2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

열처리가 Inconel 690 증기발생기 세관의 마모 특성에 미치는 영향

Effects of Heat Treatment on the Fretting Wear of Inconel 690 Steam Generator Tube

홍진기, 김인섭

한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

요 약

열처리에 입계 탄화물 형태의 변화가 Inconel 690 증기발생기 세관 마모 수명에 미치는 영향을 조사하였다. 열처리는 결정립 크기를 증가시키기 위한 용체화와 입계 탄화물의 형태를 변화시키기 위한 시효 열처리를 수행하였으며, 온도, 시간의 증가에 따른 결정립 크기의 증가와 입계 탄화물의 조대화를 확인하였다. 마모시험 결과, 입계 탄화물이 존재하는 경우 마모 수명은 입계 탄화물이 존재하지 않는 경우 보다 다소 증가하고, 입계 탄화물의 형태가 조대 할수록 마모수명이 증가하는 경향을 보였다. 마모실험 후 표면 관찰 결과, 입계 탄화물이 존재하는 경우 균열이 관찰되었으며, 입계 탄화물이 존재하지 않는 경우에는 균열이 관찰되지 않고 침식면이 관찰되었다. 이러한 경향은 입계에 존재하는 크롬 탄화물이 마모에 의한 균열의 생성 및 전파에 영향을 미치는 것을 보여준다.

Abstract

The effects of microstructure on fretting wear were investigated in Inconel 690 tube. The microstructural observation indicated that the solution annealing temperature and time affected the grain size of the Inconel 690 tubes. The carbide morphology, along grain boundaries, was mainly affected by thermal treatment time and temperature. The wear test results showed that specimens with coarse carbides along grain boundaries had more wear resistance. Cracks were found in specimens with carbides along the grain boundary, while few cracks were found in carbides free specimens. It seemed that the carbides on grain boundary assisted crack formation and propagation in carbide containing specimens.

1. 서론

원자력발전소의 매우 많은 구성요소 중 얇고 긴 형태의 구조물이 유체에 의한 진동에 노출되어 있다. 더구나 설계 및 가동조건에 따라 얇고 긴 세관과 지지판사이의 틈이 존재하게 되므로 마모 및 고주기 피로에 취약해진다. 이러한 마모의 위험은 세관에서만 일어나는게 아니라 원자로 노심의 제어봉관 같은 곳에서도 일어날 수가 있다. 즉 원자력발전소의 내부는 항상 고온 고압의 유체에 의한 진동이 항상 존재하며 이에 대한 설계과정에서의 충분한 고려가 필요하다.

원자력발전소 증기발생기 세관은 고온 고압의 유체에 의한 진동으로 인해 세관과 세관 지지판 사이의 상대적인 운동에 의해 마모 및 마손, 그리고 피로 현상이 일어난다. 가동경험으로 볼 때 매우 많은 국내외 증기발생기에서 이러한 현상이 발생하여 원자력발전소의 가동률을 현저히 감소시키어 왔다.

증기발생기 내부는 그 형태에 따라 다소 차이는 있으나 고온/고압 환경 하에서 가동되고 있다. 또한 원자력발전소에서의 증기발생기 고유의 역할 수행으로 인해 내부는 매우 빠른 유체의 흐름이 일어나고 있다. 이에 따라 증기발생기 상부의 U-자관 영역과 세관 지지판에서 유체에 의한 진동이 발생한다 [1, 2].

마모는 접촉하고 있는 물체들의 주기적이고 반복적인 상호 운동에 의해서 발생하며 이러한 반복적인 상호 운동의 결과로 물체의 표면 손실 및 손상으로 정의 된다. 특히 프레팅 마모의 경우 일반적인 슬라이딩 마모와는 접촉 물체의 상대적 운동 변위의 크기에 의해서 구분되며 원자력발전소 증기발생기의 유체유발진동에 의해서 일어나는 마모 현상은 슬라이딩과 충격 두 종류의 운동이 모두 일어나는 충격프레팅 마모이다 [3].

