

Nd:YAG lazer kaynağı ile birleştirilen Ti6Al4V alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine ısıl işlemlerin etkileri

Ceyhun KÖSE^{1,*}, Engin KARACA²

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 60150, Tokat.

² Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 60150, Tokat.

Geliş Tarihi (Received Date): 03.04.2018
Kabul Tarihi (Accepted Date): 15.11.2018

Özet

Bu çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımı levhalar Nd:YAG lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Lazer kaynaklı birleştirmelere kaynak öncesi ve sonrası ısıl işlem uygulanmıştır. Ön ısıtma uygulanan lazer kaynaklı numunelere, kaynak sonrası gerilim giderme, solüsyon ısıl işlemi ve yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem şartlarının, lazer kaynaklı birleştirmelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numunelerin mikroyapısı yaşlandırma uygulanmayan numunelere göre daha kaba taneli bir yapıdan oluşum gösterdiği gözlenmiştir. Yaşlandırma uygulanan numunelerde süneklik ve tokluk değerlerinde artış gözlenirken yaşlandırma uygulanmayan numunelerin sertlik ve çekme dayanımlarında artış tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Titanyum alaşımı, lazer kaynak, ısıl işlem, mikroyapı, mekanik özellikler.

Effects of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of Nd:YAG laser beam welded Ti6Al4V alloy

Abstract

In the present study, Ti6Al4V titanium alloy plates were joined using Nd:YAG laser beam welding method. Pre- and post-weld heat treatments were applied to laser welded

* Ceyhun KÖSE, ceyhun.kose@gop.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3907-2226>
Engin KARACA, engin.karaca@gop.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-0446-8463>

joints. After welding stress relieving, solution heat treatment and ageing were also applied to preheated laser welded samples. Effects of heat treatment conditions on microstructure and mechanical properties of laser beam welded joints were studied. The results showed that the aged samples were found to be made of coarsened grains compared to microstructures of non-aged samples. There were increases in ductility and toughness of samples applied to ageing increased, while hardness and tensile strength of non-aged samples were higher.

Keywords: *Titanium alloy, laser welding, heat treatment, microstructure, mechanical properties.*

1. Giriş

Titanyum alaşımları, α (alfa), $\alpha+\beta$ alaşımları ve β (beta) alaşımları olmak üzere başlıca üç grupta sınıflandırılabilir. α alaşımlarının tüm yapısını α fazı oluştururken, β alaşımlarının yapısında büyük ölçüde β fazı bulunmaktadır ve bu yapıya çözündürme sıcaklığından itibaren soğutarak ulaşılabilir. $\alpha+\beta$ alaşımları ise oda sıcaklığında hem α hem de β fazını içermektedir [1]. $\alpha+\beta$ alaşımları içinde en çok Ti6Al4V kullanılmaktadır. Düşük yoğunluk, ısıl direnci, yüksek mekaniksel dayanım, korozyon dayanımı, biyouyumluluk özellikleri nedeniyle Ti6Al4V alaşımı çok geniş bir kullanım alanına sahiptir [2,3]. Bu dayanıklı ve hafif alaşımlar, jet motorları, uzay araçları, füze, basınç kazanı, ortodonti, medikal implant ve cerrahi aletlerin yapımı gibi pek çok uygulamalarda kullanılmaktadır [4,5].

Ti6Al4V alaşımı, TIG, sürtünme, sürtünme-karıştırma, plazma ark, elektron ışın, lazer kaynağı gibi pek çok yöntemle birleştirebilmektedir [2,5,6]. 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 yapabilme imkanından dolayı geleneksel kaynak yöntemlerinden ayrılır [7-14]. Fiber optik kablo destekli lazer kaynak sistemleri ise; düşük ışın sapma oranı, fileksibl (esnek) ışın dağıtımını, düşük bakım maliyeti, yüksek verimlilik ve yüksek kaliteli kaynaklı birleştirmeler sunmaktadır [15].

Titanyum ve alaşımlarının kaynağında yüksek ısı girdisine bağlı yavaş soğuma, kaynak dikişinde tane irileşmesine neden olmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının kaynağında, kaynak bölgesine iletilen ısı girdisi azaltılarak soğuma hızının artırılması ve dar bir kaynak dikiş biçimi elde edilmesi önerilmektedir. Ti6Al4V titanyum alaşımlarının elektron ışın ve lazer ışın kaynaklı birleştirmelerinde düşük ısı girdisine bağlı hızlı soğumadan dolayı kaynak dikişinde ince taneli birincil β oluşum göstermekte ve bu mikroyapısal dönüşüm de dayanım artışına neden olmaktadır [6]. Ancak, kaynak dikişinin hızlı soğuması durumunda baskın bir şekilde martenzitik yapı oluşmaktadır [16]. Martenzitik yapı, ana malzemeye kıyasla kaynak dikişinin tokluğunu düşmesine sebebiyet vermektedir [16,17]. Kaynak metali ve ITAB'daki süneklik kayıpları, kaynak sonrası uygulanan ısıl işlemler ile yeniden düzenlenerek iyileştirilebilmektedir [17]. Düşük sünekliğe sahip $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarının kaynak sonrası ısıl işlemi, β geçiş sıcaklığının altında yapılması önerilmektedir [18]. Titanyum ve alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerine uygulanan gerilim giderme tavı, dayanım ve süneklik üzerine olumsuz bir etki oluşturmamaktadır. Gerilim giderme tavlama ile birlikte, kaynak dikişinin soğuması esnasında oluşabilecek iç gerilmeler mümkün mertebe azaltılabilmektedir.

Titanyum ve alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerine kaynak sonrası uygulanan solüsyona alma, yaşlandırma gibi ısıl işlemler ise; kaynaklı birleştirmenin kırılma tokluğunu, sünekliliğini, korozyon direncini ve yüksek sıcaklıklara dayanımı arttırmaktadır.

