

Ti6Al4V Alaşımına Kriyojenik İşlemin Etkilerinin Araştırılması

Fatih Hayati akır

DOKTORA TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim 2019

Investigation of the Effects of Cryogenic Treatment on Ti6Al4V Alloy

Fatih Hayati Çakır

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Mechanical Engineering

October 2019

Ti6Al4V Alaşımına Kriyojenik İşlemin Etkilerinin Araştırılması

Fatih Hayati akır

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Osman Nuri elik

"Bu Tez Eskişehir Osmangazi niversitesi tarafından "2017/15A210" no'lu proje çerçevesinde desteklenmiştir"

Ekim 2019

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Fatih Hayati ÇAKIR'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Ti6Al4V Alaşımına Kriyojenik İşlemin Etkilerinin Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

İkinci Danışman : -

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Üye : Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İrfan KAYA

Üye : Prof.Dr. Taner KAVAS

Üye : Doç.Dr. Hakan GAŞAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK danışmanlığında hazırlamış olduğum “Ti6Al4V alaşımına Kriyojenik İşlemin Etkilerinin Araştırılması” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.24/10/2019

Fatih Hayati ÇAKIR

İmza

ÖZET

Titanyum alaşımları, yüksek korozyon direnci, spesifik mukavemet ve yüksek sıcaklık kararlılığı gibi istisnai özellikleri nedeniyle biyomedikal, havacılık, gıda işleme ve petrokimya endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu üstün özelliklerinin yanında sınırlı aşınma direnci, üretim zorluğu ve yüksek maliyet gibi bazı olumsuz özellikler de vardır. Titanyum alaşımına kriyojenik işlem uygulanmasının, yukarıda belirtilen olumsuz yönlerin bazılarının çözülmesine katkıda bulunabileceği düşünülmektedir. Yapılan çalışmaların sonucunda Ti6Al4V alaşımına kriyojenik işlem uygulanmasının malzeme özelliklerinde pek çok değişime yol açtığı gözlenmiştir. Uygulanan kriyojenik işlem ile mikroyapının değiştiği, β fazının işlem süre ve koşullarına bağlı olarak α fazına dönüştüğü, yapıdaki iç gerilmelerin azaldığı, tanelerin düzenlendiği yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucunda gözlenmiştir. İçyapıdaki düzenlenme etkisi elektriksel iletkenlik testinde de gözlenmiştir, bu teste göre 36 saat kriyojenik işlem uygulanan numunenin elektriksel iletkenliğinin yaklaşık %7 artmıştır. Aşınma testi sonuçlarına göre 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerin aşınma direnci yaklaşık %8,5 çözeltiliye alma sonrası 36 saat yaşlandırma uygulanan numunelerin aşınma direnci ise yaklaşık %13 artmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre kriyojenik işlemin malzemenin plastisite özelliklerine olumlu etkisi olduğu gözlenmiş 36 saat kriyojenik işlem uygulanan numunelerin; tokluğu %5 düzgün plastik şekil değiştirme bölgesi alanı ise %8 artmıştır. İmal edilebilirlik özellikleri ise tel erozyon yöntemi ile belirlenmiştir, bu sonuçlara göre 36 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerin malzeme kaldırma oranı yaklaşık %5 artarken ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri %30 düzeyinde azalmıştır. Elektrokimyasal özelliklere olan etkilerini incelemek için %0,9'luk izotonik çözelti kullanılarak korozyon testleri yapılmıştır. Bu testlere göre tüm numunelerde koruyucu oksit filmi oluşması gerçekleşmiş; potansiyodinamik testlere göre yalnızca derin kriyojenik işlem uygulanmasının korozyon direncine olumlu etki ettiği ancak yaşlandırma öncesi uygulandığı durumda korozyon potansiyelini bir miktar artırdığı gözlenmiştir. Bu kapsamda kriyojenik işlemin sıcaklık ve süresinin kontrollü olarak uygulanmasının Ti6Al4V alaşımında mekanik özellikler, imal edilebilirlik, aşınma, korozyon gibi pek çok farklı özelliğe olumlu etki edebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kriyojenik işlem, Korozyon, İmal Edilebilirlik, Ti6Al4V, Mekanik Özellikler, Yaşlandırma

