

Cu-TiB₂ 복합재료의 기계적 성질에 미치는 TiB₂ 입자의 영향

강계명[†] · 최중운

서울산업대학교 신소재공학과

The Influence of TiB₂ Particle on the Mechanical Property of Cu-TiB₂ Composites

Kae Myung Kang[†] and Jong Un Choi

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(2003년 12월 12일 받음, 2004년 1월 5일 최종수정본 받음)

Abstract The mechanical and electrical properties of Cu-TiB₂ composites prepared by hot extrusion and cold drawing according to the variation of TiB₂ contents and the size of TiB₂ particle have been studied. The experimental results showed that the electrical conductivity was decreased with increasing the TiB₂ content, and their tensile strength and hardness increased inversely. In the case of the same content of TiB₂ particle, the smaller TiB₂ particle, the higher their mechanical properties. The electrical conductivity of Cu-TiB₂ composites showed more than 70%IACS. Their yield strength and hardness were more than 120 MPa and H_RB 60-70, respectively.

Key words hot extrusion, electrical conductivity, tensile strength, hardness

1. 서 론

전극재료로 사용되는 Cu기 복합재료는 고온, 고압하에서도 높은 전기전도도와 우수한 기계적 성질이 요구되고 있다.¹⁾ 기존의 Cu-Cr, Cu-Zr 석출경화형 동합금은 고온에서 석출상의 조대화에 따른 재료 고온물성의 열화로 인하여 최근의 고온 접점재료의 요구 성능을 충족시키지 못하고 있다.^{2,3)} 이에 분산강화형 Cu기 복합재료에 관한 연구가 접점재료의 주요 연구 과제로 부각되었다.^{4,5)}

Cu기 분산강화형 복합재료는 강화상의 종류 및 특성에 따라 그 성능이 좌우됨으로, 이들 강화상에 관한 연구는 주요 고온 특성연구로 나아가고 있다.⁶⁾ 현재 강화상으로 W를 이용한 고용점 금속 및 Al₂O₃, ZrO₂ 등의 산화물상을 응용한 전기적, 기계적 고온특성에 관한 연구 및 기지조직과의 젖음성에 관한 연구가 보고되고 있다. 그러나 W의 경우, W의 상대적 높은 밀도에 따른 전기적 성질의 저하와 W 분말의 편석에 기인한 균일 혼합상 제조의 어려움 등이 제기되고 있다. 또한 Al₂O₃, ZrO₂ 등 강화상으로 산화물의 응용은 이들 산화물의 물성에 기인한 전기적 성질의 저하에 그 문제점이 있다.⁷⁻¹⁰⁾

이에 따라 이들 문제점을 보완하는 강화상으로 TiB₂에 관한 연구가 많은 연구자에 의해 보고되고 있다.¹¹⁻¹³⁾ 이는 TiB₂ 상의 우수한 전기적 성질과 고온 기계적 성질에 기인한 것으로 있다. 강화상으로 TiB₂는 3225°C의 고

온 열적 안정성과 함께 대전류 사용 환경 하에서도 고경도와 10%IACS의 전기전도도 및 우수한 열전도도를 지닌 분산상으로 있어, 이를 활용한 Cu기 복합재료의 전기적, 기계적 성질의 향상을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 Cu 분말과 TiB₂ 분말을 열간 압출공정을 이용한 Cu-TiB₂ 복합재료를 제조하여, TiB₂ 첨가량과 입자크기에 따른 Cu-TiB₂ 복합재료의 전기적 성질 및 기계적 성질을 조사하였다. 또한 실제적용을 위한 2차 가공으로 압출재에 냉간 인발가공을 단면감소를 변화로 10%부터 65%까지 하여, 각각의 TiB₂ 입자가 미치는 Cu-TiB₂ 복합재료의 전기적, 기계적 성질의 변화를 조사하였다.

2. 실험 방법

Cu-TiB₂ 복합재료의 준비는 기지분말로는 10 μm의 Cu 분말을 강화상으로는 10 μm와 20 μm의 TiB₂ 분말을 사용하여 Table 1과 같이 1, 3, 5 vol.%로 TiB₂ 분말 함량을 변화시켰다. 분말의 혼합은 V형 믹서를 이용하여 4시간 혼합하였다. 혼합된 분말을 Cu 캔 (외경: 70 mm, 내경: 62 mm, 길이: 200 mm)에 장입한 다음, 밀봉하였으며 800°C에서 2시간 동안 탈가스 처리 후 열간 압출하였다.