최근까지 증기발생기 마모 관련 연구는 증기발생기 세관과 세관 지지대 사이의 형상인자 따른 영향, 온도 등의 환경인자 영향 등에 대해서는 수행되어 왔으며, 미세구조 등 금속학적 관점에서의 연구는 거의 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Inconel 690 세관 시편의 미세구조 변화가 마모에 미치는 영향을 규명하기 위한 연구를 수행하였으며, 이를 이용한 마모 감소방안에 대해 연구하였다.

2. 실험 절차

2.1 시편 준비

이 연구에서 실험에 사용된 증기발생기 세관 시편은 Inconel 690TT 관형이며 세관 지지대 시편으로는 AISI 405 판상을 사용하였으며 한국중공업에서 제공 받았다. 시편의 조성은 표 1,2와 같다.

2.2 열처리

열처리는 결정립의 크기를 증가시키고 결정립과 결정입계의 탄화물을 제거하기 위한 용체화 처리 후에 입계 탄화물을 석출 시키기 위한 시효 처리를 수행하였다. 다양한 결정립의

크기와 탄화물의 형태를 얻기 위해 다양한 온도와 시간동안 열처리를 수행하였다. 열처리 시간과 온도는 표 3과 같다.

2.3 미세구조 관찰 및 미세경도 시험

열처리 후 시편의 미세구조를 관찰하기 위하여 6% 나이탈 (nital) 용액에서 4V의 전압으로 60초간 에칭하였으며, 결정입계의 탄화물 형태를 확인하기 위해서 인산과 증류수가 8:1의 비율로 혼합된 용액에서 3V 전압으로 20초동안 에칭을 하였다. 결정립의 크기 측정은 ASTM E 112 [4]에 수록된 방법으로 수행하였다.

미세경도는 비커스 경도계를 사용하여 25g 부하로 측정하였다.

2.4 마모 시험

시험에 사용된 마모시험 시스템은 마모실험 장치, 로드셀(load cell), 스트레인 게이지 (strain gauge) 및 미세저울로 구성되어 있다. 로드셀은 실험 시 세관 시편과 지지대 시편사이의 부하를 측정하며, 스트레인 게이지는 실험 시 세관 시편의 운동 변위를 확인하는데 사용된다. 마모 시험에 사용된 실험 장치는 그림 1과 같다.

마모 실험은 30Hz의 동일한 진동수에서 수행되었으며, 변위는 100μm, 200μm, 총회전수 (cycles)는 27,000, 54,000, 108,000의 조건에서 수행되었다. 마모량을 측정하기 위하여 실험 전후 질량을 측정하였으며, 질량 측정 전에는 초음파 세척기를 이용하여 시편을 세척하였다.

마모 실험 후에는 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 세관 시편의 손상 표면을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세구조 관찰 및 미세경도

열처리를 수행한 모든 시편은 열처리 이전 상태의 시편에 비해 결정립의 크기가 증가하였으며, 고온에서 장시간 용체화 열처리를 수행한 시편의 결정립의 크기가 가장 많이 증가하는 것을 확인하였다. 결정립의 크기가 가장 큰 시편은 1150°C에서 3시간 열처리를 수행한 시편의 결정립 크기가 가장 컸으며, 1070°C에서 1시간 열처리를 수행한 시편의 결정립 크기가 가장 작았다. 용체화 열처리 후 시편의 결정립 크기와 ASTM 상수는 표 4와 같다.

그림 2는 시효 열처리 전후의 입계의 탄화물 형태를 나타내고 있다. 입계 탄화물의 형태는 시효 온도가 높아짐에 따라, 시간이 길어짐에 따라 조대화 되는 것을 알 수 있다.

