



# 초음파 금속 용접에서 다층 배터리 셀 용접 공정에 적용되는 혼과 앤빌의 정렬 조건에 따른 용접성 평가

신 승 민\* · 김 동 철\*\*,†

\*한국모니터링시스템

\*\*한국생산기술연구원 집합적충연구부문

## Evaluation of Weldability based on Alignment Condition of Horns and Anvils used in Multilayered Battery Cell Welding Process in Ultrasonic Metal Welding

Seungmin Shin\* and Dongcheol Kim\*\*,†

\*Monisys Co., Ltd., 116, Seoul, 07293, Korea

\*\*Advanced Joining and Additive Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, 21999, Korea

†Corresponding author: dckim@kitech.re.kr

(Received July 19, 2021; Revised July 28, 2021; Accepted August 3, 2021)

### Abstract

A battery cell has a foil-to-tab structure that is connected with multi-layer foils and a tab, and it is important to secure the weld quality to improve the battery performance. Ultrasonic metal welding (UMW) is widely applied as a technology suitable for battery cell welding because it provides a relative low heat input to welds owing to solid-state welding. In this study, 40 layers of 8  $\mu\text{m}$  Cu foil and one layer of nickel-plated 0.2 mm Cu strip applied to a multilayered battery cell were used to evaluate the weldability of the materials for the UMW process. An experiment was conducted under four alignment conditions of a horn and an anvil to investigate the effect of the alignment on the weldability. The weld quality was classified based on the weld strength, discoloration, and failure mode of the test specimen to obtain a suitable welding range. The effect of the alignment condition on the deformation and weld shape was investigated by observing the cross-section of welds made under the four alignment conditions.

Key Words: Ultrasonic metal welding, Multi-layered battery cell, Tool horn, Anvil, Weld quality, Weld lobe, Deformation

## 1. 서 론

E-모빌리티 산업에서는 전기 자동차 수요가 급증하고 있다. 전기자동차의 보급을 위해 핵심 부품인 배터리의 성능을 높이기 위한 기술 개발에 집중되어 있고, 리튬 이온 기술이 적용된 배터리 성능은 높은 에너지 밀도와 관련되어 있다<sup>1)</sup>. 배터리 설계는 단일 셀이 모듈로 결합되어 있는 구조로 되어 있으며, 모듈이 스택되어 배터리 팩을 형성한다<sup>1)</sup>. 배터리 셀은 다층의 포

일(foil)과 탭(tab)이 연결되는 구조로 되어있다. 이러한 포일과 탭 용접은 배터리의 성능과 효율성 향상을 위해 양호한 용접 품질을 확보하는 것이 중요하다. 따라서 양호한 포일과 탭 용접 품질을 만족하는 적합한 용접 공정 기술이 필요하다. 이에 초음파 금속 용접 (ultrasonic metal welding)은 고주파의 초음파 에너지를 사용하는 고상 용접으로 다층 용접과 이종 소재 접합에 용이하며, 용접부의 입열이 적기 때문에 배터리 셀 용접에 적합한 기술로 많이 적용되고 있다<sup>3-5)</sup>. 배터리 셀은 소재 조합에 따라 혼(horn)과 앤빌(anvil)의

형상을 설계하기 때문에 초음파 금속 용접 공정에서 용접 품질에 대한 지침이 아직까지 정립되어 있지 않다.

선행 연구로 초음파 금속 용접에서 배터리 셀 소재를 이용한 다층 접합 방식으로 용접 특성 및 현상 등을 연구한 사례가 있다<sup>6-8)</sup>. 또한, 구리 소재를 이용하여 통계적 기법으로 용접 강도와 변수들의 관계를 분석한 연구가 수행되었다<sup>9)</sup>. K. Arimoto et al. 등은 C-형 혼을 사용하여 구리 포일과 니켈도금 구리 조합에서 용접부 접합 형성을 거시적 관점에서 미세 조직과 변형에 미치는 영향을 조사하였다<sup>10)</sup>. 그러나 다수의 선행 연구에도 불구하고, 최근 개발되고 있는 고밀도 다층 배터리의 셀 용접에 대한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구는 초음파 용접 공정에서 다층 배터리 셀 용접에 적용되는 두께 8 $\mu$ m 구리 포일 40겹과 두께 0.2mm 니켈도금 구리 스트립 소재를 이용하여 용접을 진행하였다. 혼과 앤빌의 정렬 조건을 4개 수준으로 구분하여 이에 따른 용접성 평가를 위한 실험을 수행하였다. 또한, 실험영역 내 4개의 정렬 조건에서 용접 품질을 분류하여 용접 로브 영역을 도출하였고, 이에 따른 단면을 분석하여 정렬 조건에 따라 용접부에서 변형되는 형상과 영역을 관찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 초음파 용접 구조

