Ti 합금과 철강의 이종재료 접합공정 특성 리뷰

유현정* · 이태현* · 강민정* · 김철희***,†

*한국생산기술연구원 접합적층연구부문

**포틀랜드주립대학 기계재료공학과

Process Review on Dissimilar Metal Joining of Steel and Ti Alloys

Hyeonjeong You*, Taehyun Lee*, Minjung Kang*, and Cheolhee Kim*,***,†

*Advanced Joining & Additive Manufacturing R&D Department, KITECH, Incheon, 21999, Korea

**Department of Mechanical and Materials Engineering, Portland State University, OR 97229, USA

†Corresponding author: chkim@kitech.re.kr

(Received August 2, 2021; Revised September 24, 2021; Accepted November 1, 2021)

Abstract

Titanium alloys have high specific strength and excellent high-temperature properties. However, Ti alloys have limited weldability with other metals due to the formation of brittle intermetallic compounds. Moreover, when steel is a counterpart of dissimilar metal joining, the soundness of weld is hardly achieved due to weld defects. Numerous studies have been conducted to achieve joint strength by minimizing the effects of Fe-Ti intermetallic compounds. In most studies, pure titanium or Ti-6Al-4V alloy were selected as the Ti base metal, whereas stainless steel, low carbon steel, or alloy steel were selected as the steel base metal. To date, joining processes such as diffusion bonding, brazing, fusion welding, and solid-state joining have been investigated. In this study, the characteristics of each of these joining processes were reviewed. More specifically, the formation of intermetallic compounds was analyzed when Ti alloy and steel were directly joined without using interlayer materials.

Key Words: Titanium alloy, Steel, Dissimilar metal welding, Diffusion welding, Brazing, Solid state welding, Fusion welding, Intermetallic compound

1. 서 론

Ti 합금은 비강도와 내식성이 우수하여 항공부품, 발전/화학 플랜트 등 주요 구조부품 뿐 아니라 형상기억 합금, 패션 용품 등에 사용되고 있다¹⁾. Ti 합금은 고온에서 산소와의 반응성이 높아 진공 중에서 공정이 이루어지는 전자빔 용접이나 충분한 보호가스 분위기 하에서 레이저 용접이나 아크 용접공정을 이용하여 용접하고 있으며²⁾, 대표적으로 α 형 합금인 순수 Ti 금속과 $\alpha+\beta$ 형 합금인 Ti-6Al-4V 합금이 용접구조에 주로 이용되고 있다

Ti 합금의 사용이 증가함에 따라 Ti 합금과 철계 소재의 이종재료 접합에 대한 관심이 높아지고 있다. 그

러나 Fig. 1의 상태도에서 확인할 수 있듯이 FeTi, Fe₂Ti 등 취성이 강한 금속간 화합물(Intermetallic

Fig. 1 Ti-Fe binary Phase diagram^{3,4)}

Table 1 The thermal and mechanical properties of STS 304 and Ti-6Al-4V alloy⁵⁾

	STS 304	Ti-6Al-4V*
Melting temperature (°C)	1400-1455	1636-1660
Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ /K)	17.3-18.7	9-9.7
Thermal conductivity (W/m·K)	16.2-21.5	6.6-17.5
Density (g/cm ³)	8.00	4.42
Tensile strength (MPa)	505	985
Elongation (%)	70	15

compound, IMC)이 형성되는 문제점이 있다^{3,4)}. 또한 Table 1의 물리적·기계적 특성을 확인해 보았을 때 두 모재간의 열적 특성이 크게 차이 나기 때문에 전통적 용융용접을 할 경우 양측 모재에 열 변형과 용접 후 계면에서 잔류 응력이 발생하게 된다^{5,6)}. 이로 인해 접합 부에서 균열이 발생하기 때문에, Ti 합금과 철계 소재의 이종재료 접합에는 브레이징, 확산접합이나 마찰용접, 폭발용접과 같은 고상용접이나 고에너지/저입열 용접 등이 적용되고 있다⁷⁾.

본 논문에서는 기존 연구결과를 확산접합, 브레이징, 용융용접 외 고상접합으로 나누어 기존 발표되는 공정의 특성을 리뷰하고 특히 중간층 없이 Ti 합금과 Fe계 소재가 용접될 경우의 IMC 거동에 대해 고찰하고자 한다.

2. 확산접합

확산접합은 Fig. 2와 같이 접합면을 가압하면서 가열하여 접합면 사이에서 서로간의 원자 확산이 발생하고, 이를 통해 접촉된 표면이 접합되는 방법으로, (a) 접촉상태, (b) 고온크립, (c) 입계 및 보이드 소멸, (d) 체확산 보드 소실 과정으로 진행된다⁸⁾. 확산접합은 크게 중간 삽입재를 사용한 경우와 사용하지 않는 경우로 나눌 수 있는데 각 경우에 대해서 소개하고자 한다 (Table 2).

Fig. 2 Schematic of diffusion bonding process⁸⁾

Ghosh et al.⁹⁻¹¹⁾은 중간 삽입재 없이 순 Ti 금속과 STS 304 소재의 확산접합 온도(800-950 °C)와 시간(1-2 hr)에 따른 접합부의 강도와 계면에 형성되는 IMC 거동을 관찰하였다. 접합 시간과 관계없이 850 °C에서 가장 높은 인장 강도를 가졌으며, 온도가 증가함에 따라 강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 접합부에서 σ 상, FeTi, Fe₂Ti, Fe₂Ti₄O 등의 IMC가 관찰되었다.

Kundu et al.은 순 Ti 금속과 석출경화형 17-4 PH STS 소재¹²⁾ (850-950 °C, 2 hr) 또는 오스테나이트-페라이트 구조로 이루어진 듀플렉스 STS 소재¹³⁾ (800-950 °C, 1.5 hr)를 각각 중간 삽입재 없이 확산접합하였다. 17-4 PH STS 소재와의 이종접합부에서는 σ 상, Fe₂Ti, FeTi, Cr₂Ti, χ , α -Fe, α -Ti와 β -Ti가 관찰되었으며, 듀플렉스 STS 소재와의 이종접합부에서는 α -Fe+ λ , λ +FeTi, FeTi+ β -Ti와 β -Ti 상이 관찰되었다.

