

알루미늄 판 표면에 용사된 Al/SiC의 마모 거동 Wear Behavior of Al/SiC in Thermal Spray Process

김형자 · 이광진 · 유만희 · 이성호

H. J. Kim, K. J. Lee, M. H. You and S. H. Lee

Key Words : Thermal spray process[TSP], Severe condition, Coefficient of friction, Wear rate, Moderate wear.

Abstract : Tribological property of the ceramics used in severe condition was investigated and both Al₂O₃ ball and Al/SiC composite made by thermal spray process[TSP] were used as a specimen in this study. Four kinds of material couple in ball and disk specimens were tested in the dry condition by using ball-on-disk type tribo-tester. Friction coefficient, surface roughness, wear rate, and photograph of the worn surface were investigated. Generally, High SiC contents[40~50%] specimens showed very low friction coefficient below 0.05 and little wear rate in dry condition. And also, low SiC contents[0%] specimens showed a moderate wear rate and high coefficient of friction at the same condition.

1. 서 론

기술의 발전과 더불어 좀 더 저렴한 원가로 우수한 기계적 성질과 제품의 품질을 향상시키며 극한 조건에서도 안정성과 경제성이 있는 소재의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

알루미늄 기지 복합체는¹⁾ 금속으로서는 사용 불가능한 특수 환경에서도 사용이 가능하므로 다양한 영역에서의 습동 재료로서 기대는 매우 크다.

그러나 알루미늄의 경우 중공업에 이용되는 금속에 비하여 소형이고 작으며 하중이 적게 요구되는 일상생활용품에서부터 특수 분야까지 다양하게 이용되고 있으나, 회전체 등에서 마찰시 경도가 낮은 일반 알루미늄의 경우 마멸이 신속히 진행되어 구조물의 수명에 직접적인 영향을 미친다. 이에 적절한 윤활제의 공급으로 문제를 해결하려는 시도가 진행되고 있으며, 다른 방법으로는 표면을 경하게 하고 표면의 윤활성 향상이나 응착방지를 위한 표면처리법으로 내마멸성^{2~4)}을 개선하고 있다. 금속 매트릭스 복합체들은 통상 다양한 기법, 즉 파우더 메탈리지(분말야금학), 교반주조, 압착주조, 액체금속 침투, 등이 이용되고 있으나 이런 기법들은 높은

공정비용, 긴 공정시간, 복잡한 형상 생성의 어려움 등 단점을 가지고 있다. 한편, 열용사 기법은 이러한 단점을 해결할 수 있으며 다양한 제품을 제작할 수 있는 장점을 가지고 있다.

세라믹스의 마찰마멸 특성에 관한 연구는^{5~6)} 어느 정도 진행되어 왔으나 아직까지 알루미늄 판 모재 표면에 Al/SiC의 용사에 관한 마찰·마멸의 메커니즘(mechanism)이 불분명하므로 이에 대한 기초 연구가 필요하다.

세라믹 입자들에 의해서 강화된 금속 매트릭스 복합체는 단일석재의 재료에 비해 세라믹의 높은 강도, 낮은 열팽창계수, 우수한 내마멸성 때문에 커다란 관심을 받고 있으며 다양한 종류의 표면 개선법과 고품질의 박막을 물리적, 화학적으로 표면에 증착시켜 내식성 및 내열성 등을 향상시킬 수 있다는 점에서 산업분야에 광범위하게 응용될 것으로 기대된다.

세라믹과 금속의 마찰, 마멸의 분위기 및 환경변화에 의한 연구로서 Sasaki⁷⁾는 세라믹스의 마찰·마멸에 미치는 분위기, 습도 및 수분의 영향에 대한 연구 결과로서 마찰 면에 형성된 물의 흡착층 및 수산화물이 마찰에 큰 영향을 끼친다고 보고하고 있으며, 또한 무윤활 상태 대기 중에서 Ghar⁸⁾, 岩佐⁹⁾는 어떤 마찰, 마멸 조건에 있어서 세라믹스와 금속의 조합이 세라믹스 또는 금속끼리의 조합보다 양호한 내마멸성을 나타내고 있다고 보고하고 있다. Anderson¹⁰⁾은 저 하중, 고속도에서의 각종 세라믹

접수일 : 2006년 4월 3일
이광진(책임저자) : 창원기능대학
E-mail : kwangjlee@kopo.ac.kr Tel. 011-643-0417
김형자 : 부경대학교 기계공학부
유만희, 이성호 : 부경대학교 대학원

스와 강철과의 마찰, 마멸실험에서 산화알루미나 (Al_2O_3), 질화규소(Si_3N_4)의 순서대로 양호한 내마멸 성능을 나타내고, 더욱이 접촉면에 생성되는 이착막이 마찰, 마멸 특성에 큰 영향을 미친다는 것으로 보고 되고 있다.

