

**LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ TİTANYUM
ALAŞIMLARININ FARKLI ISIL İŞLEMLER
SONUCUNDA MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ TİTANYUM ALAŞIMLARININ
FARKLI ISIL İŞLEMLER SONUCUNDA MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

ASLIHAN KENAR
0000-0003-1454-6082

Prof. Dr. Rukiye ERTAN
(Danışman)
000-0002-9631-4607

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022

TEZ ONAYI

Aslıhan Kenar tarafından hazırlanan “Lazer Kaynağı ile Birleştirilmiş Titanyum Alaşımlarının Farklı Isıl İşlemler Sonucunda Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Rukiye ERTAN

- Başkan** : Aaaaa. Dr. Aaaaaaaaa AAAAAAAAAA
000-000-000-000
Aaaaaaaaa Üniversitesi,
Aaaaaaaaaaaaa Fakültesi,
Aaaaaaaa Aaaaaaaaaaaaa Anabilim Dalı İmza
- Üye** : Aaaaa. Dr. Aaaaaaaaa AAAAAAAAAA
000-000-000-000
Aaaaaaaaa Üniversitesi,
Aaaaaaaaaaaaa Fakültesi,
Aaaaaaaa Aaaaaaaaaaaaa Anabilim Dalı İmza
- Üye** : Aaaaa. Dr. Aaaaaaaaa AAAAAAAAAA
000-000-000-000
Aaaaaaaaa Üniversitesi,
Aaaaaaaaaaaaa Fakültesi,
Aaaaaaaa Aaaaaaaaaaaaa Anabilim Dalı İmza
- Üye** : Aaaaa. Dr. Aaaaaaaaa AAAAAAAAAA
000-000-000-000
Aaaaaaaaa Üniversitesi,
Aaaaaaaaaaaaa Fakültesi,
Aaaaaaaa Aaaaaaaaaaaaa Anabilim Dalı
- Üye** : Aaaaa. Dr. Aaaaaaaaa AAAAAAAAAA
000-000-000-000
Aaaaaaaaa Üniversitesi,
Aaaaaaaaaaaaa Fakültesi,
Aaaaaaaa Aaaaaaaaaaaaa Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././....

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.../.../.....

Aslıhan KENAR

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Rukiye ERTAN
Tarih

Aslıhan KENAR
Tarih

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans

LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ TİTANYUM ALAŞIMLARININ FARKLI ISIL İŞLEMLER SONUCUNDA MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ashhan KENAR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Rukiye ERTAN

Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek mukavemet özellikleri ve korozyona karşı yüksek dirençleriyle bilinen ve aynı zamanda düşük yoğunluklarından dolayı hafif olmaları sayesinde günümüzde oldukça geniş uygulama alanına sahip, önemli bir mühendislik malzemesidir. Sahip olduğu bu özellikleriyle farklı endüstriyel uygulamalarda kullanılan titanyum alaşımlarının başlıca kullanım alanları uzay ve havacılık sanayi, kimya endüstrisi, denizcilik ve biyomedikal uygulamalar olarak sıralanabilir.

Gelişen teknoloji ile değişen dünyamızda hafiflik ve yüksek mukavemet gibi önemli iki önemli bileşene sahip olan titanyum ve alaşımlarının mekanik özellikleri, kaynak işlemine bağlı olarak yüksek oranda değişmektedir. Bununla beraber, uygun ısıl işlemler uygulandığında bu mekanik özellikleri beklenen seviyeye taşımak mümkündür.

Bu tez çalışmasında farklı sektörlerde çok geniş kullanım alanına sahip, Ti6Al4V kimyasal formüllü, Grade 5 olarak sınıflandırılan titanyum sac malzeme kullanılmıştır. 1 mm kalınlığındaki malzeme lazer kaynağı ile kaynak edilerek bu malzemeye farklı ısıl işlemler uygulanmıştır. Bunun sonucunda çekme ve sertlik deneyleri ile parçanın mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Titanyum, grade-5, ısıl işlem, kaynak, mekanik özellikler, sertlik.
2022, xii + 52 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOYS COMBINED WITH LASER WELDING AFTER DIFFERENT HEAT TREATMENTS PROCESSES

Ashhan KENAR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Rukiye ERTAN

Titanium and titanium alloys are vital materials widely used in many engineering applications. Their low density, high strength and high corrosion resistance specifications make them superior in industrial applications. Different areas where titanium and its alloys are extensively used can be listed as space and aviation industry, chemical, maritime and biomedical industries.

Titanium and its alloys have two favorable characteristics such as lightness and high strength. On the other hand, the mechanical properties of these materials highly fluctuate depending on the welding process. However, it is possible to bring these mechanical properties to the expected level when appropriate heat treatment processes are applied. In this thesis, titanium sheet material with Ti6Al4V chemical formula, was used. Ti6Al4V is classified as Grade 5-titanium material, which has a wide range of usage areas in different sectors. The material of 1 mm thickness was welded with laser welding and different heat treatments were applied to this material. As a result, the changes in the mechanical properties of the material were investigated with tensile and hardness tests.

Key words: Titanium, grade-5, heat treatment, welding, mechanical properties, hardness
2022, xii + 52 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında bilgi ve deneyimini benimle paylaşan, yönlendirmeleriyle çalışmalarımı kolaylaştıran hocam Sayın Prof. Dr. Rukiye ERTAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Test çalışmalarım için numune hazırlama sürecinde desteklerini eksik etmeyen Tofaş Türk Otomobil Fabrikası'ndan değerli çalışma arkadaşlarım Arda Yılmaz, Batuhan Atıcı, Gürkan Yılmazoğlu ve Uğur Üzel'e yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Tüm bu süre boyunca işlerimi kolaylaştırarak çalışmalarına destek olan yöneticim Yağmur Çevik'e değerli desteğinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatımın başından bugünlere kadar maddi ve manevi tüm desteklerini her zaman yanımda hissettiğim değerli büyüklerim, ailem, Müberra & İsmail Kenar ve Gülfiye Cesur'a teşekkürlerimi sunarım. Son olarak hayatımın her anında yanımda olan ve bu süreçte desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Murat Cesur'a teşekkürlerimi sunarım

Aslıhan Kenar
08/01/2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Titanyumun Tarihçesi	3
2.2. Titanyumun Genel Özellikleri.....	5
2.3. Titanyum Üretimi.....	8
2.4. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması	10
2.4.1 α Alaşımları.....	17
2.4.2 $\alpha+\beta$ Alaşımları	18
2.4.3 β Alaşımları.....	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	27
3.1. Kullanılan Materyaller	27
3.2. Kaynak Prosesi.....	28
3.3. Malzemelere Isıl İşlem Uygulanması.....	30
3.4. Yapılan Testler ve Analizler	31
3.4.1 Çekme Testi	32
3.4.2 Vicker's Sertlik Testi	36
4. BULGULAR.....	41
4.1. Çekme Test Sonuçları ve Değerlendirmeler	41
4.2. Sertlik Test Sonuçları ve Değerlendirmeler	43
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	46
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	52

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
F	Kuvvet
N	Newton
α	Alfa
β	Beta
Al	Alüminyum
C	Celsius
Fe	Demir
Ti	Titanyum
Zr	Zirkonyum
K	Kelvin
Mo	Molibden
Mpa	Mpa Mega pascal

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	American Society for Testing and Materials
TIG	Tungsten Inert Gaz Kaynağı
GR	Grade
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
IEB	Isıdan Etkilenmiş Bölge
HV	Vickers Sertlik Değeri
DIN	Alman Standartları Enstitüsü LBW
Nd-YAG	Neodymium-doped yttrium aluminum garnet; Nd:Y3Al5O12
CpTi	Ticari Saf Titanyum
HMK	Hacim merkezli kübik yapı
HSP	Hegzagonal sıkı paket yapısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Saf titanyum süngeri	4
Şekil 2.2. Titanyum üretimi (Chen, Z., George, D., 2017)	8
Şekil 2.3. Sünger titanyum üretim prosesi	9
Şekil 2.4. Sünger titanyumun üretiminden sonra yapılan ergitme işlemleri ve ingot eldesi	10
Şekil 2.5. Titanyum ve mikro yapısının sıcaklıkla değişimi (Demirel, 2021)	11
Şekil 2.6. α ve β titanyum kafes yapıları (Anonim, 2022).....	11
Şekil 2.7. Titanyuma ait mikroyapılar (Sıkı paket hekzagonal ve hacim merkezli kübik) (İc-dem, 2007).....	11
Şekil 2.8. Titanyum faz diyagramı (Demirel, 2021)	12
Şekil 2.9. Alaşım elementlerinin titanyum faz diyagramı üzerine olan etkisi (Balaban 2007)	13
Şekil 2.10. Eşekslenli (a) ve iğnesel (b) içyapı örneği (Gökdemir, 2005)	15
Şekil 2.11. Ti6AlV'un farklı soğutma sıcaklıklarında oluşan mikroyapıları (İc-dem, 2007)	18
Şekil 2.12. Uygulanabilir birleştirme yöntemleri.....	21
Şekil 2.13. Lazer kaynağının şematik gösterimi ve kaynaktan etkilenen metalik bölgeler (Yavuz, 2005)	24
Şekil 2.14. Lazer ile kaynak işlemi sırasında oluşan bölgeler (Akman, 2006).....	24
Şekil 2.15. Nd-YAG lazer sisteminin bileşenleri (Akman, 2006)	25
Şekil 3.1. Nd-YAG lazer kaynak makinesi	28
Şekil 3.2. Isıl işlem fırını.....	30
Şekil 3.3. Çekme testi çubuğu için ASTM E8 standartları	32
Şekil 3.4. Telerozyon tezgâhı.....	33
Şekil 3.5. Çekme testi numunelerinin görüntüsü	34
Şekil 3.6. Zwick Roell Z250 markalı çekme testi makinesi	35
Şekil 3.7. Çekme testinde kopan numuneler	36
Şekil 3.8. Vicker's sertlik testi ekipmanı ve formülasyonu	37
Şekil 3.9. Vicker's sertlik testi için numuneler	38
Şekil 3.10. Ultra Vilibo bakalitleme cihazı	39
Şekil 3.11 Vicker's sertlik ölçüm cihazı	40
Şekil 4.1. Parametre grupları çekme deneyi sonuçları (Maksimum çekme kuvveti ve uzama miktarları)	42
Şekil 4.2. Parametre grupları çekme deneyi sonuçları (Parametre gruplarının maksimum çekme kuvvetleri ve uzama miktarları)	42
Şekil 4.3. Sertlik ölçümü alınan noktalar	43
Şekil 4.4. Sertlik ölçümü sonuçları grafiği	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Titanyum elementinin özellikleri	6
Çizelge 2.2. Bazı metal ve alaşımların yapısal özelliklerinin karşılaştırılması.....	7
Çizelge 2.3. Farklı titanyum alaşımlarına ait mekanik özellikler	14
Çizelge 2.4. Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri Gökdemir, 2005)	15
Çizelge 2.5. α ve β dengeleyici elementler (İşler, 1999)	19
Çizelge 2.6. Bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri (Kahraman, 2007)	22
Çizelge 2.7. Titanyum tipik ısıtma işlem değerleri (Kıral, 2012).....	26
Çizelge 3.1. Grade 5 Titanyumun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	27
Çizelge 3.2. SWA 300 ND: Yağ lazer kaynak makinesinin teknik özellikleri (Xeu ve ark., 2019)	29
Çizelge 3.3. Lazer kaynak parametreleri (Sevinç, 2019).....	29
Çizelge 3.4. Numunelere uygulanan ısıtma işlem prosesleri	31
Çizelge 4.1. Parametre grupları çekme deneyi sonuçları.....	41
Çizelge 4.2. Numunelere uygulanan işlemler ve sertlik ölçüm değerleri	45

1. GİRİŞ

Birçok metal ve alaşımları, endüstriyel alanda ve değişiklik sektörlerde yoğunlukla kullanılmaktadır. Ürün ve prosese bağlı olarak değişik sektörlerde, farklı özelliklere (sertlik, mukavemet, kırılgenlik, ısı iletkenliği vb.) sahip metaller öncelikli olarak tercih edilmektedir.

Özellikle son yıllarda, titanyum ve titanyum alaşımları bazı sektörler başta olmak üzere birçok alanda yoğun şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Titanyum elementinin düşük yoğunluğu, yüksek mukavemet karakteristiği, düşük ısı genleşme katsayısı, yüksek korozyon ve ısı direnci gibi özellikleri bu malzemenin en önemli tercih sebepleridir.

Titanyum elementi, bu üstün özellikleri öncelikle havacılık ve biyomedikal sektörlerinin ilgisini çekmiş ve birçok farklı sektörde artan ivme ile yaygınlaşmıştır. Uzay endüstrisi, enerji sektörü ekipmanları, uçak parçaları, hava araçlarının hidrolik sistemleri, biyomedikal protezler titanyumun ve alaşımlarının kullanıldığı başlıca çevrelerdir.

Titanyum elementinin tüm bu kullanım alanlarında başarısını artırmak ve yeni alanlara da penetrasyonunu sağlamak için, bu malzemenin özelliklerini geliştirmek ve daha dayanıklı ve işlenebilir yapılar elde etmek için birçok çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir. Titanyum komplelerinin ve çeşitli tekniklerle birleştirilmiş veya işlenmiş parçalarının mukavemetini artırma çalışmaları bu kapsamdaki en önemli araştırma gruplarından biridir. Çeşitli yöntemlerle birleştirilmiş titanyum alaşımlarının dayanımını artırmak için ısı işleme prosesleri uygulanmakta ve bu işlemlerin sonucunda daha dayanıklı ve gelişmiş özelliklere sahip ürünler elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu kapsamda kaynak yöntemiyle birleştirilen titanyum malzemelerin, farklı ısı işleme senaryolarında karakteristiklerinin nasıl değiştiği ve geliştiği sorusuna cevap aranmaktadır.

Bu tezde, çok farklı alanlarda geniş kullanım alanına sahip, Ti6Al4V kimyasal formüllü, Grade 5 olarak sınıflandırılan titanyum sac malzeme kullanılmıştır. 1 mm kalınlığındaki

malzeme lazer kaynağı ile kaynak edilerek bu malzemeye farklı ısıl işlemler uygulanmıştır. Bunun sonucunda çekme ve sertlik deneyleri ile parçanın mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Çalışmaların sonucunda, farklı seviyelerde olmakla birlikte uygun ısıl işlem senaryoları uygulandığında, kaynakla birleştirilmiş titanyum malzemelerin mekanik özelliklerin daha iyi seviyeye taşımının mümkün olduğu görülmüştür.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

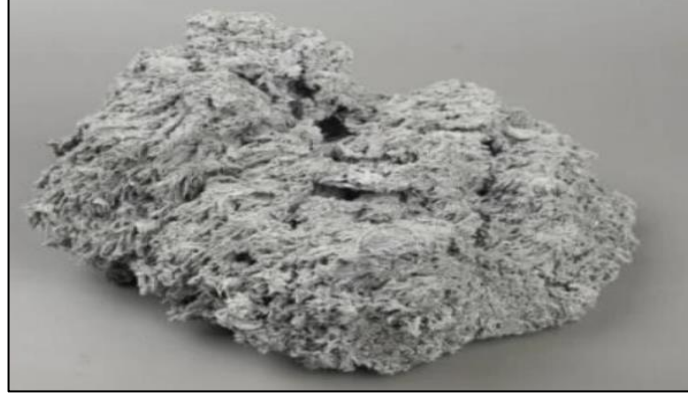
2.1. Titanyumun Tarihçesi

Keşfedilmesi 1791 yılına dayanan titanyum metalinin ortaya çıkışı İngiltere’de, kimyager William Gregor ile gerçekleşmiştir. William Gregor bu metal ile ilk olarak bir akarsuda bulunduğu siyah kumlarda karşılaşmıştır. İlmenit (manyetik demir tozu) olarak bilinen bu cevherin mıkmatistan etkilendiği fark ederek ilmenitin içinde yeni bir elementin olabileceğini düşünmüştür (Krebs, 2006). Ardından siyah kumlardan demirin hidroklorik asit ile ayrılması sonucu daha önce hiç karşılaşmadığı farklı bir metal oksit elde ederek bulunduğu bu sonucu ilgili bilim otoriteleri ile paylaşmıştır. Eş zamanlarda Alman bilim insanı Martin Heinrich Klaproth da kırmızı bir cevher olan rutillerin (TiO₂) analizinde William Gregor’un paylaşımıyla benzer sonuçlar elde etmiştir. Klaproth, Yunan mitolojisinde dünyanın oğulları anlamına gelen Titanlardan esinlenerek bu elemente titanyum adını vermiştir.

