

저항점용접된 Al5052/DP590 이종소재의 특성평가 및 공정의 최적화

조범지^{*,**} · 김지선^{**} · 유효상^{**} · 김인주^{**} · 이성희^{*} · 김영곤^{**,†}^{*}목포대학교 공과대학 신소재공학과^{**}한국생산기술연구원**Characterization of resistance spot welded Al5052/DP590 dissimilar materials and processing optimization**Beom-Ji Jo^{*,**}, Ji-Sun Kim^{**}, Hyo-Sang Yoo^{**}, In-Ju Kim^{**},
Seong-Hui Lee^{*} and Young-Gon Kim^{**,†}^{*}Dept. of Advanced Materials Science & Engineering, Mokpo University, Mokpo 534-729, Korea^{**}Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 500-460, Korea

†Corresponding author : ygkim1@kitech.re.kr

(Received March 13, 2015 ; Accepted April 7, 2015)

Abstract

IRW(Inverter Resistance Welding) process and DSW(Delta-spot welding) process for dissimilar materials of DP590 and Al5052 were performed to evaluate the welding quality and mechanical properties. IRW experiment was carried out with changing the welding current. The other welding parameters such as pressure force, weld time, squeezing time and holding time were fixed. On the other hand, DSW experiment was performed using the process tape at welding current of 11.5kA. The other conditions were same as IRW conditions. The various testes such as shear tensile strength, nugget diameters, EDS, SEM and cross-sectional observation for weld zone was performed. As a result, IMC(Inter Metallic Compound) thickness at 11.5kA was thinner than those of 9.5kA and 10.5kA conditions. In addition, thinned IMC layer was observed when high electric current apply to the materials(DP590 and Al5052) in a short time through dissimilar resistance spot welding controlling welding conditions. The relationship between the thickness of IMC and current intensity was after discussed.

Key Words : Intermetallic compound, DP590, Al5052, Shearing stress, Weld nugget, Resistance spot welding, Delta-Spot welding

1. 서 론

최근 자동차 산업에서 연비개선은 선택이 아니라 필수가 되었다. 경량화는 자동차의 기본성능인 가속력과 제동력을 향상시키는 직접적인 요인이며 이를 위해 경량금속 사용이 증가하고 있다¹⁾. 경량금속으로는 알루미늄, 마그네슘, 플라스틱 및 복합재료가 있으며, 차체 경량화를 위해 내식성, 내구성에 대한 저항이 높은 알루미늄 합금이 차체 부품으로 대체되고 있으며 알루미늄 합금으로 대체 시 약 50%의 차체 경량화가 가능하다

²⁻⁴⁾. 또한 탑승자의 안전과 차체효율을 위해 고강도강판의 꾸준한 적용도 요구하고 있기 때문에 알루미늄 합금과 고강도강판의 안정적인 용접부형성에 대한 연구가 진행되고 있다⁴⁻⁸⁾. 자동차 산업에서 주요한 용접 기술은 1877년 Elihu Thomson에 의해 발명된 저항점용접이다^{9,10)}. 저항점용접은 작업의 자동화 적용이 뛰어나며 용접속도가 빨라 대량생산에 적합하다¹⁰⁻¹²⁾. 그러나 저항점용접을 알루미늄 합금과 고강도강판의 용접에 적용할 경우, 용접 중에 알루미늄 소재에 의한 잔재가 전극수명을 마모시키는 문제가 있다¹⁾. 이러한 문제점은 전극수명을 감소시키며 수시로 전극교체작업을 진행하

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of DP590 and Al5052 alloys

Chemical composition(at%)							Mechanical Properties		
Material	Fe	C	Mn	Si	Mg	Al	T.S.(MPa)	Y.S.(MPa)	El.(%)
DP590	97.36	0.14	2.1	0.40	-	-	600-700	330-410	28
Al5052	0.40	-	1.0	0.25	2.8	Bal.	190-200	90-100	27