열간 압출은 400 ton급 수평식 열간 압출기를 사용하였다. 이때 컨테이너는 74 mmφ×400 mm로서, 400°C로 열간 압출시 빌렛의 온도는 900°C로 선정하였으며 가

[†]E-Mail : littbird@snut.ac.kr

Table 1. Composition of Cu-TiB₂ metal matrix composite.

Specimen	Cu (vol%)	TiB ₂ (vol%)	TiB ₂ particle size
#1	99	1	10 μm
#2	97	3	10 μm
#3	95	5	10 μm
#4	99	1	20 μm
#5	97	3	20 μm
#6	95	5	20 μm

열시의 온도편차는 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내였다. 콘테이너의 온도는 400°C 로 고정하였고 온도는 콘테이너 상부에 K형 열전대를 삽입하여 측정하였으며, 상부와 하부 및 좌우의 온도 구배가 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이내가 되도록 제어하였다. 압출속도는 Ram계수 12(3 m/min)로 하여 200 mm ϕ (압출비 8.3:1)로 열간 압출 하였다.

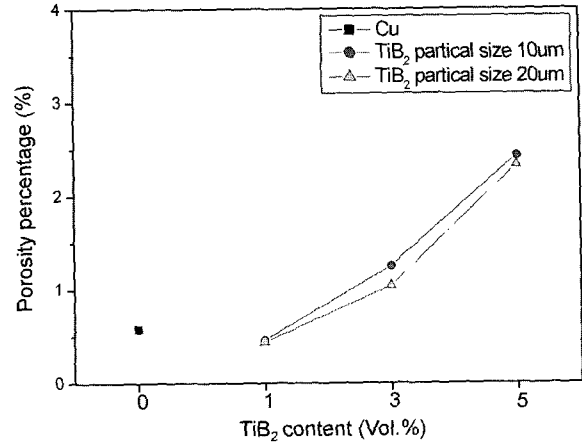
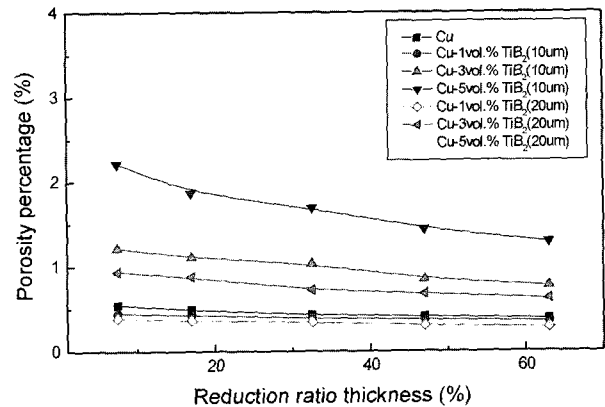
열간 압출 한 직경 20 mm ϕ 의 압출재를 10% 단면감소율로 총 단면감소율이 65%까지 냉간 인발을 하였다. 냉간 인발 실험에 사용된 유압식 인발기는 50 ton급이며 stroke는 2.5 m이다. 압출재로부터 단면감소율에 따른 기공율의 변화를 관찰하기 위하여 총 단면감소율 65%까지 기공율을 측정하였다. 기공율은 Archimedes의 원리를 이용하여 이론밀도와 실제밀도와의 차이에 의해 측정하였다.

TiB₂의 첨가량 및 평균입도에 따라 열간 압출법으로 제조된 Cu-TiB₂ 압출재에 미치는 영향을 살펴보기 위해 전기전도도, 경도 및 상온인장시험을 행하였다. 전기전도도는 Centurion NDT model을 이용하였으며, 경도는 Rockwell 경도기(H_RB: 하중 100 kg)를 이용하였다. 인장시험은 표준시편을 상온에서 변형속도 $1.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 로 하여 항복강도 및 연신율을 구하였다. 인장시험은 만능시험기(INSTRON)를 사용하였다. 인발재는 평균 단면감소율에 따른 전기전도도 및 경도의 변화를 관찰하였으며, 총 단면감소율 65%까지 측정하였고, 압출재와 인발재의 미세조직을 광학현미경을 사용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

열간 압출법으로 제조된 Cu-TiB₂ 복합재료의 압출재 기공율을 Fig. 1에 나타내었다. 평균입도가 10 μm인 경우 TiB₂를 1, 3, 5 vol% 첨가한 압출재의 기공율은 0.45, 1.24, 2.43%로 증가하였고, 20 μm인 경우는 TiB₂ 함량이 증가할수록 기공율이 0.43, 1.04, 2.32%로 증가하였다. 여기서 10 μm가 20 μm일 때보다 기공율이 증가한 것은 부피 분율이 높아 기지와 TiB₂의 계면의 공극이 증가한 것으로 사료된다.

