

## 논문

## 분사주조한 Al 6061 합금의 Mg/Si 첨가량의 변화에 따른 기계적 특성 고찰

이재성<sup>†</sup> · 김명호

인하대학교 신소재공학부

### A Study on the Mechanical Properties of Spray-cast Al 6061 Alloy with Variation of Mg/Si Content

Jae-Sung Lee<sup>†</sup> and Myung-Ho Kim

Division of Material Science &amp; Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

#### Abstract

Mechanical properties of the spray-cast Al 6061 alloy with variation of Mg/Si addition were investigated. After spray-cast, hot extrusion was performed at 460°C then followed ageing treatment to the T6 condition. SEM, EDX, and XRD were used to characterize a  $\beta$ (Mg<sub>2</sub>Si) precipitate. The amount of  $\beta$  precipitate was calculated from the XRD measurements. Hardness, ultimate tensile strength and elongation were tested then compared with those of the Al 6061 alloys made by ingot metallurgy (I/M) and powder metallurgy (P/M). The ultimate tensile strength and elongation of the spray-cast Al 6061 alloy were 318MPa and 16.5%, respectively. These properties were improved in the 2.2 wt%Mg and 1.3wt%Si addition up to 349MPa of UTS and 12.5% of elongation, mainly due to increased amount of a fine supersaturated  $\beta$ (Mg<sub>2</sub>Si) precipitate.

**Key words** : Spray-cast, Supersaturation, Al 6061, Mg<sub>2</sub>Si, Mechanical properties.

(Received June 9, 2008 ; Accepted July 17, 2008)

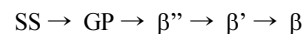
#### 1. 서 론

최근 산업의 발달로 고강도, 내마모성, 우수한 열팽창 특성, 고인성, 내식성 등의 우수한 기계적 특성을 갖는 고 기능성 재료와 복잡하고 다양한 형상의 제품을 제조하기 위한 새로운 제조기술들이 개발되고 있다. 이러한 새로운 제조기술 중 하나인 분사주조(Spray-casting) 기술은 용융된 금속을 atomization에 의하여 semi-solid 상태로 분사하는 공정과, 저온의 기판(substrate)에 고속으로 연속충돌 시킴으로써 얇은 판상으로 적층하는 공정을 포함하고 있다[1-4].

특히, 분사주조 기술은 분산강화, 조직의 미세화, 고용도의 증가, 균일한 상 분포 및 편석의 제거와 같은 급속응고의 장점을 가지고 있으며, 일반적으로 급속응고 과정에서 수반되는 분말이나 얇은 시편의 성형과정이 없으므로 분말의 가공과정에서 수반되는 금속의 산화물 생성을 억제하는 특징도 가지고 있다[5].

본 실험에서 사용한 Al 6061 합금은 대표적인 열처리형 합금으로써 선박용재, 차량용재, 고압용 파이프재, 각종 구조재료 등으로 널리 사용하는 Al합금 중 비교적 높은 강도를 가지는

합금이다[6]. Al 6XXX계(Al-Mg-Si)합금의 시효처리 시 발생하는 일반적인 석출 과정은 다음과 같다.



여기에서 SS는 supersaturated solid soluton을 의미한다. 이 중  $\beta''$ 상의 존재로 인하여 시효처리 시 경도값의 피크가 나타나며, 또한 이 상은 인장강도의 상승에 주요한 영향을 미친다.  $\beta'$  과시효처리 시 나타나는 상으로 알려져 있고  $\beta$ 상(Mg<sub>2</sub>Si)은 석출과정에서 안정상으로 기존문헌들을 통해 보고되어 왔다[7].

본 실험에서는 Al 6061 합금의 열처리시 석출되는 안정상인  $\beta$ 상의 양을 변화시켜 석출된  $\beta$ 상의 석출량에 따른 시험편들의 기계적 특성의 변화를 고찰하고자 하였다. 이를 위하여 본 실험에서는 이 Al 6061 합금에서  $\beta$ 상의 형성에 크게 영향을 미치는 Mg/Si의 첨가량을 변화시키고 이와 함께 분사주조 기술을 사용하여 시편을 제작하였다. 이는 다양한 Mg/Si의 첨가량에 따른 시편의 기계적 특성을 알아보고자 함과 동시에 급속응고를 통하여 제조한 시험편의 기계적 특성을 연구하기 위한 것이다. 이후 후속 공정과 시효처리를 통하여 기계적 특성의 변화를 살펴보고 Mg/Si의 첨가량과의 관계를 알아보고자 하였다.