게 하여 작업효율을 떨어뜨린다. 또한 알루미늄 합금과 고강도강판은 용접 및 열팽창 등 열특성의 차이가 있고 용접 시 이종금속 친화력이 커서 용접부에 바람직하지 않은 금속간화합물(IMC : InterMetallic Compound)이 형성된다^{4,12-15}. 금속간화합물은 알루미늄합금과 고강도강의 용접부에 접합강도를 저하시키고 결함(크랙, 기공)을 발생시켜 계면파단을 야기시키는 문제가 있다^{3,16-17}. 그러나 아직까지 이런 이종금속의 저항점용접에서 발생하는 용접결함 등에 대한 연구가 많이 진행되고 있으나 금속간화합물의 제어에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Al5052합금과 DP590의 이종재료의 저항점용접에 프로세스테이프라는 추가적인 특수금속을 사용해 용접시 발생하는 금속간화합물의 특성을 분석하고 최적용접공정을 확립하려고 하였다. 용접부에 대한 평가는 너짓크기측정, 전단응력, 단면관찰, EDS(energy dispersive x-ray spectroscopy) 분석, SEM(Scanning Electron Microscope)관찰을 통하여 진행하였다.

2. 사용 재료

2.1 공시 재료

본 연구에 사용된 피용접재는 내식성, 용접성, 가공성이 우수한 Al5052와 AHSS강 중 가장 많이 사용되는 DP강을 사용하였다^{5,18,19}. ISO14272 welding joint (DP590; 1.4t, Al5052; 1.5t) 규격에 의해 Fig. 1과 같이 제작되었으며, 두께 1.4mm의 DP590과 1.5mm의 Al5052가 사용되었다. Table 1에 각 소재의 화학 성분과 기계적 특성을 나타내었다.

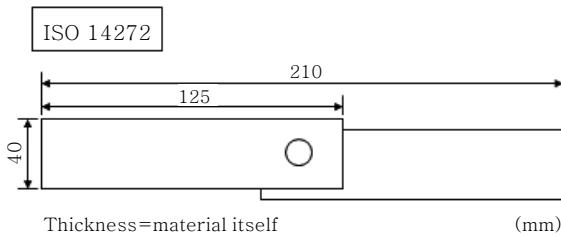


Fig. 1 Schematic drawing of the specimen of spot welding joint (DP590; 1.4t, Al5052; 1.5t)

3. Al5052/DP590 저항용접 실험

3.1 적용 용접공정

3.1.1 인버터 저항점용접실험

일반적인 인버터 저항용접공정을 이용하여 이종금속의 용접부 특성을 분석하기 위한 실험을 수행하였고 시스템 구성 및 실험에 이용된 용접조건은 ISO 18278-2 규정에 명시된 조건을 사용하였다. 전극팁은 Domeradius type이며 직경 8mm의 Cr-Cu 소재 전극팁을 사용하였다.

3.1.2 델타스팟을 활용한 저항점용접실험

델타스팟 용접은 오스트리아의 프로니우스사가 개발한 저항점용접방법으로 프로세스 테이프라는 전극팁과 모재사이의 용접 저항을 증가시켜주는 특수금속을 삽입하여 기존의 저항점용접공정에서 이를 수 없었던 너짓형상위치 제어가 가능한 특징을 갖고 있으며, 원리는 Fig. 2와 같다. 프로세스 테이프는 그 소재가 CrNi계열의 PT-3000, Cu에 C가 첨가된 PT-3200을 Al5052면에 부착시키고 Cu계열의 PT-2000, Cu에 Ni이 첨가된 PT- 2110을 DP590면에 부착시켜서 실험을 진행하였다.