위의 실험 결과로 보아 Inconel 690 시편의 결정립 크기는 용체화 온도와 시간에 영향을 받는 것을 확인할 수 있으며, 시효 온도와 시간은 결정 입계의 탄화물의 형태에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

비커스 미세경도 값을 그림 3에 나타내었다. 결정 입계의 경도 값은 결정립에서 측정한 경도 값에 비해 높았다. 결정 입계의 탄화물 존재 유무에 따른 미세경도 값은 입계 탄화물

이 존재하는 경우 높은 값을 보였다. 이러한 결정립과 입계의 경도 값 차이는 입계에 존재한 스트레인 에너지 때문이며[5], 탄화물 존재 유무에 따른 경도 값의 차이는 입계에 존재하는 석출물 등에 의한 영향으로 보인다. 또한 미세경도 값은 용체화 온도가 높아짐에 따라 시간이 길어짐에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경도 값의 변화는 다른 연구자들의 [6] 실험 결과와 일치한다.

3.2 경도에 따른 영향

Inconel 690에 대한 미세경도가 마모에 미치는 영향을 알아보기 위해 마모량과 미세경도 값의 관계를 확인하였으며 그림 4에 나타내었다. 마모량은 가장 미세경도가 높은 열처리를 수행하지 않은 AS시편에서 가장 컸으며, 경도와 명확한 관계를 가지지는 않는다. 경도가 상대적으로 낮은 열처리 시편의 마모량이 열처리를 수행하지 않은 시편의 마모량 보다 상대적으로 적은 것으로 보아 Archard의 마모식은 Inconel 690 재질에 적용하기 힘든 것을 알 수 있다.

이러한 경향은 Ko[3]와 Suh[7] 등에 의해 논의 되어졌다. Ko 등에 의해 마모를 일으키는 주된 기구가 전단 기구인 것으로 밝혀졌고, 따라서 경도와는 밀접한 상관 관계를 가지지 않는 것으로 보고되었다.

3.3 입계 탄화물 형태에 따른 영향

탄화물 형태에 따른 영향을 살펴보기 위해 동일한 온도(1150°C)와 시간(1hr)에서 용체화 처리를 한 후에 다양한 온도 및 시간에서 시효 처리를 수행하였다. 시효처리에 따른 입계 탄화물의 형태를 그림 2에 나타내었다.

그림 5는 다양한 입계 탄화물의 형태와 마모량에 대한 관계를 나타내고 있다. 마모량은 입계에 탄화물이 존재하지 않는 시편이 가장 컸으며, 탄화물의 형태와 분포가 상대적으로 미세한 시편이 조대한 시편에 비해 다소 높은 마모량을 보인다. 위의 실험 결과로 보아 Inconel 690 재질의 입계 탄화물 형태는 마모량에 영향을 미치는 것으로 보이며, 입계 탄화물의 형태가 조대화 될수록 마모 저항성이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

마모 실험 후 손상된 시편의 주사전자현미경 사진을 그림 6에 나타내었다. 입계에 탄화물이 존재하는 시편의 마모 손상 표면에서는 균열이 관찰 되었으며, 입계 탄화물이 존재하지 않는 시편의 손상 표면에서는 미세 균열은 관찰되지 않았고 연삭 마모에 의한 것으로 보이는 텍스쳐(texture) 형태의 손상이 관찰되었다.

위의 실험 결과를 살펴보면 시편 입계의 탄화물 존재 유무에 따라 주된 마모 기구가 바뀌는 것을 알 수 있다. 입계 탄화물이 존재하지 않는 경우, 시편 표면의 변형이 상대적으로 쉽다. 따라서 변형에 의해 경화된 제 3상(third body)[8]의 생성이 쉬워지고, 이렇게 생성된 제 3상은 상대적으로 연한 Inconel 690 시편의 표면에서 연삭 마모를 일으키는 것으로 보여진다. 입계 탄화물이 존재하는 시편의 경우, 입계의 탄화물은 decohesion에 의해 균열의 생성 및 전파를 촉진하는 것으로 보인다 [9]. 입계 탄화물이 미세하고 연속적으로 분포하는 경우 탄

화물 주변에서 생성된 균열이 전파하는데 필요한 거리가 짧아지고, 또한 균열이 생성될 수 있는 위치가 많아지므로 마모 저항성이 조대한 형태의 탄화물을 가진 시편에 비해 우수하지 못한 것으로 보인다.