Literatürde Ti6Al4V titanyum alaşımının elektron ışın kaynağı, ilave metal kullanımlı ve ilave metal kullanımsız lazer kaynağı, TIG (Tungsten Inert Gas) kaynak yöntemi ile birleştirmelerine ait çalışmalar bulunmasına rağmen [2,4,5,15,17,18], Robotik Nd:YAG lazer kaynaklı birleştirmelere kaynak öncesi ve sonrası uygulanan ısıl işlemlerin etkilerini inceleyen çalışma yeterince bulunmamaktadır. Bu çalışmada Ti6Al4V levhalar, fiber optik ışın dağıtım sistemi destekli Nd:YAG lazer kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynak öncesi ön tavlama gerçekleştirilmiş, kaynak sonrası ise iki farklı ısıl işlem prosedürü uygulanmıştır. Isıl işlemlerin, lazer kaynaklı Ti6Al4V alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir.

2. Deneysel çalışmalar

2.1. Malzeme, kaynak işlemi ve ısıl işlem prosedürü

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

Tablo 1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal kompozisyonu.

%C	Al	V	Fe	N	O	H	Ti
0.010	6.02	4.14	0.098	0.007	0.12	0.002	Kalan

Deney malzemesi, 100x330x4mm ölçülerinde kaynak işlemine hazır duruma getirilmiştir. Deney numuneleri Tablo 2’de belirtilen parametrelerle, 4 kW gücüne sahip Nd:YAG lazerin, FANUC ROBOT R-2000 iB 210F marka robota entegre edilmesiyle oluşturulan kaynak tertibatıyla (lazer, fiber optik kablo vasıtasıyla lazer kaynak kafasına iletilmektedir), yatay pozisyonda ve ilave metal kullanılmadan birleştirilmiştir. Kaynak öncesi ve sonrası Tablo 3’de belirtilen parametrelerde ısıl işlemler uygulanmıştır.

Tablo 2. Lazer kaynak parametreleri.

Numuneler	Lazer gücü (W)	Kaynak hızı (mm/s)	Koruyucu gaz	Gaz basıncı (bar)	Odak mesafesi (mm)	Isı girdisi (kJ/mm)
A1	1500	9	He	1	190	0.16
B1	2000	9	He	1	190	0.22

Tablo 3. Isıl işlem prosedürü.

Numuneler	Isıl işlem şartları
A1 Ana malzeme (A)	350 °C/20 dak ön tav + 720 °C/1 saat gerilim giderme/havada soğutma + 920 °C/1 saat solüsyona alma/havada soğutma + 650 °C/2 saat yaşlandırma/havada soğutma
B1 Ana malzeme (B)	350 °C/20 dak ön tav + 720 °C/1 saat gerilim giderme/havada soğutma + 920 °C/1 saat solüsyona alma/havada soğutma

2.2. Mekanik testler ve mikroyapı analizleri

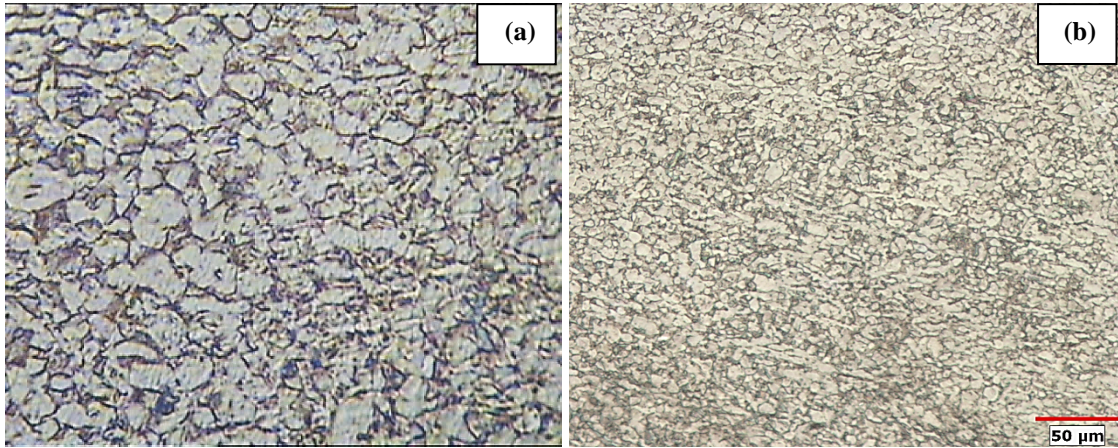
Birleştirmelerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için her bir parametre için 4'er adet çekme testi numuneleri ISO 4136: 2012, çentik darbe testi numuneleri ISO 9016: 2012 standartlarında hazırlanmıştır. Çekme testi INSTRON marka 100 kN kapasiteli çekme test cihazında 10 mm/dak ilerleme hızında, darbe çentik testi ise oda sıcaklığında OHR&FEDERAF AG PSW 13/15 marka deney cihazıyla gerçekleştirilmiştir. MicroVickers sertlik ölçümü ise, GALILEO marka ölçüm cihazında uca 15 saniye 200g yük uygulanarak belirlenmiştir.

Isıl işlem uygulanmış numunelerin mikroyapı değişimlerini karakterize etmek için Kroll's solüsyonu ile dağlama işlemi prosedürü uygulanmıştır. Mikroyapı incelemeleri 5x-100x büyütme 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.