SUMMARY

Titanium alloys are widely used in the biomedical, aerospace, food processing, and petrochemical industries due to their exceptional properties such as high corrosion resistance, specific strength, and high-temperature stability. In addition to these superior properties, there are some negative properties such as limited wear resistance, production difficulty and high cost. It is contemplated that the application of cryogenic treatment to the titanium alloy may contribute to the resolution of some of the above-mentioned disadvantages. As a result of experimental studies, it has been observed that cryogenic treatment of Ti6Al4V alloy causes many changes in material properties. The characterization studies show that the microstructure changed with the cryogenic treatment, the β phase transformed into α phase depending on the processing time and conditions, the internal stresses in the structure decreased and the grains were refined. Another result in which the regulation effect in the internal structure was observed was the electrical conductivity test which showed that the electrical conductivity of the sample which was applied for 36 hours cryogenic process increased by 7%. According to the wear test results, wear resistance of samples treated with deep cryogenic treatment for 24 hours increased by approximately 8.5% and wear resistance of samples subjected to 36 hours aging after solution increased by 13%. Tensile test results showed that the cryogenic process had a positive effect on the plasticity properties of the material. The toughness increased by 5% while the uniform plastic deformation area increased by 8%. Manufacturability properties were determined by the wire erosion method. According to these results, the material removal rate of the samples applied 36 hours deep cryogenic process increased by approximately 5%, while average surface roughness values decreased 30%. Corrosion tester was used by using a 0.9% isotonic solution to investigate the effects on electrochemical properties. According to these tests, protective oxide film was formed in all samples; According to potentiodynamic tests, it was observed that only deep cryogenic treatment had a positive effect on corrosion resistance but it increased the corrosion potential to some extent when applied before aging. In this context, the controlled application of temperature and duration of the cryogenic treatment might improve mechanical properties, manufacturability, wear and corrosion of Ti6Al4V alloy.

Keywords: Aging, Cryogenic Treatment, Corrosion, Manufacturability, Mechanical Properties, Ti6Al4V

TEŞEKKÜR

Çalışmam sırasında bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e, tez izleme toplantılarındaki değerli fikirleriyle tezin kapsamının oluşmasındaki katkılarından dolayı Doç. Dr. Melih Cemal KUŞHAN ve Dr. Öğr. Üyesi İrfan KAYA'ya, deneysel çalışmalarında yardımcı olan Tekniker Akif TUTGUN'a ve Araş. Gör. Dr Abdullah SERT'e kriyojenik ısıtma işleminin gerçekleştirilmesinde yardımcı olan MMD Makine ve Malzeme Teknolojileri firması çalışanlarına, korozyon testleri konusunda yardımcı olan Doç. Dr. Mustafa Özgür ÖTEYAKA'ya ayrıca deney numunelerini hazırlanmasına katkıda bulunan Eskişehir Şeker Fabrikası çalışanlarına teşekkür ederim. Bu çalışmayı 2017/15A210 No'lu Bilimsel Araştırma Projesi ile destekleyen Eskişehir Osmangazi Üniversitesine teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca benden maddî ve manevî hiçbir desteği esirgemeyen aileme ve çalışmalarım boyunca bana destek olan eşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. TEORİK BİLGİ	3
2.1. Titanyum Alaşımlarının elde edilmesi ve üretimi	5
2.2. Kristal Yapısı	6
2.3. Faz Dönüşümü	7
2.4. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	9
2.4.1. α alaşımları	13
2.4.2. α ya yakın alaşımlar	14
2.4.3. $\alpha + \beta$ Alaşımları	14
2.4.4. β alaşımları	14
2.5. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Uygulama Alanları	16
2.5.1. Kimyasal işleme, gıda ve petrokimya endüstrisi	18
2.5.2. Medikal uygulamaları	18
2.5.3. Havacılık uygulamaları	19
2.5.4. Diğer uygulama alanları	20
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	21
4. TİTANYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER VE KRİYOJENİK İŞLEM	28
4.1. Titanyum alaşımlarına uygulanan geleneksel ısı işlemler	28
4.1.1. Gerilme giderme	30
4.1.2. Yumuşatma (Annealing) tavlama	30
4.1.3. Çözeltiye alma ve yaşlandırma	32
4.1.4. Titanyum alaşımlarına uygulanan özel ısı işlemler	35

