

# Al-Mg-Si계 알루미늄 합금 판재 마찰교반접합부의 결정 방위 분포에 대한 용접후열처리의 영향

이 광 진\*<sup>†</sup>

\*한국생산기술연구원

## Effect of Post Weld Heat Treatment for Crystal Orientation Distribution on Friction Stir Welds of Al-Mg-Si Series Aluminum Alloy Sheets

Kwang-jin Lee\*<sup>†</sup>

\*Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 500-480, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : kjlee@kitech.re.kr

(Received October 15, 2009 ; Revised November 6, 2009 ; Accepted December 15, 2009)

### Abstract

Friction stir welding (FSW) was carried out for Al-Mg-Si series aluminum alloys which are being used for automotive body structure. Consequently, Post weld heat treatment (PWHT) was applied to the friction stir welds to evaluate the effect of the paint baking process which is one of the automotive fabrication process on friction stir welded zone (FSWZ) in 443K for 1.2Ks. Grain structure and its crystal orientation distribution was measured about both the as welded specimens and the post weld heat treated specimens. An optical microscope (OM) and an field emission scanning electron microscope (FE-SEM) was used for observing the grain structure and measuring its crystal orientation distribution, respectively. Changes on the grain structure and its crystal orientation distribution were not detected. From the present results, it was confirmed that the paint baking process after FSW do not affect on the grain structure and its crystal orientation distribution of FSWZ. The comprehensive investigations will be performed for various automotive aluminum alloys manufactured by different processes, in the future.

Key Words : Al-Mg-Si series aluminum alloy, FSW, PWHT, Crystal orientation distribution

### 1. 서 론

마찰교반접합(Friction Stir Welding)은 영국의 TWI(The Welding Institute)가 개발한 접합 방법으로, 회전하는 툴(Probe와 Shoulder로 구성)을 재료에 삽입하여 재료와 툴의 사이에서 발생하는 마찰열을 이용하여 재료를 연화함과 동시에 고온 소성 유동을 일으켜 툴의 좌우에 배치된 재료의 일부를 상호간에 맞은편 영역에 교반 혼입시켜 접합을 실현하는 고상 접합 방법이다<sup>1-4)</sup>. 이 접합 방법은 기존의 용융 용접 방법들과

비교하여 발열이 최소한으로 억제되어, 접합 후 열에 의한 변형이 현저히 감소하고, 접합 후의 결함도 거의 발생하지 않으며, 강력한 소성 변형에 의해 접합부 조직이 모재보다 미세화 하는 등의 이점이 많아 개발된 지 십 수 년 밖에 지나지 않았음에도 불구하고, 이미 자동차, 철도 차량, 선박 및 항공 우주 분야 등 다양한 분야의 제품에 적용되고 있으며, 최근에는 동, 마그네슘, 타이타늄, 강 등과 이들을 주체로 하는 합금 및 복합재료 등으로 적용이 확대되고 있다<sup>5-10)</sup>. 특히, 자동차 배기가스 규제 강화에 대응하고자, 일본과 유럽을 중심으로 자동차 차체 분야에 대한 알루미늄 합금의 적용이

급격히 확대되고 있는 가운데, 알루미늄 합금에 대한 가장 효과적인 접합 방법 중의 하나인 마찰교반접합 방법의 적용 또한 기대되고 있다. 국내의 경우, 극소수의 최고급 양산 차종의 Hood에 알루미늄 합금이 적용되고 있으나, 마찰교반접합 방법이 채택되지는 않았다. 이는 초기 설비 투자에 대한 부담뿐 아니라, 본 접합 방법에 의해 제조된 제품에 대하여 전 조립 공정 중의 안정성이 충분히 확보되지 않았기 때문으로 사료된다.

향후, 알루미늄 합금을 적용한 자동차 차체 분야에 마찰교반접합 방법을 적용하기 위해서는 여러 가지 문제점들이 해결되어야 하고, 많은 데이터들이 축적되어야 한다. 그들 중, 가장 우선적으로 검토되어야 할 부분이 마찰교반접합부의 미세 조직 변화에 대한 Paint-baking process의 영향일 것이다. 특히, 본 연구에서 채용한 Al-Mg-Si계와 같이 석출 강화 현상을 이용하는 열처리형 알루미늄 합금의 경우는 더욱 상세한 검토가 요구된다고 할 수 있겠다. 이와 관련하여 최근 수년간 자동차 선진국을 위주로 다수의 연구가 수행되었으며, 접합부 강도에 직접적으로 영향을 미치는 석출 거동에 관한 연구 결과가 일본과 미국 등에서 보고된 바가 있다. 그러나 접합부의 결정 방위 분포, 특히 접합 공정 후의 Paint-baking process에 의한 접합부 결정 방위 분포의 변화에 관한 연구 결과는 거의 찾아보기 힘든 실정으로, 이 분야에 대한 연구와 검토가 시급하다 할 수 있겠다.

