Journal of Korean Powder Metallurgy Institute
Vol. 13, No. 6, 2006

가스 분무 공정에 의해 제조된 Al-Si 합금 분말 압출재의 열처리에 의한 미세조직 및 기계적 특성 변화

남기영 · 진형호 · 김용진[a] · 윤석영 · 박용호*
부산대학교 재료공학부, [a]한국기계연구원 분말재료연구센터

Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties for Al-Si Alloyed Powder Material by Gas Atomizing and Hot Extrusion Process

Ki-Young Nam, Hyeong-Ho Jin, Yong-Jin Kim[a], Seog-Young Yoon and Yong-Ho Park*
School of Material Science and Engineering, Pusan National University,
30 Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea
[a]Korea Institute of Machniery and Materials, Powder Materials Research Center,
66 Sangnam-dong, Changwon 641-831, Korea
(Received October 27, 2006; Accepted December 7, 2006)

Abstract The microstructural and mechanical properties of Al-Si alloyed powder, prepared by gas atomization followed by hot extrusion, were studied by optical and scanning electron microscopies, hardness and wear testing. The gas atomized Al-Si alloy powder exhibited uniformly dispersed Si particles with particle size ranging from 5 to 8 μm. The hot extruded Al-Si alloy shows the average Si particle size of less than 1 μm. After heat-treatment, the average particle size was increased from 2 to 5 μm. Also, mechanical properties of extruded Al-Si alloy powder were analyzed before and after heat-treatment. As expected from the microstructural analysis, the heat-treated samples resulted in a decrease in the hardness and wear resistance due to Si particle growth. The friction coefficient of heat-treated Al-Si alloyed powder showed higher value through all sliding speed. This behavior would be due to abrasive wear mechanism. As sliding speed increases, friction coefficient and depth and width of wear track increase. No significant changes occurred in the wear track shape with increased sliding speed.

Keywords : Hypereutectic Al-Si alloy, Gas atomization, Particle size, Wear

1. 서 론

알루미늄은 표면에 형성되는 산화막과 낮은 소결온도로 인하여 소결성이 매우 좋지 않으므로, 알루미늄의 소결성을 향상시키기 위하여 Si 또는 DS (dispersoid)를 첨가하여 소결성을 개선하고 있다. 첨가하는 Si 및 DS의 함량에 따라 합금 분말의 소결특성이 변화한다. 그러므로 우수한 소결특성 및 기계적 특성을 가지는 성형소결체를 얻기 위해 분말합금의 조성 최적화에 대한 다양한 연구가 이루어져 왔다[1-7]. 또한, 알루미늄은 구리(Cu), 마그네슘(Mg), 아연(Zn), 실리콘(Si) 등의 첨가원소에 의해 미세구조의 제어 및 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[8]. 특히, Si를 첨가한 Al-Si계 합금은 기계적 특성 향상뿐만 아니라, 내마모 특성을 크게 향상시킬 수 있다는 점에서 고강도 경량소재로서의 가능성을 가지고 있다[9]. Al-Si 합금의 기계적 특성은 Si 함량에 따라 증가하며, 과공정(hypereutectic, Si>12.6 wt.%) 조성이 일반적인 아공정(hypoeutectic) 합금에 비하여 고강도 소재로서의 가능성이 높다.

*Corresponding Author : [Tel : +82-51-510-2339; E-mail : yhpark@pusan.ac.kr]

그러나 과공정 Al-Si 합금은 경질의 Si함량 증가에 따른 취성의 증가로 가공성이 크게 떨어지며, 특히 응고시 Si 입자의 성장이 급격히 일어나 기계적 특성 또한 크게 저하시키므로, 전통적인 주조공정으로는 과공정 Al-Si 합금에서 Si 입자의 성장 억제와 미세화에 한계가 있다고 알려져 있다[10-12].

