마그네슘을 6 wt.% 함유한 알루미늄 합금의 저항 점용접성 평가

김민규^{*,**} · 김세현^{*,**} · 황인성^{*,**} · 김동윤^{*,**} · 김영민^{*} · 이승환^{**} · 유지영^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 접합적층연구부

^{**}한양대학교 융합기계공학과

Resistance Spot Weldability of Aluminum Alloy with 6 wt.% Magnesium

Mingyu Kim^{*,**}, Sehyeon Kim^{*,**}, Insung Hwang^{*,**}, Dong-Yoon Kim^{*,**}, Young-Min Kim^{*},
Seung Hwan Lee^{**}, and Jiyoung Yu^{*,†}

^{*}Advanced Joining & Additive Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology,
Incheon, 21999, Korea

^{**}Hanyang University Department of Mechanical Convergence Engineering, Seoul, 04763, Korea

[†]Corresponding author: susagye@naver.com

(Received September 7, 2021; Revised September 27, 2021; Accepted October 21, 2021)

Abstract

To ensure safety and reduce the weight of vehicles, studies are being actively conducted on different aluminum alloys that have strength higher than conventional aluminum alloys. The development of high-performance aluminum alloys through magnesium content control is underway. Research on manufacturing techniques, such as, welding for application to the car body parts of these materials is required. In this study, the resistance spot weldability of an aluminum alloy with 6 wt.% magnesium (Al-6Mg) was evaluated and compared with the commercial aluminum alloy 5052, 6061 (Al5052, Al6061). The suitable welding range of the Al-6Mg was found to have a welding current of 24 kA to 28 kA, and a similar level of Al6061. The welding heat input was almost the same for the three materials, which resulted in no difference in the diameter of the nuggets. There was no significant difference of the porosity ratio between Al-6Mg and Al5052; however, the porosity ratio of Al6061 was higher. The alloy with the highest tensile shear strength, hardness and energy absorption of a welded joint was Al-6Mg. The low porosity ratio and high hardness of the Al-6Mg alloy caused the relatively high tensile shear strength and energy absorption of the welded joint.

Key Words: Resistance spot welding, Aluminum alloy, Magnesium, Weld lobe, Nugget size, Porosity ratio, Hardness, Tensile shear strength, Energy absorption

1. 서 론

차량의 경량화와 충돌 안전성의 확보를 목적으로 알루미늄 합금과 초고강도강을 포함한 경량 소재의 차체 적용이 증가되고 있다¹⁻³⁾. 차량 경량화의 경우, 자동차 중량이 10% 감소할 경우 가속도 및 제동 성능이 향상되고 약 8%의 연비 향상 효과가 있으며, 그와 함께 배기가스 배출의 감소 효과가 있다고 보고되고 있다⁴⁾. 이와 같은 경량 소재의 장점 때문에, 후드, 테일 게이트

트 등의 차체 부품과 로어 암, 크로스 멤버와 같은 사시 부품으로의 알루미늄 합금의 적용이 증가되고 있다⁵⁾. 차량 경량화와 더불어 충돌 안전성의 확보를 위해, 기존 알루미늄 합금 대비 고강도의 알루미늄 합금의 개발 역시 활발히 이루어지고 있다. 특히, 알루미늄 합금은 마그네슘의 함량에 따라 소재의 강도가 달라지며, 일반적으로 마그네슘의 함량이 높을수록 강도가 높아진다^{6,7)}. 이와 관련하여 마그네슘의 함량 제어를 통한 고성능의 알루미늄 합금의 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 이러한 소재의 차체 부품으로의 적용을 위한 용

접 등의 제조 기술에 대한 연구가 필요한 상황이다.