3. Sonuçlar ve tartışma

3.1. Mikroyapı incelemeleri

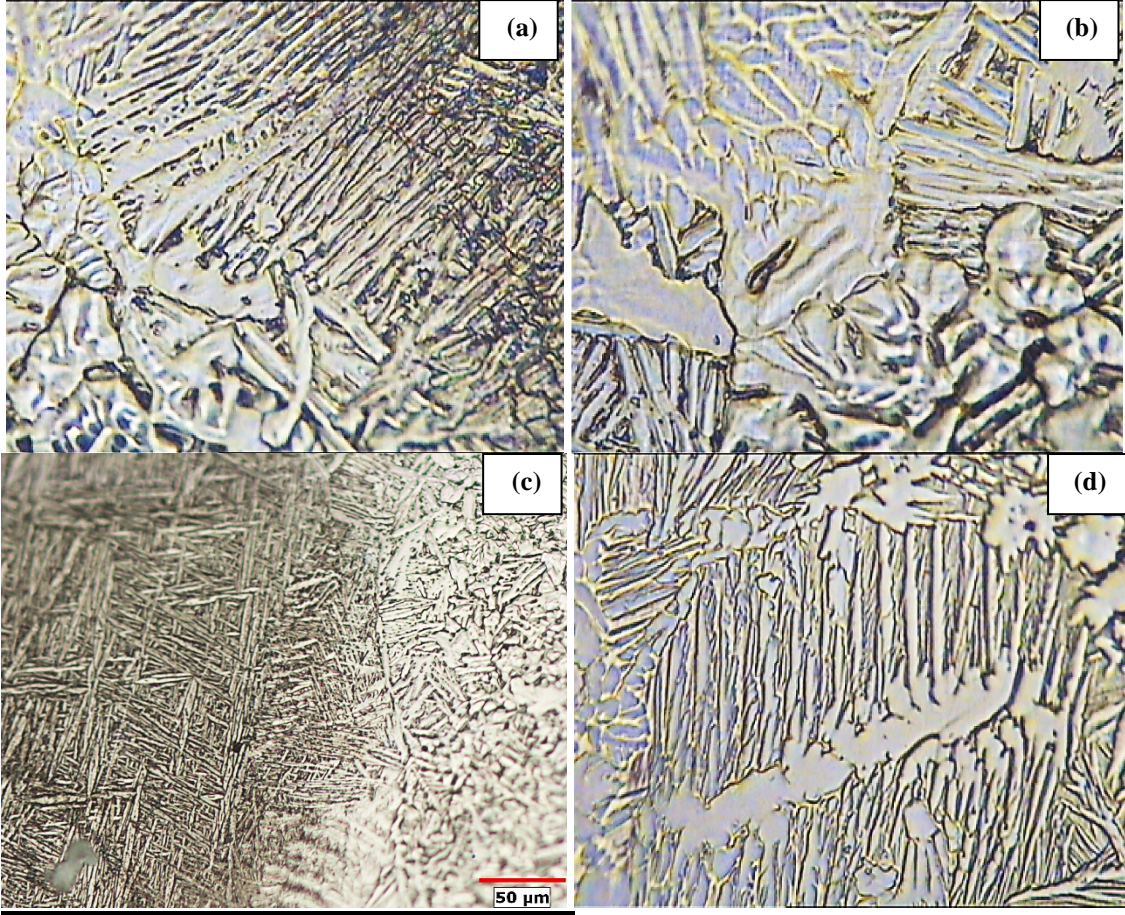
Ana malzeme (A ve B numuneleri) mikroyapılarının eş eksenli α tanelerinden ve tane sınırlarındaki β tanelerinden meydana geldiği görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Ana malzemeler; (a) gerilim giderme + solüsyona alma + yaşlandırma uygulanan A numunesi (1000x), (b) gerilim giderme + solüsyona alma ısıl işlemi uygulanan B numunesi (200x).

Kaynak sonrası tavlama işlemi süreciyle, malzemede termodinamik denge elde edilmesi amaçlanmaktadır. Lazer kaynağı veya elektron ışın kaynağıyla birleştirilen $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarının ısıl işlemler sonrası mikroyapıları; martenzit fazı içerisinde β fazı oluşumu göstermekte ya da α fazı çökeltileri kalıntı biçiminde mikroyapı içerisinde yer almaktadır. Isıl işlem süresi ya da ısıl işlem sıcaklık derecesi arttıkça, aşırı yaşlanma etkisiyle tane büyümesi oluşumları meydana gelmektedir [16]. Şekil 2'de, yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış kaynaklı birleştirmenin (A1 numunesi) taneyapısının, yaşlandırma uygulanmayan ana malzeme ve lazer kaynaklı mikroyapısına göre (B ve B1 numunesi) daha fazla irileştiği açık bir şekilde görülmektedir. Kaynak sonrası uygulanan ısıl işlemler sonrası elde edilen bu mikroyapı değişimi, kaynaklı

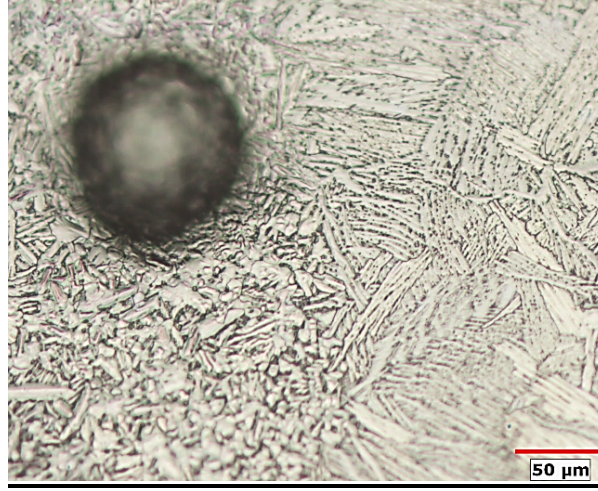
birleştirmenin çekme dayanımında bir miktar azalmaya neden olması beklenirken, kaynak bölgesinin süneklüğünde ise artış beklenmektedir.



Şekil 2. Isıl işlem uygulanmış lazer kaynaklı numunelerin mikroyapı görüntüleri; a-) A1 numunesine ait ITAB (1000x) ve b-) kaynak metali görüntüsü (1000x), c-) B1 numunesine ITAB (200x) ve d-) Kaynak metali görüntüsü (1000x).

