

## 마찰교반접합된 알루미늄 합금의 내식 특성에 관한 연구 동향

안병욱\* · 최돈현\*\* · 연운모\*\*\* · 정승부\*,†

\*성균관대학교 신소재공학부

\*\*성균관대학교 마이크로 전자 패키징 연구소

\*\*\*수원과학대학 신소재 응용과

### Researches in Corrosion Resistance of Friction Stir Welded Aluminum alloys

Byung-Wook Ahn\*, Don-Hyun Choi\*\*, Yun-Mo Yeon\*\*\* and Seung-Boo Jung\*,†

\*School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University

\*\*MEPL, Sungkyunkwan University

\*\*\*Department of Advanced Materials Application, Suwon Science College

†Corresponding author : sbjung@skku.edu

#### Abstract

Aluminum alloys have been considered for substantial use in these industries. This ensues from their attractive strength to weight ratio, superb formability, apposite weldability and acceptable corrosion resistance. Depending on the specific application, corrosion behavior is a significant factor of a welded joint. In this study, recent researches in the view of corrosion resistance of friction stir welded aluminum alloys are briefly reviewed.

Key Words : Friction stir welding, Aluminum alloy, Corrosion resistance

#### 1. 서 론

알루미늄 및 마그네슘과 같은 경금속 합금은 최근 건축, 전기 및 수송산업과 같은 분야뿐만 아니라 우주 항공 산업등과 같은 고 부가가치 산업에서도 폭넓게 적용이 되어 산업수요가 크게 증가하고 있는 추세이다. 특히 알루미늄 합금의 경우 친환경·고부가가치 소재로서 알루미늄 합금 소재 시장은 꾸준히 증가하여 왔으며 향후에도 지속적인 성장이 이루어질 것으로 기대된다. 하지만 알루미늄 합금을 기존의 용융 용접법을 통하여 용접을 할 시에는 용융부 (fusion zone) 및 열 영향부 (Heat affected zone)에서 합금 원소의 편석 및 여러 가지 원인에 의해 부식 민감성 (corrosion susceptibility)이 증가하는 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>.

마찰교반접합 (Friction Stir Welding)은 1991년 영국 TWI에서 개발한 고상 접합법으로서 접합 공정은 다음과 같다. 접합시키고자 하는 재료를 판에 단단히 고정시킨 채 비소모성의 접합 톨을 일정한 회전속도를 갖고 재료 내에 삽입한다. 그 다음 판을 이동시켜 고상 상태에서 판과 재료 사이에 마찰에너지를 발생시키고

이 에너지는 마찰열로 변화하여 재료를 연화시킨다. 열에 의해 연화된 재료는 회전하는 톨에 의해 기계적으로 교반이 되어 고상상태에서 접합이 이루어지게 된다.

마찰교반접합을 적용하여 알루미늄 합금을 접합할 경우 다음과 같은 요인들로 인해 부식 민감성이 감소되는 것으로 알려져 있다. 우선, 마찰교반접합공정은 액상 상태 접합이 아닌 고상 상태의 접합이므로 합금 원소의 편석이 발생하지 않는 장점을 갖고 있다. 또한, 접합 진행 시 용가재 (filler metal)를 사용하지 않으므로 용접부의 화학적 조성은 알루미늄 합금 원 소재와 같다. 이와 같은 이유로 마찰교반 접합은 용융 용접에 비하여 우수한 부식 민감성을 나타내는 것으로 알려져 있다<sup>2)</sup>.

따라서 본 논문에서는 마찰교반접합을 적용한 알루미늄 합금의 접합부 부식 특성에 관하여 보고된 연구 결과를 정리하여 소개하고자 한다.

#### 2. 최근 연구 동향

마찰교반접합된 알루미늄 합금의 부식 특성에 관한 연구들은 2000계 (Al-Cu 합금), 5000계 (Al-Mg 합금),

6000계 (Al-Mg-Si 합금)을 중심으로 진행되고 있다.

