

진공분위기 내에서 건조마찰 미끄럼운동을 하는 저탄소강 표면의 마찰마모 특성

공호성 · 윤의성 · 권오관

한국과학기술연구원 기전연구부 트라이블로지연구팀

Friction and Wear at Dry Sliding Low Carbon Steel Surfaces Under Vacuum Conditions

Ho-Sung Kong, Eui-Sung Yoon and Oh-Kwan Kwon

Tribology Group, KIST

Abstract—The friction and wear of mild steel at dry sliding surfaces under different vacuum conditions have been investigated to understand the wear mechanisms. For the test, a ball-on-disk typed wear-rig has been built and implemented, allowing control of sliding speed, load and vacuum. Results show that, at a high sliding velocity, friction of low carbon steel (SS41) under a high vacuum is much higher than that of ambient condition and wear is much severer. It is due to lack of effective oxidation film formation on which steel surfaces could protect themselves against the severe wear. It has been shown, however, that there is a critical regime with contact conditions (at a low sliding velocity, a low load, and under a medium vacuum) at which effective, protective films of low carbon steel have been built on the surfaces in a friction process with a self-regulating way, resulting in both very low coefficients of friction (about 0.3) and mild wear. In order to investigate the protective films on steel surfaces, the worn surfaces and the wear debris have been experimentally analyzed with SEM, AES/SAM and XRD. A theoretical analysis of frictional heating at sliding surfaces, and an experimental analysis of the influence of oxidation wear under various vacuum conditions are described. The important variables on which self-formations of protective films at dry sliding surfaces depend, and the wear mechanisms are also investigated.

1. 서 론

건조마찰 하에서 미끄럼운동을 하는 금속재료 표면에서의 산화막 형성과 재료의 마찰마모 특성 변화에 관한 연구들이 과거부터 많은 연구의 대상이 되고 있다[1-9]. 재료표면의 산화막이 모재에 비하여 일반적으로 경도가 높을 뿐만 아니라, 접촉하는 재료 상호간의 직접적인 접촉에 의한 응착(adhesion)을 방지하여 재료의 마찰 및 마모를 감소시킬 수 있는 보호막의 역할을 하기 때문이다. 가혹한 접촉조건 하에서의 산화막 파괴는 접촉면에 응착을 쉽게 발생시키므로 심각한 마모의 증가를 초래하게 되는데, 예를 들어 알루미늄 재료표면의 seizure 현상에서 이와 같은 경우를 찾아볼 수 있다[10]. 산화막의 형성과

산화층의 두께는 재료표면의 온도에 의하여 크게 지배되는 물리화학적 현상이므로, 미끄럼 접촉표면에서도 표면의 온도 조건에 따라 혹은 건조마찰시 마찰열에 의하여 재료표면의 온도가 증가하여 산화가 발생할 수 있으나[1-7,21], 마찰열에 의한 표면의 평균 온도(bulk temperature) 증가가 무시될 만한 접촉조건 하에서도 미끄럼표면이 산화될 수 있다는 연구결과들이 발표된 바 있다[6,12]. 최근들어 Quinn 등[1-3]은 재료표면의 산화막형성이 표면의 평균온도보다는 실제 접촉면에서 발생하는 고온의 마찰온도(flash temperature)에 그 원인이 있다고 발표하였다. 그들은 표면산화를 발생시키기 위한 온도범위가 저합금강에서는 약 224~689°C 정도이며, 온도범위에 따라 결정구조가 다른 산화철들이 생성될 수 있다고 하였다.

또한 금속의 산화율은 온도외에 미끄럼 표면의 조건과 소성변형 정도 등의 접촉조건 등에 의하여 영향을 받으므로, 접촉운동조건 변화에 따라 산화율이 수십, 수백배로 변할 수 있다고 하였다. 진공도와 같은 환경조건은 표면산화를 지배하는 또 다른 변수이다. Kragelski 등[13]은 강 표면의 효과적인 산화보호막이 산소가 대기상태보다 감소된 중진공(medium vacuum; 10^{-1} Torr)하에서 형성됨을 보였는데, 그들은 진공도에 따라 산화막 두께는 감소하나, 중진공 하에서 형성된 얇은 두께의 산화막이 마모를 감소시키는데 있어서 가장 효과적이었다고 하였다. 진공상태 하에서 강 표면의 산화에 관한 연구는 이외에도 많은 연구결과들이 보고되어 있다[9,10,13].

산화막이 접촉표면에 형성되는 과정과 이들에 의해서 심한 마모가 방지되는 현상들을 이해하는 것은 매우 중요하다. Scott 등[15]은 접촉면에 마모입자들이 밀착하고 뭉침으로써 산화보호막을 성장시키고 마모를 감소시키게 한다고 하였다. Sullivan 등[6]은 산화보호막이 표면 위에서 마모입자들의 소결에 의한 물질전이(mass transfer)와 성장에 의해 형성되어 접촉하중을 실제로 지지하는 고원(plateau) 형상의 접촉면을 형성한다고 하였다. Iwabuchi 등[14]은 최근 그들의 연구에서 상호 금속접촉을 방지하는데 효과적인 표면 보호막의 형성은 접촉표면 전체에 걸친 산화현상에 의해서가 아니라, 마모입자들에 의해서 접촉표면 위에 밀착된 산화층에 의한 현상임을 실험적으로 규명한 바 있다. 본 연구에서는 진공 하에서의 저탄소강(low carbon steel)의 마모기구를 이해하고 진공도 변화에 따른 산화마모기구 변화를 연구하기 위하여, 진공 하에서 건조마찰 미끄럼표면의 마찰과 마모특성을 시험분석하였으며, 하중 및 미끄럼속도 변화에 따른 산화막의 특성 변화와 마찰열의 효과를 고찰하였다.