<sup>†</sup>E-mail : max1736@naver.com

Table 1. Chemical composition of the spray-cast Al 6061 alloys(wt.%).

#		Mg	Si	Fe	Cu	Al
	Al 6061(ASM)	1.2Max	0.8 Max	0.7 Max	0.4 Max	Bal.
No.1	Al-0.6Mg-0.4Si	0.68	0.43	0.13	0.28	Bal.
No.2	Al-1.2Mg-0.8Si	1.3	0.76	0.13	0.28	Bal.
No.3	Al-2.2Mg-1.3Si	2.15	1.23	0.18	0.28	Bal.
No.4	Al-2.0Mg-1.6Si	1.94	1.51	0.13	0.26	Bal.

## 2. 실험 방법

본 실험에 사용된 분사주조 시험편은 Al 6061, Al-25 wt.%Si, Pure Mg, Pure Al을 사용하여 전기저항로에서 20 Kg을 목표 중량으로 용해하여 분사주조 장치를 사용하여 예비성형체 (preform)를 제작하였다. 이 때의 분사온도는 760~780°C, 분사 가스는 6kg/cm<sup>2</sup>의 분사압력을 가진 N<sub>2</sub>가스를 사용하였다. 이렇게 주조된 예비성형체를 460°C로 예열한 후 25 : 1의 압출비로 열간압출을 실시하여 최종적으로 10mmØ봉상 시험편을 제조하였다. 이렇게 제조된 시험편에 대하여 540°C에서 2hr 동안 용체화 처리를 거쳐, 염욕(salt bath)을 이용하여 170°C에서 각각 4, 8, 16, 24hr 동안 시효처리를 행하였다.

제조한 시험편은 미세조직 관찰을 위해 1 µm 다이아몬드 페이스트(Diamond Paste)로 연마한 후 미세조직을 관찰과, 열처리 시 생성되는 석출상을 확인하기 위하여 SEM(Jeol5600), EDX, XRD를 이용한 상 분석을 실시하였다.

기계적 성질을 측정하기 위하여 ASTM subsize 규격의 봉상 인장시험편으로 가공한 후, Instron 4481 인장시험기를 사용하여 인장속도 1.8 mm/min으로 상온에서 인장시험을 실시하였다. 경도 측정은 Rockwell 경도계를 사용하여 각각의 시험편당 5회를 측정하고 최대값과 최소값을 제외한 나머지 측정치를 평균하여 구하였다.

본 연구에서 제조한 시험편들의 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다. Mg/Si의 첨가량에 있어서 No.2 시험편의 경우에는 사용되는 Al 6061 합금의 화학적 조성과 동일한 조성을 목표로 제작하였고, No.1 시험편의 경우에는 Al 6061 합금의 Mg/Si의 첨가량의 절반의 양을 목표로 하여 시험편을 제작하였다. No.3과 No.4 시험편의 경우에는 Al 6061 합금의 Mg/Si의 첨가량인 1.2/0.8(wt.%)보다 Mg/Si 양을 증량하여

Table 2. Experimental conditions of the spray casting.

Melting temperature	800°C
Pouring temperature	800°C
Molten metal temperature	760~790 °C
Atomizing gas	N <sub>2</sub>
Gas pressure	6 Kg/cm <sup>2</sup>
Flight distance of droplet	440~460 mm
Speed of the substrate	50 rpm

Table 3. Experimental conditions of the hot extrusion.