본 연구에서는 우수한 소결특성과 기계적 특성을 보이는 과공정 Al-Si 합금에서 Si입자의 미세화를 위한 가스분무(gas atomization) 공정기술을 이용하여 제조된 Al-Si 합금 분말 소재에 대하여 열처리 전후의 조직 및 기계적 특성을 평가하고, 미세 조직 및 첨가원소와 기계적 특성과의 연관성을 검토하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서는 용해용 원료로 99.5% 순도를 가지며 평균 입도 5 mm인 Al, 99.7% 순도의 2~3 mm 크기를 보이는 불규칙형 Si 분말을 사용하였다. 이외에 첨가원소로는 99.9% 이상의 고순도를 가지는 Cu, Ni, Fe, Mg, Mn을 사용하였다. 합금 조성은 현재 자동차용 베인(vane) 소재로 상용중인 Al-20Si-3.5Cu-5.5Fe-1.2Mg-0.5Mn 과공정 조성을 선택하였다. 본 연구의 가스분무 공정으로 제조되는 분말들은 각각의 분말 모두가 균일한 조성을 갖게 하는 것이 중요하므로, 분무 공정 전에 원료분말들을 혼합한 후 유도 진공 용해로에서 용융시켜 약 2 kg 내외의 모재를 만든 후 가스분무 장치의 용해부에 장입하였다.

고강도 Al-Si 합금 분말은 그림 1에 도식된 가스분무 장치로 제조하였다. 분무노즐의 크기는 약 2.5 mm며, 용해온도는 950°C로 하여 충분한 용탕 유동도를 가지도록 하였다. 가스분무 공정 시 압력은 3 MPa, 사용가스매체는 N_2+20 wt.%O_2 혼합가스를 사용하였다. 합금 분말 제조를 위한 gas atomization의 공정조건을 표 1에 나타내었다. 제조한 합금분말을 400°C, 압출비 21:1의 조건으로 열간 압출한 후, 열처리를 실시하였다. 열처리 조건은 510°C까지 가열하여 30분간 유지한 후, 급냉하여 172°C에서 20시간 유지 후 서냉하였다.

가스 분무 공정으로 제조한 분말의 평균입도는 레이저 입도 분석기(Laser Particle Size Analyzer, Micromeritics, ASAP2000)를 이용하여 3회 측정한 후 평균을 취하여 평균입도와 입도분포를 분석하였다. 미세조직은 분말 시료를 열경화성 수지에 장입한 후 기계적 연마 과정을 거친 후 광학 현미경을 이용하여 분석하였으며, 분말의 형상은 주사전자현미경(SEM, JEM 5800, Jeol, Japan)으로 분석하였다.

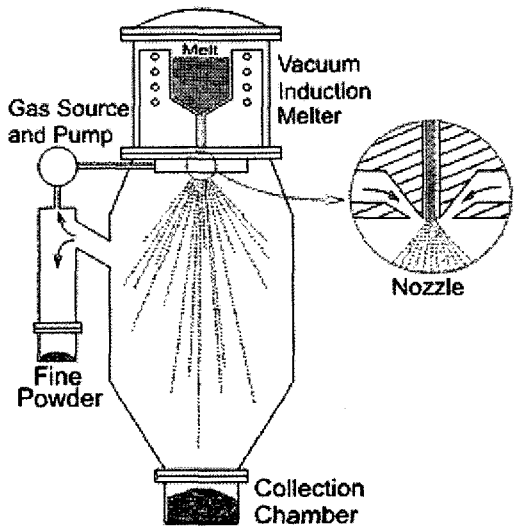

Fig. 1. Schematic illustration of Gas atomizer.

Table 1. Processing parameters of gas atomization

Atomization gas	N_2 (high purity), N_2+O_2
Atomization pressure	3 MPa
Inner diameter of nozzle	2.5 mm
Pouring temperature	950

열처리 전후의 압출재에 대하여 광학현미경(PMG3-613U W/Acc, OLYMPUS, Japan)과 주사전자현미경(S-4300, Hitachi, Japan)을 통하여 미세조직을 관찰하였다. 기계적 특성을 조사하기 위해 Micro Vickers 경도실험기를 통하여 압출재의 경도를 측정하였으며, 마모시험기(Triboss PD-102, R&B, Korea)를 사용하여 마찰과 마모특성을 평가하였다. 마모실험실 실험조건으로는 온도 25°C, 습도 25~30%의 조건에서 시행되었으며, 상대재(counterpart material)로는 평균경도가 Hv 325인 주철 핀을 사용하였다. Sliding speed에 따른 마모거동을 살펴보기 위하여 sliding speed를 각각 0.1 m/s, 0.3 m/s, 0.5 m/s로 변화시켰으며, 이동거리 500 m, 수직하중을 10N으로 고정하였다. 시험 후

마모트랙의 조직사진은 광학현미경과 주사전자현미경을 통하여 관측하였다. 마모트랙의 넓이와 깊이는 주사전자현미경과 stylus 장치를 사용하여 측정하였다. 마모시험 중에 발생된 wear debris의 조성분석은 에너지 분산 분광기를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

알루미늄 혼합분말 합금의 기계적 성질과 소결성을 향상시키기 위하여 알루미늄에 Si 를 첨가하여 얻어진 혼합분말합금 압출재의 미세조직 및 기계적 특성을 평가하였다.