2. 마모시험 장치 및 방법

본 실험에 사용된 시험 장치는 ball-on-disk형 마모시험기로 Fig.1에서 보는 바와 같이 진공 분위기 또는 특수한 분위기 하에서 마찰마모 시험을 할 수 있도록 제작하였다[16]. 진공도는 기계식 회전펌프와 확산펌프를 사용하여, 1.3 Pa (10^{-2} Torr)의 중진공과 $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ (4×10^{-5} Torr)의 고진공 조건들을 얻었으며, 진공압력은 thermal conductivity vacuum gauge ($\text{atm} \sim 10^{-1} \text{ Pa}$)와 penning gauge ($10^{-1} \sim 10^{-4} \text{ Pa}$)로 측정 하

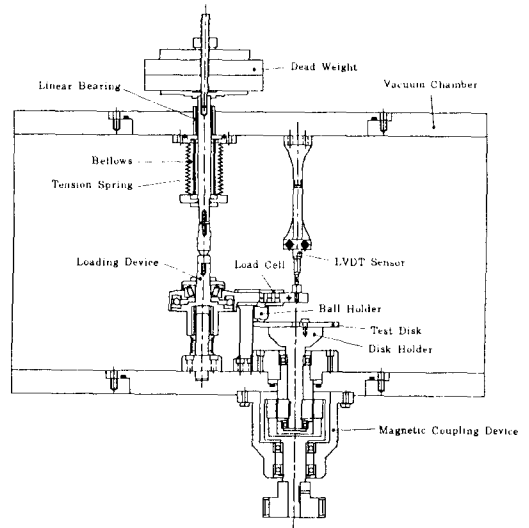


Fig. 1. A sectional view of the wear-rig.

였다. 시편으로는 직경 110 mm, 두께 6 mm의 디스크와 직경 ϕ 12.7 mm의 볼을 사용하였다. 디스크의 회전속도는 서보모터 제이기에 의해 제어되며, 최대 미끄럼 속도는 10 m/s이었다. 하중은 볼에 가해지며, 진공하에서 하중 부과장치의 상하 직선운동을 위하여 linear 베어링과 스테인레스 재질의 벨로우즈를 사용하였다. 진공실 내의 온도는 Al-Cr형 열전대로 측정하였으며, 50 W 복사식 할로겐램프의 제어를 통하여 진공실내 온도를 30°C 로 일정하게 유지하도록 하였다. 볼과 디스크 시편 사이의 마찰력은 스트레인-게이지형 로드셀로 측정하였으며, 측정계의 noise를 제거하기 위하여 1 kHz의 low-pass filter를 사용하였다. 측정된 신호는 스트레인게이지 증폭기에 의해 증폭되어 12 bit A/D 변환기를 통해 PC로 입력된다. 또한 빠른 속도의 데이터 샘플링이 필요한 경우에는 300 MHz 디지털-오실로스코프를 사용하였다.

시험 디스크는 재질이 SS41 (KS D 3503-82, 0.11~0.18% C 아공석강)이며, 표면을 연마한 후 다시 #1000 연마지로 무방향 연마하여 표면거칠기가 약 $0.1 \mu\text{m}$ (Ra) 되도록 하였으며, 디스크 표면의 평균 경도는 Knoop 경도계로 1.6 GPa(압입하중: 9.8N)이었다. 시험 볼은 재질 EN 31(grade 25; extra polished)인 SKF사 제품으로 표면경도는 Rockwell C scale로 65 (8.4 GPa)이었다. 시험 볼과 디스크는 TCE(trichloroethylene)를 사용하여 초음파 세척기에서 세척한 후 건조하여 별도의 진공실에 보관하였다. 시험속도는

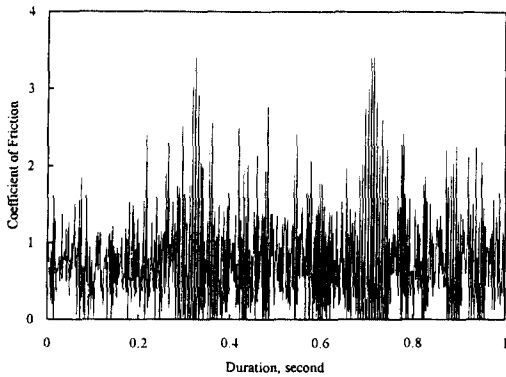


Fig. 2. Variations of the coefficient of friction under a high vacuum (5.0×10^{-3} Pa), at the sliding velocity of 0.1 m/s and under the normal load of 9.8N.

디스크 위의 일정한 접촉트랙 반경(35 mm)에서 주축의 회전속도에 따라 변화되었으며, 미끄럼속도 0.1~1.0 m/s, 하중 4.9~29.4N(시험초기의 Hertz 압력: 0.44~0.80 GPa), 총 미끄럼거리 3600 m의 조건에서 시험을 수행하였다. 디스크의 마모량은 광학현미경을 사용하여 디스크 마모트랙의 폭을 측정하므로써 계산되었다.

3. 시험결과

진공하에서 불과 디스크의 마찰계수는 초기에 약 0.2 정도로 낮은 값을 나타내었다. 이와 같이 시험초기의 낮은 마찰계수는 이미 표면에 형성된 얇은 산화막, 수분, 또는 흡착된 오염물질들로 구성되어 있는 표면 오염층에 의한 영향의 결과로 사료되나, 얼마간의 미끄럼접촉 후 마찰계수가 급격히 증가함을 보였다. Fig. 2는 고진공(5.0×10^{-3} Pa), 미끄럼속도 0.1 m/s, 하중 9.8N의 시험조건 하에서 시험초기에 40000 data/sec의 빠른 속도로 데이터를 샘플링했을 때의 마찰계수의 변화로써 심한 stick-slip의 양상을 보여주며 주기적으로 높은 peak를 나타내고 있다. 마찰계수의 peak 값은 미끄럼 속도가 빠르면(1.0 m/s) 증가하여 최대 10 이상이 될 때도 발견되었다. 그러나, 미끄럼거리가 점차 길어짐에 따라 시험 초기의 높은 peak들은 그 크기가 점차로 감소하고 안정화된 마찰계수를 보였는데, 미끄럼거리에 따른 마찰계수의 변화가 진공도와 미끄럼조건에 의해 크게 영향을 받을 수 있었다.

Fig. 3은 하중 9.8N, 미끄럼속도 0.1 m/s일 때 진공

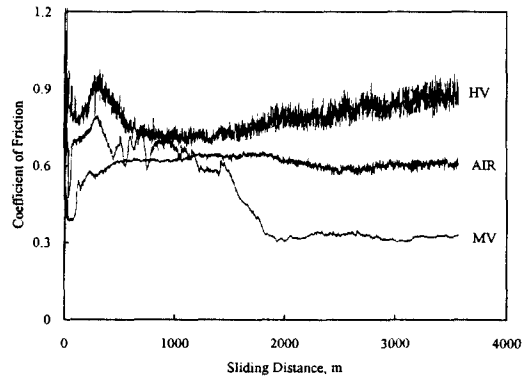


Fig. 3. Friction under various conditions of air pressure. (HV: 5.0×10^{-3} Pa, MV: 1.3 Pa).