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2. Kriyojenik Isıl İşlemler	42
4.2.1. Kriyojenik ısıtıl işlemin demir esaslı malzemeler üzerine uygulamaları	43
4.2.2. Kriyojenik ısıtıl işlemin demir dışı malzemeler üzerine uygulamaları	44
5. MATERYAL VE YÖNTEM	47
5.1. Titanyum Alaşımlarına Kriyojenik İşlem ve Yaşlandırma Uygulanması.....	50
5.2. Optik ve Elektron Mikroskobu ile Karakterizasyonu	52
5.3. X-Ray Difraksiyon Yöntemi Kullanılarak Ti6Al4V Alaşımının Karakterizasyonu	55
5.4. Mekanik Özelliklerin ve Sertliğin Belirlenmesi	63
5.4.1. Çekme testi.....	63
5.4.2. Sertlik Testleri	66
5.5. Aşınma Testleri	67
5.7. İmal Edilebilirlik Testleri.....	70
5.8. Korozyon ve Elektrokimyasal Özelliklerin İncelenmesi	72
5.8.1. Elektrik iletkenliği testleri.....	72
5.8.2. Korozyon testleri	73
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	75
6.1. Karakterizasyon Çalışmaları	75
6.1.1. Optik mikroskop ile yapılan çalışmalar.....	77
6.1.2. XRD tekniği ile yapılan çalışmalar	82
6.2. Mekanik Özelliklerin ve Sertliğin Belirlenmesi	89
6.2.1. Numunelere çekme testi uygulanması.....	89
6.2.2. Sertlik testi uygulanması	92
6.3. Tribolojik özelliklerin belirlenmesi	93
6.4. İmal edilebilirlik özelliklerinin incelenmesi	99
6.5. Korozyon ve elektrokimyasal özelliklerin incelenmesi	103
6.5.1. Elektrik iletkenliği testi	103
6.5.2. Korozyon testi	104

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	110
8. TEZ ÖZETİ VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....	113
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	114
ÖZGEÇMİŞ	122

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. İlmentit (FeTiO ₃) ve Rutil (TiO ₂).....	3
2.2. Farklı Mühendislik malzemelerinin farklı sıcaklıklardaki Mukavemet /Ağırlık oran grafiği	4
2.3 Titanyum Sünger Eldesi Süreci	5
2.4 Titanyum Spongedan ingot Eldesi Süreci	6
2.5. Saf Titanyum kristal Kafes Yapısı	7
2.6 Ti6Al4V alaşımı sepet formundaki lamelli mikroyapı.....	8
2.7. β faz bölgesinden hızlı soğutulmuş “Asiküler” martenzit (Ti6Al4V) (a) Işık mikroskobu (b) TEM.....	8
2.8. Alaşım elementlerinin Titanyum alaşımlarının faz diyagramına olan etkisinin şematik gösterimi.	9
2.9. Titanyum alaşımlarının pseudobinary h-isomorphous faz diyagramı	10
2.10. Titanyum alaşımlarının sınıflandırıldığı şematik grafik.....	11
2.11. β titanyum faz denge diyagramı	15
2.12. Titanyum Alaşımları kullanım alanları	16
2.13. Çeşitli Alaşımların sıcaklığa bağlı dayanım ve oksidasyon durumu.....	17
4.1. Alfaya yakın alaşımların ısıtılma işlemi	36
4.2. Ti6242 Alaşımı için β fazından farklı soğutma hızlarında elde edilen mikroyapılar a) 1°C/min b) 100°C/min c) 8000°C/min.	36
4.3. Ti %6Al için farklı Vanadyum oranları Faz diyagramı	37
4.4. a) β faz bölgesinde tavllanmış Ti6Al4V mikroyapısı b) α+β faz bölgesinde tavllanmış Ti6Al4V mikroyapısı	38
4.5. a) β faz bölgesine ısıtılıp havada soğutma ile elde edilen mikroyapı b) α+β faz bölgesine ısıtılıp havada soğutma ile elde edilen mikroyapı	38
4.6. a) Hekzagonal α' b) Lenticular α' c) Ortorombic α''	39
4.7. a)Ti6Al4V alaşımı 954°C de çözeltilme sonrası su verilmiş, b) 843°C de çözeltilme alınmış su verilmiş	39
4.8. Kararsız β fazının alaşım elementi miktarına göre dönüşüm şeması.	40
4.9. Farklı işlemler ile Ti6Al4V alaşımında elde edilen mikroyapılar	41
4.10 Farklı yükler altındaki aşınma direncinin kriyojenik işlem sıcaklığı ile değişimi	44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.1 Akış Şeması.....	48
5.2. Kriyojenik işlem Düzeneği.....	51
5.3. Yalnızca kriyojenik işlem uygulanan numunelerin sıcaklık zaman grafiği	51
5.4. Yaşlandırma ve kriyojenik işlem uygulanan numunenin sıcaklık zaman grafiği.....	52
5.5. Oda sıcaklığında farklı ısıl işlemler görmüş Ti6Al4V alaşımı için XRD pikleri	56
5.6. Farklı soğutma koşullarının 63° deki pik şiddetine etkisi	57
5.7. Ti6Al4V ve Ti6Al2Sn4Zr2Mo0.08Si alaşımları için farklı ısıl işlemleri FWHM değerleri	58
5.8. Ti6Al4V alaşımı için farklı sıcaklıklar için hesaplanmış α ve β fazlarının kimyasal bileşim diyagramı.....	59
5.9. Ti6Al4V Alaşımının farklı koşullarda ölçülen XRD paternleri ve Kafes parametreleri	60
5.10. Titanyum alaşımlarındaki α ve β faz dönüşümüne vanadyum bileşiminin etkisini gösteren temsili ikili diyagram	61
5.11. Farklı tavlama sıcaklıklarından a) Havada, b) Suda soğutma sonucu elde edilen XRD difraksiyon paternleri ve faz oranları	62
5.12. Çekme test numunesi ve ölçüleri.....	63
5.13. Shimadzu AG-IS 250 kN çekme cihazı.....	64
5.14. Çekme grafiği.	65
5.15. Çekme deneyi numuneleri değerlendirme metodolojisi.....	66
5.16. Numunelerin ortalama sertlik değerleri (HV).	67
5.17. Aşınma test düzeneği.....	68
5.18. Aşınma testi ölçüm düzeni ve örnek aşınma alanı.	69
5.19. Tel erozyon test numunesi temsili gösterimi (a) testlerde kullanılan tel erozyon tezgâhı (b).....	70
5.20 Elektriksel iletkenlik hesabında kullanılan formül.....	72
5.21. Korozyon test düzeneği.	74
6.1 Referans Ti6Al4V malzeme mikro yapısı ve faz oranları.....	76
6.2 Ti6Al4V Faz dönüşüm diyagramı	76
6.3. Numuneler ait mikroyapı (1000X) görüntüleri	79