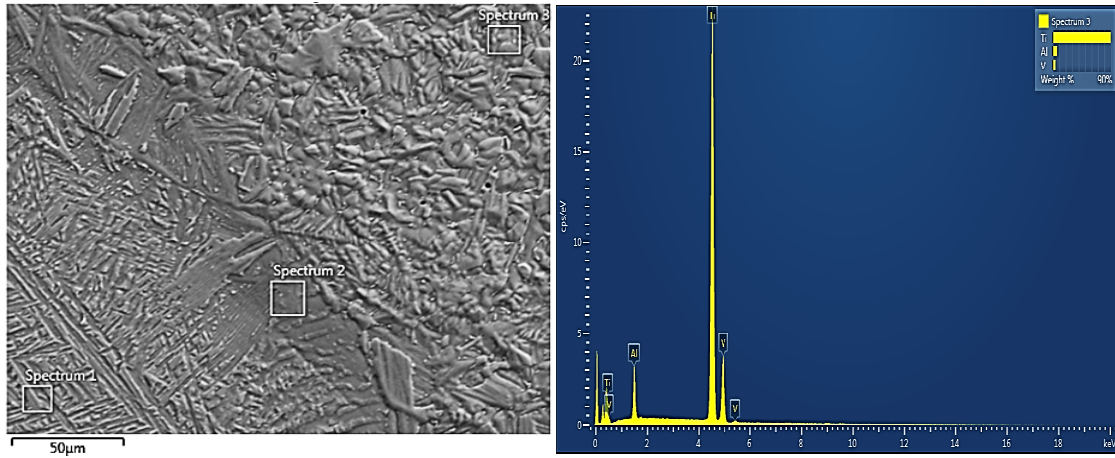
Lazer kaynaklı birleştirmelerde dar bir ITAB oluşumu meydana geldiği optik mikroskop görüntülerinden anlaşılmaktadır (Şekil 2). Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan ve uygulanmayan lazer kaynaklı numunelerin özellikle kaynak metali mikroyapısında yüksek sıcaklığın ve bekleme süresinin etkisiyle belirgin tane büyümesi, lamellar $\alpha+\beta$ faz yapısı ve α fazı tane sınırlarında basket-weave Widmanstatten tane yapısı oluşumu meydana geldiği görülmektedir. Tane irileşmesi, beklenildiği gibi yaşlandırma uygulanan numunelerde daha etkili gerçekleşmiştir. Isıl işlem sıcaklık değerleri, β geçiş sıcaklığının altında olması nedeniyle α tane sınırı yapısının tamamen β fazına dönüşmesi beklenmeyen bir durumdur. Yaşlandırma süresine ve soğutma şartlarına bağlı olarak α tane sınırı yapısıyla birlikte α plakaları, tane sınırında dönüşmüş β taneleri bulunabilir [6,19]. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numunede, dönüşmüş β hacim oranının artış gösterdiği mikroyapı görüntülerinden açık bir şekilde görülebilmektedir. Ayrıca, B1 numunesinin kaynak metalinde porozite oluşumu gözlenmiştir (Şekil 3). Lazer kaynaklı titanyum alaşımlarında gözenek oluşumuyla genellikle karşılaşmaktadır. Gaz tipi poroziteler özellikle, kaynak dikişinin katılaşması esnasında, kaynak havuzundaki hidrojenin uzaklaştırılmaması nedeniyle oluşum

göstermektedir [20]. Gözenek oluşumu nedeniyle, kaynaklı birleştirmelerin mekanik dayanımında düşüşlerin yaşanması muhtemeldir.



Şekil 3. B1 numunesinin kaynak metalinde gözenek oluşumu (200x).

Tüm ısıl işlem şartları ve kaynak parametreleri için gerçekleştirilen EDS analizleri sonuçları incelendiğinde, ana metal, ITAB ve kaynak metali bölgelerinden önemli derecede element kayıplarının yaşanmadığı tespit edilmiştir (Şekil 4). Bu sonuçlardan, ısı girdisinin veya ısıl işlemlerin lazer kaynaklı birleştirmeler üzerinde element kaybı oluşturmadığı açık bir şekilde söylenebilir.



Şekil 4. A1 numunesine ait EDS analizi.

3.2. Çekme deneyi

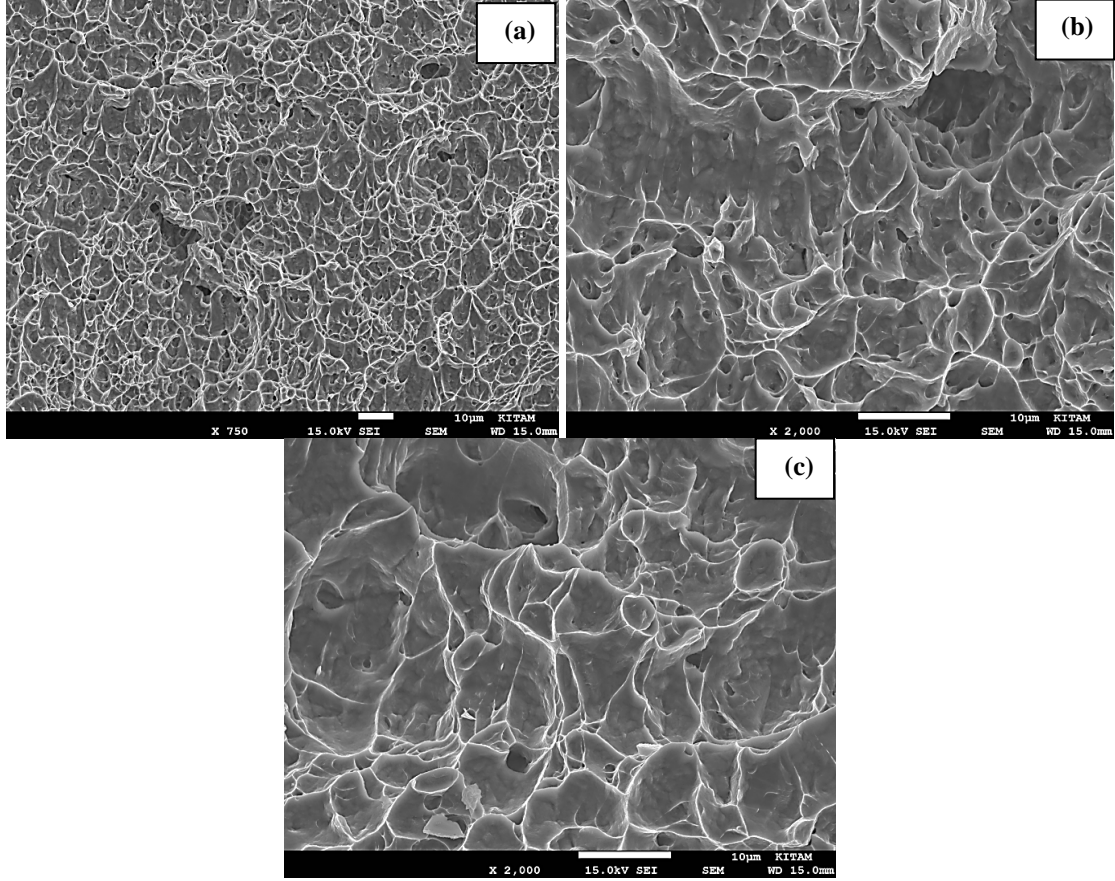
Isıl işlemler uygulanmış ana malzeme ve lazer kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi uygulanmış ve sonuçlar Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Isıl işlem uygulanan ana malzeme ve lazer kaynaklı deney numunelerinin çekme deneyi sonuçları.

