한국소성가공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집 pp.147~150

누적압연접합에 의한 6061 Al 합금의 결정립 미세화와 마멸 특성 연구

이태오* · 김용석*

An Investigation of Sliding Wear and Microstructural Evolution of Ultra-Fine Grained 6061 Al Alloy Fabricated by ARB

T. O. Lee and Y. S. Kim

Abstract

The ARB (Accumulative Rolling Bonding) process was applied to a 6061 Al alloy to obtain ultra-fine grains. After 4 ARB cycles at 315℃, original equilibrium large grains were transformed to ultra-fine grains of several hundred nano-meter size with nonequilibrium grain boundaries. At lower number of cycles, microstructure of highly-tangled dislocation cells were observed. Large grains and coarsened precipitates filled the microstructure of specimens experienced ARB cycles more than 5. Sliding wear tests using a pin-on-disk type wear tester were conducted on the ARB processed 6061 Al alloy plate. Wear rates of the 6061 Al alloy increased with the increase of ARB cycle number as well as the applied load. Worn surfaces and debris, cross-sections of the worn specimen were examined with scanning electron microscopy (SEM) to investigate the wear mechanism of the ultra-fine grained 6061 Al. Tensile properties of the 6061 Al alloy were also studied and used to correlate the wear test results with the microstructures, which evolved continuously with the number of ARB cycles.

Key Words : Ultra Fine Grain, 6061Al, Accumulative Rolling-Bonding (ARB), Sliding Wear

1. 서 론

최근 구조재료의 결정립 크기를 1 ㎛ 이하로 미세화시켜 그 기계적 특성을 향상시키고자 하는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 초미세립 소재는 합금원소의 첨가 없이도 우수한 상온 기계적 성질을 나타내고,

* 국민대학교 금속재료공학부

빠른 변형률 속도와 낮은 온도에서의 초소성 특성을 지닌다. 이와 같은 초미세립 소재의 제조 방법으로는 torsion test, mechanical milling, ECAP (Equal Channel Angular Pressing) 등이 있으나, 이들은 모두 큰 bulk 재료에 적용이 어렵다는 단점을 지닌다. 그러나 누적압연접합 (ARB) 공정은 단순 압연에 의한 변형으로 외부 형태를 유지하면서 소재에 무한대의 소성변형을 가할 수 있어, 수백 나노미터 이하의 결정립 크기를 갖는 bulk 재료를 제조할 수 있는 장점을 지닌다[3,4]. 본 연구에서는 시효 처리가 가능한 6061 Al 합금에 ARB 공정을 적용하여 초미세립이 얻어지는 미세조직 변화 과정을 관찰하였고, 초미세립 6061 Al 합금의 상온 인장특성과 마멸거동을 또한 연구하였다. 기 연구된 순 Al 에서의 ARB 거동과 비교하였고, 비평형 결정립계를 지닌 초미세립 소재에서의 변형거동을 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 연구의 소재로는 두께 2 mm의 상용 6061 Al 판재를 사용하였다. 본 소재로부터 폭 3 mm, 길이 50 mm의 판재를 가공하고, 가공된 시편을 529℃에서 열처리한 후, 우수한 표면 접합을 유도하기 위해서 판재의 표면을 wire brushing 하고 아세톤 세척을 행하였다. 이후 시편 두 장을 겹치고 각 모서리에 드릴로 구멍을 낸 다음 가는 철사를 이용하여 판재를 동여매고 315℃에서 10분간 예열 후 50 %의 압하율로 압연하였다. 이러한 처리 과정을 반복하며 7 cycle 까지 ARB 공정을 행하였다. ARB 공정을 거친 시편들의 미소비커스경도 측정과 상온 인장시험을 행하였다. 상온인장시험은 $6\times 10^{-4}/s$의 변형율 속도로 행하여졌다. ARB 가공된 시편의 TEM 미세조직은 75% Ethyl Alcohol + 25% Nitric Acid 용액으로 233K의 온도에서 젯 연마(jet polishing)된 시편을 Jeol 1210 투과전자현미경을 사용하여 관찰하였다. 미끄럼 마멸 시험은 pin-on-disk type의 마멸 시험기를 사용하여 마멸 상대재로 경도값이 Hv 153 kg/mm^2인 스테인리스강 볼을 사용하여 행해졌다. 미끄럼속도는 0.1 m/s, 마멸거리는 500 m로 일정하게 유지하였고, 마멸하중을 1 N~4 N으로 변화시켰다. 시편 무게 변화량을 마멸거리로 나누어 마멸속도를 산출하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 미세조직과 상온 기계적 특성