## 2.1 2000계 알루미늄 합금

2000계 합금을 피접합재로 사용하여 진행된 연구 중 주목할 만한 연구로는 2010년 Kang<sup>3)</sup> 등이 마찰교반 접합된 AA2024-T3 알루미늄 합금의 부식 특성을 평가한 것을 들 수 있다. Kang 등은 틀 회전 속도 700 rpm, 이송속도 200 mm/min의 접합조건에서 마찰교반 접합을 수행하였으며, 광학 단면 마크로 사진 및 미세 조직을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1 (f)에 나타나 있는 SAZ (shoulder active zone)의 경우 흑색의 스트링거 (stringer)를 관찰 할 수 있다. 이 영역을 고배율로 확대하여 관찰 하였을 시 Fig. 1 (g)의 광학 이미지에서 1과 2로 표기된 영역인 2상 입자들이 존재하는 것을 보인다.

SAZ 영역에서 생성된 서로 다른 석출 상을 관찰하기 위하여 Fig. 2에 SEM/EDS 분석결과를 나타내었다. Fig. 2를 통해서  $Al_2CuMg$  (S phase, 1, 2, 3)과 Al-Cu-Fe-Mn (4, 5, 6)의 두 가지 상이 존재하는 것으로 나타났다. 반면에  $Al_2Cu$  ( $\theta$  phase)는 생성이 되지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3는 EXCO 용액 (4.0 M NaCl + 0.5 M

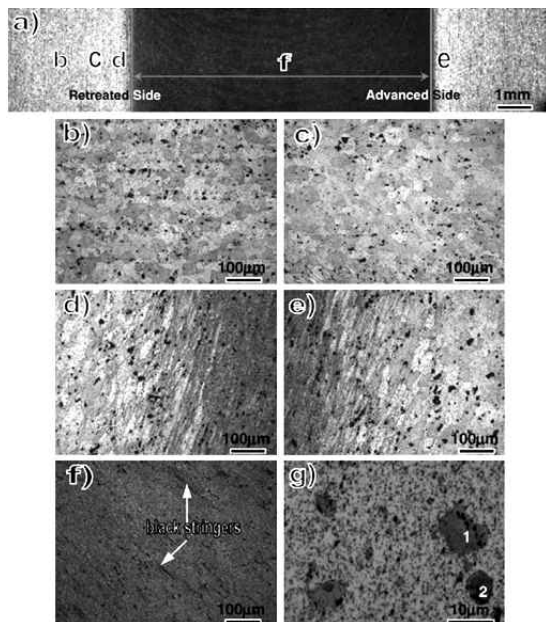


Fig. 1 Microstructures on the top surface of the FSW joint. (a) overview, (b) base metal, (c) HAZ (heat affected zone), (d) TMAZ-R (the thermo-mechanical affected zone of the retreating side), (e) TMAZ-A (thermo-mechanical affected zone of the advancing side), (f) SAZ (shoulder active zone), (g) intermetallics in SAZ<sup>3)</sup>

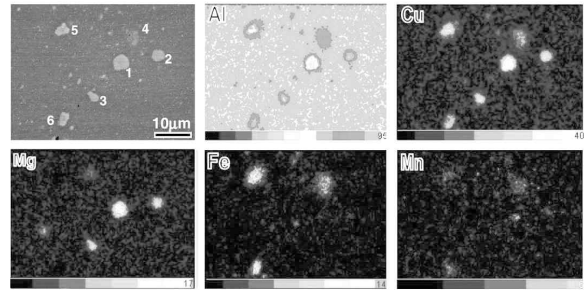


Fig. 2 EDS mapping of particles of S phase and Al-Cu-Fe-Mn phase in the SAZ

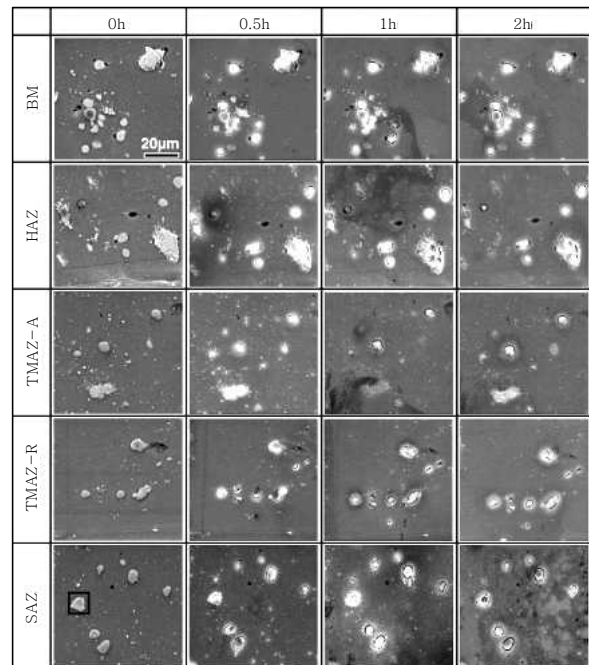


Fig. 3 The corrosion behavior in the different regions during different corrosion periods<sup>3)</sup>