Numuneler	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama (%)
A	1025	944	20
B	1039	955	18
A1	791	730	12
B1	840	785	10.5

Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, ısıl işlemlerin etkisiyle meydana gelen mikroyapısal dönüşümler sonucu, yaşlandırma uygulanmayan ana malzemenin (B numunesi) çekme dayanımı, yaşlandırma uygulanan ana malzemenin (A numunesi) çekme dayanımından yüksek bulunmuştur. Ancak, yüzde uzama az da olsa B numunesinde daha düşük bulunmuştur. Lazer kaynaklı B1 numunesinin çekme dayanımı ise, A1 numunesinin çekme dayanımından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan A1 numunesinin çekme dayanımının düşük, sünekliğinin yüksek çıkmasının ana nedeni, ısıl işlemler sonrası α tanelerinin daha iri boyutlarda oluşum göstermesi ve temperlenmiş martenzitin varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüm ısıl işlem şartlarında kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımları ana malzemelerden daha düşük bulunmuştur. Çekme deneyi sonrasında kopmalar ITAB ve kaynak metalinden gerçekleşmiştir. Bunun nedenleri arasında, kaynak dikişinde meydana gelen poroziteler, kaynak dikişinde çöküntü (underfills), mikroçatlaklar ve mikroyapısal dönüşümler sayılabilir. Lazer kaynaklı birleştirmelerin mikroyapılarında ince β tanelerinin oluşum göstermesi nedeniyle yüksek süneklik göstermesi [21] beklenebilirdi. Bu çalışmada, kaynak dikişi mikroyapısında α plateletlerin (levhacıkların) kabalaşmasına rağmen, lamellar yapı oluşumu, çekme dayanımında ve süneklikteki azalmaya neden olarak düşünülmektedir. Araştırmacılar, kaynak sonrası ısıl işlemler ile birlikte, kaynak metali mikroyapısında lameller yapının stabil kalması nedeniyle, kaynaklı birleştirmede ana metale göre daha düşük süneklik değerleri elde edileceğine işaret etmektedir [18]. Aynı zamanda, kaynak sonrası uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi ile birlikte martenzit ve Widmanstätten α yapısının lamellar α - β tane yapısına dönüşmesiyle, akma ve çekme dayanımında azalmaların, süneklikte ise artış meydana geleceği araştırmacılar tarafından bildirilmektedir [6,16,17]. Artan sıcaklıklarda, düzensiz şekilli β tanelerinin oluşum göstermesi nedeniyle, ana malzemeye kıyasla, kaynaklı birleştirmelerin darbe/kırılma tokluğu ve akma dayanımında azalmaların yaşanacağı araştırmacılar tarafından vurgulanmaktadır [22]. Kaynak dikişinin katılaşması esnasında oluşabilecek mikrosegregasyonlar da sünekliği azaltan etmenler arasında sayılabilir. Genel olarak çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, iki farklı ısıl işlem prosedürü uygulanan lazer kaynaklı numunelerin çekme dayanımları arasında çok büyük farklılıkların yaşanmadığı sonucuna varılmıştır. Bu sonucun alınmasının ana nedeni, ısıl işlem şartlarının β geçiş sıcaklığının altında gerçekleştirilmesi ve böylelikle de birincil β tane boyutlarında önemli değişimlerin meydana gelmemesinden ileri geldiği düşünülmektedir.

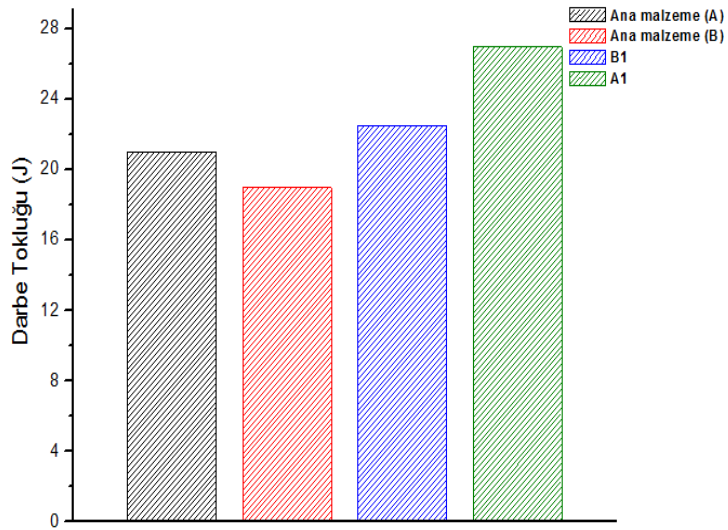
Çekme deneyi sonrası ana malzemeler ve lazer kaynaklı B1 numunelerinin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, gözeneklerden anlaşılacağı üzere, ısıl işlemlerle titanyuma ait tipik kırılma biçimi olan sünek kırılma biçiminde kırılmaların gerçekleştiği açık bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 5). Kaynaklı birleştirmelerin kırılma yüzeyi görüntülerinde herhangi bir inklüzyon oluşumu gözlenmemiştir.



