

티타늄 분말재료 기술

김 용 진

한국기계연구원 재료연구부

Technology of Titanium Powder Materials

Yong-Jin Kim

Korea Institute of Machinery and Materials

1. 서 론

티타늄 및 티타늄합금은 강도/밀도 비가 높고, 내열성, 내부식성, 피로강도가 높기 때문에 지금까지 항공, 우주, 해양 및 화학 장치용 소재로서 많이 사용되어 왔다. 최근, 자동차 산업과 레저용 제품 등의 성능과 효율향상을 위해 항공·우주 산업이나 특수 화학장치 산업에 한정되어 사용되고 있던 티타늄소재를, 이들 산업으로 확대하여 응용하고 있다^{1,2)}. 특히 티타늄의 가볍고 강한 특성을 이용하여 기존의 자동차 부품을 대체하여 경량화 시키고, 고효율화하고자 하는 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 골프용품 등 각종 스포츠용품에도 경기력 향상을 위해 기존 재료를 티타늄소재로 대체시키고 있다³⁻⁵⁾. 그러나 티타늄소재의 사용을 일반화하는데 가장 큰 어려움은 지금까지 구조용 재료로서 널리 사용되고 있는 철, 구리 및 알루미늄 등에 비해 제조를 위한 공정비용이 너무 높기 때문에 제품의 가격 부담이 크다는 것이다. 이는, 티타늄이 높은 반응성을 가지고 있어 일반적인 방법으로는 용해 및 주조가 불가능하고, 주조한 잉곳도 단조, 압연 및 절삭 가공이 어렵기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 티타늄 혹은 티타늄합금분말을 이용, near net 형상으로 성형하여 제품을 제조하는 분말야금법이 주목을 받게 되었다⁶⁻¹⁰⁾.

본 고에서는 티타늄 분말부품을 제조하기 위한 분말야금공정을 적용하는데 있어서, 사용되는 원료분말 및 이를 성형, 소결 등의 고밀도화 공정을 이용하여 제품화하는 기술과 응용현황에 대해 간략히 기술하고자 한다.

2. 티타늄 원료 분말

분말야금법에 사용되는 티타늄분말은 크게 순수 티타늄 분말과 알루미늄, 바나듐 등의 원소분말을 혼합하여 사용하는 경우(blended elemental; BE)와 rotating electrode process(REP), electron beam rotating disc(EBRD) 등의 방법을 사용하여 티타늄합금분말을 제조한 후, 이를 원료분말로 사용하는 경우(pre-alloy; PA법)로 구분할 수 있다. 전자의 경우에 사용되는 티타늄분말은 산화티타늄을 Kroll법이나 Hunter법으로 정제한 후, 용해하여 티타늄 ingot을 만드는 공정 중간에 생성되는 티타늄 스펀지(titanium sponge)이기 때문에, 용해주조공정에 의해 제조된 티타늄에 비해 분말가격이 절반 이하로 싼 장점이 있다. 반면 후자의 경우는 티타늄 혹은 그 합금의 잉곳을 재 용해하여 합금화하고, 다시 분말로 제조하기 때문에 티타늄 스펀지분말에 비해 청정하지만 분말가격이 비싸, 용해 주조법에 의해 제조된 소재보다 경제적인 면에서 불리하다는 단점이 있다. 따라서 티타늄 스펀지분말을 원료분말로 사용하여 낮은 공정비용을 유지하고, 기존의 티타늄소재와 동등한 특성을 갖는 제품을 제조하고자 하는 연구가 많이 진행되어 왔다¹⁰⁻¹⁴⁾.