본 연구에서는 Al-Mg-Si계 자동차용 알루미늄 합금 판재(T4)에 대하여 마찰교반접합을 실시한 후, Paint-baking process 상당의 접합후열처리를 추가적으로 실시한 시편의 접합부 결정 방위 분포를 분석하여, 자동차 조립 공정 중의 Paint-baking process가 마찰교반접합부 결정 방위 분포에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서는 국내외에서 자동차 구조용 판재로 주로 사용되고 있는 두께 1mm의 Al-Mg-Si계 열처리형 알루미늄 합금 판재를 사용하였으며, 그 화학적 조성은 Table 1에 나타난 바와 같다. 알루미늄 합금 판재는 세계적으로 널리 통용되고 있는 대표적인 공정으로 직

**Table 1** Chemical composition of base metal

Si	Mg	Cu	Mn	Others	Al
1.1	0.4	≤0.01	0.01	≤0.1	bal.

**Table 2** Manufacturing process of base metal sheet

Process	Condition
Casting	ingot, 45t x 220w x 145L
Homogenization	823K, 4hr
Hot Rolling	673K, 2.5t
Cold Rolling	RT, 1.0t
Solution Heat Treatment	773K, 1hr
Water Quenching	293K
Aging	over 1month

**Table 3** Mechanical properties of base metal

Tensile specimen	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
JIS5	130	230	25

**Table 4** Friction stir welding condition

Specimen size		1t × 70w × 140L
Tool	Probe dia.	3mm
	Shoulder dia.	8mm
FSW condition	Travel speed	100mm/min
	rpm	2000
	Tilting	3°

접 제조하였으며, Table 2에 세부 공정 조건을 나타내었다. Table 3에 모재에 대한 인장시험 결과를 나타내었으며, 이 결과들을 통하여 본 모재가 국내외에서 시판되고 있는 6xxx계 알루미늄 합금 판재들과 거의 동등한 수준의 기계적 특성을 가지는 것을 확인하였다.

마찰교반접합은 공구강으로 제작한 틀을 사용하였으며, 시편 및 접합 공정에 대한 자세한 내용은 Table 4에 정리하였다. 접합후열처리는 실차 제조 라인의 도장 공정에 상당하는 443K에서 1.2Ks동안 실시하였다.

접합부에 대한 미세 조직 관찰은 접합 표면으로부터 두께 방향으로 250 $\mu$ m 연마한 ND-Plane에 대하여 실시하였으며, 결정립 조직은 Keller 용액에 의한 에칭 후, 광학현미경을 사용하여 실시하였다. 접합부 결정 방위 분포, 결정립 크기 및 결정립간 방위각(Misorientation angle) 등의 측정에는 전계 방사형 주사전자현미경 (FE-SEM, JSM7000F, 20Kv)을 사용하였다. 결정 방위 분포 측정용 시편은 전해연마에 의해 표면을 경면 연마하였고, 80 $\mu$ m × 260 $\mu$ m 영역에 대해서 측정 간격 0.5 $\mu$ m~1.3 $\mu$ m의 조건에서 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

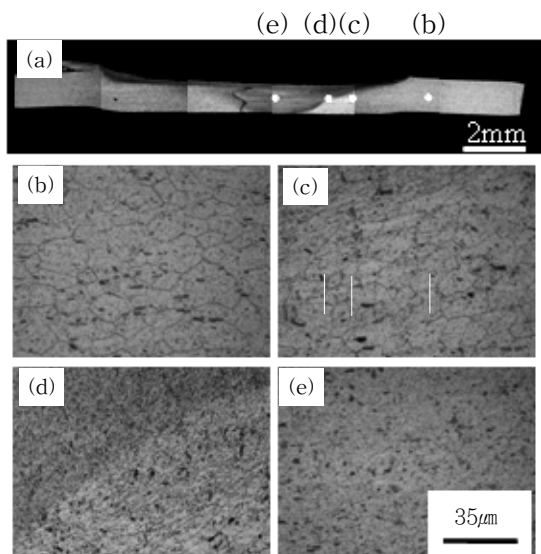
#### 3.1 접합부 결정립 조직

광학현미경에 의한 접합부 결정립 조직 관찰은 모재 (BM: Base Metal), 열영향부 (HAZ: Heat Affected Zone), 열기계적영향부 (TMAZ: Thermo-mechanical Affected Zone) 및 교반부 (SZ: Stirred Zone)로 나누어 관찰하였다.