Fig 1에 여러 ARB cycle을 거친 6061 Al 시편의 TEM 미세조직과 각각의 SADP를 나타내었다. Fig 1 (a)는 ARB 공정 1 cycle 후의 상용 6061 Al의 미세조직 사진을 보여주고 있는데, 전위들이 모여 형성된 전위셀과 미세한 석출물들이 관찰되고 있으며, 전위 밀도가 높은 것을 보인다. 이러한 미세조직 변화는 3 cycle 까지 계속되었다. Fig 1 (b)에서는 ARB cycle 수가 4 cycle 까지 증가함에 따라 초기에 생성되었던 전위셀들이 점차 없어지고 아결정립들이 생성되고 있다. 또한 4 cycle 후의 SADP에서 점들이 약간 연신되어 있음은 아결정립들 사이의 방위각이 증가함을 보인다. 점차적인 가공량 증가에 의해서 5 cycle 의 경우, 결정립의 크기가 약간 증가했지만, 방위각이 큰 평형 대경각립계가 생성되었음을 관찰할 수 있다 (Fig 1 (c)). 그러나 ARB 공정 7 cycle 조직은 결정립 내부와 입계에서 전위 밀도가 증가하고, 높은 분율의 조대한 석출물들을 보인다.(Fig 2 (c)).

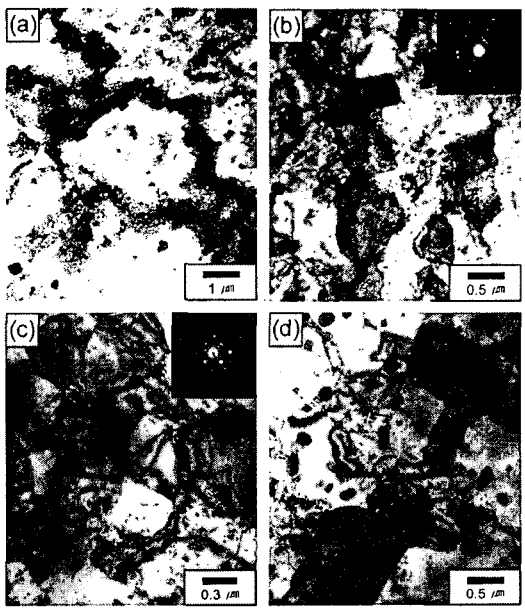

Fig. 1 TEM microstructures of 6061 Al Alloy after various ARB cycles at 315℃: (a) 1, (b) 4, (c) 5, (d) 7

Fig 2에 ARB 각 cycle을 거친 시편의 상온 인장시험 결과를 나타내었다. 1, 2 cycle 시편에서는 급격히 증가한 전위 밀도에 의해서 인장강도가 급격히 증가한 것을 볼 수 있다. 그러나 3 cycle 후 전위의 재배열과 전위밀도의 감소에 의해서 강도가 약간 감소하나, 4 cycle 이

후 재배열된 전위들에 의해서 아결정립이 생성되고 이로 인해서 다시 강도가 증가하였다[6]. 그러나 5 cycle 이후에서는 인장강도가 급격히 감소하고 있다. 신율은 ARB 공정 1 cycle에서 급격히 감소하였고, 4 cycle 이후 강도의 감소에도 불구하고 신율은 여전히 낮거나 감소하는 경향을 보인다. ARB 공정 4 cycle 이후 기계적 성질이 급격히 저하하는 원인으로는 불안정한 결정립계와 조대화한 석출물 등을 들 수 있다.