그림 2에 가스분무 공정으로 제조된 합금 분말의 분말 입도분포 변화와 분말의 미세구조를 나타내었다. 제조된 분말의 크기는 5~200 μm의 분포를 보여주며 불규칙한 형상을 가진다. 압출 성형시 불규칙한 형상의 분말이 구형인 분말에 비해 분말간의 계면이 넓으므로 결합력이 높아, 우수한 성형성을 가지는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 사용된 가스분무 공

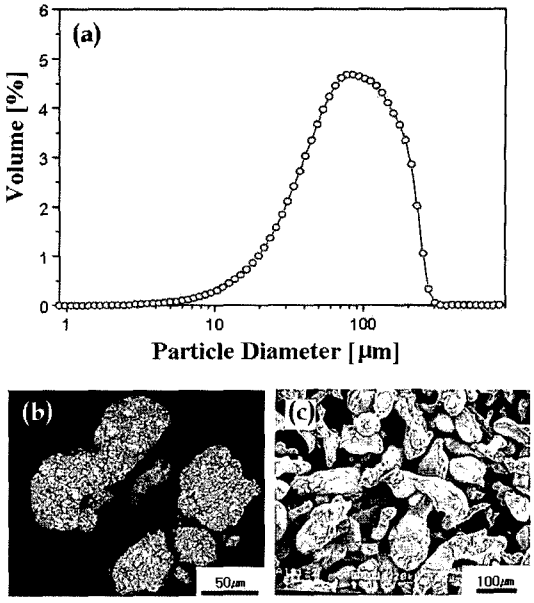

Fig. 2. (a) Size distribution of gas atomized power; (b) and (c) shape and microstructure of the as-atomized power with N_2+O_2 mixed gas.

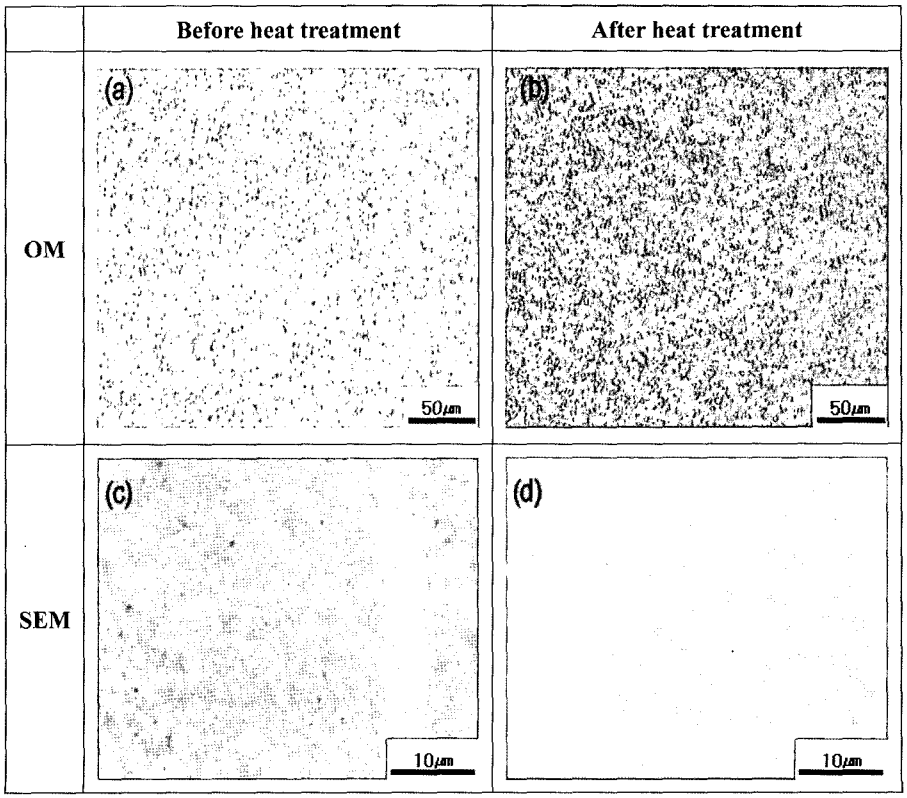

Fig. 3. Effect of heat treatment on microstructure (a), (b) Optical micrographs; (c), (d) Scanning electron micrographs.