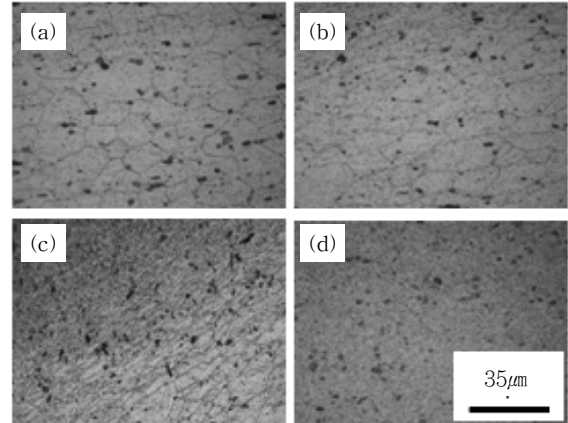
접합후열처리를 실시하지 않은 시편에 대한 관찰 결과를 Fig. 1에 나타내었다. BM에서는 대략 30~40 $\mu$ m 정도 크기의 결정립이, HAZ와 TMAZ에서는 BM에서의 그것과 비슷한 양상의 결정립들과 심하게 전단 변형을 받은 결정립들이 각각 관찰되었다. 또한 SZ에서는 광학현미경 사진으로는 구별하기 힘들 정도로 매우 미세한 결정립들이 관찰되었다. Fig. 1의 시편과 동일한 Joint에서 채취한 시편에 대하여, 443K에서 1.2Ks동안 접합후열처리를 실시한 후의 관찰 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 결정립 크기를 비롯한 전반적인 결정립 조직의 양상은 접합후열처리를 실시하지 않은 시편의 결과와 거의 차이가 없는 것을 확인하였다. 이 결과는 완성차 제조 공정 중의 도장 공정 조건이 마찰교반접합부의 결정립 조직에 크게 영향을 미치지 않음을 시사하는 것으로 생각된다.

#### 3.2 접합부 결정립 방위 분포

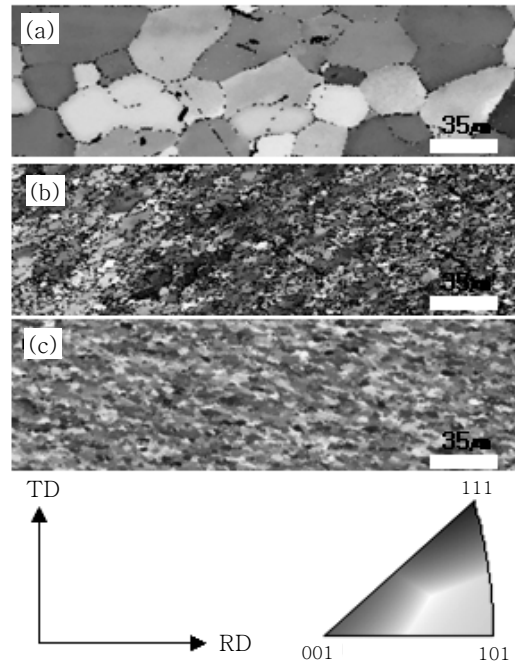
Fig. 3은 마찰교반접합만 실시한 시편의 ND-Plane에 대한 영역별 역극점도 (IPF: Inverse Pole Figure)



**Fig. 1** Optical macrograph(a) and micrographs of the as-welded specimen. (b) BM, (c) HAZ, (d) TMAZ, (e) SZ



**Fig. 2** Optical micrographs of the post-weld heat treated specimen. (a) BM, (b) HAZ, (c) TMAZ, (d) SZ



**Fig. 3** Orientation images of the as-welded specimen. (a) BM, (b) HAZ+TMAZ, (c) SZ

를 나타낸다. BM은 완전히 재결정된 고경각 등축정 결정립으로 구성되어 있으며, 적색 계통의 Cube ( $\{001\} \langle 100 \rangle$ ) 또는 그에 가까운 방위를 가지는 결정립들과 녹색 계통의 Goss ( $\{011\} \langle 100 \rangle$ ) 결정립들이 혼합되어 있는 전형적인 알루미늄 합금 압연재의 방위 분포를 나타내고 있음이 확인되었다. 반면, HAZ+ TMAZ 영역은 다양한 형태와 크기의 결정립 조직으로 구성되어 있었다. 이 영역에서 관찰된 결정립들은 BM의 결정립들과 달리 대부분 일정한 방향성을 가지고 있었으며, 결정립 내에 상당한 양의 아결정립이 형성되어 있는 것이

