



Ceyhun Köse, Engin Karaca

Gaziosmanpaşa University, Tokat-Turkey
ceyhunia@gmail.com; engin.karaca@gop.edu.tr

<http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2017.12.3.2A0121>

Ti6Al4V ALAŞIMININ FİBER LAZER KAYNAK KABİLİYETİ

ÖZ

Bu çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımı levhalar fiber lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Farklı ısı girdisi şartlarının, fiber lazer kaynaklı birleştirmelerin metalurjik ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Yüksek ısı girdisi ile birleştirilen numunenin kaynak metalinde düşük ısı girdisiyle birleştirilen numunenin mikroyapısına göre bir miktar tane irileşmesi meydana geldiği, kaynak metalinde birincil α yapılarının hacim oranının arttığı gözlenmiştir. Düşük ısı girdisiyle birleştirilen numunenin kaynak metali mikroyapısı basketweave ya da asiküler α' ve tane sınırlarında birincil β tanelerinden meydana gelmiştir. Düşük ısı girdisiyle birleştirilen numunenin çekme dayanımı, yüksek ısı girdisiyle birleştirilen numuneye göre yüksek bulunurken sünekliği daha az bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Titanyum, Ti6Al4V Alaşımı, Mikroyapı, Fiber Lazer Kaynak, Mekanik Özellikler

FIBER LASER WELDABILITY OF Ti6Al4V ALLOY

ABSTRACT

Ti6Al4V titanium alloy plates were joined using fiber laser welding method in the present study. Effects of different heat input conditions on metallurgical and mechanical properties of fiber laser welded joints were investigated. Some grain coarsening was observed in microstructure of weld metal in sample joined using high heat input compared to that using low heat input, and volume rates of primary α structure increased in weld metal. Microstructure of weld metal in sample joined using low heat input was made of basket-weave or acicular α' grains and prior- β grains. Tensile strength of samples joined using low heat input were higher than that joined using high heat input, but its ductility was lower.

Keywords: Titanium, Ti6Al4V Alloy, Microstructure, Fiber Laser Welding, Mechanical Properties

How to Cite:

Köse, C. ve Karaca, E., (2017). Ti6Al4V Alaşımının Fiber Lazer Kaynak Kabiliyeti, **Technological Applied Sciences (NWSATAS)**, 12(3):140-152, DOI: 10.12739/NWSA.2017.12.3.2A0121.



1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Titanyum alaşımları arasında Ti6Al4V alaşımı en çok kullanılan ve tercih edilen alaşım türüdür. Ti6Al4V alaşımı $\alpha+\beta$ alaşım grubundandır, alüminyum α dengeleyici, vanadyum ise β dengeleyicidir [1]. Düşük yoğunluk, ısı direnci, yüksek mekaniksel dayanım, korozyon dayanımı, biyouyumluluk özellikleri nedeniyle Ti6Al4V alaşımı çok geniş bir kullanım alanına sahiptir [1 ve 4]. Ti6Al4V alaşımı, jet motorları, uzay araçları, füze yapımı, otomotiv endüstrisi, basınç kazanı, ortodonti, medikal implant ve cerrahi aletlerin yapımı gibi pek çok uygulamalarda kullanılmaktadır [5]. Ti6Al4V alaşımı, TIG, sürtünme kaynağı, sürtünme-karıştırma kaynağı, plazma ark, elektron ışın, lazer kaynağı gibi pek çok yöntemle birleştirilebilmektedir [1]. Ancak, bu malzemelerin kaynağında bazı zorluklarla karşılaşmaktadır. Titanyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmeleri yüksek ısı girdisiyle gerçekleştirilmesi durumunda yüksek miktarda distorsiyon ve yüksek kontaminasyon riski meydana gelebilmektedir. Ti6Al4V kaynaklı birleştirmelerinde 500°C'nin üzerine çıktığında, kaynak dikişinde oksijen, nitrojen, hidrojen gibi zararlı gaz absorpsiyonu riski artmakta ve mekanik dayanımda düşüşler yaşanabilmektedir [6]. Titanyum ve alaşımlarının kaynağında yüksek ısı girdisine bağlı yavaş soğuma şartlarında ise, kaynak dikişinde tane irileşmesi ve porozite oluşumları meydana gelmektedir [7].

Tane irileşmesi ve porozite oluşumları özellikle kaynaklı birleştirmelerin mekaniksel dayanımında düşüşe neden olacağı bilinmektedir. Titanyum ve alaşımlarının kaynağında, kaynak bölgesine iletilen ısı girdisinin azaltılmasıyla birlikte soğuma hızının arttırılması, dar bir kaynak dikiş biçiminin ve ince tanelerden oluşan bir mikroyapının elde edilmesi önerilmektedir. Çok hızlı soğuma şartlarında ise, kaynak metali mikroyapısının tamamen martenzitik yapıdan oluşum göstermesi nedeniyle tokluk değerlerinde düşüşler yaşanacağına da özellikle dikkat çekilmektedir [8]. Lazer kaynak yöntemi düşük ısı girdisi, yüksek yoğunlaşma enerjisi, yüksek kaynak ilerleme hızı, dar kaynak bölgesi, derin nüfuziyetli birleştirmeler elde edilebilmesi, yüksek mekanik dayanım, düşük distorsiyon ve ilave metal kullanmadan kaynak yapabileme imkanından dolayı geleneksel kaynak yöntemlerinden ayrılır [9 ve 16]. Fiber lazer kaynak yöntemi ise; düşük ışın sapma oranı, fileksibl ışın dağıtımı, düşük bakım maliyeti, yüksek verimlilik ve yüksek kaliteli kaynaklı birleştirmeler sunmaktadır [1 ve 17]. Geleneksel kaynak yöntemlerine göre, lazer kaynağı ile ısı girdisi kontrol altına alınarak, Ti6Al4V alaşımının kaynaklı birleştirmelerin metalurjik özellikleri ve mekaniksel dayanımı istenilen düzeyde gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, Ti6Al4V levhalar robotik Nd:YAG fiber lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Ti6Al4V lazer kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı ve mekaniksel özelliklerine lazer kaynak gücünün etkisi araştırılmıştır.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Ti6Al4V alaşımı yüksek dayanım, korozyona direnci, biyouyumluluk, düşük yoğunluk gibi özelliklere sahip olması nedeniyle özellikle uzay, havacılık, savunma sanayi, otomotiv ve medikal endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahip bir malzemedir. Lazer kaynağı ise hızlı ve mukavemetli birleştirmeler sağlaması nedeniyle endüstride önemli bir yer edinmiştir. Günümüzde titanyum alaşımlarının lazer kaynaklı birleştirmelerine ait çalışmaların sıklığı dikkati çekmektedir. Bu çalışmada, Titanyum alaşımları içerisinde en yaygın kullanım oranına sahip olan Ti6Al4V alaşımının fiber lazer kaynak

yöntemiyle birleştirilebilirliği araştırılarak özellikle ülkemiz endüstrisine rehberlik etmesi amaçlanmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDY)

3.1. Malzeme ve Kaynak İşlemi (Materials and Welding Process)

Bu çalışmada, endüstrinin birçok alanında tercih edilen, kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilen Ti6Al4V alaşımı kullanılmıştır.