본 연구의 실험에 사용된 용접기는 주파수가 20 kHz에 3 kW의 출력 사양을 가지며, 구조는 Fig. 1과 같다. 60 Hz의 전원이 전원부/컨트롤러에 인가되면, 전원부에서 이 AC 전원을 고주파 전기 에너지로 변환시킨 후 진동자를 이용해 고주파 기계적 진동에너지로 변환한다. 컨버터(converter)를 통한 고주파 전기 신호는 동일 주파수의 기계적 진동 신호로 변환 되고, 부스터(booster)에 의해 기계적 진동 신호가 증폭되어 혼을 통해 용접 소재에 전달된다. 전달된 용접 소재는 20 kHz의 초음파 진동 에너지에 의한 마찰열을 발생시켜 용접부를 생성하게 된다.

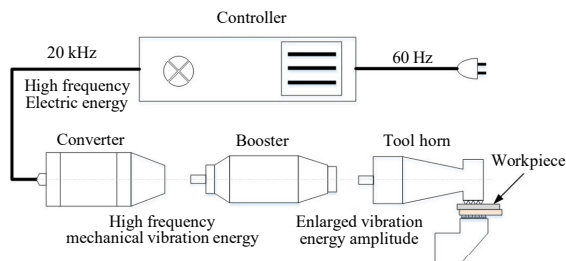


Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic welding systems

### 2.2 소재 및 실험 조건

실험에 사용된 소재는 배터리 셀에 적용되는 8 $\mu$ m 두께의 순도 99.99 (wt.%) 구리 포일과 0.2mm 두께의 니켈도금 구리 스트립을 사용하였다. 시편은 길이 50mm와 폭 20mm로 Fig. 2(a)와 같이 가공하였다. 용접 방식은 Fig. 2(b)와 같이, 하판에는 두께 0.2 mm 니켈도금 구리판 1매를 배치하고, 상판에는 구리 포일을 40겹으로 겹치는 방식으로 배치하여 용접 실험을 수행하였다.

실험에 사용된 혼과 앤빌은 40겹의 다층 구리 포일과 니켈도금 구리 스트립의 안정적인 용접을 위해 Fig. 3(a), (b)와 같은 형상으로 설계하여 실험을 수행하였다.

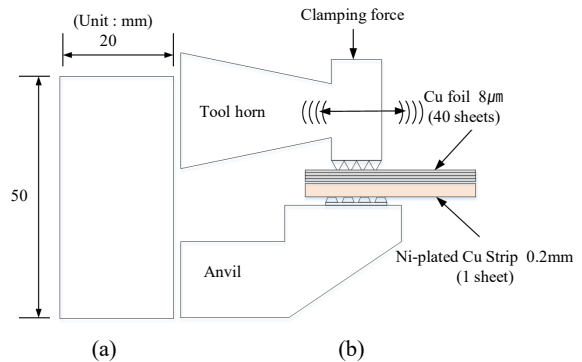


Fig. 2 (a) Test sheet size and (b) joint type used in the experiment

Table 1 Factor and levels for experimental design

Factor	Levels
Welding time (s)	0.3, 0.5, 0.7, 0.9
Amplitude ( $\mu$ m)	50
Welding pressure (bar)	1, 2, 3, 4

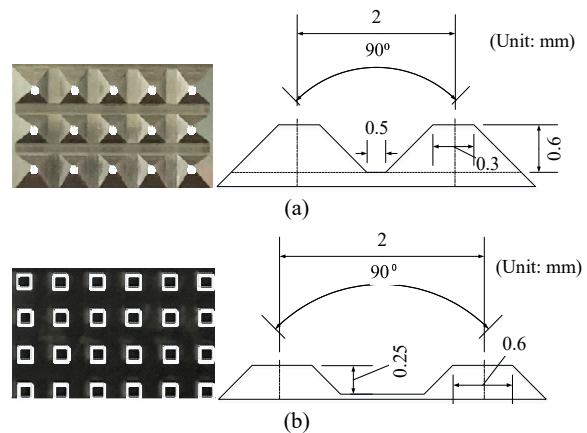
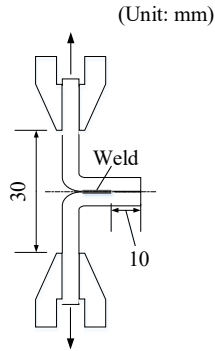