관찰되었다. 특히, 결정 방위 분포의 관점에서 무엇보다 눈에 띄는 것은 전단 변형계( $\{111\} \langle uvw \rangle$ ) 계통의 결정립들이 상당수 관찰되었다는 것이다. 이 결정립들은 마찰교반접합 공정 중, Probe의 고속 회전 및 접합 방향으로의 진행 과정에서 발생한 금속 소성 유동에 의해 결정립들이 전단 변형을 받은 결과로 판단된다. 그리고 이 영역이 수많은 저경각 입계로 이루어진 것으로부터, 이 시야는 HAZ보다는 TMAZ쪽에 치우친 영역으로 판단된다. 한편, SZ에서는 수  $\mu\text{m}$  정도의 고경각 초미세립으로 구성된 결정립 조직이 관찰되었으며, 주로 입방체 방위Cube ( $\{001\} \langle 100 \rangle$ )과 전단 변형계 방위( $\{111\}$ )의 결정립들이 관찰되었다.

Fig. 4는 마찰교반접합 후, 완성차 조립 라인의 도장 공정 상당의 열처리를 실시한 시편의 ND-Plane에 대한 영역별 역극점도를 나타낸다. 각 영역별 결정립의 형태와 크기, 그리고 그들의 방위 분포는 접합후열처리를 실시하지 않은 시편의 결과와 거의 흡사했다. 다시 말하면, BM, TMAZ 그리고 SZ 결정립들의 주방위는 각각  $\{001\} \langle 100 \rangle$ ,  $\{111\} \langle uvw \rangle$  그리고  $\{001\} \langle 100 \rangle$ 이라는 것이 확인되었다. Fig. 3과 Fig. 4의 결과로부터, 마찰교반접합 후의 도장 공정은 접합부 결정 방위 분포에 큰 영향을 미치지 않는다는 것이 확인되었다.

Fig. 5는 마찰교반접합만을 실시한 시편에 대한 영역별 극점도(Pole Figure)를 나타낸다. BM은 입방체 방위인  $\{001\} \langle 100 \rangle$ 이  $\text{max}=7$ 의 상당히 높은 집적도를

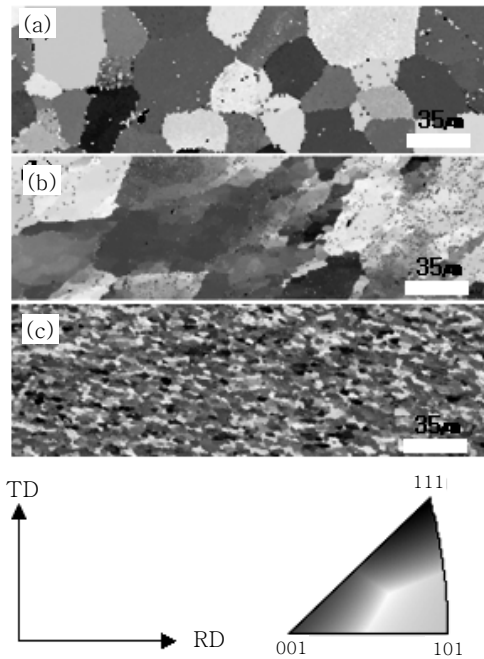


Fig. 4 Orientation images of the post-weld heat treated specimen. (a) BM, (b) HAZ+TMAZ, (c) SZ