Tablo 1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (% ağırlık)
(Table 1. The chemical composition of Ti6Al4V (wt.%))

%C	Al	V	Fe	N	O	H	Ti
0.010	6.02	4.14	0.098	0.007	0.12	0.0020	Kalan

Deney malzemesi, 100x330x4mm³ ölçülerinde kaynak işlemine hazır duruma getirilmiştir. Deney numuneleri Tablo 2'de belirtilen parametrelerle, 4kW gücüne sahip FANUC ROBOT R-2000 iB 210F marka Nd:YAG fiber lazer kaynak makinesiyle yatay pozisyonda ve ilave metal kullanılmadan birleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Fiber lazer kaynak makinesi
(Figure 1. The Fiber laser welding machine)

Tablo 2. Lazer kaynak parametreleri
(Table 2. The laser welding parameters)

Numune	Lazer Gücü (W)	Kaynak Hızı (mm/s)	Koruyucu Gaz	Gaz Basıncı (bar)	Odak Mesafesi (mm)	Isı Girdisi (kJ/mm)
A	1500	6	He	1	190	0.250
B	2000	6	He	1	190	0.333

3.2. Mekanik Testler ve Mikroyapı Karakterizasyonu (Mechanical Tests and Microstructure Characterizations)

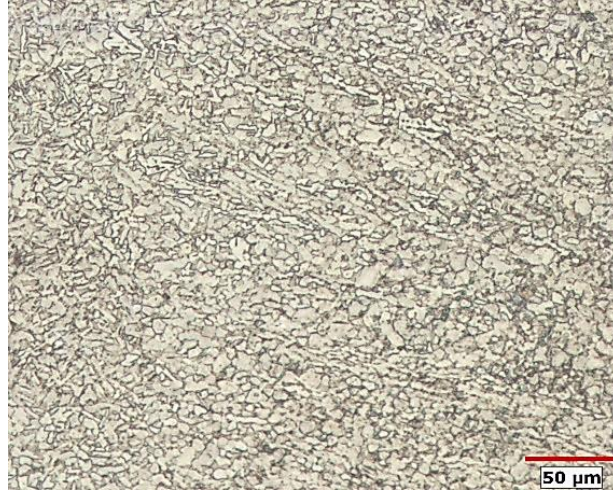
Birleştirmelerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için her bir parametre için 4'er adet çekme testi numuneleri ISO 4136: 2012, çentik darbe testi numuneleri ISO 9016: 2012 standartlarında hazırlanmıştır. Çekme testi INSTRON marka 100kN kapasiteli çekme test cihazında 10mm/dk ilerleme hızında, darbe çentik testi ise oda sıcaklığında ALŞA marka deney cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümü ise, GALILEO marka ölçüm cihazında uca 15 saniye 200g yük uygulanarak belirlenmiştir. Lazer kaynaklı numunelerinin mikroyapı

değişimlerini karakterize etmek için Kroll's solüsyonu ile dağlama işlemi prosedürü uygulanmıştır. Mikroyapı incelemeleri 5x-100x büyütmeli NIKON marka optik mikroskop, JEOL JSM 6060 LV ve JEOL JSM 7001 LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve OXFORD X-MAX 80 (EDS) donanımı ile gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULT AND DISCUSSIONS)

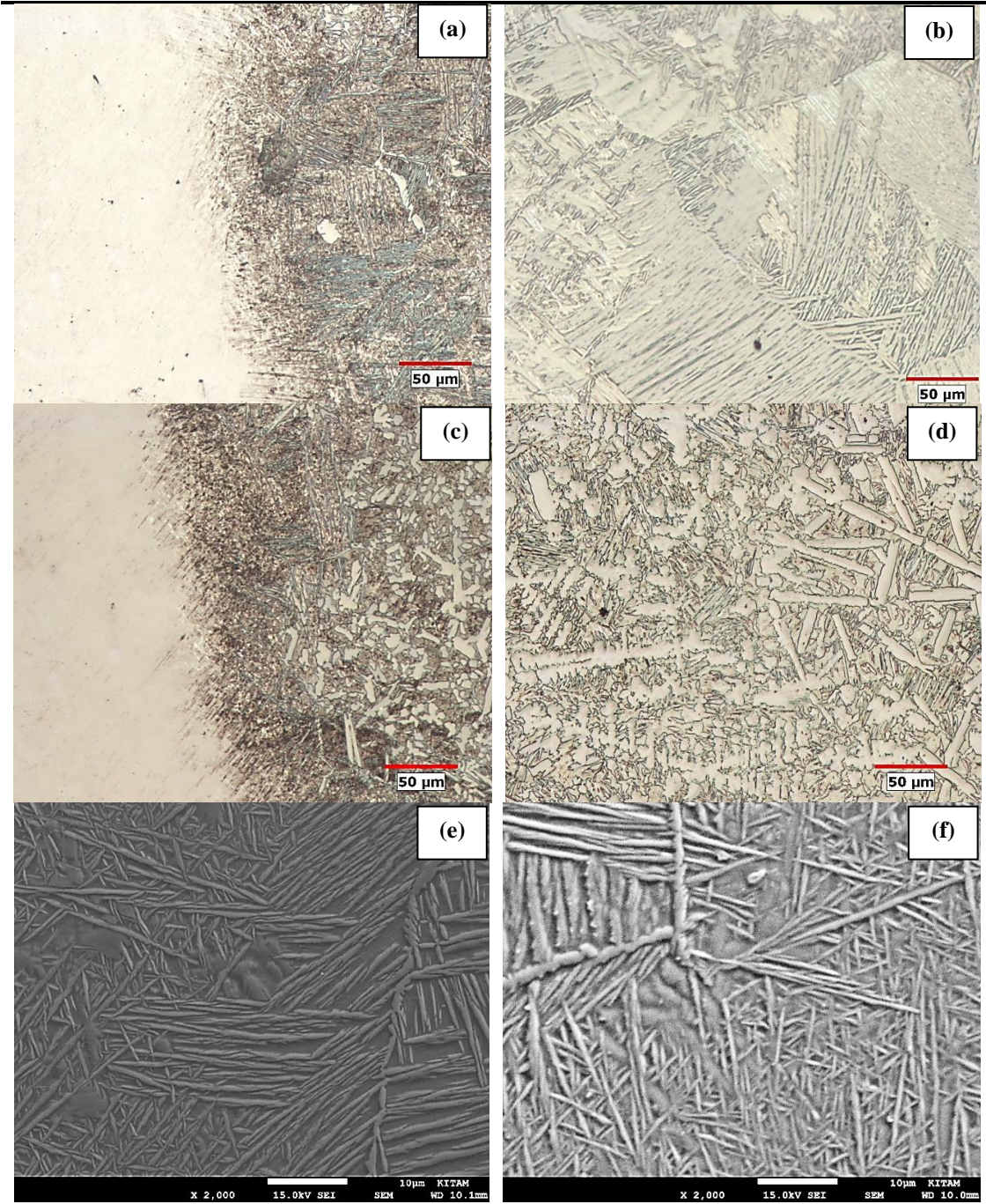
4.1. Mikroyapı İncelemeleri (Microstructural Examinations)