Fig. 3 The shape and dimensions of the (a) tool horn and (b) anvil used in the experiment



**Fig. 4** Schematic diagram of T-peel test method for weld performance evaluation

실험 조건은 Table 1과 같이 용접 시간과 진폭, 가압력을 입력 변수로 선택하였고, 수준은 용접 시간 4수준, 진폭 1수준, 가압력 4수준으로 실험을 수행하였다. 완전 요인 설계를 사용하여 16개의 실험 조건에서 3회 반복 실험하였다.

용접 평가는 500N 로드 셀의 인장 시험기를 사용하여 T-peel test로 기계적 강도를 평가하였다. Fig. 4과 같은 방식으로 당기는 속도는 50mm/min로 선택하였고, T-peel test 중 최대 하중을 용접 성능의 척도로 사용하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 용접 품질 분류

초음파 용접 공정에서 배터리 셀 접합은 소재 조합에 따라 혼과 앤빌의 형상을 재설계 하기 때문에 그에 따른 용접 특성과 품질이 다르게 형성되어 이에 대한 지침이 정립되어 있지 않다. 본 연구에서는 소재 조합과 시편 크기를 고려하여, 실험 영역 내에서 용접 품질에 대한 기준을 Table 2에 요약하여 나타내었다.

Table 2에서 부족 용접(under weld)은 용접 강도가 40N 이하이며, 구리 포일이 용접부에 니켈도금 구리 스트립 소재와 접합되지 않는 계면 파단 형태와 부분 계면 파단 양상을 보인다. 적정 용접(good weld)은 용접 강도가 40N 이상이고, 구리 포일이 용접부에 니켈도금 구리 스트립 소재와 혼과 접합된 용접 하단부가 물결 모양으로 뜯겨지는 양상을 보여 양호한 용접 상태를 보여준다. 과 용접(Over weld)은 용접 강도가 40N 이하 또는 이상으로 일정하지 않으며, 용접부의 구리 포일이 변색되는 양상, 용접부 하단이 끊어지는 양상 및 버튼 파단 형태 등으로 파단 양상이 일정하지 않고 다양하게 나타난다.

**Table 2** Weld quality classification based on within the experimental domain<sup>3)</sup>

Description	Load (N)	Discoloration	Failure mode	Fracture appearance
Under weld	<40	x	Interfacial	
			Partial interfacial	
			Fully adhered circumference fracture with tearing	
Good weld	40<	x	Fully adhered with tearing	
Over weld	40<	O	Fully adhered with tearing	
	<40 or 40<	O	Fully adhered circumference fracture with tearing	
	40<	O	Button	

#### 3.2 혼과 앤빌의 정렬 조건에 따른 용접성 평가

실험 영역 내에서 Table 2와 같은 용접 품질 기준을 기반으로 혼과 앤빌이 맞물리는 위치에 따른 용접성을 평가하기 위해 실험을 수행하였다. 용접 로브 영역을 구분하기 위한 강도 기준은 3회 반복 실험하여 획득한 강도 값을 평균으로 하였다.

Table 3에 혼이 앤빌과 맞물리는 위치를 4개의 수준으로 나타내었다. 혼의 진동이 움직이는 방향은 y 축 방향이다.

Fig. 5는 Table 3 혼/앤빌 정렬 조건 1은 혼과 앤빌이 맞닿아서 위치해 있을 때 용접 로브 영역을 나타낸 것이다.

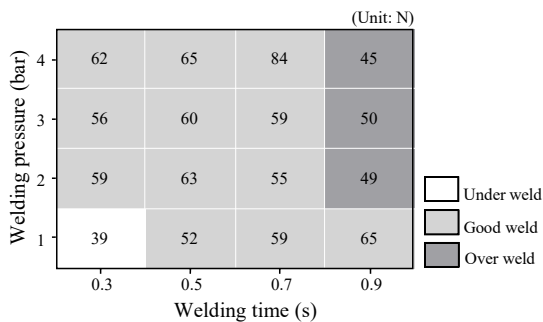
혼/앤빌 정렬 조건 1에서 부족 용접 영역은 용접 시간 0.3s 기준 가압력 1bar 조건에서만 나타난 것을 확인할 수 있다. 적정 용접 영역은 용접 시간 0.9s 기준 가압력 2~4bar 조건의 과 용접 영역을 제외한 나머지 조건에서 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Table 3 혼/앤빌 정렬 조건 2에서 혼이 x축 방향으로 앤빌과 앤빌 사이에 위치해 있을 때 용접 로브 영역을 나타낸 것이다.