Kaya et al.¹⁴⁾은 Ti-6Al-4V 합금과 IF 강재를 중간 삽입재 없이 900 °C와 950 °C에서 30분 동안 확산접합하였다. 확산접합 온도가 증가함에 따라 IMC 결정립 성장으로 인해 부피 분율이 증가하고, 취성이 커지기 때문에 강도가 감소하는 경향을 나타내었다.

중간 삽입재를 사용하지 않은 경우 고온에서 Ti이 화학적으로 잘 반응하기 때문에 Ti과 스테인리스강 계면의 반응 구역에서 σ , χ , λ FeTi, Fe₂Ti, β -Ti 및 Fe₂Ti₄O상 등 취성의 금속간 화합물이 형성되며, 접합부의 기계적 특성을 저하시켰다. 따라서 접합 품질을 향상시키기 위해 중간 삽입재로 Cu, Ag, Ni 등 여러 합금을 사용한 결과가 보고되고 있다.

Kundu et al.은 순 Ti 금속과 STS 304 소재에 중간 삽입재로 300 μ m 두께를 가지는 Cu¹⁵⁾ (850-950 °C, 1.5 hr) 및 Ni¹⁶⁾ (800-950 °C, 3 hr)를 사용하였다. Cu를 중간 삽입재로 사용한 경우 최적조건인 900 °C에서 318 MPa의 최대 인장강도를 나타냈다. 상대적으로 낮은 850 °C에서는 낮은 접합온도로 인해 불완전한 유착이 발생하였고, 950 °C에서는 온도가 증가함에 따라 취성 금속간 화합물의 부피분율이 증가하여 강도가 감소했다. 중간 삽입재로 Ni를 사용한 경우 850 °C에서 Ti이 STS 쪽으로 확산되는 것을 Ni 중간층이 완전히 차단하여 270 MPa의 최대 인장강도를 나타내었으며, 900 °C 이상에서는 확산을 차단하지 못하기 때문에 강도가 감소했다. 또 다른 소재 조합으로는 Ti-6Al-4V 합금과 17-4 PH STS 소재에 대해 150 μ m 두께의 Ni 합금을 사용하여 확산접합한 연구결과가 있

Table 2 Summary of diffusion bonding research for Ti/Steel dissimilar metal joining

Ti	Steel	Interlayer	Process temp. (°C)	Process time (h)	Author, publication year
Pure Ti	STS 304		850-900	1	Ghosh, 2002 ⁹⁾
Pure Ti	STS 304		850-950	2	Ghosh, 2003 ¹⁰⁾
Pure Ti	STS 304		800-950	1.5	Ghosh, 2003 ¹¹⁾
Pure Ti	17-4 PH STS		850-950	2	Kundu 2006 ¹²⁾
Pure Ti	micro-duplex STS		800-950	1.5	Kundu, 2008 ¹³⁾
Ti-6Al-4V	IF steel		900, 950	0.5	Kaya, 2017 ¹⁴⁾
Pure Ti	STS 304	Cu	850-950	1.5	Kundu, 2005 ¹⁵⁾
Pure Ti	STS 304	Ni	800-950	3	Kundu, 2008 ¹⁶⁾
Ti-6Al-4V	17-4PH	Ni alloy	800-900	0.75	Kundu, 2013 ¹⁷⁾
Ti-6Al-4V	STS 321	AlMg6	350-600	Not given	He, 2008 ¹⁸⁾
Pure Ti	Low carbon steel	Cu-12Mn-2Ni	800, 850	0.5-3	Elrafaey, 2009 ¹⁹⁾

다¹⁷⁾. 접합 조건은 800~900 °C까지 25 °C 간격의 온도에 대해서 45분, 900 °C에서 5, 15, 30, 45분에 대해 총 8가지 조건으로 진행했다. 온도와 시간에 따른 경향을 확인해본 결과 온도가 증가할수록 IMC 길이가 증가하고, 시간이 증가함에 따라 중간층인 Ni 합금이 Ti 확산을 차단하지 못하는 것이 확인되었다.

He et al.¹⁸⁾은 Ti-6Al-4V 합금과 STS 321 소재에 대해 중간 삽입재로 500 μm 두께의 Al 합금을 사용했다. 350~500 °C 온도 범위에 대해 접합 경향을 확인했으며, 450 °C에서 IMC가 거의 형성되지 않은 접합부를 형성하며 최대 인장강도를 나타내었다. 확산 시간이 증가하면 STS/Al 계면에 IMC 형성으로 인해 강도가 저하되었다.

Elrafaey et al.¹⁹⁾은 순 Ti 금속과 저탄소강에 대해 중간 삽입재로 Cu-12Mn-2Ni를 사용하였다. Ti-Fe IMC나 Ti-C IMC는 형성되지 않았으며, 보다 취성이 낮은 Ti_2Cu 나 TiCu 와 같은 Cu-Ti IMC가 형성되어 안정된 강도 확보가 가능하였다고 보고하였다.

3. 브레이징

브레이징은 Fig. 3과 같이 접합하고자 하는 두 모재 사이에 450 °C 이상의 융점을 가지는 용가재를 삽입하고 모재의 고상선 온도 이하의 열을 가하면서 용가재만 용융시켜, 두 모재 사이에 젖음 현상과 모세관 현상에 의해 침투 및 확산을 통해 접합하는 방법이다⁸⁾. 브레이징을 적용한 Ti 합금과 철계 소재의 이종재료 접합 연구는 Table 3에 요약하였다.

Camargo et al.²⁰⁾은 순 Ti 금속과 STS 304 소재

Fig. 3 Schematic of brazing process⁸⁾

에 20 μm 두께의 Ag-Cu 삽입재를 넣어 접합했다. 삽입재의 Cu 함량에 따라 접합부 특성을 확인해본 결과 함량이 증가하면 삽입재 내 Ti 함량이 증가하여 Ti와 Fe 사이의 금속간 화합물 형성 속도가 빨라지므로 강도가 저하된다.

Liu et al.²¹⁾은 세 가지 종류의 은납을 이용하여 Ti-6Al-4V 합금과 STS 304 소재의 진공브레이징을 840~900 °C에서 수행하였다. 접합부에 TiCu , Ti_2Cu , Ti_2Cu_3 , Cu-Sn-Ti IMC 형성이 확인되었으며, 적용한 은납 필러에 따라 적정온도에서는 양호한 계면 형성이 가능하였다.