Ana malzeme mikroyapısının eş eksenli α tanelerinden (açık renkli tane-Hekzagonal Sıkı Paket) ve tane sınırlarındaki β tanelerinden (koyu renkli tane-Hacim Merkezli Kübik) meydana geldiği görülmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Ana malzemenin mikroyapısı
(Figure 2. Microstructure image of base metal)

Ana malzemedeki eş eksenli yapı kırılma tokluğunu arttırmakta ve dayanımı desteklemektedir [1 ve 18]. İlave kaynak metali kullanılmamasına bağlı olarak ITAB ve kaynak metali mikroyapısı ana metalin ergitilmesi ile oluşum göstermiştir. İlave kaynak metali kullanılması durumunda, ITAB ve kaynak metali mikroyapısında ana metale göre büyük farklılıklar oluşacağı bilinmektedir. Alaşımın kimyasal kompozisyonuna ve soğuma oranına göre mikroyapı şekil alacaktır. Lazer kaynağının karakteristik özelliği olan düşük ısı girdisine bağlı hızlı soğuma oluşturması neticesinde ITAB ve kaynak metalinde ince taneli mikroyapı oluşumu meydana gelmiştir (Şekil 3). Ancak, yüksek lazer gücü veya çok yavaş kaynak hızıyla gerçekleştirilen birleştirmelerde tane irileşmesi beklenebilir. Kaynak dikişinin katılaşma süreci boyunca, β taneleri ısı akışı yönünde büyüme gösterir [19].

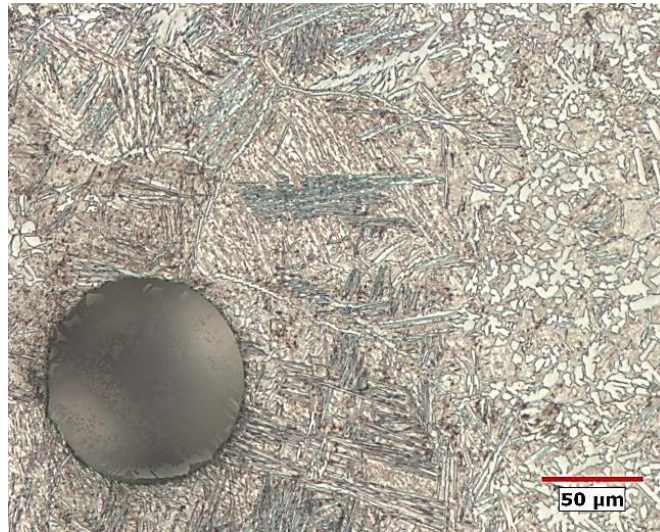


Şekil 3. Kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı görüntüleri, A numunesine ait (a) ITAB, (b) kaynak metali görüntüsü, B numunesine ait (c) ITAB, (d) kaynak metali görüntüsü, (e) ve (f) A numunesinin kaynak metali SEM görüntüsü

(Figure 3. Microstructure images of welded joint, (a) HAZ, (b) weld metal of sample A, (e) and (f) SEM images of weld metal of sample B)