5000/6000 계열의 알루미늄 합금을 포함한 차체용 알루미늄 합금의 저항 점용접성에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있다. Kim 등은 알루미늄 5052에 대해 용접 시간에 따른 저항 점용접성을 연구하였는데, 너트의 성장이 용접 초기에 끝나고 그 이후에는 차이가 없다는 결론을 내렸다⁸⁾. Abioye 등은 0.6mm 두께의 알루미늄 5052박판을 용접 전류, 용접 시간, 전극 지름의 세 변수로 저항 점용접 후 다구찌법을 사용해 최적 조건을 찾아내어 점용접성을 평가하였다. 그 결과, 용접 전류가 전단인장강도와 너트의 직경에 가장 큰 기여도를 갖는 결론을 내렸다⁹⁾. Li 등은 두께가 다른 3장의 알루미늄 5052 판재의 저항 점용접에서 너트의 성장을 연구하였으며, 이 연구에서는 두께가 얇은 시편 쪽에서 너트가 먼저 생성되었고 이후 너트가 합쳐지는 현상을 보고하였다¹⁰⁾. Luo 등은 알루미늄 5052의 저항 점용접 전 예열을 주어 날림 발생을 줄이고 너트의 직경과 전단인장강도를 높이는 등 저항 점용접성을 개선시켰다¹¹⁾. Jo 등은 알루미늄 6061에 대하여 radius형 전극으로 가압력에 따른 용접성을 평가하였으며, 가압력 5.9kN 조건에서 적정용접구간이 증가한다고 보고했다¹²⁾. Shah 등은 알루미늄 6061에 초음파를 적용시킨 저항 점용접성을 연구하였는데, 초음파를 적용한 저항 점용접의 적용을 통해 용접부의 기계적 강도, 연성, 강성 및 흡수 에너지를 향상시킬 수 있다는 결과를 도출하였다¹³⁾. Khan 등은 알루미늄 6061에 weld-bond와 저항 점용접을 동시에 적용하여 용접 특성을 분석하였으며, weld-bond와 저항 점용접을 적용한 경우에는 가압력이 높아지거나 일정 전류 이상의 용접 전류를 적용시킬 때 오히려 전단인장강도가 감소한다고 보고하였

다¹⁴⁾. 이처럼 5000/6000 계열 상용 알루미늄 합금에 대한 저항 점용접성에 관한 연구는 활발히 이루어지는 반면, 약 6wt.%의 마그네슘을 함유한 알루미늄 합금(Al-6Mg)에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 상황이다.

본 연구에서는 Al-6Mg의 저항 점용접성을 상용재 알루미늄 5052, 6061(Al5052, Al6061)과 비교하여 평가하였다. 적정 용접 구간을 구한 후 공정변수를 설정하였으며, 설정한 조건에서 너트 사이즈, 기공 면적비, 경도, 전단인장강도, 흡수에너지 등을 비교하였다. 동일 용접 조건에서 3개 소재에 인가되는 에너지는 동등하였으며, 이로 인해 너트의 직경 또한 크게 차이가 없었다. 기공 면적비는 Al-6Mg, Al5052는 유의미한 차이가 없었으며, Al6061이 높게 나타났다. 용접부의 경도 분포는 Al-6Mg가 가장 높게 나타났다. 전단인장강도와 흡수 에너지가 가장 높은 소재는 Al-6Mg였으며, Al6061의 전단인장강도와 흡수 에너지가 가장 낮게 나타났다. 이러한 상대적으로 높은 Al-6Mg의 전단인장강도와 흡수 에너지는 용접부의 낮은 기공 면적비와 높은 경도 분포로 인한 것으로 사료된다.

2. 실험 절차

본 연구에서는 1.5mm 두께의 Al-6Mg, Al5052, Al6061을 사용하였다. Al-6Mg의 경우 마그네슘의 조성이 6.76wt.%로 마그네슘 조성이 Al5052, Al6061보다 높았다. 소재의 화학적 조성, 기계적 물성은 Table 1, 2에 나타내었다. Al-6Mg의 모재 인장강도는 452MPa이고, 연신율은 9%이다. 시험편의 크기는 Fig. 1에 나타내며, KS B 0851에 따라 40×125mm

Table 1 Chemical composition of materials

Material	Chemical compositions (wt.%)								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al-6Mg	0.084	0.17	0.002	0.009	6.76	<0.001	0.013	0.004	Bal.
Al5052	0.139	0.253	0.028	0.003	2.357	0.171	0.012	-	Bal.
Al6061	0.614	0.475	0.244	0.107	0.099	0.099	0.151	0.028	Bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Material	Mechanical properties		
	Yeild strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Al-6Mg	389	452	9
Al5052	180	222	11
Al6061	275	330	10

Fig. 1 Schematic of test piece

Fig. 2 (a) Morphology, and (b) design of electrode

의 크기 가공한 시편으로 실험하였다.