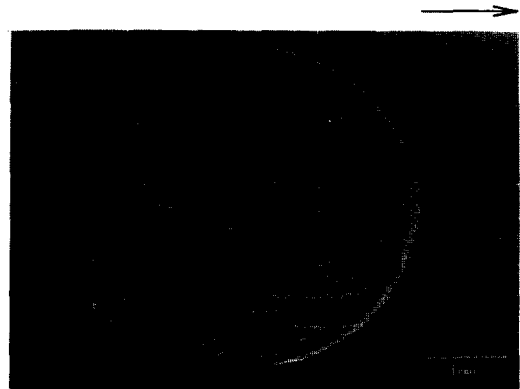


Fig. 4. A wear scar on the ball after a test at which conditions are under ambient air, under the normal load of 9.8N and at the sliding velocity of 0.1 m/s. (Direction of sliding is shown by a dark arrow in Figures).

도에 따른 마찰계수의 변화를 보여주고 있다. 대기 중에서의 마찰계수는 약 0.6으로 상대적으로 안정화된 값을 나타내고 있으나, 진공 하에서의 마찰계수는 진공도에 따라 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 고진공(5×10^{-3} Pa)하에서의 마찰계수는 대기에서보다 크게 나타났으나, 중진공(1.3 Pa)하에서의 마찰계수는 마찰거리가 길어짐에 따라 약 0.3까지 크게 감소되었다. 진공도 변화에 따른 볼 표면의 마모형상들의 모습은 Fig. 4~6과 같다. Fig. 4는 대기중에서의 볼 표면의 마모흔(wear scar)으로, 연삭(abrasive)마모에 의해 미끄럼방향으로의 심한 미끄럼 자국을 보이고 있으며, 붉은 색의 마모입자들을 디스크의 마모트랙 주변에서 관찰할 수 있었다. 이때 생성된 마모입자의 XRD 분석결과에서 α - Fe_2O_3 산화철의 특성 peak들이

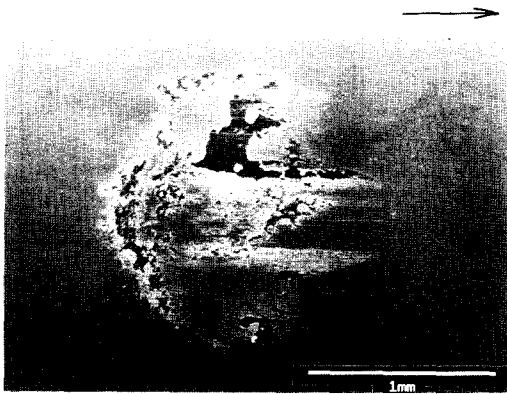


Fig. 5. A wear scar on the ball under a medium vacuum (1.3 Pa , $P=9.8\text{N}$, $v=0.1\text{m/s}$). Note that thin layer patches are partly formed on the surface.

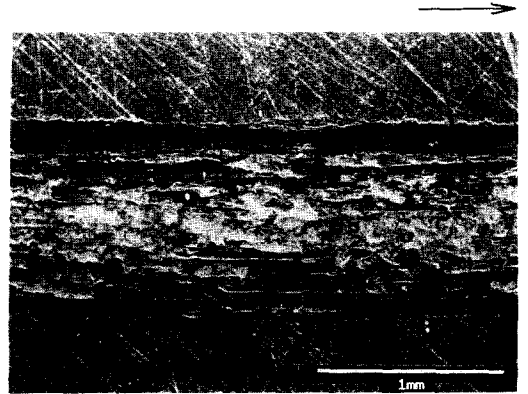


Fig. 7. A wear track of steel disk under a medium vacuum; thin layer of contact patches are visible along the direction of sliding.

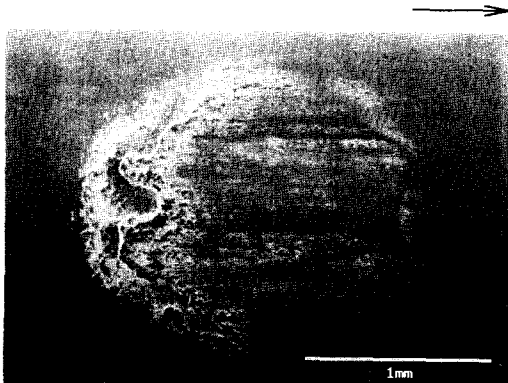


Fig. 6. A wear scar on the ball under a high vacuum ($5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, $P=9.8\text{N}$, $v=0.1\text{m/s}$). Note that wear debris are compacted at inlet area.

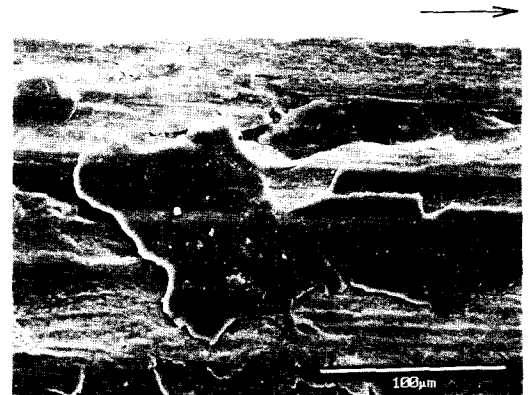


Fig. 8. An enlarged view of the Fig. 7 showing the formation of a thin layer contact patch.