티타늄 스펀지분말을 이용한 티타늄 소재 제조는 제조 공정상의 여러 장점에도 불구하고, 분말 자체가 CI성분을 1,000-1,500ppm정도 함유하고 있기 때문에 여러 가지 문제점이 있다. 이 중 가장 큰 문제는 티타늄 분말을 성형한 후 소결 및 고온등압성형(hot isostatic press; HIP)을 거치더라도 CI의 기화에 의해 잔류 기공이 존재해서 진밀도를 얻을 수 없다는

것이다. 이러한 문제로 wrought 소재에 비해 인장 및 항복강도, 연신율, 피로강도, 고온강도 등 대부분의 기계적 특성이 낮게 나타난다. 티타늄분말에 포함된 Cl은 hydride-dehydride(HDH)공정의 적용으로 Cl함량을 10ppm수준으로 낮추는데 성공하였다⁸⁾. HDH 분말을 사용할 시 소결 및 HIP 후 진밀도를 얻을 수 있으며, 기계적 특성도 wrought재와 거의 유사하다. 그러나 이 방법은 티타늄 판재를 hydride시킨 후, 분쇄하여 분말로 만들고 다시 dehydride처리에 의해 수소를 제거하여 분말을 제조하기 때문에 wrought재를 사용하는 것에 비해 단지 부품 제조 시 기계 가공량을 줄일 수 있다는 점 외에는 큰 장점이 없다. 따라서 티타늄 분말부품의 사용화를 위해서는 경제적인 측면에서 스펀지분말을 원료로 하여 기계적 특성이 우수한 티타늄 분말부품을 제조하는 공정의 개발이 가장 바람직하다. 그림 1은 Kroll법에 의해 제조된 스펀지분말과 REP공정에 의해 제조된 Ti-6Al-4V합금분말의 형상을 나타낸다. 그림에서와 같이 티타늄 스펀지 분말은 불규칙형상이기 때문에 일반적인 분말성형프레스에 의해 쉽게 성형이 가능하지만, 합금분말은 분말제조 공정특성상 대부분이 구형분말이기 때문에 성형이 쉽지 않다.

3. 티타늄 합금분말 부품 제조 기술

부품제조를 위한 성형 및 소결공정은 크게 원소분말(elemental powder)을 사용하는 방법(BE법)과 합금분말(pre-alloy powder)을 사용하는 방법(PA법)으로 구분할 수 있다. 일반적으로 BE법에 의해 제조된 티타늄 분말부품은 원소분말을 사용함으로써 저 비용

으로 제조가 가능하지만 진밀도화가 어려운 반면, PA법은 진밀도화가 가능하고 성능도 BE법에 의해 제조된 티타늄 부품보다 우수하기 때문에 항공기용 부품 등에 주로 응용된다. 그러나 최근 분말야금 공정의 개선과 제조장비의 성능 향상에 의해 BE법에 의해 제조된 티타늄부품도 진밀도화가 가능하고 wrought 소재나 PA법에 의해 제조된 티타늄부품과 동등한 성질을 가질 수 있다¹⁵⁾.

티타늄 부품의 기계적 특성은 원료분말의 특성, 합금원소, 밀도와 조직에 의존하여 원료분말의 특성에 보다 큰 영향을 받는다. 지금까지 티타늄 분말재료는 Ti-6Al-4V합금에 대해 중점적으로 연구되어 왔기 때문에 대부분의 연구결과는 이 합금을 위주로 발표되고 있다. 그러나 최근에는 일반 상용화를 목적으로 β 티타늄합금이나 근이 α 티타늄합금에 대한 연구도 부분적으로 수행되고 있으며, 소결기술의 발달로 최근 BE법에 의해서 상대밀도 92%에서 100% 사이의 부품을 제조할 수 있다. 한편 PA법에 의한 티타늄 소재제조는 소결공정을 거치는 BE법과는 달리, 가스분사공정(gas atomization process)이나 PREP(plasma rotating electrode process)법에 의해 제조된 구형분말을 고온 등압성형(hot isostatic press; HIP)공정을 거쳐 진밀도화가 가능하다. 따라서 PA법에 의해 제조된 티타늄 소재의 기계적 특성은 원료분말 자체의 청정도에 의해 크게 좌우된다. 그림 2는 BE 및 PA법에 의해 제조된 Ti-6Al-4V 합금의 피로특성을 나타낸다⁸⁾. BE법에 의해 제조된 합금은 wrought재(1/M product)에 비해 낮은 피로강도 및 피로수명을 나타내는데, 이는 분말 내에 포함되어 있는 Cl과 잔류기공에 의한 것이다. 그러나 BE법에 의해 제조된 분