Atasoy et al.²²⁾은 순 Ti 금속과 저탄소강의 소재에 중간 삽입재로 80 μm 두께의 Ag 합금을 사용하였다. 브레이징 온도와 시간을 각각 700~850 °C, 30~120 분으로 설정하여 총 16개 조건으로 실험한 결과 850 °C, 90 분에서 450 Hv로 가장 높은 경도를 나타내었다. 접합 온도와 시간이 증가함에 따라 중간재 면

Table 3 Summary of brazing research for Ti/Steel dissimilar metal joining

Ti	Steel	Interlayer	Process	Author, publication year
Pure Ti	STS 304	28Ag-Cu, 46Ag-Cu	Vacuum brazing	Camargo, 1993 ²⁰⁾
Ti-6Al-4V	STS 304	silver based fillers	Vacuum brazing	Liu, 2002 ²¹⁾
Pure Ti	Low carbon steel	AgCuZn	Vacuum brazing	Atasoy, 2008 ²²⁾
Ti-6Al-4V	STS 321	AgCuTi	Vacuum brazing	Yue, 2008 ²³⁾
Pure Ti	Low carbon steel	Ag-27.25Cu-12.5In-1.25Ti (Incusil ABA)	Vacuum brazing	Elrefaey, 2009 ²⁴⁾
Ti-6Al-4V	STS 304	Ti based (40Ti-20Zr-20Cu-20Ni), silver based(Ag-5Pd), and nickel based (Ni-7Cr-3.1B-4.5Si-3Fe-0.06C, BNi2 and Ni-14Cr-10P-0.06C, BNi7)	Brazing	Chung, 2012 ²⁵⁾
Ti-6Al-4V	STS 316L	AgCuZn	Vacuum Brazing	Tashi, 2014 ²⁶⁾
TiAl alloy	40Cr steel	CuTiNiZrV foil	Vacuum Brazing	Dong, 2015 ²⁷⁾
Ti-6Al-4V	STS 316L	CuSi3 wire	Arc Brazing	Pardal, 2016 ²⁸⁾

적이 감소하는 것이 관찰되었다.

Yue et al.²³⁾은 Ti-6Al-4V 합금과 STS 321 소재에 AgCuTi 합금을 삽입재로 넣고, 920-980 °C에서 접합하였다. 920 °C에서 접합된 시편은 CuTi, Ag계, Cu₄Ti 및 β-Ti 상으로 구성되며 전단강도는 최대 188 MPa으로 Ag계 상에서 연성파단이 발생했다. 온도가 980 °C로 증가함에 따라 접합부는 Ag계, CuTi₂, Ti-Cu계 및 β-Ti 상으로 구성되며 취성의 Cu-Ti IMC 형성으로 인해 전단강도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Elrefaey et al.²⁴⁾은 순 Ti 합금과 저탄소강 소재 접합을 하기 위해 200 μm의 Incusil ABA(Ag-27.25Cu-12.5In-1.25Ti wt%) 삽입재를 사용했다. 650-850 °C에서 15 분동안 접합한 결과 750 °C에서 접합부에 해로운 영향을 미치는 IMC가 형성되지 않아 전단강도는 최대 113 MPa을 나타내었다. 650 °C에서는 접합부에 해로운 영향을 미치는 IMC는 관찰되지 않았으나 낮은 접합 온도로 인해 삽입재 용융이 부족했으며, 일부 기공이 관찰되었다. 750 °C 이상의 조건에서는 steel과 Ti 계면에 취성의 TiCu 상이 형성되어 접합부의 강도가 감소하였다.

Chung et al.²⁵⁾은 Ti-6Al-4V 합금과 STS 304 소재를 브레이징하기 위해서 Ti 기반, Ag 기반, Ni 기반한 4가지 종류의 필러를 880-1050 °C에서 평가하여, Ni 기반의 BNi₂ (Ni-7Cr-3.1B-4.5Si-3Fe-0.06C)와 BNi₇ (Ni-14Cr-10P-0.06C)이 가장 최적의 성능을 보여주었다고 보고하였다.

Tashi et al.²⁶⁾은 Ti-6Al-4V 합금과 STS 316L 소재에 AgCuZn 필러를 사용하여 진공브레이징을 수행하고, 접합계면에서 CuTi, Fe-Cu-Ti, Cu₃Ti, Cu₃Ti₂,

TiAg, Ag₃Fe₂를 관찰하였다. 브레이징 시간과 온도가 증가할수록 증가하는 Cu-Ti, Fe-Cu-Ti IMC는 접합 성능을 저하시키지만 TiAg IMC는 접합부에 연성을 증가시키는 역할을 하였다.

Dong et al.²⁷⁾은 Ti-Al 합금을 40Cr 강과의 이종 재료에 CuTiNiZrV 포일을 중간 삽입재로 넣어 브레이징을 수행하였다. 적용된 포일 중 Cu_{43.75}Ti_{37.5}Ni_{6.25}Zr_{6.25}V_{6.25} (at.%) 포일은 퍼짐성이 좋아 얇고 평평한 용접부 형성이 가능하였으나 Ti₁₉Al₆와 Ti₂Cu IMC가 형성되어 접합부 강도가 저하되었고, Cu_{37.5}Ti₂₅Ni_{12.5}Zr_{12.5}V_{12.5} 포일은 강도 평가에서 TiAl 모재에서 파단이 발생하면서 107 MPa 수준의 양호한 강도 확보가 가능하였다.

Pardal et al.²⁸⁾은 Ti-6Al-4V 합금과 STS 316L 소재에 CuSi₃ 와이어를 이용하여 아크 브레이징을 수행하였다. 아크 용접공정으로는 저입열 구현이 가능한 CMT (Cold Metal Transfer) 공법을 사용하였고, 1.7 mm 갭을 조성하고 맞대기 조인트로 아크 브레이징을 수행하였다. Cu와 모재 사이에 IMC 형성은 피할 수 없었으나 Fe-Ti IMC보다는 연성 확보에 유리한 IMC가 형성되었다. 적용한 조건 범위에서는 입열이 높을 경우 젖음이 잘 발생하여 접합강도가 높은 결과가 관찰되었다.

