

스텔라이트 합금 용사 코팅의 피로 강도에 미치는 후열처리의 영향

오정석 · Jun Komotori^a · 이창규*

한국원자력연구소, 원자력재료기술개발부, 대전광역시 유성구 덕진동 150, 305-353

^a일본 게이오대학교 기계공학과

Effect of Post-heat Treatment on Fatigue Strength of Thermally-Sprayed Stellite Alloy on Steel

Jeong Seong Oh, Jun Komotori^a and Chang Kyu Rhee*

Dept. of Nuclear Materials Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute,
150 Dukjindong Yuseonggu Daejeon, 305-353, Korea

^aDept. of Mechanical Engineering, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku,
Yokohama-shi. Kanagawa, 223-8522, Japan

(Received January 20, 2005; Accepted March 25, 2005)

Abstract The effect of post-heat treatment on the coating characteristics and the fatigue strength of the gas flame thermally sprayed Stellite alloy coatings on 0.35% carbon steel were investigated. The fatigue fracture surfaces of the heat treated samples were observed using SEM (Scanning Electron Microscopy). For as-sprayed samples, there was considerable scattering in the fatigue life due to the presence of the pores in the coating. After the post-heat treatment to improve the microstructural characteristics of the coating layer, the fatigue strength of the specimens was greatly improved, increasing with increasing the coating thickness. For the specimens with the 0.3mm and 0.5mm thick coating, the fatigue cracks originated in the substrate region just below the interface. On the contrary, for the specimens with the 1.0mm thick coating, they nucleated at the pore within the coating, and the fatigue strength was 2.6 times higher than that of the substrate due to the high fatigue resistance of the coating.

Keywords : Thermal spray, Post-heat treatment, Fatigue strength, Coating thickness

1. 서 론

용사는 표면처리기술의 하나로 단시간에 두꺼운 코팅이 가능한 특징이 있으며 내마모성, 내열성, 내부식성을 개선하기 위한 목적으로 산업 분야에 널리 사용되고 있다. 용사의 코팅층과 모재 사이의 경계면의 밀착성에 관한 연구¹⁻²⁾, 용사의 내부식성³⁻⁵⁾ 및 내마모성⁶⁻⁸⁾에 관한 연구는 많이 진행되고 있으며 용사 처리를 함으로서 재료의 내마모성 및 내부식성이 비약적으로 향상된다는 것이 보고되고 있다. 반면, 기계구조물의 안전성 측면에서 중요한 피로 특성⁹⁻¹⁰⁾에 관한 연구는 매우 부족한 상태이며 해결해야 할 점들

이 많이 남아있다.

용사 후의 코팅층에는 분말 입자와 입자 사이의 기공, 산화물 및 미용융 분말 입자(unmelted particles) 등이 다수 존재하여 후처리에 의해 코팅층을 개선할 필요가 있다. 용사 후의 피로특성을 향상시키는 후처리로서 피막에 도료를 도포하는 방법, 그리고 코팅층의 미세한 기공을 봉하기 위해 페놀수지, 실리콘 수지, 에폭시 수지 등의 유기재료 및 액상 유리(liquid glass), 에틸 규산염(ethyl silicate) 등의 무기재료를 봉인제(sealer)로 사용하여 코팅층에 침투시켜 경화시키는 방법이 있다. 특히 자용 합금(self-fluxing alloy) 용사의 경우, 코팅층의 분말 입자

*Corresponding Author : [Tel : +82-42-868-8551; E-mail : ckrhee@kaeri.re.kr]

사이의 결합력이 약하고 기공 및 산화물 등의 결함이 다량 존재하기 때문에 후처리로서 코팅층의 열처리를 하게 된다. 열처리는 일반적으로 숙련자가 가스 화염을 사용하여 숙련자의 감각으로 제어하고 있어 자용 합금 용사 재료의 열처리의 온도 및 시간을 정량적으로 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 자용 합금의 스텔라이트 용사 코팅층의 특성을 개선하기 위해, 용사 후 적절한 조건에서 열처리¹¹⁾를 실시하였으며 코팅층의 미세조직변화, 결합량 등의 특성을 조사하여 최적 열처리 조건을 결정하였다. 또한, 최적 조건에서 열처리를 한 용사재에 대해 피로 시험을 하여 용사재의 피로 강도에 미치는 열처리영향을 조사하였다. 특히 코팅층의 두께를 변화시켜 피로 강도 및 피로 파괴 기구를 검토, 고찰하였다.