발견되었다. 진공하에서 볼 표면의 손상은 Fig. 5~6에서와 같이 대기에서와 그 유형이 다르게 나타났다. 볼 표면의 마모흔은 대기에서보다 그 크기가 상대적으로 작았으며, 불완전한 원형의 모습이고, 부분적으로 검회색의 얇은 층으로 덮혀있었으며, 미끄럼방향의 입구쪽에 많은 입자들이 쌓여서 고착되어 있음을 볼 수 있었다. 디스크의 접촉표면에서도 볼에서와 같이 검회색의 마모입자들이 생성되어 표면에 고착되어 있음이 관찰되었다. Fig. 7은 중진공 하에서의 디스크 마모트랙의 모습을 보여주고 있다. 검회색의 연속적인 형태로 표면에 고착된 접촉부(patch)의 모습이 미끄럼 방향을 따라 보이는데, Fig. 8의 확대된 모습으로부터 이러한 접촉부가 미세한 마모입자들로 밀집 소결되어 표면 위에 얇은 층의 큰 고원(plateau)의 모습으로

형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같이 진공하에서 생성된 마모입자들을 XRD를 이용하여 분석한 결과에서는 철의 산화물이 분명하게 검출되지 않았다. 그러나, 얇은 층의 고원부 표면을 AES/SAM(Auger Electron Spectroscopy/Scanning Auger Microscopy)으로 분석한 결과에서는 표면에 얇은 두께의 산화층이 형성되어 있음을 발견할 수 있었다. 이에 대해서는 이후의 분석결과 해석(3.2.2)에 자세히 설명되어 있다. Fig. 9는 중진공(1.3 Pa)하에서 하중을 변화시켰을 때 미끄럼거리에 따른 마찰계수의 변화를 나타내고 있다. 저하중하에서가 고하중하에서 보다 빨리 마찰계수가 감소하였으며, 마찰계수가 0.3정도로 낮아져 안정화되는데 걸리는 임계거리는 하중의 증가에 따라 증가하였다. 그러나 하중 29.4N 의 조건 하에서는 마찰계

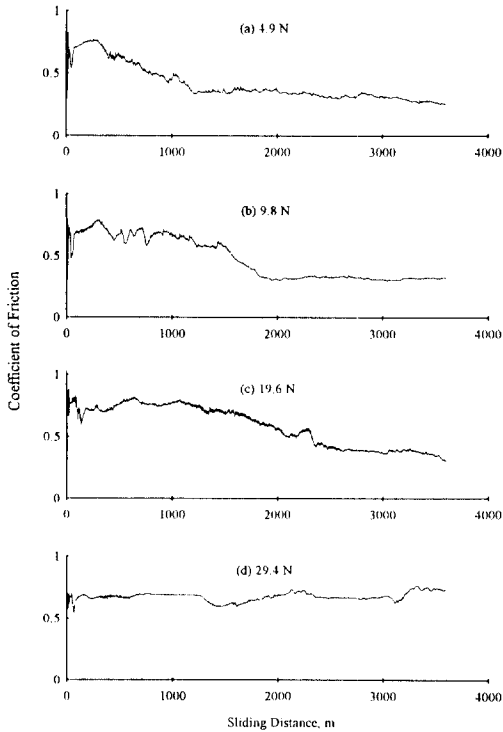


Fig. 9. Variation of the coefficient under various normal loads with the sliding distance (under a medium vacuum and $v=0.1$ m/s): (a) under 4.9N; (b) under 9.8N; (c) under 19.6N; (d) under 29.4N.

수가 전 시험기간 동안에 걸쳐 감소되지 않았으며, 이 후 미끄럼 거리를 7200 m로 증가시켜 시험한 결과에서도 마찬가지로 감소되지 않았다. Fig. 10은 각 진공조건에서 미끄럼속도 변화에 따른 디스크 마모율의 변화를 나타내고 있다. 평균 마모율은 동일한 조건 하에서 3번 이상의 반복시험 결과로부터 산출하였다. 시험결과는 시험조건 하에서 마모율이 약 $10^{-11} \text{m}^3/\text{m}$ 정도임을 보여주고 있는데, Lim과 Ashby [11]에 의해 분류된 mild oxidation 마모기구에서의 마모율 범위와 일치하고 있음을 알 수 있었다. 대기 중에서의 디스크 마모율은 미끄럼속도의 증가에 따라 감소하였는데, 이러한 현상은 Fig. 11에서 보는 바와 같이 볼 표면의 마모흔 모습에서도 관찰되었다. 즉, Fig. 11(1.0 m/s)은 Fig. 4(0.1 m/s) 보다 마모흔이 상대적으로 작으며 마모입자들이 입구 부위에 부분적으로 밀집되어 고착되어 있음을 볼 수 있다. 진공 하에서의 볼의 마모율은 대기에서의와 같이 속도 증가에

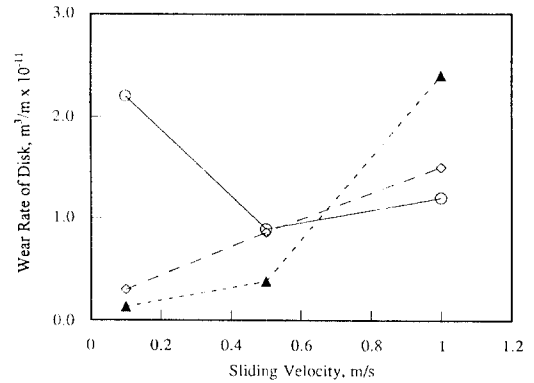


Fig. 10. Wear rates of the disk at varying sliding velocities ($P=9.8\text{N}$): '○' in air; '◇' under a high vacuum; '▲' under a medium vacuum.

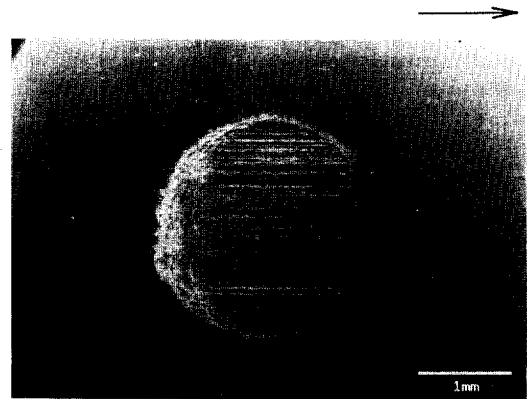


Fig. 11. A wear scar on the ball after a test in ambient air ($P=9.8\text{N}$, $v=1.0$ m/s).