이러한 연구는 무윤활 상태와 수중에서와 같은 국부적인 환경에서의 제 특성에 대한 결과이며 실제적으로, 공정이 간단하고 비용도 저렴하며 사용가능성이 있는 열용사 기법에 의해 제조된 탄화규소 (SiC) 강화 알루미늄 복합재의 마멸 특성을 연구한 결과는 아직까지 드물다.

따라서 본 연구에서는 열용사 공정(thermal spray process, TSP)을 이용 다양한 체적비의 Al 104와 탄화규소(SiC)를 코팅한 탄화규소 강화 알루미늄 매트릭스 복합재(AMCs)를 건식마찰과 마멸 실험을 통하여 산업용으로 사용되는 기계부품의 트라이볼로지 설계의 기초 자료를 제시하는 것을 목적으로 마찰·마멸표준시험법 중 볼-온-디스크방식의 시험기를 이용하여 일정한 미끄럼 속도와 미끄럼 거리 및 수직하중의 변화에 따른 마멸거동을 살펴보고자 한다.

2. 실험방법

2.1 실험 방법

Fig. 1은 마찰 마멸 시험기의 개략도 이며, 실험은 상향의 수직 스피ndl의 척에 디스크 시편이 설치되어 회전하며 볼은 하향에서 접촉되는 구조로 되어 있다.

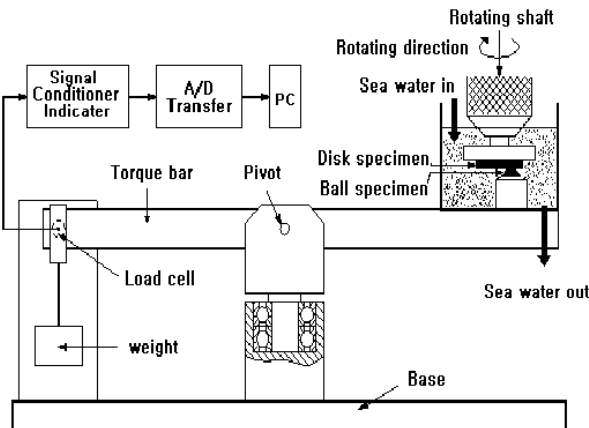


Fig. 1 Schematic diagram of Ball-on-disk type wear tester

수직 하중은 피벗(pivot)에 지지되어 있는 토크

바 (torque bar)의 한 쪽 끝에 볼 시편을 고정시키고 그 반대쪽의 추(weight)에 의하여 볼 시편이 디스크 시편에 접촉함으로써 하중이 가해지도록 되어 있다.

마찰계수의 측정은 스피ndl이 회전하면 볼과 디스크의 접촉면 사이에는 마찰력이 발생하고 마찰력은 토크 바(torque bar)의 회전을 구속하는 로드 셀(capacity 25LBS, model GM, Sensotec)에 의하여 전압신호로 변환된다.

이 신호는 신호처리기와 아날로그/디지털 변환기를 거쳐서, 데이터는 퍼스널 컴퓨터에 연속적으로 저장된다.