4. 결론

Inconel 690 증기발생기 세관 재질의 결정립 크기와 경도는 용체화 처리 온도와 시간에 따라 영향을 받으며, 입계 탄화물의 형태는 시효 온도와 시간에 따라 영향을 받는다.

마모 실험 결과, 시편의 미세경도는 마모량과 큰 상관 관계를 가지고 있지 않은 것으로 보이며, 이러한 현상의 주된 원인은 전단(shear) 기구이기 때문인 것으로 보인다. 입계 탄화물의 존재 유무에 따라 주된 마모기구가 바뀌는 것이 전자현미경 관찰 결과 확인되었으며, 입계 탄화물이 존재하는 경우가 존재하지 않는 경우에 비해 뛰어난 마모 저항성을 가지는 것이 확인되었다. 아울러 탄화물의 형태가 조대한 경우가 미세한 경우에 비해 뛰어난 마모 저항성을 가지는 양상을 보였다.

후기

본 연구는 한국전력공사에서 지원하는 차세대원전 과제와 교육인적자원부에서 지원하는 두뇌한국 21에서 부분 지원했음.

Reference

1. C. E. Taylor, M. J. Pettigrew, T. J. Dickinson, I. G. Currie and P. Vidalou, Journal of Pressure Vessel Technology, **120**, pp283 (1998).
2. P. L. Ko, Transaction of ASME, Journal of pressure vessel technology, **101**, pp 125 (1979).
3. P. L. Ko, Journal of Tribology, **107**, pp149 (1985).
4. Annual book of ASTM standard sec. 3, ASTM E 112, (1994).
5. D. A. Porter and K. E. Easterling “Phase transformations in metals and alloys”, Chapman and Hall, second edition, pp156.
6. Heung – Bae Park, Young – Ho Kim, Byong – Whi Lee and Karp – Soon Lim, Journal of Nuclear Materials, **231**, pp 204 (1996).
7. Saka, Proceeding of the International Conference on the Fundamentals of Tribology, pp135 (1978)
8. T. Sada, M. Oike and N. Emory, Wear, **97**, pp 291 (1980).
9. N. P. Suh, S. Jahanmir, E. P. Abrahamson and A. P. L. Turner, Transaction of ASME, Journal of Lubrication technology, **96**, pp 631 (1975).

Table1. Chemical composition of Inconel 690 tube

(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.002	0.27	0.28	0.008	0.001	29.4	59.2	0.01
Co	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	Fe
0.011	0.28	0.01	0.027	0.01	0.004	0.012	10.5

Table 2. Chemical composition of tube support plate (AISI 405)

(wt%)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Fe
0.08	1.00	0.04	0.03	1.00	13.0	0.60	Val.

Table 3. Summary of heat treatment conditions

Designation	SA Temperature	SA Time	TT Temperature	TT Time
AS				
SAH	1150°C	1hr		
SAH701	1150°C	1hr	700°C	1hr
SAH715	1150°C	1hr	700°C	15hr
SAH801	1150°C	1hr	800°C	1hr
3SAH701	1150°C	3hr	700°C	1hr
SAL701	1070°C	1hr	700°C	1hr
SAL715	1070°C	1hr	700°C	15hr