4. 용융용접

용융용접을 이용하여 Ti 합금과 철계 소재를 용접할 경우 취성이 강한 Fe-Ti IMC의 형성을 억제하는 것이 불가능하다. 그래서 저입열 구현이 가능하고, 공정 제어가 쉬운 레이저 용접이나 전자빔용접을 적용한 연

Table 4 Summary of fusion welding research for Ti/Steel dissimilar metal joining

Ti	Steel	Interlayer	Process	Joint	Author, publication year
Pure Ti	STS 304		Laser welding	Lap	Hiraga, 2002 ²⁹⁾
Ti-6Al-4V	STS 316L	Pure Cu (0.5 mm)	Laser welding Electron beam welding	Butt	Tomashchuk, 2011 ³⁶⁾
Ti-6Al-4V	42CrMo		Laser welding	Lap	Zhao, 2011 ³⁰⁾
Pure Ti	STS 316		Laser welding	Butt	Satoh, 2012 ³¹⁾
Pure Ti	STS 304	V, Ta	Laser welding	BOP	Shanmugarajan, 2012 ⁴⁴⁾
Ti-6Al-4V	STS 304L	AZ31B Mg wire	Laser welding	Butt	Gao, 2013 ⁴⁶⁾
TiNi alloy	STS 304	Cu foil	Laser welding	Butt	Li, 2013 ³⁷⁾
Ti-6Al-4V	STS 304	Cu foil	Laser welding	Butt	Mitelea, 2013 ³⁸⁾
Ti-6Al-4V	STS 316L		Laser welding	V butt	Mohid, 2013 ³²⁾
α - β Ti alloy	STS 316L	Cu foil	Electron beam welding	Butt	Tomashchuk, 2013 ³⁹⁾
Ti-6Al-4V	STS 201		Laser welding	Butt	Chen, 2014 ³⁴⁾
Pure Ti	12Kh18N10T	Ta-Cu	Laser welding	V butt	Cherepanov, 2014 ⁴⁰⁾
Ti-6Al-4V	STS 304	Cu3Si wire	Laser-arc hybrid welding	V butt	Gao, 2015 ⁴¹⁾
Ti-6Al-4V	STS 316L	Pure V foil	Laser welding	Butt	Tomashchuk, 2015 ⁴⁵⁾
Pure Ti	STS 304		Laser welding	Lap	Chen, 2016 ³⁴⁾
Pure Ti	12Kh18N10T	Cu plate (C11000)	Laser welding	Butt	Pugacheva, 2016 ⁴²⁾
Pure Ti	STS 304	ERCuSn-A, ERNiCu-7	Gas tungsten arc welding	V butt	Thonondaeng, 2016 ⁴³⁾
Ti-6Al-4V	STS 301L	Nb sheet	Laser welding	Butt	Zhang, 2016 ⁴⁷⁾
Ti-6Al-4V	STS 301L		Laser welding	Butt	Zhang, 2019 ³⁵⁾

구가 많이 수행되었으며, 일부 연구에서는 가스 텅스텐 아크 용접과 중간 삽입재를 같이 이용하였다 (Table 4).

제살용접을 이용한 레이저 용접의 경우(Fig. 4a)²⁹⁻³⁵⁾에는 Ti-Fe, Ti-Cr 등의 IMC 형성에 대해 공통적으로 보고되었으며, 합금 성분이 다양할수록 복잡한 중간상이 관찰된다. 레이저 조사 위치 등 공정변수에 따른 IMC의 거동과 접합강도의 변화에 대해 주로 연구되었다.

취성이 강한 IMC상을 제어하기 위하여 용융용접에서 Cu³⁶⁻⁴³⁾, V^{44,45)}, Ta^{40,44)}, Mg⁴⁶⁾, Nb⁴⁷⁾ 등을 중간 삽입재가 사용되었다. Cu와 Mg 등은 레이저 브레이징의 형태로 모재를 거의 녹이지 않고 적용되어 Fe-Ti보다 취성을 작은 IMC 형태로 접합부 조직을 구성할 수 있다. V, Ta, Nb 등은 모재에 합금이 용이한 소재들로 용접부 강도를 향상시키기 위하여 사용되어 V와 Nb의 경우^{44,45,47)}의 경우 약 370 MPa 수준의 높은 접합강도가 확인되었으나 Ta의 경우 산화 문제로 강도 확보에 실패하였다⁴⁴⁾. 레이저 용접을 적용한 Ti 합금/철계 소재의 이중재 용접에 대해서는 Auwal et al.⁴⁸⁾에 의해 자세히 리뷰되었다.

아크 용접⁴³⁾과 레이저-아크 하이브리드 용접⁴¹⁾의 경우 용접으로 표기되었으나 실제적 접합형태는 윗절의

아크 브레이징 형태로 저융점의 Cu 계 와이어를 브레이징 필러로 이용하고 열원으로 가스 텅스텐 아크(Fig. 4b)나 레이저-아크 복합열원을 사용한 형태로 적용되었다.

5. 기타 고상용접

Ti 합금과 Fe계 소재의 용접에는 확산접합 외 폭발용접과 마찰용접 등의 고상용접공정에 대한 연구가 진행되었다 (Table 5). 이들 고상용접의 경우 입열 및 공정온도가 낮아 IMC 층의 제어가 유리하지만 특수한 용접장비가 필요하거나 조인트 형상에 제한을 가지고 있다.