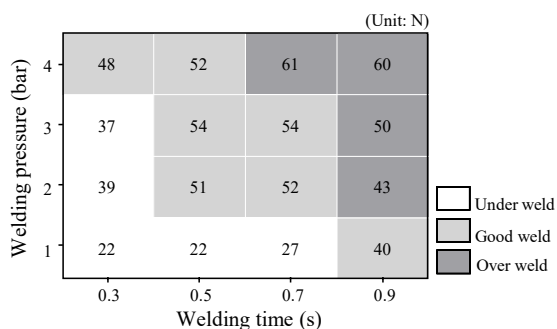
혼/앤빌 정렬 조건 2에서 부족 용접 영역은 용접 시

**Table 3** Shape by the relative position of the tool horn and anvil

Alignment Condition	Position	Front	side
1			
2			
3			
4			

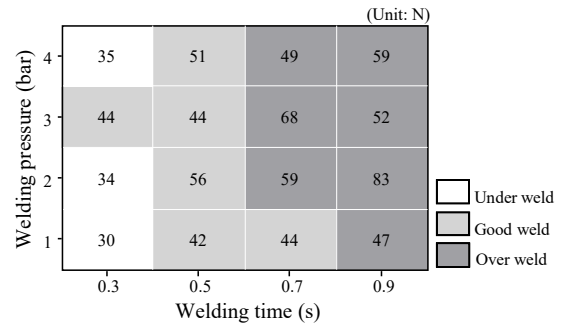


**Fig. 5** Weld lobe for alignment condition 1

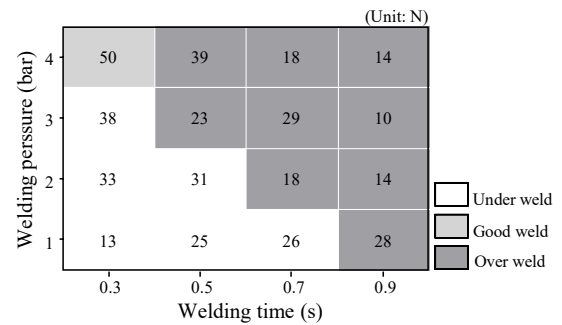


**Fig. 6** Weld lobe for alignment condition 2

간 0.3s 기준 가압력 1~3bar와 가압력 1bar 기준 용접 시간 0.5s, 0.7s 조건에서 나타난 것을 확인할 수 있다. 과 용접 영역은 용접 시간 0.9s 기준 가압력 2~4bar와 용접 시간 0.7s 기준 가압력 4bar 조건에



**Fig. 7** Weld lobe for alignment condition 3



**Fig. 8** Weld lobe for alignment condition 4

서 발생하며 적정 용접 영역은 부족 용접 및 과 용접 영역을 제외한 나머지 조건에서 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Table 3 혼/앤빌 정렬 조건 3에서 혼이 x 축 방향으로 앤빌과 앤빌 사이와 y 축 방향으로 앤빌과 앤빌 사이에 위치해 있을 때 용접 로브 영역을 나타낸 것이다.

혼/앤빌 정렬 조건 3에서 부족 용접 영역은 용접 시간 0.3s 기준 가압력 1bar, 2bar, 4bar 조건에서 나타난 것을 확인할 수 있다. 적정 용접 영역은 용접 시간 0.7s 기준 가압력 2~4bar와 용접 시간 0.9s 기준 가압력 1~4bar 조건의 과 용접 영역을 제외한 나머지 조건에서 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 Table 3 혼/앤빌 정렬 조건 4에서 혼이 y 축 방향으로 앤빌과 앤빌 사이에 위치해 있을 때 용접 로브 영역을 나타낸 것이다.

혼/앤빌 정렬 조건 4에서 부족 용접 영역은 용접 시간 0.3s 기준 가압력 1bar, 2bar, 3bar와 0.5s 기준 가압력 1bar, 2bar, 0.7s 기준 가압력 1bar 조건에서 나타난 것을 확인할 수 있다. 적정 용접 영역은 용접 시간 0.3s 기준 4bar 조건에서만 나타난 것을 확인할 수 있다. 나머지 조건은 과 용접 영역으로 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 혼/앤빌 정렬 조건 4의 과 용접 영역에서 강도 값이 40N 보다 낮은 것은 용



접부가 하단에서 끊어졌기 때문이다. 이는 혼이 용접 시 앤빌에 접촉되면서 용접부 하단에 영향을 미친 것으로 판단된다.