용접 실험은 최대 용접 전류 50.0kA 출력의 MFDC 인버터 저항 점용접 전원과 최대 가압력 12.0kN까지 가능한 서보 건을 이용하여 진행하였다. 전극은 선단 반경 50mm(R50), 직경 20mm인 Radius형 Copper-Chromium-Zirconium 전극을 사용하였고, 외관은 Fig. 2에 나타내었다.

Table 3은 용접 조건을 보여준다. 용접은 용접 전류 16, 20, 24, 28, 32, 36kA로 진행하였으며, 용접 시간은 50, 83, 117ms로 진행하였다. 가압력은 4.9kN으로 고정하였다. 용접 전류는 DCflex70(PEM, Nottingham, UK)으로 측정하였고, 용접 전압은 전극단에

Table 3 Welding conditions

Item	Condition
Electrode force (kN)	4.9
Welding current (kA)	16, 20, 24, 28, 32, 36
Welding time (ms)	50, 83, 117

서 측정하였으며, 측정에는 NI-9229(National Instruments, Texas, USA)전압 측정 모듈을 사용하였다. 용접 전류는 0kA에서 70kA까지 측정할 수 있으며, 용접 전압은 -60V에서 60V까지 측정 가능하다. 용접 신호는 50kHz로 측정하여 0.5ms당 25개의 데이터를 사용하였다. 용접 중 전류, 전압 신호 측정을 토대로 날림 발생을 판단하였고, 너깃의 직경은 OLYMPUS SZ61-(OLYMPUS, Tokyo, Japan)을 사용해 광학 현미경으로 측정했다. 경도는 마이크로 비커스 경도를 사용하여 0.2kgf의 하중으로 측정하였으며, 0.5mm 간격으로 31타점 진행하여 너깃의 중심부를 기준으로 양쪽 7.5mm를 측정하였다. 인장 시험은 30kN 용량의 SHIMADZU AG-X(SHIMADZU, Kyoto, Japan)로 진행하였다. 용접부는 NaOH 수용액으로 에칭하였으며, 인장 속도는 5mm/min으로 설정하였고, 인장 시험은 3회 반복 시험 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접 특성 평가

3.1.1 적정 용접 구간

용접 구간은 Fig. 3에 나타내었다. 회색으로 표시한 부분은 KS B 0850 규격에 따른 B급 평균을 만족하지 못하는 범위이고, 빨간색으로 표시한 부분은 날림이 발생된 범위이다. 날림은 중간날림이 발생하였으며, 이는 너무 높은 일열로 인해 발생한 것으로 사료된다. 날림 발생은 Al-6Mg와 Al5052의 경우 32kA의 용접 전류에서 날림이 발생하였고, Al6061은 36kA에서 날림 발생하였다. Al-6Mg와 Al6061은 16kA의 용접 전류에서 용접되지 않았다. Al5052가 Al-6Mg, Al6062에 비해 다소 넓은 영역의 적정용접영역을 가지는 것으로 나타났다. 버튼 파단은 Al-6Mg의 경우 28kA, 83ms 조건과 날림이 발생한 조건에서 주로 발생하였으며, Al5052와 Al6061은 날림이 발생한 조건에서만 발생하였다.