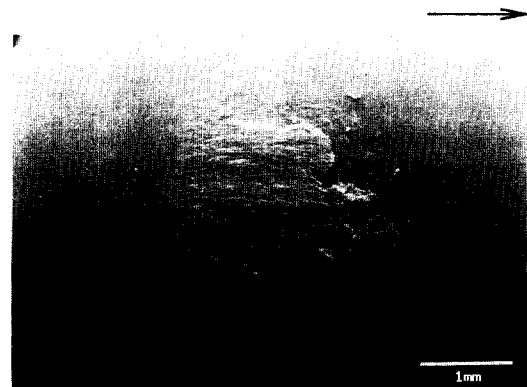


Fig. 12. A wear scar on the ball after a test under a high vacuum ($P=9.8\text{N}$, $v=1.0$ m/s); showing that a large scale of thick film is accumulated on the surface.

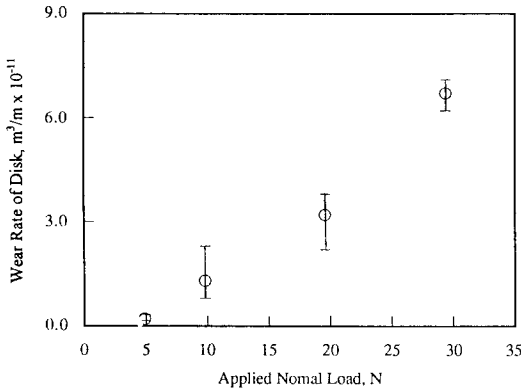


Fig. 13. Wear rates of the disk under various, normal loads ($P=1.3$ Pa, $v=1.0$ m/s).



Fig. 14. A surface damage of a steel disk under a high load ($P=29.4$ N) and under a medium vacuum ($v=0.1$ m/s); compacted wear debris are fractured in a fatigue.

따라 감소하였으나, 디스크 마모율은 미끄럼속도의 증가에 따라 증가하였다. Fig. 12는 고진공, 고속의 미끄럼 속도(1.0 m/s)에서의 볼 표면의 마모흔 모습으로써, 마모흔 경계에 디스크 표면으로부터 물질전이가 되어 두껍게 밀착된 층이 관찰되었다. 이와 같이 물질전이된 층의 두께는 미끄럼 속도의 증가에 따라 증가하였는데, 상기 결과는 고속에서의 디스크 마모율 증가현상과 일치하였다. Fig. 13은 중진공 하에서 하중변화에 따른 디스크 마모율의 변화이다. 디스크의 마모율은 하중 증가에 따라 선형적으로 증가함을 볼 수 있었으며, 고하중에서는 접촉 patch의 얇은 층이 파괴됨을 볼 수 있었다. Fig. 14는 이미 밀집 고착된 고원부의 접촉 patch 표면이 반복되는 높은 접촉응력 하에서 피로파괴되는 모습을 보여 주고 있다.

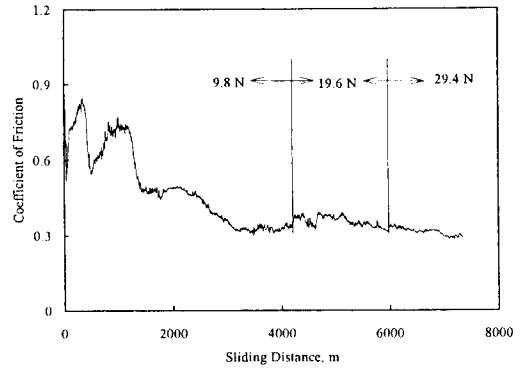


Fig. 15. Friction coefficient under increasing step loads ($v=0.1$ m/s and under a medium vacuum); the applied load (9.8N) first increased to 19.6N and secondly to 29.4 N step by step.

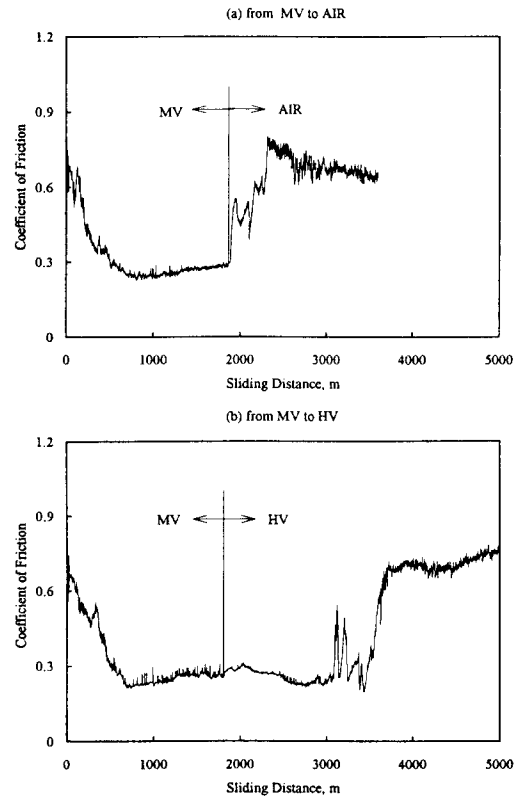


Fig. 16. Variations of coefficient of friction of a test at which initial environmental condition is changed from a medium vacuum to: (a) an ambient air (b) a high vacuum.

접촉면에 효과적인 산화층이 형성되면, Fig. 15에서 처럼 하중이 증가되어도(단계적으로 9.8N-19.6N-29.4

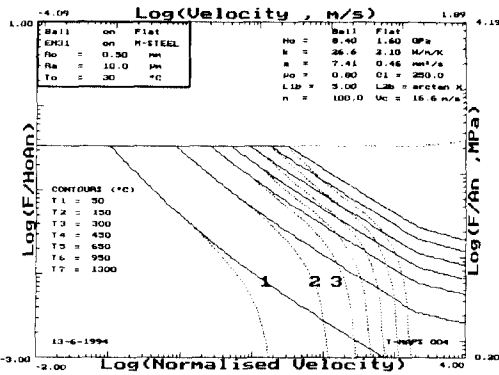


Fig. 17. A temperature map for the sliding of EN31 ball on mild steel disk (full line: bulk temperatures, broken line: flash temperatures). The conditions at varying sliding velocities are marked ('1' at 0.1 m/s, '2' at 0.5 m/s, '3' at 1.0 m/s). Contact pressure are those at the end of the test.