5.1 폭발용접

Kahramna et al.⁴⁹⁾은 Fig. 5(a)에서 관찰할 수 있듯이 앤빌 위에 STS 304판재를 위치하고 5도의 경사각을 두고 설치한 Ti-6Al-4V 판재 위에 폭발을 발생시켰으며 소재의 두께는 각각 1.5 mm였다. 짧은 공정시간으로 인해 IMC 층은 계면에 형성되지 않았으며, 인장-전단 시험에서 모재 파단이 발생하였고, 180도

Table 5 Summary of solid state joining research for Ti/Steel dissimilar metal joining

Ti	Steel	Interlayer	Process	Joint	Author, publication year
Ti-6Al-4V	STS 304		Explosive welding	Lap	Kahraman, 2005 ⁴⁹⁾
Pure Ti	STS 304L		Friction welding	Butt	Dey, 2009 ⁵¹⁾
Pure Ti	STS 304		Friction stir welding	Double butt lap	Fazel-Najafabadi, 2010 ⁵²⁾
Pure Ti	STS 304		Friction stir welding	Double butt lap	Fazel-Najafabadi, 2010 ⁵³⁾
Ti-6Al-4V	STS 304		Friction stir welding	Lap	Campo, 2014 ⁵⁴⁾
Ti-6Al-4V	1018 steel	Cu, Nb	Vaporizing foil actuator welding (VFAW)	Lap	Liu, 2015 ⁵⁰⁾

Fig. 4 Schematic of (a) laser keyhole welding, (b) gas tungsten arc welding, and (c) laser-arc hybrid processes⁸⁾

굽힘시험을 통과하는 양호한 접합부를 형성하였다.

Liu et al.⁵⁰⁾은 VFAW(Vaporizing foil actuator welding)을 이용하여 0.41 mm 두께의 Ti-6Al-4V 판재위에 중간층인 Nb (0.25 mm)과 Cu (0.13 mm) 판재를 위치하고 가장 상층에 연강을 배치하여 순간적 기화압력을 이용하여 용접을 수행하였다. 순간적인 접합에 의해서 IMC는 형성되지 않고 양호한 용접부를 형성하였으며, 910 °C에서 24시간 동안 열처리를 수행한 경우에도 계면에 IMC가 성장하지 않는 화학적으로 안정된 용접이 가능하며, 고온 동작이 필요한 부품에서도 안정성 확보가 가능함을 확인하였다.

5.2 마찰용접과 마찰교반용접

Dey et al.⁵¹⁾은 원자력 발전부품에 요구되는 이종재 접합부를 제작하기 위하여 봉형의 순 Ti 금속과 STS 304L 소재에 대한 마찰용접을 시도하였다. 적절한 마찰용접공정변수 선정을 통하여 인장시험에서 Ti 금속 모재가 파단되는 접합부를 형성하였다. 접합공정에서 상대적으로 변형이 쉬운 Ti 금속에서 플래쉬가 발생하였으며, STS 모재와의 경계가 유지되면서 동적 재결정이 Ti 쪽으로 진행되었다. IMC 층은 STS 모재와 접한 동적 재결정부에서 10 μ m 두께로 형성되었으며, STS 소재에서 Fe, Cr이 α -Ti로 확산되었다.

Fazl-Najafabadi et al.^{52,53)}은 순 Ti 금속과 STS 304 합금과의 마찰교반용접(Fig. 5b)을 수행하였다. 상하판 배열을 바꾸면서 연구를 진행하였고, 4 mm 두께의 소재의 계면을 가공하여 겹침-맞대기 조인트를 만들어서 공구강 솔더와 WC 핀을 이용하여 용접을 수행하였다. 두 소재 배열 모두에서 TiFe₂가 아닌 TiFe IMC층이 3 μ m 정도의 두께로 형성된다고 보고하였으며, Ti이 상판일 경우 보다 STS가 상판일 경우 강도가 30% 증가하면서 Ti와 유사한 강도 확보가 가능하였다.

Campo et al.⁵⁴⁾은 1.6 mm 두께의 Ti-6Al-4V 합금을 상판에 위치하고 2.5 mm 두께의 1018 강재를 하판에 겹치기 조인트로 배치하고 마찰교반용접을 수행

Fig. 5 Schematic of (a) explosion welding and (b) friction stir welding process⁸⁾

하였다. Ti 합금이 동작온도에서 강도가 더 높아 상판에 위치하는 것이 유리하였으며, 용접 후 상온에서 안정된 β -Ti이 형성되었다. Ti 원소가 STS 소재 쪽으로 확산하면서 5 μm 정도의 TiFe_2 IMC 층이 관찰되었으며, 용접공정에 의한 연화가 열영향부에서 관찰되었다.

6. 직접 접합부 IMC의 형성

6.1 확산접합부

Ghosh et al.의 연구¹⁰⁾에서는 중간 삽입재 없이 순수 Ti 금속과 STS 304 소재의 확산접합이 시도되었다. 950 $^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간 확산접합할 경우 계면에서 STS 쪽으로 Ti가 확산되어 20 μm 정도의 σ 상 ($\text{Fe} \sim 59.8\text{--}61.8$ at.%, $\text{Cr} \sim 29.2\text{--}31.8$ at.%, $\text{Ni} \sim 4.7\text{--}5.8$ at.% and Ti)을 형성하고, 이 층에 접해서 Fe_2Ti (Cr, Ni) IMC 층 (Fig. 1의 1), 1-2 μm 두께의 얇은 $\text{TiCr}_2 + \text{Fe}_2\text{Ti}(\text{Cr})$ 층 (Fig. 6의 2번 영역)과 $\text{FeTi}(\text{Cr}, \text{Ni})$ IMC 층 (Fig. 6의 3번 영역)이 형성된다. 이 때 Fe_2Ti IMC 층의 두께는 약 1-2 μm , FeTi 층의 두께는 약 1-5 μm 이다. Campo et al.⁵⁴⁾의 연구에서도 동일하게 Ti이 STS 소재로 확산되면서 5 μm 두께의 IMC 층이 확인되었다.

Fig. 6 Diffusion welded joint of Ti-6Al-4V alloy and STS 304 steel¹⁰⁾

Fig. 7 Diffusion welded joint of Ti-6Al-4V alloy and IF steel¹⁴⁾

Kaya et al.¹⁴⁾의 연구에 따르면 Ti-6Al-4V 합금과 IF(Interstitial free) 강재의 확산접합부에서는 위의 Ti 합금/STS 접합부에 비해 간단한 IMC 층이 관찰되었다. IF 강에서 Fe 원소가 Ti 합금 쪽으로 확산이 되면서 Ti-6Al-4V 합금 쪽에는 FeTi IMC 층이 형성되었으며, IF 강재 쪽으로는 Fe_2Ti IMC 층이 형성되었다 (Fig. 7). 상대적으로 높은 950 $^{\circ}\text{C}$ 의 공정시간에서

도 IMC 층의 총 두께는 $1.5 \mu\text{m}$ 이내로 형성되어 접합 강도 확보에 큰 문제가 없었다.