3.2 이종소재 용접 조건

용접조건은 Table 2와 같이 ISO 18278-2 규정에 명시된 다단펄스 조건을 사용하였다. 일반적으로 이종 재료에 대한 용접조건은 규정되어있지 않으며 ISO 18278-2 규정은 동종강재의 두께 및 표면처리에 대한 정보를 통해 용접조건(인버터)을 선정하는 기준을 제공해 준다. 본 실험에서는 초기 실험계획에 대한 시행착오

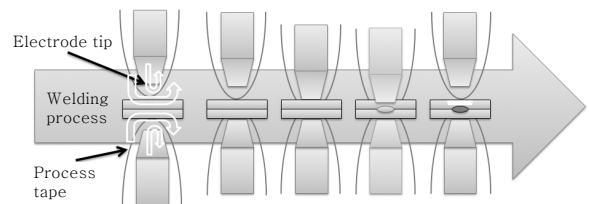


Fig. 2 Schematic diagram of Delta-Spot welding process

Table 2 Experimental conditions for dissimilar welding based on ISO 18278 Standard

Welding parameter	Inverter experimental condition	Delta-Spot experimental condition
Force (kN)	4.5	4.5
Welding current(kA)	8.0kA ~ 13kA (0.5kA increment)	11.5
Weld time (cycle, 1 cycle = 0.02s)	21	21
Cool time (cycle, 1 cycle = 0.02s)	4	4
Squeeze time (cycle, 1 cycle = 0.02s)	40	40
Hold time (cycle, 1 cycle = 0.02s)	25	25
Process tape	-	2000 & 3000
	-	2000 & 3200
	-	2110 & 3000
	-	2110 & 3200

를 줄이기 위해 본 규정을 사용하여 초기 실험을 수행하였다. squeeze time은 생산라인에서는 6~30cycle 정도의 초기 가압시간을 부여하지만 보다 안정성 있는 통전구간을 확보하기 위해 연구에서는 보다 긴 시간을 부여하기도 한다. 따라서 본 실험에서도 생산라인보다 더 긴 40cycle로 초기가압시간을 정하였다. 1차적으로 인버터저항용접공정을 이용하여 겹치기 용접실험을 하였고, 단면형상, 조직관찰, 전단응력, 너깃직경 분석 등을 통하여 도출한 조건 중 최적 조건을 델타스팟 용접 공정에 적용하여 실험을 수행하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 인버터 저항용접 실험결과

4.1.1 용접조건 선정

전단인장실험과 너깃직경측정을 통해 획득한 정보를 이용해 저항점용접조건영역을 Fig. 3의 그래프를 통해 나타내었다. KS규격에 의하면 국내 최소 너깃직경은 $4\sqrt{t}$

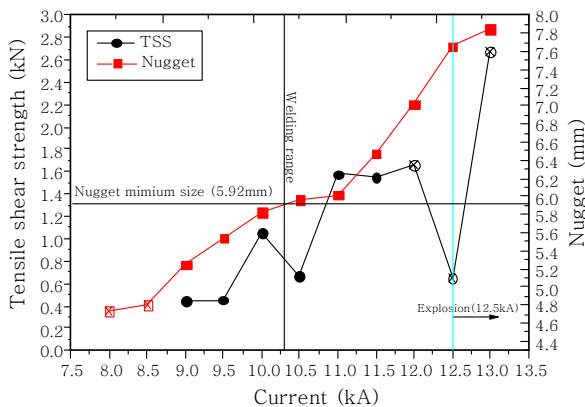


Fig. 3 Variations of tensile shear strength(TSS), nugget diameters according to welding current

를 확보해야하지만 국내 자동차 메이커에서는 $5\sqrt{t}$ 의 너깃경 확보를 요구한다. 따라서 본 연구에서는 $5\sqrt{t}$ 의 최소 너깃경 계산식을 이용하여 DP590의 두께 $t=1.4$ 를 대입하여 구한 값인 5.92mm이상의 너깃경을 가지고 날림이 발생하지 않는 영역까지를 적정 용접 범위로 선정하였다. Fig. 3에서와 같이 실험은 전류 8.0kA부터 실시하였으나 전단인장강도 실험을 할 수 없을 만큼 시험편(8.0kA, 8.5kA)의 상태가 불량하여 형성된 너깃의 장경과 단경에 대해 각각 측정하여 그 평균값을 너깃직경으로 나타내었다. 일반적으로 용접전류가 증가함에 따라 너깃직경이 증가하고 전단인장강도도 증가한다고 알려져 있다. 그러나 본 연구에서는 10.5kA, 12.5kA조건에서는 전단인장강도 값이 낮게 나왔다. 그 원인은 아직 명확하지는 않으나 10.5kA는 IMC층이 조대하게 형성되고 IMC층 형상이 평평하게 형성된 금속간화합물로 인해 강도가 낮아진 것으로 판단되며, 12.5kA는 날림이 발생하는 영역으로 날림에 의한 변수가 작용하거나 IMC층의 형상 혹은 다른 변수에 의한 영향이 있을 것으로 판단된다. 12kA부터는 날림이 발생하였으며 너깃직경으로는 10.5kA부터 용접가능조건으로 판단할 수 있으나 전단인장강도까지 만족하는 조건은 11.0kA, 11.5kA이었으며, 따라서 11.5kA조건을 저항점용접의 최적조건으로 판단하였다.