Diameter of extrusion die	50 mmΦ
Die angle	180°
Ram speed	2.2 mm/sec
Die temperature	400°C
Extrusion ratio	25 : 1
Extrusion temperature	460°C

2.2/1.3, 2.0/1.6(wt.%)를 장입주조 하였으며 이를 통해 Mg/Si의 과포화에 따른 특성을 알아보고자 시험편을 제작하였다. Table 2, 3에는 본 연구에 적용된 예비성형체의 제조조건 및 열간압출조건을 표시하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1은 분사주조한 No.3 시험편을 압출하고, 시효처리 한 후 주사전자현미경으로 관찰한 미세조직사진이다. Fig. 1(a)에 나타난 석출상을 EDX로 분석한 결과 6XXX계 Al 합금의 주요석출상인 β(Mg<sub>2</sub>Si)임을 확인 할 수 있었다. 이 β상의 석출은 6XXX Al 합금의 기계적 특성의 향상에 기여하는 것으로

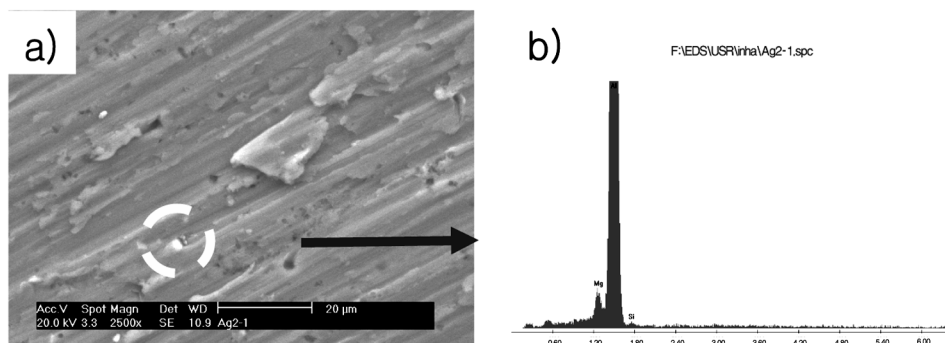


Fig. 1. SEM and EDX analysis of an extruded and aged Al-2.2Mg-1.3Si alloy: (a) SEM image and (b) EDX analysis of β(Mg<sub>2</sub>Si).

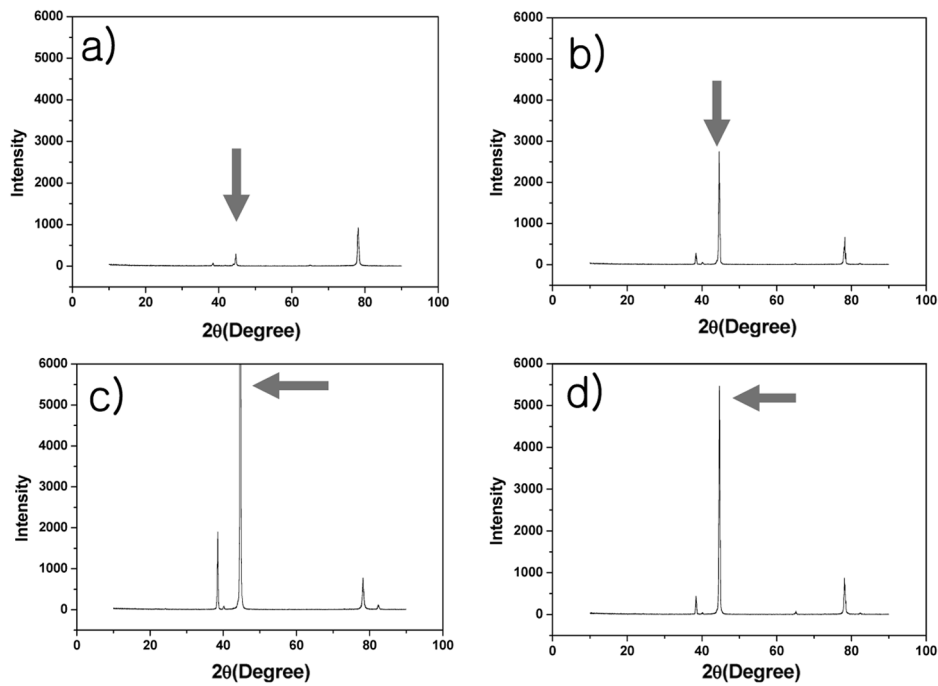


Fig. 2. X-ray diffraction pattern of the aged alloys: (a) Al-0.6Mg-0.4Si, (b) Al-1.2Mg-0.8Si, (c) Al-2.2Mg-1.3Si, (d) Al-2.0Mg-1.6Si, respectively.