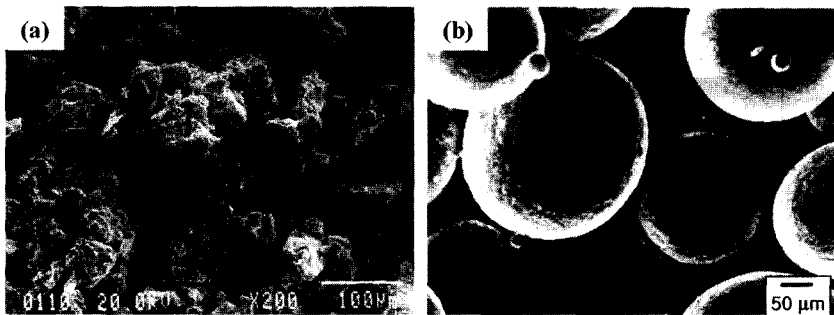


Fig. 1. Titanium and alloy powders fabricated by (a)Kroll and (b)REP process: (a) pure titanium powder, (b) Ti-6Al-4V powder.

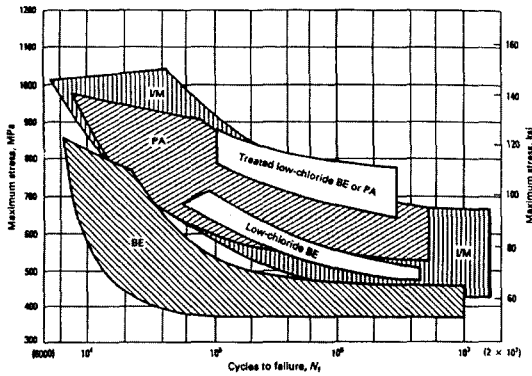


Fig. 2. Comparison of the room temperature fatigue life scatter bands of BE and PA Ti-6Al-4V compacts to that of a mill-annealed I/M alloy.

말 티타늄소재도 Cl의 함유량이 10ppm이하인 HDH 분말을 원료로 사용한 경우에는 wrought재와 비슷한 수준의 피로특성을 얻을 수 있다. PA법에 의해 제조된 Ti-6Al-4V 합금은 wrought재와 동등수준 이상의 피로특성을 나타내기 때문에 기존 wrought재를 대체할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 티타늄 복합분말 부품 제조 기술

티타늄 소재를 자동차 부품 등 일반 산업용으로 상용화하기 위해서는 앞에서 언급된 경제성 문제 외에 기존 사용되고 있는 재료보다 내마모성, 강성 (rigidity) 및 내열성이 우수하여야 한다. 이러한 우수한 특성 부여를 위해 티타늄 복합재료에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 티타늄 복합재료 제조공정은 용해·주조에 의한 제조방법과 분말야금에 의한 제조방법으로 나눌 수 있으며, 전자는 주로 티타늄 용해 시 카본을 첨가하여 부분적으로 TiC 입자를 생성시켜 Ti/TiC복합재료를 제조하는 것으로, 기계적 특성이 TiC의 주상정(dendrite)크기에 의존하기 때문에 주조 시 냉각속도가 빨라야 한다. 따라서 제조할 때 잉곳의 크기가 제한 받고, 잉곳내에 TiC가 생성되어 있어 단조, 압연 등의 후 공정에 어려움이 있기 때문에 연구가 활발히 진행되지 않고 있다. 반면에 분말야금법에 의한 티타늄 복합재료 제조는 경제성 향상과 특성 개선을 동시에 추구할 수 있는 유일한 공정이기 때문에 지금까지 꾸준히 연구되고 있다¹⁶⁻¹⁸⁾.

