

프레팅 마멸에 의한 접촉 응력 및 표면현상 변화 예측에 관한 연구

김종성[†] · 이상돈 · 조용주[‡]

부산대학교 기계공학부

A study on estimating of contact pressure and surface shape change due to fretting wear

Jongsung Kim[†], Sangdon Lee and Yongjoo Cho[‡]

Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received December 18, 2008; Revised February 15, 2009; Accepted February 20, 2009)

Abstract – Fretting occurs wherever short amplitude reciprocating sliding between contacting surfaces is sustained for a large number of cycles. The fundamental characteristic of fretting is the very small amplitude of sliding and combination of different wear mechanism. Predicting wear is important to enhance reliability of the parts. The objective of this paper is to predict fretting wear by using a contact analysis considering wear process. This construction will give us important information to know a property of fretting wear.

Key words – contact pressure(접촉응력), fretting(프레팅), shape change(형상변화), wear(마멸), Reliability(신뢰성)

1. 서 론

프레팅 마멸은 작은 진폭을 가진 미끄럼 운동에 의해 발생하는 마멸을 말한다. 일반적으로 프레팅 마멸은 리벳 및 볼트, 핀 등과 같은 체결체의 미세진동에 의해 유발된다. 이러한 체결부의 마멸은 허용 공차 이상의 마멸을 유발할 수 있으며, 피로 균열 및 프레팅 피로로 이어질 수 있다. 특히 항공기와 같은 주요 구조물에서는 많은 체결체가 부품간의 체결을 위하여 사용되고 있으며, 이들 체결체 사이에서 프레팅이 발생하고 있다. 주요 구조물에서의 프레팅에 의한 파손은 경제적 손실 및 인명피해 등으로 이어질 수 있으므로 프레팅 방지 방안 및 프레팅 손상에 대한 수명 예측이 필요할 것이다.

이영제[1], 김동구[2]등은 원자력 발전의 핵연료 피복

관에 발생하는 프레팅 마멸등을 실험적으로 파악하고자 하였으며, O. Vingsbo[3]는 진폭과 수직 하중의 관계에서 프레팅 메커니즘을 분류하고자 하였다. 이를 바탕으로 이영제[4], 정성훈[5]은 마찰력을 이용하여 프레팅을 분류하기도 하였다.

기계부품에 대한 일반적인 피로 및 손상허용에 대한 정량적인 평가 방법은 확립되어 있지만, 프레팅 현상 및 마멸에 대한 정량적인 평가는 아직 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 마멸이 진행됨에 따른 형상 변화를 고려한 접촉 응력을 이용하여 접촉 응력의 변화 및 그에 따른 마멸 형상을 예측해보고자 한다.

2. 이 론

2-1. 프레팅(fretting)

프레팅은 접촉면사이의 왕복 미끄러짐 운동을 통해 발생한다. 프레팅이 발생할 수 있는 상한계가 있으며

[†]주저자 : goodjjong@pusan.ac.kr

[‡]책임저자 : yjcho@pusan.ac.kr

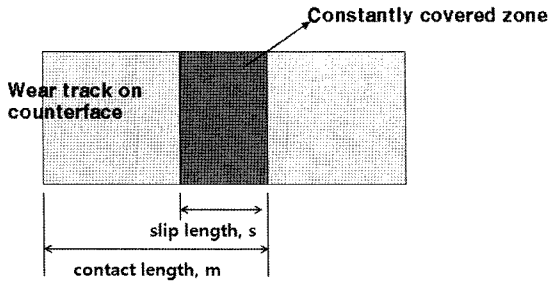


Fig. 1. Concept of MOC.

대부분의 연구에서는 이를 150~300 μm으로 규정하고 있으며, 상한계점 이상에서는 프레팅 마멸보다 기계적 마멸이 우세하게 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 1 μm 이하의 진폭에서도 프레팅은 발생한다는 것을 발견하였다. 프레팅 마멸과 기계적 마멸을 구별하는 것은 절대적 진폭보다는 마멸 흔적의 면적과 접촉 면적 비로 정의된 MOC(Mutual Overlap Coefficient) 개념을 통해 정의하는 것이 더욱 적절할 것이다[6].