가공도에 따른 기공율의 변화는 Fig. 2에 나타내었다. 강화재의 크기가 10 μm인 경우 총 단면감소율 65%의 최대가공도에서 기공율은 강화재의 부피변화에 따라 각각 0.38, 0.35, 0.77%로 조사되었고, 강화재의 크기가 20 μm인 경우에는 강화재 부피변화에 따라 0.28, 0.68, 0.92%

**Fig. 1.** The variation of porosity percentage with TiB₂ content.**Fig. 2.** The variation of porosity percentage with reduction of area.

로 각각 조사되었다. 이는 가공도가 증가할수록 전위밀도 증가에 따른 공극의 감소에 기인하여 기공율이 감소한 것으로 생각된다.

평균입도가 10 μm와 20 μm인 TiB₂를 1, 3, 5 vol%로 첨가하여 열간 압출법으로 제조한 Cu-TiB₂ 복합재료 압출재의 미세조직을 Fig. 3에 나타내었다. 회색의 입자는 강화상인 TiB₂ 입자로 기지의 전층에 비교적 균일하게 분포되었으며, TiB₂의 함량이 증가하여도 대체적으로 균일하게 분포된 것으로 나타났다.

TiB₂의 함량과 입도에 따른 압출재의 전기전도도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Cu기내의 TiB₂ 첨가량이 1, 3, 5 vol%로 증가할수록 입도가 10 μm인 경우 전기전도도는 83.3, 77.8, 74.5% IACS로 감소하였고, 입도가 20 μm인 경우 전기전도도는 83.5, 79.5, 77% IACS로 감소하였다. 기지 분말로 제조된 압출재의 전기전도도가 약 88.5% IACS로서, 강화입자의 TiB₂가 13% IACS의 전기적 특성을 가진다고 해도 Cu기내 자유전자의 이동을 방해하는 요소로 작용하기 때문에 TiB₂ 첨가량이 증가할수록 전기전도도는 감소하게 된다. TiB₂ 입자 크기가 20 μm인 것이 10 μm보다 전기전도도가 다소 높는데 이

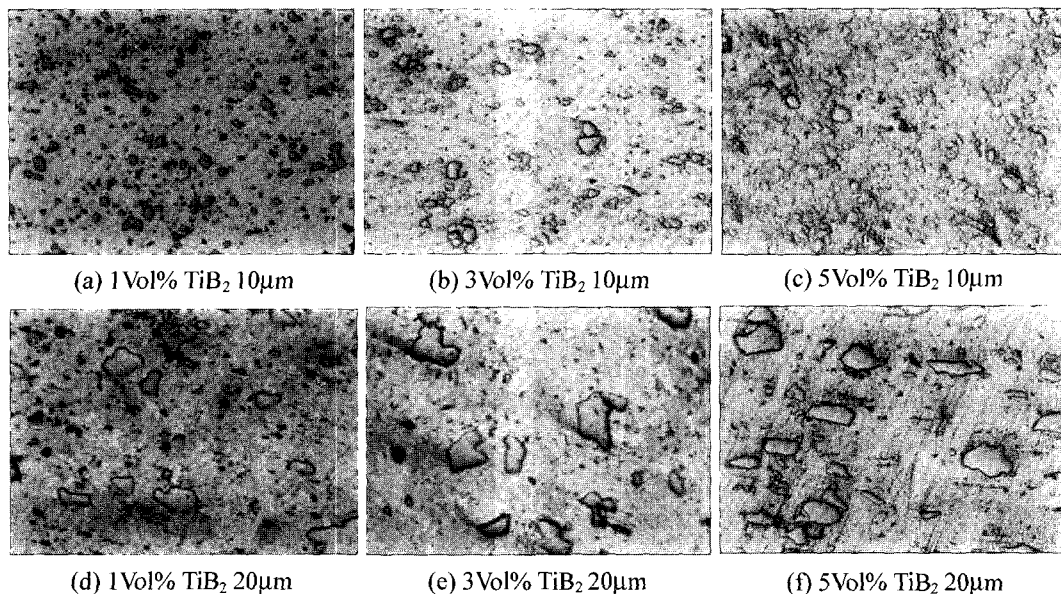


Fig. 3. Microstructure of Cu-TiB₂ particle reinforced composites.

