

용융 봉사욕 침지법에 의해 금형용 강에 형성된 VC coating층의 밀착성과 내마모성에 관한 연구

이병권 · 남태운*

서울 정수 기능대학

*한양대학교 금속재료공학과

A study on Adhesion and Wear Resistance of Vanadium Carbide Coating on Die Steels by Immersing in Molten Borax Bath

B. K. Lee and T. W. Nam*

Seoul Jungsoo Polytechnic College, Seoul, Korea

*Dept. of Materials Sci. & Eng. Hanyang University, Ansan, Korea

Abstract A study on adhesion and wear resistance of VC(vanadium carbide) coating on die steels, STD11 and STD61, has been carried out. The VC coating on the die steels was made by immersing them in molten borax bath, a kind of TRD(thermo-reactive deposition and diffusion). Adhesion strength and wear resistance were investigated using scratch test, indentation test and plate-disc test(Ogoshi type) respectively. The influence of sliding distance on the amount of wear has been determined and dominant wear mechanisms has been characterized using optical microscopy, scanning electron microscopy and EDS spectroscopy. The critical adhesion strength(L_c) between VC coating layer and substrate(STD11) was increased to 60N(L_c) in the scratch test. In the case of STD61, the strength increased to 24N. The wear resistance of VC coated die steels was excellent because the diffusion layer formed just below the coating layer. The dominant wear mechanism was identified as adhesive wear for VC coating die steels which were worn by combination of cracking and plucking of VC fragments and disc.

(Received November 30, 1999)

Key words: VC(vanadium carbide) coating, die steels(STD11, STD61), adhesion strength TRD(thermo-reactive decomposition and diffusion), wear mechanism

1. 서 론

최근 산업이 고속도화, 고능률화 및 고정밀화 추세로 발전함에 따라 우수한 내마모성과 내식성을 갖는 새로운 코팅 기술을 요구하게 되었다. 이러한 코팅기술로 최근 각광을 받고 있는 환경 친화적인 건식 코팅기술에는 화학 증착법(CVD)이나 물리 증착법(PVD)이 있다 [1-2]. 이들 코팅기술과 함께 열 반응 석출 핵산법(TRD: thermo-reactive deposition and diffusion)의 일종으로 용융 봉사욕 침지법에 의한 VC(vanadium carbide)코팅기술 또한 화학 증착법으로 형성된 TiC, TiN 코팅층이나 물리 증착법에 의한 TiN 코팅층과 함께 높은 경도(Hv 3,000)를 갖고 있으며 내마모, 내소착성, 내식성, 내박리성등이 우수하여 실질적인 금형, 공구 기계 부품등에 이용이 확대되고 있다.

다종 소량 생산하는 금형은 동형 균질의 제품을 생산

하는 mother tool로서 상품의 품질과 가격을 좌우하며 오늘날 대량생산에 따른 자동화와 고속화, 난가공재료, 무윤활등의 악조건을 극복하여야 한다. 이러한 가혹한 조건을 해결하기 위한 방법으로 표면처리(표면개질 포함)를 이용하는 방법은 내구성 향상이나 신뢰성 확보 및 자원의 효율적 활용이라는 점에서 가장 확실한 방법이다.

용융염 침지법에 의한 VC 코팅처리는 설비 공정등이 열처리 그 자체이고 처리온도에서 일정하게 유지시킨 봉사욕중에서 자유롭게 처리재를 취급할 수 있어 기동률을 높일 수 있을뿐만 아니라, 처리시간이 상이한 여러 형태의 금형을 동시에 처리할 수 있는 등의 유연성과 경제성을 동시에 갖고 있으며, 밀착성 및 모서리 도포성도 우수하여 형상이 복잡한 금형의 코팅처리에 이상적이며 실용적인 처리법이다.

VC 코팅처리는 新井, 小松등에 의해 연구[3-5]되었으

며 봉사($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)에 SFE(surface layer forming element)로 V_2O_5 와 환원제인 B_4C 를 첨가하여 VC 코팅층을 강 표면에 형성시키는 것으로 봉사는 고온(1000°C)에서도 증발이 적고 환경오염이 없으며 열화가 적다는 점등의 장점을 갖고 있다. 강에 VC 코팅처리하기 위해서는 고온의 오스테나이트화 온도에서 수 시간동안(일반 경화처리 시간보다 수배 긴 시간) 용융 봉사욕에 침지하여야만 수 μm 의 VC 코팅층의 형성이 가능하기 때문에 이와 같은 고온에서 장시간 처리로 인한 강의 충격인성, 항절인성, 피로강도, 내마모성등 기계적 성질에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 코팅기술에서 가장 중요한 VC코팅층과 모재간의 밀착력에 대한 연구 결과는 거의 없으며 또한 내마모성에 대한 체계적인 연구결과[7-9] 또한 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이용이 확대되고 있는 대표적인 냉간 금형용 강인 STD11과 열간 금형용 강인 STD61을 모재로 사용하여 VC 코팅 처리한 후 다른 표면 처리법과 상대적인 비교가 가능한 밀착성 시험방법으로 스크래치 시험과 압흔 시험을 행하여 균열 전파형태와 코팅층의 떨어져나간 양상 등의 밀착성을 조사하고 마모시험을 통해 VC 코팅층의 두께와 내마모성과의 관계 그리고 마모기구를 조사, 분석하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 시험편 준비 및 마모시험

본 실험에서 모재로 사용된 시험편은 시판되고 있는 대표적인 냉간 금형용 강인 STD11과 열간 금형용

Table 1. Chemical composition of specimens(wt%)

compo. Speci.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
STD11	1.44	0.32	0.42	0.025	0.003	11.80	0.84	0.25
STD61	0.35	1.02	0.43	0.027	0.012	5.18	1.30	0.85