예를 들면, Fig. 1와 같이 접촉길이 m인 편이 슬립 진폭 s만큼의 미끄럼 운동을 한다면 MOC의 값은 $m/(s+m)$ 이 될 것이다. 이때 접촉길이가 슬립 진폭의 거리가 같다면 MOC의 값은 0.5가 될 것이다. 일반적인 실린더와 피스톤 링과 같은 경우의 미끄러짐 마멸에서는 MOC의 값은 매우 작아 0.1을 넘지 않는다. 반대로 프레팅에서는 MOC 값은 1에 근접한다.

$$MOC = \frac{\text{contact area}}{\text{wear track area}} \quad (1)$$

프레팅은 다음과 같은 세가지 방식의 거동을 보인다[3].

- ① Stick regime
- ② Mixed stick-slip regime
- ③ Gross slip regime

Fretting maps에서는 프레팅 마멸시 이를 진폭과 수직하중의 관계로 분류하였으며, fretting fatigue maps에서는 프레팅 피로시 최대 사이클 응력 및 수직하중의 관계로 분류하였다[7].

2-2. 실험장치

기존 프레팅 실험에서는 미세 진폭을 캠등과 같은 기계적 방법으로 회전운동을 직선운동으로 변환하였다[3]. 그러나 이러한 방법은 캠 제작상의 오차나 캠의 변형으로 인한 실험적 오차를 발생시킬 수 있다. 그래서 본 연구에서는 piezoactuator와 같이 전압을 조절함으

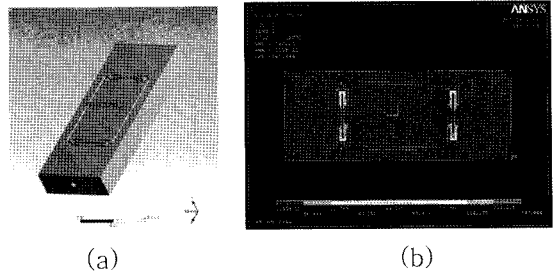


Fig. 2. (a) base design by using ANSYS workbench analysis, (b) Confirmation of tension and compression through ANSYS analysis.

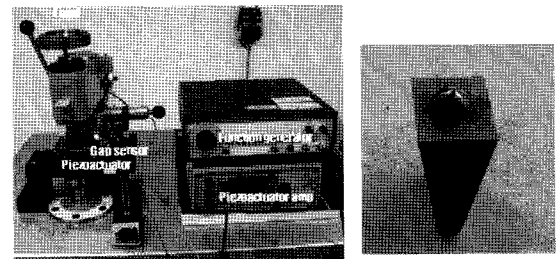


Fig. 3. Experiment equipments & specimen.

로써 stroke를 정확히 제어 할 수 있는 실험 장치를 제작, 사용하였다.

Piezoactuator로 stroke를 발생시킬시 인장력에 비해 압축력이 떨어지는 단점이 있다. 이 점을 보완하기 위해 Fig. 2와 같이 판스프링의 형태로 일정한 인장력과 압축력을 낼 수 있게 제작하였다.

2-3. 접촉해석

일반적인 두 탄성체의 접촉 해석은 상당표면과 강체면의 접촉으로 생각할 수 있다. 본 연구에서는 기본적으로 영향 함수를 이용한 접촉 해석을 사용하였다. Fig. 4와 같은 등방성 및 균질한 두 non-conformal 탄성체에 수직 하중이 작용할 때 접촉 면적과 압력분포를 알기위해 사각조각 표면에 작용하는 균일한 분포 하중에 의한 변위의 해를 이용하여 두 탄성체사이의 응력을 해석하고자 한다.

강체구의 등가 곡률 반경 및 상당 탄성계수는 다음과 같다[8].

$$R_{eq} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$E_{eq} = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (3)$$

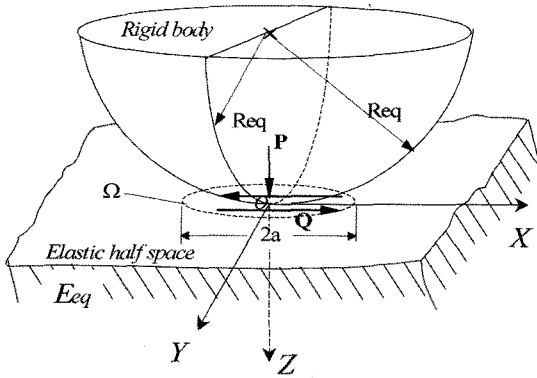


Fig. 4. Contact geometry of an equivalent body.