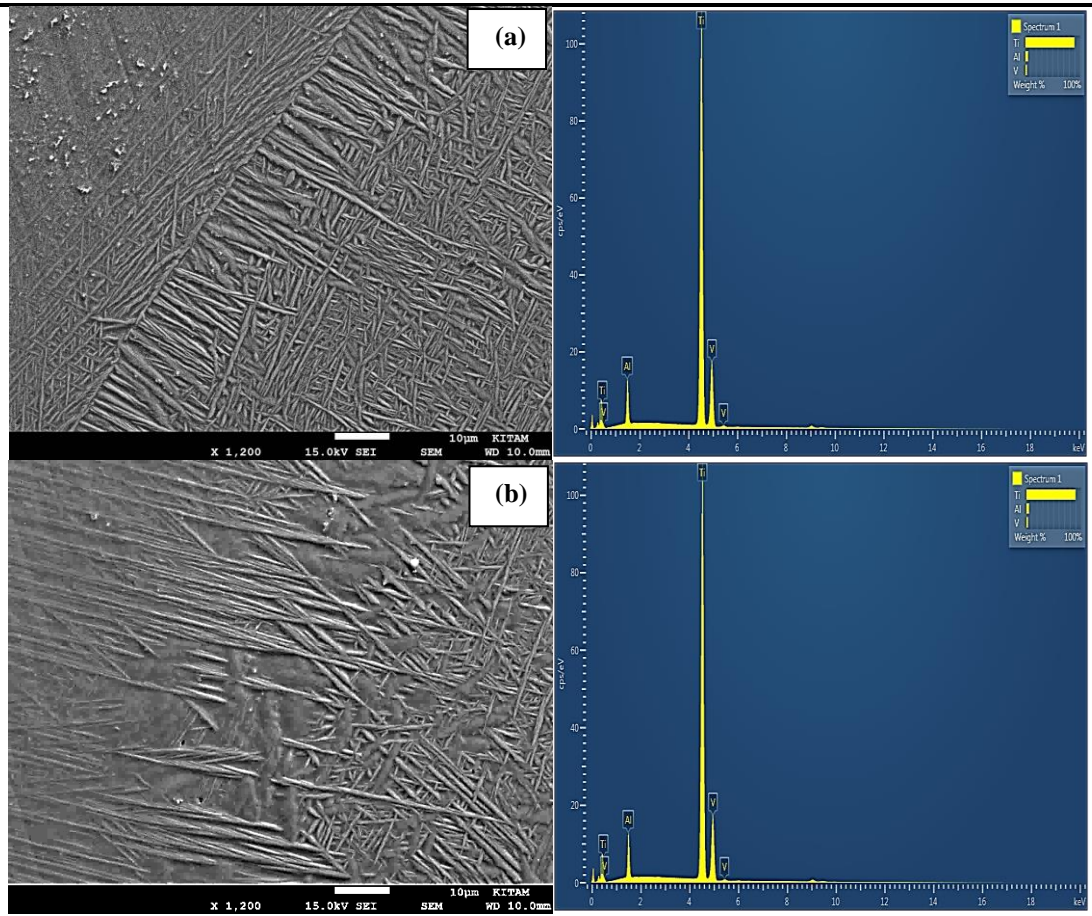
Kaynaklı birleştirmelerin mikroyapıları incelendiğinde, ITAB yapısının hızlı soğumadan dolayı ince asiküler α' martenzit ve birincil α yapılarından meydana geldiği görülmektedir (Şekil 3). Beta geçiş sıcaklığı altındaki soğutmalarda bu tür mikroyapı ile karşılaşilmektedir [20]. Ti6Al4V alaşımında tamamen martenzitik mikroyapı elde edilebilmesi için 410°C/s 'den yüksek soğuma oranının

gerçekleşmesi gerektiği araştırmacılar tarafından bildirilmektedir [1 ve 21]. Araştırmacılar, ana metalin, kaynak sürecinde β geçiş sıcaklığının üzerinde ısıtıldığı zaman hızlı soğuma prosesi gerçekleşmesi durumunda, yüksek sıcaklık β fazından α' martenzit fazı ile birlikte basketweave yapısının oluşum göstereceğini bildirmektedir [22]. 410°C/s 'den daha düşük soğuma oranlarında ise dönüşmüş α fazı tercihen birincil β tane sınırında oluşum gösterecektir. Lazer kaynak parametrelerinin değişimine yani ısı girdisi değişimine bağlı olarak oluşan soğuma oranı, ITAB genişliği üzerinde etkili olduğu Şekil 3'den görülebilmektedir. Düşük ısı girdisi ile birleştirme nedeniyle dar bir ITAB oluşmuştur. Yüksek ısı girdisiyle birleştirilen numunenin ITAB mikroyapısında kaynak termal çevrimin etkisiyle bir miktar tane irileşmesi gerçekleşmiştir. Kaynak metalinin mikroyapısının özellikle düşük ısı girdisiyle birleştirilen numune de basketweave ya da asiküler α' ve tane sınırlarında birincil β tanelerinden meydana geldiği görülmektedir. Lazer kaynak yönteminde düşük ısı girdisine bağlı hızlı soğuma neticesinde, martenzitik yapı içerisinde β fazının difüzyonsuz dönüşümü gerçekleşir. Kaynak metalinde, ITAB'a göre küçük miktarlarda kabalaşmış sütünsal β tane yapıları oluşum göstermiştir. Yüksek ısı girdisi ile birleştirilen numunenin kaynak metalinde ise birincil α yapılarının hacim oranının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, kaynak metalinin mikroyapı görüntüsünde porozite oluşumları gözlenmiştir (Şekil 4). Lazer kaynaklı titanyum alaşımlarında gözenek oluşumuyla genellikle karşılaşmaktadır. Gaz tipi poroziteler özellikle, kaynak dikişinin katılaşması esnasında, kaynak havuzundaki hidrojenin uzaklaştırılmaması nedeniyle oluşum göstermektedir [1 ve 23]. Gözenek oluşumu nedeniyle, kaynaklı birleştirmelerin mekanik dayanımında düşüşler beklenir.



Şekil 4. B numunesinin kaynak metalinde porozite oluşumu
(Figure 4. Porosity formation in weld metal of sample B)

Kaynaklı numunelerden gerçekleştirilen EDS analizleri sonuçları incelendiğinde (Şekil 5), ana metal, ITAB ve kaynak metalinin bölgelerinden önemli derecede element kayıplarının yaşanmadığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan, ısı girdisinin lazer kaynaklı birleştirmeler üzerinde olumsuz bir etki oluşturmadığı açık bir şekilde söylenebilir.



Şekil 5. Lazer kaynaklı A ve B numunelerinin ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgelerinden EDS analizi
(Figure 5. EDS analysis of base metal, HAZ and weld metal, respectively (a) Sample A, (b) Sample B)

4.2. Çekme Deneyi (Tensile Test)

Ana malzeme ve lazer kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi uygulanmış ve sonuçlar Tablo 3'de gösterilmiştir.