티타늄 분말복합재료에서 티타늄의 강한 화학반응

성에 의해 사용할 수 있는 강화재(reinforcement)는 한정되어 있다. 현재 주로 연구에 사용되고 있는 섬유 강화재로서는 SiC이며 입자 강화재로는 TiC, TiB₂, B₄C등이다. SiC섬유를 이용한 티타늄 복합재료에 대한 연구는 70년대부터 최근까지 많은 연구가 진행되고 있지만 이방성(anisotropy)과 복잡한 제조공정에 따른 높은 제조비용에 의해 상용화를 하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 입자강화 복합재료를 상용화하기 위한 연구가 활발해지고 있다.

정질입자가 분산강화된 티타늄 복합재료를 분말야금공정으로 제조하는 방법 중 가장 널리 사용되는 공정은 CHIP공정이다. 그림 3은 CHIP공정을 모식적으로 나타낸 것이다. 먼저 티타늄분말과 분산강화용 분말을 혼합기에서 혼합한 후 냉간 등압성형(cold isostatic press; CIP)기에서 원하는 형상으로 성형을 한다. 이때 성형압은 약 400MPa을 가해 성형밀도가 진밀도의 약 85-90%에 달하게 한다. 성형체는 10⁻⁴torr 이상의 고 진공에서 소결하며, 진공소결 후 밀도는 모든 기공이 폐기공화되는 상대밀도 약 94%이상 되게 한다. 이를 위한 적절한 소결조건은 티타늄분말

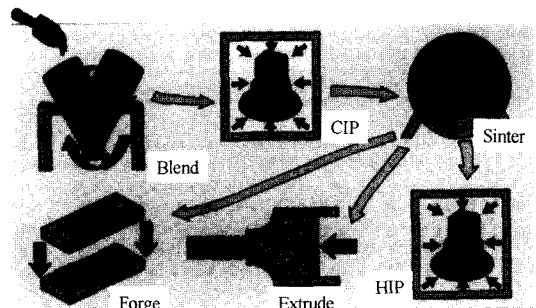


Fig. 3. Schematic of CHIP process.

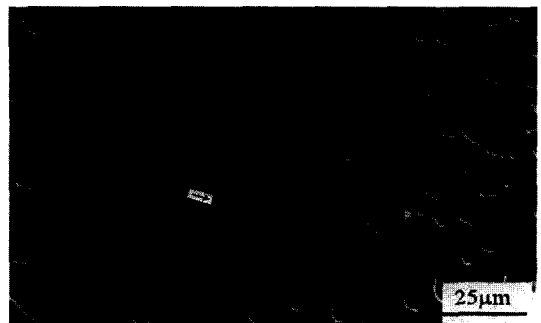


Fig. 4. Microstructure of Ti-TiC sintered composite processed by KIMM.

의 크기, 입도분포, 합금종류에 따라 매우 다르나 대부분의 소결온도는 1200°C 이상이다. 폐기공화 시킨 소결체는 잔류기공 제거를 위해 HIP, 고온 단조, 압출 혹은 압연 등의 공정을 거친다. 현재 잔류기공 제거를 위해 대부분이 HIP을 사용하고 있으며 고온 단조, 압연 등을 병행하여 재료특성을 향상시키고자 하는 연구가 진행되고 있다.

그림 4는 한국기계연구원에서 새로운 공정에 의해 제조된 Ti/TiC복합재료의 대표적인 조직을 나타낸 것이다¹⁹). TiC입자의 크기가 10-30 μm 범위이며 전체적으로 입자가 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 그림 5는 온도에 따른 인장 및 항복강도의 변화를 Ti-6Al-4V합금과 비교한 것으로 TiC가 첨가됨으로써 상온 및 고온에서의 인장, 항복강도가 25-30% 증가하고 있음을 알 수 있다²⁰).