알려져 있다. 그러나 시효처리 이후에 생성되는 β상의 양을 정량적으로 고찰할 수 있는 방법은 현재까지 명확하게 알려진 바가 없다. 따라서 본 연구진은 제조한 4가지 시험편에 있어서 석출된 β상의 양을 간접적으로 고찰하기 위하여 XRD를 이용하여 상 분석을 시도하였다.

Fig. 2는 각각의 시험편을 16시간 동안 시효처리 한 후 XRD로 상 분석한 결과이다. 상 분석 결과 Fig. 2에 보인 바와 같이 각 조성에 따라 β상의 peak가 다르게 나타나는 것을 알 수 있었으며 이를 통해 Mg/Si의 첨가량을 조절함으로써 β상의 석출량을 변화시킨 결과, 각각의 시험편이 서로 다른 양의 β상을 석출하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 3은 각각의 시험편에 대하여 시효시간의 변화에 따라 XRD로 상 분석을 행한 후 β상 pattern의 아래 면적을 측정된 결과를 나타낸 그림이다. 면적의 측정은 각각 서로 다른 조성을 갖는 시험편들의 XRD 그래프를 동일한 비율로 확대한 후, 가로, 세로의 길이가 1 mm인 모눈종이를 이용하여 완전히 한 칸이 포함되면 1, 절반이 포함되면 0.5로 칸수를 측정하였다. 즉, 본 연구에서는 4가지 각기 다른 조성을 가진 시험편의 β상 pattern의 peak 면적을 상대 비교 함으로써 기계적 특성과 β상의 석출량과의 관계를 설명하고자 하였다. 측정결과 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 대부분의 시험편들이 16시간 동안 시효처리 했을 경우에 가장 넓은 면적을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 No.3과 No.4 시험편의 경우에는 일반적인 Al 6061 합금과 동일한 조성을 가진 No.2 시험편의 β상 pattern과 비교하여 월등히 넓은 면적을 나타냄을 알 수 있으며, 이로부터 이들 시험편이 과포화 석출을 나타내었음을 알 수 있다. 이 가운데 특히 No.3 시험편의 경우 다른 합금에 비하여 상대적으로 가장 넓

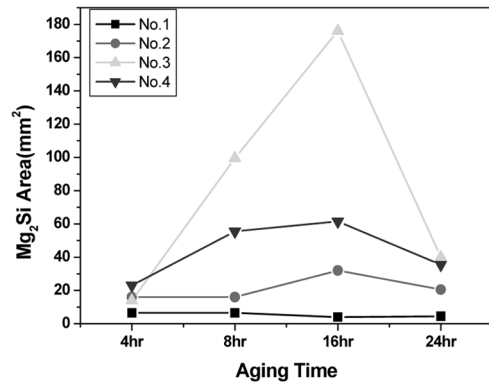


Fig. 3. The relative amount of β-phase measured by X-ray diffraction pattern.

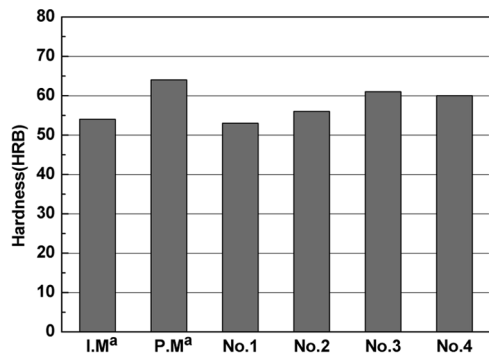


Fig. 4. Comparison of hardness after aging treatment. The data IM<sup>a</sup> and PM<sup>a</sup> are from ref[8].