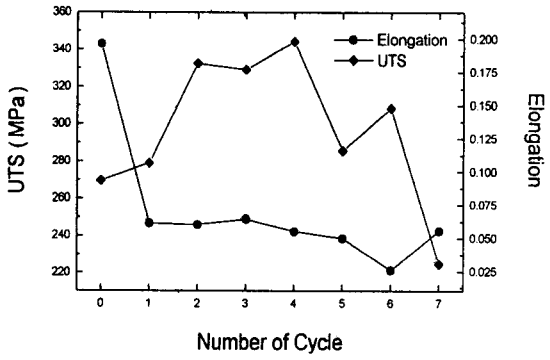

Fig. 2 Mechanical Properties at ambient temperature of 6061 Al Alloy as a function of the ARB cycles

3.2 미끄럼 마멸시험 결과

Fig. 3은 ARB 처리된 6061 Al 시편의 마멸속도 변화를 ARB cycle과 마멸하중의 함수로 보여주고 있다. ARB 공정 3 cycle 까지는 마멸 저항성이 미약하게 증가하나, 5 cycle 이상을 거친 시편의 마멸 저항성은 급격히 감소하고 있다. 이같은 결과는 ARB 공정 4 cycle 이 후, 시편의 경도가 감소하고 연신율은 여전히 낮아 마멸에 대한 임계변형율이 낮아지며 마멸면에서 마멸입자가 쉽게 생성되는 때문으로 고찰된다[7]. Fig. 4에 4 N 하중하에서 마멸 시험된 1 cycle과 7 cycle 시편에서 관찰된 마멸면과 마멸부스러기의 SEM 사진, 그리고 마멸단면의 광학현미경 사진을 나타내었다. 저 cycle 시편의 경우 높은 경도값과 변형에 대한 저항성이 변형층 박리보다는 긁힘 마멸을 주로 낳은 것을 볼 수 있으나 (Fig. 4 (a), (c), (e)), 마멸속도가 높은 7 cycle 처리된 시편에서는 낮은 경도와 활발한 표면 변형으로 인하여 변형층 박리가 더 쉽게 일어났음이 관찰된다 (Fig. 4 (b), (d), (f)). 마멸단면 사진은 ARB 공정 횟수가 증가한 시편에서 더 깊은 균열이 발생했음을 보인다 (Fig. 4 (f)).

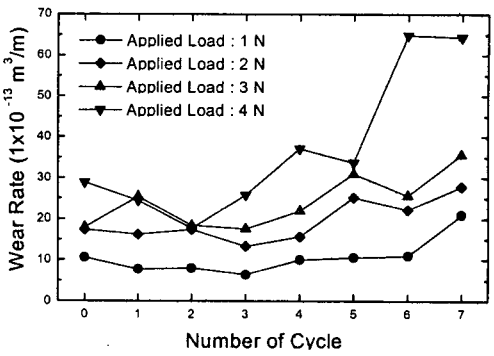

Fig. 3 Variation of wear rates of the ARB processed 6061 Al specimens as a function of applied load and ARB cycles

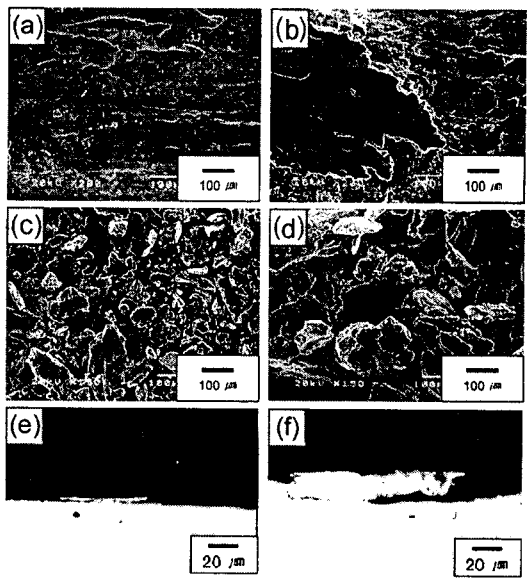

Fig. 4 SEM micrographs of worn surfaces ((a), (b)) and wear debris ((c), (d)) and OM micrographs of cross sections ((e), (f)) of the wear-tested 6061 Al specimens. The specimens were tested at the applied load of 4 N and experienced different ARB cycles.: (a) 1 cycle, (b) 7 cycle, (c) 1 cycle, (d) 7 cycle, (e) 2 cycle, and (f) 7 cycle

ARB 공정 5 cycle 이후 마멸 속도가 증가하는 현상은 불안정한 미세조직으로 인한 전위 이동의 용이, 조대해진 석출물로 인한 경도값의 감소 등과 연관된 것으로 추정된다.

