

분말 ECAP 공정 시 치밀화의 유한요소해석

윤승채 · 팜 광 · 천병선 · 이홍로 · 김형섭*
충남대학교 나노공학부

Finite Element Analysis of Densification Behavior during Equal Channel Angular Pressing Process of Powders

Seung Chae Yoon, Pham Quang, Byong Sun Chun, Hong Ro Lee and Hyoung Seop Kim*
Department of Nano Materials Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea
(Received October 24, 2006; Accepted December 5, 2006)

Abstract Nanostructured metallic materials are synthesized by bottom-up processing which starts with powders for assembling bulk materials or top-down processing starting with a bulk solid. A representative bottom-up and top-down paths for bulk nanostructured/ultrafine grained metallic materials are powder consolidation and severe plastic deformation (SPD) methods, respectively. In this study, the bottom-up powder and top-down SPD approaches were combined in order to achieve both full density and grain refinement without grain growth, which were considered as a bottle neck of the bottom-up method using conventional powder metallurgy of compaction and sintering. For the powder consolidation, equal channel angular pressing (ECAP), one of the most promising method in SPD, was used. The ECAP processing associated with stress developments was investigated. ECAP for powder consolidation were numerically analyzed using the finite element method (FEM) in conjunction with pressure and shear stress.

Keywords : Powder consolidation, Equal channel angular pressing, Severe plastic deformation, Shear deformation, Finite element method

1. 서 론

최근 나노미터 크기의 극미세 영역에서 재료의 새로운 물리적 현상과 향상된 특성을 나타내는 많은 연구 결과가 보고됨에 따라 나노과학/기술이라는 새로운 영역이 많은 각광을 받고 있다. 이러한 나노기술은 차세대 소재 개발을 선도할 중추적 기술로 부각되고 있으며, 다양한 영역에 걸친 응용을 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 영향은 소재 분야에서도 파급되고 있으며, 나노소재의 제조에 대한 많은 연구 성과들이 발표되고 있다¹⁻⁴⁾. 이에 나노결정립 구조 재료를 얻기 위해 분말을 이용한 벌크 소재를 제조하는 Bottom-up 방식의 공정에 대한 관심이 높아지고 있다⁵⁻⁸⁾. 고기능성 급속응고 분말, 기계적합

금화 분말, 나노 분말과 같은 고기능, 우수 분말들을 제조하여 기존에 상용된 재료의 물성을 뛰어넘는 새로운 재료를 얻을 수 있었으며, 이에 따른 새로운 분말 성형법이 필요하게 되었다. 고상에서 분말의 고형화는 소성변형에 의하여 주로 이루어짐으로 응력, 온도, 가공시간, 응력/온도의 비등의 공정조건을 고려해야 우수한 부품 소재를 얻을 수 있다^{9,10)}. 지난 수십년간 분말과 비정질 또는 나노 결정립 상태의 미세조직을 유지하면서 진밀도의 벌크 재료를 얻으려는 시도가 많이 진행되어져 왔으며, 고형화 공정 중에 결정화 및 결정립 성장 억제를 이루는 동시에 가공 온도를 낮추어 높은 치밀화를 얻을 수 있는 가공 공정에 대한 연구가 요구되었고, 이에 강소성 공정을 통한 분말고형화가 적합한 분말성형법으로 평가되어

*Corresponding Author : [Tel : +82-42-821-6596; E-mail : hskim@cnu.ac.kr]

활용되고 있다^{7,8,10,11}).

강소성 공정중의 하나인 등통로각압축(Equal channel angular pressing: ECAP) 공정은 특정한 교차각과 모서리각을 가지는 통로의 내부로 재료를 통과시킴으로써, 다른 소성가공법에 비하여, 재료의 내부에 균일한 심한 전단 변형을 가하는 소성가공 공정이다^{3,6,13}). 이 공정은 구 소련의 Segal¹⁴에 의해 처음 소개 되었으며, 소재를 통로에 반복해서 통과시키는 간단한 공정을 통해 시편에 초기 단면의 변화 없이 초미세결정립 조직을 만들 수 있는 대표적인 Top-down 방식으로써 지난 수년간 많은 연구 성과가 보고된 바가 있다. 이와 더불어 최근에는 ECAP 공정으로 제조된 재료의 물리적 특성 연구뿐만 아니라 해석적이며, 수치적인 방법을 통해 소성가공 공정의 해석도 점차 활발히 이루어지고 있다^{6,14}).