4.1.2 용접부 IMC 제어 특성 분석

Fig. 4의 SEM 촬영한 이미지와 실제현미경으로 관찰한 이미지에 나타났듯이 전류가 11.5kA 일 때 가장 IMC(InterMetallic Compound)층이 얇게 형성되었으며 전단인장강도(TSS)가 가장 높았다. 전류가 높은 조건일수록 용접부가 넓게 형성되어 전류 상승에 따른 입열의 증가로 압흔이 깊게 발생됨을 확인할 수 있다.

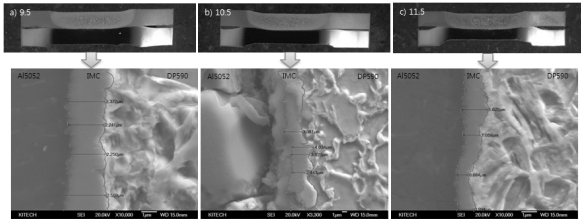


Fig. 4 SEM Images of IMC zone for analysis of IMC thickness : (a) = 2.4um, (b) = 3.4um, (c) = 1.9um

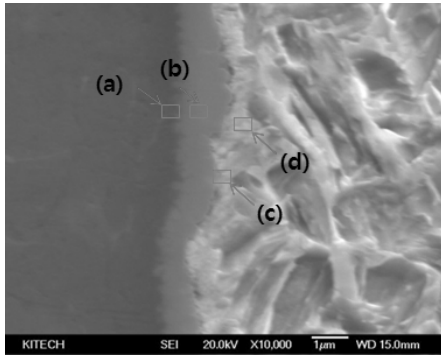


Fig. 5 EDS measuring points of the dissimilar weld zone

일반적으로 입열이 증가할수록 금속간화합물의 생성은 증가하는 경향이 있으나 10.5kA, 11.5kA를 비교해보면 저전류일 때 금속간화합물의 두께가 더 두꺼웠음을 확인하였으며, 9.5kA와 10.5kA를 비교해보면 저전류를 사용할 경우 더 두꺼운 금속간화합물 층이 형성되었으며, 9.5kA와 11.5kA는 큰 차이는 없음을 확인하였다. 이는 단순히 투입되는 전류에 따른 입열량 변화가 금속간화합물 두께에 미치는 영향력 이외의 다른 변수에 의한 영향이 있는 것으로 판단되며 좀 더 상세한 고찰이 필요하다.