Titanyumun azot ve oksijene olan ilgisinden dolayı saf titanyumun elde edilmesi uzun ve teknolojik prosesler gerektirmektedir. Bu sebeple saf titanyumun elde edilmesi diğer metallere kıyasla daha pahalı olmaktadır. Titanyumu karbonun varlığında ısıtarak ayırmak, bu işlem sonucunda titanyum karbit oluşturacağı için mümkün olmamaktadır. %99,9 saflıkta titanyumun eldesini ilk olarak 1910’da General Elektrik için çalışan Matthew Hunter oluşturmuştur. Hunter, bu işlemi titanyum tetra klorür ile sodyumu 700–800 °C’de ısıtarak gerçekleştirmiştir. (Britannica, 2021).

Keşfedilmesi iki yüz yıl öncesine dayansa da ticari olarak üretimi 1950’lerde başlayan titanyumun metalinin laboratuvar dışında kullanımı bu yıllara kadar mümkün olmamıştır. 1946 yılında William Justin Kroll titanyum metalinin mineral kaynaklarından elde edilmesi üzerine çalışmalarda bulunmuştur. Kroll bu çalışmasında inert gaz ortamında titanyum tetrakloridin magnezyum ile indirgenmesini sağlayarak titanyum elde etmiştir. Ortaya çıkan yapı gri, gözenekli ve süngerimsi görünümünden dolayı “titanyum süngeri” olarak adlandırılmıştır. (Nakamura ve arkadaşları, 2017).

Şekil 2.1.'de sünger şeklindeki titanyumun görseli verilmiştir.



Şekil 2.1. Saf titanyum süngeri

Titanyum alaşımları çok yüksek sıcaklıklarda bile sahip oldukları yüksek mukavemetsel özellikleri, korozif ortamlarda gösterdikleri korozyon dirençleri ve yüksek dayanıma sahip olmalarıyla diğer metallerden ayrılır. Diğer metallere kıyasla hafif bir metal olan titanyum (yoğunluk: 4.54 g/cm³) çelik kadar güçlüdür ancak çelikten %45 daha hafiftir. Sahip olduğu karakteristik özellikler sayesinde günümüzde oldukça geniş kullanım alanına sahiptir.

Titanyum düşük yoğunluk ve düşük ısı iletkenlik ile yüksek mukavemete sahip olması nedeniyle uçak ve uzay kapsüllerinin gövdelerinde, füzelerde, enerji santrallerinde kullanılan borularda, savunma sanayinde zırh kaplamalarda ve askeri gemilerde kullanılır. Titanyum elementi ayrıca, yüksek hızla çalışan ve titreşime maruz kalan otomobil parçalarında da tercih edilir. Titanyumun hafif bir malzeme olması, uzay, havacılık ve otomotiv sektöründe tasarlanan parçaların ağırlığını azalttığı için yakıt tüketimini de önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu şekilde hem ekonomik hem de çevresel fayda sağlamak söz konusudur.

Araç ağırlığının azaltılarak yakıt tasarrufu sağlanması ve verimliliğinin artırılması, araçta gürültünün azaltılması gibi konularda titanyum ideal mühendislik malzemelerinden biridir. Titanyum alaşımlı otomobil parçaları ağırlıklı olarak bağlantı çubuklarında, motor supaplarında, egzoz sistemlerinde ve süspansiyon yaylarında kullanılır. Özellikle

motosiklet egzoz sistemlerinde (susturucu) düşük maliyetli alaşımlar geliştirilerek titanyum alaşım kullanımı yaygınlaştırılmıştır. Tampon, orta çubuk, somun ve civata, kontrol çubuğu, bağlantı elemanları, tahrik mili, tampon braket, kiriş ve fren kaliper, piston, motor bağlantı çubuğu, pin mili civatası, vana ve yatak yuvası gibi çeşitli otomotiv parçalarında kullanım alanı vardır.

Biyolojik uyumluluğu nedeniyle titanyum, biyomedikal uygulamalarda da kullanım alanına sahiptir. Anti-alerjik ve anti-toksik bir metal oluşu ve organik sıvılara olan dayanıklılığı nedeniyle biyolojik uyumluluğu yüksek olan bu metalin, diş implantları, yapay protezler, cerrahi aletlerin yapımı olmak üzere medikal alanda çok geniş kullanım alanı bulunmaktadır.

Titanyum yapısı itibari ile kimya sektöründe, vernik, cila, plastik ve boya ham maddelerinin yapımında da kullanılmaktadır. Kâğıt dolgu ve kâğıt kaplamalarında, beyaz mürekkep, renkli cam ve seramik, kozmetik ürünler, cep telefonu, spor aletleri, gözlük, saat, takı ve mücevher gibi aksesuarlarda da geniş kullanım alanına sahiptir.

2.2. Titanyumun Genel Özellikleri

Periyodik tablonun dört numaralı grup ve periyodunda yer alan titanyumun simgesi Ti ve atom numarası 22'dir. Atom ağırlığı 47.87 g/mol'dur. 4.51 g/cm³ 'lük yoğunluk ile çeliğin ve süper alaşımların %60'ı kadar bir yoğunluğa sahiptir. Parlak ve grimsi yapısıyla beraber oldukça güçlü ve hafif bir metal olan titanyuma ait spesifik bilgiler Çizelge 2.1.'de gösterilmiştir:

Çizelge 2.1. Titanyum elementinin özellikleri

Adı, Sembölü, Atom numarası	Titanyum, Ti, 22
Element serisi	Geçiş metalleri
Grup, periyot, blok	4, 4, d
Atom ağırlığı	47.867 g.mol ⁻¹
Elektron dizilimi	[Ar] 3d ² 4s ²
Enerji seviyesi başına Elektronlar	2, 8, 10, 2
Maddenin doğal hali	Katı
Yoğunluk (o.s.)	4.506 g·cm ⁻³
Erime noktası	1941 K, 1668 °C, 3034 °F
Kaynama noktası	3560 K 3287 °C, 5949 °F)
Erime	14.15 kJ·mol ⁻¹
Buharlaştırma ısı	425 kJ·mol ⁻¹
Kristal yapısı	Hegzagonal
Yükseltgenme seviyesi	4, 3, 2, 1 [2]
Elektronegatifliği	1.54 (Pauling ölçeği)
Atomik yarıçapı	140 pm
Kovalent yarıçapı	136 pm
Isıl iletkenlik	(300 K) 21.9 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
CAS kayıt numarası	7440-32-6
Elektrik direnci	(20 °C) 0.420 µΩ·m
Elastisite modülü	116 GPa

Titanyumun 126 kg/mm² akma dayanımı, bakır ve krom-nikelli çeliklere oranla yüksek korozyon direnci öne çıkan özellikleri arasındadır. Titanyum genellikle 500°C ile 700°C aralığında verimli çalışma alanına sahiptir. Erime noktası 1668°C olan titanyum erime noktası 1536°C olan demire göre daha yüksek erime noktası değerine sahipken, 116 Gpa elastisite modülü ile demirin 194 Gpa elastisite modülüne kıyasla daha düşük bir elastisite modülüne sahip olduğu bilinmektedir. Başta demir olmak üzere molibden, vanadyum, alüminyum, kalay ve zirkonyum gibi çeşitli metaller ile alaşım yapabilir.

Çizelge 2.2.'de titanyumun, alüminyum, çelik ve ortak kullanım alanına sahip bazı metaller ile karşılaştırılması yer almaktadır.

Çizelge 2.2. Bazı metal ve alaşımların yapısal özelliklerinin karşılaştırılması

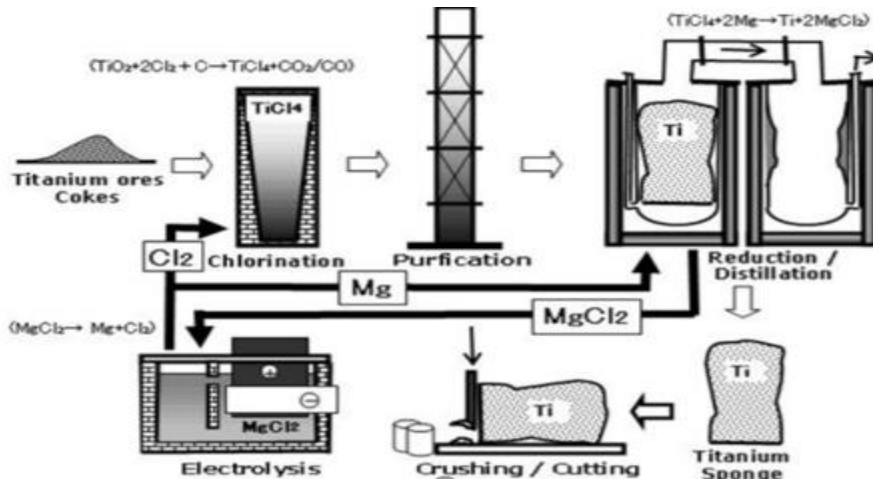
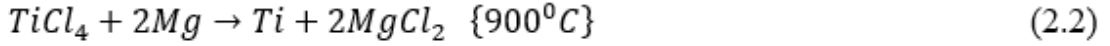
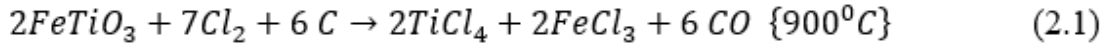
Element	Ti	Al	Zr	Ta	Alaşımsız Çelik	CrNi Çeliği
Ergime Noktası (°C)	1668	660	1852	2996	1500	1450
Kaynama Noktası (°C)	3260	2330	3578	5425	3000	3000
Kafes Yapısı Yüksek Sıcaklık	KHM (beta)	-	KHM (beta)	-	KHM >1392°C	-
Dönüşüm Sıcaklığı	882 °C	-	862 °C	-	906-1392°C KYM (gama)	-
Kafes Yapısı Oda Sıcaklığı	Hegzagonal (alfa)	Kübik Yüzey Merkezli	Hegzagonal (alfa)	Kübik Hacim Merkezli	Kübik Hacim Merkezli (alfa)	Kübik Hacim Merkezli
Isıl Kapasite	525	880	289	136	449	502
Isı İletkenliği	16,5	240	19	54	52,5	16,5
Isıl Genleşme	8,7	25	5,8	6,5	12	17,5

Korozyona karşı yüksek dayanımı, manyetik özelliğinin olmayışı, yüksek biyolojik uyumluluğu ile bilinen titanyum metali doğada kayalarda, toprakta, suda ve canlı varlıkların birçoğunda bulunur. Titanyum metali demir, magnezyum ve alüminyumun ardından doğada en çok rezerve sahip elementlerin başında gelir ve yer kabuğunun yaklaşık %0,6'sını bu metal oluşturmaktadır. Titanyumun ayrıca güneş ve göktaşları üzerinde de bulunduğu bilinmektedir. Apollo 17 tarafından Ay'dan gelmiş taşlarda da %12 civarında titanyum dioksit bulunmuştur. (Larousse, 2021)

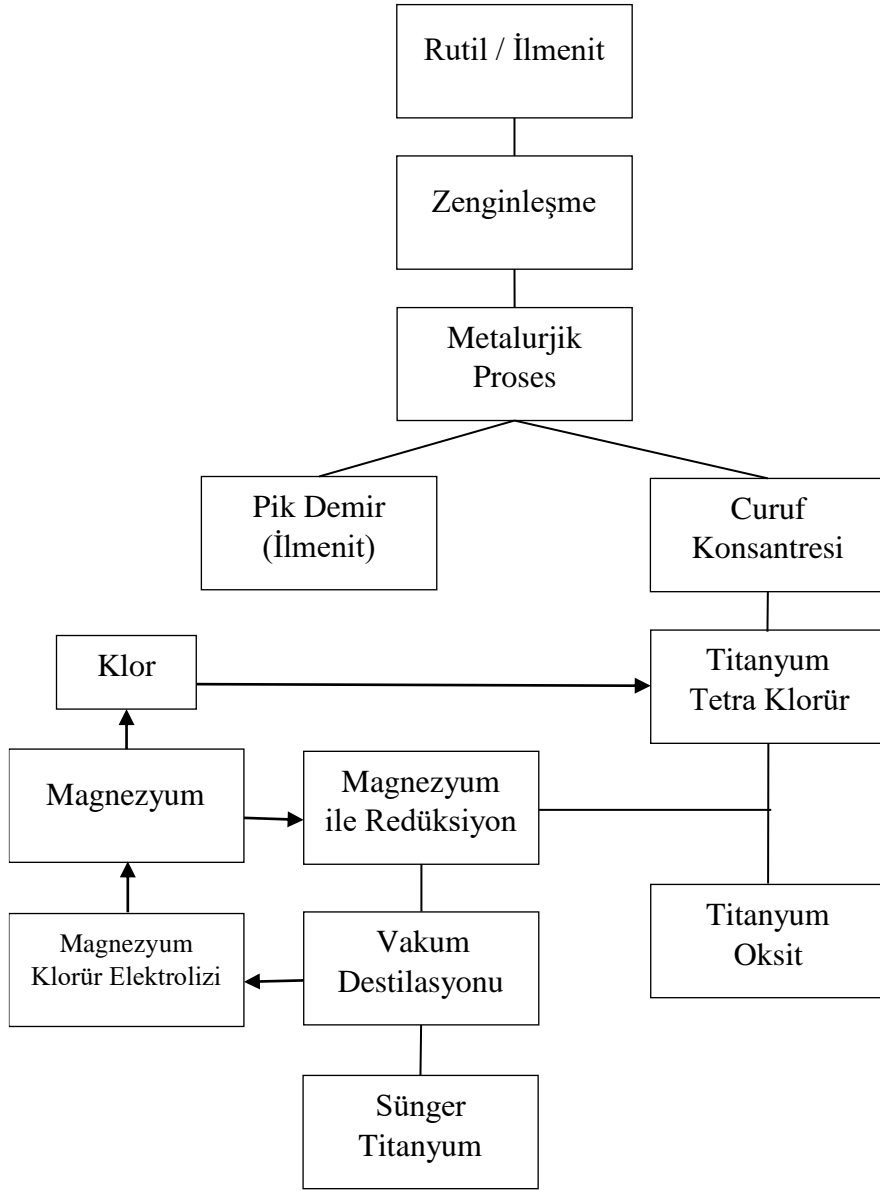
Titanyum elementi doğada litosferde ve yer kabuğunda geniş bir şekilde dağılmış olan rutil (TiO₂) ve ilmenit (FeTiO₃) cevherlerinde bulunur. Titanyum en yüksek dağılımı ile TiO₂ şeklinde (%97-98) rutil cevherinde bulunmaktadır.

2.3. Titanyum Üretimi

Günümüzde titanyumun metalik eldesi için yaygın olarak kullanılan yöntem Kroll prosesidir. Şekil 2.2. ve Şekil 2.3.'de Kroll prosesi ile titanyum süngerinin elde edilme adımları gösterilmektedir. İlk olarak cevher zenginleştirme işlemi ile hazırlanan rutil veya ilmenit mineralleri kullanım durumuna göre pik demir ya da cüruf olarak alınır. Bu aşamada ilmenit cevheri kullanılacaksa pik demir, rutil ise cüruf olarak kullanılır. Kroll prosesinde rutil veya ilmenit metalleri klor gazı ile 900°C'de reaksiyona girerek TiCl₄ (titanyum tetra klorür) elde edilmektedir. Kimyasal tepkime sonucu oluşan klorlu gazlar ve tetra klorür ayrımsal damıtma yöntemi ile ayrıştırılarak ayırma reaktöründeki titanyum tetra klorür 800°C-850°C'de paslanmaz çelik kap içinde sıvı magnezyum ile metalik titanyuma indirgenir. Tepkimeler (2.1) ve (2.2)'de görüleceği üzere gerçekleşir.