Şekil 5. Çekme deneyi sonrası kırılma yüzeyi SEM görüntüleri; a-) A ve b-) B numunesi, c-) B1 numunesi.

3.3. Çentik darbe testi

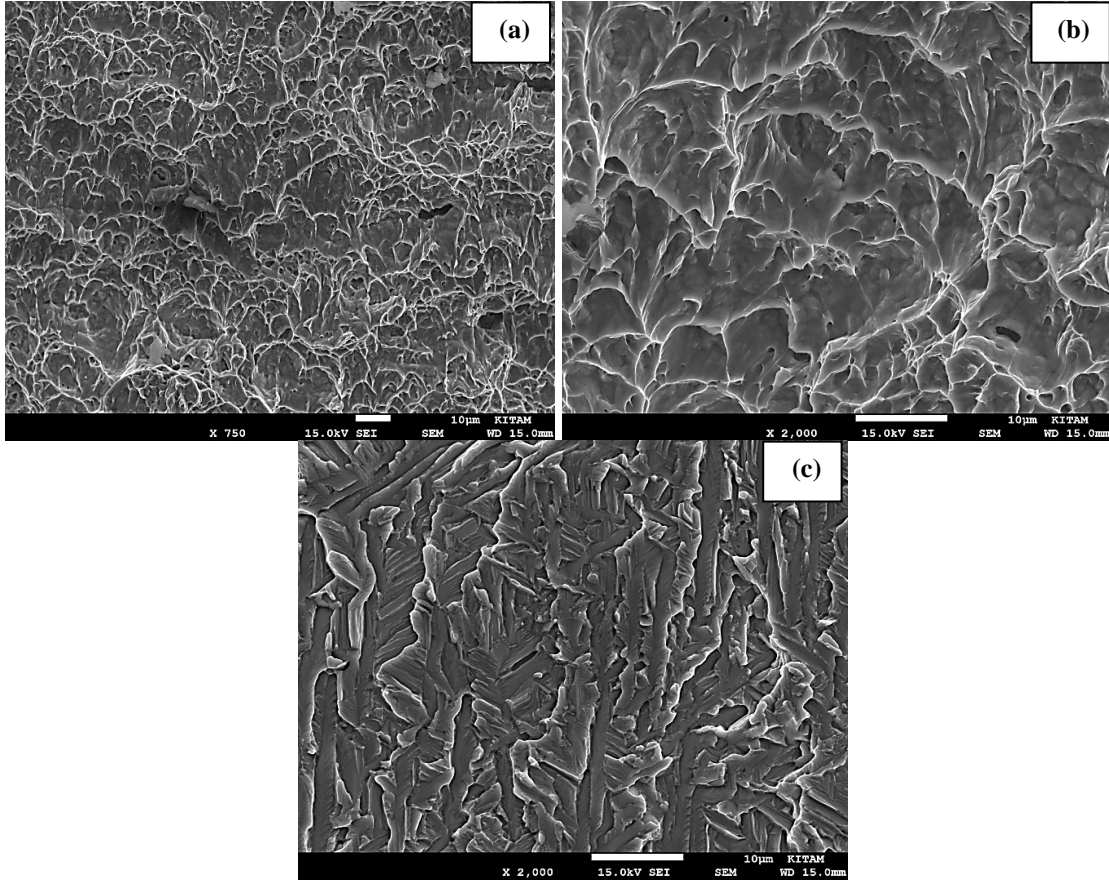
Isıl işlemlenmiş ana malzeme ve lazer kaynaklı numunelerin oda sıcaklığında darbe toklukları belirlenmiş ve sonuçlar Şekilde 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Çentik darbe deneyi sonuçları

Yaşlandırma ısısal işlemi uygulanan A numaralı ana malzemenin darbe tokluğu, yaşlandırma uygulanmayan B numaralı ana malzemeye kıyasla daha yüksek bulunmuştur (21J ve 19J). Ana malzemelerin darbe toklukları, kaynaklı birleştirmelerin darbe tokluğundan daha düşük bulunmuştur (Şekil 6). Kaynak sonrası uygulanan ısısal işlemlerin etkisiyle, kaynak dikişi mikroyapısındaki tane içi α tanelerinin hacim oranı artış göstererek darbe tokluğunu arttıracakları araştırmacılar tarafından vurgulanmaktadır [17,23], ayrıca martenzitin $\alpha+\beta$ faz yapısına dönüşmesiyle süneklikteki artışla birlikte darbe tokluğunda iyileşmelerin meydana geldiği düşünülmektedir. Kaynak sonrası ısısal işlemlerle, α tane sınırının kabalaşmasıyla, tane sınırındaki çatlak ilerleyişinin yönü değişerek darbe tokluğunda iyileşmeler yaşanacağı da araştırmacılar tarafından özellikle bildirilmektedir [17,23]. Benzer çalışmalar gerçekleştiren araştırmacılar ayrıca, titanyum alaşımlarının darbe tokluğunu arttırmak için, düşük kaynak hızı veya yüksek lazer gücü kullanılarak, ısı girdisinin artırılmasıyla birlikte martenzit yapısının asiküler α (iğnems) veya Widmanstatten α tane yapısına dönüştürülmesi gerektiğini vurgulamaktadır [24].

