가스텅스텐 아크용접용 타이타늄합금 플럭스-메탈 코어드 와이어 제조기술

최성우^{*,**} · 홍재근^{*} · 박찬희^{*} · 이상원^{*} · 강남현^{**} · 최윤석^{**} · 박지태^{***} · 안순태^{***} · 엄종택^{*,†}

^{*}한국기계연구원 부설 재료연구소, 타이타늄연구실

^{**}부산대학교, 재료공학부

^{***}삼화스틸

Manufacturing Process of Titanium Alloys Flux-Metal Cored Wire for Gas Tungsten Arc Welding

Seong-Woo Choi^{*,**}, JaeKeun Hong^{*}, Chan Hee Park^{*}, Sangwon Lee^{*}, Namhyun Kang^{**},
Yoon Suk Choi^{**}, Ji Tae Park^{***}, Soon Tae Ahn^{***}, and Jong-Taek Yeom^{*,†}

^{*}Korea Institute of Materials Science, titanium Department, Changwon, 648-831, Korea

^{**}Pusan National University, School of Materials Science and Engineering, Busan, 609-735, Korea

^{***}Samhwa Steel, Busan, 46905, Korea

[†]Corresponding author : yjt96@kims.re.kr

(Received May 2, 2019 ; Revised May 14, 2019 ; Accepted June 3, 2019)

Abstract

At present, flux or metal cored wires are widely used in iron-based materials for flux cored arc welding in order to reduce the cost of welding production. However, the development of flux or metal cored wire for titanium materials, which are widely used in the petrochemical, power plant and marine vessel fields, has not been done yet, and development is required. In this study, manufacturing process of titanium alloys flux-metal cored wire for gas tungsten arc welding was investigated by FEM simulation and experimental analysis. FEM simulation of tube welding process was carried out with initial three preform-types (butt tube, overlap tube and welded tube). In the FEM simulation results, tube welding process using initial welded tube was evaluated to cause cracking of the specimen during the process. In actual making process of titanium alloys flux-metal cored wire for gas tungsten arc welding, overlap-type tube was evaluated to be the most suitable initial preform shape. In addition, it was confirmed that the filling ratio of the flux-metal was maintained uniformly at over 70%.

Key Words : Titanium, Flux-metal cored wire, FEM simulation, EBSD

1. 서 론

최근 순수 타이타늄 및 타이타늄합금은 높은 비강도, 우수한 내식성, 인체에 무해한 특성등을 이용하여 항공 우주, 석유화학 및 에너지, 조선해양, 의료, 일반산업 등 다양한 응용분야에 활용되고 있으며, 특히 조선해양 및 일반산업의 경우 용접재료가 타이타늄 수요의 많은 부

분을 차지하고 있다¹⁻⁵⁾.

일반적으로 용접재료는 “용접에 사용되는 피복아크용 접봉, 용접와이어, 플럭스, 실드가스를 포함한 용접용 소 모재료를 총칭한다.”고 정의되고 있으며, 이러한 용접재료는 용접시공의 품질 및 생산성을 결정하는 중요한 요소로 작용하기 때문에 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 또한, 용접재료는 피복아크용접봉, 솔리드와이어, FCW (Flux Cored Wire) 및 기타로 분류되어 있다⁶⁻⁸⁾.

타이타늄의 경우 α , $\alpha+\beta$, β 계 합금 등 합금의 종류가 매우 다양하며 각 합금별 적합한 용접재료가 요구된다⁹⁻¹³. 그러나 타이타늄 합금 용접재료의 경우 합금의 용해로부터 단조, 압연, 신선공정으로 제조되고 있고 산소와의 고친화성으로 인해 진공용해가 반드시 요구되고 특유의 난성형성 등으로 인해 제조비용이 크며, 소량 다품종이 요구되는 적용분야의 특성상 용접재료의 개발이 현실적으로 어려운 실정이다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 기존의 피복아크 용접봉과 솔리드와이어의 장점을 가진 FMCW(Flux-Metal Cored Wire)의 개발이 일부 진행 중이다⁸. Fig. 1은 기존의 타이타늄 용접봉 제조공정과 FMCW 제조공정을 비교하여 나타낸 것이다. FMCW는 플럭스를 감싸는 스트립 내부에 충전되는 플럭스와 메탈의 혼합 성분을 조절하여 수요자가 원하는 용접재료의 제조가 가능한 방법이다. 이러한 FMCW 개발은 철계 합금에 국한하여 개발이 진행되고 있으나 아직 타이타늄합금 FMCW 연구개발은 상당히 미비하다.