Şekil 2.2. Titanyum üretimi (Chen, Z., George, D., 2017)

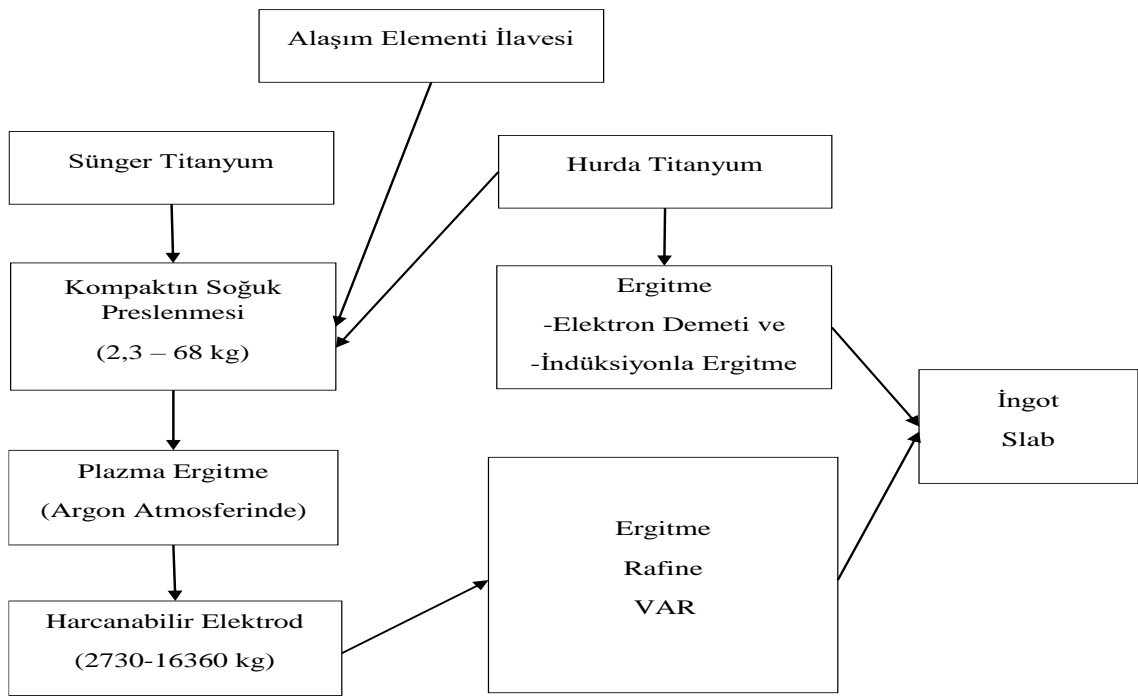


Şekil 2.3. Sünger titanyum üretim prosesi

Ortaya çıkan ürüne gözenekli yapısından dolayı sünger titanyum adı verilir. Sıvı haldeki $MgCl_2$ periyodik olarak reaktörden alınır ve elektroliz yoluyla yeniden magnezyuma dönüştürülebilir. Bu aşamada süngerimsi yapıda bulunan titanyum, ergitme işlemi görmeden önce kırılır ve preslenir. Bu sırada alaşım elementleri ve hurda titanyum ilavesi de karışıma eklenebilir. Preslenmiş titanyum vakum altında metal parça ark fırınında ergitilir. Bu işleme vakum ark ergitme (VAR) adı verilir. Ergimiş halde bulunan metal vakum altında yeniden katılaştırılabilir. Daha saf ve homojen bir yapının istenildiği

durumlarda tekrar ergitilip katılaştırılabilir. Bu şekilde tekrarlayan ergitme işlemleri sonucunda rafinasyon gerçekleşmiş olur. Bu ergitme işlemleri çoğunlukla döküm parçaların üretiminde ve hurda hammadde kullanıldığındaki ergitme işlemlerinde tercih edilmektedir. Ekstrüzyon ve haddeleme gibi işlemlerle titanyum yarı-mamulleri elde edilmektedir. Sünger titanyum üretiminden sonra yapılan ergitme işlemleri ve ingot eldesi aşağıdaki gibidir.

Sünger titanyum üretiminin ardından yapılan ergitme ve ingot eldesine ait işlemler Şekil 2.4.'de görülmektedir.

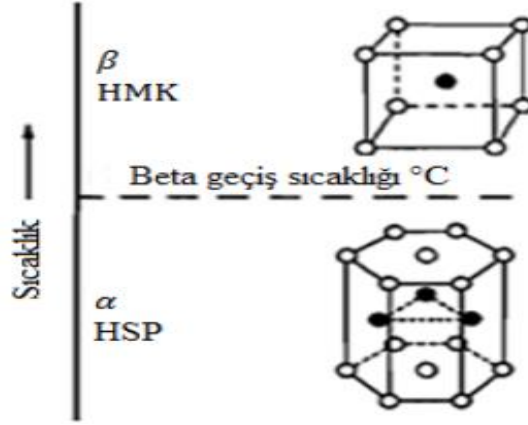


Şekil 2.4. Sünger titanyumun üretiminden sonra yapılan ergitme işlemleri ve ingot eldesi

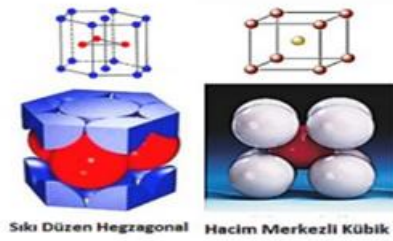
2.4. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum, allotropik bir malzeme olup, farklı sıcaklıklarda farklı kristal yapı ve fazlara sahiptir. Oda sıcaklığında hekzagonal sıkı paket kristal yapıdaki (HSP) α fazında olan titanyum, 882 °C sıcaklığın üzerinde hacim merkezli kübik yapıdaki (HMK) β fazına geçmektedir. α titanyumundan β titanyumuna allotropik dönüşüm sıcaklığı “ β dönüşüm sıcaklığı” olarak tanımlanmaktadır.

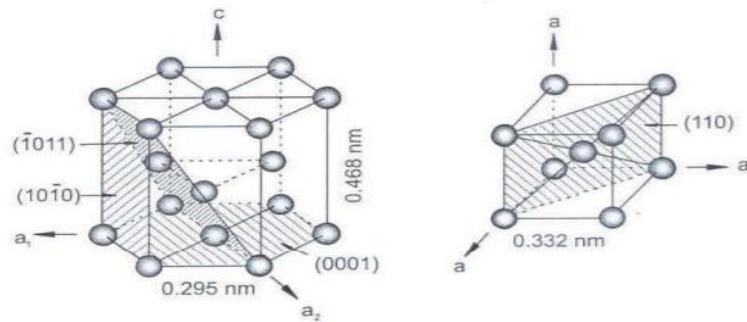
HSP α titanyum ve HMK β titanyumun kristal yapısı, titanyum kafes yapıları ve hekzagonal ve kübik kristal yapıları Şekil 2.5.-2.7.'de şematik olarak gösterilmektedir



Şekil 2.5. Titanyum ve mikro yapısının sıcaklıkla değişimi (Demirel, 2021)

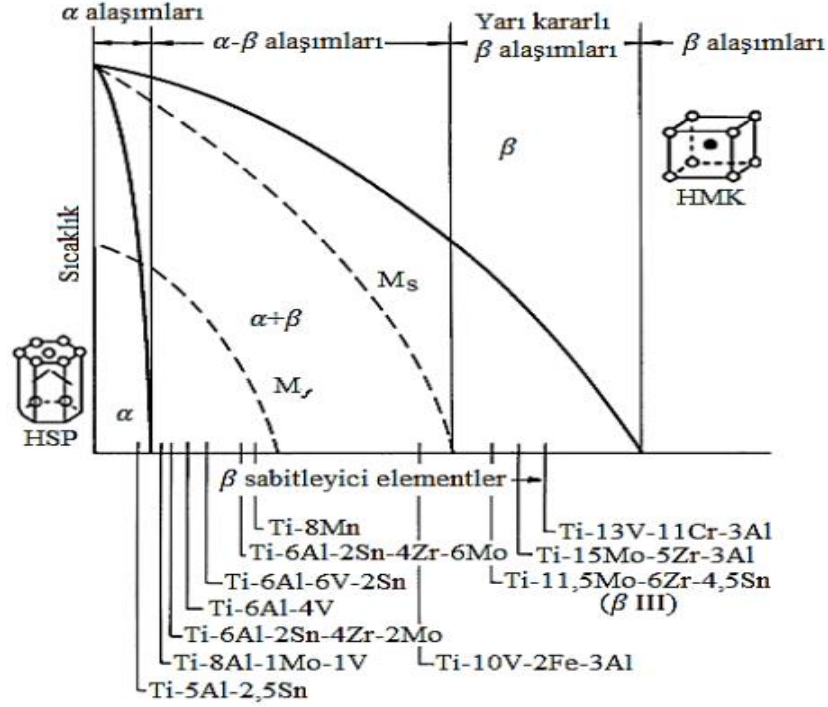


Şekil 2.6. α ve β titanyum kafes yapıları (Anonim, 2022)



Şekil 2.7. Titanyuma ait mikroyapılar (Sıkı paket hekzagonal ve hacim merkezli kübik) (İc-dem, 2007)

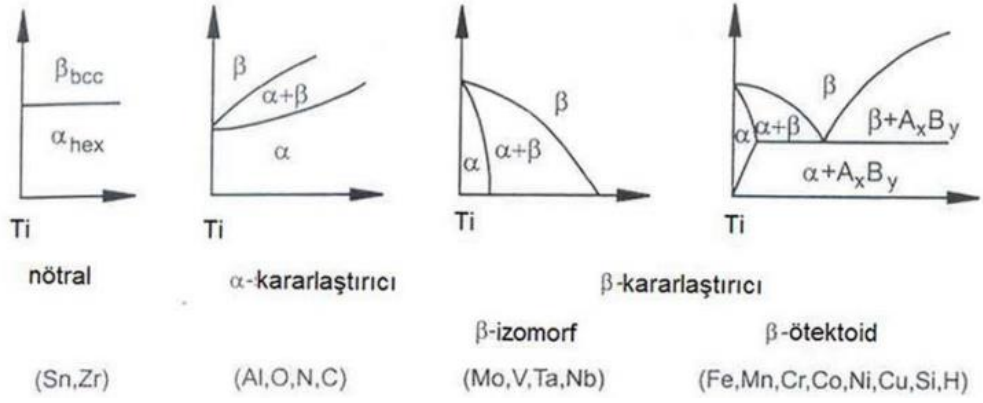
Titanyum alaşımları mikro yapılarına göre, α alaşımları, β alaşımları ve $\alpha + \beta$ alaşımları olarak sınıflandırılmaktadır. Bu alaşımlar $\alpha \rightarrow \beta$ dönüşüm sıcaklığının artırılması ya da azaltılmasına etki eden elementlerin ilavesiyle oluşturulmaktadır. Alaşım elementlerinin faz değişimine etkisi Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Titanyum faz diyagramı (Demirel, 2021)

α sabitleyiciler, β sabitleyiciler ve nötral elementler olarak ayrılan alaşım elementlerinden Al, O, N, C, gibi elementler α fazı sabitleyicileri ve Mo, V gibi metaller ise β fazı sabitleyicileri olarak bilinmektedirler. Sn ve Zr ise nötral elementlerdir.

Nötral, α veya β dengeleyici elementlerin farklı sıcaklıklarda faz yapısı üzerine etkisi de Şekil 2.9'de gösterilmiştir:



Şekil 2.9. Alaşım elementlerinin titanyum faz diyagramı üzerine olan etkisi (Balaban 2007)

Oda sıcaklığında α fazında bulunan ticari saflıktaki titanyumlar mekanik özellikleri itibariyle saf titanyuma benzemektedirler. Bu alaşımlara az miktarda β sabitleyicileri eklendiğinde yakın α fazı olarak adlandırılan faz meydana gelmektedir. Bu faz α fazlı titanyuma benzer özelliklere sahiptir. Ayrıca bu alaşımlar sahip olduğu özelliklere ek olarak 500°C'ye varan sıcaklıklarda kullanılabilir.

Her iki fazın da bulunduğu $\alpha + \beta$ alaşımları yüksek mukavemetleri ile öne çıkarken üretilen titanyum alaşımlarının yarısından fazlası bu grupta yer alan Ti6Al4V alaşımı oluşturmaktadır.

$\alpha + \beta$ alaşımlarına göre daha iyi şekillendirilebilme ve sertleştirilebilme özellikleri nedeniyle son yıllarda yaygın olarak kullanılmakta olan bir diğer grup ise β titanyum alaşımlarıdır. Bu alaşımlar da yapılarında yüksek oranda β fazı sabitleyicileri içermektedirler. Özellikle uzay ve havacılık sanayisinde sık kullanılan Ti6Al4V alaşımına alternatif olarak geliştirilen Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn alaşımı β alaşımına örnek olarak verilebilir.

Çizelge 2.3.'de farklı titanyum alaşımlarına ait mekanik özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.3. Farklı titanyum alaşımlarına ait mekanik özellikler

Alaşım	Elastik Modülü [GPa]	Akma Mukavemeti [MPa]	Çekme Mukavemeti [MPa]	(%) Uzama
Ti - Grade 1	102.7	170	240	24
Ti - Grade 2	102.7	275	345	20
Ti - Grade 3	103.4	380	450	18
Ti - Grade 4	104.1	485	550	15
Ti-6Al-4V (Tavlanmış)	110 - 114	825-869	895-930	6-10
Ti-6Al-7Nb	114	880-950	900-1050	8-15
Ti-5Al-2.5Fe	112	895	1020	15
Ti-5Al-1.5B	110	820-930	925-1080	15-17
Ti-15Zr-4Nb-4Ta-0.2Pd (Tavlanmış)	99	693	715	28
Ti-15Zr-4Nb-4Ta-0.2Pd (Yaşlandırılmış)	94	806	919	18
Ti-13Nb-13Zr (Yaşlandırılmış)	79-84	836-908	973-1037	10-16
Ti-12Mo-6Zr-2Fe (Tavlanmış)	74-85	1000-1060	1060-1100	18-22
Ti-15Mo (Tavlanmış)	78	544	874	21
Ti-15Mo-5Zr-3Al (Yaşlandırılmış)	80	1000-1060	1060-1100	18-22
Ti-15Mo-2.8Nb-0.2Si (Tavlanmış)	83	945-987	979-999	16-18
Ti-35.3Nb-5.1Ta-7.1Zr	55	547	597	19
Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (Yaşlandırılmış)	80	864	911	13.2