SA : Solution Annealing
TT : Thermal Treatment
AS : As received

Table 4. Results of grain size measurements

	AS	SAL	SAH	3SAH
Grain No	8.07	7.49	5.53	5.2
Grain size (μm)	25	30	60	80

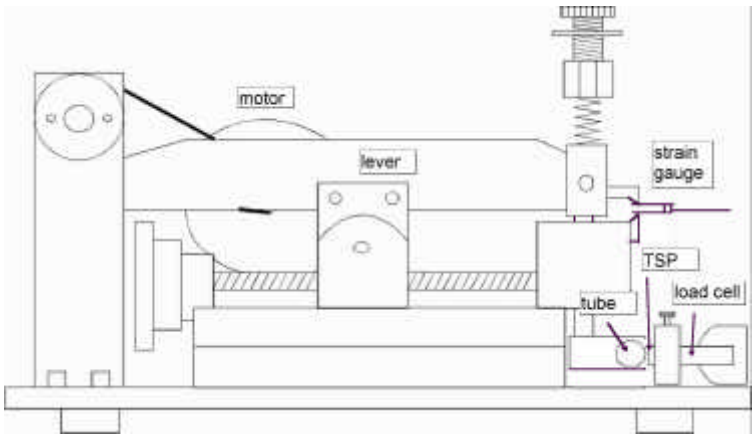
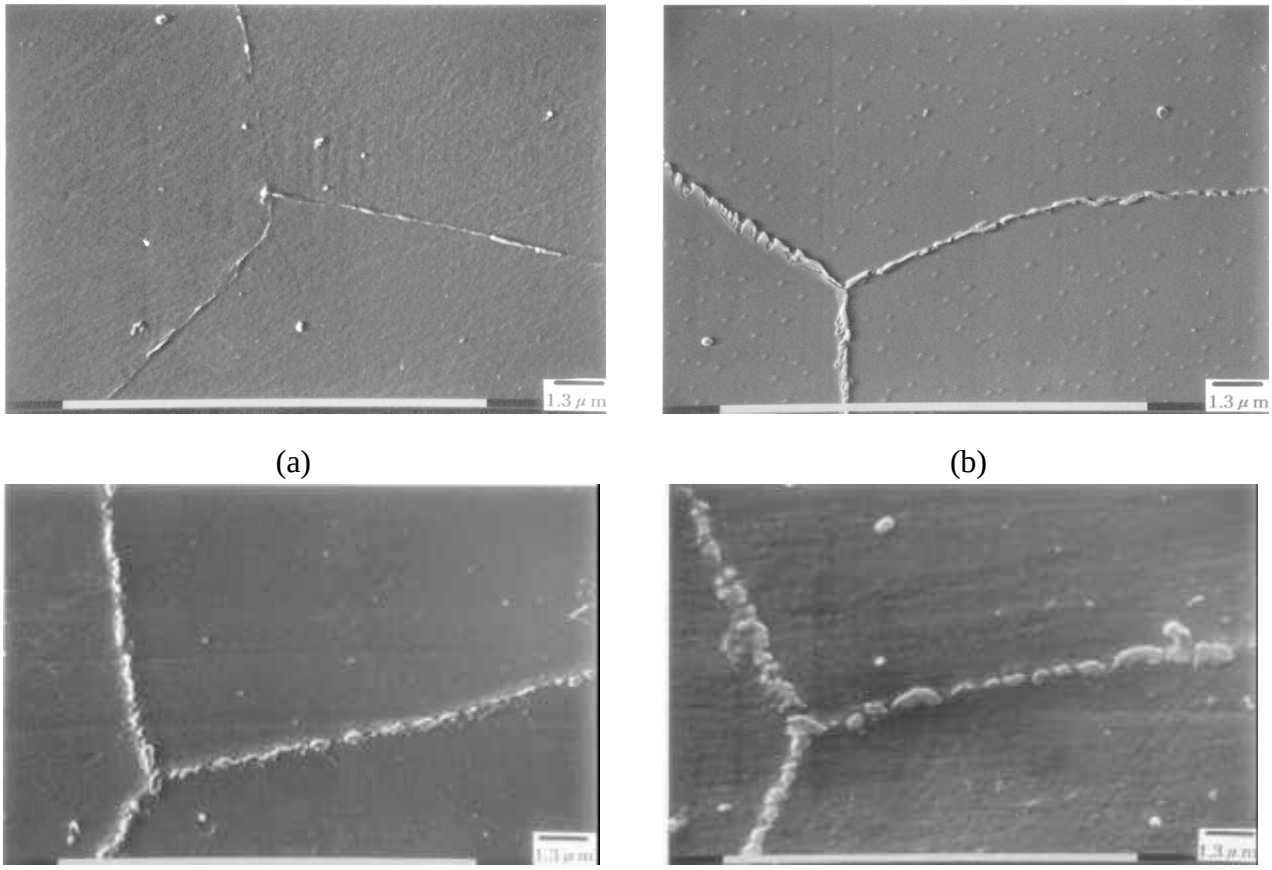