2. 실험 방법

피로 시험편의 모재는 기계 구조용 탄소강 SM35C를 사용하였다. 1100°C에서 3시간 소둔 처리 후 그림 1과 같은 형상, 치수로 기계 가공하였다. 용사를 하기 전에 코팅층과 모재와의 밀착성을 올리기 위해 시험편의 R부를 블라스터(blasted)처리한 후 내식성·내마모성을 가지고 있는 Stellite No.6 합금 분말을 가스 화염 용사법(gas flame spraying)으로 용사하였다. 용사 후 열처리는 진공로에서 행하였다. Stellite No.6 합금 분말의 화학 성분 및 용사 조건은 표 1 및 표 2와 같았으며, 코팅층의 두께는 1.0 mm로 하였다.

이상과 같이 준비한 시험편의 R부를 사포(sand paper) 및 알루미나를 사용하여 경면으로 연마하였다. 피로 시험은 실은 대기 중에서 회전 굽힘 피로 시험기(3000 rpm)를 사용하여 행하였다. 이때 107사이클 까지 반복하여 파단이 생기지 않았을 때 피로시험을

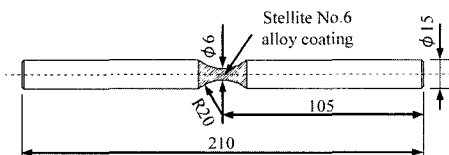


Fig. 1. Typical geometry and dimension of fatigue specimen.

Table 1. Chemical composition of Stellite No.6 (wt%)

Cr	Ni	W	Fe	Si	B	C	Mn	Co
18.80	13.10	7.68	2.25	2.28	1.78	0.74	0.39	Bal.

Table 2. Gas flame spraying parameters

Primary Gas	Oxygen (0.5 MPa)
Secondary gas	Acetylene (0.1 MPa)
Powder carrier gas	Air
Spraying distance	150~200 mm
Rotational speed of specimen	300 rpm

중지하고 그 때의 응력 진폭의 최대값을 피로강도로 정의하였다.

파단 후의 시험편에 대해서는 전자현미경(SEM)으로 파면 관찰을 통하여 파괴 기점을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

용사 시험편의 피로 시험 결과를 정리하여 그림 2에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 피로 수명의 스퀘터링(scattering)이 아주 크게 나타나고 있어 일반적인 철강 재료에서와 같은 형태의 피로 수명 곡선을 그릴 수 없었다. 피로 수명의 스퀘터링이 심한 요인을 찾기 위해 동일 응력 진폭 하에서 피로 수명이 크게 다른 2개의 시험편에 대해 (i) 극치 통계(Statistics of Extremes)¹²⁾에 의한 코팅층 최대 결합 치수 ($\sqrt{area_{max}}$), (ii) 코팅층의 결합 면적율 (porosity)을 구하였으며, (iii) 코팅층을 현미경으로 관찰하였다