5. 티타늄 분말 부품의 응용

티타늄 분말부품의 산업화 응용은 대상 부품의 종류에 따라 BE 분말을 원료분말로 사용하는 경우와 PA분말을 원료로 사용하는 경우로 뚜렷하게 구분할 수 있다. 앞에서 언급된 바와 같이 BE분말은 성형

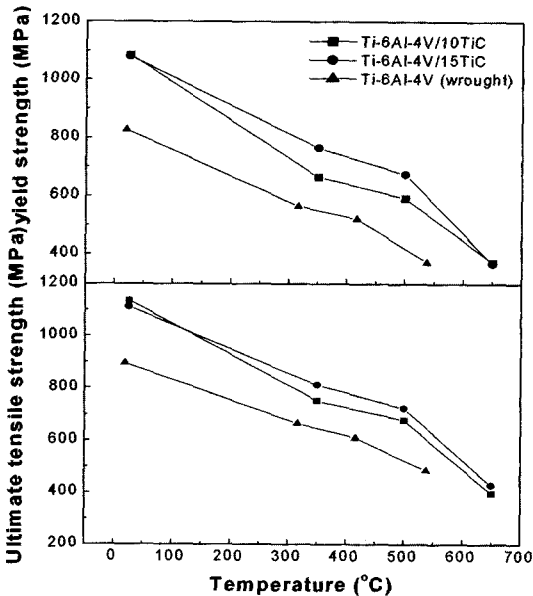


Fig. 5. Temperature dependence of yield and ultimate tensile strength of wrought Ti-6Al-4V and Ti-6Al-4V/composites processed

및 소결이 가능하기 때문에 복잡한 형상의 near net 부품을 제조할 수 있는 반면, 기계적 특성의 한계를 가지고 있다. 한편, PA분말은 CIP, HIP 혹은 압출 등의 고비용 공정을 거치기 때문에 기계적 특성은 우수하지만 BE분말 공정에 비해 제조비용이 2배 이상 비싸진다. 따라서 현재 특수한 목적의 부품을 제외하고는 대부분 BE분말을 사용하여 부품을 제조, 상업화하려고 미국, 일본 등을 중심으로 많은 노력을 하고 있다. 현재 티타늄 분말부품의 응용은 미국 Dynamet Technology사에서 그림 3의 CHIP공정을 이용하여 Cerme Ti라는 상품명으로 가장 활발하게 산업화를 하고 있다²¹). 현재 이 소재는 그림 6과 같은 의료용, 군사용, 자동차용 부품 및 스포츠용품 적

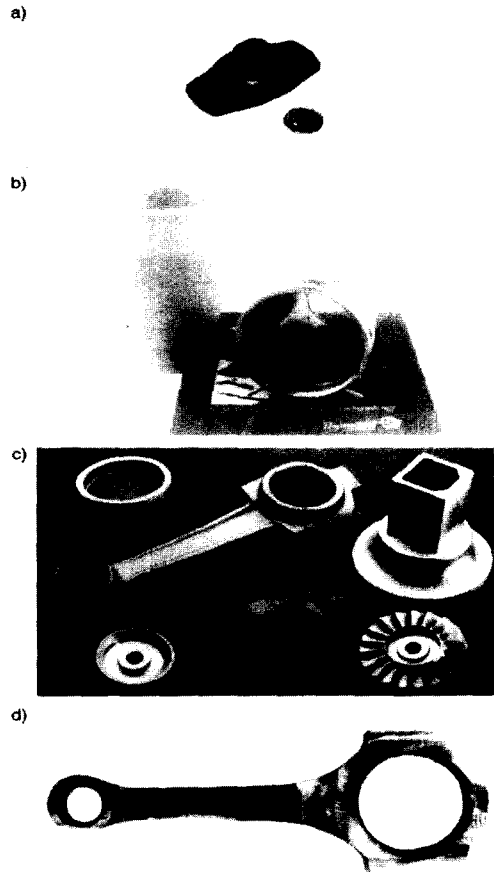


Fig. 6. Parts produced using the blended elemental approach; a) Ti-6Al-4V medical prosthesis produced by die pressing, b) preform and finished machined Ti-6Al-4V sidewinder missile housing, c) a variety of parts produced by Dynamet Technology Inc., and d) connecting rod.