Table 2. Conditions of the wear test

Abrasion distance	100, 200, 400, 600m
Final load	6.3kg
Abrasion speed	2.91m/sec
Contact pressure	200kg
Lubricant feeding system	None lubrication
Count material	SM20C Normalizing condition
Temperature	16°C

장인 STD61로서 이들의 화학조성은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 마모 시험편을 나타낸 것으로 (a)는 STD11과 STD61로 제작한 시험편이며 (b)는 회전디스크이다. 상대재료로 시판용 일반탄소강(SM20C)을 노말라이징 처리하여 사용하였다. 마모시험은 OGOSHI 신속 마모시험기(Type OAT-U 동경 시험 기기 제작)를 사용하여 Table 2와 같은 실험 조건에서 행하였다. 마모 시험편은 SiC 연마지 2000번까지 연마 후 $0.3 \mu\text{m}$ 다이아몬드연마제를 사용하여 경면 연마를 하여 VC 코팅 처리하였으며 마모시험 전후 삼염화 에칠판, 아세톤, 에탄올에 각각 5분씩 초음파 세척하였고 정확한 마모감량을 측정하기 위해 화학천칭(스위스 Mettler사 Model AE160)을 사용하여 10^{-4} g 까지 측정하였다.

단위 하중당의 마모체적을 비마모량으로 하였으며 비마모량(Ws)은 다음 식으로부터 계산하였다.

$$Ws = \frac{Bb_0^3}{8rP_0l_0} \quad \dots \dots (1)$$

여기에서 Ws: 비마모량(specific abrasion mm^2/kg)

B: 회전디스크 폭(revolving disc width)

b_0 : 마모흔 폭

r: 디스크 반경

P_0 : 최종 하중(1 kg)

l_0 : 마찰거리(100, 200, 400, 600 m)

2.2. VC 코팅처리 및 열처리

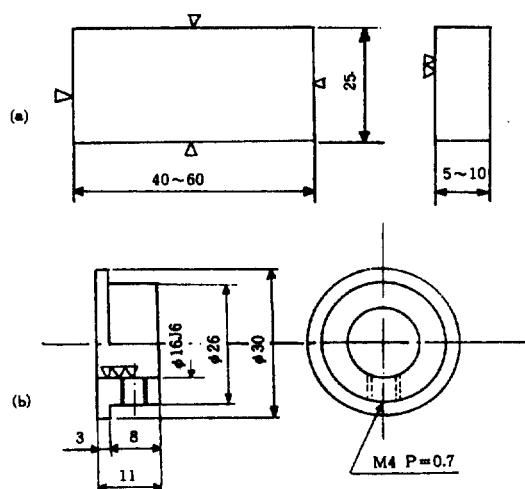


Fig. 1. Dimensions of the wear test specimen;(a) Test piece (b) Revolving disc.

STD11과 STD61로 제작된 마모 시험편을 VC 코팅 처리하기 위해 무수봉사($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)를 내열강 Pot(160 $\Phi \times 350\text{ h}$)를 사용하여 전기로에서 용융시킨 후 순도 99% 1,000mesh 크기의 V_2O_5 와 환원제로 순도 99% 600mesh 크기의 B_4C 를 첨가하였다. 이때 봉사욕의 조성은 봉사 80 wt%, 충형성 원소(V_2O_5) 15 wt%, 환원제 B_4C 를 5 wt% 서서히 교반하면서 첨가하였다.

VC 코팅처리 및 템퍼링 처리는 Table 2와 같은 조건으로 처리온도는 1000°C와 1025°C에서 각각 4시간, 8시간 침적한 후 템퍼링 처리하였다. VC 코팅처리후의 코팅층의 두께는 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 두께를 측정하였다.

2.3. VC 코팅층과 모재간의 밀착성 시험

코팅층의 밀착력을 시험하는 방법으로는 압흔시험, 스크래치 시험, 햄머링시험, 굽힘시험, 코인닝시험등이 있으며 그 중에서도 압흔시험과 스크래치시험은 질적 비교목적에 가장 유용한 방법이며 주로 박막에 적용되는 방법[2]이다.

본 실험에서는 VC 코팅층과 모재간의 밀착성을 조사하기 위하여 압흔시험법과 스크래치시험법을 사용하여 평가하였다. 압흔시험은 로크웰 C scale, 150 kgf의 하중을 가하여 압입자가 VC 코팅처리된 모재에 찍힌 압흔자국 주변의 코팅층의 균열양상과 전파형태를 비교하여 밀착력을 평가하는 방법이다. 이때 압흔자국은 Fiber optic illuminator(Canon HLS-100)를 사용하여 조사하였다. 스크래치시험은 디아이몬드 탐침으로 VC 코팅 표면을 긁은 후 accoustic emission과 SEM관찰을 통해 임계응력(L_c)을 측정하였으며 코팅층의 떨어져 나가는 양상을 비교하여 밀착력을 정량적으로 평가하였다. 이때 스크래치 밀착성을 조사하기 위해 밀착성

측정장치는 CSEM사 Automatic scratch tester로서 Table 4에 스크래치 밀착성 시험시 사용한 표준조건을 나타냈다.