따라서 본 연구에서는 대표적인 $\alpha+\beta$ 계 타이타늄합금인 Ti-6Al-4V합금 용접에 적용하기 위한 타이타늄합금 FMCW 용접재료를 제조하고자 하였고, 다품종 FCAW(Flux Cored Arc Welding)용 타이타늄합금 용접재료 제조를 위하여 인발공정에 미치는 공정변수의 영향을 고찰하였다. 먼저, Al, V분말과 용접 Flux 혼합성분이 충전될 초기 순수 Ti소재 튜브는 조관공정을 통해 제조하고자 하였고, 유한요소해석을 활용하여 조관된 순수 Ti소재 튜브의 초기형상에 따라 최종 1.2mm Ti-6Al-4V합금 FMCW를 제조하기 위한 인발공정에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, 유한요소해석을 통해 선정된 초기형상 즉, 순수 Ti 튜브들은 조관공정에 의해 제조하고 Al, V분말과 용접 Flux 혼합성분을 충전한 후 혼합성분의 충전율에 따른 인발공정의 영향과 최적의 인발공정조건을 조사하였다.

2. 사용 재료

2.1 타이타늄 판재 분석

본 연구에서는 두께 0.5 mm, 폭 14 mm의 타이타늄 판재를 타이타늄합금 FMCW 제조를 위한 초기 스트립으로 활용하고자 하였고, 활용한 타이타늄 판재는 순수 타이타늄 Gr.2로써 화학성분은 Table 1에 나타내었다. 또한, 초기 판재의 물성을 파악하기 위하여 미

Fig. 1 Manufacturing processes of Ti-alloys welding materials: (a) coated welding rod and solid wire (b) flex cored wire

Fig. 2 EBSD analysis results of the initial Ti material: (a) EBSD inverse pole figure map and (b) (0001) and (10 $\bar{1}$ 0) pole figures

세조직 분석 및 인장시험을 수행하였다.

타이타늄 판재의 미세조직은 전계방출형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope)을 통해 관찰하였으며, Fig. 2에 나타내었다. EBSD(Electron backscatter diffraction) 분석결과 초기 집합조직은 (0001)면이 TD(Transverse direction) 방향으로 약 30° 틀어진 전형적인 압연판재에서 나타나는 splitted basal texture로써, 약 10 μ m 크기의 등축정 α 상으로 이루어져 있음을 관찰할 수 있다¹⁴.

Table 1 Chemical composition of Titanium materials [wt%]

Alloy	O	N	C	H	Fe	Ti
-	0.09	0.25	0.043	0.002	0.042	Bal.

또한, 인장시험은 만능 재료시험기(Universal testing machine, Instron-4206)를 이용하였고, $10^{-3}/s$ 의 속도로 실시하여 기계적 특성을 평가하였다. 이때 인장 시험편은 게이지 길이가 25 mm인 ASTM E8(subsize)의 규격에 따라 관재의 압연방향으로 제작하였다. 인장시험을 통하여 얻어진 기계적 성질은 인장강도 530 MPa, 항복강도 350 MPa, 연신율은 약 33%를 나타내었다.