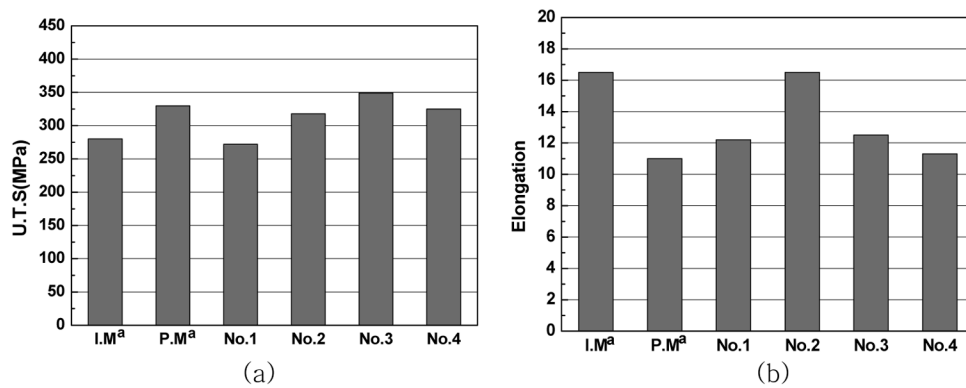


Fig. 5. Comparison of properties after aging treatment : (a) Ultimate tensile strength, (b) Elongation. The data IM<sup>a</sup> and PM<sup>a</sup> are from ref[8].

은 면적을 나타내는 것으로 보아 상대적으로 더 많은 β상을 석출하였음을 알 수 있으며, 이로 인하여 이 합금의 기계적 특성이 가장 우수하다는 것을 예상할 수 있었다.

Fig. 4는 분사주조법으로 제조한 시험편들을 16시간동안 인공시효처리한 후 측정된 경도값을 그래프로 나타낸 것이다. 분사주조한 시험편들이 I/M (Ingot Metallurgy)법으로 제조한 합금보다는 대체적으로 높은 경도를 나타냈으나, P/M (Powder Metallurgy)법으로 제조한 합금보다는 상대적으로 낮은 경도를 나타내었다. 그러나 No.3 시험편의 경우 경도가 62HRB를 나타냄으로써, P/M법으로 제조된 합금의 경도인 64 HRB와 유사한 값을 보여 4가지 시험편 중 가장 높은 경도를 가짐을 확인하였다. 각각의 시험편의 경도를 살펴보면 No.1 시험편에서 No.3 까지 경도가 조금씩 상승함을 알 수 있고 No.4 시험편의 경우 No.1, No.2 시험편 보다는 높지만 No.3 시험편 보다는 오히려 낮게 나타남을 알 수 있다. 이 결과는 앞서 수행한 XRD의 분석결과와 일치하는 것으로써 No.3 시험편이 본 실험에 사용된 4가지 조성의 시험편 중 가장 뛰어난 기계적 특성을 나타낼 것이라는 예상을 확인시켜주는 결과이다.

Fig. 5는 분사주조법을 사용하여 제조한 시험편들을 16시간 동안 인공시효처리한 후 기계적 특성 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 No.1 시험편의 경우 인장특성이 다른 시험편들과 비교 할 때 가장 낮게 나타남을 알 수 있는데 이는 앞에서 Fig. 3에서 제시한 상 분석 결과에 나타난 바와 같이 낮은 Mg/Si양의 첨가로 인하여 주요한 강화석출상인 β상의 석출이 가장 적게 이루어졌고 이 때문에 인장특성이 오히려 감소한 것으로 판단된다.

No.2 시험편의 경우 최대인장강도가 318 MPa로서 P/M법으로 제조한 Al 6061 합금의 최대인장강도(330 MPa)에 근접한 값을 나타낸 반면 연신율은 16.5%로서 I/M법으로 제조한 Al 6061 합금과 유사한 결과를 나타내었다. 일반적으로 최대인장강도가 상승하면 연신율은 감소하는 것이 상례이나, No.2 시험편의 경우 최대인장강도는 증가하였으나 연신율의 감소는 일어나지 않았다. 이는 분사주조를 통하여 합금을 제조 할 경우 P/M법과는 달리 산화물의 형성이 억제되며[5] 이로 인해 연신율의 감소가 수반되지 않은 결과로 보이며, 이는 분사주조를 통하여 제조한 합금의 기계적 특성이 P/M법으로 제조한 합금

보다 더 우수함을 확인할 수 있는 결과이다.