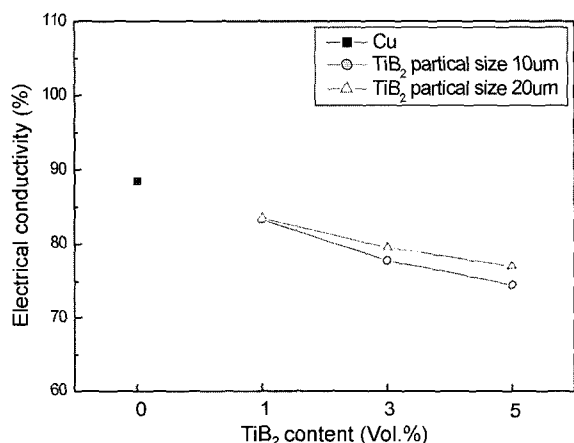


Fig. 4. The variation of electrical conductivity with TiB₂ content.

는 TiB₂의 평균입도가 커지면 기지와 의 계면 분율이 작아져 자유전자의 이동경로가 증가하게 되므로 전기전도도가 증가하는 것으로 생각된다.

TiB₂ 함량과 입도에 따른 압출재의 경도변화를 Fig. 5에 나타내었다. 10 µm의 TiB₂ 함량이 1 vol%일 때 54H_RF, 3 vol%일 때 60H_RF, 5 vol%일 때 66.8H_RF이고 20 µm의 TiB₂ 함량이 1 vol%일 때 52H_RF, 3 vol%일 때 57H_RF, 5 vol%일 때 61.4H_RF로 TiB₂의 함량이 증가할수록 경도값은 증가하였다. 또한 TiB₂의 평균입도가 작을수록 경도가 증가하는 것으로 나타났다.

TiB₂ 함량과 입도에 따른 압출재의 인장시험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에서 TiB₂의 함량 및 입도에 따른 항복강도는 입자 크기가 10 µm일 때 TiB₂ 함량이 1, 3, 5 vol%로 증가하면 항복강도는 108, 111, 118 MPa로 증가하였고 20 µm인 경우 TiB₂ 함량이 1, 3, 5 vol%로 증가하였을 때 114, 121, 126 MPa로 증가

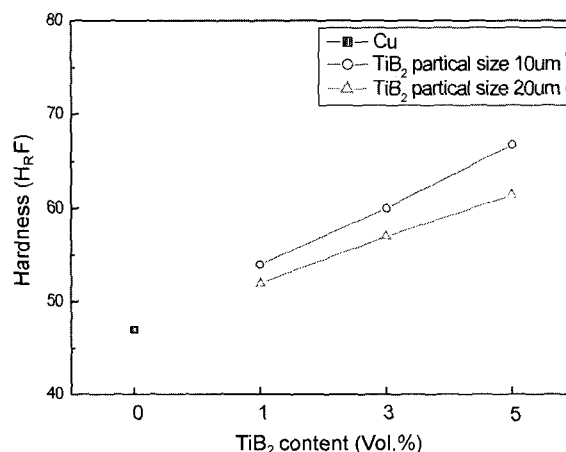
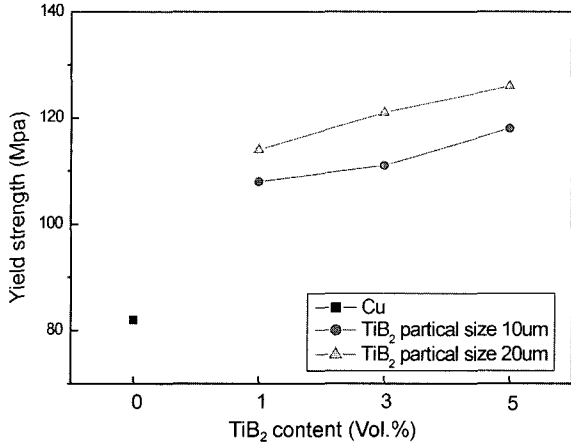