N) 마찰 계수는 안정화된 낮은 값을 유지하였다. Fig. 16은 중진공(1.3 Pa)하에서 일정 거리의 미끄럼운동 후 마찰계수가 안정화 되었을 때, 각기 (a)는 대기로 (b)는 고진공(5×10^{-3} Pa)으로 진공도를 변화시켰을 경우 마찰계수의 변화를 보여주고 있다. 대기로 변화되었을 경우 마찰계수는 순간적으로 급격하게 증가하여 대기 상태에서의 평균 마찰계수치인 약 0.6 정도로 접근하였다. 고진공으로 진공도가 증가한 경우 역시, 고진공 분위기 시험 하에서의 높은 마찰계수치로 접근하였으나, (a)에 비해 낮은 마찰계수가 상당한 미끄럼 기간동안 안정된 값으로 유지되었다. 이러한 결과들로부터 접촉 patch의 얇은 층의 형성과 마찰에 미치는 그 역할이 진공도에 의해 크게 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 고 찰

4-1. 마찰열

시험조건에서의 국부돌기 접촉면적의 표면온도 (flash temperature)와 공칭접촉면적 표면에서의 온도 (bulk temperature)를 Ashby 등[17,18]에 의해 개발된 소프트웨어 'T-MAPS4'를 이용하여 이론적으로 계산하였다. Fig. 17은 ball-on-disk 접촉형태에서 접촉압력과 미끄럼속도에 의해 표면에 발생하는 bulk temperature(실선)와 flash temperature(점선)들의 등온선 지도이다. 좌측 하단에 각 등온선들의 온도가

°C로 되어 있으며, 우측 상단에 볼과 디스크의 대표적인 재료특성치, 마찰계수 및 기타 조절이 가능한 변수들의 값들을 나타내고 있다. 디스크의 열전도율은 참고문헌[2]로부터 강의 산화물(steel oxide)의 열전도율을 인용하여 사용하였다. 볼의 공칭접촉반경($R_0 = 0.5$ mm)은 대기중에서 0.1 m/s의 미끄럼 속도 조건일 때 시험후 볼의 마모흔의 측정으로부터 구한 값이다. Ball-on-disk의 접촉형태에서는 볼이 마모됨에 따라 접촉면의 크기가 증가하여 접촉압력이 점차적으로 감소하기 때문에 표면의 온도는 낮아진다. 굵은 숫자 (1-3)는 하중 9.8N하에서 미끄럼속도가 각각 0.1, 0.5, 1.0 m/s일 때 시험 종료시의 계산된 온도 위치를 나타내고 있으며, 미끄럼 속도가 0.1 m/s일 때의 flash temperature는 접촉 초기에는 약 650°C에서 시험 종료시에는 70°C 정도로 변화되었음을 추정할 수 있다. 'T-MAPS4'에 의하여 접촉 초기단계에서 계산된 온도범위는 Quinn 등[2]에 의해 제시된 저합금강에서의 표면산화 온도범위와 잘 일치하고 있다.

4-2. 표면의 화학적 분석

AES/SAM(Auger Electron Spectroscopy/Scanning Auger Microscopy)의 ion beam을 이용한 depth profiling의 분석을 통하여 표면 및 깊이 변화에 따른 부표면(subsurface)에서의 화학성분의 변화(주로 산소)를 조사하였다. 표면의 오염층을 제거하기 위해 ion sputter cleaning을 한 후 마모된 디스크 표면을 분석하였다. 깊이 방향의 재료 성분 분포를 분석하는 depth profiling을 위하여 표면의 sputtering에는 3 kV의 argon beam을 사용하였으며, 샘플이 깎여나가는 sputtering 속도는 SiO_2 기준시편으로 약 143 Å/min 이었다. Fig. 18은 하중 9.8N, 미끄럼 속도 0.1 m/s일 때 (a) 대기, (b) 중진공, (c) 고진공하에서 마모시험한 디스크 표면들에서의 C, O, Fe의 depth profiling의 결과이다. 그림 (a)는 대기에서의 depth profiling의 결과로 표면에 얇은 층의 산화층이 형성되어 있음을 보여 주는데, 마모입자내에 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 의 특성 peaks가 발견된 XRD 분석과 아울러 표면이 붉은색을 띠는 모습 등의 사실로부터 판단하여 보면 강의 표면이 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 의 산화철의 형태로 산화되었음을 확인할 수 있다. 산화층의 두께는 SEM 사진분석 및 depth profiling의 결과 약 0.1 μm 정도(order)로 측정되었다. 그림 (b)는 중진공(1.3 Pa)하에서 검회색의 얇은 층이 디스크 마모트랙에 고원 형태의 접촉 patch를 형성하고 있는 표면에서의 depth profiling의

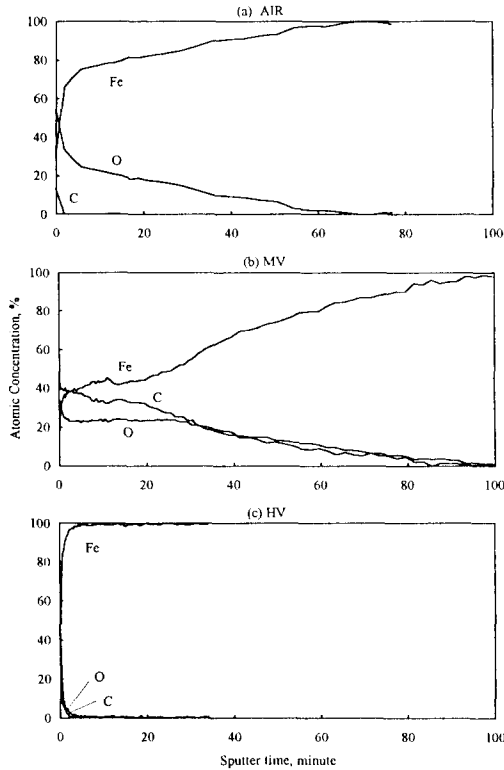


Fig. 18. AES depth profiles of elemental concentrations (Sputter rate, 143 Å/min; specimens tested under 9.8N and 0.1 m/s sliding velocity): (a) in ambient air; (b) on a dark-gray coloured thin layer region under a medium vacuum; (c) under a high vacuum.