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.4. Görüntü işleme işlemi sonucunda düzenlenen mikroyapılar 1000X.....	80
6.5. Numunelerden görüntü işleme tekniği ile elde edilen β faz oranları.....	81
6.6 XRD paternlerinin üst üste gösterimi.	82
6.7. Numunelerin XRD paternleri ayrı gösterimi.	84
6.8. Rietveld Analizine göre β faz oranları.....	85
6.9. G1 ve G4 ün XRD analizleri.	86
6.10. G1 ve G4 için FWHM değerleri.	87
6.11. G1, G6, G7, G8 in XRD analizleri.	88
6.12. Çekme test numunesi ve ölçüleri.	89
6.13 Çekme Deneyi Sonuçları a) Tokluk ve 2.Bölge Alanı b) Çekme Gerinim ve Maksimum Gerinim c) Akma dayanımı ve Çekme Dayanımı.....	91
6.14. Numunelerin ortalama sertlik değerleri (HV).	93
6.15. Aşınma Testi Sonuçları sürtünme katsayısı a) Referans ve yalnızca kriyojenik işlem uygulanmış b) Referans ve yaşlandırma işlemi uygulanmış.....	96
6.16. Aşınma test sonuçları grafik gösterimi: a) Aşınma oranı b) Ortalama Sürtünme Katsayısı	97
6.17. Farklı numunelerin aşınma bölgesi görüntüleri(100X).	99
6.18. Malzeme kaldırma oranları.....	100
6.19. Tel Erozyon yöntemi ile kesilen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülükleri (R_a). 101	
6.20 Tel erozyon yöntemi ile işlenen yüzeylerin ortalama sertlik değerleri.	102
6.21. Elektriksel Direnç ölçüm sonuçları	103
6.22. Korozyon test düzeneği.	105
6.23. E_{corr} Testi Sonuçları a) Referans Grup ve yalnızca kriyojenik işlem uygulanmış b) Referans Grup ve yaşlandırma işlemi uygulanmış.	106
6.24. Potansiyo dinamik polarizasyon testi Sonuçları a) Referans ve yalnızca kriyojenik işlem uygulanmış b) Referans ve yaşlandırma işlemi uygulanmış.	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Saf Titanyumun fiziksel özellikleri	4
2.2. Başlıca Titanyum alaşım elementleri.	10
2.3. Titanyum alaşımlarının karşılaştırmalı özellik Çizelgesi	12
4.1. Titanyum Alaşımlarına uygulanan geleneksel ısıl işlemler	31
4.2. Ti6Al4V yaşlandırma parametreleri.....	34
5.1. Ti6Al4V alaşımı özellikleri	47
5.2. Numunelere uygulanan ısıl işlem prosedürü	50
5.3. Titanyum Alaşımlarında yaygın olarak kullanılan dağlayıcılar	54
5.4. Farklı ısıl işlem görmüş Ti6Al4V alaşımının kafes parametreleri	57
5.5. Aşınma test parametreleri.....	68
5.6. Tel Erozyon işlem parametreleri.	71
5.7. Korozyon testlerinde kullanılan izotonik çözelti ve vücut sıvısının karşılaştırılması. .	74
6.1 Ti6Al4V Silindirik çubuk numunesi sertifikadaki kimyasal kompozisyon bilgileri.....	75
6.2. Ti6Al4V Sac numunesi sertifikadaki kimyasal kompozisyon bilgileri.....	75
6.3. Çekme Deneyi Sonuçları.....	89
6.4. Aşınma testi sonuçları	94
6.5. Potansiyo dinamik polarizasyon testi Sonuçları.....	108