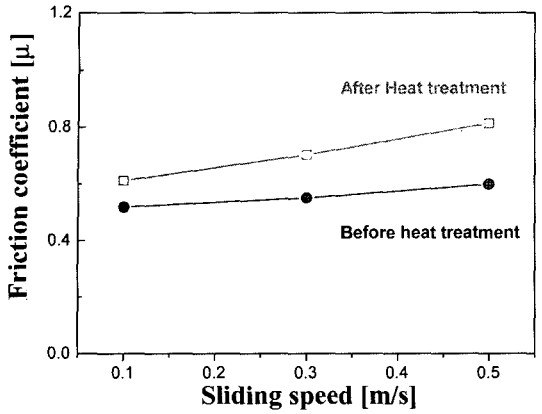

Fig. 4. Friction coefficient of Al-Si alloy as Sliding speed.

정으로 제조된 불규칙한 형상의 미세분말은 균열이 없는 건전한 압출재로 성형할 수 있었다[13]. 그림 2(b) 단면 조직사진에서 알 수 있듯이 분말 내부는 5~8 μm 정도의 Si 입자가 편석 없이 균일하게 분산되어 있었다. 이는 가스분무 전 원료분말들을 혼합한 후 유도 진공 용해로에서 용융이 균일하게 되었으며, 또한 가스분무 중 급냉 응고에 의해 편석이 감소된 것으로 보인다.

그림 3은 열처리 전후의 Al-Si 합금의 단면 미세조직을 광학현미경과 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 결과이다. 그림 3(a), (c)는 열처리 전, 그림 3(b), (d)는 열처리 후의 혼합분말 합금의 미세조직으로, 열처리 전 조직 전반에 걸쳐 미세하게 분산분포되어있던 1 μm 이하의 미세 Si 입자들이 열처리과정에서 2~5 μm 정도로 성장한 것이 관찰되었으며, 경도는 열처리 전후의 합금이 각각 260 Hv, 137 Hv로 열처리 후에 경도가 감소하였다. 이는 Al-Si 합금 내 Si 입자들이 열처리에 의해 결정립이 성장하여 경도가 감소한 것으로 판단된다.

그림 4는 상대재로 사용된 주철에 대한 열처리 전후 Al-Si 합금의 마찰계수를 sliding speed의 변화에 따라 나타내고 있다. Sliding speed가 증가함에 따라 마찰계수가 증가하는데, 이는 상대재료 사용된 steel pin의 경도(325 Hv)가 Al-Si 합금의 경도보다 높은 경도를 가지므로 연삭마모(abrasive wear)거동이 작용