용을 활발히 진행하고 있다. 한편 일본의 토요타 자동차에서는 1998년에 티타늄 분말복합재료로 비교적 가격이 저렴한 자동차용 흡, 배기밸브를 개발하여 새로운 승용차 엔진인 Altezza 모델에 처음으로 적용하였다²²⁾. 엔진에 티타늄 흡, 배기 밸브를 적용하므로써 기존 사용되고 있는 철계 흡, 배기밸브에 비해 밸브 무게는 40%감소시킬 수 있었고, 스프링을 포함한 전체 무게는 16%감소시킬 수 있었다. 이 결과 엔진의 최대 회전력을 700rpm증가시킬 수 있었고, 소음도 30%이상 감소시켜 획기적인 엔진성능의 향상을 가져올 수 있었다. 또한 마찰력의 현저한 감소로 쉐시프트의 운전 토크(driving torque)를 20%이상 감소시켜 저연비, 고성능의 엔진을 실현할 수 있게 되었다. 따라서 1998년 처음 티타늄 분말 흡, 배기밸브를 자동차 엔진에 적용한 이후 현재까지 약 50만개 이상의 밸브를 제작, 사용하고 있다. 그림 7은 티타늄 복합 분말로 제조된 흡, 배기밸브가 엔진에 장착된 승용차 및 밸브의 형상을 나타낸다.

6. 티타늄 분말 부품의 향후전망

티타늄이 가벼우면서도 강하고 내식성이 좋은 특성을 가지기 때문에 지금까지 항공기, 화학공업용 장치 및 의학기구용 재료로서 중점적으로 사용되어 왔다. 그러나 1990년대 분말야금공정을 적용하여 기존의 가공공정에 의해 제조되는 티타늄 부품보다 상대적으로 값싸고 복잡한 형상의 near net 부품제조가 가능함으로서 그 응용범위가 자동차 부품, 스포츠용품 등으로 다양화 되고 있다. 특히 티타늄 소재에서

가장 문제시 되고 있는 내마모성을 TiC등의 경질입자를 함유한 분말복합재료를 사용하여 해결함으로써 자동차용 흡, 배기 밸브 등에 적용이 가능하여 젊고 일본에서는 자동차엔진에 장착하여 상용화에 성공하였다. 그러나 티타늄 분말부품의 우수한 특성과 가공공정의 최소화에 의한 제조비용 절감에도 불구하고, 지금까지 그 응용범위가 획기적으로 증가하지 않는 이유는 철계 부품과의 가격 경쟁력 때문이다. 즉, 지금 티타늄 분말부품이 대체하려는 대부분의 부품은 철을 주성분으로 하는 부품이기 때문에 순수한 가격적인 측면에서 티타늄 분말부품이 매우 불리한 여건에 놓여 있다. 그러나 자동차 및 각종 기계부품의 티타늄 분말부품 적용여부는 가격/성능의 비로서 주로 판단하기 때문에, 토요타 자동차의 적용 예에서와 같이 성능면에서 매우 우수한 특성이 나타나면 가격적인 불리함에도 불구하고 산업화가 가능하다. 이를 위해서는 향후 in-situ 공정과 같이 원료분말 및 부품 제조비용을 최소화 하고, 순수한 성형, 소결공정에 의해서만 우수한 특성을 가진 티타늄 부품을 제조할 수 있는 기술을 확보할 수 있어야하고, 이러한 기술개발로 인해 다양한 산업분야에 응용잠재력이 매우 클 것으로 예상된다.