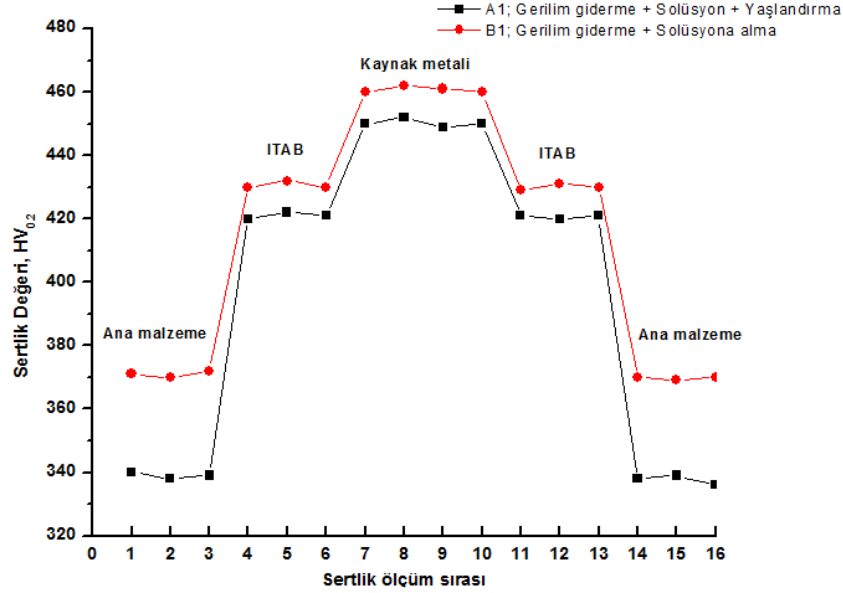
Çentik darbe deneyi sonrası ana malzemeler ve lazer kaynaklı A1 numunelerinin kırılma yüzeyi morfolojisi SEM ile incelenmiştir (Şekil 7). Ana malzemelere ait kırılma yüzeyi SEM görüntüsünden kırılmanın sünek şekilde gerçekleştiği açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Lazer kaynaklı numunenin ise tanelerarası kırılma ile birlikte klivaj kırılma biçiminde kırılmaların gerçekleştiği kırılma yüzeyi morfolojilerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 7. Çentik darbe deneyi sonrası kırılma yüzeyi SEM görüntüleri; a-) A ve b-) B numunesi, c-) A1 numunesi.

3.4. Mikrosertlik testi

Lazer kaynağı, geleneksel kaynak yöntemlerine göre yüksek güç yoğunluğuna sahip olması nedeniyle, düşük ısı girdisi ve hızlı katılaşma oluşturmakta ve kaynaklı birleştirmelerde yüksek sertlik değerleri elde edilmektedir. Isıl işlem uygulanmış lazer kaynaklı numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde (Şekil 8), kaynak metal ve ITAB sertliğinin ana metalden daha yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8. Lazer kaynaklı birleştirmelerin sertlik dağılımları.

En sert bölge olarak, kaynak metal olarak bulunmuştur. Kaynak metalinin, ITAB'a göre daha sert bulunmasının ana nedeni, bu bölgenin daha ince yapıli tanelerden oluşum göstermesidir. Kaynak sonrası ısıl işlemler ile, martenzitin $\alpha+\beta$ faz yapısına dönüşmesi ve α fazı levhacıklarının kalıntı β fazından dönüşümüyle birlikte, ana metale kıyasla ITAB ve kaynak metalinde sertlik artışı görüleceği vurgulanmaktadır [8]. β fazı α fazına göre daha yumuşak ve sünektir, kaynak sonrası ısıl işlemlerle birlikte β faz yapısının azalması sonucu özellikle kaynak metalinde sertlik artışı gerçekleşeceği araştırmacılar tarafından bildirilmektedir [6]. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan lazer kaynaklı numunenin yaşlandırma uygulanmamış numunenin sertliğinden bir miktar düşük bulunmuştur. Yüksek sıcaklıklarda α martenzit fazının, β yapısına dönüşümüyle ve tane yapısının daha da kabalaşmasıyla sertlik düşüşleri yaşanmaktadır. Kaynak sonrası ısıl işlem sıcaklığı arttıkça da sertlikte düşüş meydana geleceğine özellikle dikkat çekilmektedir [19].

5. Sonuçlar

1- Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan ve uygulanmayan lazer kaynaklı numunelerin özellikle kaynak metal mikroyapısında yüksek sıcaklığın ve bekleme süresinin etkisiyle belirgin tane büyümesi, lamellar $\alpha+\beta$ faz yapısı ve α fazı tane sınırlarında basket-weave Widmanstatten tane yapısı oluşumu meydana gelmiştir. Tane irileşmesi, beklenildiği gibi yaşlandırma uygulanan numunede daha etkili gerçekleşmiştir.

2- Kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımları ana malzemelerden daha düşük bulunmuştur. Bunun nedenleri arasında, kaynak dikişinde meydana gelen poroziteler, dikişte çöküntüler, mikroçatlaklar ve mikroyapısal dönüşümler sayılabilir. Lazer kaynaklı numunelerin çekme dayanımları arasında çok büyük farklılıkların yaşanmadığı sonucuna varılmıştır. Bu sonucun alınmasının ana nedeni, ısıtma işlem şartlarının β geçiş sıcaklığının altında gerçekleştirilmesi ve böylelikle de birincil β tane boyutlarında önemli değişimlerin meydana gelmemesinin neden olduğu düşünülmektedir.

3- Yaşlandırma uygulanan ana malzemenin (A numunesi) darbe tokluğu yaşlandırma uygulanmayan ana malzemeye (B numunesi) kıyasla darbe tokluğu daha yüksek bulunmuştur. Ana malzemelerin darbe toklukları, kaynaklı birleştirmelerin darbe tokluğundan daha düşük bulunmuştur. Kaynak sonrası uygulanan ısıtma işlemlerin etkisiyle, kaynak dikişi mikroyapısındaki tane içi α tanelerinin hacim oranı artış göstererek darbe tokluğunu arttırdığı düşünülmektedir. Ayrıca, martenzitin $\alpha+\beta$ faz yapısına dönüşmesi süneklik artışına neden olarak darbe tokluğunu iyileştirici rol oynamıştır.