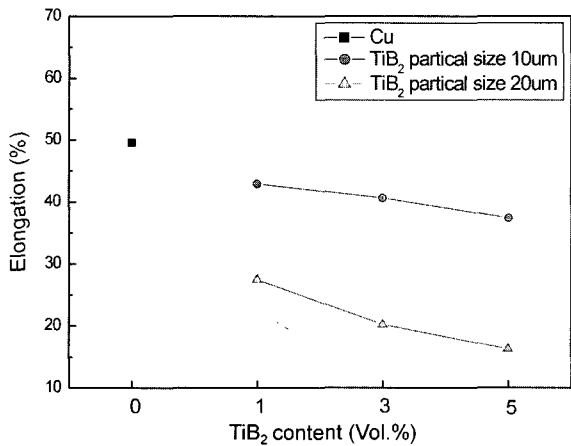
Fig. 5. The variation of hardness with TiB₂ content.

하였다. 또한 연신율은 Fig. 6(b)처럼 20 µm일 때 10 µm보다 다소 감소하였다. 일반적으로, 석출경화합금에서는 분산된 석출상이 기지금속과 정합상태를 갖기 때문에 이러한 정합상태를 끊을 만한 충분한 응력이 작용해야만 파괴가 일어나며, 석출상의 크기가 작고, 입자간 거리가 짧을수록 강도는 증가한다. 그러나 금속기 복합재료는 기지와 강화상간의 계면이 부정합상태를 가지며, 특히 기지와 강화입자간의 계면특성이 없기 때문에 인장축 방향으로 응력을 가하면 Michal Besterci의 보고에서와 같이 기지금속과 강화상간의 계면에서 공극이 형성되어 성장 및 합체에 의해 파괴가 일어난다.¹⁴⁾

한편 2차 냉간가공에 따른 단면감소율변화와 전기전도도의 변화를 조사하여 Fig. 7에 나타내었다. 전기전도도는 단면감소율이 증가할수록 감소하였다. 단면감소율이 50%까지는 급격히 감소하였으나 그 후로는 다소 완만한 감소율을 보였다. 이는 가공에 의한 전위밀도의 증가로 자유전자의 이동이 방해받기 때문으로 생각된다.



(a) Strength



(b) Elongation

Fig. 6. The variation of yield strength and elongation with TiB₂ content.

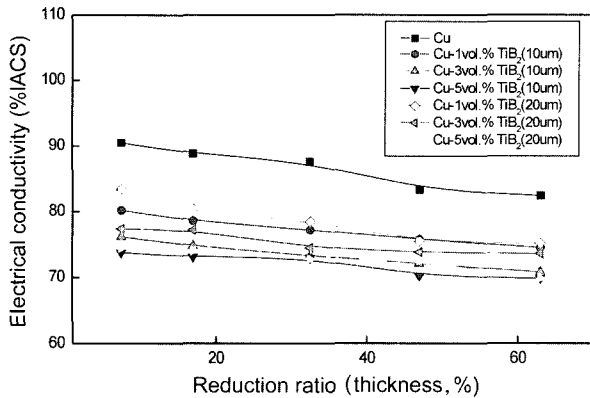


Fig. 7. The variation of electrical conductivity with reduction of area.

소한 반면, 그 이상의 단면감소율에서는 전위밀도의 증가율이 완만하게 증가하기 때문에, 그 만큼 전기전도도의 감소율이 적어지는 것으로 생각된다.

단면감소율에 따른 경도의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 단면감소율이 50%까지 급격히 증가하다가 그 이상의 단면감소율에서는 완만하게 증가하였다. 이 또한 전

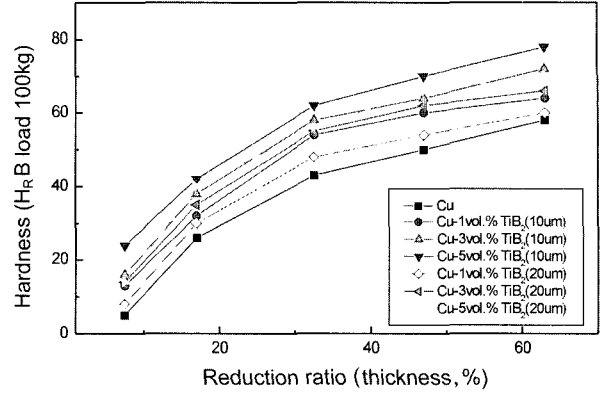


Fig. 8. The variation of hardness with reduction of area.