VC 코팅층 직하 모재에서 모재 중심부까지 경도분포를 측정하기 위해 미소 경도계(Matsuzawa DMH-1 digital)를 사용하여 500grf 하중으로 각각 5회 측정하여 최대치와 최소치를 버린 3개 경도치의 평균값을 구하였다. VC 코팅층과 모재간의 중간층 형성 가능성 유무 및 미세 조직을 확인하기 위하여 주사 전자 현미경(SEM)과 EDS를 사용하여 성분 등을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. VC 코팅층과 처리온도 침적시간

STD11과 STD61 두 강종을 1000°C와 1025°C에서 각각 4hrs, 8hrs VC 코팅처리하여 주사전자현미경(SEM) 및 광학 현미경으로 측정한 코팅층의 두께를 Table 4에 나타냈다. Table 4에 나타난 바와 같이 STD11의 경우 4.2 μm 에서 15.5 μm 까지 나타났고 STD61의 경우는 2.4 μm 에서 7.6 μm 로 조사되었다. VC 코팅층의 두께는 침지시간과 처리온도에 따라 거의 직선적인 관계를 나타냈으며 Fig. 2는 1000°C에서 8hrs 동안 VC 코팅 처리하여 (a) STD11 (b) STD61로 층의 두께는 각각 7.8 μm , 5.0 μm 인 광학 현미경 사진이고 Fig. 3은 SEM 사진으로 1025°C에서 8hrs 동안 VC 코팅 처리로 각각 15.5 μm , 7.6 μm 코팅층

Table 4. Standard condition of scratch adhesion test

Diamond Stylus Tip Radius	Loading Rate (dl/dt)	Moving Rate (dx/dt)	Sensitivity
R=0.2 mm	100 N/min	10 min/min	1.2 scale/unit

Table 3. VC coating treatment condition

Material	VC coating Temp.(°C)	Immersing Time(hr)	Kind of cooling	Tempering(°C) ×hr	Hardness of substrate(Hv)
STD11	1000	4	O.Q	180°C × 1hr	746
		8			763
	1025	4	"	"	722
		8			680
STD61	1000	4	"	560 × 1hr × 2times	518
		8			526
	1025	4	"	"	512
		8			515

의 두께를 나타냈다.

VC 코팅 처리온도와 시간에 따른 시험편의 모재 중심부 경도를 Table 3에 나타냈다. STD11의 경우에 모재중심부 경도는 1000°C에서는 침지시간이 길어짐에 따라 경도는 상승하였다. 彭山[10]등에 의하면 이는 1000°C 오스테나이트화 온도에서는 유지시간이 길어짐에 따라 기지로 1차 탄화물에서 탄소의 용입량이 증가하여 경도가 상승한다고 하는 연구결과와 일치하였으며 1025°C 오스테나이트화 온도에서는 침지시간이 길어짐에 따라 경도는 감소하였다. 이는 잔류 오스테나이트 양의 증가에 따른 것이다. 1000°C에서 4hr 침적한 것은 잔류 오스테나이트 양이 19%정도에서 1025°C에서 8hr 침지한것은 거의 30%로 증가하기 때문에 이는 모재 경도의 저하를 초래한 것으로 판단된다. 또한 STD11은 저온 텁퍼링을 실시하여 잔류 오스테나이트의 분해와 텁퍼링에 기인한 2차 탄화물의 석출은 거의 없기 때문이다[11-12].

STD61의 경우는 적은 양의 탄화물을 갖고 있기 때문에 1000°C에서 8hr 침지한것의 경도가 약간 증가한 것으로 나타났다. 1025°C에서 4hrs, 8hrs 처리한 것의 경도의 증감은 거의 나타나지 않았다. 이는 탄소 함유량이 적어 VC 코팅처리시 잔류 오스테나이트 발생량도 소량이어서 560°C에서 2번 텁퍼링에 의한 모재

Fig. 2. Optical microstructure of the VC coating layer at 1000°C, 8hrs; (a) STD11: thickness of the VC coating layer 7.8 μm (b) STD61: thickness of the VC coating layer 5.0 μm

Fig. 3. SEM the fractured cross section of the test pieces VC coated at 1025°C 8hrs; (a) STD11: thickness of the VC coating layer 15.5 μm (b) STD61: thickness of the VC coating layer 7.6 μm

Table 5. The thickness arrangement of VC coating layer on STD11 and STD61 for the test pieces: sliding speed 2.91 m/sec, final load 6.3 kg, and count material as revolving disc SM20C normalizing condition respectively.

Test pieces materials (substrate)	VC coated temp. and immersing time	Scattering thickness of VC coated layer (mm)	Average thickness of VC coated layer(μm)	Sliding distance (m)	Revolving disc material (count material)
STD11	1000°C, 4hrs	3.9~4.4	4.2	100 200 400 600	SM20C Normalizing condition Hardness: Hv 150
	1000°C, 8hrs	7.5~8.2	7.8	100 200 400 600	"
	1025°C, 4hrs	7.7~8.4	8.1	100 200 400 600	"
	1025°C, 8hrs	15.3~15.9	15.5	100 200 400 600	"
STD61	1000°C, 4hrs	2.1~2.6	2.4	100 200 400 600	"
	1000°C, 8hrs	4.8~5.1	5.0	100 200 400 600	"
	1025°C, 4hrs	5.0~5.4	5.2	100 200 400 600	"
	1025°C, 8hrs	7.5~7.8	7.6	100 200 400 600	"

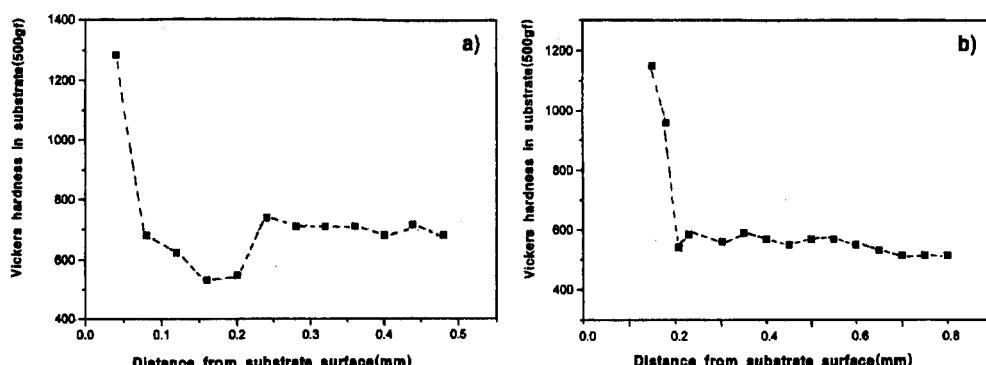


Fig. 4. Hardness distribution in substrate of the test pieces VC coated at 1025°C, 8hr; (a)STD11 (b)STD61.