6.2 마찰용접과 마찰교반용접

Fazel-Najafabadi et al.^{52,53)}은 순 Ti 금속과 STS 304 소재에 대해 상하판 소재조합을 변경하면서 겹치기 FSW를 수행하였는데, Ti가 STS 쪽으로 확산되어서 TiFe_2 가 아닌 TiFe IMC가 $4 \mu\text{m}$ 이내로 형성된다고 보고하였으며, 이를 TiFe가 TiFe_2 에 비해 자유에너지가 더 낮기 때문이라고 설명하였다.

Dey et al.⁵¹⁾은 순 Ti 금속과 STS 304 소재를 봉형으로 마찰용접을 수행하였는데, 변형이 발생하는 Ti 쪽에서 IMC 층과 동적 재결정이 발생하였다. Fig. 8을 통해 STS 소재로부터 Fe와 Cr이 용접층으로 확산되면서 $10 \mu\text{m}$ 정도의 두께를 가지고 주된 성분은 Ti, Fe, 그리고 Cr으로 확인되었다.

Fig. 8 (a) SEM-BSE micrograph of Ti/STS 304L interface, and (b) corresponding SEM-EDS line scan across the interface⁵¹⁾

6.3 레이저용접

Zhang et al.³⁵⁾은 Ti-6Al-4V 합금과 STS 301L 소재의 맞대기 조인트에 레이저 용융을 이용한 접합기술을 제안하였다. 이 공정에서 레이저는 Ti 합금에만 조사되고 이 때 두 소재의 계면에 공정조성의 액상(eutectic liquid)이 형성되면서 Ti 합금과 STS 소재간의 접합이 이루어진다. 기존 확산접합 연구와 유사하게 Ti 원소가 STS 쪽으로 확산되면서 Ti 합금과 가까운 쪽은 TiFe IMC 층이, STS 소재와 가까운 쪽은 TiFe_2 IMC 층이 형성되는데 Ti 모재와 TiFe IMC 층 사이에 β -Ti 층이 형성되었다.

Chen et al.³³⁾은 Ti-6Al-4V 합금과 STS 201 소재의 맞대기 레이저 용접을 수행하였다. 레이저빔을 STS 소재 쪽에 조사할 경우 용접성이 더 우수하였으며, Ti 합금에 가까운 층(Layer I)은 $\text{FeTi} + \alpha\text{-Ti}$ 로 구성되고, STS에 가까운 층은 FeTi (질은 회색, C), Fe_2Ti (회색, D와 E)과 τ 상 ($\text{Ti}_5\text{Fe}_{17}\text{Cr}_5$, 밝은 색, F)으로 구성되었다고 보고하였다 (Fig. 9).

Fig. 9 Microstructures of Ti/STS laser welded joint. (a) interfacial microstructures and (b) magnification of layer II in the Fig. 9(a)³³⁾

7. 결 론

Ti 합금은 우수한 기계/재료적 특성에도 불구하고 소재 및 가공, 조립 비용이 상대적으로 높아 활용이 제한적이었다. Ti 합금과 Fe계 소재의 용접 접합에서의 품질과 생산성을 확보할 경우 기능성과 경제성을 동시에 만족할 수 있는 솔루션 개발이 가능하다. 기존의 확산접합과 브레이징의 경우 적용 부품의 형상이나 생산성이 제한적이므로 용융용접이나 접근이 용이한 고상용접방법의 개발이 요구된다. FeTi, Fe₂Ti와 같은 IMC 층 형성을 충분히 제어하면서 생산성 확보가 가능한 고에너지 용접이나 저입열 용융용접, 마찰교반용접 등에 기반한 새로운 용접 공정들이 제안될 것으로 예상된다.