Fig. 5와 6은 용접부를 EDS(Energy Dispersive

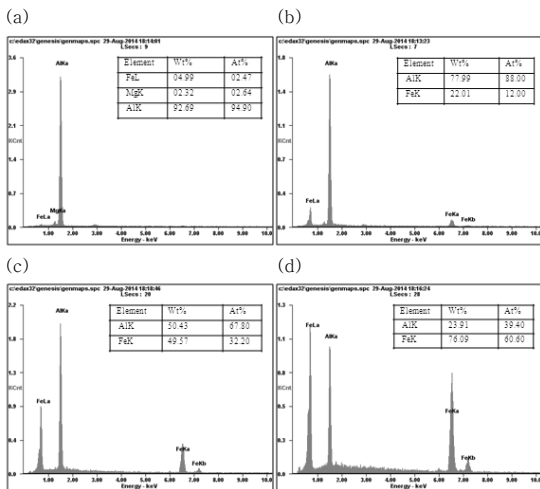


Fig. 6 EDS spectrums of the dissimilar weld zone

x-ray Spectroscopy)로 관찰한 것이다. Al과 Fe의 원자함유량 비율에 따라 (b)는 FeAl₃, (c)는 FeAl₂, (d)는 FeAl로 판단되며 이 결과를 토대로3개의 IMC 층이 형성됨을 확인하였다. Al5052와 DP590간의 저항점용접에서 용융부의 금속간화합물은 다양한 형태로 존재하게 되며 전류를 짧은 시간에 높게 통전시킬 경우에 IMC층이 얇아짐을 Fig. 3의 그래프와 Fig. 4의 이미지를 통해 확인할 수 있다.

4.2 델타스팟 용접 실험결과

인버터 용접실험조건과 같은 조건으로 델타스팟용접 실험을 진행하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서와 같이 3000&2000계열, 3000& 2110계열 프로세스 테이프의 조합의 경우에서 전단인장강도 및 너깃 직경이 기존 인버터 저항용접에 비해 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 3200&2110, 3200&2000 계열의 경우는 강도 및 너깃직경이 인버터 저항용접의 값들과 유사하거나 낮게 나타났다. 이 결과는 프로세스 테이프라는 각 모재의 성분에 맞게 추가적인 접촉저항을 발생시키는 성질의 금속이 모재와 전극팁 사이에 삽입되어 추가 입열을 발생시켜 기존의 저항용접보다 열적 전기적 특성을 향상시켜 우수한 용접성을 나타내었다고 사료된다. 테이프는 DP590쪽에 삽입되는 2000, 2110계열의 영향보다는 Al5052쪽에 삽입되는 3000, 3200계열의 프로세스 테이프의 영향이 큰 것으로 사료된다. Fig. 7에서도 확인할 수 있듯이 프로세스테이프 3000계열과 2000, 2110계열의 조합은 너깃직경과 전단인장강도가 높은 값을 나타내고 3200계열과의 조합에서는 그보다는 낮은 값을 나타낸다. 또한, 프로세스 테이프에 대한 정밀 분석은 검토하지 못했으나 알루미늄 모재 쪽에 삽입되는 3000, 3200계열의 프로세스

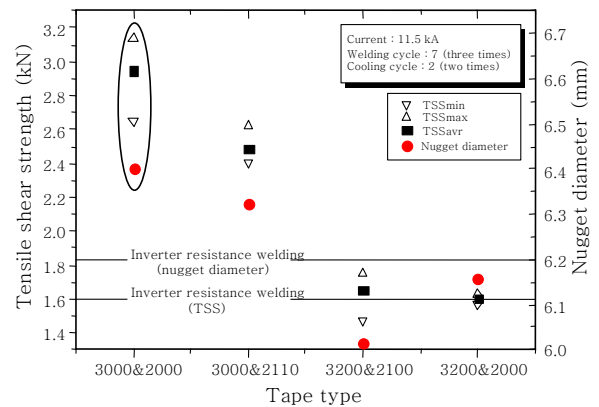


Fig. 7 Comparison strength and nugget diameter according to process tape type

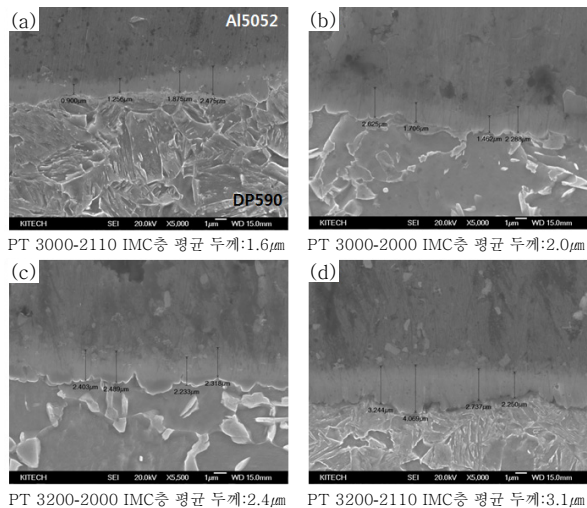


Fig. 8 SEM images of IMC zone for analysis of IMC thickness jointed Delta-Spot welding