중심부 경도의 변화는 적다[12]. Table 5는 두 강종의 VC 코팅 처리온도에 따른 코팅층의 두께 분포와 평균 값을 나타낸 것이다.

3.2. VC 코팅층 직하 모재 경도 분포

VC 코팅 처리한 1025°C 8hrs 침적한 시험편의 VC 코팅층 직하 모재의 경도 분포를 Fig. 4에 나타냈다. VC 코팅층의 형성은 코팅층과 직하 모재중의 탄소가 탄화물층을 통하여 표면으로 확산된다. 이 확산된 탄소는 용융 봉사육 속의 V와 결합하여 VC층을 성장시킨다. 그 결과 VC 코팅층 직하의 탄소는 VC층 성장속도가 모재로부터 탄소의 확산 속도보다 크기 때문에 VC 코팅층 직하 모재의 탄소는 고갈되어 침지온도가 상승하고, 침지시간이 증가함에 따라 VC 코팅층 직하의 모재 경도 저하는 더욱 커질 것이다. 그러나 STD61의 경우는 비교적 모재의 탄소량이 적기 때문에 침지 온도의 상승, 침지시간의 증가에도 불구하고 VC 코팅층 직하 모재경도의 저하는 적게 조사되었다.

이러한 VC 코팅층 직하의 모재경도의 저하는 VC 코팅 직후 확산 *sourcing* 처리하면 경도는 회복되며 이러한 것은 피로강도나 인성 등을 증가시킨다. VC 코팅층 직하 모재경도의 저하는 피로시험 결과 이 부분이 피로균열의 시발점이 되어 피로강도에 악영향을

미친다[9].

3.3. VC 코팅층과 모재사이의 밀착력

Fig. 5는 로크웰 C scale 압입자의 압흔자국을, Table 6에 압흔 형태를 나타냈다. (a)는 STD11을 1000°C에서 4hrs 침적하여 VC 코팅처리한 것이며 압흔자국 주위에 A 형태로 hair crack이 거의 나타나지 않았으며 (b)는 1000°C에서 8hrs 침적하여 VC 코팅 처리한 것으로 B, C 형태의 길이가 짧은 세모균

Table 6. Failures observed at each thickness of VC coating layer in the indentation test

Substrate	Thickness of VC coating layer(μm)	Abrasion weight loss(10^4 g) at sliding distance 600 m	Failure type	Failure observed
STD11	4.2	5.1	A	
	7.8	1.8	B, C	
	8.1	1.9	B, C	
	15.5	2.1	D	
STD61	2.4	54	E	
	5.0	31	F, G	
	5.2	28	F, G	
	7.6	24	G, H	

Fig. 5. Topography of the lateral crack patterns made by 150 kgf indentation on VC coated STD11; (a) 1000°C, 4hrs, (b) 1000°C, 8hrs, (c) 1025°C, 4hrs and (d) 1025°C, 8hrs

열이 발생한 것을 관찰할 수 있다. (c)는 1025°C에서 4hrs 침적하여 VC 코팅한 것으로 (b)와 거의 유사한 B, C 형태의 세모균열을 나타내고 있으며 압흔자국도 약간 변형되어 있다. (d)는 1025°C에서 8hrs 침적하여 VC 코팅처리한 것으로 (b)와 (c)보다도 크게 전파된 세모균열이 보이며 압흔자국의 변형 또한 (c)보다 심하게 나타났다.(D 형태)

이상의 결과에서 VC 코팅 처리온도가 상승하고 침지 시간이 증가함에 따라 VC 코팅층의 두께는 증가한다. 즉 VC 코팅층의 두께가 증가함에 따라 압흔 주위의 발생하는 균열도 뚜렷하고 크게 나타났으며 압흔자국의 변형도 커지는 것으로 나타났다.

STD11은 모재의 경도가 높아 압입자로 인한 내부 소성변형이 거의 일어날 수 없어 세모균열만이 나타난 것으로 판단된다. 어느 경우에도 압흔 주위에는 VC 코팅층의 박리는 관찰되지 않았다.

Fig. 6은 STD61의 압흔자국을 나타낸 것으로 VC 코팅 처리조건은 Table 3와 같다. (a)는 거의 균열 발생이 관찰되지 않았으며(E 형태) (b)에서는 꾸불꾸불한 동심원 형태의 세모균열(hair crack)이 보이며(F, G 형태) (c)는 (b)보다도 더 발달된 형태의 세모균열이 뚜

렷하게 다수 보이며(F, G 형태) (d)에서는 (c)보다 더욱 선명한 세모균열이 길게 전파되었다(G, H 형태). 또한 압흔자국 주위에 C, D 형태의 균열과 연결되어 있으며 압흔자국도 많이 변형된 것을 관찰할 수 있다. 이것은 STD61의 모재경도가 STD11보다 낮아 압흔주위가 융기되면서 소성변형에 의한 동심원 형태의 세모균열이 발생했을 것으로 판단된다.

이상의 결과에서 VC 코팅층과 모재와의 접합력의 크기는 VC 코팅층의 두께에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. STD11이나 STD61에 VC 코팅처리 한 것은 코팅층의 파괴인성 측면에서 CVD나 PVD처리 보다 우수하다고 판단된다. 이는 두 표면처리기술에 의해 고속도 공구강에 형성시킨 TiN코팅층의 압흔시험 결과[13] 바리현상도 관찰되기 때문이다. 최근에는 코팅 층과 모재와의 밀착력을 향상시키기 위해 질화처리등을 이용하여 중간층등을 도입하는 방법들이 연구[14]되고 있다.