ORCID: Hyeonjeong Your: <https://orcid.org/0000-0002-0734-1743>

ORCID: Taehyun Lee: <http://orcid.org/0000-0003-0010-972X>

ORCID: Minjung Kang: <http://orcid.org/0000-0003-1894-4301>

ORCID: Cheolhee Kim: <http://orcid.org/0000-0003-4127-3171>

References

1. Korean Welding and Joining Society, Welding and Joining Handbook, 1: Ferrous and Non-Ferrous Materials, *Korean Welding and Joining Society*, Daejeon, Korea (2008).
2. Y. N. Ahn and C. H. Kim, Yb:YAG Laser and Electron Beam Welding of Ti-6Al-4V Alloy, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 29(6) (2011) 4-8.
<https://doi.org/10.5781/kwjs.2011.29.6.624>
3. J. L. Murray, Phase Diagrams of Binary Titanium Alloys, *ASM Int.* (1987).
4. G. Cacciamani, J. De Keyser, R. Ferro, U. E. Klotz, J. Lacaze, and P. Wollants, Critical evaluation of the Fe-Ni, Fe-Ti and Fe-Ni-Ti alloy systems, *Intermetallics*, 14 (2006) 1312-1325.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2005.11.028>
5. <http://www.matweb.com>
6. Z. Yu, Review of Ti to Steel Dissimilar Joining, *Res. Develop. Mater. Sci.* 5(5) (2018).
<https://doi.org/10.31031/rdms.2018.05.000623>
7. Y. Gao, T. Tsumura, and K. Nakata, Dissimilar Welding of Titanium Alloys to Steels, *Trans. JWRI*, 41(2) (2012) 7-12.
8. Korean Welding and Joining Society, Welding and Joining Handbook, 3: Process and Thermal Processing, *Korean Welding and Joining Society*, Daejeon, Korea (2008).
9. M. Ghosh and S. Chatterjee, Characterization of Transition Joints of Commercially Pure Titanium to 304 Stainless Steel, *Mater. Charact.* 48(5) (2002) 393-399.
10. M. Ghosh, K. Bhanumurthy, G. B. Kale, J. Krishnan and S. Chatterjee, Diffusion Bonding of Titanium to 304 Stainless Steel, *J. Nucl. Mater.* 322(2-3) (2003) 235-241.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2003.07.004>
11. M. Ghosh and S. Chatterjee, Diffusion Bonded Transition Joints of Titanium to Stainless Steel with Improved Properties, *Mater. Sci. Eng. A* 358(1-2) (2003) 152-158.
[https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(03\)00298-3](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(03)00298-3)
12. S. Kundu, M. Ghosh, and S. Chatterjee, Diffusion Bonding of Commercially Pure Titanium and 17-4 Precipitation Hardening Stainless Steel, *Mater. Sci. Eng. A* 428(1-2) (2006) 18-23.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.10.047>
13. S. Kundu and S. Chatterjee, Diffusion Bonding between Commercially Pure Titanium and Micro-Duplex Stainless Steel, *Mater. Sci. Eng. A* 480(1-2) (2008) 316-322.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.033>
14. M. Kaya, M. Kılıç, I. Kırık, E. M. Karakurt, and B. Gulenc, Diffusion Bonding between Ti-6Al-4V Alloy and Interstitial Free Steel, *Materialwiss. Werkstofftech.* 48(7) (2017) 661-665.
<https://doi.org/10.1002/mawe.201700003>
15. S. Kundu, M. Ghosh, A. Laik, K. Bhanumurthy, G. B. Kale, and S. Chatterjee, Diffusion Bonding of Commercially Pure Titanium to 304 Stainless Steel Using Copper Interlayer, *Mater. Sci. Eng. A* 407(1-2) (2005) 154-160.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.07.010>
16. S. Kundu and S. Chatterjee, Characterization of Diffusion Bonded Joint between Titanium and 304 Stainless Steel Using a Ni Interlayer, *Mater. Charact.* 59(5) (2008) 631-637.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.05.015>
17. S. Kundu, B. Mishra, D. L. Olson, and S. Chatterjee, Interfacial Reactions and Strength Properties of Diffusion Bonded Joints of Ti64 Alloy and 17-4PH Stainless Steel Using Nickel Alloy Interlayer, *Mater. Des.* 51 (2013) 714-722.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.088>
18. P. He, X. Yue, and J. H. Zhang, Hot Pressing Diffusion Bonding of a Titanium Alloy to a Stainless Steel with an Aluminum Alloy Interlayer, *Mater. Sci. Eng. A* 486 (1-2) (2008) 171-176.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.076>
19. A. Elrefaey and W. Tillmann, Solid State Diffusion Bonding of Titanium to Steel Using a Copper Base Alloy as Interlayer, *J. Mater. Process. Technol.* 209(5) (2009) 2746-2752.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.014>
20. P. Camargo, R. Trevisan, and S. Liu, Microstructural Characterization of Titanium to 304 Stainless Steel Brazed Joints, *Weld. J.* 72(12) (1993) 537.
21. C. Liu, C. Ou, and R. Shiue, The Microstructural Observation and Wettability Study of Brazing Ti-6Al-4V and 304 Stainless Steel Using Three Braze Alloys, *J. Mater. Sci.* 37(11) (2002) 2225-2235.
<https://doi.org/10.1023/A:1015356930476>
22. E. Atasoy and N. Kahraman, Diffusion Bonding of Commercially Pure Titanium to Low Carbon Steel Using a Silver Interlayer, *Mater. Charact.* 59(10) (2008) 1481-1490.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.01.015>
23. X. Yue, P. He, J. C. Feng, J. H. Zhang, and F. Q. Zhu,