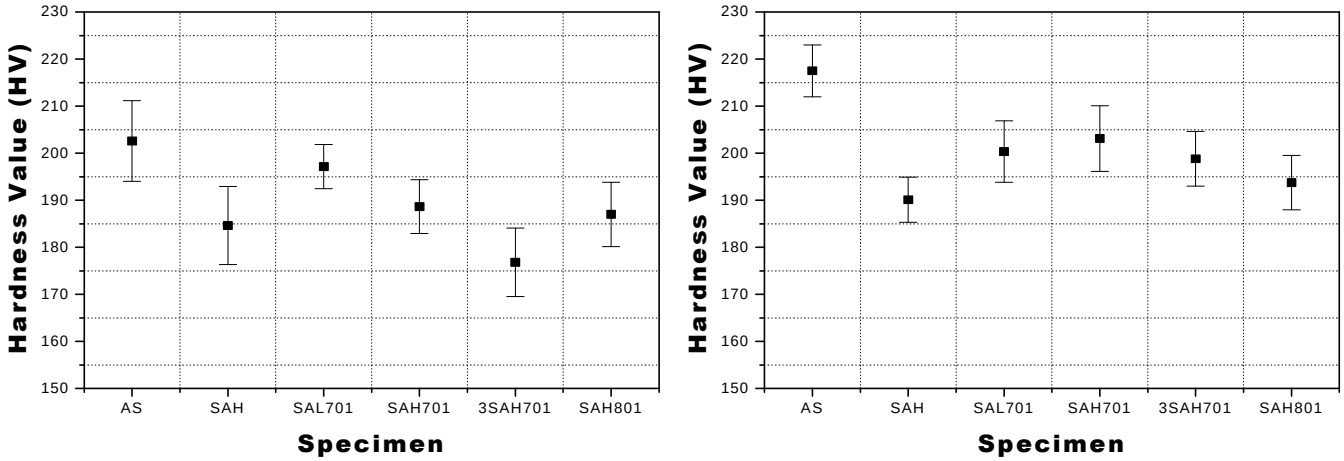
Fig. 1. Wear testing machine
(TSP : tube support plate, lever : used to adjust displacement)



(a) (b)

(b) (d)

Fig. 2 Carbide morphology of (a) SAH(solution annealed at 1150°C for 1hr) (b) SAH701(solution annealed at 1150°C for 1hr, thermally treated 700° 1hr) (c) AS(as-received) (d) SAH801(solution annealed at 1150°C for 1hr, thermally treated at 800°C,



(a) (b)