$KNO_3 + 0.1 M HNO_3$ , 25 °C)을 이용하여 모재 및 접합부의 여러 영역에서 침적 시험을 실시하였다. 모든 영역에서 0.5 h 침적 시험을 실시 할 시에는 S phase와 알루미늄 기지 사이에서 공식 (Pitting corrosion)이 발생하는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 S phase가 알루미늄 기지와 반응 시 양극으로 작용하였기 때문이다. 또한 SAZ 영역의 경우 앞서 Fig. 2에 언급하였듯이 S phase 외에 Al-Cu-Fe-Mn의 석출물이 존재한다. 이러한 Fe가 함유된 석출물의 경우, Fig. 4에 나타나듯이 침적 시간이 증가함에 따라 석출물의 외곽 부분부터 부분적으로 침식이 되는 것을 볼 수 있다. 이는 Fe가 함유된 금속간 화합물의 경우 자기 부식 전위 (self-corrosion potential)이  $-0.35 V_{SCE}$ 로 알루미늄 기지에 비해  $0.3 V_{SCE}$  더 높은 것으로 알려져 있다<sup>4)</sup>.

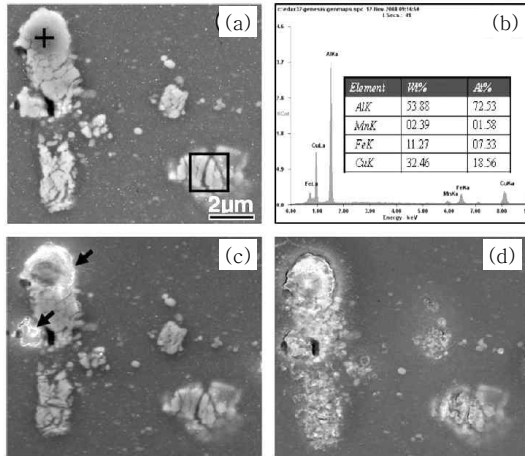


Fig. 4 The corrosion behavior of Al-Cu-Fe-Mn-Si phase in HAZ. (a) before immersion, (b) the EDS spectra of the particle, (c) after being immersed for 0.5 h, (d) after being immersed for 2 h<sup>3)</sup>

이러한 이유로 Fe가 함유된 금속간 화합물이 존재하는 영역에서는 더 극심한 갈바닉 부식이 일어나는 것으로 알려져 있다. 따라서 SAZ 영역이 Fig. 3에서 나타나듯이 시간이 지날수록 좀더 극심한 공식이 진행되는 것을 관찰할 수 있다.

### 2.2 5000계 알루미늄 합금

5000계 합금을 피접합재로 사용하여 진행된 연구 중 주목할 만한 연구로는 2013년 Choi 등이 마찰교반접합된 AA 5083 알루미늄 합금의 예민화 열처리 유무에 따른 부식 특성 평가 한 것을 들 수 있다. Choi<sup>5)</sup> 등은 5000계 알루미늄 합금의 경우 특정 온도에서의 열처리 (175 °C, 240 시간)을 진행하게 되면 결정립계 내에 Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> (β phase) 이 석출이 되어 입계 부식에 취약

Table 1 Various welding conditions and the sensitization heat treatment<sup>5)</sup>

Specimen	Heat-treatment condition	FSW process
A1	as-received	Base metal
A2	as-received	700 rpm weld
A3	as-received	1050 rpm weld
A4	as-received	1600 rpm weld
S1	Sensitized	Base metal
S2	Sensitized	FSW after Sensitization (700 rpm weld)
S3	Sensitized	FSW after Sensitization (1050 rpm weld)
S4	Sensitized	FSW after Sensitization (1600 rpm weld)