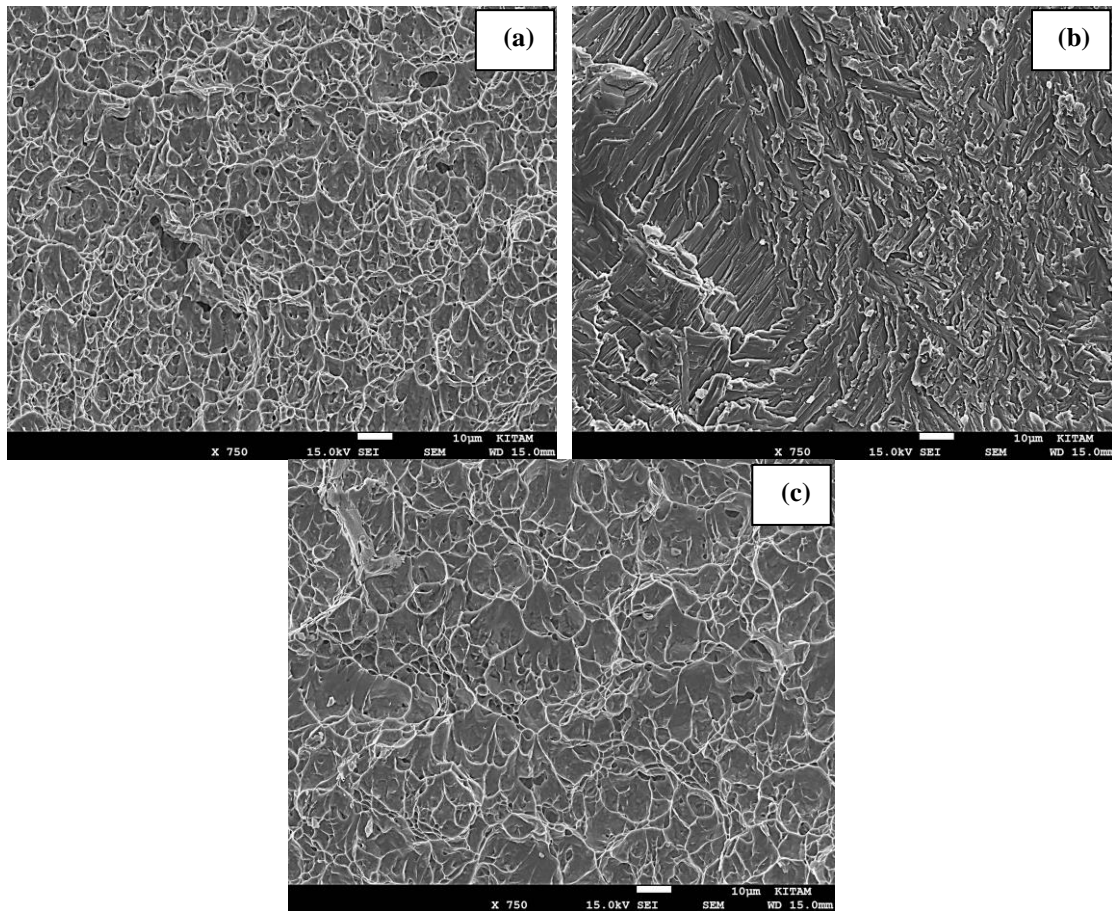
Tablo 3. Ana malzeme ve lazer kaynaklı numunelerin çekme deneyi sonuçları

(Table 3. The tensile test results of base metal and laser welded samples)

Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Ana malzeme	1057	965	18.5
A	830	720	8.5
B	780	675	8.8

Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, ana malzemenin çekme dayanımı, akma dayanımı ve yüzde uzama değerleri, farklı ısı girdisiyle birleştirilen lazer kaynaklı numunelerden daha yüksek bulunmuştur. Kaynaklı birleştirmelerden ana malzemeye kıyasla daha düşük mekaniksel dayanım elde edilmesine nedenler olarak, kaynak dikişinde meydana gelen poroziteler, underfills (kaynak dikişinde çöküntü), mikroçatlaklar ve mikroyapısal dönüşümler sayılabilir. Düşük ısı girdisiyle birleştirilen numunenin (A numunesi) çekme ve akma dayanımı, yüksek ısı girdisiyle birleştirilen numunenin (B numunesi)

çekme ve akma dayanımından yüksek, fakat yüzde uzama oranı daha düşük bulunmuştur. Kaynak bölgesine iletilen ısı girdisinin artış göstermesi sonucunda, tane boyutlarında meydana gelen irileşmeler çekme ve akma dayanımında küçük miktarda da olsa düşüşe neden olmuştur. Kaynaklı $\alpha+\beta$ alaşımlarında düşük süneklik, irileşmiş birincil β oranına ve tane içi asiküler mikroyapı oluşumuna bağlıdır [24]. Kaynak dikişinin katılaşması esnasında oluşabilecek mikrosegregasyonlar da sünekliği azaltan etmenlerdendir [1]. Çekme deneyi sonrası ana malzeme ve lazer kaynaklı numunelerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 6), çukurcuk (dimples) şeklindeki yüzey morfolojisinden anlaşılacağı üzere ana malzemede ve B numunesinde titanyuma ait tipik kırılma biçimi olan sünek kırılma biçiminde, A numunesinde ise klivaj (quasi-cleavage) kırılmayla birlikte kırılmanın tanelerarası gerçekleştiği açık bir şekilde görülebilmektedir. Kaynaklı birleştirmelerin kırılma yüzeyi görüntülerinde herhangi bir inklüzyon oluşumu gözlenmemiştir.