Fig. 4의 표면 위의 두 점간의 접촉 전 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x,y) = R_{eq} - \sqrt{R_{eq}^2 - (x^2 + y^2)} \quad (4)$$

접촉문제를 풀기 위해서는 다음과 같은 구속조건에 따른 반복 연산이 필요하다.

접촉영역에서는

$$p(x,y) > 0, e(x,y) = 0, \quad (5)$$

접촉영역 밖에서

$$p(x,y) = 0, e(x,y) > 0, \quad (6)$$

여기서 $p(x,y)$ 는 접촉압력이며 $e(x,y)$ 는 변형후의 강체면과 거친 표면간의 거리를 나타내며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$e(x,y) = h_1(x,y) + h_2(x,y) + u_1(x,y) + u_2(x,y) - \delta \quad (7)$$

접촉 영역 내에서는 Boussinesq의 식으로 나타내면 다음과 같은 관계를 가진다[8].

$$\frac{2}{\pi E_{eq}} \iint_{\Omega} \frac{p(x'-y')}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} dx' dy' = \delta - e(x,y) \quad (8)$$

사각조각면(patch)내에서는 균일한 압력을 가지므로 다음과 같이 단순 이산화될 수 있다.

$$\sum_{i=1}^k F_{i,j} P_j = \delta - e_i \quad (9)$$

여기서, k 는 접촉영역 Ω 내에서의 사각조각면의 수이고 j 는 요소 j 에서의 수직분포하중에 의한 요소 i 에서의 영향을 나타내는 영향함수(influence function)로서

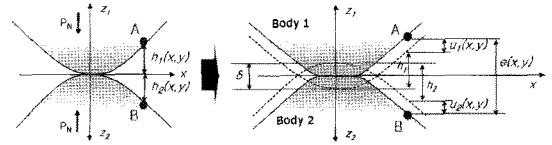


Fig. 5. Contact of elastic bodies.

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{i,j} = \frac{2}{pE_{eq}} \left[[x+a] \ln \left\{ \frac{(y+a) + \sqrt{(y+a)^2 + (x+a)^2}}{(y-a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x+a)^2}} \right\} + (y+a) \ln \left\{ \frac{(x+a) + \sqrt{(y+a)^2 + (x+a)^2}}{(x-a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x-a)^2}} \right\} + (x-a) \ln \left\{ \frac{(y-a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x-a)^2}}{(y+a) + \sqrt{(y+a)^2 + (x-a)^2}} \right\} + (y-a) \ln \left\{ \frac{(x-a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x-a)^2}}{(x+a) + \sqrt{(y-a)^2 + (x+a)^2}} \right\} \right] \quad (10)$$

2-4. 마멸깊이 측정모델

기존의 프레팅 마멸 예측 모델은 2D모델링을 기초로 하여 ABAQUS 등의 소프트웨어를 사용하였다. 하지만 2D 모델링의 문제점은 실린더의 길이를 무한대로 가정하였으며, 이로 인해 edge effect등이 고려되지 못한다는 점이다. [9] 또한 마멸이 진행됨에 따라 접촉형상이 변화되며, 그에 따른 압력을 새롭게 구해야 할 것이다. ABAQUS대신 접촉해석을 이용하면 같은 조건을 해석하는데 걸리는 시간이 하루에서 30분 이내로 단축할 수 있다[10].