3. 실험 방법

3.1 조관 및 인발공정 유한요소해석

Al, V분말과 용접 Flux를 충전할 초기 타이타늄 튜브를 제조하기 위해서는 먼저 타이타늄 관재로부터 조관공정(관재를 말아서 튜브로 제조하는 공정)을 통하여 초기형상을 제조하여야 한다. 본 연구에서는 R/B(Roll Bending) 조관법을 이용하고자 하였고, 초기 소재 튜브의 외경은 5.0 mm, 내경은 4.0 mm로 선정하였으며 초기 튜브를 이용하여 최종 1.2 mm급 직경의 타이타늄 FMCW 용접재료를 제조하는 것을 목표로 하였다. 인발공정에 앞서 최적 초기 형상을 선정하기 위하여 유한요소해석 상용 소프트웨어인 DEFORM-3D Ver 6.1을 이용하여 성형해석을 수행하였으며, Fig. 3에 제시된 butt tube(Fig. 3(a)), overlap tube(Fig. 3(b)), welded tube(Fig. 3(c)) 등 초기 세 가지 조관 튜브 형태에 따른 인발특성을 분석하였다. 이때 유한요소해석의 경우 초기소재의 길이는 해석시간을 고려하여 200 mm로 가정하였고, 초기 유한요소개수는 100,000개이며, 부가적으로 척(Chuck)을 사용하는 것으로 해석하여 실제공정과 비슷한 조건으로 설정하였다. 또한, 소재와 금형 사이의 마찰상수는 쿨롱마찰(μ) 0.1¹⁵⁾로 설정하였으며, 인발속도는 35 mm/sec로 설정하여 해석하였다. 그리고 첫 번째 패스를 완전히 빠져 나온 소재에 대해 변형이력을 고려하여 두 번째 패스에 대한 해석을

연속적으로 수행하였다.

3.2 풀림열처리 및 인발공정

인발공정 전에 조관으로 인해 조관 튜브에 형성된 잔류응력 제거와 인발공정중 가공경화로 인한 강도상승을 해소하기 위해서 중간 풀림 열처리는 상당히 중요한 공정 중 하나이며, 본 연구에서 최적의 풀림 열처리조건을 도출하기 위한 연구를 하였고, 유한요소해석으로부터 얻어진 최적 초기형상에 따른 초기 타이타늄 조관 튜브를 제작하였다. 또한, 조성에 맞게 배합한 Al, V분말과 용접 Flux 혼합성분을 조관튜브에 충전한 후 직경 1.2 mm까지 인발시험을 수행하였다. 이때 인발 공정변수로는 초기 타이타늄 조관 튜브 형상과 혼합성분의 충전율을 변수로 하여 최적 인발조건을 도출하고자 하였다. 인발공정에서 중요한 변수인 인발하중¹⁶⁾을 기반으로 인발다이스를 설계하고 시험인발을 통해 인발속도는 35 mm/sec를 최적조건으로 설정하였고, 흑연 윤활제를 초기 조관튜브와 금형에 적절히 도포하여 인발공정을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 유한요소해석을 활용한 최적 초기 타이타늄 조관 튜브 설계

튜브 내부에 플럭스를 삽입하여 제조되는 FMCW의 경우 내부 형상제어와 함께 튜브의 균열, 터짐 등의 결함을 방지하는 것이 중요하다. 이에 따라 인발공정 전 조관공정으로 제조 가능한 초기 튜브형상에 따른 인발 공정시 변형 및 결함 발생 여부 등에 대해 공정해석을 수행하였다. 이때 결함 발생 여부를 해석하기 위한 방법으로 기공생성과 성장에 의한 연성파괴 개념의 손상값을 계산하는 수정 Cockcroft-Latham 모델¹⁷⁾을 활용하였고, 이 모델은 기공크기가 임계치에 도달하면 파괴가 발생한다는 이론인 기공성장개념을 기초로 Oh ¹⁸⁾ 등에 의해 제안된 식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_0^{\epsilon_f} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\sigma} \right) d\bar{\epsilon} = C$$

여기서 ϵ_f 는 파단변형량, σ 는 유효응력, ϵ 는 유효변형률, $\sigma_{\max}$ 는 최대인장응력 그리고, C 는 임계 손상값을 나타낸다. 본 수식에서 손상의 축적치가 임계 손상값인 C 이상인 경우 파괴가 발생할 수 있음을 의미하는 것으로, 온도가 낮을수록 변형속도가 높을수록 임계 손상값은 낮게 나타난다. 등축정조직을 가지는 Ti합금에 대해

Fig. 3 Initial shapes for drawing process with three pre-form-types (a) butt tube (b) overlap tube (c) welded tube

Fig. 4 Comparison of experimental results and simulation results of effective strain and damage distributions for drawing process with three pre-form-types. (a) butt tube (b) overlap tube (c) welded tube