일반적으로 분말고형화 방법으로 사용되는 대부분의 공정은 높은 압력을 가하여 전위의 미끄러짐에 의한 분말 입자 기지의 소성변형을 이용하여 기공을 채우거나, 높은 온도에서 압력을 가하여 전위와 확산을 통해 기공을 소멸하는 방법을 택하고 있다. 본 강소성 공정인 ECAP는 분말고형화에 필요한 치밀화와 분말 결합에 매우 우수한 특성을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 유용한 가공 변수 조절로 인해 고기능/우수 분말의 결정화 및 결정립 성장을 억제하는 동시에 높은 치밀화를 이룰 수 있는 공정으로 응용되고 있다^{6,11}). 그러나 공정의 접근과 해석에 있어서 많은 경우 실험적 방법에 의존하고 있어, 본 연구에서 공정상 나타나는 여러 특성과 변수들을 유한요소법을 이용하여 고찰하고자 한다.

2. 분말성형 이론과 유한요소해석 방법

분말성형에 대한 유한요소법을 수행하기 위해서는 다공질 재료의 변형에 대해 구형 가능한 이론항복식이 필요한데, 이를 위해 Gurson 항복식을 사용하였다¹⁵). 연성 재료나 기공을 포함한 분말 재료가 큰 소성변형을 받을 때는 일반적으로 개재물과 같은 제 2 상 주위에서 기공의 발생, 성장, 합체의 과정을 거쳐 재료의 파괴로 이어진다. 이렇게 기공을 포함한 재료의 경우는, 소성변형 중에 정수압 응력성분의 영향에 의해 체적 변화를 수반하므로, 비압축성 변형과 정수압 응력 성분의 무의존성을 가정한 von Mises의 항

복조건식이나 그에 대응하는 구성방정식이 성립하지 않는다. 기공을 함유한 재료에 대해서 항복조건식을 다음과 같은 식 (1)의 일반적인 형태의 항복조건식이 제안되어 있다.

$$f(\sigma_{ij}, \sigma_M, C_v) = \left(\frac{q}{\sigma_M}\right)^2 + g\left(\frac{\sigma_{kk}}{\sigma_M}, C_v\right) = 0 \quad (1)$$

여기서 C_v 는 기공 체적 함유율이고, σ_M 은 모재의 유효응력이며, q 는 기공을 함유한 재료의 유효응력에 해당한다. 일반적으로 연성 재료의 경우, C_v 는 매우 작은 10^{-4} 정도로 나타나며, 변형에 따라 증가한다.

Gurson은 강소성 재료나 다수의 무작위한 형태의 기공을 함유한 연속체를 하나의 구형 기공을 갖는 재료의 경우로 이상화하고, 소성변형에 대한 극한 해석을 수행하여 근사적으로 다음과 같은 등방성 기공재료에 대한 항복조건식(Gurson's yield criterion)을 식 (2)와 같이 일반화하여 제안하였다.

$$f = \left(\frac{\sqrt{\frac{3}{2}}\sigma_{ij}\sigma_{ij}}{\sigma_M}\right)^2 + 2q_1 C_v \cosh\left(\frac{q_2 \sigma_{kk}}{2\sigma_M}\right) - (q_3 C_v^2 + 1) = 0 \quad (2)$$

여기서 $q_1=1.5$, $q_2=1$, $q_3=q_1^2$ 일 때 수치해석 결과가 실제 다공질 재료의 변형을 잘 표현되는데, 분말 성형 공정을 위해 Gurson 항복조건식을 고려하여 상용 유한요소 Code인 ABAQUS에서 계산을 수행하였다.