결과이다. 표면부에서의 산소의 농도가 대기 조건보다 낮으나 깊이에 따른 산소의 농도가 안정적으로 나타나 있다. 그러나, 고원 형태의 접촉면 patch 사이에 균테균테 분포되어 있는, 밝은 빛을 띠는 표면 부위에서의 depth profiling 결과에서는 산소 농도가 무시할 정도로 희박하게 나타났다. 상기와 같은 AES에 의한 표면부(0.1 μm order)에서의 저농도 산소 분포의 측정결과가 상기 조건 하에서 분석했던 마모입자들의 XRD 결과에서 뚜렷한 산화철의 특성 peaks를 발견하지 못한 원인으로 사료된다. 저진공하에서 생성된 산화철의 종류를 정확하게 규명하기 위하여는 더욱 정밀한 화학분석을 수행하여야 하나, 본 연구에서는 다음과 같은 사실들을 근거로 하여 상기의 표면이 Fe 금속입자 및 Fe₃O₄의 산화철로 혼합되어 덮여 있는 것으로 판단하였다. 표면에 Fe₃O₄의 산화철이 생성되면, 미끄럼운동시 Fe₃O₄이 이른바 고체윤활제의

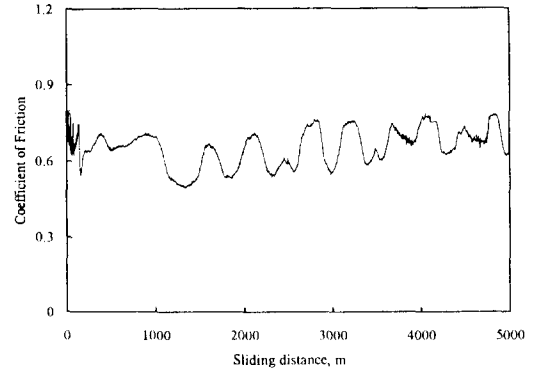


Fig. 19. Variations of the coefficient of friction of a test at which conditions are under $P=9.8N$, $v=0.5$ m/s and a medium vacuum.

역활을 하여 마찰력과 마모량이 감소될 수 있음은 이미 연구보고된 바 있다[10,19]. 마모 트랙 표면이 붉은색이 아닌 검회색으로 나타나고, 중진공 하에서 생성된 마모입자들이 대기에서의 것(red oxide; 상자상체)에 비하여 높은 대자율(magnetic susceptibility)을 띠는 사실들도 Fe₃O₄ 산화철 형성의 근거를 뒷받침해 준다. 또한 화학량적 관점에서 볼 때 산소가 적은 조건 하에서 철은 대기에서보다 더 적은 양의 산소와 화학 반응하므로 α-Fe₂O₃ 형태보다는 Fe₃O₄(또는 FeO)의 산화철의 형태로 형성될 가능성이 높다. 이는 오일 윤활하에서 저탄소강의 미끄럼 표면에 Fe₃O₄ 산화철 피막이 생성되는 현상과 유사하다[19]. 고진공 하에서는 그림 (c)에서 보는 바와 같이 산화철 피막이 매우 얇은 층을 이루고 있음을 보여주고 있다. 피막의 두께는 SEM 및 depth profiling 결과로부터 약 100 Å 정도 (order)이었으며, 또한 피막의 형태도 중진공 하에서 형성된 연속된 형태의 산화층과는 다르게, 고진공하에서는 얇은 산화층이 표면에 산개하여 형성되어 있었다.

4-3. 산화보호막의 형성기구

금속표면에 산소가 화학적으로 흡착되면, 표면에 산화보호막이 형성되어, 금속과 금속간의 접촉이 방지되고, 마찰과 마모가 크게 감소된다. 시험 결과로부터 산화막의 형태와 두께는 진공도에 따라 다르며, 저탄소강 미끄럼표면에서 형성된 산화철의 얇은 피막이 금속간의 상호접촉을 방지하기 위한 보호막 역할을 함을 확인하였다. 이러한 층의 형성은 일반적으로 마모입자의 발생과 물질전이를 수반하고, 표면에

밀착되어 고원(plateau) 형태의 접촉부(contact patches)를 형성하였다. 산화층은 볼과 디스크의 양쪽 표면에서 형성되었으나, 두께는 볼에서 더 두껍고 미끄럼 속도의 증가에 따라 증가하였다. 진공하에서의 미끄럼 마찰계수의 변화는 대기와는 다른 종류의 산화철의 형성과 피막 두께에 따라 영향을 받았다. 진공하에서 미끄럼 표면에 형성된 산화막의 형성기구는 대기에서와 다르게 나타났는데, 시험결과 다음과 같이 산화막 형성기구를 추정할 수 있었다. 즉, 진공 하에서 미끄럼 초기 단계의 마찰계수는 대기 상태에서보다 높으므로, 결과적으로 국부 접촉에서 높은 마찰열을 초래하고, 표면에 큰 소성변형을 야기시키며, 많은 양의 마모입자를 생성케 할 것이다. 이러한 것들은 미끄럼거리의 증가에 따라 표면의 산화를 촉진하고, 마모입자들의 밀착/소결에 의하여 피막의 두께를 증가시킬 것이다. 접촉면에서의 높은 온도(약 400~650 °C) 발생이 Fe_3O_4 산화철 형성의 필요조건을 만족시켜, 접촉면에 보호막을 형성시킨다. 마찰계수는 상기의 결과들로 인한 보호막의 형성으로 인하여 초기에는 급격히 감소하나, 형성된 산화층이 매우 약하고 얇기 때문에 파괴되어 마찰계수가 다시 증가하며, 이후의 산화층의 형성과 파괴는 자기-조절(self-regulating)에 의해 반복된다. Fig. 19는 중진공하, 0.5 m/s의 시험조건에서의 미끄럼거리에 따른 마찰계수의 변화로 이와 같은 자기-조절에 의한 마찰계수의 변동을 잘 보여 주고 있다. 그러나, 중진공 및 저하중 (19.6N 이하), 미끄럼 속도가 저속(0.1 m/s 이하) 인 접촉조건 하에서의 마찰계수는 일정한 미끄럼 거리의 임계거리를 지나면 낮게 감소하여(약 0.3) 안정화되었는데, 이와 같은 현상은 임계거리 동안에 접촉면의 산화막 두께가 점차 성장하여 효과적인 산화보호막이 마모표면에 형성된 결과로 판단되었다. 상기 조건 이상의 고진공, 고하중, 고속의 미끄럼속도에서는 마찰열에 의해 접촉면에 높은 표면온도가 발생하나, 마찰계수는 감소하지 않고 변동되는 모습을 나타나고 있다. 이러한 현상은 Kragelski 등[20]에 의해 제안된 설명에서와 같이, 고하중 접촉시 산화보호층이 파괴됨으로써, 또는 미끄럼속도가 고속일 때 산화막 형성을 위한 반응시간이 불충분하기 때문에 산화층의 두께가 얇아지므로써 발생되어지는 현상으로 설명할 수 있으며, 산화보호막의 형성은 마찰열에 의한 표면의 온도(flash temperature) 증가 외에 진공도, 접촉하중 및 미끄럼속도 등 접촉조건에 영향을 받음을 발견할 수 있었다.