약 870℃에서 성형 시 약 0.79정도의 값을 가지는 것으로 보고하고 있으며^{19,20)}, 상온에서는 0.79보다 더 낮은 임계 손상값을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 butt tube, overlap tube 그리고 welded tube를 최종 1.2 mm의 중간단계인 2.4 mm까지 인발한 상태에 대한 각 초기 튜브형상별 유한요소해석의 변형률과 손상 분포와 함께 실제 각 초기 튜브형상별 조관공정으로부터 얻어진 인발형상을 비교하여 나타낸 것이다. 유한요소해석결과와 실제 조관된 형상이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 유한요소해석 결과 welded tube의 경우 butt tube 및 overlap tube보다 내부 및 외부의 변형률 및 손상분포가 높음을 확인할 수 있다. 즉, weld tube의 손상분포는 최대 1.0 이상인 부분이 상당부분 존재함을 확인할 수 있으며, 이것은 weld tube의 활용시 임계보상값인 0.79이상을 넘어 균열이 발생할 수 있음을 나타내는 해석결과이다. 이러한 결과의 원인으로는 welded tube의 경우 butt tube 및 overlap tube와는 다르게 튜브가 구속되어 있어 내부 및 외부의 변형률 및 손상이 높게 나타난 것이라고 판단된다. 결국, welded tube의 인발공정과정에서 튜브의 균열 및 터짐현상으로 나타날 수 있어 내부 삼입된 플럭스-메탈이 외부로 유출될 수 있음을 예측하는 결과로, FMCW 제조에 적합하지 않을 것이라고 판단하였다.

4.2 타이타늄합금 FMCW (Flux-Metal Cored Wire) 제조 공정설계

인발 효율을 고려했을 때 중간 풀림 열처리 없이 또

Fig. 5 Micrographs of fracture surface for Ti-sample drawn from 5.0 mm to 1.8 mm

는 횡수를 최소화하여 1.2 mm이하의 FMCW 용접봉 제조 공정을 설계해야 한다. 초기 조관 후 외경과 내경이 각각 5.0 mm 및 4.0 mm인 점을 감안할 때 계획하고 있는 1.2 mm까지 인발 할 경우 약 85%의 단면감소율을 가지게 된다. 실제로 5.0 mm에서 1.8 mm까지 인발 후 중간 풀림 열처리 없이 인발을 계속 진행하게 되면 Fig. 5와 같이 파단이 발생하게 된다. 본 연구에서는 사용된 튜브소재의 파단감소율이 약 70%로 확인하였으며 이에 따라 안전계수를 15%로 계산하게 되면 약 60%의 단면감소율을 가지게 되는 조건에서 중간풀림열처리를 수행하는 것이 바람직하다. 결과적으로 60% 단면감소율을 나타내는 2.4 mm에서 중간 풀림 열처리를 실시하는 것이 튜브의 결함을 최소화하는 방안으로 판단된다.

한편, 최적 풀림 열처리 조건을 찾기 위해 타이타늄 소재에 대해 초기 어닐링 상태, 60% 압연상태, 60% 압연 후 아르곤분위기의 튜브로에서 400℃, 500℃, 600℃의 어닐링을 실시하였다. 어닐링한 상태에 대해 인장시험이 수행되었으며 Fig. 6에 인장곡선을 나타내었다. 초기 어닐링된 소재상태의 인장강도 및 연신율은 각각 499 MPa 및 28.0% 였는데 2.4 mm까지 튜브 인발을 했을 때와 같이 약 60%의 단면감소율까지 압연 후

Fig. 6 Stress-strain curves of Ti samples before and after cold working and various heat treatments