분말고형화 ECAP 공정 시 변형거동을 계산하기 위한 모재의 물성으로 50 μm 에 등축 결정립을 가지는 어닐링 된 Cu 재료를 사용하였다. 일반적인 인장 실험으로는 본 계산에서 발생하는 유효변형률 1 이상의 대변형률에 대한 결과를 얻기 어려우므로, 전위 셀의 진화 모델을 이용하여 이론적 계산을 통해 얻은 응력-변형률 곡선을 고려하였다¹⁶). 초기 시편의 형상 및 크기는 실제 실험과 동일한 크기인 $6 \times 6 \times 50 \text{ mm}^3$ 으로 설계하였으며, 내부에 분말을 채우기 위한 공간의 크기는 $4 \times 4 \times 40 \text{ mm}^3$ 이고, 두께 방향 변형률이 0인 평면변형 상태를 가정하였다. ECAP의 금형은 모서리각 $\Psi=0^\circ$ 와 통로각 $\Phi=90^\circ$ 이고, 초기에 총 5000개의 4절점 요소를 사용하여 계산을 하였다. 또한, 냉간가공(20°C)의 등온 상태를 유지하기 위해 속도는 1 mm/s로 일정하게 유지하였고, 이 경우 시편의 온도증가는 1°C 이하로 유지된다. 시편과 금형 사이의 마찰 계수는 일반적으로 냉간가공 공정에 적용되는 0.1을 사용하였으며, 분말과 순구리 피복재간의 계면은 0.2의 마찰계수를 사용하였다. 실험에서 Cu

피복재에 분말을 충전한 다음 냉간 정수압 공정을 거쳐 내부 분말의 밀도를 높이는 것을 고려하여, 초기 상대 밀도를 50%, 70% 그리고 90%로 하여 계산을 수행하였다. 본 계산은 KISTI에서 제공하는 IBM690 (666 Gflops) 슈퍼컴퓨터를 사용하여 계산을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 분말 ECAP의 개략적인 모식도이다. (a)는 ECAP 가공 중에 발생하는 응력의 양상과 유한

요소 계산 시 시간에 따른 응력 경향을 분석하기 위해 상부(Top) 지점과 하부(Bottom) 지점으로 나누어 표시하였고, (b)는 실제 실험에서 사용된 Cu 분말의 피복과 내부 분말의 형상이다. ECAP 공정 초기의 경우, 압축응력으로 인해 분말 치밀화가 이루어지며 주변형대를 통과하면서 전단변형에 의한 전위 증식 및 결정립 미세화가 이루어진다. 따라서 공정 중에 일어나는 압축응력과 전단응력은 재료의 파괴나 재료 변형에 중요한 변수로 작용될 수 있다.

그림 2는 분말 ECAP 가공 공정 후에 잔류하는 수직응력(S11, S22)을 나타낸 것으로 피복재와 분말

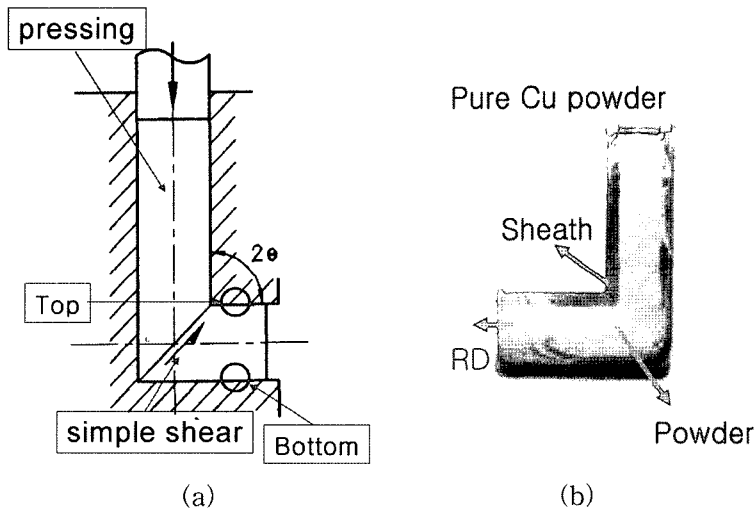


Fig. 1. ECAP for powder consolidation: (a) schematic plot and (b) experimental picture.