4개 혼/앤빌 정렬 조건의 용접 로브 영역을 비교한 결과 혼/앤빌 정렬 조건 4 → 3 → 2 → 1 순으로 적정 용접 영역이 넓게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 본 실험 영역 내에서 혼과 앤빌이 맞물리는 위치에 따른 용접성은 혼/앤빌 정렬 조건 1 위치일 때 적정 용접 영역이 가장 넓게 형성되었다. 또한 양호한 용접 영역의 평균 용접부 강도도 혼/앤빌 정렬 조건 1에서 가장 높은 값을 나타내었다.

### 3.3 혼과 앤빌의 정렬 조건에 따른 단면 분석

Table 4와 같이 혼과 앤빌의 정렬 조건에서 용접부가 변형되는 유형을 모식도로 나타내었다. 이를 Table 5와 같이 정렬 조건에 따른 단면 형상에 Table 4의 변형 유형을 표시하였고, 강도 값과 비교하여 나타내었다.

정렬 조건에 따라서 용접부가 변형되는 영역을 관찰하기 위해 동일한 용접 조건으로(용접시간 0.5s, 진폭 50 $\mu$ m, 가압력 2bar) 실험하여 나타낸 것이다. 혼/앤빌 정렬 조건 1은 혼과 앤빌의 날이 용접 시 동시에 영향을 받아 용접부가 형성되어 있는 것을 보여준다. 이는 용접 시 앤빌의 날 형상에서 변형되는 영역(Deformation 2)과 혼의 날 형상에서 변형되는(Deformation 1) 방향으로 전체가 변형되어 용접부가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 혼/앤빌 정렬 조건 1의 용접부는 상대적으로 다른 혼/앤빌 정렬 조건의 용접부 보다 얇게 형성되지만, 혼과 앤빌 사이에서 변형되어 용접에 영향을 미치는 영역이 넓기 때문에 용접 강도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 혼/앤빌 정렬 조건 2는 앤빌의 날에서

**Table 4** Weld deformation type

Type	Deformation
1	
2	
3	
4	

**Table 5** Cross-section shape according to 4 alignment conditions

Alignment condition	Cross-section	Load (N)
1		60
2		65
3		55
4		32

용접 시 일부 변형 되어 용접부의 영역이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 용접 시 앤빌의 날 형상에서 변형되는 영역(Deformation 3)과 혼의 날 형상에서 변형되는(Deformation 1) 영역이 용접되어 용접부가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 혼/앤빌 정렬 조건 2의 용접부는 혼과 앤빌 사이에서 용접에 영향을 미치는 영역이 혼/앤빌 정렬 조건 3과 4보다 넓기 때문에 용접 강도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 혼/앤빌 정렬 조건 3은 앤빌의 날 형상에서 용접 시 변형되는 영역이 존재하지 않은 상태에서 용접부 영역이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 용접 시 혼의 날 형상에서 변형되는(Deformation 4) 방향으로만 용접부가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 용접 시 혼의 날 형상에서만 변형되는 영역이 존재하기 때문에 상대적으로 혼/앤빌 정렬 조건 1, 2보다 변형 되어 용접되는 영역이 좁아 용접 강도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 혼/앤빌 정렬 조건 4는 혼/앤빌 정렬 조건 3과 동일하게 앤빌의 날 형상에서는 변형되는 영역이 존재하지 않은 상태에서 용접부 영역이 형성되어 있는