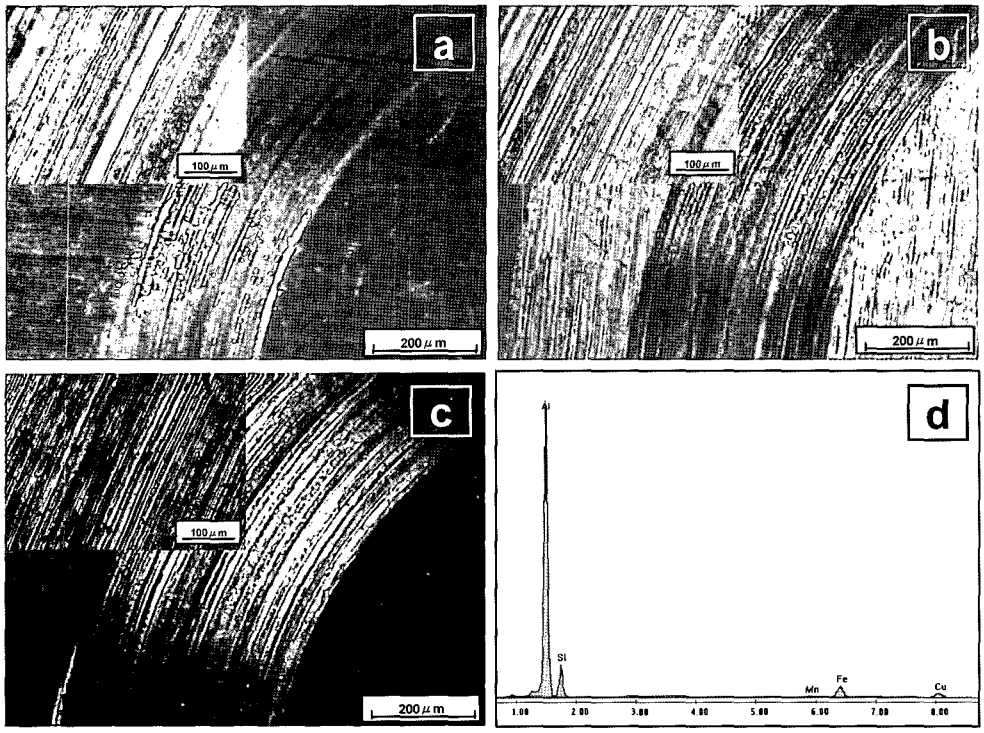

Fig. 5. Morphology and EDS analysis after wear test for Al-Si alloy before heat treatment : surface morphology at (a) sliding speed 0.1 m/s, (b) 0.3 m/c, (c) 0.5 m/s; EDS analysis of wear debris at (d) sliding speed 0.5 m/s.

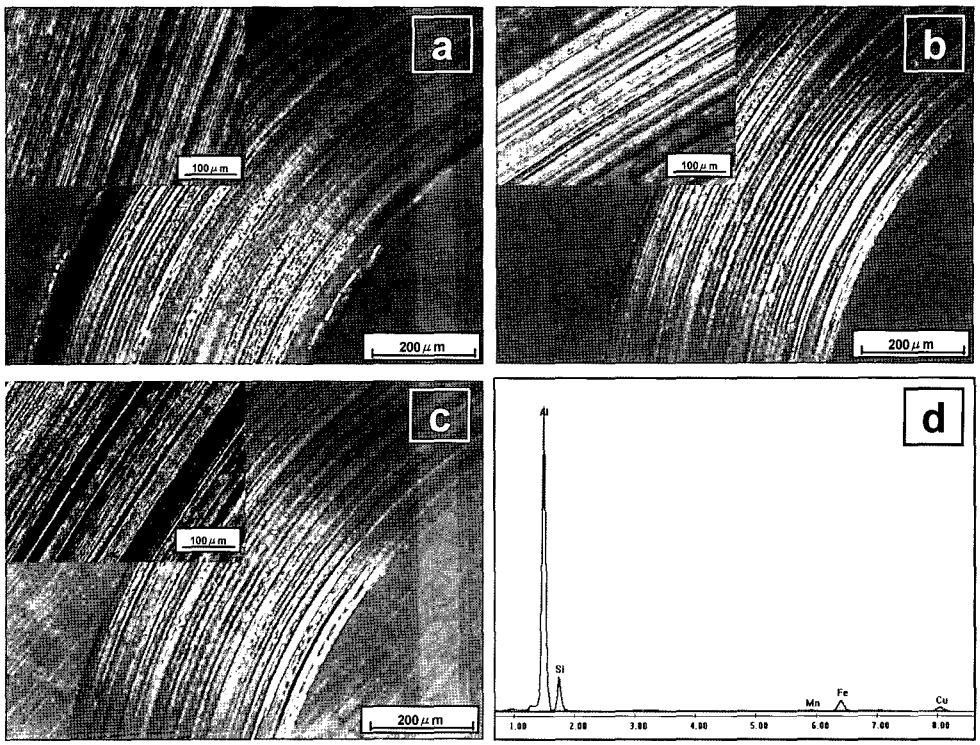

Fig. 6. Morphology and EDS analysis after wear test for Al-Si alloy after heat treatment : surface morphology at (a) sliding speed 0.1 m/s, (b) 0.3 m/c, (c) 0.5 m/s; EDS analysis of wear debris at (d) sliding speed 0.5 m/s.

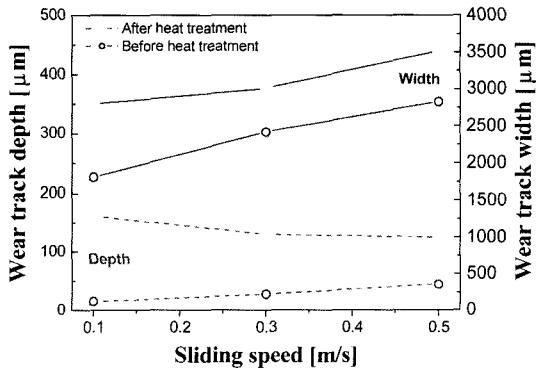

Fig. 7. Wear track depth and width as Sliding speed.

였기 때문으로 보여진다.