인장강도는 675 MPa 까지 증가하고 연신율이 10.6%로 급격히 하락한 것을 관찰할 수 있다. 특히 균일연신율은 2%가 되지 못해 2.4 mm 까지 튜브 인발을 하게 되면 더 이상의 인발이 어려워짐을 알 수 있다. Fig. 7(a)는 초기 어닐링된 소재상태의 미세조직을 나타낸 것이고, 7(b)는 60% 가공 후 미세조직 관찰결과를 나타낸 것이다. 초기 등축정 조직과 달리 60% 압연 후 미세조직은 내부에 다수의 변형쌍정이 생성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 변형쌍정에 대한 분석을 위해서 EBSD를 수행하였으며, 분석한 결과 Fig. 8과 같이 변형쌍정의 대부분은 기지와 약 85°의 방위관계를 가지는 인장 변형쌍정 및 약 64.4°의 방위관계를 가지는 압축 변형쌍정을 확인 할 수 있다. 이러한 2 종류의 변형쌍정은 생성 중에는 성형성의 향상을 가져올 수 있지만, 이미 포화상태로 생성된 후에는 기지와 쌍정 또는 쌍정 간의 계면에서 미세크랙을 발생시킬 수 있으므로, 결국 최적의 풀림 열처리 조건을 설계하기 위해서는 변형쌍정이 없어지면서 표면 산화가 최소화 되고 작업 효율성을 향상시킬 수 있는 가능한 한 낮은 온도를 찾아내야 된다고 판단하였다. 단면감소율 60%까지 냉간가공 후 400℃, 500℃, 600℃에서 30분 열처리 후 인장시험결과에서 알 수 있듯이 약 60%의 냉간가공 후 675 MPa인 인장강도가 400℃ 및 500℃ 열처리 후 601 MPa 및 560 MPa로 낮아 졌으나, 초기 상태인 499 MPa 보다는 여전히 높은 것을 알 수 있었

Fig. 7 Optical micrographs of Ti materials (a) as-received (b) rolled to 60%

Fig. 8 EBSD analysis results of 60% rolled sample: (a) IQ map and (b) Misorientation angle distribution

Fig. 9 Optical micrographs of Ti samples (a) rolled to 60% + annealed (400 °C) (b) rolled to 60% + annealed (500 °C)

Fig. 10 EBSD analysis results of 60% rolled +annealed (600 °C) sample: (a) IPF map and (b) Misorientation angle distribution

다. 한편, 600℃에서 열처리 후 인장강도가 509 MPa로 초기 상태와 유사하게 회복된 것을 관찰 할 수 있다. Fig. 9는 60% 냉간압연후 400℃와 500℃에서 어닐링상태의 미세조직을 나타낸 것이고, Fig. 10은 60% 냉간압연후 600℃에서 어닐링상태의 EBSD 분석결과를 나타낸 것이다. 400℃, 500℃에서 열처리된 시편은 기지 내부에 존재하는 변형쌍정이 완전히 재결정화 되지 못하고 여전히 존재함을 확인 할 수 있었고, 변형쌍정 계면은 결정립계면과 같이 소재의 강화 효과를 야기하므로 초기 소재보다 여전히 높은 인장강도를 갖는 것으로 판단되었다. 그와 달리 600℃에서 열처리된 시편은 정적 재결정화가 발생하여 내부에 변형쌍정이 모두 없어진 것을 확인할 수 있다. 즉, 완전한 재결정 등축조직을 확인 할 수 있으며, 90% 이상이 15° 이상의 고경각 경계를 가지고 있다. 또한 개별 결정립 내부 색깔 변화가 거의 없이 단일 색상으로 이루어진 것은 내부에 존재하고 있던 전위가 완전히 풀림 처리된 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 타이타늄소재 튜브를 2.4 mm 까지 인발 후 최적 풀림 조건인 600℃에서 30분 간 열처리 후 공냉하면 초기 기계적 물성을 회복할 수 있다는 것을 의미한다.

앞서 언급한 조관튜브 형상에 따른 실제 FMCM 용접봉을 제조하기 위한 공정조건을 도출하기 위하여 Flux-Metal의 충전비율을 달리한 인발시험을 수행하였다. Fig.

Fig. 11 Cross sections of flux butt type tube shape after drawing (a) 50% (b) 70% (c) 90%

Fig. 12 Cross sections of flux overlap type tube shape after drawing (a) 50% (b) 70% (c) 90%

11는 butt-type 튜브 내부에 플럭스를 50%, 70%, 90% 채운 후 1.2 mm까지 인발 후 단면 형상을 나타낸 것이다.