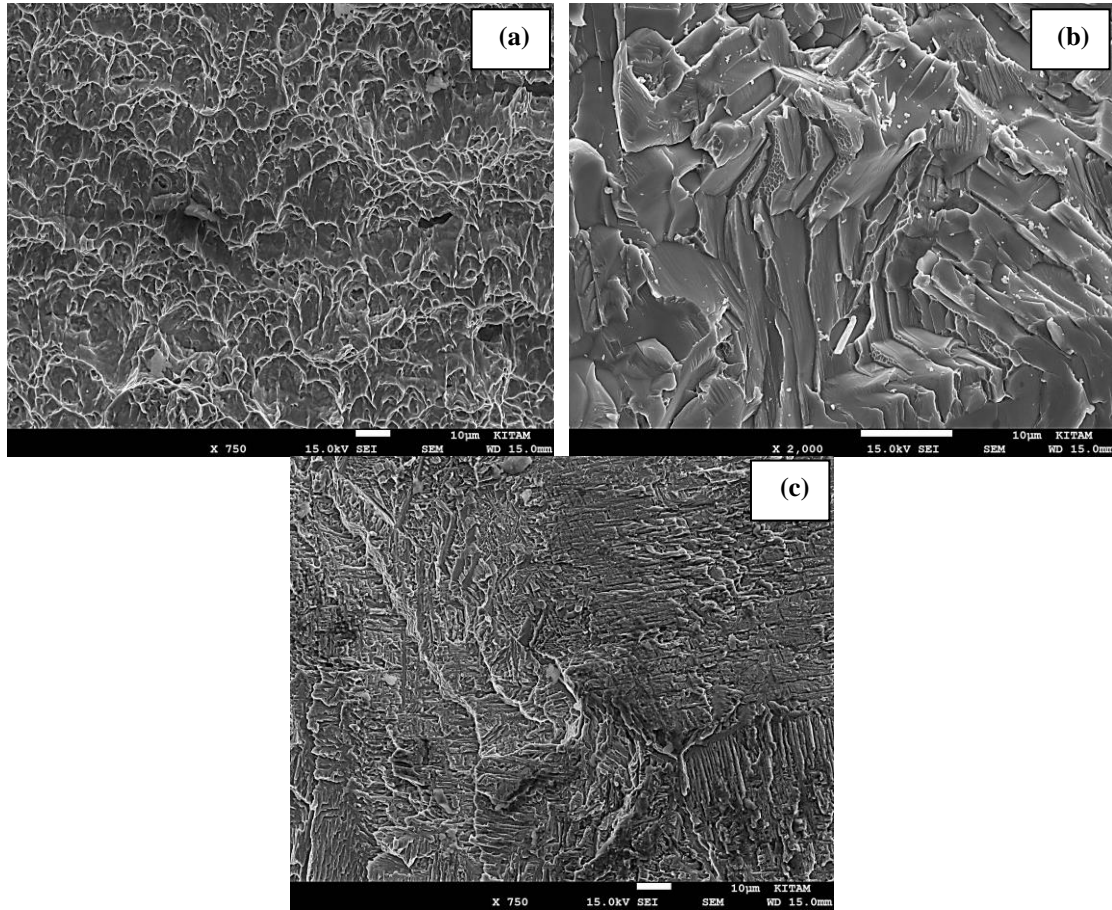


Şekil 6. Çekme deneyi sonrası ana malzeme (a), A numunesi (b) ve B numunesinin (c) kırılma yüzeyi SEM görüntüsü
(Figure 6. Fracture surface images of base metal and laser welded samples after the tensile test, (a) Base metal, (b) Sample A, (c) Sample B)

4.3. Çentik Darbe Testi (Charpy Impact Test)

Ana malzeme ve lazer kaynaklı numunelerin oda sıcaklığında darbe dayanımları belirlenmiştir. Ana malzemenin darbe tokluğu, lazer kaynaklı numunelerden daha yüksek bulunmuştur (17J). Düşük kaynak hızıyla diğer bir deyişle yüksek ısı girdisiyle birleştirilen numunenin darbe tokluğu, düşük ısı girdili numuneden daha yüksek

bulunmuştur (15J ve 14J). Bu sonuçlara benzer sonuçlar elde eden araştırmacılar da, titanyum alaşımlarının darbe tokluğunu arttırmak için, düşük kaynak hızı veya yüksek lazer gücü kullanılarak, ısı girdisinin arttırılmasıyla birlikte martenzit yapısının asiküler α veya Widmanstatten α tane yapısına dönüştürülmesi gerektiğini vurgulamaktadır [25]. Soğuma hızı $\alpha+\beta$ alaşımlarının mekaniksel özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Hızlı soğuma koşullarında ince yapılı α plateletlerin oluşmasıyla toklukta düşüşlerin yaşanacağı, düşük soğuma şartlarında ise α plateletlerinin irileşmesi ile birlikte çatlak yayınının yönü değiştirilerek toklukta iyileşmelerin yaşanacağı araştırmacılar tarafından vurgulanmaktadır [1 ve 26]. Darbe deneyi sonucunda ana malzeme ve kaynaklı numunelerin kırılma yüzeyleri SEM ile incelenmiştir (Şekil 7). Ana malzeme sünek kırılma biçiminde, lazer kaynaklı numunelerin ise tanelerarası kırılma ile birlikte klivaj kırılma biçiminde kırılmaların gerçekleştiği çukurcuk (dimples) azalışlarından açık bir şekilde anlaşılmaktadır.

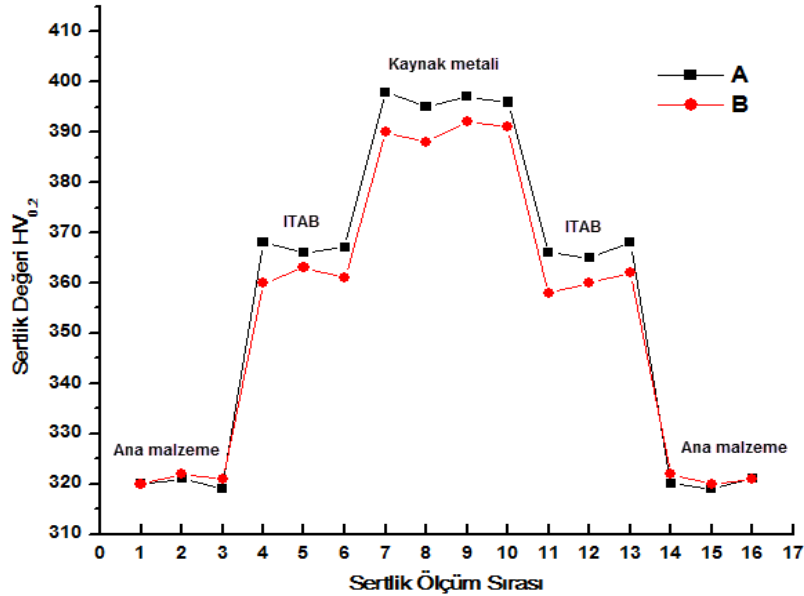


Şekil 7. Çentik darbe deneyi sonrası ana malzeme (a), A numunesi (b) ve B numunesinin (c) kırılma yüzeyi SEM görüntüsü
(Figure 7. Fracture surface images of base metal and laser welded samples after The Charpy V-notch impact test, (a) Base metal, (b) Sample A, (c) Sample A)

4.4. Mikrosertlik (Microhardness)

Lazer kaynağı geleneksel kaynak yöntemlerine göre yüksek güç yoğunluğuna sahip olması nedeniyle, düşük ısı girdisi ve hızlı katılaşma oluşturur ve böylelikle kaynaklı birleştirmelerde yüksek sertlik değerleri elde edilir. Kaynaklı birleştirmelerdeki sertlik

dağılımı mikroyapı ile doğrudan ilişkilidir, mikroyapıdaki martenzit yapısı, Ti6Al4V alaşımının ITAB ve kaynak metalinin sertlik artışıdaki en önemli faktördür. Farklı lazer gücüyle yani farklı ısı girdisi ile birleştirilen numunelerin ortalama sertlik değerleri incelendiğinde (Şekil 8), kaynak metal ve ITAB sertliğinin ana metalden daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. $\alpha+\beta$ ana malzeme tane yapısına göre ITAB ve kaynak metalinde daha sert ve ince asiküler α' martenzit tane yapısı oluşması bu sonuca neden olacağı araştırmacılar tarafından bildirilmiştir [27 ve 28].