- Microstructure and Interfacial Reactions of Vacuum Brazing Titanium Alloy to Stainless Steel Using an AgCuTi Filler Metal, *Mater. Charact.* 59(12) (2008) 1721-1727.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.03.014>
24. A. Elrefaey and W. Tillmann, Effect of Brazing Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Joints, *J. Mater. Process. Technol.* 209(10) (2009) 4842-4849.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.01.006>
 25. T. Chung, J. Kim, J. Bang, B. Rhee, and D. Nam, Microstructures of Brazing Zone between Titanium Alloy and Stainless Steel Using Various Filler Metals, *Trans. Nonferr. Met. Soc. China*, 22 (2012) s639-s644.
[https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(12\)61778-6](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(12)61778-6)
 26. R. Soltani Tashi, S. a. A. Akbari Mousavi, and M. Mazar Atabaki, Diffusion Brazing of Ti-6Al-4V and Austenitic Stainless Steel Using Silver-Based Interlayer, *Mater. Des.* (1980-2015), 54 (2014) 161-167.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.103>
 27. H. Dong, Z. Yang, Z. Wang, D. Deng, and C. Dong, Cutinizr Amorphous Alloy Foils for Vacuum Brazing of TiAl Alloy to 40Cr Steel, *J. Mater. Sci. Technol.* 31(2) (2015) 217-222.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2014.04.003>
 28. G. Pardal, S. Ganguly, S. Williams, and J. Vaja, Dissimilar Metal Joining of Stainless Steel and Titanium Using Copper as Transition Metal, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 86(5-8) (2016) 1139-1150.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-8110-2>
 29. H. Hiraga, K. Fukatsu, K. Ogawa, M. Nakayama, and Y. Muto, Nd:YAG Laser Welding of Pure Titanium to Stainless Steel, *Weld. Int.* 16(8) (2002) 623-631.
 30. S. Zhao, G. Yu, X. He, Y. Zhang, and W. Ning, Numerical Simulation and Experimental Investigation of Laser Overlap Welding of Ti6Al4V and 42CrMo, *J. Mater. Process. Technol.* 211(3) (2011) 530-537.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.11.007>
 31. G. Satoh, Y. L. Yao, and C. Qiu, Strength and Microstructure of Laser Fusion-Welded Ti-SS Dissimilar Material Pair, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 66(1-4) (2012) 469-479.
<https://doi.org/10.1007/s00170-012-4342-6>
 32. Z. Mohid, M. A. Liman, M. R. A. Rahman, N. H. Rafai, and E. A. Rahim, Dissimilar Materials Laser Welding Characteristics of Stainless Steel and Titanium Alloy, *Appl. Mech. Mater.* 465-466 (2013) 1060-1064.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.1060>
 33. S. Chen, M. Zhang, J. Huang, C. Cui, H. Zhang, and X. Zhao, Microstructures and Mechanical Property of Laser Butt Welding of Titanium Alloy to Stainless Steel, *Mater. Des.* 53 (2014) 504-511.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.044>
 34. H. C. Chen, G. Bi, B. Y. Lee, and C. K. Cheng, Laser Welding of CP Ti to Stainless Steel with Different Temporal Pulse Shapes, *J. Mater. Process. Technol.* 231 (2016) 58-65.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.12.016>
 35. Y. Zhang, J. Zhou, D. Sun, and X. Gu, Nd:Yag Laser Welding of Dissimilar Metals of Titanium Alloy to Stainless Steel without Filler Metal Based on a Hybrid Connection Mechanism, *J. Mater. Res. Technol.* 9(2) (2019) 1662-1672.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.001>
 36. I. Tomashchuk, P. Sallamand, H. Andrzejewski, and D. Grevey, The Formation of Intermetallics in Dissimilar Ti6Al4V/Copper/AiSi 316 L Electron Beam and Nd: YAG Laser Joints, *Intermetallics*, 19(10) (2011) 1466-1473.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.05.016>
 37. H. Li, D. Sun, X. Gu, P. Dong, and Z. Lv, Effects of the Thickness of Cu Filler Metal on the Microstructure and Properties of Laser-Welded TiNi Alloy and Stainless Steel Joint, *Mater. Des.* 50 (2013) 342-350.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.014>
 38. I. Mitelea, C. Groza, and C. Craciunescu, Copper Interlayer Contribution on Nd:Yag Laser Welding of Dissimilar Ti-6al-4v Alloy with X5CrNi18-10 Steel, *J. Mater. Eng. Perform.* 22(8) (2013) 2219-2223.
<https://doi.org/10.1007/s11665-013-0507-1>
 39. I. Tomashchuk, P. Sallamand, N. Belyavina, and M. Pilloz, Evolution of Microstructures and Mechanical Properties During Dissimilar Electron Beam Welding of Titanium Alloy to Stainless Steel Via Copper Interlayer, *Mater. Sci. Eng. A* 585 (2013) 114-122.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.07.050>
 40. A. N. Cherepanov, A. M. Orishich, and V. I. Mali, Laser Welding of Stainless Steel with a Titanium Alloy with the Use of a Multilayer Insert Obtained in an Explosion, *Combust. Explos. Shock Waves*, 50(4) (2014) 483-487.
<https://doi.org/10.1134/s0010508214040182>
 41. M. Gao, C. Chen, L. Wang, Z. Wang, and X. Zeng, Laser-Arc Hybrid Welding of Dissimilar Titanium Alloy and Stainless Steel Using Copper Wire, *Metall. Mater. Trans. A* 46(5) (2015) 2007-2020.
<https://doi.org/10.1007/s11661-015-2798-3>
 42. N. B. Pugacheva, M. V. Myasnikova, and N. S. Michurov, Simulation of the Elastic Deformation of Laser-Welded Joints of an Austenitic Corrosion-Resistant Steel and a Titanium Alloy with an Intermediate Copper Insert, *Phy. Met. Metallogr.* 117(2) (2016) 195-203.
<https://doi.org/10.1134/s0031918x15120078>
 43. T. Thonondaeng, K. Fakpan, and K. Eidhed, Dissimilar Metals Welding of CP Titanium to 304 Stainless Steel Using GTAW Process, *Appl. Mech. Mater.* 848 (2016) 43-47.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.848.43>
 44. B. Shanmugarajan and G. Padmanabham, Fusion Welding Studies Using Laser on Ti-SS Dissimilar Combination, *Opt. Lasers Eng.* 50(11) (2012) 1621-1627.
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.05.008>

45. I. Tomashchuk, D. Grevey, and P. Sallamand, Dissimilar Laser Welding of AISI 316L Stainless Steel to Ti6-Al4-6v Alloy Via Pure Vanadium Interlayer, *Mater. Sci. Eng. A* 622 (2015) 37-45.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.084>
46. M. Gao, S. W. Mei, Z. M. Wang, X. Y. Li, and X. Y. Zeng, Characterisation of Laser Welded Dissimilar Ti/Steel Joint Using Mg Interlayer, *Sci. Technol. Weld. Join.* 17(4) (2013) 269-276.
<https://doi.org/10.1179/1362171812y.00000000002>
47. Y. Zhang, D. Sun, X. Gu, and H. Li, A Hybrid Joint Based on Two Kinds of Bonding Mechanisms for Titanium Alloy and Stainless Steel by Pulsed Laser Welding, *Mater. Lett.* 185 (2016) 152-155.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.138>
48. S. T. Auwal, S. Ramesh, F. Yusof, and S. M. Manladan, A Review on Laser Beam Welding of Titanium Alloys, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 97(1-4) (2018) 1071-1098.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2030-x>
49. N. Kahraman, B. G?len?, and F. Findik, Joining of Titanium/Stainless Steel by Explosive Welding and Effect on Interface, *J. Mater. Process. Technol.* 169(2) (2005) 127-133.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.045>
50. B. Liu, A. Vivek, W. Lin, C. Prothe, and G. Daehn, Solid-State Dissimilar Joining of Ti-Fe with Nb and Cu Interlayers, *Weld. J.* 94(7) (2015) 219s-224s.
51. H. C. Dey, M. Ashfaq, A. K. Bhaduri, and K. P. Rao, Joining of Titanium to 304L Stainless Steel by Friction Welding, *J. Mater. Process. Technol.* 209(18-19) (2009) 5862-5870.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.06.018>
52. M. Fazel-Najafabadi, S. F. Kashani-Bozorg, and A. Zarei-Hanzaki, Joining of CP-Ti to 304 Stainless Steel Using Friction Stir Welding Technique, *Mater. Des.* 31(10) (2010) 4800-4807.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.003>
53. M. Fazel-Najafabadi, S. F. Kashani-Bozorg, and A. Zarei-Hanzaki, Dissimilar Lap Joining of 304 Stainless Steel to CP-Ti Employing Friction Stir Welding, *Mater. Des.* 32(4) (2011) 1824-1832.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.026>
54. K. N. Campo, L. C. Campanelli, L. Bergmann, J. F. D. Santos, and C. Bolfarini, Microstructure and Interface Characterization of Dissimilar Friction Stir Welded Lap Joints between Ti-6Al-4V and AISI 304, *Mater. Des.* (1980-2015) 56 (2014) 139-145.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.002>