Ticari Saf Titanyum

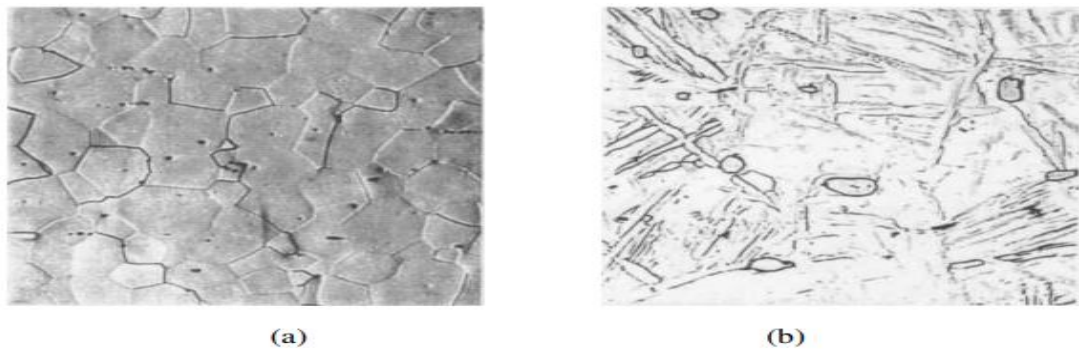
Ticari saflıktaki titanyum (CpTi commercially pure titanium) %98,63 ila %99,5 oranında titanyum içerir. Titanyumun içinde az miktarda oksijen, hidrojen, azot, demir ve karbon gibi elementler bulunabilir. Bu elementlerden karbon, azot ve oksijen titanyumun sünekliliğini bir miktar azaltsa da aynı zamanda malzemeyi güçlendirir. Oda sıcaklığındaki ticari saf titanyumun mikro yapısı tamamıyla α fazındadır ve hegzagonal sıkı paket (HSP) yapıdadır. 885 °C'ye ısıtıldıktan sonra bu faz hacim merkezli kübik yapıdaki β fazına dönüşür. Farklı kalitelere ait ticari saf titanyumlara ait α ve β dönüşüm sıcaklıkları Çizelge 2.4.'de verilmiştir. Ticari saflıktaki titanyum katkı elementi içeriğine göre Grade

1'den Grade 7'ye kadar kalite gruplarına ayrılmıştır. Bu kalite grupları arasındaki en önemli fark titanyumun içerdiği oksijen miktarından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 2.4. Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri (Gökdemir, 2005)

ASTM STANDARDI	Akma Muk.(MPa)	Çekme Muk.(MPa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Katkı Elementleri (mak % ağırlıkça)					
			Alfa(α)	Beta(β)	N	C	H	Fe	O	Pd
Grade 1	170	240	888	880	0,03	0,10	0,015	0,20	0,18	0
Grade 2	280	340	913	890	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25	0
Grade 3	380	450	920	900	0,05	0,10	0,015	0,30	0,35	0
Grade 4	480	550	950	905	0,05	0,10	0,015	0,50	0,40	0
Grade 7	280	340	913	890	0,05	0,10	0,015	0,30	0,25	0,2

Çizelge 2.4.'te görüldüğü gibi titanyumun akşam mukavemeti 170 MPa ile 480 MPa arasında değişmektedir. Önemli katkı metalleri olan oksijen ve demirin titanyumdaki içeriği arttıkça malzemenin aynı zamanda akma ve çekme mukavemetleri de artmaktadır. 700 °C'lerde tavlama işlemi ile kullanılan ticari saf titanyumun tavllanmış haldeyken mikro yapısı iğnesel veya eş eksenli olabilmektedir. Beta fazdan alfa faza dönüşüm sırasında malzemeye uygulanan soğutma hızı iğnesel alfa fazını oluşturmaktadır. İğnesel alfa plakalarının genişliği soğutma hızının artmasıyla daralacaktır. Yeniden kristalleşme tavlaması uygulanmış durumda ise eş eksenli yapı görülmektedir. Malzemenin mikro yapısında iğnesel alfa fazının görülmesi bu malzemenin beta dönüşüm sıcaklığının üzerindeki noktalara kadar ısıtıldığını göstermektedir. Şekil 2.10'da ticari saf titanyumda gözlemlenen iğnesel ve eş eksenli mikroyapılar gösterilmiştir (Leyens ve Peters 2003).



Şekil 2.10. Eşeksenli (a) ve iğnesel (b) içyapı örneği (Gökdemir, 2005)

Titanyum ve alaşımlarının eşeksenli ve iğnesel mikroyapılarına göre mekanik özellikleri değişmektedir. Eşeksenli mikroyapıya sahip olan alaşımlar yüksek mukavemet, yüksek süneklik, iyi bir şekillendirme kabiliyetine sahipken, iğnesel mikroyapıdaki alaşımların kırılma tokluğu ve sürünme direnci oldukça yüksektir.

Saf titanyum, alaşımlı titanyum malzemelere kıyasla daha zayıftır ve yüksek sıcaklıklarda dayanımını yitirir. Fakat saf titanyumun çok yüksek korozyon direncine sahip olması bu malzemenin özellikle yüksek mukavemet gerektirmeyen, daha çok korozif ortamlarda kullanılmasında tercih edilir. Özellikle kimya ve petrol endüstrisinde, rafinerilerde, boru donanımları, reaktörler, pompa ve valflerin üretiminde klorit, sülfit ve diğer kimyasallara karşı gösterdiği yüksek korozif direnç sayesinde geniş kullanım alanına sahiptir.

2.4.1 α Alaşımları

α alaşımlarının mikro yapıları yüksek oranda alfa fazı içermektedir. Genellikle çok yüksek sıcaklık dayanımı gereken ya da kriyojenik uygulamalarda (-253°C) tercih edilirler. Alfa titanyum alaşımları alüminyum, kalay ve zirkonyum elementlerini içerir. Genel olarak %5 Al- %2,5 Sn içeren bu alaşımlar sıkı paket hegzagonal yapılarına rağmen yüksek sıcaklıklarda bile yüksek mukavemet gösterirler. Bu alaşımların sürünme dayanımları β alaşımlarına göre daha fazladır. Bu sebeple yüksek sıcaklık aralığında kullanılan alfa alaşımları en yüksek mukavemetlerini $315-595^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında gösterirler.

α alaşımları kararlı α fazına sahip olduklarından dolayı $\alpha + \beta$ alaşımları ve β alaşımları gibi ısı işlem ile sertleştirilmezler. Bununla birlikte, soğuk işlem uygulamalarının ardından oluşacak gerilmeleri yok etmek amacıyla tavlama işlemi ya da yeniden kristalleşme tavlama yapılabilmektedir. $\alpha + \beta$ alaşımları ve β alaşımlarına kıyasla daha dar bir sıcaklık aralığında dövme sıcaklığına sahip olan α alaşımlarının genel olarak dövülebilme kabiliyetleri düşüktür. Döve işlemi sırasında malzemenin yüzeyinde oluşacak çatlakların önüne geçebilmek için dövme prosesinde deformasyon miktarının düşük tutulması ve malzemenin belirli aralıklarla tavlama gerekmektedir. Tavlama işleminin sonrasındaki soğutma hızına bağlı olarak alfa alaşımlarının mikroyapısı iğnesel ve eşeksenli olarak değişmektedir. $\text{Ti}_5\text{Al}_2.5\text{Sn}$ alaşımı tek fazlı alfa alaşımına örnek olarak verilebilir. Bu alaşım 300°C 'ye kadar olan sıcaklıklarda iyi bir şekillendirme kabiliyeti gösterirken yüksek çekme ve sürünme dayanımına sahiptir.

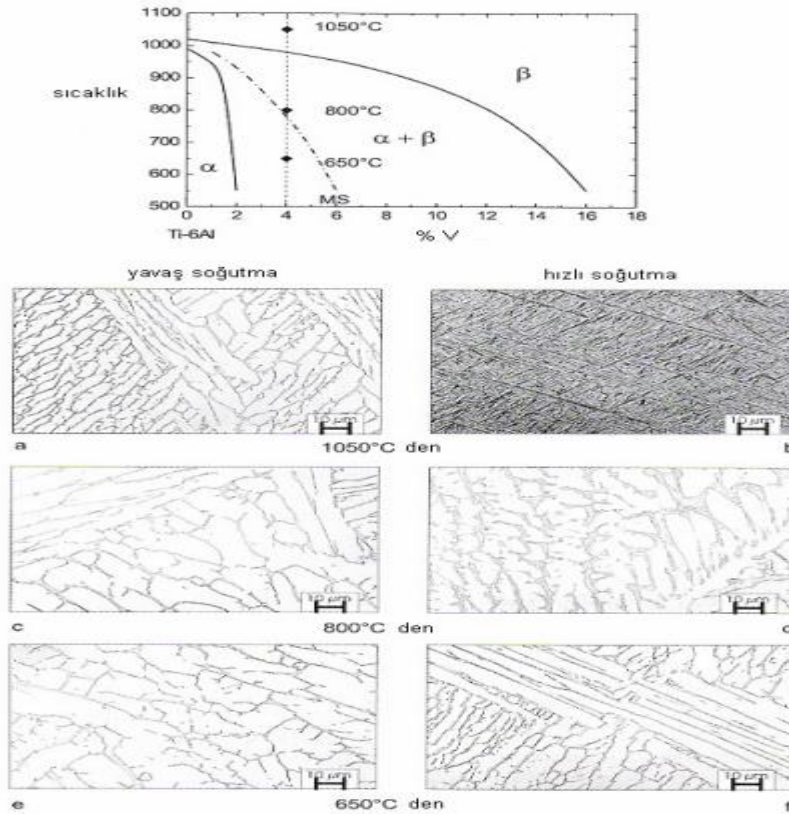
Yapısındaki alfa fazı yüksek kararlılığa sahipken aynı zamanda yapısında sınırlı miktarda beta fazını kararlı kılan elementler içeren alaşımlar "süper alfa" ya da " α 'ya yakın" olarak adlandırılır. Bu alaşımlara örnek olarak $\text{Ti}_8\text{Al}_5\text{Zr}_0.5\text{Mo}_0.25\text{Si}$ verilebilir. Bu alaşımlar 500°C 'ye çıkan sıcaklıklarda kullanılabilen, yüksek dayanıma sahip malzemelerdir.

Yüksek korozyon dayanımını ve deformasyon kabiliyetinin beklenildiği kimya ve petrol endüstrisinde saf titanyumun dayanım gereksinimi karşılayamadığı durumlarda alfa titanyum alaşımları tercih edilmektedir. Düşük sıcaklıklarda, hidrojen depolama ve

basıncılı tanklarda sıklıkla kullanılan alfa alaşımlarının en bilinen örneklerinden biri Ti-5Al-2,5Sn olarak verilebilir.

2.4.2 $\alpha+\beta$ Alaşımları

α ile β faz dengeleyici elementlerin oda sıcaklığında uygun oranda kullanılmasıyla α ve β fazlarının karışımı olan bir yapı elde edilmektedir. $\alpha+\beta$ alaşımları bileşimlerinde %5 oranında β fazı kararlaştırıcı elementler içerirler. Bu alaşım β dönüşüm sıcaklığının altına ısıtıldığında az miktarda α 'nın kalmasını ve tane irileşmesi önlenir. Alaşıma hızlı soğutma işlemi uygulandığında iğnesel alfa fazı meydana gelir. Yavaş soğutma işlemi ise eşeksenli alfa yapısı meydana getirmektedir. Şekil 2.11.'de Ti-6Al-V aşımında farklı sıcaklıklarda yavaş soğutma ve su vererek soğutma sonucunda oluşan mikroyapılar gözükmektedir.



Şekil 2.11. Ti6AlV'un farklı soğutma sıcaklıklarında oluşan mikroyapıları (İçdem, 2007)

$\alpha+\beta$ alaşımlarına uygulanan tavlama işlemi ile yüksek süneklik ve dayanım dengesi elde edilir. Ayrıca bu alaşımlara çözündürme, su verme ve yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanabilir. Yaşlandırma işlemi ile malzemenin dayanımı artmaktadır. Alaşımların kimyasal yapıları içerdikleri alaşım elementleri ve malzemeye uygulanan ısıl işlemlere göre değişiklik göstermektedir. Çizelge 2.5.'te α ve β dengeleyici elementler görülmektedir.

Çizelge 2.5. α ve β dengeleyici elementler (İşler, 1999)

Alaşım elementi	Alaşım elementi miktarı (Ağırlıkça %)	Yapı hatası
Alüminyum	2-7	Alfa dengeleyici
Kalay	2-6	Alfa dengeleyici
Vanadyum	2-15	Alfa dengeleyici
Molibden	2-13	Alfa dengeleyici
Krom	2-12	Alfa dengeleyici
Bakır	1-3	Alfa dengeleyici
Zirkonyum	2-8	Sürünme dayanımını arttırır
Silisyum	0,05-1	Sürünme dayanımını arttırır

Titanyum alaşımlarının %70'inden fazlasını $\alpha+\beta$ alaşımları oluşturmaktadır. En çok kullanılan $\alpha-\beta$ alaşımları Ti6Al4V ve Ti6Al6V2Sn formüllerine sahip alaşımlardır. Bu alaşımlar gününüzde kullanılan titanyum alaşımlarının %50'den fazlasını oluşturmaktadır. Ti6Al4V alaşımını sahip olduğu üstün özellikleri nedeniyle uzay ve havacılık sanayi başta olmak üzere medikal çalışmalarda, petrokimya endüstrisinde çok geniş alanlarda kullanılmaktadır. Bu alaşımlar yüksek çekme ve yorulma dayanımları ile yüksek korozyon direncine sahiptir. Ayrıca işlenebilirlik, kolay kaynak edilebilirlik ve ticari bakımdan temin edilebilirlik açısından oldukça kullanışlıdır. Ti6Al4V alaşımının içeriğindeki alüminyum elementinin güçlü bir katı çözelti sertleşme etkisi göstermesi ve vanadyum elementinin de oda sıcaklığında β fazını stabil hale getirirken yüksek sıcaklıklarda malzemenin sünekliği iyileştirmesi bu malzemeye yüksek mukavemet özelliği sağlamaktadır.

α - β alaşımları ekstrüze edilmiş, levha, çubuk ve tel şeklinde mamül halde bulunur. Haddelenmiş ve ekstrüze edilmiş malzemeler genellikle havacılık sanayisinde uçak parçalarının üretiminde kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda kullanılması gereken parçaların çekme dayanımını artırmak için ısıl işlem uygulanmaktadır. Bu alaşımlar 482 °C'lerde ve 1138 MPa'a kadar çıkan bir çekme dayanımında kullanılabilirler.

2.4.3 β Alaşımları

β Alaşımları yüksek oranda β fazı dengeleyici elementlerinden molibden ve vanadyum içerirler. Özellikle molibden ve vanadyum içeren β alaşımlarının korozyon direnci yeksektir ve yeksek kırılma tokluğuna sahiptirler. β matrisi içerisinde α fazının öknelmesi ile sertleştirilebilirler. Tavlama işlemi ile mikroyapılarında yalnızca β fazı bulunan bu alaşımlara hızlı soğutma uygulandığında yapılarında tamamı β fazından meydana gelen on bir dengesiz faz oluşmaktadır. β alaşımları yeksek yoğunluk, sertleştirilebilirlik, dövülebilirlik ve iyi soğuk şekillendirme özellikleri ile diğer titanyum alaşımlarından ayırt edilebilirler. Isıl işlem ve şartlı kaynak işlemlerine uygundur. β titanyum alaşımları yeksek dayanımın önemli olduğu uzay ve havacılık uygulamalarında, bağlantı elemanlarında ve kirişlerde kullanılabilirler. (İçdem, 2007)

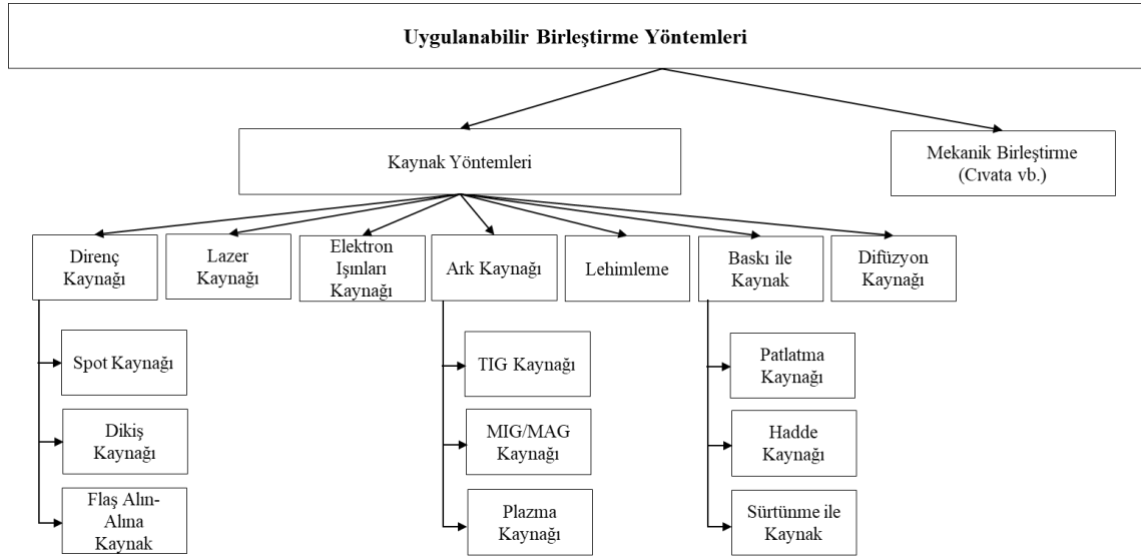
2.5. Titanyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti

Metal malzemelerin kaynak işlemlerinin öncesinde birtakım ön hazırlık uygulamaları vardır. Bunların başında kaynak yapılacak malzemenin temizlenmesi, uygun kaynak yönteminin belirlenmesi ve kaynak ağzı açılması gelir. Kaynak işlemi sırasında ise, ortamın temizliği, ortamın nemi ve sıcaklığının optimum düzeyde olması, koruma gazının türü, her pasodan sonra mekanik temizlik ve apak giderme işlemlerinin düzenli şekilde yapılması gerekir. Kaynak sonrası uygulanacak işlemler ve kontroller ise, varsa malzeme üzerinde mekanik ve ısıl işlem gerekliliği, tahribatsız ve tahribatlı muayeneler olacaktır. Titanyum ve alaşımları kaynak yeteneği bakımından genel olarak iyi malzemelerdir. Kaynak dikişi ve kaynak yapılmış bölgeye bakıldığında malzemenin mekanik özelliklerinin korunduğu ve korozyon dayanımının çok değişmediği görülür. ASTM

International titanyuma uygulanabilecek otuz bir farklı kaynak türü tanımlamıştır. (Kıral 2012).

