역시 Cr 도금이 수행되고 도금층 두께가 두꺼워짐에 따라 감소하였다.

인장 시험 결과 AISI 1045강의 인장 특성은 항복강도 : 794.3 MPa, 인장강도 : 923.9 MPa, 연신율 : 7.5%로 측정되었으며, A 도금재는 항복강도 : 794.1 MPa, 인장강도 : 921.8 MPa, 연신율 : 2.0%, B 도금재는 항복강도 : 789.9 MPa, 인장강도 : 926.6 MPa, 연신율 : 1.0%로 얻어졌다. 인장 파단면 관찰 결과, 표면 영역에서 AISI 1045강은 내부와 동일한 연성 파괴 모드를 보였다. A 도금재(13 μm)의 경우 일부 딥플은 관찰되었으나 AISI1045 강과 비교해 보았을 때 딥플이 덜 발달된 것으로 나타났다. 도금층의 두께가 두꺼운 B 도금재(53 μm)는 도금층 직하 영역에서 딥플이 전혀 발달되지 않고 찢겨진 파단면을 보였다. Cr 도금재들의 낮은 연신율은 관통형 균열과 도금층 직하 영역에서 존재하는 인장 잔류 응력에 의한 것임을 알 수 있었다.

고주기 피로 시험 결과, 피로한은 각각 AISI 1045 : 600 MPa, A 도금재(13 μm) : 500 MPa, B 도금재(53 μm) : 325 MPa로 나타났다. Cr 도금을 수행하고, 도금층의 두께가 두꺼워짐에 따라 고주기 피로 수명 및 피로한이 모든 응력조건에서 AISI 1045강에 비해 큰 폭으로 감소하였다. 피로 파단면 관찰 결과, AISI 1045강은 균열이 시편 표면의 한 영역에서 시작되어 전파, 파단이 되는 일반적인 피로 파면을 보였으나, Cr 도금재들은 공통적으로 Cr도금층의 관통형 균열에서 균열이 시작되어 모재로 균열이 전파되는 것으로 나타났다. Cr 도금층의 관통형 균열에 응력 집중과 더불어 도금층 직하에 존재하는 인장 잔류 응력이 Cr 도금재들이 AISI1045 강보다 낮은 고주기 피로 특성을 보이는 원인으로 제시되었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 “경질Cr 습식 도금 대체 용사 코팅 기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. M. Weisse, C. K. Wamukwamba, H. J. Christ, and H. Mughrabi, *Acta Metall.* **41**, 2227 (1993).

2. W. Mocko, *Mater. Des.* **58**, 145 (2014).
3. M. Tsujikawa, D. Yoshida, N. Yamauchi, N. Ueda, T. Sone, and S. Tanaka, *Surf. Coat. Technol.* **200**, 507 (2005).
4. B. Larisch, U. Brusky, and H. J. Spies, *Surf. Coat. Technol.* **116**, 205 (1999).
5. M. Watanabe, S. Kuroda, K. Yokoyama, T. Inoue, and Y. Gotoh, *Surf. Coat. Technol.* **202**, 1746 (2008).
6. T. Laha, Y. Chen, D. Lahiri, and A. Agarwal, *Compos. Part A* **40**, 589 (2009).
7. Y. M. Wang, S. Cheng, Q. M. Wei, E. Ma, T. G. Nieh, and A. Hamza, *Scripta Mater.* **51**, 1023 (2004).
8. H. J. C. Voorwald, M. P. Silva, M. Y. P. Costa, and M. O. H. Cioffi, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **32**, 97 (2008).
9. R. H. Oskouei and R. N. Ibrahim, *Surf. Coat. Technol.* **205**, 3967 (2011).
10. A. R. Davies, J. E. Field, K. Takahashi, and K. Hada, *Diamond Relat. Mater.* **14**, 6 (2005).
11. K. S. Nam, K. H. Lee, S. C. Kwon, D. Y. Lee, and Y. S. Song, *Mater. Lett.* **58**, 3540 (2004).
12. L. Wang, Y. Gao, T. Xu, and Q. Xue, *Appl. Surf. Sci.* **252**, 7361 (2006).
13. S. K. Ibrahim, D. T. Gawne, and A. Watson, *Trans. IMF* **76**, 156 (1998).
14. G. Saravanan and S. Mohan, *Corros. Sci.* **51**, 197 (2009).
15. J. Pina, A. Dias, M. Francois, and J. L. Lebrun, *Surf. Coat. Technol.* **96**, 148 (1997).
16. M. P. Nascimento, R. C. Souza, W. L. Pigatin, and H. J. C. Voorwald, *Int. J. Fatigue* **23**, 607 (2001).
17. M. J. Ortiz-Mancilla, C. Marino-Berroteran, J. A. Berrios-Ortiz, G. Mesmacque, and E. S. Puchi-Cabrera, *Surf. Eng* **20**, 345 (2004).
18. M. P. Nascimento, R. C. Souza, I. M. Miguel, W. L. Pigatin, and H. J. C. Voorwald, *Surf. Coat. Technol.* **138**, 113 (2001).
19. H. J. C. Voorwald, R. Padilha, M. Y. P. Costa, W. L. Pigatin, and M. O. H. Cioffi, *Int. J. Fatigue* **29**, 695 (2007).
20. S. Suresh and A. E. Giannakopoulos, *Acta Mater.* **46**, 5755 (1998).
21. Q. G. Wang, P. N. Crepeau, C. J. Davidson, and J. R. Griffiths, *Met. Trans. B* **37**, 887 (2006).
22. J. Z. Yi, P. D. Lee, T. C. Lindley, and T. Fukui, *Mater. Sci. Eng. A* **432**, 59 (2006).
23. B. Zhang, D. R. Poirier, and W. Chen, *Met. Mater. Trans. A* **30**, 2659 (1999).
24. G.-S. Ham, M.-S. Baek, J.-H. Kim, S.-W. Lee, and K.-A. Lee, *Met. Mater. Int.* **23**, 26 (2017).
25. D.-W. Ha and C.-Y. Jeong, *Korean J. Met. Mater.* **56**, 177 (2018).