Fig. 7은 스크래치 밀착성 시험 결과를 나타낸 것이며 다이아몬드 탐침으로 VC 코팅 표면을 긁은 후 accoustic emission 신호를 통해 임계하중(L_c) 변화를 측정하여 코팅층과 모재간의 밀착력을 정량적으로 평가

Fig. 6. Topography of the lateral crack patterns made by 150 kgf indentation on VC coated STD61; (a) 1000°C, 4hrs, (b)1000°C, 8hrs, (c) 1025°C, 4hrs and (d) 1025°C, 8hrs

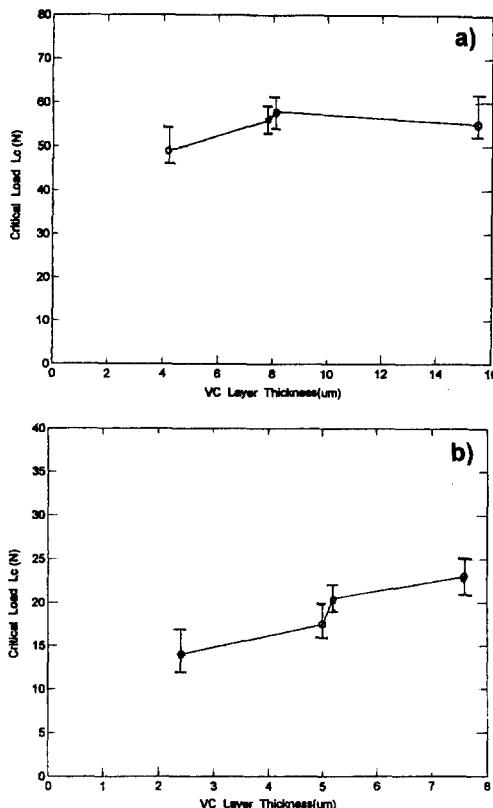


Fig. 7. Critical load of VC/STD11, STD61 layer with the change of VC coating thickness (a) STD11 (b) STD61

한 것이다. (a)는 STD11에 형성시킨 VC 코팅층의 두께에 따라 임계 하중값의 변화를 나타낸 것이다. VC 코팅층의 두께가 4.2 μm일 때 임계 하중값이 50N 정도이며 7.8 μm, 8.1 μm로 증가함에 따라 60N정도로 임계 하중값이 증가하였다. VC 코팅층의 두께가 15.5 μm일 때는 임계하중값이 약간 감소한 56N정도로 나타나 VC 코팅층의 두께증가에 의한 임계 하중값은 8.1 μm까지는 증가하였으나 VC 코팅층의 두께가 더욱 증가함에 따라 임계 하중값도 증가하지는 않았다. (b)는 STD61의 경우로 VC 코팅층의 두께가 2.4 μm일 때 14N정도의 임계 하중값을 나타냈고 7.6 μm 까지 VC 코팅층의 두께가 증가함에 따라 임계 하중값은 꾸준히 증가하여 24N정도를 나타냈다. 스크래치시험에서 코팅층이 모재로부터 떨어져 나갈때 음성파 방출 진폭이 크게 변한다. 스크래치 시험결과 STD11은 음성파 방출 이 약간 발생시작하는 시점을 임계 하중값으로 하였으며 임계하중이 80N에 이르러서도 음성파 방출 진폭은

Fig. 8. Scratch channel (a)STD11 (b)STD61

심한 변화를 나타내지 않았다.

Fig. 8의 (a)는 STD11의 scratch channel을 나타낸 것이며 (b)는 STD61의 스크래치 경로를 나타내었다. 탐침이 코팅층위를 미끄러지면서 발생하는 스크래치 경로로 CVD나 PVD처리에 의해 형성된 TiN코팅층의 스크래치 시험에서 나타나는 등각균열이나 열린균열등의 파괴양상[15]이 나타나지 않아 두 강종(STD11, STD61) 모두 밀착력이 우수한 것으로 나타났다. 다만 STD61의 경우는 STD11보다 음성파 방출 진폭의 변화가 커졌다.

이상에서 언급한 결과로서 정확한 임계 하중값의 측정에 어려움이 있어 다른 처리법과 비교는 곤란하지만 VC 코팅처리한 두 강종, STD11과 STD61의 접착력의 상대비교는 가능하였으며 적어도 STD11의 스크래치시험에 의한 밀착력은 STD61의 2.5배 이상으로 나타났고 VC 코팅층의 두께가 8.1 μm까지는 두강종 모두 스크래치 밀착력이 증가한 것으로 조사되었다.

3.4. 내마모성

Fig. 9는 마모거리가 100, 200, 400, 600 m로 증가

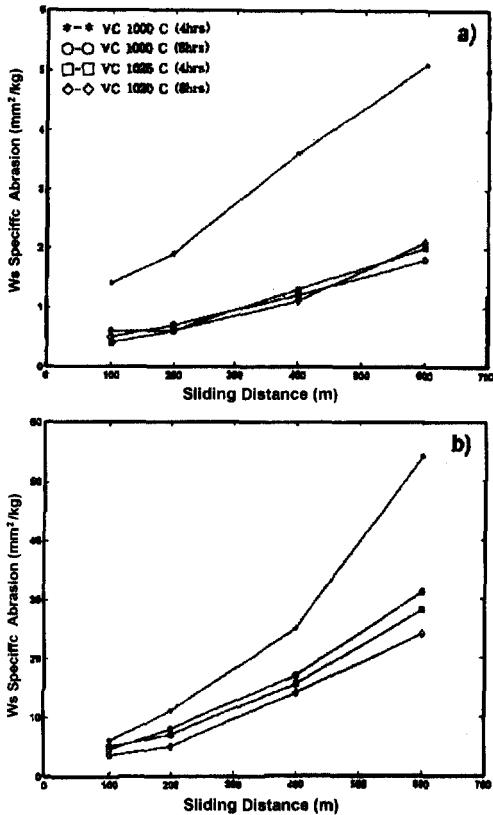


Fig. 9. Relation between the weight loss and the sliding distance; (a)STD11/VC (b)STD61/VC