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Titanyum alaşımları, yüksek korozyon direnci, spesifik mukavemet ve yüksek sıcaklık kararlılığı gibi istisnai özellikleri nedeniyle biyomedikal, havacılık, gıda işleme ve petrokimya endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Titanyum alaşımlarının bu üstün özelliklerinin yanında sınırlı aşınma direnci, şekillendirmenin zor olması ve yüksek maliyet gibi bazı olumsuz özellikleri de vardır. Titanyum alaşımına kriyojenik işlem uygulanmasının, yukarıda belirtilen olumsuz yönlerin bazılarının çözülmesine katkıda bulunabileceği düşünülmektedir. Kriyojenik işlem malzemelerin kontrollü olarak soğutulması bu sıcaklıkta bir miktar beklenmesi ve kontrollü olarak ısıtılması işlemidir. Kriyojenik işlem özellikle kararsız ve yarı kararlı iç yapıdaki malzemeleri etkileyerek yapının daha kararlı ve düzenli hale gelmesine katkıda bulunmaktadır.

“Ti6Al4V Alaşımına Kriyojenik İşlemin Etkilerinin Araştırılması” isimli çalışmada kullanım alanları giderek artmakta olan titanyum alaşımlarına yapılacak olan sıfır altı işlemin yapıdaki etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Tez kapsamında “Ti6Al4V” titanyum alaşımına farklı koşullarda kriyojenik işlem uygulanmıştır. Yapılan bu işlemlerin malzemede meydana getireceği değişiklikler araştırılmıştır. Bu işlem malzemenin mikroyapısı, aşınma ve sürtünme özellikleri, mekanik özellikleri, elektriksel özellikleri, imal edilebilirlik ve korozyon özellikleri gözlenerek incelenmiştir. Yapılan incelemeler ve elde edilen bulguların değerlendirilmesiyle, Ti6Al4V alaşımına kriyojenik işlemin etkilerinin ortaya koyulması amaçlanmıştır. Bu etkinin anlaşılması ile pratik uygulamalarda titanyum alaşımlarının uygun koşullarda uygulanacak kriyojenik işlem ile aşınma direnci, plastik şekil verme, imal edilebilirlik kabiliyeti korozyon direnci gibi özellikleri iyileştirilerek; üretim maliyetlerinin azaltılması, kullanım ömürlerinin uzaltılması ve kullanım potansiyellerinin artırılması amaçlanmıştır.

Tez kapsamında sırasıyla; Bölüm 2’de titanyum alaşımlarının ham madde halinden üretimi, yapıya katılan alaşım elementlerinin etkileri, ticari olarak kullanılan titanyum alaşımlarının türleri, temel faz oluşum ve dönüşüm mekanizmaları ile malzeme özellikleri anlatılmıştır. Bu bölümün amacı titanyum alaşımlarını tanıtarak; çalışma koşulları, bu