Titanyum alaşımları östenitik paslanmaz çelik veya alüminyum kaynağında kullanılan ekipmanlar ve gaz metal ark kaynağı, plazma ark kaynağı, gaz tungsten ark kaynağı ve lazer kaynak ile kaynak edilebilmektedirler. Titanyuma kullanılacağı şartlara göre farklı kaynak işlemleri uygulanabilir. Kimya ve petrol sektöründe kullanılacak basınçlı kap ve aparatların üretiminde TIG kaynağı, daha kalın iş parçalarının üretiminde ise plazma kaynağı uygulanması uygun olacaktır. Uzay ve havacılık endüstrisinde ise genellikle elektrik ışın kaynağı ve lazer kaynağı tercih edilmektedir.

Şekil 2.12’de titanyuma uygulanan kaynak yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Uygulanabilir birleştirme yöntemleri

Alaşımsız titanyumlar ve tüm titanyum alaşımları kaynak edilebilirler. Alaşımsız haldeki saf titanyumun tavlanmış ve soğuk işleminden geçmiş titanyumlara göre kaynak kabiliyeti daha yüksektir. α alaşımlarından Ti-5Al-5Sn-5Zr, Ti-5Al-20Sn, Ti-6Al-2Cb-1Ta-1Mo, Ti-8Al-1Mo-1V ve Ti-7Al-12Zr daima tavlanmış şekilde kaynak edilmelidir. En bilinen Ti6Al4V formülüne sahip α - β alaşımı ve az miktarda β kararlılaştırılmış alaşımlar da kaynak işlemine uygundur. Fakat içeriğindeki kararlılaştırılmış β fazı arttıkça kaynak

işlemi sırasında malzemenin gevrekleştiği gözlemlenmektedir. Bu gevrekleşmeyi önlemek için kaynaklı malzemeye yaşlandırma sertleşmesi uygulanabilir. Yaşlandırma işleminin uygulanmadığı kaynaklı malzemeler istenmeyen oranda gevrek hale gelebilirler. Bu nedenle Ti6Al4V alaşımı tavllanmış halde veya eriyik işlem ve yaşlandırma yapılarak kaynak edilir.

Çizelge 2.6'da bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Bazı titanyum alaşımlarının kaynak edilebilirlikleri (Kahraman, 2007)

Alaşım Türü	Alaşım Sembolü	Kaynak Edilebilirlik
<i>Ticari Saflıktaki Titanyum</i>	-	Çok iyi
<i>α Alaşımları</i>	Ti-0,2Pd	Çok iyi
	Ti-5Al-2,5Sn	İyi
	Ti-5Al-2,5Sn-ELI	Çok iyi
<i>α'ya yakın Ti Alaşımları</i>	Ti-8Al-1Mo-1V	Çok iyi
	Ti-66Al-2Cb-1Ta-0,8Mo	Çok iyi
	Ti-6Al-4Zr-2Mo-2Sn	İyi
<i>α+β Ti Alaşımları</i>	Ti-6Al-4V	İyi
	Ti-6Al-4V-ELI	Çok iyi
	Ti-7Al-4Mo	Özel uygulamalar için sınırlandırılmış
	Ti-6Al-4V-2Sn	Özel uygulamalar için sınırlandırılmış
	Ti-8Mn	Kaynak yapılması önerilmez
<i>β Alaşımları</i>	T, -13V-11Cr-3Al	İyi

Titanyum ve titanyum alaşımlarının gazlara olan ilgisi farklı kaynak türlerinin uygulanmasına engel olurken, uygulama esnasında bazı ek önlemler alınmasını da gerektirir. Kullanılan Argon veya Helyum koruyucu gazları yüksek saflığa sahip olmalıdırlar. Reaktif yapısından dolayı oksiasetlenen (gaz) kaynağının yapılması mümkün değildir. Titanyum alaşımlarının yüksek sıcaklıkta havada bulunan gazları bünyesine almasından dolayı yapısında bir miktar gevrekleşme meydana gelmektedir. Bu yüzden kaynak işleminin koruyucu gaz altında yapılması daha uygun olacaktır. Küçük ve orta hacimli kaynak uygulamaları çevrenin kontrol altında olduğu ortamlarda yapılabilirken daha büyük hacimli kaynaklar ise korucu gaz odalarının kurulması ve bu odalarda sadece

kaynak bölgesinin alt ve üst taraftan koruyucu atmosfer altına alınması ile yapılırlar. Bu koruma ortamı, kaynak dikişi ve kaynak bölgesinin sıcaklıklarının 540°C altına düşmesine kadar devam etmektedir.

Ana metalin ve ilave metalin kaynak sırasında kirlenmesini önlemek için temiz olması gerekir. Dolayısıyla malzemenin yüzeyindeki kirlerin, kaynak sonrası renklemelerin ve oksidasyonların temizlenmesi gerekir. Aksi durumda malzeme, ortamdaki gaz ile reaksiyona girecek, kaynak dikişlerinde hatalar belirgin olacak ve bu da malzemenin mekanik özelliklerini bozacak ve kaynak kalitesini olumsuz etkileyecektir. Ayrıca ergimiş halde yüksek sıcaklıkta bulunan titanyum kendi oksitlerini de çözeceğinden, kullanılacak kaynak teli temiz deri eldivenler ile tutulmalıdır.

Titanyum alaşımlarında kaynak bölgesi ana malzeme kadar çevre şartlarına ve farklı kimyasal ortamlara dayanıklılık göstermektedir. Fakat kaynak kalitesi düştükçe kaynak bölgesinde de bu durum azalacak ve hatta kaynak dikişi ana malzemeye göre daha az dayanıklı konuma geçecek, daha erken korozyona uğrama durumu ile karşılaşılacaktır. Titanyuma uygulanan kaynak işleminin ardından malzemenin mekanik özellikleri değiştiği bilinmektedir. Kaynak sırasında oluşan iç gerilimleri azaltmak için malzemeye kaynak sonrası gerilim giderme ve rekristalizasyon tavlama gibi ısıl işlemler uygulanması gerekir.

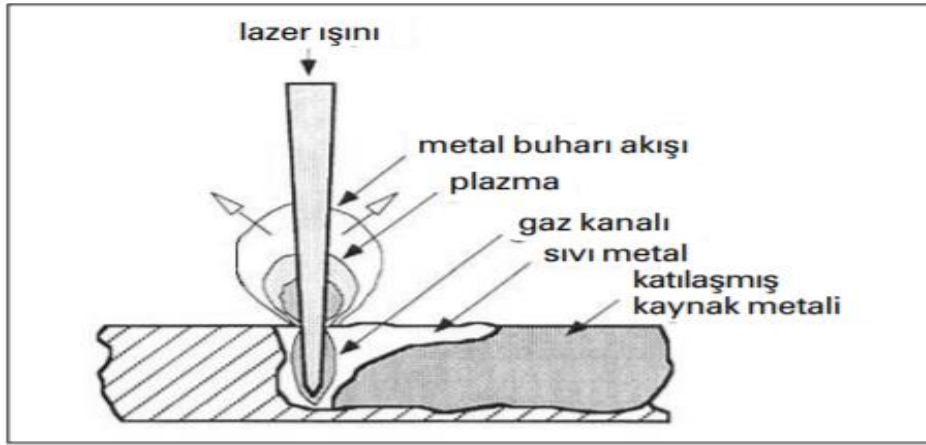
Lazer Kaynağı

Uyarılmış radyasyon ile ışığın kuvvetlendirilip yayınına anlamına gelmektedir. Lazer kaynağı ile kaynak yapılan metallerin birbirine temas eden yüzeylerinin eritilmesi ve bu yüzeylerin soğumaya bırakılmasıyla füzyon işlemi gerçekleşir. İngilizce “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harfleri kısaltılarak LASER olarak kullanılan kelime dilimizde de lazer olarak kullanılmaktadır. Lazer uyarılmış radyasyon ile ışığın kuvvetlendirilip yayınına ifade eder. (Arslan, 2020)

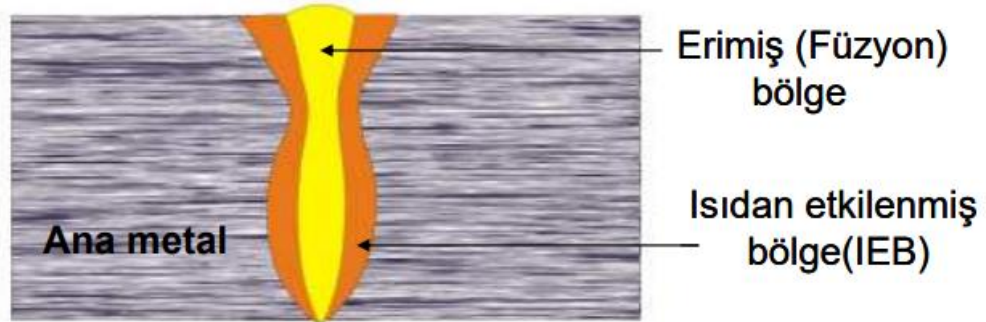
Lazer kaynağı yapılmış malzeme esas itibarıyla üç ana bölümden meydana gelmektedir: İlki ana malzeme olarak belirtilen kaynak yapılan malzemenin kendisidir ve bu

malzemede herhangi bir yapısal değişiklik olmamaktadır. İkinci alan ise füzyon alanı olarak belirtilen erimiş metalin (kaynak dikişinin) olduğu alandır ve son olarak bu iki alan arasında kalan, ısıdan etkilenmiş bölge yer almaktadır. Bu bölge ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) olarak adlandırılır.

Şekil 2.13'te lazer kaynağının şematik gösterimi ve Şekil 2.14'te kaynaktan etkilenen metalik bölgeler gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Lazer kaynağının şematik gösterimi ve kaynaktan etkilenen metalik bölgeler (Yavuz, 2005)



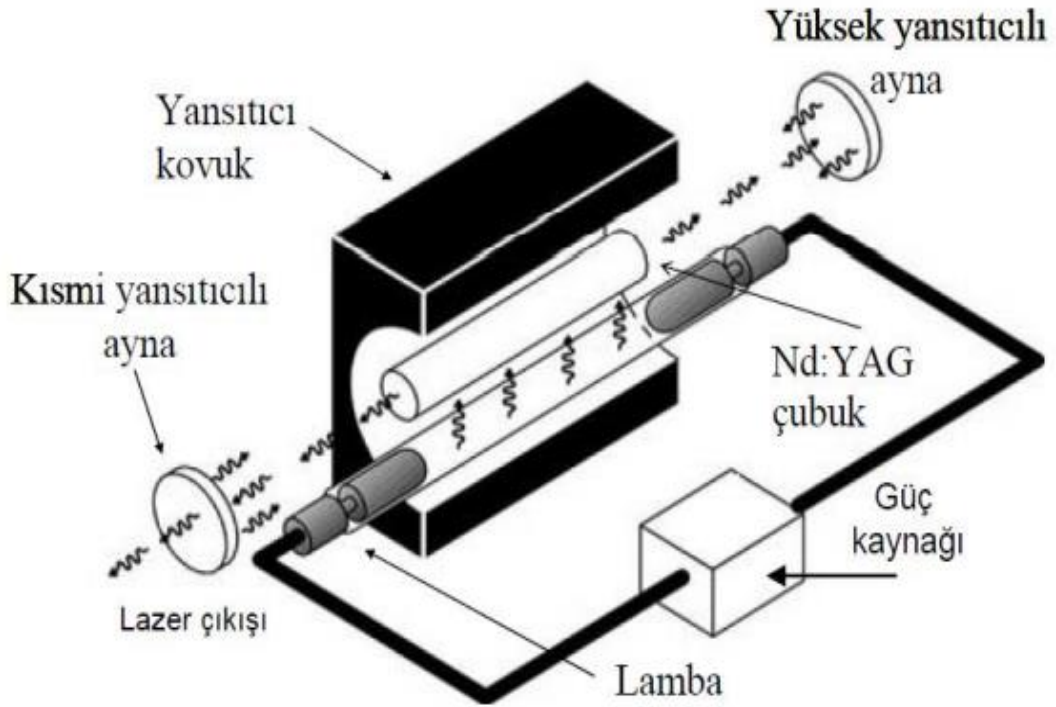
Şekil 2.14. Lazer ile kaynak işlemi sırasında oluşan bölgeler (Akman, 2006)

Nd: YAG Lazeri

Katı hal lazerleri içinde en yaygın kullanılan lazer Nd-YAG lazeridir. Ana kristal olarak $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG, Yttrium Aliminyum Garnet) kullanılır. Sürekli veya yarı atımlı çalışan bu lazer hem lamba hem de AlGaAs yarı iletken lazerleriyle pompalanabilirler.

Nd-YAG lazerlerde çubuk şeklindeki kristalin baş ve son kısımları yansımayı giderecek mat bir madde ile kaplanarak yansımanın önlenmesi sağlanır. Kaplanmış bu kristal metal bir kap içerisinde monte edilerek bu kap üzerine kullanılacak yöntem uygun seçilen flaş lambalar ile yansıtıcı aynalar yerleştirilir.

Şekil 2.15.'te bir Nd-YAG lazer sisteminin bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Nd-YAG lazer sisteminin bileşenleri (Akman, 2006)

2.6. Titanyum ve Alaşımına Uygulanan Isıl İşlemler

Titanyum ve alaşımlarına gerilim giderme, tavlama, çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanır.

Titanyum ve alaşımlarına uygulanan ısıl işlemlerde genel olarak, gerilim giderme işlemi ile parçanın üretimi sırasında oluşan iç gerilmelerin önlenmesi, tavlama işlemi ile malzemenin yapısal ve boyutsal kararlılığının sağlanması ve talaş kaldırmaya uygunluk gibi önemli parametrelerinin optimizasyonu sağlanırken, çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri ile parçanın mukavemetinin artırılması amaçlanmaktadır. Parçalara uygulanan tavlama, çözeltiye alma ve gerilim giderme ısıl işlemleri ile malzemenin korozyon direncini arttırmak ve yapı içinde oluşacak çarpımları önlemek mümkün olacağı gibi parçanın şekillendirme öncesinde beklenen duruma getirilmesi de sağlanır. Titanyum ve alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler ile malzemenin kırılma dayanımının, kırılma sünekliğinin ve yüksek sıcaklık ortamında sürünme özelliklerinin iyileştirilmesi de mümkündür. Çizelge 2.7’de titanyuma uygulanan ısıl işlem türleri verilmiştir.