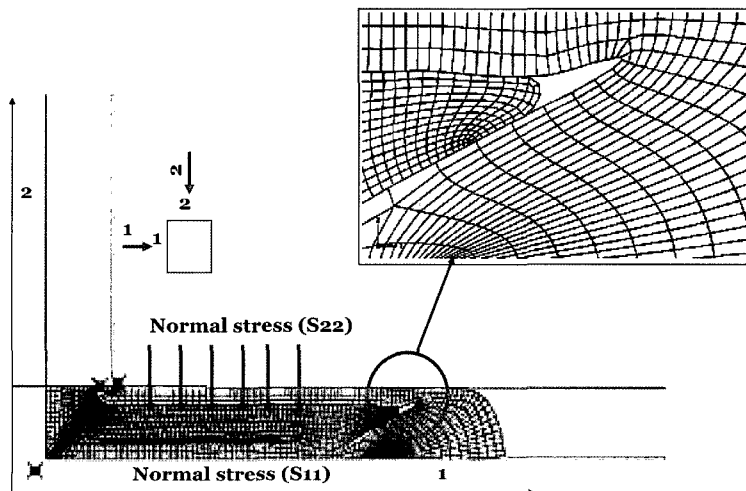


Fig. 2. Deformed geometry and the surface gap predicted by finite element method.

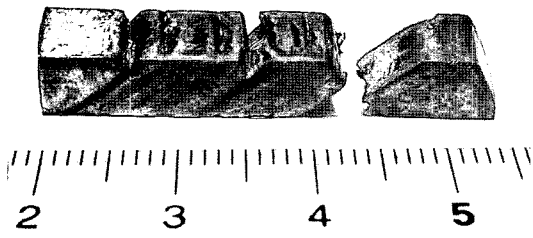


Fig. 3. The fracture of powder ECAP sample after multipasses.

사이의 재료 앞부분에 나타나는 결함은 상부지점과 하부지점의 잔류하는 수직응력의 차이로 인한 것으로 사료된다. 내부 분말이 받는 응력의 상부지점에 잔류하는 수직응력은 주로 재료에 있어서 위에서 누르는 수직응력(S22)이고, 하부지점의 공정 후 잔류하는 수직응력은 대개 출구 방향의 수직응력(S11)이 존재한다. 이런 가공 공정 중 발생하는 재료 유동의 차이로 나타나는 상부와 하부의 응력 양상으로 인해 분말과 피복재 사이에 결함을 발생하게 된다. 이와 같이 내부에 결함이 존재하는 상태에서 반복 공정을 이루었을 때, 그림 3에서 보는 바와 같이 파괴의 주된 요인으로 작용되어질 수 있으나 상부와 하부의 응력 상태를 바꾸어 주는 경로 C를 사용할 경우 전전한 분말 고형체를 얻는 것이 더 용이해진다⁹⁾.

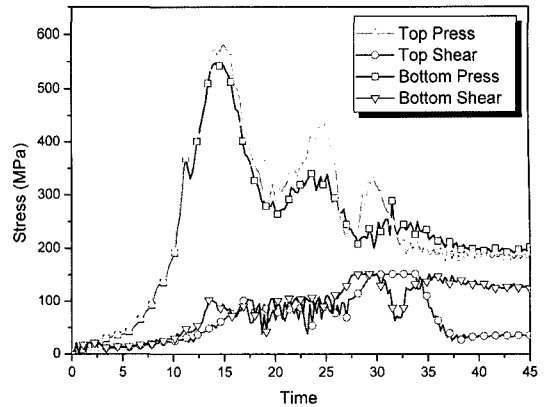


Fig. 4. Stroke time vs. stress (press and shear) during powder ECAP at various places (Initial relative density: 70%).

그림 4는 시간에 따른 응력의 이력을 나타낸 것으로, 분말 ECAP 공정 중 내부 분말 상대밀도가 70% 일때 분말에 작용하는 압축응력과 전단응력을 나타낸 것이다. 이는 일부 요소를 시간에 따라 응력 상태를 추적한 것이며, 외부 피복재의 경우 분말 ECAP 가공이 끝나게 되면 제거하기 때문에 내부 분말의 응력 분포만 고려하였다. 전반적으로 압축응력이 내부 분말에 가하는 전단응력보다 높게 작용되어 분말 재료에서 발생할 수 있는 파괴의 요소를 제거할 수 있으며, 게다가 전단변형으로 인한 전위 증식은 분말이 가질 수 있는 산화막과 불순물을 깨뜨리