3.1.2 용접 신호 분석

3가지 알루미늄 합금의 저항 점용접에서의 전기적인 특성을 분석하기 위해 용접 신호를 분석하였다. Fig. 3의 결과를 토대로 Al-6Mg의 날림 이전 용접 전류인 28kA를 공정변수로 설정하였다. 또한, 28kA의 용접 전류에서 83ms의 용접 시간 이후 큰 변화가 나타나지 않아 83ms의 용접 시간을 공정 변수로 설정하였다 그리고, 동저항과 전력은 Eq. 1, 2에 의해 계산되며, V는 전압(단위: V), I는 전류(단위: A), R은 동저항(단위: Ω), P는 전력(단위: W)이다

117 ms	Fracture shape	×
	Tensile shear strength	-	3.6 kN	6.5 kN	7.6 kN	6.8 kN
83 ms	Fracture shape	×
	Tensile shear strength	-	3.5 kN	5.4 kN	7.3 kN	6.9 kN
50 ms	Fracture shape	×
	Tensile shear strength	-	3.3 kN	4.5 kN	6.2 kN	6.5 kN
Time	Current	16 kA	20kA	24 kA	28 kA	32 kA

(a)

117 ms	Fracture shape					
	Tensile shear strength	2.2 kN	3.3 kN	4.2 kN	5.1 kN	5.7 kN
83 ms	Fracture shape					
	Tensile shear strength	2.1 kN	2.9 kN	3.9 kN	4.8 kN	5.6 kN
50 ms	Fracture shape					
	Tensile shear strength	1.7 kN	2.4 kN	3.4 kN	3.9 kN	4.7 kN
Time	Current	16 kA	20 kA	24 kA	28 kA	32 kA

(b)

117 ms	Fracture shape					
	Tensile shear strength	1.9 kN	2.8 kN	3.6 kN	4.1 kN	5.8 kN
83 ms	Fracture shape					
	Tensile shear strength	1.9 kN	2.7 kN	3.4 kN	4.1 kN	5.1 kN
50 ms	Fracture shape					
	Tensile shear strength	1.9 kN	2.4 kN	3.0 kN	3.7 kN	4.0 kN
Time	Current	20kA	24 kA	28 kA	32 kA	36 kA

(c)

Fig. 3 Weld lobe of (a) Al-6Mg, (b) Al5052, and (c) Al6061 with increasing welding time and current

$$R = \frac{V}{I} \quad (1)$$

$$P = V \times I \quad (2)$$

Fig. 4은 3개 소재의 동저항과 전력 파형을 보여준다. Al-6Mg와 Al6061의 경우 동저항의 파형이 급격히 증가한 후 점차 감소하는 것으로 나타났다. Al5052의 경우 급격히 증가 후 감소한 이후 일정한 수준의 동저항이 나타났다. 전력 파형은 Eq. 1, 2에서 알 수

있듯이, 정전류 용접 조건에서는 전류가 안정화된 이후에 동일한 형상을 가진다. 전력의 크기는 3개의 소재가 동일한 조건에서 동등 수준의 값을 가지는 것으로 분석되었다.

Fig. 5은 3개 소재의 조건별 인가된 에너지의 비교를 보여준다. 에너지는 Eq. 3에 의해 결정된다. E는 에너지(단위: J), t는 시간(단위: s)이다. 3개의 소재에 인가된 에너지를 비교한 결과 동일한 조건에서 용접 중 거의 동등한 에너지가 용접부에 인가되는 것으로 나타났다.

$$E = \int P dt \quad (3)$$

3.1.3 용접부 단면 분석

Fig. 6은 Al-6Mg, Al5052, Al6061의 단면을 나타낸다. 단면 분석 결과 동일 용접 조건에서 3개 소재 모두 비슷한 크기의 너깃이 형성되었다. 이는 Fig. 5의 결과와 같이, 동일 용접 조건에서 동등 수준의 에너지가 용접부에 인가되었기 때문으로 사료된다.