Şekil 8. Kaynaklı birleştirmelerin sertlik dağılımları
(Figure 8. Microhardness distributions in the welded joints)

Lazer gücü arttıkça diğer bir deyişle ısı girdisi arttıkça, sertlik değerinde azalmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Isı girdisinin artışına bağlı olarak birincil β yapısının irileşmesi neticesinde sertlikte düşüşler meydana geleceği araştırmacılar tarafından bildirilmiştir [28]. Isı girdisinin azalması durumunda ise daha ince taneli α' yapısının meydana gelmesiyle sertlik artışı yaşanacağı vurgulanmaktadır [1 ve 23]. Araştırmacılar, kaynak metalinin ana metale göre sertlik artışına neden olarak, asiküler α' yapısının ve tane sınırlarının sahip olduğu yüksek yoğunluk dislokasyonlarını göstermektedir [22]. İki farklı lazer gücü parametresi için de, kaynak metal sertliği, ITAB'a göre daha yüksek değerlerde bulunmuştur. Kaynak metalinden ITAB'a doğru sertlikteki azalışa martenzit oranının ve Widmanstatten α yapısının azalmasının neden olduğu araştırmacılar tarafından bildirilmektedir [1 ve 29]. Sertlik sonuçlarına genel olarak bakıldığında, ITAB ve kaynak metal sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Sertlik sonuçlarının birbirine yakın olması, Ti6Al4V alaşımının ısı iletkenlik katsayısının (6.7W/mK) çok düşük olması ile ilişkilendirilmektedir [30]. Ti6Al4V alaşımının kaynak bölgesine iletilen ısı enerjisi yayılmadan önce, o bölgede daha uzun süre kalabilmektedir [30]. ITAB ve kaynak metal sertliğinin ana metale göre daha sert olması, ana metale göre daha dayanımlı birleştirmeler elde edilmesine neden olması beklenebilir. Sertlik sonuçları ile çekme dayanımı sonuçları arasında bir orantı olması beklenir. Ancak, bu çalışmada kaynak metal ve



ITAB'da görülen porozitelerin varlığı veya mikroçatlak oluşumları nedeniyle bu sonuca ulaşılammıştır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Ana malzeme mikroyapısı eşeksenli tanelerden oluşum gösterirken, hızlı soğumadan dolayı kaynak metali yapısı her iki kaynak parametresi için ağırlıkla martenzitik mikroyapı oluşumu göstermiştir. Yüksek ısı girdisi ile birleştirilen numunenin ITAB ve kaynak metalinde küçük miktarda tane irileşmesi oluşmuştur. Mikroyapıda bazı porozite oluşumları gözlenmiştir.
- Çekme testi sonucunda ana malzemenin dayanımı, lazer kaynaklı birleştirmelerden daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuca, kaynak dikişinde görülen porozitelerin neden olduğu düşünülmele birlikte kaynak dikişinde oluşması muhtemel underfill ve mikroçatlakların neden olduğu söylenebilir. Düşük ısı girdisiyle birleştirilen numunenin çekme ve akma dayanımı, yüksek ısı girdisiyle birleştirilen numunenin çekme ve akma dayanımından yüksek, fakat yüzde uzama oranı daha düşük bulunmuştur.
- Darbe testi sonucunda ise kaynaklı birleştirmelerin darbe dayanımları ana malzemeden daha düşük bulunmuştur. Yüksek lazer kaynak gücüyle diğer bir deyişle yüksek ısı girdisiyle birleştirilen numunenin darbe tokluğu, düşük ısı girdili numuneden daha yüksek bulunmuştur. Isı girdisinin artmasıyla birlikte, martenzit yapısının asiküler α veya Widmanstatten α tane yapısına dönüşümü darbe dayanımını arttıran etmenlerin başında geldiği bilinmektedir.
- Farklı ısı girdisi ile birleştirilen numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde, kaynak metali ve ITAB sertliğinin ana metalden daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. En sert bölge, kaynak metali olarak bulunmuştur. Lazer gücü arttıkça diğer bir deyişle ısı girdisi arttıkça, sertlik değerinde azalmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Isı girdisinin artışına bağlı olarak birincil β yapısının irileşmesi sertlik düşüşüne neden olduğu düşünülmektedir.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGEMENTS)

Yazarlar, katkılarından dolayı Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü değerli öğretim üyesi Prof.Dr. Zafer Tatlı'ya ve araştırma görevlilerine, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Fakültesi değerli öğretim üyesi Prof.Dr. Uğur Kölemen, Dr. Fikret Yılmaz ve araştırma görevlilerine, Samsun 19 Mayıs Üniversitesi KİTAM'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Köse, C. and Karaca, E., (2017). Robotic Nd:YAG Fiber Laser Welding of Ti-6Al-4V Alloy, Metals, Vol:7, pp:1-11.
2. Kahraman, N., (2007). The Influence of Welding Parameters on the Joint Strength of Resistance Spot-Welded Titanium Sheets, Mater.Des., Vol:28, pp:420-427.
3. Çalığülü, U., (2016). Ti6Al4V Alaşımının Gümüş Aratabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilebilirliği, Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, Vol:7, pp:577-586.
4. Yıldız, A., Kaya, Y., and Kahraman, N., (2016). Joint Properties and Microstructure of Diffusion-Bonded Grade 2 Titanium to AISI 430 Ferritic Stainless Steel Using Pure Ni Interlayer, Int J Adv Manuf Technol., Vol:86, pp:1287-1298.
5. Dikbaş, H. and Katı, N., (2015). Ti6Al4V Alaşımının PTA Kaynağında 1800W Kaynak Gücünde Birleştirilebilirliğin