Stowers와 Rabinowicz의 가정에 의하면 프레팅 마멸은 접촉 표면에 대한 접촉 압력을 이용한 Archard's equation으로 평가할 수 있는 것으로 가정하였다. 일반적인 Archard's equation 은 다음과 같다[10].

$$\frac{V}{S} = K \frac{N}{H} \quad (11)$$

정량적인 예측을 위해 수직압력이 작용하는 이산화된 표면의 마멸 프로파일을 나타내기 위해서는 위의 식을 다음과 같이 수정할 필요가 있다.

$$\frac{dV}{dS} = K \frac{dN}{H} \quad (12)$$

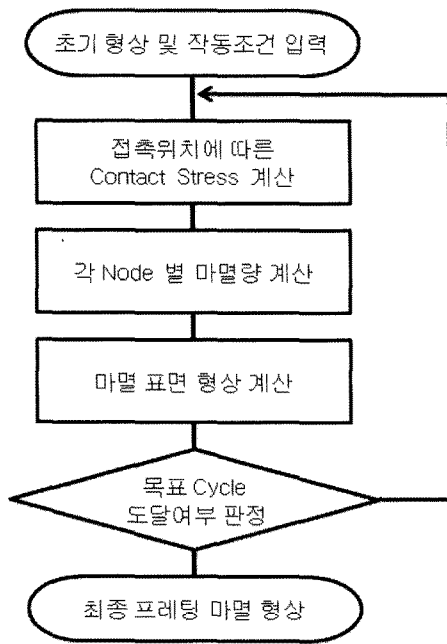


Fig. 6. Flow chart for prediction of wear height.

양변을 dA 로 나누면 다음과 같은 식이 된다.

$$\frac{dV}{dAdS} = K \frac{dN}{HdA} \quad (13)$$

dV/dA 항은 마멸 높이 dh_w 가 되며, dN/dA 항은 접촉 압력 $p(x,y)$ 항으로 대체할 수 있다. K 및 H 항은 일정한 값이므로 k 로 대체한다면 다음과 같은 식이 된다.

$$dh_w = kp(x,y)ds \quad (14)$$

이를 각 사이클 당 일반적인 식으로 바꾸면 다음과 같은 식을 도출할 수 있다.

$$h_w = k \int_0^n p(x,y)s(n)dn \quad (15)$$

마멸량 예측 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 초기의 형상 및 수직 하중 및 진폭에 대한 형상을 입력 받는다.
- ② 초기 시작점에서 형상에 따른 접촉 압력을 계산한다.
- ③ 초기 입력한 진폭에 도달할 때 까지 x방향으로 해석격자만큼 움직이면서 접촉 해석을 반복한다.
- ④ 목표 진폭까지 접촉 해석을 다하였다면 각 해석 격자에서 해석결과로 나온 접촉압력의 값을 이용하여 위, 아래 시편의 마멸량을 계산한다. 이때 위시편의 마

Table 1. Conditions of fretting test

Normal load(N)	30
Initial maximum Hertzian stress (MPa)	427
Stroke (μm)	20
Total number of wear cycles	1000
Wear coefficient(Pa^{-1})	2×10^{-14}
Radius of a sphere (mm)	30

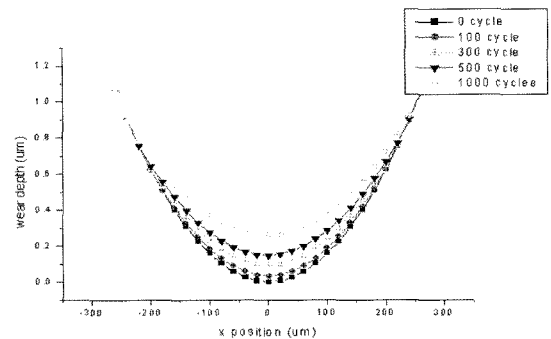


Fig. 7. Predicted wear profile of upper specimen.

멸폭은 접촉폭과 같을 것이며, 아래 시편의 마멸폭은 접촉폭과 진폭의 합과 같을 것이다.

⑤ 전 단계의 마멸형상에서 ④에서 구한 마멸량을 제거함으로써 새로운 마멸 형상을 구한다.

⑥ 목표 사이클까지 도달하였다면 해석을 마치고, 그렇지 않다면 ②의 단계부터 다시 해석을 시작한다.

3. 결 과

본 연구에서 구와 평판의 접촉을 해석 대상으로 삼았으며 그 제원은 다음과 같다.

1cycle이 지날때마다 마멸량을 계산 후 위, 아래 시편의 형상을 변화시켰으며 이에 따른 접촉압력의 변화를 예측해보았다.