Fig. 7과 Table 4는 Al-6Mg, Al5052, Al6061의 너깃 단면에서의 기공 면적비를 측정된 결과를 보여준다. 본 연구에서 사용한 기공 면적비는 너깃 단면에서 전체 너깃 면적에 대한 기공의 면적의 비율이다. 3개 소재의 너깃 단면에 대하여 기공 면적비에 대하여 2-표본 t 검정(2 sample t test)을 실시한 결과, 신뢰 수준 95.0%에서 Al-6Mg와 Al5052의 기공 면적비는 유의미한 차이를 보이지 않았으며, Al6061의 기공 면적비는 Al-6Mg와 Al5052의 기공 면적비와 유의미한 차이를 보였다. 즉, Al-6Mg와 Al5052의 용접부 기공 면적비는 유사한 수준이었고, Al6061의 기공 면적비는 Al-6Mg와 Al5052보다 높은 값을 가지는 것으로 조사되었다.

3.2 용접부 물성 평가

3.2.1 경도 분석

3개 소재의 경도 측정 그래프는 Fig. 8에 나타내었다. 일반적으로 용접부의 경도가 높을수록 용접부의 전단인장강도가 증가하는 것으로 알려져 있다¹⁵⁾. 경도 측정은 28kA, 83ms 조건의 시편을 사용하였다. 모재 경도는 Al-6Mg가 약 135HV_{0.2} 수준으로 가장 높게 나타났다. Al5052는 약 75HV_{0.2}, Al6061은 약 120HV_{0.2} 수준으로 나타났다. 전단인장강도가 가장 높았던 Al-6Mg의 용접부 경도는 80HV_{0.2} 정도로 가장 높게 나타났다. 전단인장강도가 가장 낮은 Al6061의 용접부 경

Fig. 4 Dynamic resistance and power with welding time of (a) Al-6Mg in 28kA, 83ms, (b) Al-6Mg in 32kA, 83ms, (c) Al5052 in 28kA, 83ms, (d) Al5052 in 32kA, 83ms, (e) Al6061 in 28kA, 83ms, and (f) Al6061 in 36kA, 83ms

Fig. 5 Input energy with welding current

도는 $55HV_{0.2}$ 로 Al5052보다 약 $5HV_{0.2}$ 낮게 나타났으며, 모재 경도와 약 $65HV_{0.2}$ 의 차이가 났다.

3.2.2 전단인장강도 분석

Fig. 9는 3개 소재의 인장 시험 결과를 보여준다. 시험편의 조건은 28kA, 83ms이다. 최대 전단인장강도는 피크점을 통해 확인하였다. 최대 전단인장강도는 Al-6Mg가 7.3kN으로 가장 높게 나타났으며, 동일한 조건에서 Al5052보다 약 50%, Al6061보다 약 120% 높게 나타났다.

Fig. 10은 3개 소재의 흡수 에너지 비교를 나타내었다. 흡수 에너지는 내충격성과 관련이 있으며, 용접부

Fig. 6 Nugget of Al-6Mg, Al5052, and Al6061 with increasing welding current

Fig. 7 Porosity ratio of Al-6Mg, Al5052, and Al6061

Table 4 2 sample t test of porosity ratio

Material	Mean	Standard deviation	Standard error
Al-6Mg	0.422	0.285	0.14
Al5052	0.738	0.198	0.099
Al6061	1.986	0.385	0.19

강도의 지표로 알려져 있다¹⁶⁾. 흡수 에너지는 최대하중까지의 면적을 통해 구할 수 있고, 이는 Eq. 4에 나타내었다. $E_{absorption}$ 는 흡수 에너지(단위: J), d_{peak} 는 피크점에서의 위치(단위: m), P_{load} 는 하중(단위: N)이다. Al-6Mg의 흡수 에너지는 4.9J로 Al5051보다 약 40%, Al6061보다 약 150% 높게 나타났다.

$$E_{absorption} = \int_0^{d_{peak}} P_{load} dt \quad (4)$$

Fig. 11은 3개 소재의 너깃 직경 대비 전단인장강도를 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이, 동일 전류에서

Fig. 8 Hardness test line and hardness with distance of (a) Al-6Mg, (b) Al5052, and (c) Al6061