Table 1 Mechanical properties of Al/SiC TSP (thermal spray process)

SiC volume rate.(%)	0	10	20	30	40	50
Micro hardness (HB)	31.7	31.8	35.5	41.3	36.4	38.7
Coating thickness (μm)	800					
Particle dimension (μm)	40					
PRACAIR, Al-104(%)	100	90	80	70	60	50
SiC Aldrich, #37809-7(%)	0	10	20	30	40	50
Coating color	Silver gray					

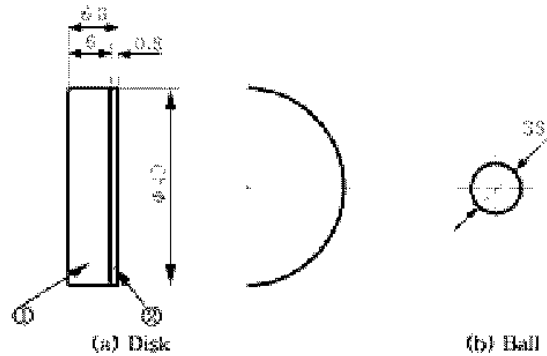


Fig. 2 Shape and dimensions of specimens

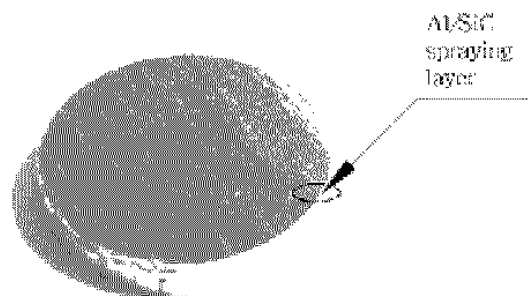


Fig. 3 Disk of specimen (D40 X t6.8)

2.2 시험편

마찰 및 마멸실험에 사용된 시험편은 Fig.2와 3과 같다. SiC 혼합체적비율별로 열용사한 디스크는 연삭작업과 래핑작업을 거쳐 용사층의 두께 약 0.8mm, 표면 평균조도가 R_{max} 0.5 μ m가 되게 가공하여 사용하였다. 볼은 지름 8mm의 산화알루미나 (Al_2O_3) 구를 사용하였다. Table 1은 용사된 시험편의 기계적 특성이다

2.3 마멸실험

실험은 Fig. 1의 실험 장치를 소형 수직 밀링머신에 고정 설치한 후 미끄럼속도를 0.24m/s로 하고 하중을 변수로 하여 실시하였다. Table 2와 3은 세부적인 실험 조건의 조합을 나타낸 것이다. 이 조건에 따라 상온대기 중에서 마찰 및 마멸 실험을 실시하여 마찰계수를 측정하였다.

실험 후 광학 현미경과 표면 거칠기 시험기 (surftest SJ -301, mitutoyo)를 사용하여 각 실험 조건에 따른 마멸 면을 관찰하였다.

그리고 제작된 시험편은 탄화규소(SiC)의 함유량에 따른 조직 분포 및 조직단면을 주사전자현미경 (SEM)으로 촬영하여 실험의 효율성을 고려해 SiC 함유량20%를 제외한 0%, 10%, 30%, 40%, 50%를 선정하여 사용하였다. 모든 실험은 3회 실시하고 그에 따른 평균값을 결과치로 하였다.

Table 2 Experimental conditions

Parameters	Condition	
Sliding velocity v (m/s)	0.24	
Normal load F_N (N)	Dry	1, 2, 3
Temperature T (°C)	Dry	20+1
Sliding distance L (m)	1000	
Lubricant	Dry	

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Al/SiC 체적비와 마찰하중 변화 실험

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6에서는 체적비와 마찰 하중의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 나타낸 그림이다. 1N에서 마찰계수는 약100m 지점부터 400m 지점까지 증가하다 그 이후는 거의 일정하게 유지되었고, 2N에서 는 약200m 지점부터 600m지점까지는 증가한 후 마찰계수의 변화 추이가 1N과 유사하게 일정하도록 유지되었다. 그러나 3N에서는 약

250m에서 700m까지는 마찰계수가 증가하고 그 이상에서도 적은 값이지만 마찰계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 6에서 3N의 경우 SiC 체적비 0%와 10% 시험편에서는 미끄럼거리 약200m에서부터 600m까지는 격렬마멸(severe wear) 형태에 가까운 현상을 나타냈다.