No.3 시험편은 최대인장강도가 349 MPa으로써 앞서 예상한 바와 같이 4가지 조성의 각기 다른 시험편 중 가장 높은 최대인장강도를 나타냄을 알 수 있었다. 이러한 우수한 최대인장강도는 Fig. 3을 통하여 분석하였던 바와 같이 주요 강화석출상인 β상을 과포화 석출 함으로써 얻어진 결과로 여겨진다. 반면 연신율은 12.5%로써 높은 최대인장강도의 상승으로 인한 연신율의 저하가 나타났으나 P/M법으로 제조된 Al 6061 합금의 연신율인 11%에 비하여 높은 연신율을 나타내어 최대인장강도와 연신율의 두 가지 인장특성이 모두 P/M법으로 제조한 Al 6061 합금보다 뛰어남을 알 수 있었다.

No.4 시험편의 경우에는 No.3 시험편에 비하여 Mg/Si의 양을 더 많이 첨가하였으나 인장특성은 최대인장강도는 325 MPa, 연신율은 11.3%로 비교적 낮은 결과를 나타내었다. 이는 No.4 시험편의 경우 Fig. 3의 XRD분석과 Fig. 4의 경도 측정에서 나타난 바와 같이 No.3 시험편에 비하여 낮은 β상의 석출과 낮은 경도를 나타낸 결과와 같은 맥락으로써 이는 분사주조법을 통하여 합금을 제조하더라도 β(Mg<sub>2</sub>Si)상을 과포화 고용시킬 수 없을 만큼의 과도한 Mg/Si의 첨가에 기인한 결과라고 여겨진다.

#### 4. 결 론

분사주조 한 Mg/Si의 첨가량을 변화시킨 4가지 조성의 Al 6061 합금들의 기계적 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Al 6061 합금을 분사주조법을 사용하여 제조한 결과, 기존의 사용되는 I/M, P/M법으로 제조한 동일 조성의 합금들에 비하여 최대인장강도는 P/M법으로 제조한 합금과 유사하며 연신율은 I/M법과 유사한, 뛰어난 인장특성을 보임을 알 수 있었다.

(2) Mg/Si의 첨가량을 변화시킨후 분사주조한 합금들의 기계적 특성을 평가한 결과 2.2 wt.%Mg과 1.3wt.%Si를 첨가한 시험편의 경우, 인장강도 349MPa과 연신율 12.5%의 우수한 인장특성을 나타냄을 알 수 있었으며, 이는 분사주조를 통하여 과포화 고용되고 석출된 β상의 증가에 기인한 것으로 여겨진

다. 그러나 그 이상의 Mg/Si를 첨가한 시험편의 경우에는 오히려 더 낮은 기계적 특성을 보였는데 이는 과량의 Mg/Si를 전부 과포화 고용/석출 시키지 못하였기 때문에 나타난 결과로 여겨진다.

### 참 고 문 헌

- [1] Myung-Ho Kim, Cha-Hurn Bae, Hae-Young Jeong and Heung-Il Park: Journal of the Korea Foundrymen's society, "Microstructure and Thermal Behaviors of Droplets During the Formation of Particle Reinforced Metal Matrix Composites by Spray Casting Process 12(4) (1992) 326-334
- [2] P.C. Mathur: "Analysis of the Spray Deposition Process", Ph.D. Thesis, Drexel University
- [3] Jin Forrest, Richard Price and David Hanlon: The Int. J. of Powder Metallurgy, "Manufacturing clad products by spray forming" 33 (1997) 21
- [4] S. Hariprasad and S.M.L. sastry: JOM, "Processing Maps for Optimizing Gas Atomization and Spray Deposition" 47 (1995) 56-59
- [5] Chong-Sung Park, In-Woo Lee and Myung-Ho Kim: Journal of the Korea Foundrymen's society, "Characteristics in Microstructure of Particle Reinforced Al Matrix Composites Fabricated by Spray-Cast Forming Process 14(6) (1994) 530-540
- [6] LIU Hong, ZHAO Gang, LIU Chun-ming, ZUO Liang : Nonferrous Met, "Effects of magnesium content on phase constituents of Al-Mg-Si-Cu alloys" 16 (2006) 376-381
- [7] C. Ravi, C. Wolverton: Acta Materialia, "First-principles study of crystal structure and stability of Al-Mg-Si-(Cu) precipitates" 52(2004) 4213-4227
- [8] J.C.Huang, C.S.Shin and S.L.I.Chan: International Journal of Fatigue, "Effect of temper, specimen orientation and test temperature on tensile and fatigue properties of wrought and PM AA6061-alloys" 26 (2004) 691-703