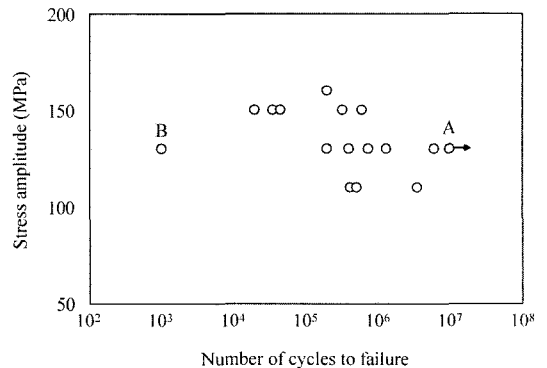
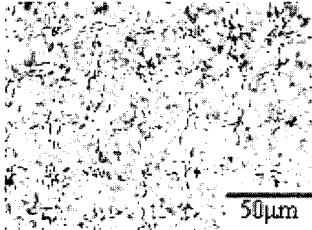
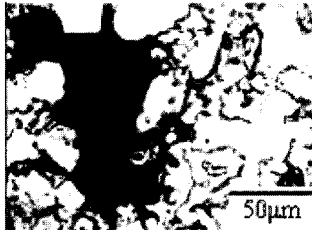


Fig. 2. Results of fatigue test for thermally-sprayed Stellite alloy coating on steel.

Table 3. Comparison of fatigue life and microstructural characteristics between specimen A and B

$\sigma = 130 \text{ Mpa}$	Specimen A (long life)	Specimen B (long life)
Fatigue life	10^7 cycles (not failed)	10^3 cycles
$\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$	30.3 μm	81.4 μm
Volume Fraction	0.11%	0.84%

Microstructure		
----------------	---	--

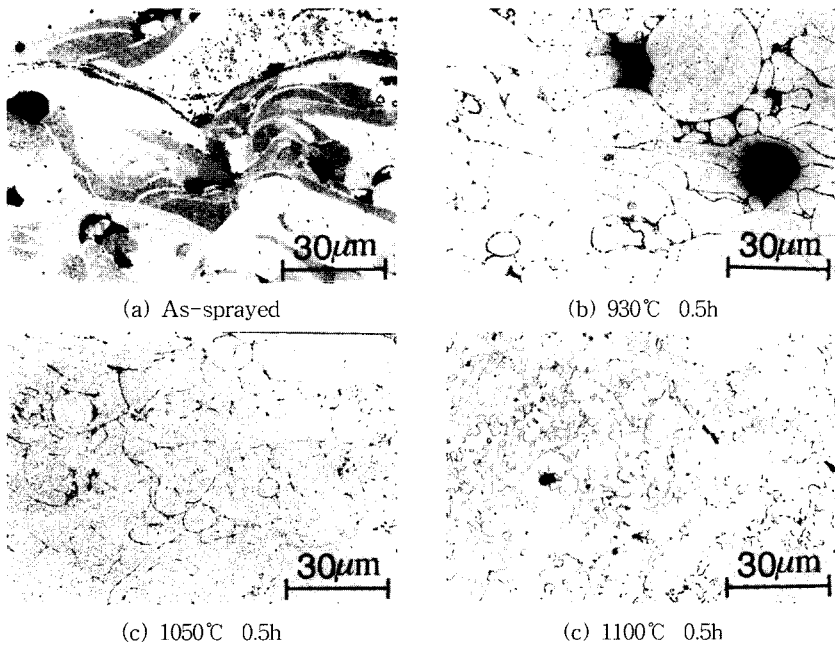


Fig. 3. Change in microstructure of coating layer after the post-heat treatment under various conditions.

(표 3 참조). 그 결과 피로 수명이 짧은 시험편 B의 경우, 표에서 보는 바와 같이 조대한 결함을 확인하였으며 극치 통계에 의한 $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ 값도 시험편 A에 비해 2.7배 정도 큰 값을 나타내었다. 이와 같이 동일 공정으로 제작된 용사막이더라도 각각의 시험편에 있어 코팅층의 특성이 서로 크게 다른 것이 피로 수명의 스퀘터링의 기본 원인이라고 생각되며, 이는 용사 코팅층의 결함 치수와 양을 제어할 경우 우수한 피로 강도를 가지는 용사재의 활용이 가능하다는 것을 시사하고 있다.