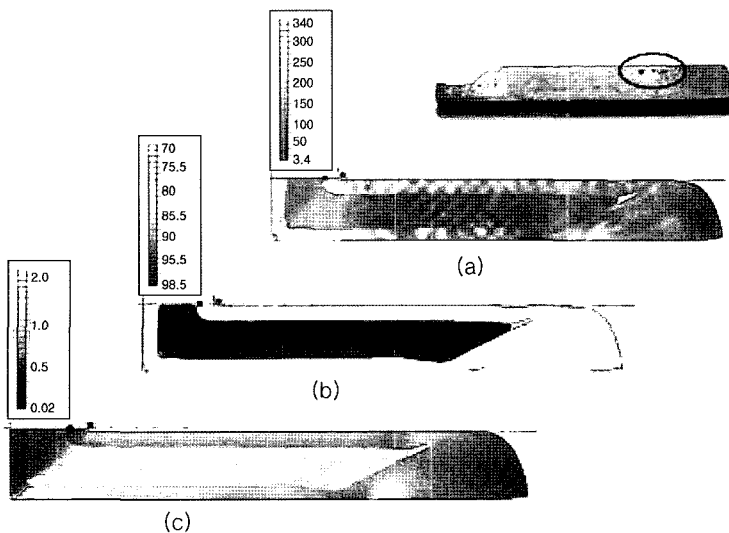
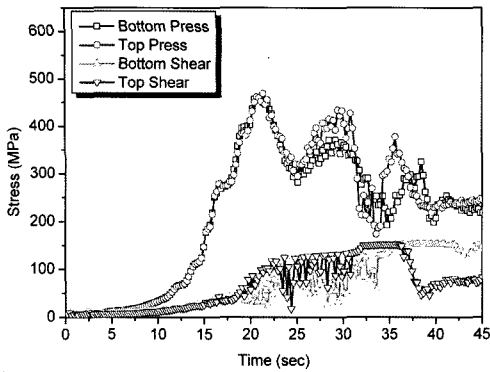
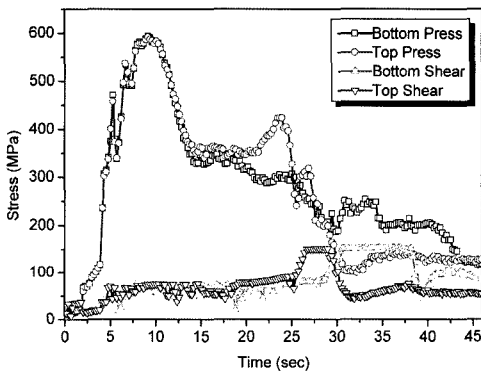


Fig. 5. Contour distribution calculated by the finite element method at final state: (a) effective stress, (b) relative density and (c) effective strain.



(a) Stress history at various points under the initial relative density of 50%.



(b) Stress history at various points under the initial relative density of 90%.

Fig. 6. The stroke time vs stress (press and shear) under different initial relative density values during powder ECAP.

우 효과적임을 나타내고 있다^{6,8)}. 마찰의 영향으로 인해 재료의 하부(Bottom) 지점이 다소 불균일 변형으로 인해 하부 지점의 유효변형률이 높게 나타나며, 이 때문에 소재가 ECAP 공정의 주변형대를 통과한 이후에 하부 지점의 전단응력이 상부지점 보다 높은 전단 응력 상태를 나타내는 것으로 사료되어지나, 자세한 각 요소의 응력 변화에 대해서는 추후 연구를 진행할 예정이다.

그림 5는 유한요소해석을 통해 얻은 변형된 소재에 대한 형상과 실험을 통해 얻은 형상에 대한 비교이다. 실제 실험에서 Cu 피복재와 내부 Cu 분말 사이에 소재의 앞 부분에 작은 내부 결함이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 유한요소법을 통해 계산된 결과인 유효응력 (a)과 유효변형률 (c)은 기존의 벌크

상태의 발표된 것과 유사한 분포를 나타내고 있을 뿐만 아니라^{10,12-14,17)}, 내부에 충전된 분말 밀도 (b)의 경우는 높은 응력으로 인해 상대 밀도가 98%이상으로 나타내고 있다.