Table 3 Combination of test conditions

Lubricating condition	Normal load[N]	Sliding velocity [m/s]	Material	
			Ball	Disk %
Dry	1			SiC 0
				SiC 10
				SiC 30
				SiC 40
				SiC 50
Dry	2	0.240	Al_2O_3	SiC 0
				SiC 10
				SiC 30
				SiC 40
				SiC 50
Dry	3			SiC 0
				SiC 10
				SiC 30
				SiC 40
				SiC 50

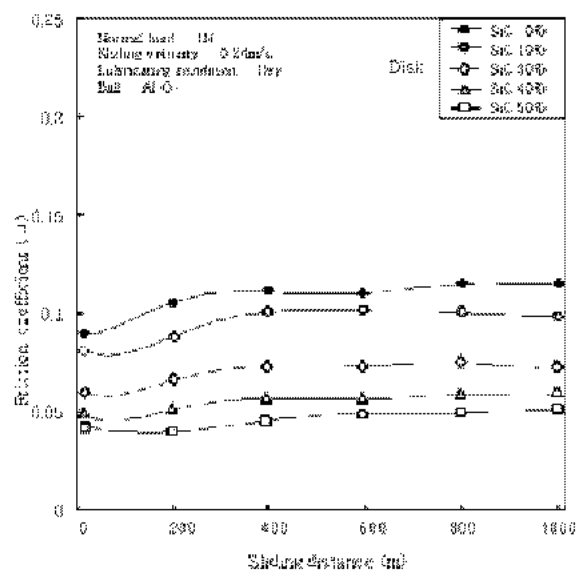


Fig. 4 Friction coefficient for sliding distance ; 1N SiC content by percentage 0~50%

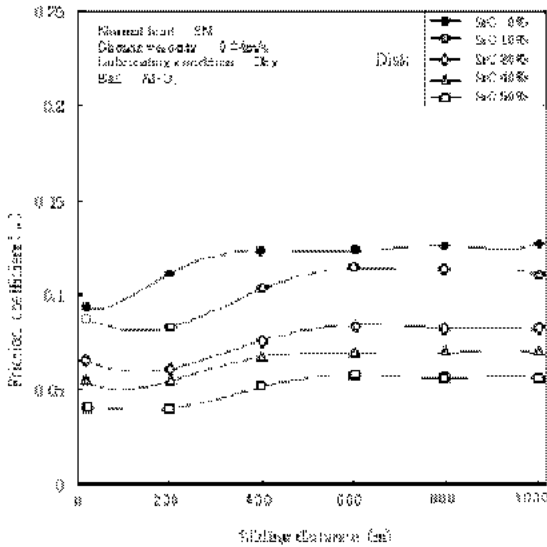


Fig. 5 Friction coefficient for sliding distance ; 2N SiC content by percentage 0~50%

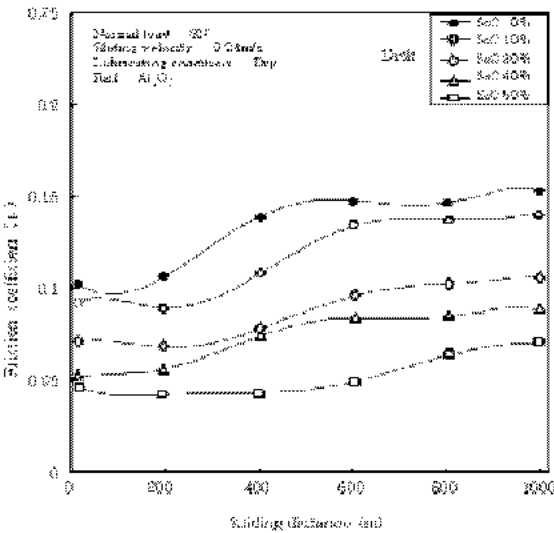


Fig. 6 Friction coefficient for sliding distance ; 3N SiC content by percentage 0~50%

그리고 1N, 2N에서는 나타나지 않았던 현상이 3N에서 체적비 40% 에서는 마찰계수의 변화 폭이 조금 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 하중이 커질수록 SiC입자와의 접촉이 증가되는 것이 원인이라 볼 수 있다.

종합적으로 평가하면 Fig. 7와 같이 마찰계수는 마찰하중이 증가하면 증가하고, SiC 체적비가 높을수록 마찰계수는 감소된다는 것을 알 수 있다.

또 Al 104의 특성 때문에 저 하중에서는 윤활제 역할에 따른 마찰계수의 변화가 거의 없다는 것을 알 수 있다.