위밀도의 증가에 의한 것으로 판단되며, 50%이상의 단면감소율에서는 전위밀도의 증가율이 적어지므로 경도값의 증가율은 완만하게 나타났다.

따라서 Cu-TiB₂ 압출재의 전기적 특성 및 기계적 성질은 TiB₂ 입자크기보다는 TiB₂의 첨가량에 영향을 주로 받는 것으로 나타났고, TiB₂ 첨가량이 동일한 압출재의 경우에는 단면감소율에 따른 전기적·기계적 성질의 변화가 전위에 의한 것으로 본 연구에서는 단정할 수 없으나 전위밀도의 증가에 기인한 현상으로 사료된다.

4. 결 론

Cu-TiB₂ 입자강화 복합재료의 TiB₂ 함량과 입자 크기 및 가공도 변화에 따른 전기적·기계적 성질의 변화로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. TiB₂ 함량이 1, 3, 5 vol%로 증가함에 따라 압출재의 경우 전기전도도는 다소 감소하였고, 평균 입도가 10 μm일 때 74.5%IACS의 최소값을 가졌다. 이는 압출재의 기공율에 기인한 전기전도도 변화 현상으로 생각된다. 또한 경도는 최대 67.8HRF까지 증가하였고, TiB₂ 10 μm의 경우에서 20 μm보다 높은 경도값으로 조사되었다. 인장시험결과 항복강도는 82 MPa에서 최대 126 MPa까지 큰 폭으로 증가하였고, 특히 20 μm 입도에서 그 증가의 폭이 큰 것을 볼 수 있었다. 압출과 인발에 따른 기계적 성질의 변화는 모두 가공도의 증가와 함께 전기전도도는 각각 83.3%IACS에서 74.5%IACS로 감소되었다. 본 연구에서 특히 Cu-5 vol%TiB₂ 입자강화 복합재료는 전기전도도가 70%IACS 이상이었고, 항복강도는 120 MPa 이상이며 경도는 60~70HRB(하중 100 kg)로 전기접점 재료로서의 우수한 특성을 가지는 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. J. S. Lee, Scripta Materialia, **39**(8), 1063-1069 (1998).
2. T. H. Kim, Journal of Korea Powder Metallurgy Institute, **1**(2), 174-180 (1994).
3. B. S. Kim, Journal of Korea Powder Metallurgy Institute, **1**(2), 167-173 (1994).

4. Lin Wang, Jian-Lin Shi, *Materials Research Bulletin* **36**, 925-932, (2001).
5. V. C. Nardone and K. M. Prewo, *Scripta Metall.*, **201**, 43-48 (1986).
6. A. b. Lebedev, S. A, Pulnev, *Scripta Materialia*, **35**(9), 1077-1081 (1996).
7. J. S. Lee, N. J. Kim, J. Y. Jung, E. S. Lee and S. Ahn, *Scripta Materialia*, **39**(8), 1063-1069 (1998).
8. V. Y. Gertsman, R. Birringer and R. Z. Valiev and H. Glieter, *Scripta metall. matter*, **30**(2), 229-234 (1994).
9. R. Z. Valiev, E. V. Kozlov, Yu. F. Ivanov, J. Lian, A. A. Nazarov and B. Baudelet, *Acta metall. mater.*, **42**(7), 2467-2475 (1994).
10. A. B Lebedev, Yu. A. Burenkov, A. E. Romanov, V. I. Kopylov, V. P. Filonenko and V. G. Gryaznov, *Mater. Sci. Engng., A*, **203**(1-2), 165-170 (1995).
11. E. Maire, D. S. Wilkinson, J. D. Embury and R. Fougères, *Acta Mater.*, **45**(12), 5261-5274 (1997).
12. J. Lee, E. S. Lee, J. Y. Jung, S. Ahn and N. J. Kim, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, **36**(4), 588-596 (1998).
13. J Gurland, *Acta Metall.*, **20**(5), 735-741 (1972).
14. Michal Besterçi, *Materials Letters*, **38**(4), 270-274 (1999).