Çizelge 2.7. Titanyum tipik ısıl işlem değerleri (Kıral, 2012)

Malzeme		Uygulanabilir Isıl İşlem Türleri			
		Gerilim Giderme	Isıl İşlem	Normalizasyon	Yaşlandırma
Ticari Sıfıkta Malzeme	Titanyum	480 – 595 °C 15-240 dak	650 – 815 °C 15-120 dak	-	-
Alfa – Beta Titanyum Alaşımları	Ti-3Al-2.5V	370-595 °C 15-240 dak	650 – 790 °C 30-120 dak	-	-
	Ti-6Al-4V	480 – 650 °C 60-240 dak	705 – 870 °C 15-60 dak	900 – 970 °C 2-90 dak	480 – 690 °C 2-8 saat
Beta Titanyum Alaşımları	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	790 – 895 °C 30-60 dak	760 – 815 °C 3-30 dak	760 – 815 °C 2-30 dak	480 – 675 °C 2-24 saat

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Kullanılan Materyaller

Bu tez çalışmasında endüstride uzay ve havacılık sanayi başta olmak üzere, medikal ve kimyasal sektörlerde çok geniş kullanım alanına sahip, Ti6Al4V kimyasal formüllü, Grade 5 olarak sınıflandırılan titanyum sac malzeme kullanılmıştır. Kullanılan Grade 5 titanyum malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

1 mm kalınlığında, 13 x 32,5 mm ölçülerinde Ti6Al4V alaşımlı titanyum sac malzeme NG-YAG lazer kaynağında birleştirilerek deneylerde kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Malzemeye farklı ısıl işlem uygulanarak bu değişken parametreler altında, çekme ve sertlik deneyleri ile parçanın mekanik özellikleri incelenecektir.

Çizelge 3.1. Grade 5 Titanyumun fiziksel ve mekanik özellikleri (Anonim, 2022)

Fiziksel Özellikler	Grade 5
Yoğunluk	4.43 g/cc
Mekanik Özellikler	
Vickers Sertliği	349
Max Çekme Dayanımı	950 Mpa
Akma Sınırındaki Gerilme Dayanımı	880 Mpa
Kopma Uzaması	14%
Kesit Alanı Daralması	36%
Elastiklik Modülü	113.8 GPa

ASTM Standardı	İmpüriteler							
	Ti	C	Fe	Al	H	N	O	V
Grade 5	90	-	Max 0,25	6	-	-	Max 0,2	4

3.2. Kaynak Prosesi

Literatür incelendiğinde kaynak çeşitleri arasından lazer kaynak yönteminin diğer yöntemlere kıyasla daha sağlam olduğu ve kaynak nüfuziyenin yüksek oranda sağlandığı görülmüştür. (Akman 2006, Kıral 2012). Lazer kaynak işleminde nüfuziyetin uygun oranda karşılanabilmesi için çift taraflı kaynak yapılmıştır. İlgili deney parçalarının kaynak prosesi Şekil 3.1.'de görülen Sıma SWA 300 Nd: YAG lazer kaynak makinesi ile yapılmıştır. Çizelge 3.2.'de Sıma SWA 300 Nd: YAG lazer kaynak makinesine ait teknik özellikler belirtilmiştir.



Şekil 3.1. Nd-YAG lazer kaynak makinesi

Çizelge 3.2. SWA 300 ND: Yag lazer kaynak makinesinin teknik özellikleri (Xeu ve ark., 2019)

Ortalama Güç	300 W
Tepe Gücü	12 kW
Atım Enerjisi	150 J
Atım Frekansı	0- 100 Hz
Atım Süresi	0,3- 25 ms
Spot Çapı	0,6- 2 mm
Lazer Işın Aktarımı	Fiber-coupled
Fokus Optiği	120 mm
Vision sistemi	Leica binocular
Hareket Hızı	0- 20 mm/s
X eksen Strok	300 mm
Y eksen Strok	150 mm
Z eksen Strok	500 mm
Soğutma	Air / aria

Lazer kaynak için belirlenen makine parametreleri Çizelge 3.3.'te gösterilmiştir. (Sevinç, 2019).

Çizelge 3.3. Lazer kaynak parametreleri (Sevinç, 2019)

<i>Model</i>	<i>SWA 300</i>
Ortalama Güç	300 W
Tepe Gücü	12 kW
Atım Enerjisi	30,6 J
Atım Frekansı	8.5 Hz
Atım Süresi	3.6 ms
Spot Çapı	1.3 mm
Lazer Işın Aktarımı	Fiber-coupled
Fokus Optiği	Operatör kontrollü
Hareket Hızı	Operatör kontrollü
Üst üste binme oranı	75%

Kaynak işlemi sırasında havanın kaynak bölgesine girmesini engellemek ve kaynak dikişiyile kaynak bölgesinin havanın olumsuz etkilerinden önlenmesini sağlamak

amacıyla koruyucu gaz olarak yüksek saflıkta argon gazı kullanılmıştır.120 barda, 10 lt/dk ile yüksek saflıkta argon gazı otuz derecelik açılı ile kaynak bölgesine verilmiştir.

3.3. Malzemelere Isıl İşlem Uygulanması

Deneyisel çalışmada 1 mm kalınlığında, orta yerinden kaynak ile birleştirilmiş, 13 x 32,5 mm ölçülerinde parçalar kullanılmıştır. Parçalar Uludağ Üniversitesi malzeme laboratuvarında bulunan, 75 litre hacimli, 1200 C°'ye kadar ısıtma yapabilen Nevola marka fırında ısıtılmıştır. Fırın görselleri Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Isıl işlem fırını

Altı farklı gruba ayrılan parçalardan ilki oda sıcaklığında hiçbir ısıl işlem görmeden ayrılmış olup diğer parçalara Çizelge 3.4.'te belirtilen ısıl işlemler uygulanmıştır.

Çizelge 3.4. Numunelere uygulanan ısıtım işlemleri

Örneklem	Uygulanan İşlem
S1	İşlem Görmemiş Plaka
S2	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş
S3	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş.
S4	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş, 600°C 'de 60 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş.
S5	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş, 500°C 'de 60 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş.
S6	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş, 400°C 'de 60 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş.

3.4. Yapılan Testler ve Analizler

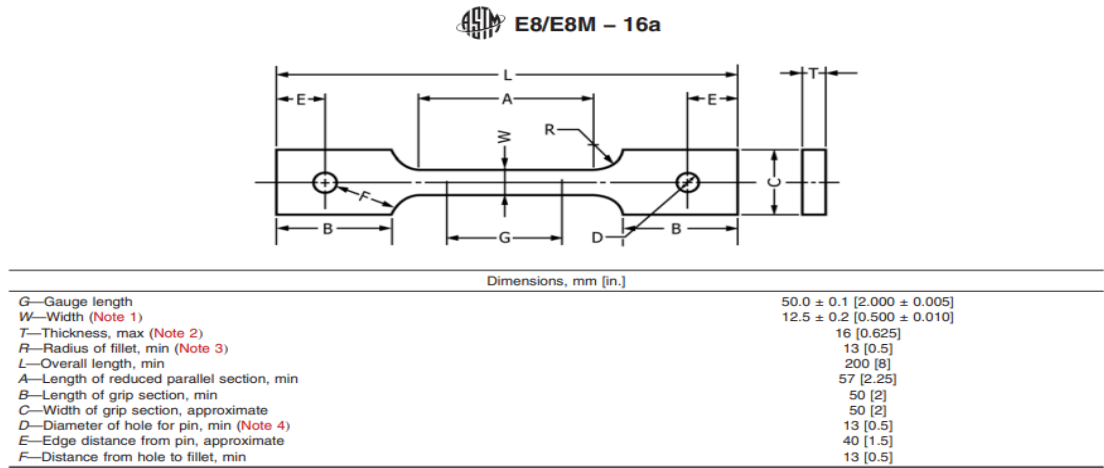
Farklı ısıtım işlemleri uygulanmış malzeme üzerinde meydana gelen değişiklikleri inceleyebilmek ve yorumlayabilmek üzere parçalara çekme ve sertlik testleri uygulanmıştır. Bu testler ile parçaların farklı ısıtım işlemleri altında mekanik özellikleri incelenmiştir.

3.4.1 Çekme Testi

Malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan testlerden birisi de çekme testidir. Çekme testi ile statik yük altındaki malzemenin elastik ve plastik özellikleri incelenir. Çekme testi sonucu elde edilen değerler mühendislik hesaplarında direkt olarak kullanılabilir. Çekme deneyinde, kullanılacak malzemenin boyutları daha önceden belirlenen standartlara göre daire veya dikdörtgen olarak numune hazırlanır. Çekme testi için standartlara göre oluşturulmuş deney numunesi, cihazın aşağı ve yukarı doğru hareket edebilen çenelerine bağlanır. Sabit hızda hareket eden çenelerden biri deney parçasına değişken çekme kuvveti uygulamış olur. Uygulanan bu çekme kuvvetine karşılık gelen uzama kaydedilerek gerilme-uzama grafiği elde edilir.

Çekme deneyi ile malzemeye ait akma değeri, elastik modülü, kopma dayanımı, kopma uzaması, kopma büzülmesi, tokluk gibi malzemeye spesifik değerler elde edilir.

Yapılacak çekme testi için altı gruba ayrılmış iş parçalarının her birinden üçer adet olmak üzere toplam on sekiz adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Numuneler ASTM E8 standartlarına uygun olarak Şekil 3.3.'teki ölçüler referans alınarak oluşturulmuştur.



NOTE 1—The ends of the reduced parallel section shall differ in width by not more than 0.1 mm [0.002 in.]. There may be a gradual taper in width from the ends to the center, but the width at each end shall be not more than 1 % greater than the width at the center.

NOTE 2—The dimension *T* is the thickness of the test specimen as stated in the applicable product specifications.

NOTE 3—For some materials, a fillet radius *R* larger than 13 mm [0.500 in.] may be needed.

NOTE 4—Holes must be on center line of reduced parallel section within ± 0.05mm [0.002 in.].

NOTE 5—Variations of dimensions *C*, *D*, *E*, *F*, and *L* may be used that will permit failure within the gauge length.

Şekil 3.3. Çekme testi çubuğu için ASTM E8 standartları

Deneyde kullanılacak numuneler Şekil 3.4.'te görseli bulunan SODICK AG600L markalı telerozyon tezgahında, telerozyon yöntemi ile kesilmiştir. Kesilen numuneler Şekil 3.5.'te gösterilmiştir.

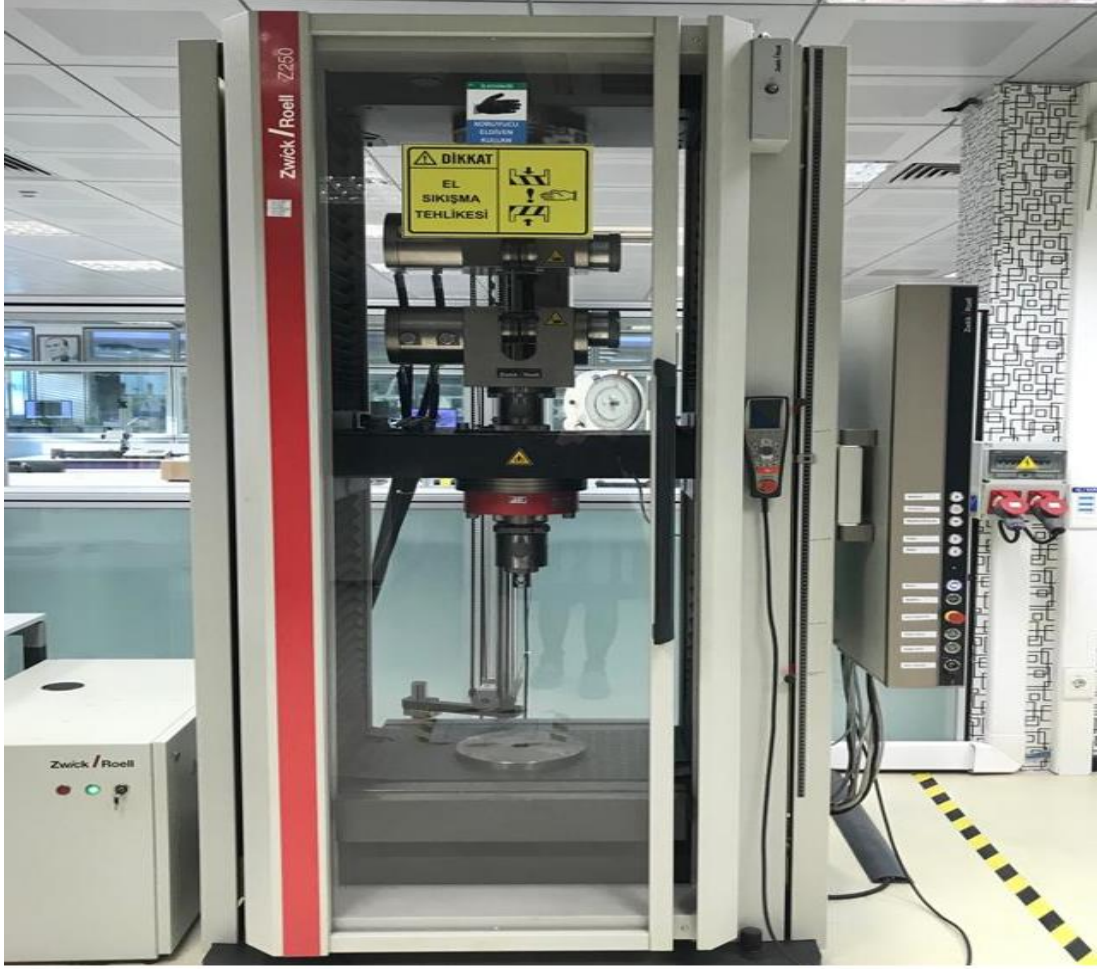


Şekil 3.4. Telerozyon tezgâhı

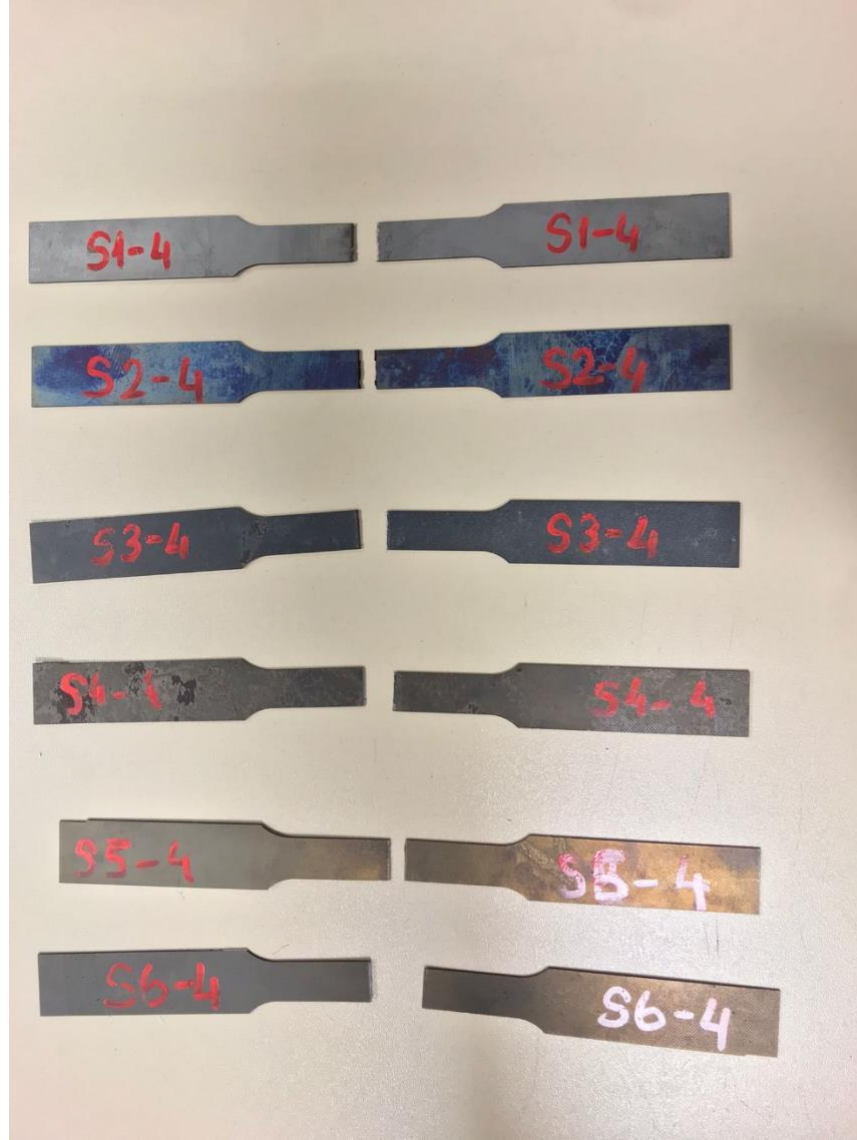


Şekil 3.5. Çekme testi numunelerinin görüntüsü

Çekme sırasında oluşabilecek salınım değerlerini minimumda tutabilmek amacıyla, her ısıl işlem parametresine sahip parçadan üçer adet numune test edilmiştir. Çekme testi Şekil 3.6'da görseli verilen Zwick Roell Z250 markalı 250 kN kapasiteye sahip test cihazında 5 mm/dk hızında yapılmıştır. Deney sırasında kuvvet ve uzama değerleri çekme cihazından bilgisayara otomatik aktarılarak veriler elde edilmiştir. Deney sonucunda kopan test parçaları ise Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.6. Zwick Roell Z250 markalı çekme testi makinesi