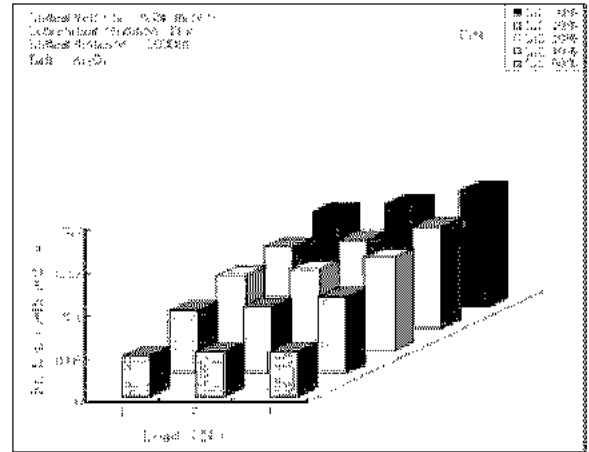


Fig. 7 The averaged values of friction coefficient under various content by percentage; 1N, 2N, 3N

3.2 마찰면의 거동

Fig. 8은 하중 및 체적변화에 따른 표면거칠기를 나타고 있다.

건식마찰 1N의 하중에서 SiC 체적비에 따른 표면 거칠기 값의 차이가 작았으나 2N, 3N에서는 SiC 체적비 0%와 10%에서 디스크 표면 거칠기 값이 크게 나타났으며, 2N에서 SiC 체적비 40% 시험편에 표면 거칠기 값이 크게 나왔다. 이것은 Al/SiC 입자의 분포 특성이라고 볼 수 있다.

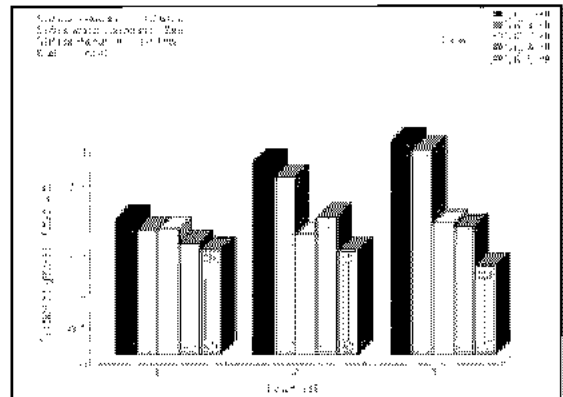
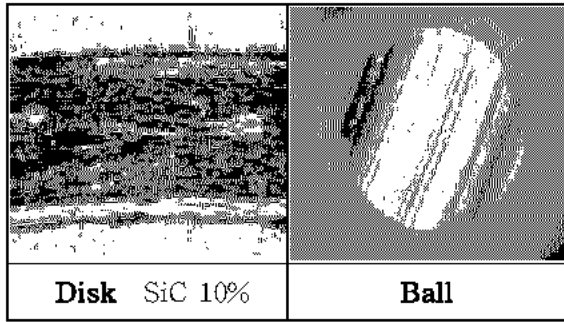


Fig. 8 The surface roughness under load 1N, 2N,3N

Fig. 9은 체적비가 적은 (SiC 10%)인 디스크와 하중 (3N)이 큰 경우 디스크의 마모트랙과 볼의 형상을 나타냈다. 마멸트랙양쪽 가장자리에서 밀려 올라온 압흔에 Al 104의 전연성의 특징이 나타나 있으며, 볼의 마찰작용 방향에서 좌우90° 방향 가장자리에 볼의 마멸형상이 도자기의 상하부 모양처럼 나타나 있다.



Sliding velocity: 0.24m/s, Sliding distance: 1000m,
Lubricating condition: dry

Fig. 9 Photographs of the worn surface (X50) ; 3N

3.3 디스크 시험편의 마멸률

마멸량은 DIN 50321에 따른 측정방법으로 미끄럼거리에 따른 마멸량을 선택하였다.