위, 아래 시편의 최대 마멸 깊이는 약 $0.26 \mu\text{m}$ 이며 마멸이 진행됨에 따라 접촉폭이 $380 \mu\text{m}$ 에서 1000사이클이 지났을 때의 접촉폭은 $520 \mu\text{m}$ 로 증가하였다. 이는 초기 접촉 면적보다 접촉 면적이 증가하여 접촉압력이 낮아졌으며, 이에 따라 마멸 진행속도가 늦어짐을 알 수 있다.

아래 시편의 마멸 형상을 살펴보면 음폭 패인 구덩이 형상으로 나타나는 것을 알 수 있으며, 위 시편 역시 초기의 구형상에서 보다 시편의 곡률이 크게 변하

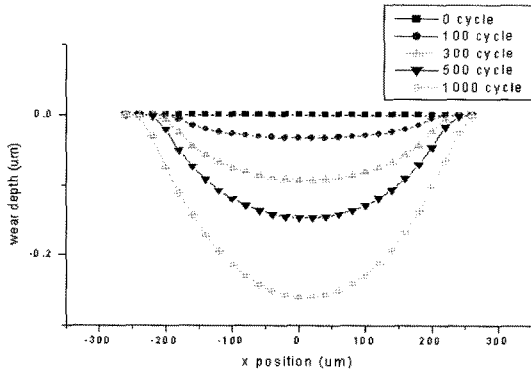


Fig. 8. Predicted wear profile of lower specimen.

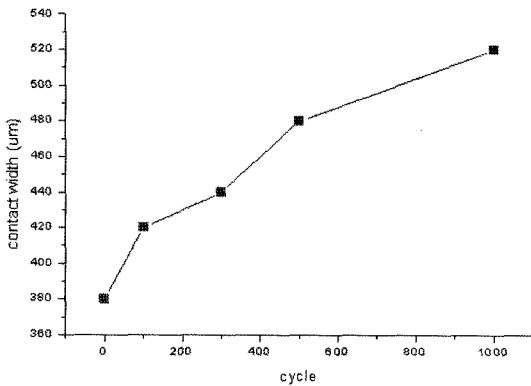


Fig. 9. Contact width.

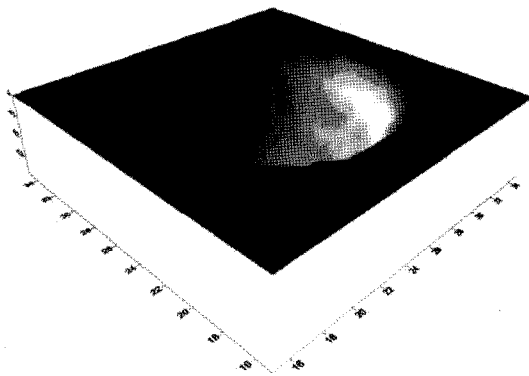


Fig. 10. Wear profile. (3D)

는 것을 알 수 있다.

접촉 압력은 초기 427 MPa에서 사이클이 커짐에 따라 최대 접촉 압력은 줄어든다. 1000사이클이 지난 후의 최대 접촉 압력은 251 MPa로 초기 압력의 58.7% 수준으로 매우 낮아졌음을 알 수 있다. 1000사이클에

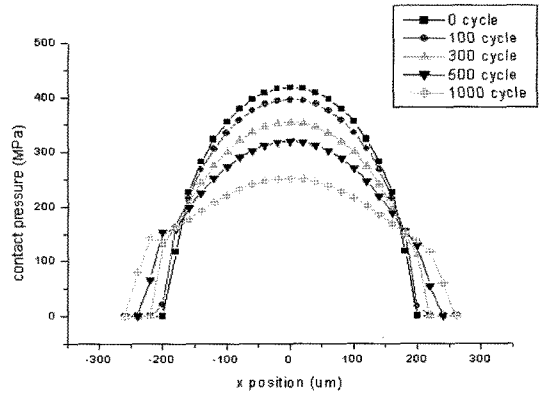


Fig. 11. Predicted evolution of contact pressure with cycles.