마멸시 마찰계수의 변화를 연속적으로 측정한 결과, Al 합금의 마멸 시험 시 측정되는 마찰계수는 3 구간으로 나뉘어 변화하였다. 1 구간은 심한 변형이 발생하며 변형층의 박리 마멸이 지배적으로 발생하는 구간이고, 2 구간은 마멸면의 표면이 산화되는 구간, 그리고 마지막 3 구간은 정상상태 구간으로 일정한 마찰계수가 측정되었다. ARB 공정 1 cycle을 거친 시편에서는 마멸시험시 심한 변형에 의해서 변형층 박리 마멸이 발생하는 1 단계 구간이 짧았고, 정상상태 구간인 3 구간이 짧은 마멸거리에서 도달하였다. 그러나 ARB 공정 7 cycle 시편의 경우는 본 연구에서 시험된 전 마멸 거리에서, 마멸 면에서 심한 변형이 발생하는 것으로 여겨지는 1 구간이 마멸 전 구간을 지배하고 있음이 관찰되었다. 이 같은 마멸 거리에 따른 마찰계수의 변화는 ARB 공정 cycle을 많이 거친 시편은 마멸 시 좀 더 활발한 전위 움직임이 발생하고 더 큰 표면(마멸면) 변형이 발생한다는 점을 시사한다.

4. 결 론

누적압연접합(ARB) 공정에 의하여 처리된 6061 Al 합금의 미세조직과 상온 기계적 특성, 그리고 그 마멸 거동을 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 6061 Al 판재의 ARB 공정 1 cycle 후, 전위 셀 조직이 관찰되었고, 이후 cycle 수의 증가에 따라 비평형 결정립계와 평형 대경각립계로 점차 변환되었다. 5 cycle 이후에서는 결정립 내의 전위밀도가 감소하고, 결정립 크기가 증가였으며, 석출물의 크기와 분율이 증가하는 미세조직이 관찰되었다.

(2) ARB 공정을 거친 6061 Al 판재는 ARB 공정 4 cycle 까지는 경도값이 증가하였으나, 이후 cycle 수의 증가에 따라 경도는 크게 감소하였다.

(3) 6061 Al 합금 판재의 미끄럼 마멸 속도는 ARB 3 cycle 까지는 약간 감소하였으나, 이후 cycle 수의 증가에 따라 마멸 속도는 크게 증가하였다. 또한 마멸하중이 증가할수록 cycle 수가 다른 시편 간의 마멸속도의 차이가 더 커졌다.

(4) ARB 공정을 거친 6061 Al 합금 판재의 마멸면, 마멸 부스러기, 마멸단면의 SEM, OM 미세조직은 ARB cycle 수가 증가할수록 높은 표면 변형이 마멸 거동을 지배함을 보였다.

참 고 문 헌

(1) Sakai T., Saito Y., Hirano K. and Kato K., 1988, Trans. ISIJ, Vol.28, pp.1028.

(2) Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Valiev, M.Z. and Langdon T.G., 1996, Acta Mater., Vol.44, p.4619.

(3) Saito Y., Tsuji N,. Utsunomiya H., Sakai T. and Hong R.G. 1998, Scripta Mater., Vol.39, p.1221

(4) Tsuji N., Saito Y., Utsunomiya H. and Tanigawa S., 1999, Scripta Mater., Vol.40, p.795

(5) Preece C.M., 1979, Treatise Mater. Sci. Technol., Vol.16, pp.249.

(6) Iwahashi Y., Horita Z., Nemoto M. and Langdon T.G., 1997, Acta mater., Vol.45, p.4733.

(7) Sytsggrlini G., Bonollo F., Molinari A. and T Izian i A., 1997, Wear, Vol.221, p.192.