한 것으로 알려져 있는 AA 5083 알루미늄을 열처리

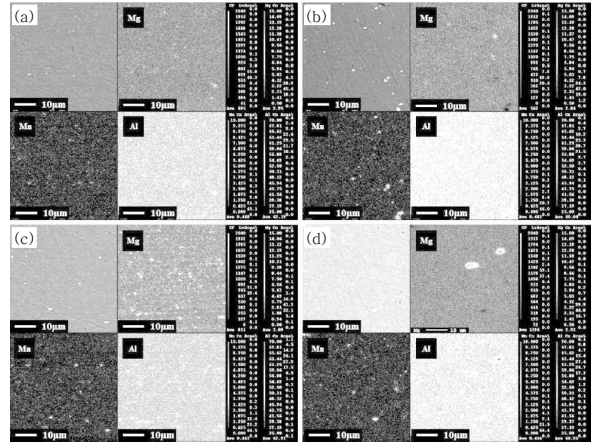


Fig. 5 Results of EPMA analysis: (a) A1 (b) A4 (c) S1 (d) S4<sup>5)</sup>

유·무에 따라 모재 및 교반부의 부식특성 차이를 연구하였다. Table 1은 FSW 실험 조건 및 열처리 조건을 나타낸 표이다.

Fig. 5는 예민화 열처리를 진행하지 않은 모재 및 교반부, 예민화 열처리를 진행한 모재 및 교반부의 EPMA 분석 결과이다. 모든 영역에서 Mn-rich 영역이 존재하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 기존 연구들을 토대로 볼 때 Al<sub>6</sub>Mn임을 알 수 있다. 반면에 Mg-rich 영역의 경우 (Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>), 예민화 열처리를 진행하지 않은 모재 및 교반부의 경우 매우 적은 영역만 존재하는 것을 볼 수 있었다. (Fig. 6 (a)-(b)) 반면에 예민화 열처리된 모재의 경우 (Fig. 6 (c)) 결정립계를 따라 Mg-rich 영역이 관찰되었다. 반면에 예민화 열처리된 알루미늄 합금을 마찰교반접합한 교반부의 경우 모재와 같은 현상이 관찰되지 않았다.

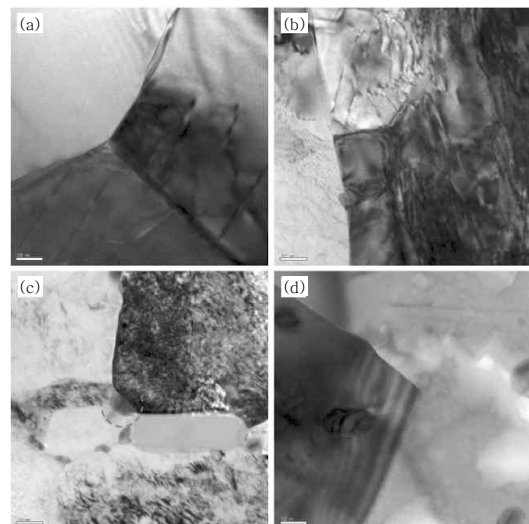


Fig. 6 TEM microstructures of the Al 5083 alloys: (a) A1, (b) A4, (c) S1, (d) S4<sup>5)</sup>

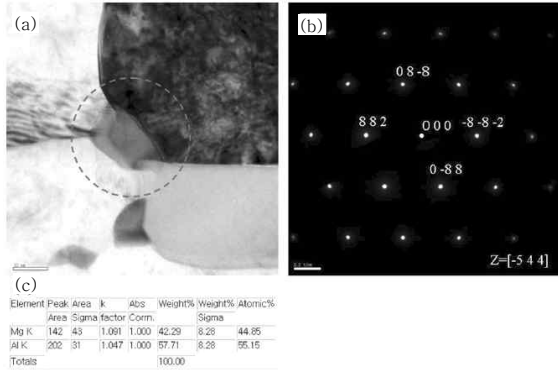


Fig. 7 Magnification TEM microstructure of S1 specimen: (a) TEM micrograph, (b) Selected area diffraction pattern (SADP), (c) Result of EDS analysis<sup>5)</sup>