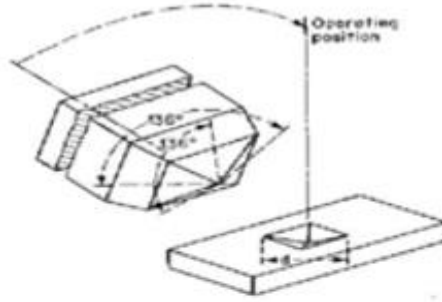
Şekil 3.7. Çekme testinde kopan numuneler

3.4.2 Vicker's Sertlik Testi

Vicker's sertlik testi 1921 yılında İngiltere'de Vicker's Ltd tarafından diğer sertlik testlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Uygulanışı diğer sertlik ölçme yöntemlerine kıyasla zaman alsa da oldukça duyarlı bir sertlik ölçme yöntemi olduğundan, özellikle araştırmalar için sertliklerin ölçülmesinde başvurulan bir yöntemdir. Vicker's deneyi ile

5HV sertlik derecesine sahip yumuşak malzemelerden 1500 HV sertlik derecesine sahip sert malzemelere kadar farklı birçok malzemenin sertliği ölçülebilir.

Bu yöntem ile sertliği ölçülecek metal parçasının üzerine, tabanı kare olan 136° tepe açılı piramit şeklinde bir u belirli bir yük altında batırılır ve yk kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegen uzunlukları ölçülür. Meydana gelen izin tabanı, köşegeni d olan, 136° tepe açılı kare bir piramittir. Kg olarak ifade edilen deney yükünün mm² olarak belirtilen iz alanına bölünmesi sonucunda Vicker's sertlik değeri bulunur.



$$VSD = \frac{2P \sin(\alpha / 2)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2}$$

Burada: P=kgf cinsinden uygulanan yük
 α =Tepe açısı
d= Taban köşegen uzunluğu [(d₁ + d₂)/2]

şekil 3.8. Vicker's sertlik testi ekipmanı ve formulasyonu

Vicker's sertlik deneyi ASTM E-92-72, B.S. 427, DIN 50133 ve TS 207 standartlarında tanımlanır. Elmas piramit sertlik deneyi anlamına gelen DPH veya HV ile sembolize edilmiştir. Testin şematik gösterimi Şekil 3.8.'de verilmiştir. Vicker's sertlik değeri, sembolün yanında uygulanan yükü gösteren sayısal değer ve yükün uygulama süresini belirten ikinci sayısal değer ilave edilerek gösterilir. Örneğin, 306/30/15 ifadesi, 15 saniye uygulanan, 30 kg yük altında ölçülen 306 Vicker's değerini belirtmektedir.

Bu tez çalışmasında Şekil 3.9.'da görüldüğü gibi lazer kaynağı ile birleştirilmiş ve çeşitli ısı işlemler uygulanmış altı adet sac parçadan kaynak dikişi ortada kalacak şekilde 10 mm eninde ve 40 mm uzunluğunda test numuneleri hazırlanmıştır.

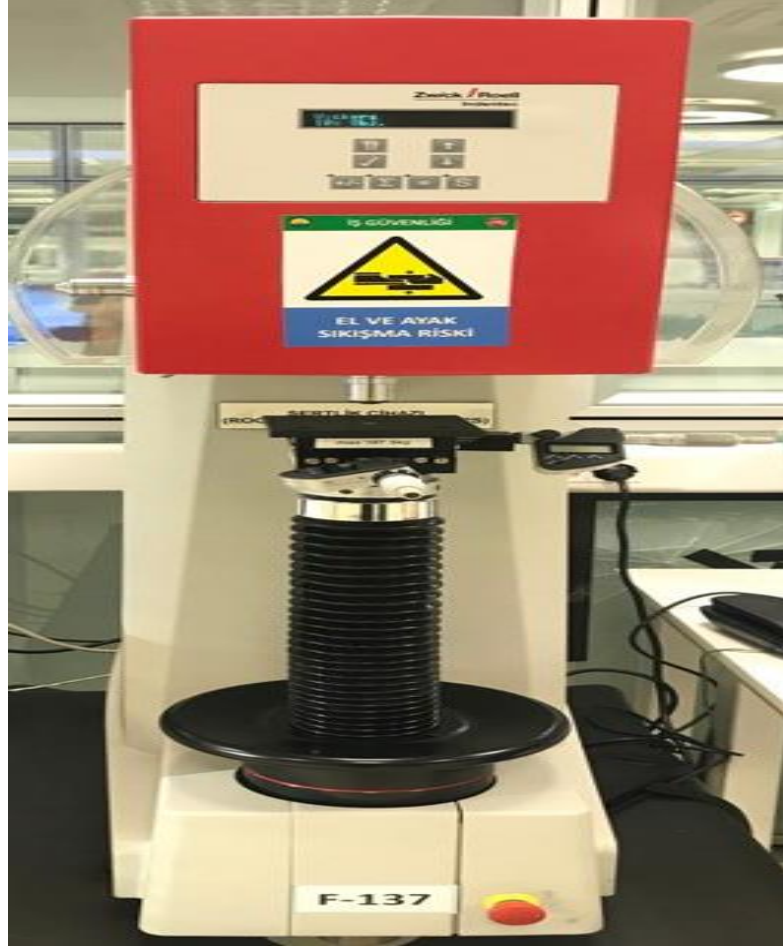


Şekil 3.9. Vicker's sertlik testi için numuneler

Numuneler 4 mm çapında bakalite alınarak sertlik testleri yapılmıştır. Numunelerin yzey parlatma, bakalite alma gibi sertlik testine hazırlama işlemleri ve sertlik testi Şekil 3.10. ve Şekil 3.11.'de gorselleri bulunan ekipmanlar ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik deneyi Zwick Roell marka cihaz ile, 10 saniye boyunca 1 kg yk ile malzeme yzerinde tahribat bırakarak olm yapılmıştır. Bunun sonucunda kaynak bglgesi, kaynaktan etkilenen bglge (ITAB) ve parçanın genelinde çıkan sertlik sonuçları değerlendirilmiştir.



Şekil 3.10. Ultra Vilibo bakalitleme cihazı



Şekil 3.11 Vicker's sertlik ölçüm cihazı

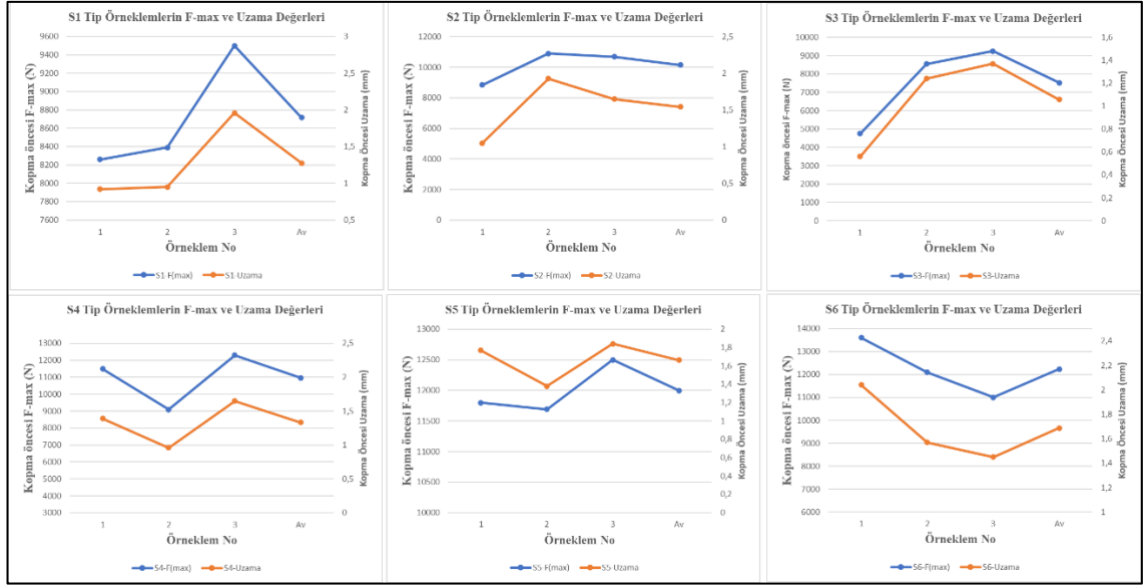
4. BULGULAR

4.1. Çekme Test Sonuçları ve Değerlendirmeler

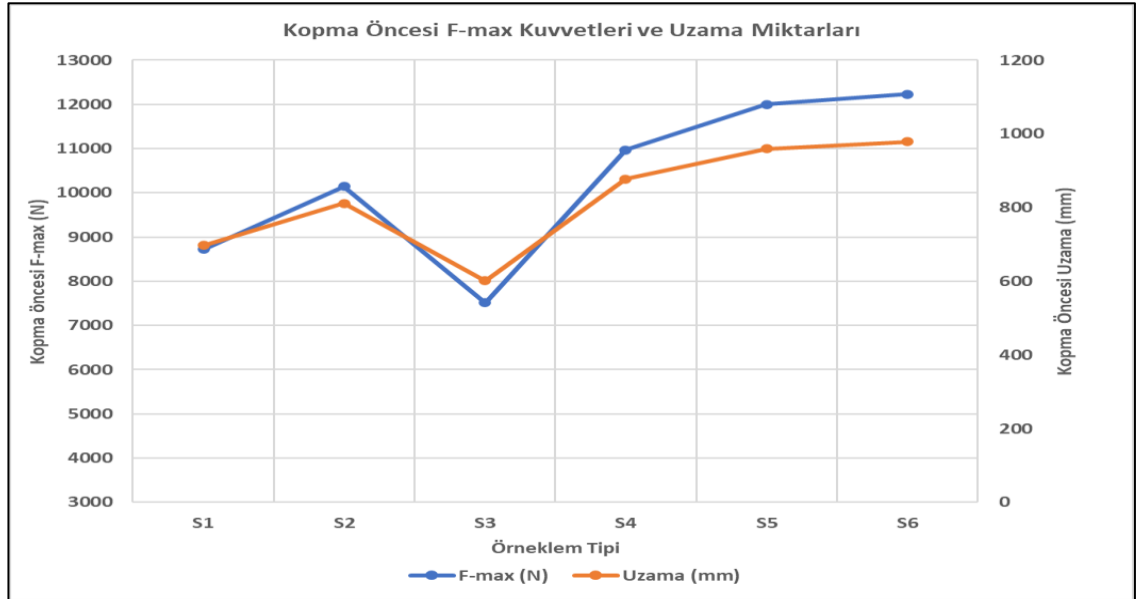
Farklı ısıl işlemlerin uygulandığı lazer kaynaklı Ti6Al4V alaşımının 6 parametre grubunun her birinden üçer adet çekme numunesi alınmıştır. Bu numunelere 1 N ön yük uygulanarak 5 mm/dk hız ile çekme testi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonucunda her bir parametre grubu için (S1,S2, S3, S4, S5, S6) ortalama maksimum çekme kuvveti ve ortalama uzama miktarlarına ulaşılmıştır. Örneğin S1 parametre grubundaki 3 numunenin maksimum çekme kuvvetleri 8260 N, 8390 N ve 9500 N olarak gerçekleşmiştir. Bu 3 değerlerin ortalaması olan 8717 N, S1 parametre grubunun ortalama “maksimum çekme kuvveti” olarak hesaplanmıştır Aynı şekilde 3 numunenin uzama miktarları da 0,92, 0,95 ve 1,96 mm olarak ölçülmüştür. Bu 3 değerlerin ortalaması olan 1,28 değeri de S1 parametre grubunun ortalama “uzama miktarı” olarak bulunmuştur. Aynı şekilde S1 parametre grubu için ortalama “uzama oranı” değerleri hesaplanmıştır. Aynı işlem S1-S6 arasındaki 6 parametre grubu için de yapılmıştır. Değerler Çizelge 4.1.’de, her parametre grubu için maksimum çekme değeri-uzama grafikleri ise Şekil 4.1.’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Parametre grupları çekme deneyi sonuçları

Parametre Grubu	Uygulanan İşlem	F-max (N)	Uzama (mm)	Uzama Oranı (%)
S1	İşlem Görmemiş Plaka	8717	1,28	2,55%
S2	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş	10147	1,54	3,09%
S3	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş.	7517	1,06	2,11%
S4	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş, 600°C 'de 60 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş.	10967	1,33	2,67%
S5	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş, 500°C 'de 60 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş.	11997	1,66	3,33%
S6	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş, 400°C 'de 60 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş.	12233	1,69	3,37%



Şekil 4.1. Parametre grupları çekme deneyi sonuçları (Maksimum çekme kuvveti ve uzama miktarları)



Şekil 4.2. Parametre grupları çekme deneyi sonuçları (Parametre gruplarının maksimum çekme kuvvetleri ve uzama miktarları)

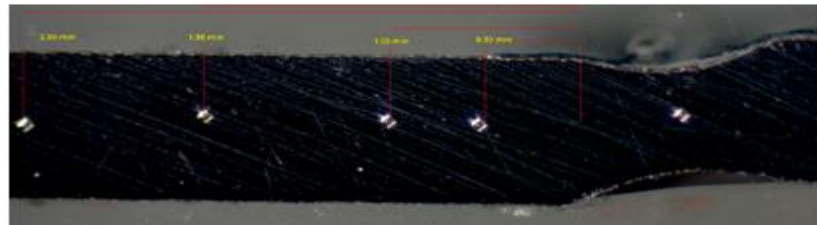
Şekil 4.2’de görüleceği üzere, farklı ısı işleme parametreleri kullanılarak elde edilen test numunelerinden en yüksek çekme mukavemetine yaşlandırma ısı işleme görmüş parçaların ulaştığı gözlemlenmiştir (S4, S5, S6). Bunlar içerisinde de özellikle 400°C - 500 °C aralığında 400°C’ye yakın noktalarda en iyi mukavemet sonucuna ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Gerilim giderme tavlama sonrasında su verme işlemi uygulanan üç numaralı numunenin (S3) gevrekleştiği ve en düşük çekme değerine sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu parçanın en yüksek sertlik değerine sahip olduğu göz önüne alınırsa malzemenin sertlik değeriyle kırılabilirliğinin ve gevrekliğinin de orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir.