koşullar için geliştirilen alaşımlar ve faz dönüşüm mekanizmalarıyla ilgili önemli noktaları özetlemektir. Bölüm 3'te ise tez kapsamında faydalanılan farklı makale ve yayınlardan derlenen literatür özeti verilmiştir. Bu literatür özeti Bölüm 2 de aktarılan genel kabul görmüş bilgilerin yanında farklı araştırmacıların bulguları ve gözlemlerinin irdelenerek bu çalışmadaki testlerin kurgulanması ve sonuçların yorumlanmasında faydalanılan kaynakları içermektedir. Bölüm 4'te ise titanyum alaşımlarına uygulanan geleneksel ısı işlemler ve titanyum alaşımlarındaki faz dönüşümleri detaylı olarak anlatılmıştır. Kriyojenik işlem tarihi ve akademik-pratik uygulamalarından bahsedilmiştir. Kriyojenik işlemin demir esaslı ve demir esaslı olmayan malzemeler üzerine olan etkileri araştırılmış ayrıca yapıda meydana getirdiği değişimleri açıklayan mekanizmalar aktarılmıştır. Bölüm 5'te deneysel olarak izlenen materyal ve yöntem irdelenmiş, titanyum alaşımlarının karakterizasyonunda kullanılan yöntemlere yer verilmiştir. Bu bölümde ayrıca deneysel çalışmalarda kullanılan yöntemler aktarılmış kullanılan ekipmanlar, deneysel parametrelerin ne şekilde belirlendiği elde edilen sonuçların hangi yöntemler kullanılarak işlendiği anlatılmıştır. Bölüm 6'da ise yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara yer verilmiştir her deneysel sonuç kendi içerisinde değerlendirilmiştir. Bölüm 7'de ise elde edilen karakterizasyon ve münferit deney sonuçları bütünsel olarak ele alınarak değerlendirilmiştir ayrıca elde edilen sonuçların literatüre olan katkısı ve titanyum alaşımlarının kullanım potansiyellerine olan etkileri irdelenmiş, gelecekte yapılabilecek çalışmalar ile ilgili öneriler verilmiştir.

2. TEORİK BİLGİ

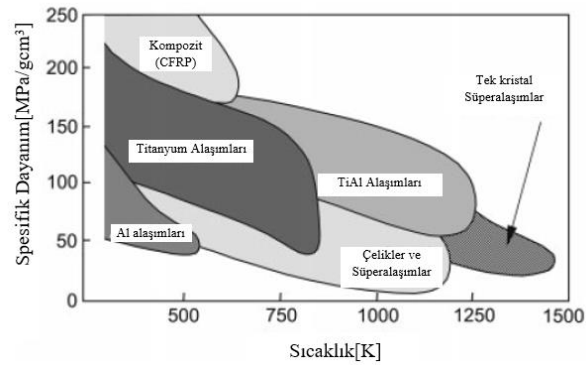
Titanyum elementi ismini antik Yunan tanrılarında almaktadır. Titanlar, Yunan mitolojisine göre efsanevi Altın Çağ'da dünyayı yönetmiş olan güçlü tanrı ırkıdır. Titanyum dünya yüzeyinde alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra en fazla bulunan dördüncü element olmasına rağmen işlenmesi ve ürün haline getirilmesi zor olduğu için ürün maliyeti oldukça yüksektir. Titanyum elementi doğada genellikle saf hali ile bulunmaz, yaygın olarak Şekil 2.1'de gösterilen ilmentit (FeTiO_3) ve rutil (TiO_2) halinde bulunur.



Şekil 2.1. İlmentit (FeTiO_3) ve Rutil (TiO_2) (Leyens ve Peters, 2003).

Saf titanyum oda sıcaklığında SPH (sıkı paket hegzagonal) yapıda bulunur. Allotropik dönüşüm gösteren saf titanyum 882°C 'nin altında α üzerinde ise β fazında bulunur. Özellikle yüksek sıcaklıklarda kimyasal olarak oldukça reaktiftir. Oksijen, azot, karbon ve hidrojen ile reaksiyona girme eğilimindedir. Sahip olduğu düşük yoğunluğa oranla yüksek dayanım ve tokluk sunar.

Titanyum alaşımlarının yüksek dayanım yoğunluk oranı, yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruması, biyo uyumlu olması ve üstün korozyon direncine sahip olması bazı önemli özellikleridir. Sahip olduğu üstün özellikler titanyum alaşımlarını pek çok uygulamada kullanımı için çekici kılmaktadır. Titanyum alaşımlarının başlıca kullanım alanları olarak hava araçları, jet motorları, implant malzemeleri, kimyasal işleme tankları, denizcilik uygulamaları ve kişisel eşyalar sayılabilir (Lütjering ve Williams, 2007). Titanyumun yoğunluğu $4,54 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Literatürde demir dışı hafif metal olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.2 incelendiğinde 300 C° ye kadar özgül dayanımı titanyumdan daha iyi olan yalnızca karbon fiber takviyeli plastiklerin mevcut olduğu görülmektedir.



Şekil 2.2. Farklı Mühendislik malzemelerinin farklı sıcaklıklardaki Mukavemet/Ağırlık oran grafiği (Leyens ve Peters, 2003).