Fig. 9 Tensile shear strength with displacement of (a) Al-6Mg, (b) Al5052, and (c) Al6061 in 28kA, 83ms

Fig. 10 Comparison of energy absorption

Fig. 11 Tensile shear strength and nugget diameter with welding current of (a) Al-6Mg, (b) Al5052, and (c) Al6061

비슷한 너깃의 직경을 보였으나, 가장 우수한 전단인장 강도를 보인 Al-6Mg가 너깃 직경 대비 전단인장강도가 가장 높았으며, 가장 낮은 소재는 Al6061이었다. 앞서 언급한 바와 같이 Al6061 대비 Al-6Mg의 낮은 기공 면적비와 높은 경도가 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 사료되며, Al5052와 Al6061의 너깃 직경 대

비 전단인장강도의 차이 또한 경도와 기공 면적비의 차이에 의한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 마그네슘을 6wt.% 함유한 Al-6Mg와 상용재 Al5052, Al6061의 저항 점용접성을 비교, 평가하였다. 결론은 다음과 같다.

1) Al-6Mg의 용접 구간은 20kA부터 용접되어 32kA 조건에서 날림 발생하였고, Al5052는 16kA 부터 용접되어 32kA조건에서 날림이 발생하였다. Al6061은 20kA 부터 용접되어 36kA조건에서 날림이 발생하였다.

2) 동일 용접 조건에서 3개 소재의 용접 중 발생한 에너지는 동등한 수준이었으며, 이에 따라 너짓의 직경 또한 3개 소재 모두 크게 차이가 없었다. 기공 면적비는 Al-6Mg, Al5052가 동일한 수준으로 나타났으며, Al6061이 가장 높게 나타났다.

3) Al-6Mg는 모재 경도가 약 $130HV_{0.2}$ 수준으로 가장 높았으며, 용접부의 경도 또한 Al-6Mg가 약 $80HV_{0.2}$ 로 가장 높게 나타났다. 모재 경도가 가장 낮은 소재는 Al5052였으며, 용접부 경도가 가장 낮은 소재는 Al6061이었다. 모재와 용접부의 경도 차이는 Al6061이 가장 높았으며, Al5052가 가장 낮게 나타났다.

4) 전단인장강도는 Al-6Mg가 가장 높게 나타났으며, 용접부의 흡수 에너지 또한 가장 높게 나타났다. Al-6Mg의 최대 전단인장강도는 Al5052의 약 150%, Al6061의 약 220%였고, 흡수 에너지는 Al5052의 약 140%, Al6061의 약 250%로 나타났다. 이러한 Al-6Mg 용접부의 낮은 기공 면적비와 높은 경도 분포가 Al-6Mg 용접부의 상대적으로 높은 전단인장강도와 흡수 에너지를 유발한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “완전융합 동적변수 제어 스마트 용접시스템 모듈 개발(kitech EH-21-0003)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

ORCID: Mingyu Kim: <https://orcid.org/0000-0001-6351-0321>
 ORCID: Sehyeon Kim: <https://orcid.org/0000-0002-1261-4742>
 ORCID: Insung Hwang: <https://orcid.org/0000-0001-5572-8670>
 ORCID: Dong-Yoon Kim: <https://orcid.org/0000-0002-9147-9971>
 ORCID: Young-Min Kim: <https://orcid.org/0000-0003-3573-8753>
 ORCID: Seung Hwan Lee: <https://orcid.org/0000-0002-1509-3348>
 ORCID: Jiyoung Yu: <https://orcid.org/0000-0002-0494-9497>