또한 그림 6은 가공 초기 상대밀도가 50%인 경우와 90%인 경우의 시간에 따른 응력 분포를 나타낸 것으로써, 초기에 상대밀도가 높을 경우에는 ECAP 가공 중에 압축으로 인한 분말 치밀화가 더 효과적으로 이루어지게 되나, 상대밀도가 작은 경우에 비해 더 높은 가공 하중이 필요하게 된다. 초기 상대밀도에 따른 최종 밀도의 차이는 거의 나타나지 않는다. 그러나 주변형대 통과 시 전단응력으로 인해 심하게 진동하는 부분도 상대밀도가 높을수록 적게 나타나는 것을 확인할 수 있으므로, 초기 내부 밀도가 높을수록 높은 압축응력이 작용하여 치밀화를 이루는 시간이 짧아진다.

4. 결 론

많은 기능성 분말 제조 공정이 발달됨에 따라 이를 효과적으로 고형화할 수 있는 공정이 필요하게 되었으며, 본 연구에서 분말 고형화 공정으로 강소성 공정의 하나인 ECAP 공정을 사용하여 발생할 수 있는 가공 변수 및 공정에 대해 유한요소법을 이용한 연구를 통해 다음의 결론을 얻었다.

1. 피복재를 사용하여 분말고형화를 이루는 공정인 분말 ECAP는 피복재와 내부 분말의 유동 차이로 인해 공정상 다른 양상을 나타내는 응력은 주변형대 통과 이후에 그 계면에 결합을 발생시킬 수 있으며, 반복 공정 수행 시 소재 파괴의 원인으로 작용될 수 있으나, 상부와 하부의 응력 상태를 바꾸어 주는 경로 C를 사용할 경우, 전전한 고형체를 얻기 용이하다.

2. 분말 ECAP 공정은 전반적으로 높은 압축응력의 작용으로 인해 분말 밀도를 높일 수 있으며, ECAP 공정의 주변형대를 통과함으로써 전위 증식 및 산화막 제거에 매우 유용한 공정으로 사료되는데, 이는 결정립 성장을 최대한 억제하는 동시에 고형화를 이룰 수 있음을 나타내고 있다.

3. 초기 내부 분말의 밀도가 높을수록 더 높은 압축응력이 작용하게 되며, 치밀화 시간도 짧아지고 전전한 고형체를 만들기 용이하기 때문에 초기 밀도가 중요한 변수로 작용하는 것임을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2006년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었으며, 또한 BK21 사업단의 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. H. S. Kim and Y. Estrin: Appl. Physics Lett., **79** (2001) 4115.
2. R. Z. Valiev and I. V. Alexandrov: Ann. Chim. Sci. Mat., **27** (2002) 3.
3. H. Gleiter: Nanostruct. Mater., **6** (1995) 3.
4. R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev and I. V. Alexandrov: Prog. Mater. Sci., **45** (2000) 103.
5. H. S. Kim and D. N. Lee: Mater. Trans., **45** (2004) 1829.
6. S. C. Yoon, S. J. Hong, M. H. Seo, Y. G. Jeong and H. S. Kim: J. Kor. Powder Metall. Inst., **11** (2004) 233.
7. J. Robertson, J. T. Im, I. Karaman, K. T. Hartwig and I. E. Anderson: J. Non-Cryst. Solids, **317** (2003) 114.
8. S. Y. Chang, K. S. Lee, S. H. Choi and D. H. Shin: J. Alloys Comp., **354** (2003) 216.
9. H. S. Kim: Mater. Sci. Eng., **A251** (1999) 100.
10. S. C. Yoon and H. S. Kim: Mater. Sci. Forum, **503-504** (2006) 221.
11. Y. G. Jeong, M. H. Seo, S. C. Yoon, S. I. Hong and H. S. Kim: J. Metastable Nanocryst. Mater., **24-25** (2005) 383.
12. H. S. Kim, M. H. Seo and S. I. Hong: Mater. Sci. Eng., **A291** (2001) 86.
13. B. S. Moon, H. S. Kim and S. I. Hong: Scripta Mater., **46** (2002) 131.
14. V. M. Segal: Mater. Sci. Eng., **A197** (1995) 157.
15. A. L. Gurson: J. Eng. Mater. Techno., **99** (1977) 2.
16. Y. Estrin, L. S. Tth, A. Molinari and Y. Brchet: Acta Mater., **46** (1998) 5509.
17. S. C. Yoon, M. H. Seo and H. S. Kim: Scripta Mater., **55** (2006) 159.