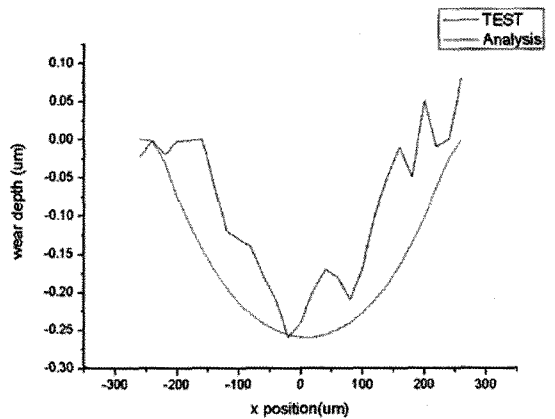


Fig. 12. Comparison of prediction and experimental results for worn surface profiles.

서 접촉 면적의 가장자리에 압력이 높게 발생하는 것은 20 μm 이동하였을 경우 접촉 해석을 하여 모서리에 집중 응력이 발생하였기 때문이다. Fig. 12는 실제 실험과 해석을 비교한 그래프이다.

4. 결 론

본 연구에서는 접촉해석을 이용하여 사이클이 지남에 따라 마멸형상이 변하는 것을 고려하여 프래팅 마멸 형상을 정량적으로 예측하였다.

본 연구에 의한 결과는 다음과 같다.

- (1) 접촉응력을 이용하여 마멸이 지남에 따라 위,아래 시편의 형상을 예측하였다.
- (2) 마멸이 진행됨에 따라 접촉폭은 증가하였으며 접촉압력은 감소함을 알 수 있었다.

후 기

참고문헌

본 연구는 지식경제부와 한국 산업기술재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

기호설명

a	x방향의 격자 크기/2
b	y방향의 격자 크기/2
e(x, y)	강체면과 표면간의 거리
E	탄성계수
Eeq	상당 탄성계수
f(x, y)	변형전 두 물체간의 거리
Fi, j	영향 함수
h(x, y)	기준면과 탄성체간의 거리
hw	마멸 깊이
H	경도
k	Archard 마멸 계수(유차원)
K	Archard 마멸 계수(무차원)
nt	총 사이클 수
N	수직 하중
p(x, y)	접촉 압력
Pj	접촉 압력
Req	상당 반경
s(n)	사이클에 따른 진폭거리
S	총 슬립량
u(x, y)	탄성체의 변형 후 이동거리
V	마멸량
δ	탄성 변형량
v	프라이슬비

1. 이영제, 김진선, 박세민, 박동신, “핵연료 피복관과 지지격자 사이에 발생하는 프레팅 마멸에 미치는 유동의 영향”, 한국윤활학회지, Vol. 24, No. 4, pp. 186-189, 2008.
2. O. Vingsbo, “On fretting maps”, WEAR, 126, pp. 131-147, 1988.
3. 김동구, 조정우, 이영제, “증기발생기 튜브 재질의 미끄럼 마멸 및 프레팅 마멸 특성”, 한국윤활학회지, Vol. 17, No. 5, pp. 380-385, 2001.
4. 이영제, 정성훈, 용석주, “프레팅 조건 하에서 스틱-슬립 현상이 마찰력에 미치는 영향”, 한국윤활학회지, Vol. 21, No. 1, pp. 16-20, 2005.
5. Seong-hoon Jeong, “Friction and wear characteristics due to stick-slip under fretting conditions”, Tribology transactions, Vol. 50, pp. 564-572, 2007.
6. Gwidon W.Stachowiak and Andrew W.Batchelor, “Engineering tribology”, pp. 593-600.
7. Z.R. Zhou, K. Nakazawa, M.H Zhu, N. Maruyama, Ph. Kapsa and L. Vincent, “Progress in fretting maps”, Tribology International 39, pp.1068-1073, 2006.
8. Love, A. E. H. “The Stress Produced in a Semi-Infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary”, Proc. Roy. Soc. London, Vol. A228, pp. 377, 1927.
9. C.H.H. Ratsimba, “Measurement, analysis and prediction of fretting wear damage in a representative aeroengine spline coupling”, WEAR, Vol. 257, pp. 1193-1206, 2004.
10. I.R. Mc Coll, J. Ding and S.B. Leen, “Finite element simulation and experimental validation of fretting wear”, WEAR, Vol. 256, pp. 1114-1127, 2004.