4- Sertlik incelemeleri sonucunda, kaynak metali ve ITAB sertliğinin ana metalden daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. En sert bölge, kaynak metali olarak tespit edilmiştir. β fazı, α fazına göre daha yumuşak ve sünek olduğu bilinmektedir, kaynak sonrası ısıtma işlemlerle birlikte β faz yapısının azalması sonucu özellikle kaynak metalindeki sertlik artışına ana neden olarak görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Karaca, E., Robotik Nd:YAG fiber lazer kaynağı ile birleştirilen Ti6Al4V alaşımının mekanik, mikroyapı ve ısıtma işlem özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, (2017).
- [2] Karimzadeh, F., Heidarbeigy, M., ve Saatchi, A., Effect of heat treatment on corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy weldments, **Journal of Materials Processing Technology A**, 206, 1-3, 388-394, (2008).
- [3] Yıldız, A., Kaya, Y., ve Kahraman, N., Joint properties and microstructure of diffusion-bonded grade 2 titanium to AISI 430 ferritic stainless steel using pure Ni interlayer, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 86, 5-8, 1287-1298, (2016).
- [4] Akman, E., Demir, A., Canel, T., ve Sınmazçelik, T., Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys, **Journal of Materials Processing Technology**, 209, 8, 3705-3713, (2009).
- [5] Cao, X., ve Jahazi, M., Effect of welding speed on butt joint quality of Ti-6Al-4V alloy welded using a high-power Nd:YAG laser, **Optics and Lasers in Engineering**, 47, 11, 1231-1241, (2009).
- [6] Kabir, A. S. H., Cao, X., Gholipour, J., Wanjara, P., Cuddy, J., Birur, A., ve Medraj M., Effect of postweld heat treatment on microstructure, hardness, and tensile properties of laser-welded Ti-6Al-4V, **Metallurgical and Materials Transactions A**, 4, 11, 4171, 4184, (2012).
- [7] Köse, C., ve Kaçar, R., The effect of preheat & post weld heat treatment on the laser weldability of AISI 420 martensitic stainless steel, **Material and Design**, 64, 221-226, (2014).
- [8] Köse, C., ve Kaçar, R., Mechanical properties of laser welded 2205 duplex stainless steel, **Materials Testing**, 54, 10, 779-785, (2014).

- [9] Köse, C., ve Kaçar, R., Effect of welding speed on the mechanical properties and microstructure of laser welded AISI 316L stainless steel, **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 30, 2, 225-235, 2015.
- [10] Köse C., Kaçar R., Zorba A. P., Bağırova M., & Allahverdiyev A. M. (2016). The effect of CO₂ laser beamwelded AISI 316L austenitic stainless steel on the viability of fibroblast cells, in vitro. *Materials Science and Engineering C*, 60, 211-218.
- [11] Köse, C., ve Kaçar, R., In vitro bioactivity and corrosion properties of laser beam welded medical grade AISI 316L stainless steel in simulated body fluid, **International Journal of Electrochemical Science**, 11, 2762-2777, (2016).
- [12] Köse, C., An investigation of the surface characterization of laser surface remelted and laser beam welded AISI 316L stainless steel, **International Journal of Electrochemical Science**, 11, 3542-3554, (2016).
- [13] Köse, C., Weldability of 5754 aluminum alloy using a pulsed Nd:YAG micro scale laser, **Materials Testing**, 58, 11-12, 963-969, (2016).
- [14] Köse, C., Lazer ile yüzey modifikasyon uygulanan AISI 2205 paslanmaz çeliğin yüzey özelliklerinin incelenmesi, **AKÜ Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 16, 67-73, (2016).
- [15] Quintino, L., Costa, A., Miranda, R., Yapp, D., Kumar, V., ve Kong, C. J., Welding with high power fiberlasers-A preliminary study, **Materials and Design**, 28, 4, 1231-1237, (2007).
- [16] Murthy, K. K., ve Sundaresan, S., Phase transformations in a welded near-titanium alloy as a function of weld cooling rate and post-weld heat treatment conditions, **Journal of Materials Science**, 33, 3, 817-826, (1998).
- [17] Thomas, G., Ramachandra, V., Ganeshan, R., ve Vasudevan, R., Effect of pre- and post-weld heat treatments on the mechanical properties of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy, **Journal of Materials Science**, 28, 18, 4892-4899, (1993).
- [18] Sundaresan, S., ve Ram, G.D.J., Use of magnetic arc oscillation for grain refinement of gas tungsten arc welds in α - β titanium alloys, *Journal Science and Technology of Welding and Joining*, 4, 3, 151-160, (1999).
- [19] Babu, N.K., Raman, S.G., Sundara, M., Srinivasa, C.V., ve Reddy, G.M., Effect of beam oscillation on fatigue life of Ti-6Al-4V electron beam weldments, **Materials Science and Engineering. A**, 471, 1-2, 113-119, (2007).
- [20] Kabir A. S. H., Cao X., Medraj M., Wanjara P., Cuddy J., ve Birur A., Effect of welding speed and defocusing distance on the quality of laser welded Ti-6Al-4V, **In Proceedings of the Materials Science and Technology (MS&T) Conference**, Houston, TX, USA, 2787-2797, (2010).
- [21] Tsay, L.W., ve Tsay C.Y., The effect of microstructures on the fatigue crack growth in Ti-6Al-4V laser welds, **International Journal of Fatigue**, 19, 10, 713-720, 1997.
- [22] Wang, S.H., Wei, M.D., ve Tsay, L.W., Tensile properties of LBW welds in Ti-6Al-4V alloy at evaluated temperatures below 450 °C, **Materials Letter**, 57, 12, 1818-1823, (2003).
- [23] Mohandas, T., Banerjee, D., ve Kutumba Rao, V.V., Microstructure and mechanical properties of friction welds of an a+b titanium alloy, **Materials Science and Engineering: A**, 289, 1-2, 70-82, (2003).
- [24] Barreda, J.L., Santamaria, F., Azpiroz, X., Irisarri, A.M., ve Varona, J.M., Electron beam welded high thickness Ti6Al4V plates using filler metal of similar and different composition to the base plate, **Vacuum**, 62, 2-3, 143-150, (2001).