여기서 마멸률 K_s 는 마멸시험 전의 디스크 시험편의 무게와 미끄럼거리가 1,000m 경과 후의 무게를 정밀 전자저울(0.0001g)로 5회 측정한 평균값을 마멸량으로 구한 다음 아래 식을 대입하여 산출하였다.

$$K_s = \frac{W}{LF_N} \quad (g/Nm)$$

여기서 W : 정밀 전자저울에서 측정된 마멸량(g)

F_N : 하중(N)

L : 미끄럼거리(1,000m)

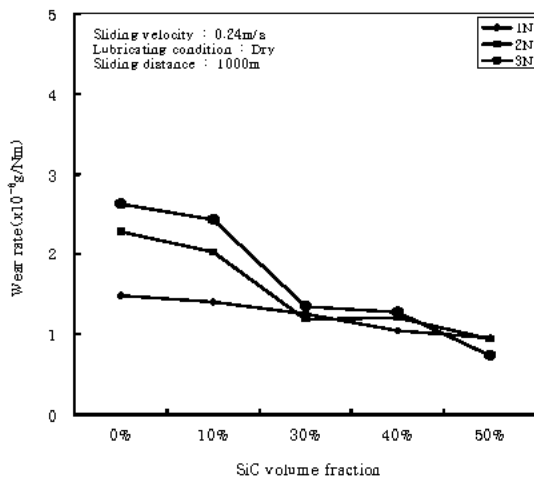


Fig. 10 Wear rate by SiC vol.% ; dry

Fig. 10은 건식마찰로 실험하여 SiC 체적비에 따라 하중별로 마멸률 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 SiC의 체적비가 증가하면 마멸률이 감소하고, 하중의 증가에 따라 마멸율이 증가하였다. 이것은

예상된 경향과 일치한다. 건식마찰 1N의 0%, 10%에서 마멸량이 적은 것은 저 하중에서 알루미늄 입자의 윤활 역할로 미소마멸(mild wear)이 일어난 것이라고 볼 수 있다. 또 초기마멸에서 표면돌기 파괴 후, 새로이 형성된 표면은 미끄럼거리의 증가에도 불구하고 접촉 면적이 넓어짐에 따라 접촉압력이 낮아져 하중에 대한 상대적 저항성이 크게 영향을 미쳤기 때문이라고 판단된다.

4. 결 론

열용사 기법(thermal spray process, TSP)으로 제작된 탄화규소 입자 강화 알루미늄 매트릭스 복합재를 우수한 내 마멸 특성을 가진 산화알루미나(Al_2O_3)와 조합하고 하중을 변수로 하여 마찰 및 마멸시험을 한 결과 다음과 같은 경향이 나타났다.

- 1) SiC 체적비가 높을수록 마찰계수는 감소하고 마찰하중이 증가할수록 마찰계수가 증가하였다.
- 2) SiC 체적비가 증가하면 마멸률은 감소하고 체적비가 동일한 경우 하중의 증가에 따라 마멸률도 증가 하였다.
- 3) 동일 하중에서 SiC 체적비가 높을수록 표면 거칠기가 양호하게 나타났다.

참고 문헌

1. J. Zhang and A. T. Alpas, 1997, "Acta Metall. Master", 45, p. 513.
2. K. H. Zum Gahr, 1989, "Sliding wear of ceramic-ceramic, ceramic-steel and steel-steel pairs in lubricated and lubricated contact", Wear, 133, pp. 1-22.
3. J. P. Singh, 1988, "Effect of flaws on the fracture behavior of structural ceramics: a review", Adv. Ceram. Master, 3, pp. 18-27.
4. K. H. Lee and K. W. Kim, 1994, "Effect of humidity and sliding speed on wear properties of Si3N4 ceramics", Materials Science and Engineering, A186, pp. 185-191.
5. Roberts. E. W, Wallbridge, N. and Dowson. D, 1983, "The Wear Characteristics of Sliding pairs of High density Polycrystalline aluminum oxide under both dry and wet conditions", Wear of Materials ASME New

York, pp. 202~211.

6. A. Ravikiran and B. N. Pramila Bai, 1993, "Water-lubricated sliding of Al_2O_3 against steel", *Wear*, 171, pp. 33-39.
7. 佐木, 1988, "セラミックスの 摩擦・摩耗に及ぼす水の 影響について", *潤滑*, Vol. 33, No.8, p.620,
8. ZumGhar, K.H, 1989, "Wear of Materials", *ASME*, 1-2, pp.431-440.
9. 岩佐, 1985, "機械 の 研究", 37-2, pp.45-52.
10. Anderson. P, 1989, "Materials Science and Engineering", A 109, pp.361-381.