본 연구에서는 자용 합금(self-fluxing alloy) 용사의 과정에서 용사 재료를 코팅 후 코팅층의 결함을 줄이기 위해 열처리를 실시하였는데, 통상적으로 가스 화염(gas torch gun)으로 하게 되는 열처리를 시간과 온도의 제어가 가능한 진공로를 사용하여 코팅층의 특성에 미치는 열처리의 영향을 검토·고찰하였다. Stellite No.6의 용점이 1140°C라는 것을 고려하여 930, 1050, 1100°C의 온도에서 대략 0.5시간 열처리하였다. 열처리 후 코팅층의 조직을 관찰한 사진을 그림 3에 나타내었다. 열처리를 실시하지 않은

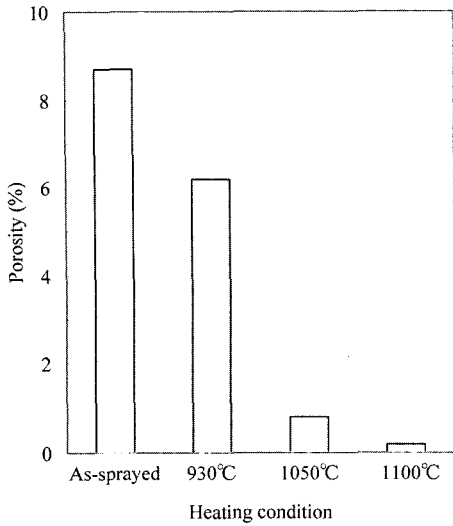


Fig. 4. Change in porosity of coating layer after the post-heat treatment under various conditions.

용사층 (as-sprayed)의 경우, 용사 분말의 적층 구조를 명확히 관찰할 수 있으며, 1050°C의 경우 조직은 거의 균일하게 되었으나 적층 구조는 아직 관찰되고 있다. 1100°C에서 열처리한 경우에는 적층 구조가 완전히 사라지고 조직이 균일화된 것을 알 수 있다. 열처리 후의 코팅층의 결합 면적을 조사한 결과(그림 4)에서는 열처리 온도가 증가함에 따라 결합 면적이 급격히 감소함을 알 수 있다. 1100°C에서 열처리한 후 코팅층의 경도값을 그림 5에 나타내었다. 코팅층의 경도는 스텔라이트 합금의 벌크 재료에 가까운 값을 나타내었다. 이와 같은 결과들로부터 코팅층의 적층 구조가 완전히 사라지고 결합이 적은 코팅층을

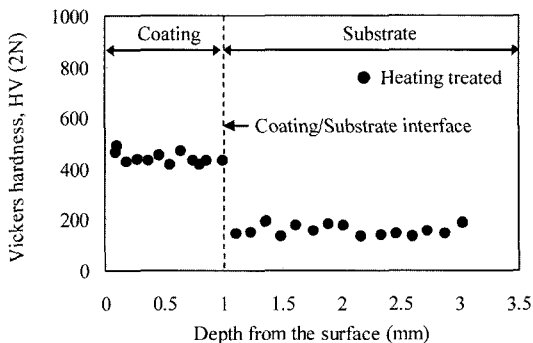


Fig. 5. Change in Vickers hardness near the interface between coating layer and substrate.

얻기 위해서는 용점에 가까운 온도에서 후열처리가 필요함을 알 수 있었다.

이상의 최적 열처리 조건을 바탕으로 피로 강도에 미치는 용사재의 열처리 영향을 조사하였다. 특히 열처리를 한 후 용사재의 코팅층의 두께를 변화시켜 피로 특성을 조사하였다. 용사 후 열처리는 진공로를 사용하여 1100°C에서 4시간 유지 후 노냉을 하였다. 용사 후 코팅층의 두께는 당초 2.0 mm이었으며 열처리 후 코팅층의 두께를 2.0 mm에서부터 기계 가공하여 0.3 mm, 0.5 mm 및 1.0 mm의 3종류의 시험편을 준비하였다. 열처리 후 EPMA(Electron Probe Micro Analyzer) 분석 결과 코팅층과 모재 사이의 계면에는 약 50 μm 정도의 확산층이 형성된 것을 확인하였다.