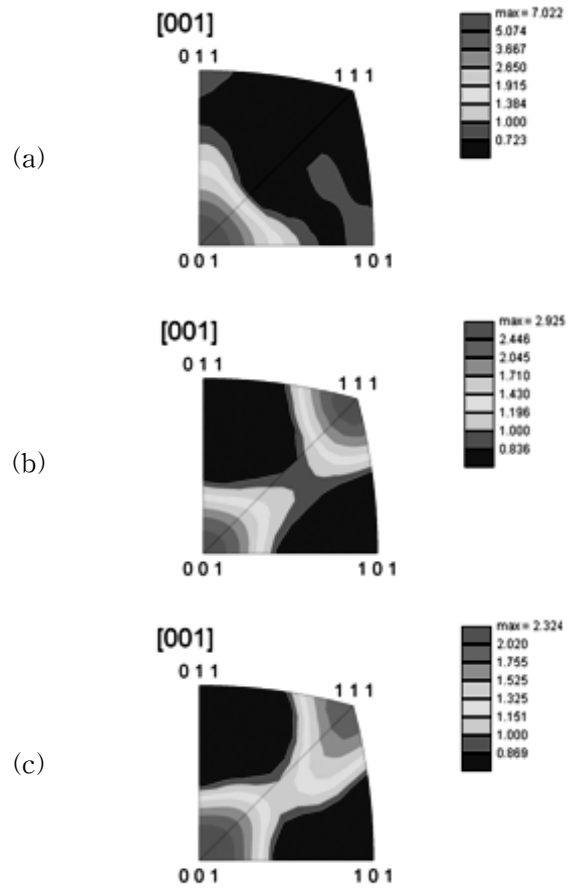
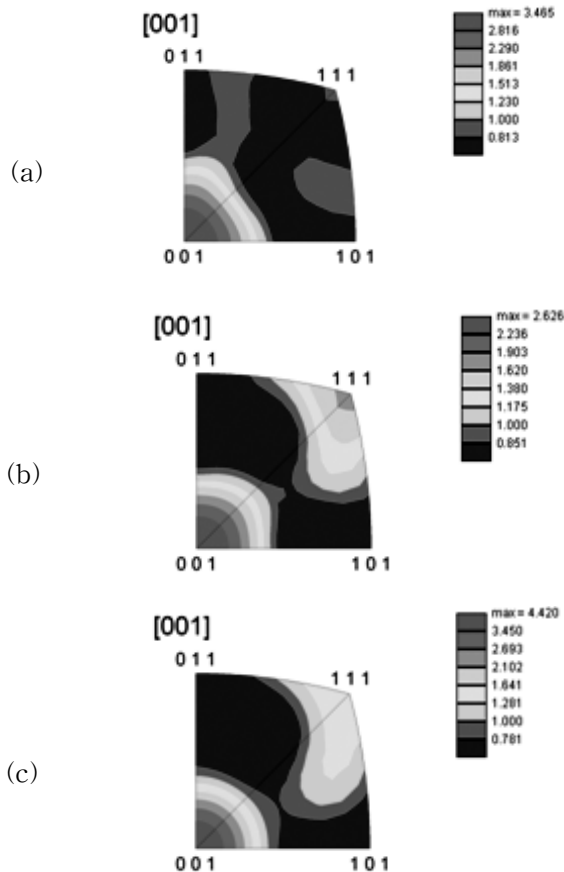


Fig. 5 (001) Pole figures of the as-welded specimen. (a) BM, (b) HAZ+TMAZ, (c) SZ

를 나타내었고, HAZ+TMAZ에서는  $\{001\} \langle 100 \rangle$ 과  $\{111\} \langle uvw \rangle$ 가 비슷한 수준으로 집적해 있는 것이 관찰되었다. HAZ가 접합에 의한 물리적 영향을 직접적으로 받지 않은 영역인 것을 고려할 때, HAZ의 주 방위는 BM과 마찬가지로  $\{001\} \langle 100 \rangle$ 일 수밖에 없다. 이 결과는 TMAZ의 주 방위가  $\{111\} \langle uvw \rangle$ 라는 것을 시사한다. 한편, SZ에서는  $\{001\} \langle 100 \rangle$ 가 집적한 가운데  $\{111\} \langle uvw \rangle$  방위가 약하게 검출되었다. 이 결과들은 역극점도의 Color Key에 의한 Images 결과와 거의 일치한다.