테이프에 따라 용접품질의 차이가 발생했다. 또한 기존의 인버터 저항용접보다 용접부 품질이 우수하였으며 프로세스테이프를 사용함으로써 날림현상은 현저히 줄었다. 이와 같이 날림현상의 감소는 용접부 품질에도 큰 영향을 미친다. 그러므로 프로세스 테이프를 이용하여 IMC층 형성 및 두께를 제어하는 것이 가능함을 알 수 있으며, 각 프로세스테이프의 최적조건을 도출하여 적용할 경우 더욱 건전하고 안정된 용접부가 형성 될 것으로 사료된다. 즉, 공정효율을 향상시키기 위해서는 너깃직경과 강도가 양호했던 3000&2000계열의 프로세스 테이프를 사용하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단된다.

Fig. 8은 SEM촬영한 이미지이며 프로세스 테이프 별로 IMC층 두께를 측정된 결과 3000&2110계열이 1.6 μ m로 인버터저항용접공정보다 얇은 IMC층이 형성 되었으며 3000&2000, 3200&2000, 3200&2110계열은 IMC층이 더 넓게 형성 되었다.

5. 결 론

본 실험을 통해 Al5052와 DP590소재의 저항용접에 대한 너깃형성, 전단강도측정, SEM관찰 및 EDS를 통한 용접부 단면의 계면층을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 인버터저항용접기를 이용하여 전류 8.0kA ~ 12.0kA에서 알루미늄과 고강도강의 이종소재용접조건 영역을 도출하였고 11.5kA에서 가장 효율적인 용접성이 나타났다. 10.5kA조건부터 충분한 입열량에 의해 건전한 용접부가 형성되었으나 12.5kA부터는 입열량

과다에 의해 날림이 발생하였다.

2) 인버터용접한 시편의 용접부의 경우, 모재와 모재 사이에서 국부적인 동저항 최대치가 발생하고 저항열이 주변으로 확산되며 입열 제어가 되지 않아 IMC층 형성이 고르지 못하였으나 델타스팟 용접한 시편의 용접부의 경우에는 프로세스 테이프를 이용한 입열제어로 프로세스 테이프와 모재 사이 2곳이 저항열 확산의 근거지가 되어 모재 전반에 열확산이 발생하고 용접성을 향상시켜 IMC층 및 너깃형성이 일관성 있게 나타난다.

3) 철과 알루미늄의 용접 시 용접부에 두께 2~5 μ m의 Fe/Al간의 금속간 화합물이 생성되지만 인버터 11.5kA조건과 델타스팟의 각 프로세스 테이프를 사용했을 때는 2 μ m미만의 두께 혹은 근사치를 가진 양호한 금속간화합물이 생성되어 프로세스 테이프를 통해 금속간화합물층 형성에 대한 제어가 가능하였다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원의 플랫폼사업지원(과제번호 JA-14-0041)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. W. Yuan, R.S. Mishra, S. Webb, Y.L. Chen, B. Carlson, D.R. Herling, G.J. Grant : Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds, *Mater. Pro. Technol.* 211 (2011), 972-977
2. F.Hayat : The effects of the welding current on heat input, nugget geometry, and the mechanical and fractural properties of resistance spot welding on Mg/Al dissimilar materials, *Mater. Design* 32 (2011), 2476- 2484
3. Y.F. Sun, H. Fujii, N. Takaki, Y. Okitsu : Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al alloy/steel joints prepared by a flat spot friction stir welding technique, *Mater. Design* 47 (2013), 350-357
4. W.Zhang, D.Sun, L.Han, D.Liu : Interfacial microstructure and mechanical property of resistance spot welded joint of high strength steel and aluminium alloy with 4047 AlSi12 interlayer, *Mater. Design* 57 (2014), 186-194
5. K. J. Lee, S. H. Kim, E. P. Kwon, K. S. Son : Friction Stir Welding of 900MPa Grade TWIP Steel, *JWJ*, 32(2) (2014), 9-13 (in Korean)
6. J.D. Lee, S.J. Lee, J.H. Bang, D.C. Kim, M.J. Kang, M.S. Kim and J.K. Kim : Mechanical Behavior of Weldbond Joint of 1.2GPa Grade Ultra High Strength TRIP Steel for Car Body Applications, *JWJ*, 32(5) (2014), 44-49 (in Korean)
7. M. Pouranvari, S.M. Mousavizadeh, S.P.H. Marashi, M. Goodarzi, M. Ghorbani : Influence of fusion zone size