Fig. 6는 각각의 영역에서의 TEM을 이용하여 미세 조직을 관찰한 결과이다. 대부분의 영역에서 석출물은 관찰되지 않았지만 예민화 열처리된 모재에서는 붉은 원형으로 표시된 부분에서 석출물이 관찰되었다. 이러한 석출물의 상을 분석하기 위해 EDS 및 SADP (Selected Area Diffraction Pattern) 분석을 실시하였으며 결과는 Fig. 7에 나타내었다. EDS 및 SADP 분석결과 결정립계 내에 β phase가 관찰되었으며 이는 예민화 열처리에 생성되었다. Table 2는 각 영역에서의 입계 부식 민감도를 측정하기 위한 시험인 NAMLT test 결과이다. NAMLT test는 30 °C의 70% Nitric acid solution에 24시간 침적 후의 질량과 침적 전의 질량과의 차이를 나타낸 결과이다. 질량 감소량은 A1 시편 (예민화 열처리된 모재) 을 제외한 나머지 영역에서의 시편 모두 비슷한 결과를 나타냈다. 이는 앞서 언급하였던 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 마찰교반접합이 진행되는 동안 접합부 하단의 열이력을 나타낸 결과이다. Al-Mg 합금의 경우 450 °C보다 높은 온도의 경우 알루미늄 기지 내로 β phase가 모두 고용되는 것으로 알려져있다. 따라서 마찰교반접합이 진행됨에 따라 교반부의 경우 예민화 열처리에 의해 생성된 β phase가 일부 고용되었다. 또한 회전되는 틀에 의해

Table 2 Result of NAMLT test of Al 5083 alloys<sup>5)</sup>

Specimens	A1	A2	A3	A4
Weight loss (mg/cm <sup>2</sup> )	3.75±0.44	2.87±0.13	2.93±0.06	2.83±0.10
Specimens	S1	S2	S3	S4
Weight loss (mg/cm <sup>2</sup> )	67.95±3.08	2.92±0.01	3.10±0.02	3.03±0.09

β phase의 일부는 파괴되었다. 이러한 이유로 인해 예민화 열처리된 모재와 교반부의 미세조직 차이가 발생

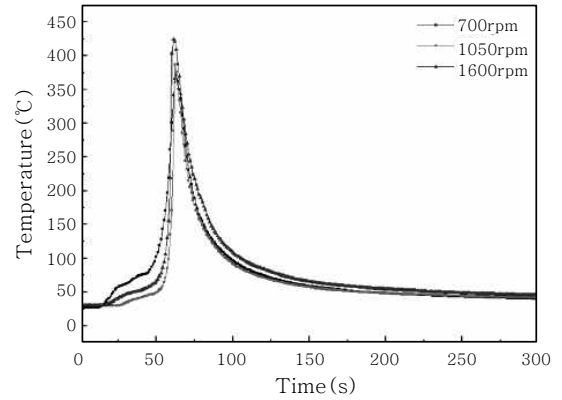


Fig. 8 Temperature profiles recorded during FSW<sup>5)</sup>

하였다.

### 2.3 6000계 알루미늄 합금

Ahimpour<sup>6)</sup> 등은 6061 알루미늄 합금을 피접합재로 사용하여 마찰교반접합과 GTA 용접 시 부식 특성의 차이 비교를 연구하였다. 부식 실험 결과 마찰교반접합한 알루미늄 합금의 경우 GTA 용접을 적용한 알루미늄 합금에 비하여 더 높은 부식 저항성을 나타내지만 모재와 비교하여 상대적으로 더 낮은 부식 저항성을 갖는 것을 볼 수 있다. (Fig. 9) 마찰교반접합 시 알루미늄 합금은 결정립 미세화로 인해 모재 대비 더 많은 결정립계 생성이 일어난다. 그에 따라서 결정립계의 전체적인 양은 모재에 비해 더 많이 생성된다. 이러한 결정립계는 갈바닉 부식이 일어날 시 부식 저항성에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

Fig. 10은 마찰교반접합 및 GTA 용접을 실시한 후 접합부의 미세조직을 관찰한 결과이다. GTA 용접을 실시한 경우 마찰교반접합을 적용한 경우에 비하여 부식된 정도가 더 심한 것을 볼 수 있다. 이는 용융 용접 시 생성되는 Al-rich dendrite와 Si-rich dendrite의 형성에 의한 것으로 알려져 있다.