위의 3종류 시험편에 대하여 회전 굽힘 피로 시험을 실시한 결과를 모재, 블라스터 처리 시험편에 대한 결과와 함께 그림 6에 나타내었다. 최적 조건에서 열처리 한 용사재의 경우 앞서 그림 2에 나타냈던 열처리를 실시하지 않은 용사재의 결과와 비교하여 피로 수명의 스퀘터링이 크게 감소하였으며 피로 신뢰성도 향상되었다. 또한 용사재의 피로 강도는 모재 및 블라스터 처리 시험편에 비해 피로 강도가 현저히 증가하였으며, 이러한 증가는 코팅층 두께가 증가할수록 더욱 뚜렷하였다. 즉, 모재의 피로 강도 180

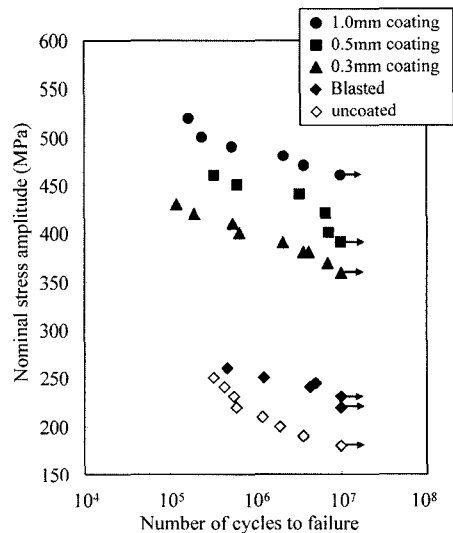


Fig. 6. Relationship between the nominal stress amplitude, S, and the number of cycles to failure, N_f, for the fatigue test specimens.

MPa과 비교하여 코팅층의 두께가 0.3 mm 및 0.5 mm의 시험편의 경우 각각 피로 강도가 360 MPa 및 390 MPa으로 2배 및 2.2배 증가한 반면, 코팅층 두께 1.0 mm 시험편의 경우 피로 강도가 460 MPa으로 2.6배 증가하였다. 이상과 같이 열처리한 용사재의 경우 모재와 비교하여 피로강도가 2배 이상 증가한 이유를 서술한다.

피로 시험 후 각각의 시험편에 대해 피로 파면을 관찰하여 피로 파괴 기점을 조사하였다. 코팅층의 두께가 0.3 mm 및 0.5 mm의 시험편의 경우 그림 7에서 알 수 있듯이 모든 파단 시험편은 계면 아래의 모재에서 피로 크랙이 발생하여 파단이 일어난 것을 알 수 있다. 한편, 코팅층의 두께가 1.0 mm의 시험편의 경우 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 모든 파단 시험편은 코팅층에 존재하는 결함에서 피로 파괴가 일어났으며, 코팅층의 고경도·고피로성이 유용

하게 발휘되어 피로 강도가 크게 증가하였다. 한편, 코팅층의 두께가 0.3 mm 및 0.5 mm의 시험편의 경우 모재부에서 피로 파괴가 일어나 모재부의 피로강도에 의해 지배될 것으로 생각되었으나, 실제로는 모재의 피로강도보다 높은 값을 보였다. 그 원인을 설명하기 위해 모재 및 용사재의 최종 파단부 피로 파괴 파면을 관찰하여 그 결과를 그림 9(a), (b)에 각각 나타내었다. 그림 9(a)에서 보는 바와 같이 모재의 경우 최종 파단부에 딴플 패턴(dimple pattern)이 관찰되어 연성파괴가 일어난 것을 알 수 있다. 반면 용사재의 최종 파단부에는 리버패턴(river pattern)이 관찰되어 같은 모재가 용사재 안에서는 취성파괴를 일으킨 것을 알 수 있다. 이는 모재가 용사재 안에서 표면에 있는 고경도의 용사 피막에 의해 강하게 소성구속을 받아 소성 변형이 일어나기 어려웠기 때문으로 판단된다¹³⁾. 실제 본 연구에서 사용된 스텔라이