- and failure mode on mechanical performance of dissimilar resistance spot welds of AISI 1008 low carbon steel and DP600 advanced high strength steel, *Mater. Design* 32 (2011), 1390-1398
8. M. Xia, Z. Tian, L. Zhao and Y. N. Zhou : Fusion Zone Microstructure Evolution of Al- Alloyed TRIP steel in Diode Laser Welding, *Mater. Trans.* 49(4) (2008), 746-753
 9. X. Wan, Y. Wang, P. Zhang : Modelling the effect of welding current on resistance spot welding of DP600 steel, *Mater. Pro. Technol.* 214 (2014), 2723-2729
 10. M.H.Razmpoosh, M.shamania, M.Esmailzadeh : The microstructural evolution and mechanical properties of resistance spot welded Fe-31Mn-3Al-3Si TWIP steel, *Mater. Design* 67 (2015), 571-576
 11. M. Pouranvari and S. P. H. Marashi : Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties, *Science and Technology of welding and joining*, 18(5) (2013), 361-403
 12. O.Martin, M.Pereda, J.I.Santos, J.M.Galan : Assessment of resistance spot welding quality based on ultrasonic testing and tree-based techniques, *Mater. Process. Technol.* 214 (2014), 2478-2487
 13. T.Ogura, T.Nishida, Y.Tanaka, H.Nishida, S.Yoshikawa, M.Fujimoto, A.Hirose : Microscale evaluation of mechanical properties of friction stir welded A6062 aluminium alloy/304 stainless steel dissimilar lap joint, *Sci. Technol. Weld. Join.* 18(2) (2013), 108-113
 14. C.Dharmendra, K.P.Rao, J.Wilden, S.Reich : Study on laser welding-brazing of zinc coated steel to aluminum alloy with a zinc based filler, *Mater.Sci.Engineer. A* 528 (2011), 4197-1503
 15. J.L.Song, S.B.Lin, C.L.Yang, G.C.Ma, H.Liu : Spreading behavior and microstructure characteristics of dissimilar metals TIG welding-brazing of aluminum alloy to stainless steel, *Mater.Sci.Engineer. A* 509 (2009), 31-40
 16. S.Niknejad, L.Liu, M.y.Lee, S.Esmaeili, N.Y.Zhou : resistance spot welding of AZ series magnesium alloys: Effects of aluminum content on microstructure and mechanical properties, *Mater. Sci. Eng. A* 618 (2014), 323-334
 17. M. Pouranvari, S.P.H. Marashi : Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part I. Controlling factors, *Mter. Sci. Eng. A* 528 (2011), 8337-8343
 18. W.S.Miller, L.Zhuang, J.Bottema, A.J.Wittebrood, P.De Smet, A.Haszler, A. Vieregge : Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, *Mater. Sci. Engineer. A*-280 (2000), 37-49
 19. A.B.Pattnaik, S.Das, B.B.Jha, N.Prasanth : Effect of Al-5Ti-1B Grain refiner on the microstructure, mechaical properties and acoustic emission characteristics of Al5052 aluminium alloy, *Mater. Res. Technol. jmrtec*-123 (2014), 1-9