Fig. 6은 마찰교반접합 후, 열처리를 실시한 시편에 대한 극점도를 나타낸다. 영역별 주 방위에 대한 전반적인 경향은 열처리 미실시 시편의 결과와 거의 동일하였다. 다만, 접합후열처리를 실시하지 않은 시편과 달리 HAZ+TMAZ에서  $\{001\} \langle 100 \rangle$  방위가 상대적으로 강하게 검출된 것은 측정 시야가 HAZ와 TMAZ의 경계에서 HAZ쪽으로 치우친 데서 기인한 것으로 생각된다. Fig. 5와 Fig. 6의 극점도 분석을 통하여, 마찰교반접합 후의 도장 공정은 접합부 결정 방위 분포에 큰



**Fig. 6** (001) Pole figures of the post-weld heat treated specimen. (a) BM, (b) HAZ+ TMAZ, (c) SZ

영향을 미치지 않는다는 것이 다시 한 번 명확히 확인되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 자동차 차체용 Al-Mg-Si계 알루미늄 합금 판재의 마찰교반접합부에 대하여 완성차 제조 라인의 도장 공정 상당의 열처리를 추가적으로 실시한 후, 접합부 결정 방위 분포를 측정함으로써, 접합후열처리가 접합부 결정 방위 분포에 미치는 영향을 조사하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 6xxx계 알루미늄 합금 판재 마찰교반접합부의 영역별 주 방위에 대하여, 틀에 의한 물리적 영향을 거의 받지 않아 초기 결정립 상태에 가까운 HAZ 영역은 입방체 방위인  $\{001\}\langle 100 \rangle$ , 틀의 고속 회전과 접합 방향으로의 진행에 의한 전단 변형을 심하게 받아 일정 방향으로 신장 배열된 결정립 상태인 TMAZ 영역은 전단 변형계 방위인  $\{111\}\langle uvw \rangle$ , 틀에 의한 극심한 소성 유동과 온도 상승에 의해 연속적으로 동적 재결정된 결정립 상태인 SZ 영역은  $\{001\}\langle 100 \rangle$ 가 주 방위라는

것이 확인되었다.

2) 마찰교반접합 후, 443K에서 1.2Ks 동안 열처리한 시편에 대하여 결정 방위 분포를 측정된 결과, 접합후열처리를 실시하지 않은 시편의 결과와 거의 동일한 결과가 얻어졌다. 이 결과로부터, 완성차 라인의 도장 공정 상당의 접합후열처리는 접합부 결정 방위 분포에 영향을 미치지 않는다는 것이 명백히 확인되었다.

향후, 알루미늄 합금을 비롯한 경량 소재의 자동차 차체 적용을 확대하기 위하여 완성차 조립 공정을 고려한 마찰교반접합 공정 설계 및 접합부 미세 조직 변화 등에 대한 폭넓은 추가 실험과 연구가 요구된다.

#### 후 기

본 연구의 일부는 광주지역 첨단부품소재 인프라구축 사업으로 수행된 연구결과(No. 09-IK-1-0001)이며, 마찰교반접합에 협조해 주신 권용재 교수님께 진심으로 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Moataz M. Attallah and Hana G. Salem ; Friction stir welding parameters, *Mater Sci. Eng. A*, **391** (2005), 51~59
2. P. Bala Srinivasan, W. Dietzel, R. Zettler, J. F. dos Santos and V. Sivan ; Stress corrosion cracking susceptibility of friction stir welded AA7075-AA6056 dissimilar joint, *Mater Sci. Eng. A*, **392**(2005), 292-300
3. M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss and P. J. Withers ; Microstructure, mechanical properties and residual stress as a function of welding speed in aluminum AA5083 friction stir welds, *Acta Mater.*, **51**(2003), 4791-4801
4. Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Ikeda, M. Enomoto, S. Jogan and T. Hashimoto ; Microstructure in the friction stir weld of an aluminum alloy, *Metal. and mater. Trans. A*, **32**(2001), 941-948
5. R. W. Fonda, J. F. Bingert and K. J. Colligan ; Development of grain structure during friction stir welding, *Scripta Mater.*, **51**(2004), 243-248
6. K. V. Java and S. L. Semiatin ; Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloy, *Scripta Mater.*, **43**(2000), 743-749
7. Y.S. Sato, Y. Kurihara, S.H.C. Park, H. Kokawa and N. Tsuji ; Friction stir welding of ultrafine grained Al alloy 1100 produced by accumulative roll-bonding, *Scripta Mater.*, **50**(2004), 57-60
8. S. Lathabai, M. J. Painter, G.M.D. Cantin and V.K. Tyagi ; Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy, *Scripta Mater.*, **55**(2006), 899-902

9. K. Nakata, Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura and T. Komazaki : Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing, *Mater Sci. Eng. A*, **437**(2006), 274-280
10. Y.S. Sato, H. Yamanoi, H. Kokawa and T. Fukuhara : Microstructural evolution of ultrahigh carbon steel during friction stir welding, *scripta Mater.*, **57**(2007), 557-560