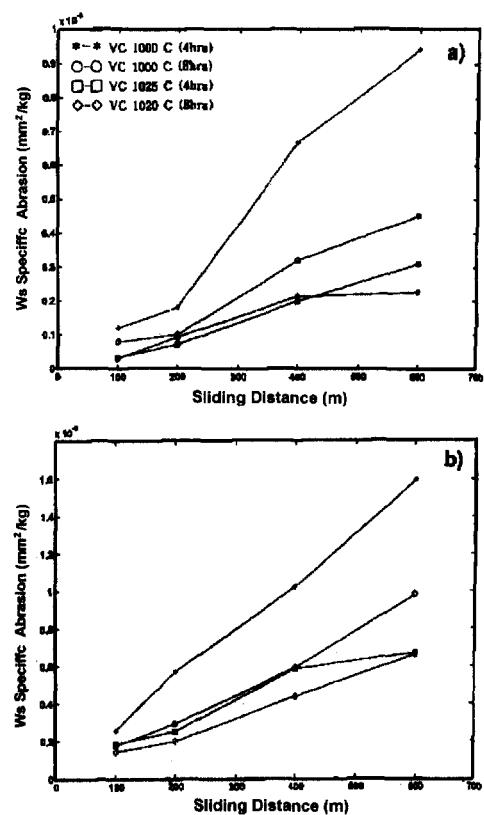


Fig. 10. Relation between the specific abrasion and the sliding distance; (a)STD11/VC (b)STD61/VC

함에 따른 마모실험 전후의 마모감량을 나타낸 것이다. (a)는 STD11로 1000°C에서 4hrs VC 코팅 처리한 것은 마모거리가 증가함에 따라 마모량도 마모 거리에 비례해서 현저하게 증가하고 있다. 이는 VC 코팅층이 4.2 μm로 얇아 마모거리가 증가함에 따라 마모량도 증가한 것으로 판단된다. 1000°C에서 8hrs, 1025°C에서 4hr, 8hrs 처리한 것은 마모거리가 증가하여도 완만한 마모량의 증가를 나타냈다. 이것은 VC 코팅층의 두께가 마모량에 크게 영향을 주는 것으로 보이며 두께가 8 μm 이상일 때는 마모거리에 따른 마모량은 거의 동일한 경향을 나타내고 있다. (b)는 STD61의 마모감량을 나타낸 것으로 1000°C에서 4hrs VC 코팅 처리한 것은 마모거리가 200, 400, 600 m로 증가함에 따라 마모감량의 증가가 더욱 크게 나타났으며 이는 VC 코팅층의 두께가 2.4 μm로 얕은 것에 기인하여 마모량이 마모거리의 증가에 따라 현저하게 증가한 것으로 판단된다. 특히 마모거리가 400 m에서 600 m로

증가함에 따라 마모감량은 크게 나타났다. 1000°C에서 8hrs, 1025°C에서 4hrs, 1025°C에서 8hrs 동안 VC 코팅 처리하여 코팅층의 두께가 5.0, 5.2, 7.2 μm인 것은 유사한 경향을 보이고 있다. 이것은 VC 코팅층이 마모되어 마모거리에 따라 마모감량이 증가한 것으로 판단된다. 마모실험에서 나타난 마모흔의 폭(b_0)을 측정하여 단위 하중당의 마모체적인 비마모량(Ws)을 식 (1)에 의해 계산한 결과를 나타낸 것이 Fig. 10이다. (a)는 STD11로 1000°C에서 4hrs 처리한 것은 마모거리가 200 m까지 비마모량의 증가가 크게 나타나지 않았으나 400 m, 600 m로 길어짐에 따라 비마모량도 크게 증가하였다. 1000°C에서 8hrs, 1025°C에서 4hrs, 8hrs 처리한 것의 마모거리에 따른 비마모량의 증가폭은 1000°C에서 4hr 처리한 것보다 적지만 유사한 경향을 나타냈다. 이 경향은 Fig. 9에 나타난 마모거리의 증가에 따라 마모감량이 적은 것과는 다른 결과이다. 이것은 마모흔의 폭(b_0)이 증가했으나 그에

따라 마모감량이 적게 나타난 것은 STD11의 VC 코팅 층의 내마모성이 크고 코팅층과 모재와의 밀착력도 큰 것으로 판단된다. (b)는 STD61로 1000°C에서 4hrs동안 VC 코팅 처리한 것은 마모거리가 증가함에 따라 비마모량도 크게 직선적으로 증가하였으며 이것은 Fig. 9의 (b)와 거의 같은 경향을 나타냈다. 탄화물층이 너무 얕으면 내마모성이나 내식성이 나쁘고 지나치게 두꺼우면 피로강도나 인성에 영향을 미치며 탄화물층의 박리가 일어나기 쉬우므로 탄화물층의 두께는 중요하다고 판단된다.

3.5. 마모특성과 기구

VC 코팅된 금형용 강의 마모기구는 코팅층과 모재의

재료특성, 표면의 기계적 성질 하중의 크기 및 지속시간, 활주속도, 활주거리등에 주로 영향을 받는다. 본 금형의 내구력이나 내마모성을 지배하는 것은 활주거리라고 보고, VC 코팅층과 활주거리에 따른 내마모성을 조사하고자 한 것이다.

STD11의 경우 활주거리가 짧은 100~200 m에서는 VC 코팅층의 실질적인 마모가 거의 나타나지 않았다. 그러나 활주거리가 증가하여 200~400 m에서 코팅층이 표면적인 소성변형이 되어 표면이 불균일한 거친 상태가 되었다. 고속고압에 의해 VC 코팅층이 flacking되거나 박리된 것이 잘게 부수어진 파편과 상대재료에 의해 adhesive wear mechanism를 나타냈다. Fig. 11은 STD11을 1025°C에서 8hrs 동안 코팅 처리하여 코팅

Fig. 11. SEM topography of wear scan of STD11 VC coated at 1025°C, 8hrs: sliding speed 2.91 m/sec, final load 6.3 kg, sliding distance 600 m.