50%만 채운 경우 플럭스가 한쪽 끝으로 쏠리는 현상을 관찰하였고, 이는 내부가 50%만 채워져 있으므로 빈공간이 많이 발생한 문제라고 판단되었다. 플럭스의 분포를 70%, 90%로 증가시켜 인발 후 플럭스 분포에 미치는 영향을 분석한 결과, 플럭스의 양이 증가할수록 최종 튜브의 벽두께가 감소하는 한편 플럭스도 균일하게 분포되는 것을 관찰 할 수 있었다. 그러나, butt-type 튜브의 경우 플럭스의 양이 증가함에 따라 스트립의 겹침부가 많이 벌어지는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 용접봉 제조시 플럭스가 외부로 누출될 수 있는 문제점을 야기할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 12는 overlap-type 튜브 내부에 플럭스를 50%, 70%, 90% 충전 후 1.2 mm까지 인발 후 단면 형상을 관찰한 것이다. Overlap-type 튜브의 경우 내부에 50%의 플럭스를 채웠을 때 플럭스의 분포가 고르지 못하고 인발 초기 유출된 것을 관찰 할 수 있다. 반면 플럭스의 분포를 70% 및 90%로 변경하여 1.2 mm까지 인발을 실시한 결과 플럭스의 양이 증가할수록 최종 튜브의 벽두께가 감소하고 플럭스의 분포도 균일한 것을 관찰할 수 있었다. Overlap-type 튜브의 경우 스트립의 겹침부가 완전히 닫혀져 있는 것을 확인할 수 있었고 이는 용접봉 제조시 플럭스가 외부로 누출되는 것을 방지할 수 있을 것이라고 판단되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 Ti-6Al-4V합금의 용접용 플럭스-메탈 코어드 와이어(Flux-metal cored wire, FMCW)를 제조하기 위한 인발공정에 미치는 공정변수의 영향을 조사하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) FMCW인발의 유한해석결과welded tube의 경우 butt tube 및 overlap tube보다 내부 및 외부의 변형을 및 손상값이 상당히 높을 것을 확인할 수 있었다.

2) Welded tube를 활용하여 Flux-Metal 충전시 인발과정에서 균열 및 터짐현상으로 충전된 Flux-Metal이 유출될 수 있어 FMCW로 제조 시 적합하지 않은 것을 확인하였다.

3) FMCW 인발과정 중 중간 어닐링공정은 인발시험편의 파단을 방지하는 중요한 공정으로 변형에 의해 발생한 변형상정을 완전히 제거할 수 있는 조건으로 600℃에서 30분을 최적 조건으로 제시하였다.

4) Flux-Metal 혼합재 분율이 미치는 영향을 분석하기 위하여 Flux-Metal을 50%, 70%, 90% 로 충전하여 인발실험을 실시한 결과, 조관공정으로 제조된 overlap-type 튜브를 사용하고 플럭스-메탈 혼합재를 70%이상 충전할 경우 혼합재가 인발후에도 균일하게 유지됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부/방위사업청 민군기술협력사업(No. 16-CM-MA-10)의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 대해 감사드립니다.

ORCID: Seong-Woo Choi: <https://orcid.org/0000-0003-2167-3792>

ORCID: Namhyun Kang: <https://orcid.org/0000-0002-9460-5128>

ORCID: Jong-Taek Yeom: <http://orcid.org/0000-0002-4714-1690>

References

1. M. Geetha , A.K. Singh , R. Asokamani, A.K. Gogia, Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants A review, *Progress in Materials Science*, 54 (2009), 397425
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004>
2. SeongHwan Min, Sungyong An, Jitae Park, Youngdo Park, Namhyun Kang, Effects of GTAW Pulse Condition on Penetration, Discoloration and Bending Property for Titanium Tube, *Journal of Welding and Joining*, 32(6) (2014), 47-55
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.6.47>
3. Duck-soo Kang, Kwang-jin Lee, Recent R&D status on friction stir welding of Ti and its alloys, *Journal of Welding and Joining*, 33(2) (2015), 1-7
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.2.1>
4. M. Niinomi, Mechanical properties of biomedical titanium alloys, *Mater. Sci. & Eng. A*, 243, 231 (1998)
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00806-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00806-X)
5. Yool Byun, Sangwon Lee, Changee Park, Jongtaek Yeom, Namhyun Kang, Jaekeun Hong, The Effects of PWHT