것을 확인할 수 있다. 이는 혼/앤빌 정렬 조건 3과 마찬가지로 용접 시 혼의 널 형상에서만 변형되는(Deformation 4) 영역이 존재하기 때문에 상대적으로 혼/앤빌 정렬 조건 1, 2보다 변형되어 용접되는 영역이 좁아 용접 강도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, 다른 혼/앤빌 정렬 조건보다 강도가 낮은 것은 혼과 앤빌의 정렬 조건이 혼에서 진동이 작용하는 방향으로 앤빌이 위치해 있기 때문에, 용접 시 혼이 앤빌에 닿아 용접부가 제대로 형성되지 않고 하단부에서 구리 포일이 끊어지는 파단 양상이 발생하여 용접 강도가 낮게 형성되는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 초음파 용접 공정에서 리튬이온배터리 셀 용접에 적용되는 구리 포일 두께 8 $\mu$ m (40 sheets) 과 니켈도금 구리 스트립 두께 0.2mm (1 sheet) 소재를 이용하여 실험 영역 내에서 용접 품질을 분류하였고, 혼과 앤빌의 정렬 조건에 따른 용접성을 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초음파 용접 공정에서는 혼과 앤빌의 정렬 조건에 따라 용접성에 영향을 미친다는 것을 비교 실험을 통해 입증하였다. 4개의 정렬 조건에 대해 용접성을 평가하였고, 그 결과 정렬 조건 1이 가장 넓은 적정 용접 로브 영역을 가지며 양호한 용접부를 확보하는데 유리하다는 것을 비교 실험을 통해 입증하였다.

2) 혼과 앤빌의 정렬 조건에 따른 4개 정렬 조건을 단면 분석하여 용접부의 변형 영역을 관찰하였다. 그 결과, 앤빌의 널 형상에서 변형되는 영역이 넓을수록 용접 강도 확보에 유리하다는 것을 관찰하였다.

본 논문은 다층 포일과 탭 구조의 배터리 셀 소재 용접의 기초 연구로써, 얻어진 연구 결과는 양산라인에서 안정적인 용접을 확보하기 위한 기술 개발에 효과적으로 활용이 가능하다.

#### 감사의 글

본 연구는 2019년도 중소 벤처기업부의 기술 개발사업 지원에 의한 연구임 (S2798672)

ORCID: Seungmin Shin: <https://orcid.org/0000-0002-8348-3671>

ORCID: Dongcheol Kim: <https://orcid.org/0000-0001-6667-2094>

#### References

1. S. Chu and A. Majumdar, Opportunities and challenges for a sustainable energy future, *Nat.* 488 (2012) 294-303. <https://doi.org/10.1038/nature11475>
2. S. S. Lee, T. H. kim, S. J. Hu, W. Cai, and J. A. Abell, Joining Technologies for Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing: A Review, *ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC), Erie, PA.* (2010) 541-549. <https://doi.org/10.1115/MSEC2010-34168>
3. T. H. Kim, J. Yum, S. J. Hu, J. P. Spicer, and J. A. Abell, Process Robustness of Single Lap Ultrasonic Welding of Thin, Dissimilar Materials, *CIRP Ann.* 60(1) (2011) 17-20. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.016>
4. A. Das, D. Li, D. Williams, and D. Greenwood, Weldability, and Shear Strength Feasibility Study for Automotive Electric Vehicle Battery Tab Interconnects, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 41 (2019) 54. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1542-5>
5. M. J. Kang, W. S. Choi, and S. H. kang, Ultrasonic and Laser Welding Technologies on Al/Cu Dissimilar Materials for the Lithium-Ion Battery Cell or Module Manufacturing, *J. Weld. Join.* 37(2) (2019) 52-59. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.2.8>
6. L. Ying, C. Haseung, C. Wayne, R. Teresa, S. J. Hu, K. Elijah, and J. Abell, Joint Formation in Multilayered Ultrasonic Welding of Ni-Coated Cu and the Effect of Preheating, *J. Manuf. Sci. Eng.* 140 (2018) 111003. <https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6328>
7. A. Das, A. Barai, I. Masters, and D. Williams, Comparison of Tab-To-Busbar Ultrasonic Joints for Electric Vehicle Li-Ion Battery Applications, *World Electr. Veh. J.* 10 (2019) 55. <https://doi.org/10.3390/wevj10030055>
8. M. J. Kang, and K. H. Lee, Influence of Welding Variables on Indentation Depth in Ultrasonically Welded Al/Cu Dissimilar Joints and Theoretical Fracture Load Estimation, *J. Weld. Join.* 38(3) (2020) 289-294. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2020.38.3.8>
9. S. Elangovan, K. Prakasan, and V. Jaiganesh, Optimization of Ultrasonic Welding Parameters for Copper to Copper Joints Using Design of Experiments, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 51 (2010) 163-171. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2627-1>
10. K. Arimoto, T. Sasaki, Y. Doi, and T. Kim, Ultrasonic Bonding of Multi-Layered Foil Using a Cylindrical Surface Tool. *Met.* 9 (2019) 505. <https://doi.org/10.3390/met9050505>