Tüm işlemler sonucunda çekme testi uygulanan tüm deney parçalarının kaynak dikişinden koptuğu gözlemlenmiştir. Bu şekilde kopmanın sebebi kaynak nüfuziyetinin parça et kalınlığı boyunca sağlanamaması olarak yorumlanmıştır.

4.2. Sertlik Test Sonuçları ve Değerlendirmeler

Farklı ısı işlemlerinin uygulandığı lazer kaynaklı Ti6Al4V alaşımında, kaynak, ITAB ve ana malzeme üzerinde sertlik değişimini belirlemek amacıyla altı adet iş parçasından 3’er adet numune alınarak sertlik testi uygulanmıştır. Sertlik ölçümlerine kaynak bölgesinden başlanmıştır. Ardından Şekil 4.3’te görüldüğü üzere 0,5mm ilerleyerek ısı tesiri altında kalan bölgeye ve 0,5 mm ilerleyerek ana metale doğru ölçümler alınmıştır.



Şekil 4.3. Sertlik ölçümü alınan noktalar

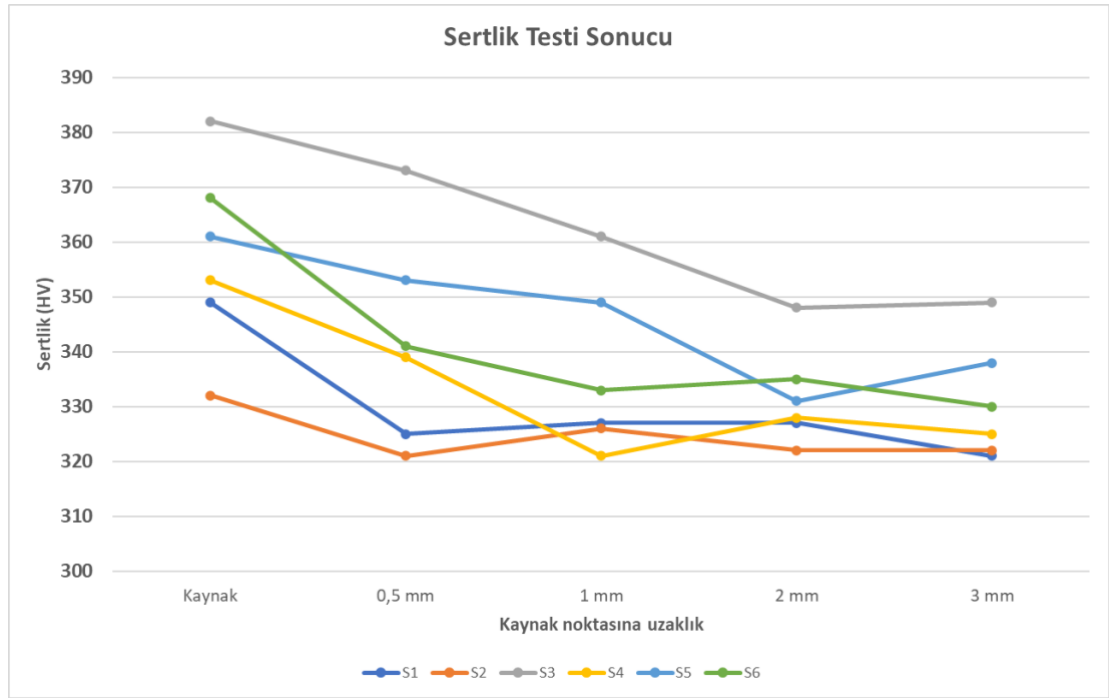
Ölçüm sonucu Çizelge 4.2 ve Şekil 4.4.'te gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde grade 5 titanyum için nominal sertlik değeri 349 HV'dir. En yüksek sertlik değerine ise S3 numaraları numune parçasının sahip olduğu görülmektedir. Bu değerleri sırasıyla S6, S5, S4, S1 ve en yumuşak sertliğe sahip olan S2 numaralı numuneler takip etmektedir. Test sonucu tüm numunelere bakıldığında en yüksek sertlik değerlerinin kaynak çekirdeğinde olduğu görülürken bu değerleri sırasıyla ITAB ve ana metal bölgeleri takip etmektedir.

Test sonucunda uygulanan farklı ısıl işlemlerin kaynak etkisiyle artan sertlik değerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Kaynak sonrası gerilim gidermesi uygulanan S2 numaralı numunenin en yumuşak sertlik değerine sahip olması bu durumu desteklemektedir. S3 numaralı numuneye gerilim giderme işleminin ardından su verme işlemi uygulanmış ve malzemenin iç yapısı değişmekle birlikte malzeme bir miktar tokluk kazanmıştır. Fakat bu işlem sonucunda malzeme çokça kırılğan bir hal alıp en yüksek sertlik değerine ulaşmıştır. Gerilim giderme tavlamaının ardından sırasıyla 600 °C, 500°C ve 400°C'ye ısıtılarak yaşlandırma işlemi uygulanan S4, S5 ve S6 numaralı numunelerin sertlik değerlerinin yaşlandırma sıcaklığı ile ters orantılı değiştiği görülmektedir.

Bu değerler, maksimum çekme kuvvetleri ile de karşılaştırıldığında, anlamlı şekilde sertlik ile çekme mukavemeti ters orantılı şekilde değişmektedir. Sadece yaşlandırma prosesine giren grupların sertliği bir miktar yüksek kalmaya devam etmektedir. Bu da yaşlandırma prosesi ile malzemenin iç yapısının değişmesi ile açıklanabilir.

Çizelge 4.2. Numunelere uygulanan işlemler ve sertlik ölçüm değerleri

Örneklem	Uygulanan İşlem	Kaynak	0,5 mm	1 mm	2 mm	3 mm
S1	İşlem Görmemiş Plaka	349	325	327	327	321
S2	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş	332	321	326	322	322
S3	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş.	382	373	361	348	349
S4	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş, 600°C 'de 60 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş.	353	339	321	328	325
S5	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş, 500°C 'de 60 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş.	361	353	349	331	338
S6	600°C 'de 30 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş, 900°C 'de tekrar 30 dakika ısıtılmış su ortamında soğumuş, 400°C 'de 60 dakika ısıtılmış, hava ortamında soğumuş.	368	341	333	335	330



Şekil 4.4. Sertlik ölçümü sonuçları grafiği

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında 1 mm kalınlığında Ti6Al4V kimyasal formülüne sahip grade 5 titanyum saçlar lazer kaynağı ile birleştirilmiş ardından bu malzemelere farklı sıcaklıklarda ısıt işlemler uygulanmıştır. Kaynak işlemi malzemenin kendisiyle herhangi bir ilave metal kullanılmadan gerçekleşmiştir. Çalışma ile Ti6Al4V alaşımının kaynak işlemine uygunluğu bir kez daha görülmüştür. Diğer yandan kaynak işlemi bilindiği gibi malzemenin yapısında bazı değişikliklere yol açarak malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Mekanik özellikleri değişen malzemelere ısıt işlem uygulanarak bu değerlerin optimum seviyeleri araştırılmıştır.

Farklı ısıt işlem parametrelerinin ardından parçalara çekme ve sertlik deneyleri uygulanmıştır. Gerilim giderme tavlamaıyla beraber su verme ve yaşlandırma ısıt işlemleri uygulanan malzemenin çekme değerinde iyileşmeler görülmüştür.

- Çekme testi uygulanan on sekiz adet numunenin tamamı farklı zamanlarda ve farklı değerlerde kaynak dikişinden kopmuştur. Bu şekilde bir kopmanın gerçekleşmesinin sebebi farklı ısıt işlemlerden bağımsız olarak kaynak kalitesiyle ilişkilendirilebilir. Kaynak dikişi boyunca nüfuziyetin homojen olmayışı yani bir bölgede nüfuziyet sağlanmışken aynı kaynak hattı üzerinde başka bir bölgede bu nüfuziyetin sağlanamamış oluşu bu şekilde kaynak dikişinden kopmaya sebep olmuştur.
- Bu şekilde kopmanın sebeplerinden birisi kaynak parçalarının kesiminde giyotin kullanılırken parça yüzeylerinin paralelliğinin tam olarak sağlanamamış oluşudur. Kaynak sırasında yüzeylerin tam olarak temasının sağlanamamış oluşu kaynak nüfuziyetini olumsuz olarak etkilemiş ve bu da kaynak kalitesini düşürmüştür. Giyotin ile kesmenin kaçınılmaz olduğu durumlarda ise parçalar özel fikstürler ile sabitlenmiş olmalıdır. Giyotin ile kesme işlemi yerine tel erozyon ya da lazer ile kesme yöntemleri tercih edilerek daha homojen yüzeyler elde edilebilir. Fakat

lazer ile kesme sonucunda oluşacak kesme bölgesi ve ITAB'da sertlik değerlerinde bir miktar değişim oluşacağını göz önünde bulundurulması gerekir.

- Bu şekilde kopmanın bir diğer sebebi ise lazerde odak mesafesi, ilerleme hızı gibi değerlerin operatör tarafından belirlenmesi sonucunda aynı hat üzerinde farklı değerler oluşturacak kaynak nüfuziyetlerinin oluşmasıdır. Mümküne manuel seçimlerin olmadığı robotik sistemler tercih edilerek daha homojen bir kaynak elde edilmelidir.
- Sertlik testi sonucunda numunelere bakıldığında en yüksek sertlik değerlerinin kaynak çekirdeğinde olduğu görülürken bu değerleri sırasıyla ITAB ve ana metal bölgeleri takip etmektedir. Test sonucunda, yaşlandırma ısıl işleminin kaynak etkisiyle artan sertlik değerini düşürdüğü gözlemlenmiştir
- Çekme testi sonuçlarına bakıldığında farklı ısıl işlem parametreleri kullanılarak elde edilen test numunelerinden en yüksek çekme mukavemetine yaşlandırma ısıl işlemi görmüş parçaların ulaştığı gözlemlenmiştir. Gerilim giderme tavlama sonrasında su verme işlemi uygulanan S3 numunesinin gevrekleştiği ve en düşük çekme değerine sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu parçanın en yüksek sertlik değerine sahip olduğu göz önüne alınırsa malzemenin sertlik değeriyle kırılabilirliğinin ve gevrekliğinin de orantılı bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu daha iyi bir çekme mukavemeti için yaşlandırma işlemiyle prosesin devam etmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.
- Çekme testi sonucunda numunelere bakıldığında en yüksek çekme mukavemeti sağlanması için gerilim giderme tavlama ile beraber su verme işlemi uygulaması sonrası yaklaşık 400 °C civarlarında yaşlandırma işlemi uygulanmasının optimal sonucu verdiği gözlemlenmiştir.

Özellikle havacılık ve uzay sanayisinde sıklıkla kullanılan Ti6Al4V alaşımı yüksek sıcaklık ve gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu çalışma ile Ti6Al4V alaşımının kaynak edildikten sonra uygun ısı işlemlerle mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Akman, E. 2006. Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarının Atımlı Nd:YAG Lazeri Kullanarak Kaynak Edilmesi ve Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi. *Y. Lisans Tezi* KÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Kocaeli
- Akman, E., Demir, A., Canel, T., Sınmazçelik, T. 2009. Laser Welding Of Ti6Al4V Titanium Alloys, *Journal Of Materials Processing Technology*; 209:3705-3713
- Akyol, S. 2007 Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliğinin Isıl İşlem Yardımıyla Arttırılması, *Y. Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Mühendisliği ABD, İstanbul
- Anonim, 2022. Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP641> (Erişim tarihi: 15.02.2022)
- Arslan, ř. 2020. Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Lazer Kaynak Kabiliyeti ve Biyoaktivite Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük
- ASM Metals Handbook, 8. Edition, Volume 7 *Atlas of Microstructures of Industrial Alloy, Microstructure of Titanium and Titanium Alloys*, 321-352
- Balaban, N. 2007. Titanyum ve Alaşımlarının Biyoyumluluklarının İncelenmesi. *Y. Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Mühendisliği ABD, İstanbul
- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "titanium". *Encyclopedia Britannica*, 22 Oct. 2021, <https://www.britannica.com/science/titanium>. Accessed 7 January 2022.
- Chen, Z., George, D., 2017. Springer Handbook of Electrochemical Energy, Springer, Berlin, Heidelberg
- Choda, T., Oyama, H., Murakami, S. 2015. Technologies for Process Design of Titanium Alloy Forging for Aircraft Parts, *Kobelco Technology Review* No:33 Feb 2015
- Demirel, M., Karaağaç İ., 2021. Titanyum Alaşımlarının Mikroyapı ve şekillendirilebilirliğine Sıcaklığın Etkileri, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9 (2021) 192-207
- Ermachenko, A.G., Lutfullin R. Ya., Mulyukov, R. 2011. Advanced technologies of processing titanium alloys and their applications in industry, *Rev. Adv. Mater. Sci.* 29 (2011) 68-8.

Ferro, P., Berto, F., Bonollo F, Romanin, L., Salemi, G. 2020. Post welding heat treatment improving mechanical properties on Ti-6Al-4V, *The 1st Mediterranean Conference on Fracture and Structural Integrity, MedFract1*

Gökdemir, Y. 2005. Saf Titanyum ve Ti6Al4V Alaşımının Yüksek Sıcaklıkta Oksidasyon Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

Güney, M. 2006. Ti6Al4V'nin Tornalanmasında Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Parametrelerin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.

İçdem, C. 2007. Saf Titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb Alaşımlarının Akışkan Yatak Ortamında Termal Oksidasyonu. *Y. Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ABD, İstanbul.

İşler, A. 1999. Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlem ve Mekanik Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kıral, M. 2012. Titanyumun Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi. *Y. Lisans Tezi*, SÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Sakarya.

Köse, C., Karaca, E. 2019. Nd:YAG lazer kaynağı ile birleştirilen Ti6Al4V alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine ısı işlemlerin etkileri, *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 21(1), 232-243, (2019)

Leyens, C., Peters, M., 2003. Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Applications, 2003 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Nakamura, K., Iida, T., Nakamura, N., Araiike, T., 2017. Titanium Sponge Production Method by Kroll Process at OTC, *Materials Transactions*, Vol. 58, No. 3 (2017) pp. 319 to 321 Special Issue on New Proposals on Titanium Production and Molten Salts

Oğuz, B., 1990. Demir Dışı Metallerin Kaynağı. Oerlikon Yayınları, https://www.magmaweld.com.tr/Content/UserFiles/OerlikonKutuphanesi/Demir_disi_metallerin_kaynagina_giris.pdf

Omoniye, P.O., Akinlabi, E.T., Mahamood, R.M. 2020. Heat Treatments of Ti6Al4V Alloys for Industrial Applications, *International Conference on Engineering for Sustainable World (ICESW 2020)*

Sevinç, S. 2019. Titanyum Alaşımlarının Plastik Şekil Verme Öncesi ve Sonrası Lazer Kaynak İşleminin Mekanik ve Boyutsal Davranışlar Üzerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa

Sezer, S. 2019. Titanyum Alaşımlarının Kaynak Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa

Sıcakyüz, Ö. 2007. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Anodik Oksidasyon Davranışı ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Subaşı, M., Karataş Ç.,2012. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarından Yapılan İmplantlar Üzerine İnceleme, *Politeknik Dergisi*, Cilt:15 Sayı: 2 s. 87-103, 2012

Yavuz, H., Çam G. 2005. Lazer – Ark Hibrit Kaynak Yöntemi, *Mühendis ve Makina*-Cilt: 46 Sayı: 543

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Aslıhan Kenar Cesur
Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir, 1989
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Eskişehir Fatih Anadolu Lisesi
Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş.

İletişim (e-posta) : aslihankenar@gmail.com