그림 5, 6은 sliding speed에 따른 열처리 전후 Al-Si 합금의 마모트랙 형상과 wear debris의 EDS 분석결과이다. 열처리 전후의 경우 모두 마모트랙 형상은 sliding speed에 관계없이 균일한 형상을 나타내며 debris의 응착도 관찰되지 않았다. 이는 주철에 의한 Al-Si 합금의 마모거동에서는 연삭마모가 지배적이기 때문으로 사료된다. EDS 분석결과 wear debris의 주성분은 Al-Si 합금의 주성분인 Al, Si, Fe, Cu이며 Al-Si 합금의 조성비와 거의 일치한다. 이는 상대재인 주철의 경도가 높아 손실이 거의 없음을 보여준다.

그림 7은 Sliding speed에 따른 열처리 전후 Al-Si 합금의 마모트랙의 깊이와 넓이를 나타낸다. Sliding speed에 관계없이 열처리 전 Al-Si 합금보다 열처리 후 Al-Si 합금의 마모트랙 깊이와 넓이가 큼을 볼 수 있는데, 열처리로 인한 합금분말 압출재 내 Si 입자들의 결정립 성장으로 인해 경도가 감소하여 Al-Si 합금의 마모특성을 저해시켰기 때문으로 판단된다. 열처리 전 Al-Si 합금의 경우 sliding speed가 증가함에 따라 마모트랙의 깊이와 넓이가 거의 일정하게 증가함을 보이는데, 이는 연삭마모가 지배적이기 때문으로 생각된다. 그러나 열처리 후 Al-Si 합금의 경우 sliding speed가 증가함에 따라 마모트랙의 깊이는 감소하나 넓이는 증가하며 그 넓이 또한 열처리 전 Al-Si 합금의 경우보다 넓음을 볼 수 있는

데, 이는 열처리 후 Al-Si 합금이 상대적으로 경도가 낮아 마모트랙의 깊이보다 넓이의 변화가 더 컸기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

알루미늄 합금의 소결성과 기계적 특성을 향상시키기 위하여 알루미늄에 Si를 첨가하여 가스 분무공정으로 제조된 Al-Si 합금분말의 특성을 분석하고, 열간 압출하여 제조된 압출재에 대한 열처리 전후의 기계적 특성을 평가하였다.

가스분무시, 30 bar의 분사가스 압력과 N_2+O_2 혼합가스로 제조된 분말은 불규칙한 형상을 가진 분말이 mono disperse되게 분포되어 있었으며, 초정 Si의 입자크기는 약 5~8 μm 였다. 열처리 전후의 기계적 특성은 합금내 Si 입자들의 미세조직 변화에 기인한 것으로 합금 내에 분산되었던 Si가 열처리에 의해 조대화됨으로써 합금의 알루미늄 혼합분말 합금의 기계적 성질과 마모특성이 저하되었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 21세기 프론티어 연구개발 사업의 일환인 "차세대 소재성형기술 개발 사업단" 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. M. Elmadagli, T. Perry and A. T. Alpas: Wear 262 (2007) 79.
2. R. E. Green: Die Cast Eng. **14** (1970) 12.
3. R. Shivanath, P.K. Sengupta and T.S. Eyre: The British Foundryman **70** (1977) 349.
4. J. Clarke and A.D. Sarakar: Wear **54** (1979) 7.
5. K.M. Jasim and E.S. Dwarakadasa: Wear **119** (1987) 119.
6. J.B. Andrews, M.V. SEneviratne, K.P. Zier and T.R. Jett: Wear of Materials: International Conference on Wear of Materials, k. Ludema (Ed.), (1985) 180.
7. B.N. Pramila Bai and S.K. Biswas: Wear **120** (1987) 61.
8. P. Delarbre and M. Krehl: Sinterstahl GmbH Report (2001).
9. H. Yamagata: Materials Science Forum, **797** (1999) 304.
10. S. Anand, T.S. Srivatsan, Y. Wu and E.J. Lavernia: J. Mater. Sci., **32** (1997) 2835.
11. J. Zhou, J. Duszczuk and B.M. Korevaar: J. Mater. Sci., **26** (1991) 5257.
12. T. Ohmi, M.Judo, K. Oshsasa, Y. Itoh, K. Matsuura and K. lishij: J. Japan Institute of Light Metals, **44** (1994) 91.
13. Y. J. Kim and J. C. Kim: J. Korean Powder Metallurgy Institute, **12** (2005) 296 (Korean).