- Araştırılması, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Dergisi, Vol:6, pp:19-30.
6. Gao, X.L., Zhang, L.J., Jing, L., and Zhang, J.X., (2013). A Comparative Study of Pulsed Nd:YAG Laser Welding and TIG Welding of Thin Ti6Al4V Titanium Alloy Plate, *Mat Sci Eng A.*, Vol:559, pp:14-21.
 7. Balasubramanian, T.S., Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., and Manickam, M.M., (2011). Influence of Welding Processes on Microstructure, Tensile and Impact Properties of Ti-6Al-4V Alloy Joints, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.*, Vol:6, pp:1253-1262.
 8. Murthy, K.K. and Sundaresan, S., (1998). Phase Transformations in a Welded Near- α Titanium Alloy as a Function of Weld Cooling Rate and Post-Weld Heat Treatment Conditions, *J. Mater. Sci.*, Vol:33, pp:817-826.
 9. Köse, C. and Kaçar, R., (2014). The Effect of Preheat & Post Weld Heat Treatment on the Laser Weldability of AISI 420 Martensitic Stainless Steel, *Mater. Des.*, Vol:64, pp:221-226.
 10. Köse, C. and Kaçar, R., (2014). Mechanical Properties of Laser Welded 2205 Duplex Stainless Steel, *Mater Test.*, Vol:54, pp:779-785.
 11. Köse, C. and Kaçar, R., (2015). Effect of Welding Speed on the Mechanical Properties and Microstructure of Laser Welded AISI 316L Stainless Steel, *J Fac Eng Archit Gaz.*, Vol:3, pp:225-235.
 12. Köse, C., Kaçar, R., Zorba, A., Bağirova, M., and Allahverdiyev, A.M., (2016). The Effect of CO₂ Laser Beam Welded AISI 316L Austenitic Stainless Steel on the Viability of Fibroblast Cells, *In Vitro, Mater Sci Eng C.*, Vol:60, pp:211-218.
 13. Köse, C. and Kaçar, R., (2016). In Vitro Bioactivity and Corrosion Properties of Laser Beam Welded Medical Grade AISI 316L Stainless Steel in Simulated Body Fluid, *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol:11, pp:2762-2777.
 14. Köse, C., (2016). An Investigation of the Surface Characterization of Laser Surface Remelted and Laser Beam Welded AISI 316L Stainless Steel, *Int. J. Electrochem. Sci.*, Vol:11, pp:3542-3554.
 15. Köse, C., (2016). Weldability of 5754 Aluminum Alloy Using a Pulsed Nd:YAG Micro Scale Laser, *Mater. Test.*, Vol:58, pp:963-969.
 16. Taskin, M., Caligulu, U., and Turkmen, M., (2011). X-ray Tests of AISI 430 and 304 Stainless Steels and AISI 1010 Low Carbon Steel Welded by CO₂ Laser Beam Welding, *Mater Test.*, Vol:53, pp:741-747.
 17. Quintino, L., Costa, A., Miranda, R., Yapp, D., Kumar, V., and Kong, C.J., (2007). Welding with High Power Fiber Lasers - A Preliminary Study, *Mater. Des.*, Vol:28, pp:1231-1237.
 18. Fu, P., Mao, Z., Zuo, C., Wang, Y., and Wang, C., (2014). Microstructures and Fatigue Properties of Electron Beam Welds with Beam Oscillation for Heavy Section TC4-DT Alloy, *Chin J Aeronaut.*, Vol:4, pp:1015-1021.
 19. Casalino, G., Mortello, M., and Campanelli, S.L., (2015). Ytterbium Fiber Laser Welding of Ti6Al4V Alloy, *J Manuf Process.*, Vol:20, pp:250-256.
 20. Wang, S.H., Wei, M.D., and Tsay, L.W., (2003). Tensile Properties of LBW Welds in Ti-6Al-4V Alloy at Evaluated Temperatures Below 450°C, *Mater. Lett.*, Vol:57, pp:1815-1823.
 21. Ahmed, T, and Rack, H.J., (1998). Phase Transformations During Cooling in $\alpha+\beta$ Titanium Alloys, *Mat Sci Eng A.*, Vol:1-2, pp:206-211.



22. Akman, E., Demir, A., Canel, T., and Sınmazçelik, T., (2009). Laser Welding of Ti6Al4V Titanium Alloys, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol:209, pp:3705-3713.
23. Kabir, A.S.H., Cao, X., Medraj, M., Wanjara, P., Cuddy, J., and Birur, A., (2010). Effect of welding speed and defocusing distance on the quality of laser welded Ti-6Al-4V. *Proceedings of the Materials Science and Technology (MS&T), Conference.* Houston, TX.
24. Sundaresan, S., Ram G.D.J., and Reddy, G.M., (1999). Microstructural Refinement of Weld Fusion Zones in a-b titanium Alloys Using Pulsed Current Welding, *Mat Sci Eng A.*, Vol:262, pp:88-100.
25. Barreda, J.L., Santamaria, F., Azpiroz, X., Irisarri, A.M., and Varona, J.M., (2001). Electron Beam Welded High Thickness Ti6Al4V Plates Using Filler Metal of Similar and Different Composition to the Base Plate, *Vacuum*, Vol:62, pp:143-150.
26. Yunk, W.K.C., Ralph, B., Lee, W.B., and Fenn, R., (1997). An Investigation into Welding Parameters Affecting the Tensile Properties of Titanium Welds, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol:63, pp:759-764.
27. Tsay, L.W. and Tsay, C.Y., (1997). The Effect of Microstructures on the Fatigue Crack Growth in Ti-6Al-4V Laser Welds, *In J Fatigue*, Vol:19, pp:713-720.
28. Mehdi, B., Badji, R., Ji, V., Allili, B, Deschaux-Beaume, F., and Soulie, F., (2016). Microstructure and Residual Stresses in Ti-6Al-4V Alloy Pulsed and Unpulsed TIG Welds, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol:231, pp:441-448.
29. Kabir, A.S.H., Cao, X., Gholipour, J., Wanjara, P., Cuddy, J., Birur, A., and Medraj, M., (2012). Effect of Postweld Heat Treatment on Microstructure, Hardness, and Tensile Properties of Laser-Welded Ti-6Al-4V, *Metall and Mat Trans A*, Vol:43, pp:4171-4184.
30. Caiazzo, F., Curcio, F., Daurelio, G., and Minutolo, F.M.C., (2004). Ti6Al4V Sheets Lap and Butt Joints Carried Out by CO₂ Laser: Mechanical and Morphological Characterization, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol:149, pp:546-552.