5. 결 론

진공조건 변화에 따른 저탄소강(low carbon steel)의 미끄럼 마찰마모 시험 결과로부터 표면산화층의 형성과 접촉조건에 상관관계를 다음과 같이 규명할 수 있었다.

(1) 미끄럼 마찰계수 및 마모를 감소시키는데 효과적인 산화보호막이 미끄럼 표면에 형성되는 데에는 진공도, 하중, 미끄럼속도 등의 연계된 임계조건이 있음을 발견하였다.

(2) 임계조건 하의 마찰과 마모의 감소는 미끄럼 표면에 Fe_3O_4 산화철의 얇은 피막이 형성됨으로써 발생하며, 이러한 표면 산화는 중진공 하에서 실제 접촉면에서의 높은 표면온도와 심한 소성변형에 의하여 촉진되었다.

(3) 산화보호막은 주로 디스크 표면에서 발생한 마모입자들의 물질전이에 의하여 접촉면으로의 밀착과 소결에 의해서 성장하였다.

(4) 볼 표면에서 형성된 산화보호막의 두께가 디스크 표면에서 보다 두껍게 형성되었으며, 미끄럼속도에 따라 증가하였다.

(5) 저탄소강 표면의 마찰과 마모를 감소시키는데 효과적인 산화보호막 형성의 임계조건은 저속의 미끄럼 속도(0.1 m/s 이하), 저하중(9.8N 이하), 중진공(1.3 Pa)이었으며, 그 이상의 접촉조건 혹은 고진공하에서 형성된 산화막은 접촉표면을 보호하기에 효과적이지 못하였다.

참 고 문 헌

1. T.F.J. Quinn, "Reviews of oxidational wear; Part I and II: The origins of oxidational wear", *Tribology International*, Vol. 16, pp. 257-271 (Part I) / pp. 305-315 (part II), 1983.
2. T.F.J. Quinn, D.M. Rowson and J.L. Sullivan, "Application of the oxidational theory of mild wear to the sliding wear of low alloy steel". *Wear*, Vol. 65, pp. 1-20, 1980.
3. T.F.J. Quinn, J.L. Sullivan and D.M. Rowson, "Origin and development of oxidational wear at low ambient temperatures", *Wear*, Vol. 94, pp. 175-191, 1984.
4. T.F.J. Quinn and W.O. Winer, "The thermal aspects of Oxidational wear", *Wear*, Vol. 102, pp. 67-80, 1985.
5. C.B. Allen, T.F.J. Quinn and J.L. Sullivan, "The oxidational wear of high ferritic steel on austenitic

- steel", Trans. of ASME, Journal of Tribology, Vol. 107, pp. 173-179, 1985.
6. J.L. Sullivan and S.G. Hodgson, "A study of mild oxidative wear for conditions of low load and speed", Wear, Vol. 121, pp. 95-106, 1988.
 7. D.K. Chaudhuri, A.J. Slifka and J.D. Siegarth, "Friction and oxidative wear of 440C ball bearing steels under high load and extreme bulk temperatures", Wear, Vol. 160, pp. 37-50, 1993.
 8. T. Sasada, K. Hiratsuka and H. Saito, "Adsorption of surrounding gas molecules on pure metal surfaces during wear process", Wear, Vol. 135, pp. 251-264, 1990.
 9. R.Y. Lee and Z. Eliezer, "On the critical thickness of protective films at sliding interfaces", Wear, Vol. 95, pp. 165-175, 1984.
 10. F.P. Bowden and D. Tabor, The friction and lubrication of solids, Chapter VII and XIV, Clarendon Press, Oxford, 1986.
 11. S.C. Lim and M.F. Ashby, "Wear mechanism maps", Acta metall. mater. Vol. 35, No. 1, pp. 1-24, 1987.
 12. M.D. Sexton and T.E. Fisher, "The mild wear of 52100 steel", Wear, Vol. 96, pp. 17-30, 1984.
 13. I.V. Kragelski, M.N. Dobyichin and V.S. Kombatov, Friction and wear - calculation methods, Translated from the Russian by N. Standen, Chap. 3, pp. 129-134, Pergamon press, 1982.
 14. A. Iwabuchi, H. Kubosawa and K. Hori, "The dependence of the transition from severe to mild wear on load and surface roughness when the oxide particles are supplied before sliding", Wear, Vol. 139, pp. 319-333, 1990.
 15. F.H. Stott and G.C. Wood, The influence of oxides on the friction and wear of alloys, Tribology, 11 (4) August, pp. 211-262, 1978.
 16. 공호성외, "진공 및 특수환경 분위기에서 사용하기 위한 마찰 및 마모시험 장치", 대한민국특허, 출원번호 제 94-10027 호, 1994.
 17. M.F. Ashby, J. Abulawi and H. Kong, "Temperature maps for frictional heating in dry sliding", STLE Tribology Trans., Vol. 34, No. 4, pp. 577-587, 1991.
 18. H. Kong and M.F. Ashby, "Wear mechanisms in brittle solids", Acta metall. mater. Vol. 40, No. 11, pp. 2907-2920, 1992.
 19. S.C. Kang and K.C. Ludema, "The breaking in of lubricated surfaces, In K.C. Ludema (ed.), Proc. Int. Conf. on Wear of Materials, Vancouver, April 14-18, 1985, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1985.
 20. I.V. Kragelski, I.M. Lyubarsky, M.I. Guslyakov and V.G. Savkin, Friction and wear in vacuum, Mashinostroenie Press, Moscow, referred as from Chapter 3 of ref. [13] pp. 129-134, 1973.
 21. S.W.E. Earles and M.G. Hayler, "Wear characteristics of some metals in relation to surface temperature", Wear, Vol. 20, pp. 51-57, 1972.