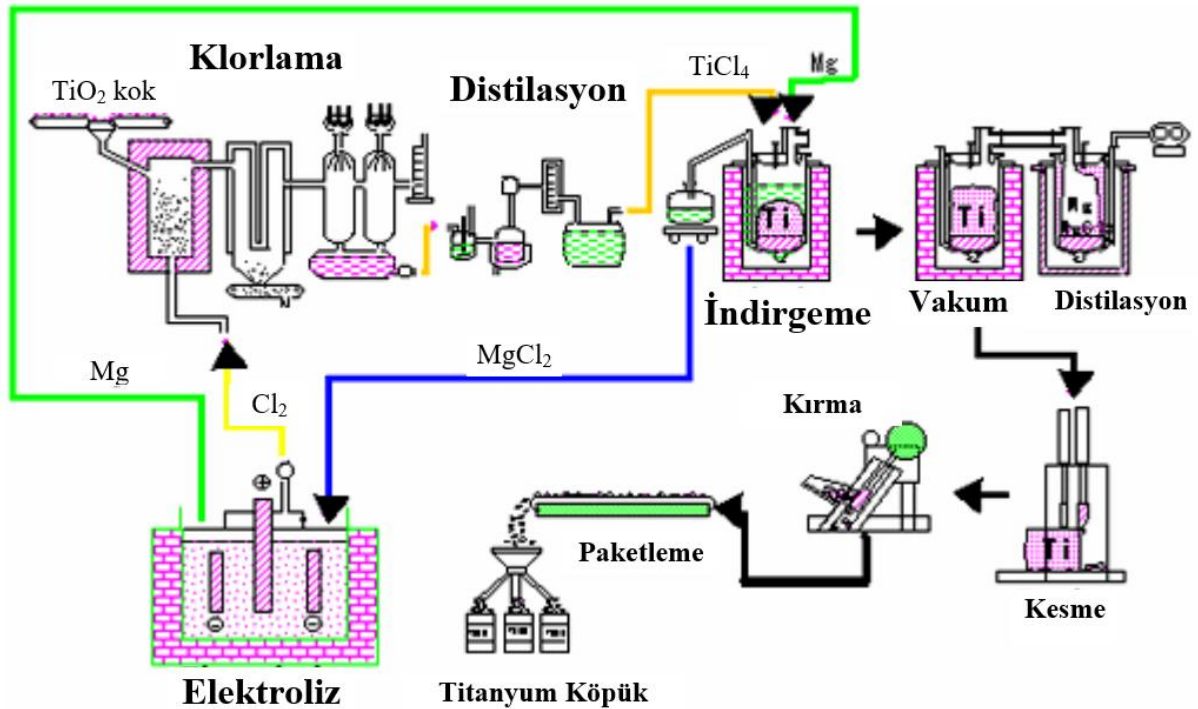
Titanyum alaşımları pek çok ortamda üstün korozyon direnci göstermektedir. Bu direnci sağlayan başlıca unsur yüzeylerinde hızlı şekilde kararlı oksit tabakaları oluşmasıdır. Yüzeyi kaplayan TiO_2 filmi malzemeyi korozyona karşı dirençli kılmaktadır. Bu tabaka hasara uğraması halinde ise hızlıca yenilenir. TiO_2 filmi yaklaşık olarak $550^\circ C$ ye kadar kararlılığını korur bu sıcaklıktan sonra ise kırılarak özelliğini kaybeder (Leyens ve Peters, 2003). Titanyuma alaşım elementi olarak Alüminyum katılarak kullanım sıcaklığı daha da artırılabilir. Saf titanyum alaşımının özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Saf Titanyumun fiziksel özellikleri (Liu vd., 2004)

Özellik	Değer
Atom numarası	22
Atomik ağırlık (g/mol)	47,9
Krisyal Yapı	
Alfa, Sıkı Paket Hekzagonal	
c(Å)	4,6832±0,0004
a(Å)	2,9504±0,0004
Beta, Hacim Merkezli Kübik	3,28±0,003
Yoğunluk(g/cm ³)	4,54
Termal genleşme katsayısı (20°C’de) K ⁻¹	8,4×10 ⁻⁶
Termal iletkenlik katsayısı (W/(m K))	19,2
Ergime sıcaklığı (°C)	1668
Kaynama Noktası (Tahmini) (°C)	3260
Dönüşüm sıcaklığı (°C)	882,5
Elektriksel Direnç	
Yüksek Saflık (μΩcm)	42
Ticari Saflık (μΩcm)	55
Elastisite Modülü, α, (GPa)	105
Akma Dayanımı, α, (MPa)	692
Çekme Dayanımı, α, (MPa)	785