Fig. 12. SEM topography of wear scan of STD61 VC coated at 1025°C, 8hrs: slicing speed 2.91 m/sec, final load 6.3 kg, sliding distance 600 m.

층의 두께가 15.5 μm 정도인 시험편의 마모흔으로 활주거리가 600 m인 것이다. A는 코팅층이 균열이나 plucking mechanism에 의해 가장 심하게 마모된 부분으로 코팅층이 거의 제거된 것으로 관찰된다. 단단한 마모입자의 microploughing에 의해 형성된 wear groove가 디스크 활주방향으로 평행하게 나타났다. flacking된 VC 코팅 파편들에 균열이 다수 발생한 것을 볼 수 있다. 균열이 발생한 코팅층 파편 조각과 디스크 마모에서 생긴 입자들이 파편이 되어 고속으로 VC 코팅 표면에 충돌되면서 마모흔 주위에 생성시킨 crater 형태의 윗 가장자리로 불균일하게 떨어져 나간 코팅층의 표면이다. VC 코팅층이 제거되고 철계모재와 디스크의 접촉에 의한 마찰열과 큰 용력으로 표면은 접촉온도가 상승하고 산소의 존재하에서 산소 흡착에 의한 산화가 진행되어 산화층이 형성된다.

Peng의 연구[16]에 의하면 마찰열로 인한 표면 온도의 상승은 600~700°C에 이르며 이러한 온도의 상승과 높은 전위밀로 인하여 산화물의 생성은 계속된다고 하였다. 이는 산화막의 취성 파괴는 더 많은 소성변형의 기인한 두면의 연속적인 접촉에 의해 일어날 것이다. 마모에서 파편은 microploughing, microcutting, microcracking의 3가지 형태에 의해 형성된다. C는 crater 형태의 마모흔과의 경계부분으로 VC 코팅층에 균열이 다수 발생한 불균일한 표면이다. D는 adhesive wear이 나타나고 VC 코팅층이 균열되거나 plucking되어 발생한 파편에 의해 wear groove이 관찰된다.

STD61에서는 VC 코팅층이 2.4 μm 의 것은 100 m 활주거리에서도 마모가 진행되었으며 활주거리의 증가에 따라 심한 adhesive wear mechanism를 나타냈고 STD11에서 나타난 불균일한 마모 현상은 거의 관찰되

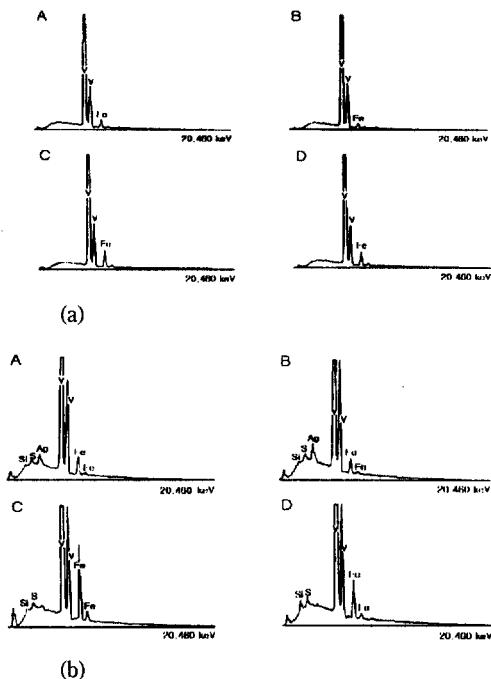


Fig. 13. SEM micrographs and EDS spectroscopy of wear scan of the test piece VC coated at 1025°C, 8hrs: sliding speed 2.91 m/sec, final load 6.3 kg, A~D EDS spectrum (a) STD11 (b)STD61

지 않았다. Fig. 12는 VC 코팅층의 두께가 7.6 μm 인 시험편의 마모흔으로 STD11보다 뚜렷하였다. 마모흔의 아래부분 경계면에 높은 마찰열과 용력 그리고 파편에 의해 코팅층이 flacking되었다. A는 마모가 심한 마모흔의 중심부분으로 코팅층이 균열이나 flacking에 의해 거의 제거되고 소수의 균열이 발생한 코팅층이 남아있다. B는 VC 코팅표면과 마모흔의 경계를 나타낸 것으로, STD11보다 활주방향으로 평행한 마모 흠이 선명하게 관찰된다. C는 A와 B의 중간부분으로 활주방향에 평행한 마모흔이 선명하며 flacking전의 코팅층에 균열도 관찰된다.

Child등의 연구[7]에 의하면 용융염 침지법으로 강에 형성시킨 VC 코팅층은 모재의 탄소량이 적을때는 V_2C 형태의 코팅층이 형성되고 탄소량이 많을때는 V_4C_3 형태의 코팅층이 형성된다고 하였다. 즉 탄소량이 많은 STD11에 형성된 VC층은 V_4C_3 의 형태이고 STD61에는 V_2C 형태라고 사료된다. 그리고 모재경도 또한 STD11의 경우 763~680 Hv로 STD61의 모재경도 526~512 Hv보다 높기 때문에 내마모성이 우수한 것으로 판단된다.