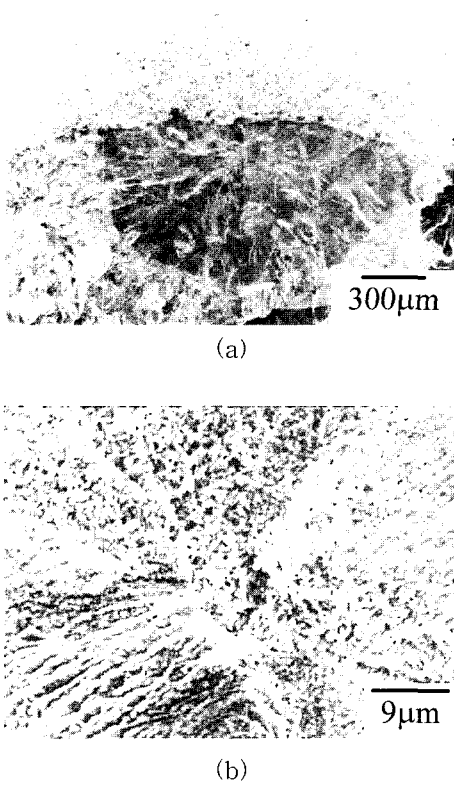


Fig. 7. Typical micrographs of fatigue fracture surface tested at $S=410$ MPa, $N_f=4.45 \times 10^6$ cycles for (a) the specimen with 0.5 mm thick coating and (b) magnified view of the fatigue crack initiation site.

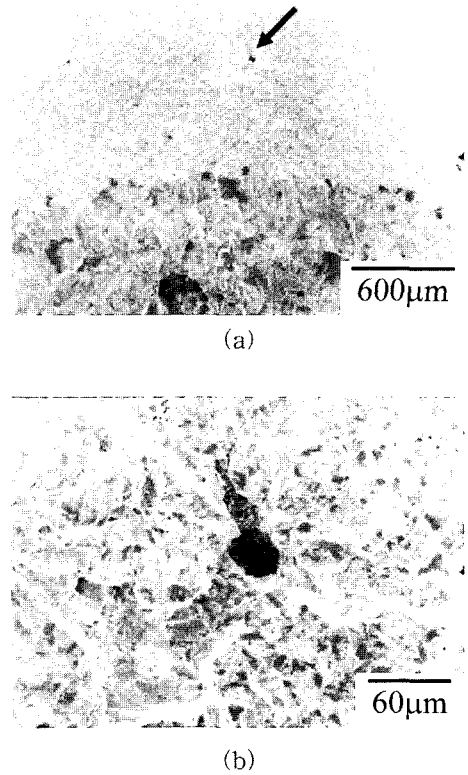
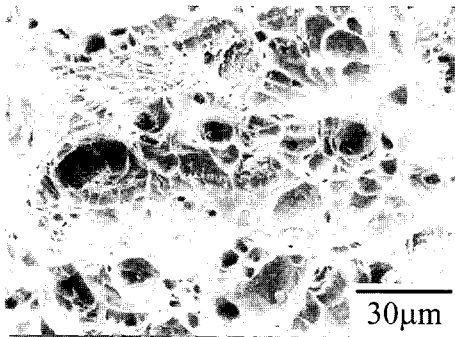
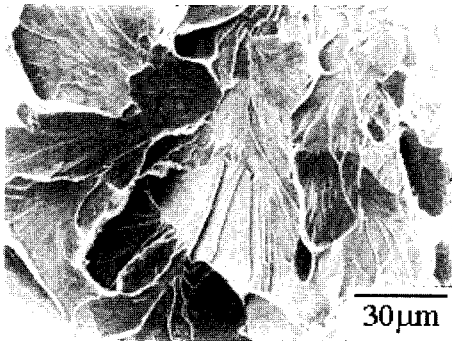


Fig. 8. Typical micrographs of the fatigue fracture surface tested at $S=470$ MPa, $N_f=3.23 \times 10^6$ cycles for (a) the specimen with 1.0 mm thick coating and (b) magnified view of the fatigue crack initiation site.