참고문헌

1. M. J. Donachie, JR.: "Titanium and titanium alloys", ASM, USA (1982) 3.
2. E. W. Codlings: "The physical metallurgy of titanium alloys", ASM, USA (1984) 15.
3. Y. T Lee and Y. T Hyun: Bull. of the korea Inst. of Met.

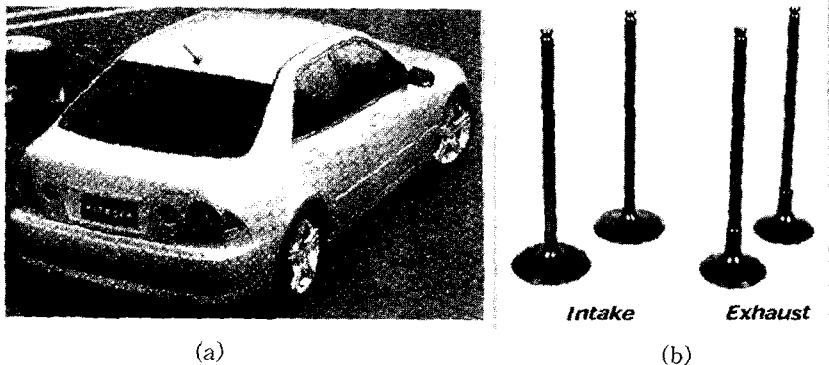


Fig.7. (a) The first family car to feature a Ti-MMC valve and (b) the appearance of the developed valves.

- & Mater. **8** (1995) 286.
4. R. Vandermark: JOM, **6** (1997) 24.
 5. A. M. Sherman, C. J. Sommer, and F. H. Froes: JOM, **3** (1997) 45.
 6. A. D. Hanson, J. C Runkle, R. Widmer and J. C Hebeissen: The Inter. J. of P/M., **26** (1990) 157.
 7. S. M. Abrowitz, P. F. Weihrauch, H. L. Heussi, S. Abrowitz: Proceed. of Titanium '95 Science and Tech. (1996) 2722.
 8. F. H. Froes and C. Suryanarayana: Rev. in Particulate Mater. **1** (1995) 223.
 9. A. S. Sheinker, G. R. Chanani, and J. B. Bohlen: Int. Jour. Powder Metall., **23** (1987) 171.
 10. V. S Moxson, P. Sjoblom and M. J. Trzcinki: Adv. in P/ M & Particulate Mater. **16** (1992) 125.
 11. D. Eylon, F. H. Froes, D. G. Heggie, P. A. Blenkinsop and R. W. Gardiner: Met. Trans. A, **14A** (1983) 2497.
 12. S. G. Kumar and R. G. Reddy: Met. Trans.A, **27A** (1996) 1121.
 13. G. Liu, D. Zhu and J. K. Shang: Met. Trans. A, **2 26A** (1995) 159.
 14. W. Tong, G. Ravichandran, T. Christman and T. Vreeland Jr.: Acta metall. **43** (1995) 235.
 15. D. Eylon, F. H. Froes, S. Abkowitz: "Titanium powder metallurgy alloys and composite", in ASM Hnadbook, vol7, USA (1998) 874.
 16. T. Saito: Adv. Pertorm Mater. **2** (1995) 121.
 17. T.S. Srivatsan, T.S. Sudrashan and E.J. Lavernia: Progress in Mater. Sci, **39** (1995) 317.
 18. Y. Lin, R. H. Zee and B.A Chin: Met. Trans. A, **22A** (1991) 859.
 19. Y.J. Kim, H. Chung and S. J. L Kang: Composite Part A. **32** (2001) 731.
 20. Y.J. Kim, H. Chung and S. J. L Kang: Mat. Sci. Eng. A **333** (2002) 343.
 21. S. Abkowitz, S. M. Abkowitz, H. Fisher and P. J. Schwartz: JOM. **5** (2004) 37.
 22. T. Saito: JOM. **5** (2004) 33.