- on Tensile Properties and Microstructures for Laser Welds of Ti-6Al-4V Alloys, *Journal of Welding and Joining*, 35(4) (2017), 1-5
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.4.1>
6. Hee-Dae Im, Chang-Hyun Choi, Jae-Heon Jung, Woong Kil, The Latest Technology Development Tends of Flux Cored Wire, *Journal of Welding and Joining*, 34(6) (2016), 1-10
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.6.1>
  7. Tae-Hoon Kim, Yoon-Sang Lee, Woo-Hyun Chung, Development of Welding Consumables for GMAW and FCAW, *Journal of KWJS*, 26(2) (2008), 1-4
  8. Tea-Hoon Kim, Chul-Gyu Park, Development of Welding Consumables for GMAW and FCAW, *Journal of Welding and Joining*, 35(6) (2017), 96-100
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.6.14>
  9. D. Kang, N. Koga, M. Sakata, N. Nakada, T. Tsuchiyama, S. Takaki, Enhanced work hardening by redistribution of oxygen in ($\alpha+\beta$)-type Ti-4Cr-0.2O Alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 606 (2014), 101-107
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.076>
  10. Byoung Hyun Yoon, Suk Hwan Kim, Woong-Seong Chang, Recent Trends of Welding Technology Ti and Ti Alloys, *Journal of KWJS*, 25(5) (2007), 22-28
  11. You Hwan Lee, Jong taek Yeom, Nho Kwang Park, Seong Seok Hong, In Ok Shim, Sang Moo Hwang, Chong Soo Lee, Prediction of Microstructure During High Temperature Forming of Ti-6Al-4V Alloy, *J. Kor. Inst. Met & Mater.* 43(12) (2005), 847-859
  12. Yu Zhang, Yutaka S. Sato, Hiroyuki Kokawa, Seung Hwan C Park, Satoshi Hirano, Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welds, *Materials Science and Engineering A*, 485(1-2) (2008), 448-455
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.08.051>
  13. Y. T. Lee and Y. T. Hyun, Effect of Thermomechanical Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-1100 and IMI 834, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* 30(7) (1992), 862
  14. F. Wagner, N. Bozzolo, Van Landuyt, T. Grosdidier, Evolution of recrystallisation texture and microstructure in low alloyed titanium sheets, *Acta Mater.* 50(5) (2002), 1245-1259
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00427-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00427-X)
  15. Geleji, Bildsame Formung der metalle in Rechnug und Versuch, Berlin, (1960)
  16. S.H. Kim, K.H. Lee, S.B. Lee, J.T. Yeom, C.H. Park, B.M. Kim, Prediction of Shape Recovery for Ni-Ti SMA Wire after Drawing, *Transactions of Materials Processing*, 22(8) (2013), 470-476
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2013.22.8.470>
  17. Peter Christiansen, Chris V. Nielsen, Paulo A.F. Martins, Neils Bay, Predicting the onset of cracks in bulk metal forming by ductile damage criteria, *Procedia Engineering*, 207 (2017), 2048- 2053
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1106>
  18. C.C. Chen, S. I. Oh, S. Kobayashi, Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing-Part 1: Deformation Mechanics of Extrusion and Drawing, *Journal of Engineering for Industry*, 101(1) (1979), 23-35
<https://doi.org/10.1115/1.3439470>
  19. T. Seshacharyulu, S.C. Medeiros, J.T. Morgan, J.C. Malas, W.G. Frazier, Y.V.R.K. Prasad, Hot deformation and microstructural damage mechanisms in extra-low interstitial (ELI) grade Ti-6Al-4V, *Mater. Sci. Eng. A*, 279 (1-2) (2000), 289-299
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00173-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00173-2)
  20. A.J. Beaudoin, R. Srinivasan, S.L. Semiatin, Microstructure modeling and prediction during thermomechanical processing, *JOM*, 54,(1) (2002), 25-29
<https://doi.org/10.1007/BF02822601>