(a)



(b)

Fig. 9. Typical micrographs of the final fatigue fracture surface region. (a) substrate region of the uncoated and (b) substrate region of the specimen with 1.0mm thick coating.

트 합금 용사재의 경우 적절한 열처리를 하면 계면 근방에 확산층이 형성되어 코팅층과 모재 사이에 고 밀착력이 형성되는 것으로 보고되어 있다¹⁴⁾.

4. 결 론

기계 구조용 탄소강을 모재로 하여 가스 화염 용사법으로 스텔라이트 합금을 코팅한 시험편에 대해 적절한 조건에서 열처리를 하여 코팅층의 특성 변화를 조사하였으며 또한 회전 굽힘 피로 시험을 하여 피로 파괴 특성을 조사하였다.

1. 스텔라이트 합금을 가스 화염 용사법으로 단순 코팅한 시험편의 경우, 피로 수명의 스퀘터링이 아주 컸으며, 피로 수명의 스퀘터링의 원인은 각각의 시험편의 코팅층에 존재하는 결함 및 특성이 서로 크게 다르기 때문이었다.

2. 용사 후 적절한 조건에서 후열처리를 한 용사재의 경우, 피로 수명의 스퀘터링이 크게 감소하였다. 열처리를 한 용사재의 경우 모재가 용사재 안에서 표면에 있는 용사 코팅에 의해 강하게 구속을 받기 때문에 소성 변형이 일어나기 어려워져 그 결과 모재와 비해 피로강도가 크게 증가하였다.

3. 코팅층이 얇은(0.3~0.5 mm) 경우 모재에서 파괴가 일어났으나, 코팅층이 두꺼운(1.0 mm) 경우 코팅층에서 피로파괴가 일어나 코팅층이 가지고 있는 고경도·고피로성이 충분히 발휘되어 모재에 비해 2.6 배 높은 피로 강도를 나타내었다.

참고문헌

1. M. H. Staia, E. Ramos, A. Carrasquero, A. Roman, J. Lesage, D. Chicot and G. Mesmacque: *Thin Solid Films*, **377-378** (2000) 657.
2. Christopher A. Brown and Stephan Siegmann: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **41** (2001) 1927.
3. Devicharan Chidambaram, Clive R. Clayton and Mitchell R. Dorfman: *Surface and Coatings Technology*, **192** (2005) 278.
4. H. J. C. Voorwald, R. C. Souza, W. L. Pigatin and M.O.H. Cioffi: *Surface and Coatings Technology*, **190** (2005) 155.
5. C. Godoy, M. M. Lima, M. M. R. Castro and J. C. Avellar-Batista: *Surface and Coatings Technology*, **188-189** (2004) 1.
6. V. Stoica, R. Ahmed, T. Itsukaichi and S. Tobe: *Wear*, **257** (2004) 1103.
7. C. N. Machio, G. Akdogan, M. J. Witcomb and S. Luyckx: *Wear*, **258** (2005) 434.
8. T. Sahraoui, N. E. Fenineche, G. Montavon and C. Coddet: *Journal of Materials Processing Technology*, **152** (2004) 43.
9. J. U. Hwang, T. Ogawa and K. Tokaji: *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **17-7** (1994) 839.
10. K. Padilla, A. Velasquez, J. A. Berrios and E. S. Puchi Cabrera: *Surface and Coating Technology*, **150** (2002) 151.
11. Y. H. Shieh, J. T. Wang, H. C. Shih and S. T. Wu: *Surface and Coating Technology*, **58** (1993) 73.
12. Y. Murakami: *Effect of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*, Yokendo (Japan).
13. J. J. Kruzic, J. M. McNaney, R. M. Cannon and R. O. Ritchie: *Mechanics of Materials*, **36** (2004) 57.
14. T. Takeshita: M.S thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Keio University, Japan (1997).