References

1. H. S. Choi, B. M. Kim, D. H. Kim, and D. C. Ko, Application of Mechanical Trimming to Hot Stamped 22MnB5 Parts for Energy Saving, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 15 (6) (2014) 1087-1093.
<https://doi.org/10.1007/s12541-014-0441-7>
2. C. J. Lee, S. H. Lee, J. M. Lee, B. H. Kim, B. M. Kim, and D. C. Ko, Design of Hole-Clinching Process for Joining CFRP and Aluminum Alloy Sheet, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 15 (6) (2014) 1151-1157.
<https://doi.org/10.1007/s12541-014-0450-6>
3. N. Saunders, M. Miles, T. Hartman, Y. Hovanski, S. T. Hong, and R. Steel, Joint Strength in High Speed Friction Stir Spot Welded Dp 980 Steel, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 15 (5) (2014) 841-848.
<https://doi.org/10.1007/s12541-014-0407-9>
4. D. Carle and M. G. Blount, The suitability of aluminium as an alternative materials for car bodies, *Mater. Des.* 20 (1999) 267-272.
[https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(99\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(99)00003-5)
5. I. S. Chang, Y. J. Cho, H. S. Park, and D. Y. So, Importance of Fundamental Manufacturing Technology in the Automotive Industry and the State of the Art Welding and Joining Technology, *J. Weld. Join.* 33 (3) (2015) 12-18.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.21>
6. J. R. Davis, Aluminum and Aluminum Alloys, *ASM International*, (1993) 531-542
7. N. S. Kim, K. H. Choi, S. Y. Yang, S. H. Ha, Y. O. Yoon, B. H. Kim, H. K. Lim, S. K. Kim, and S. K. Hyun, Hot Compression Behavior of New Al-6Mg and Al-8Mg Alloy with Improved Hot Workability Fabricated by Direct Chill Casting Method, *Metals*. 11 (2) (2021) 288.
<https://doi.org/10.3390/met11020288>
8. G. C. Kim, Effect of Welding Time on Resistance Spot Weldability of Aluminum 5052 Alloy, *Met. Mater. Int.* 25 (1) (2019) 36-48.
<https://doi.org/10.1007/s12540-018-0179-3>
9. T. E. Abioye, N. M. Anas, M. K. Ifran, A. S. Anasyida, and H. Zuhailawati, Parametric Optimization for Resistance Spot-Welded Thin-Sheet Aluminium Alloy 5052-H32, *Arabian J. Sci. Eng.* 44 (9) (2019) 7617-7626.
<https://doi.org/10.1007/s13369-019-03869-9>
10. Y. Li, Z. Luo, Y. J. Chao, S. Ao, and X. Cui, Weld Growth Mechanisms and Failure Behavior of Three-Sheet Resistance Spot Welds Made of 5052 Aluminum Alloy, *J. Mater. Eng. Perf.* 24 (6) (2015) 2546-2555.
<https://doi.org/10.1007/s11665-015-1519-9>
11. Z. Luo, S. Ao, Y. J. Chao, X. Cui, Y. Li, and Y. Lin, Application of Pre-heating to Improve the Consistency and Quality in AA5052 Resistance Spot Welding, *J.*

- Mater. Eng. Perf.* 24 (10) (2015) 3881-3891.
<https://doi.org/10.1007/s11665-015-1074-x>
12. H. G. Jo, Y. M. Kim, M. J. Kang, and D. C. Kim, Effects of Electrode Face Radius and Force on Resistance Spot Weldability of Aluminium Alloy 6061, *J. Weld. Join.* 26 (6) (2018) 46-51.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.3.8>
 13. U. Shah, and X. Lin, Effects of Ultrasonic energy on the spot weldability of aluminum alloy AA6061, *Mater. Des.* 192 (2020) 108690.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108690>
 14. M. F. Khan, G. Sharma, and D. H. Dwivedi, Weld-bonding of 6061 aluminium alloy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 78 (5-8) (2015) 863-873.
<https://doi.org/10.1007/s00170-014-6670-1>
 15. H. Zhang and J. Senkara, Resistance welding: fundamentals and applications, *CRC press*, (2011) 107-228.
 16. H. Oikawa, G. Murayama, T. Sakiyama, Y. Takahashi, and T. Ishikawa, Resistance Spot Weldability of High Strength Steel (HSS) Sheets for Automobiles, *Nippon Steel Technical Report*, (95) (2007) 39-45.
<https://doi.org/10.1007/BF03266555>