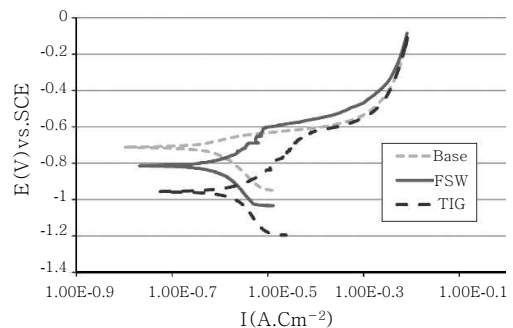


Fig. 9 Tafel polarization diagram for base metal, FSW and TIG welded alloys<sup>6)</sup>

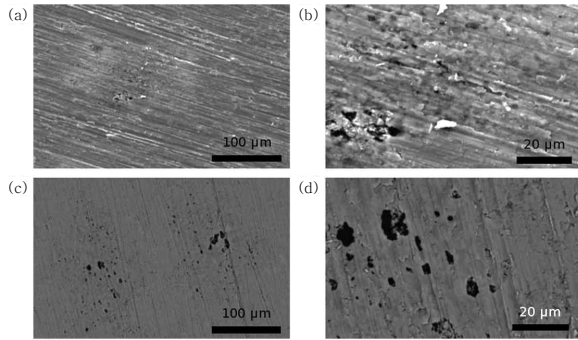


Fig. 10 Micrographs of corroded regions in: (a and b) FSW and (c and d) TIG welded alloy<sup>6)</sup>

### 3. 맺 음 말

고부가가치 소재로서 알루미늄 합금 소재 시장은 꾸준히 증가함에 따라 알루미늄의 용접법에 대한 연구가 꾸준히 진행이 되고 있으며 특히 알루미늄 합금의 용접부 부식에 대한 연구 결과들이 보고가 되고 있다. 그 중 최신 용접법 중 하나인 마찰교반접합이 알루미늄 합금의 용접부 부식 저항성에 관한 측면에서 적절한 대안으로 자리매김 하고 있다. 다만 마찰교반접합의 경우 아직 산업현장에서 범용적으로 사용되지 않는 단점이 존재한다.

### 감사의 글

본 연구의 일부는 지식경제부 산업원천기술개발사업 (과제번호 : 10038688)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.



- 안병욱
- 1986년생
- 성균관대학교 신소재공학부
- 마찰교반접합, 마찰교반접합
- e-mail : wordup1@skku.edu



- 최돈현
- 1982년생
- 성균관대학교 신소재공학부
- 마찰교반접합, 마찰교반접합
- e-mail : cdh0326@skku.edu



- 연윤모
- 1953년생
- 수원과학대학 신소재응용과
- 마찰교반접합, 마찰교반접합
- e-mail : ymyeon@ssc.ac.kr



- 정승부
- 1959년생
- 성균관대학교 신소재공학부
- 마이크로조이닝, 마찰교반접합
- e-mail : sbjung@skku.edu

### 참 고 문 헌

1. Cramer SD, Covino Jr BS. ASM handbook. In: Corrosion: environments and industries. 9th ed., vol. 13C. Materials Park, O.H: ASM International; 2006
2. J.B. Lumsden, M.W. Mahoney, G. Pollock, and C.G. Rhodes: Intergranular Corrosion Following Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 7075-T651, Corrosion, 55-12 (1999), 1127-1135
3. J. Kang, R. D. Fu, G.H. Luan, C. I. Dong, M. He: In-situ investigation on the pitting corrosion behavior of friction stir welded joint of AA2024-T3 aluminium alloy, Corrosion Science, 52 (2010), 620-626
4. G.O. Llevbare, J.R. Scully: Mass - Transport-Limited oxygen reduction reaction on AA2024-T3 and selected intermetallic compounds in chromate- containing solutions, Corrosion, 57-2 (2001), 134 - 152
5. D. H. Choi, B. W. Ahn, D. J. Quesnel, S. B. Jung: Behavior of  $\beta$  phase ( $Al_3Mg_2$ ) in AA 5083 during friction stir welding, Intermetallics, 35 (2013), 120-127
6. V. Fahimpour, S.K. Sadrnezhad, F. Karimzadeh: Corrosion behavior of aluminum 6061 alloy joined by friction stir welding and gas tungsten arc welding methods, Materials and Design, 39 (2012), 329-333