Fig. 13은 마모흔의 각 부분에 대한 성분을 E.D.S. 분석한 결과이다. (a)는 STD11의 경우로서 1025°C에서 8hrs 동안 VC 코팅 처리하여 코팅층의 두께가 15.5 μm 정도인 것으로 마모흔의 윗쪽 부분 A는 마모에 의해 코팅층이 떨어져 나가 모재가 나타난 것처럼 보이는 지역에 존재하는 흰색의 VC 코팅층으로 판단되며 E.D.S. 분석결과 VC 코팅층임을 확인할 수 있었다. B는 코팅층이 마모에 의해 완전 제거되지 않은 희색 부분으로 A와 같은 코팅층임이 확인되었으며 C, D는 Fe가 어느정도 검출된 것으로 보아 VC 코팅층 직하의 확산층이라고 사료된다. 활주거리 600 m에서도 모재까지 마모가 일어나지 않고 확산층까지 마모가 일어난 것으로 판단된다. (b)는 STD61로 A는 VC 코팅층이며 C, D는 확산층으로 판단된다. 이상의 E.D.S. 분석결과 VC 코팅층 직하에 V의 확산층이 존재할 것으로 판단되었다.

Fig. 14는 확산층의 존재를 조사하기 위해 1025°C에서 8hrs 동안 VC 코팅처리된 (a)는 STD11 (b)는 STD61을 나타낸 SEM사진과 E.D.S. 분석결과이다. 코팅층 직하 모재의 부분 B에서 나타난 것과 같이

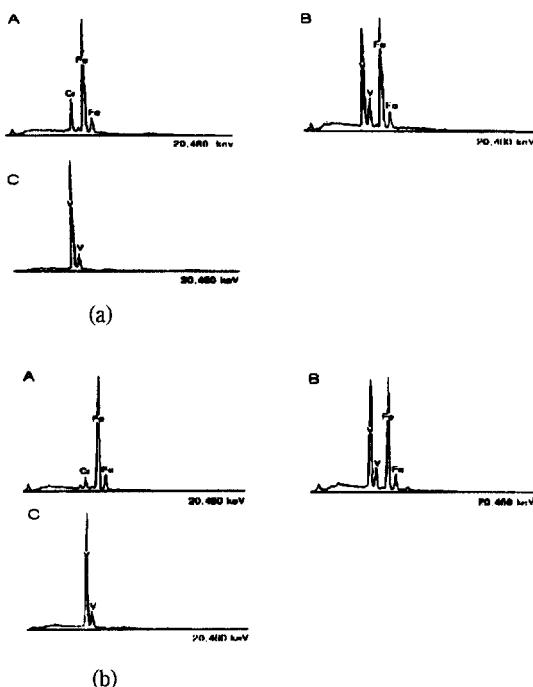


Fig. 14. SEM micrographs and EDS spectroscopy of cross section of the test piece VC coated at 1025°C, 8hrs: A-Substrate, B-Just below the VC coating layer, C-VC coating layer (a) STD11 (b)STD61

STD11이나, STD61 모두 확산층이 존재함을 확인할 수 있었고 이 확산층으로 인해 밀착력 뿐만아니라 내마모성도 우수하다고 사료된다.

4. 결 론

열반응 석출확산법의 일종인 용융염 침지법에 의해 금형용 강 STD11과 STD61에 VC 코팅시켜 코팅층의 밀착력 및 내마모성을 실험한 결과는 다음과 같다.

1. 밀착성 시험으로 스크래치 시험결과 STD11의 경우 VC 코팅층의 두께가 증가함에 따라 critical load는 두께가 8.1 μm 일 때 60N으로 최대가 되었으며 15.5 μm 의 두께에서는 약간 감소하였다. STD61의 경우는 두께가 증가함에 따라 24N까지 증가하였으며 STD11은 STD61보다 2.5배정도 밀착성이 크게 나타났다.

2. 압흔 시험결과 STD11은 코팅층의 두께가 증가함에 따라 압흔 주위에 방사형태로 된 hair crack이 뚜렷하게 크게 발달하였고 STD61은 압흔주위에 동심원 형태의 굴곡이 심한 세모균열이 크게 발달하였고 박리

는 발생하지 않았다.

3. 내마모 시험결과 훨주거리가 증가함에 따라 마모량은 증가하였으며, STD11의 경우는 코팅층의 두께가 4.2 μm 인 것은 훨주거리 증가에 따라 마모량이 크게 증가했으나 7.8 μm 이상은 마모량의 변화가 크게 나타나지 않았다. STD61의 경우는 훨주거리가 증가할수록 마모량은 증가하였으며, 코팅층의 두께가 증가할수록 마모량은 적게 나타났다.

4. VC 코팅 공구강(STD11, STD61)의 지배적인 마모기구는 웅착 마모이며 VC 코팅층 직하 모재에 확산층이 존재함을 확인할 수 있었다.

5. 참고문헌

- Vladimir Sedlacek; Metallic surface, films and coatings, Elsevier, (1992) 211.
- K. L. Mittal; Adhesion measurement of flims and coating vsp (1995) 26.
- 小松登, 新井透; 鐵と鋼, 68, (1982) 16.
- 新井透, 小松登, 彬本義謙; 金屬表面技術, 32. 5 (1981) 16.

5. 小松登, 新井透, 水浴正義; 日本金屬學會誌, 39, (1975) 247.
6. 猿本勝司, 堀田昇次, 藤田浩紀, 新井透; 材料 36, (1989) 85.
7. S. A. Plumb, H. C. Child; Heat Treat. 310 (1984) 51.
8. H. C. Child; Metal Finishing, 6, (1989) 111.
9. 李丙權; 한양대 박사학위 논문 (1994)
10. 杉山道生, 山本長邦, 吉尺浩一; 鐵と鋼 60.1 (1974) 85.
11. A. E. Pavaras, A. N. Popanolpulo; Met. Sci. Heat Treat. No. 11 (1982) 36.
12. Bofors Handbook, steel and its Heat Treatment (1976) 21.
13. Jen Fin Lin, Jeng Haur Horng; wear 171 (1994) 59.
14. C. Quaeyhaegens, L. M. Stals, L. De Schepper, M. Van Stappen and B. Malliet; Surf. Coat. Technol., 45 (1991) 193.
15. 김남식, 정채오, 이정중; 대한 금속학회지, 35 (1997) 1553.
16. Q. F. Peng; Wear, 129 (1989) 198.