Fig. 3 Hardness values of (a) matrix (b) grain boundary

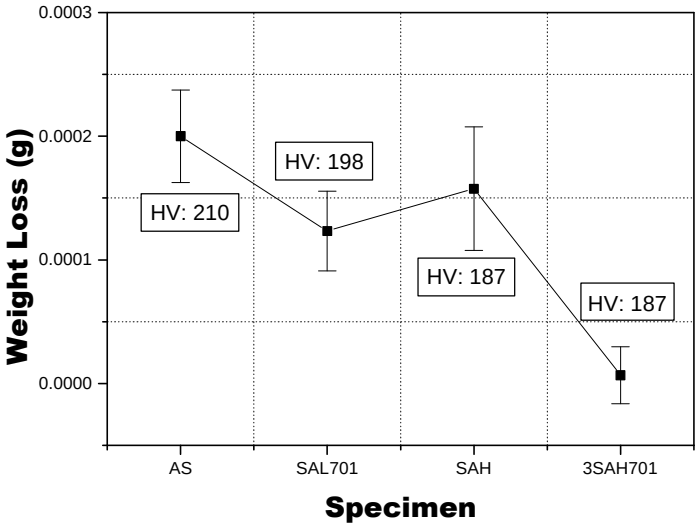


Fig. 4 Weight loss against hardness of specimens

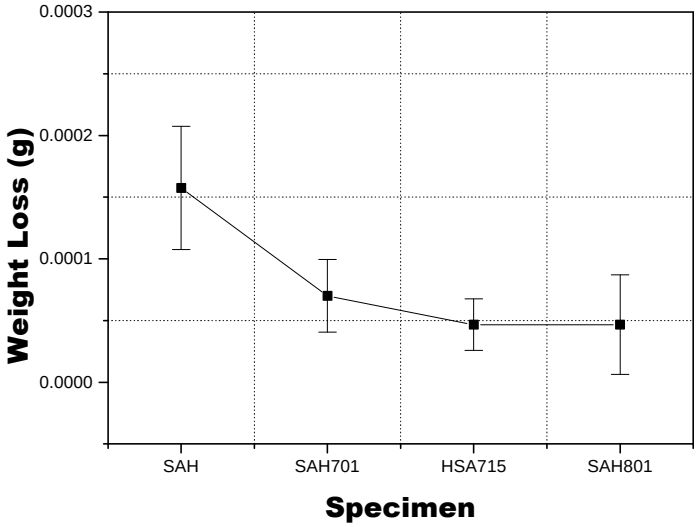


Fig. 5 Dependence of weight loss on carbide morphology

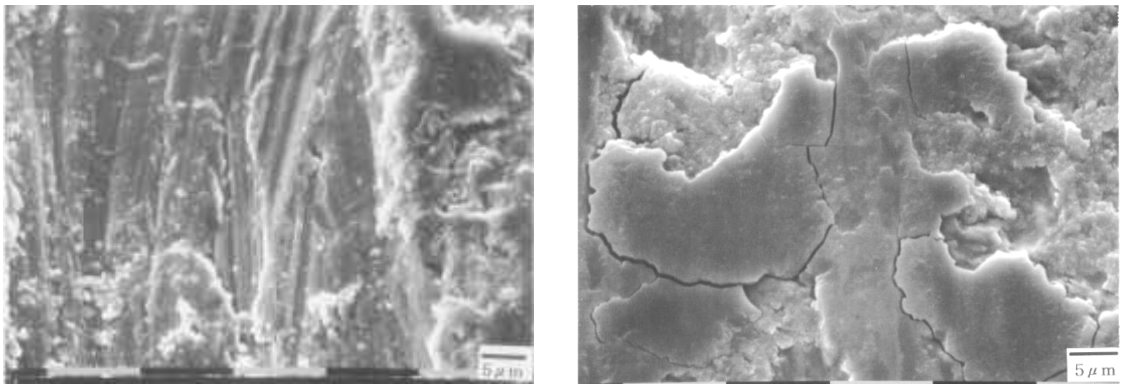


Fig. 6 SEM images of worn surface depending on carbide morphology
(a) SAH (solution annealed at 1050°C for 1hr) (b) SAH 715 (solution annealed at1050°C for 1hr, thermally treated at 700°C for 15hr)