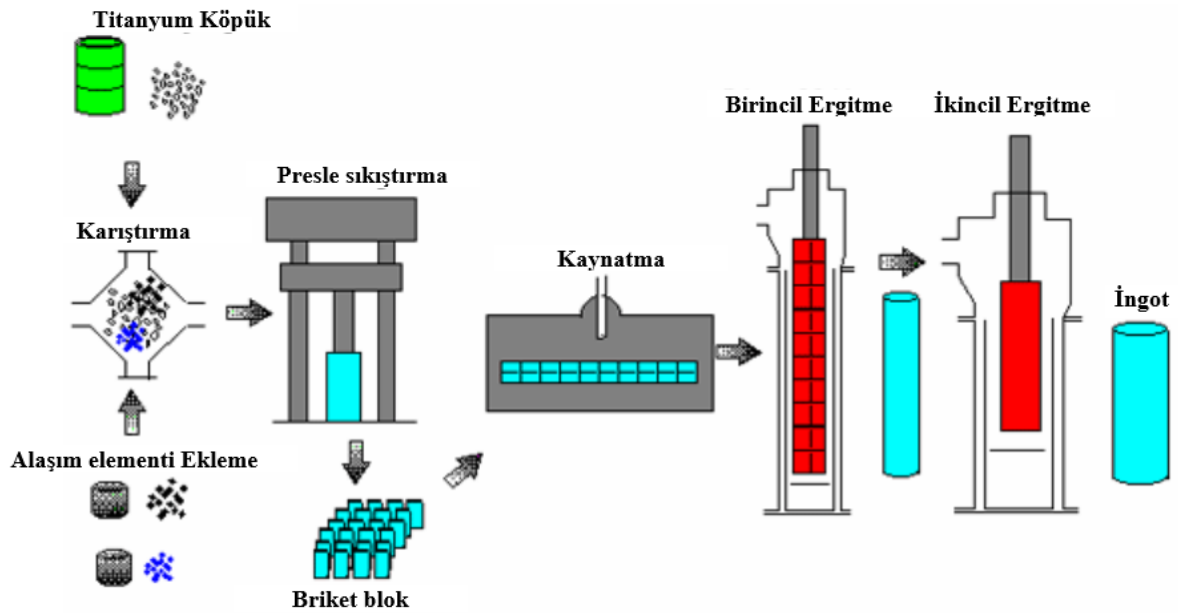
2.1. Titanyum Alaşımlarının elde edilmesi ve üretimi

Titanyumu doğada bulunan rutile (TiO_2) halinden saf olarak elde edebilmek için geliştirilen ve günümüzde de kullanılan en önemli yöntem Kroll işlemi olarak adlandırılan yöntemdir. Bu yöntemin geliştirilmesi titanyumun ticari olarak kullanımına önemli katkı yapmıştır. Titanyumun sürekli olarak üretimi halen mümkün değildir. Titanyum alaşımlarının üretimi titanyum köpük elde edilmesi ve köpükten yarı-mamul elde edilmesi olarak iki ana aşamaya bölünebilir. Kroll işleminde, bir titanyum cevheri olan rutilin klor gazı ile reaksiyona girmesi ile karbondioksit yan ürünü yanında renksiz titanyum tetraklorid elde edilir (2.1), bu işlemin ardından titanyum tetrakloritin soy gaz atmosfer altında magnezyum ya da sodyum ile saflaştırılarak saf titanyum ham halde elde edilir (2.2). Süreç şematik olarak Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Elde edilen titanyum ham maddesi indirgenme işlemine tabii tutulduktan sonra vakum ve distilasyon işlemi ile blok haline getirilir. Elde edilen blok kırılarak partiküller haline getirilir ve paketlenir. Bu haldeki ürün Titanyum köpük adını alır.



Şekil 2.3 Titanyum Sünger Eldesi Süreci (Pederson, 2002).

Titanyum cevher halinden köpük haline (sponge) dönüştürülür. Bu köpük ile alaşımlanacak elementler ve varsa hurda malzeme karıştırılır. Daha sonra toz halindeki titanyum elementi ve alaşım elementleri pres ile sıkıştırılarak briket bloklar elde edilir. Elde edilen bu bloklar enerji uygulanarak birbirlerine kaynatılır. Bu karışım homojenleşmesi ve empüritelere arındırılması için tekrar katılaştırılıp ısıtılır. Bu süreçlerde farklı fırınlar ve süreçler kullanılabilir bu süreçlerden bazıları: Vakum ark ergitme, Plazma ark ergitme, Elektron ışın ergitme, İndüksiyon ile ergitme olarak sayılabilir. İki kademeli olarak ergitilip karıştırma işleminden sonra ingot malzeme elde edilir (Polmear vd., 2017). Bu işlemler Şekil 2.4'te şematik olarak gösterilmiştir.

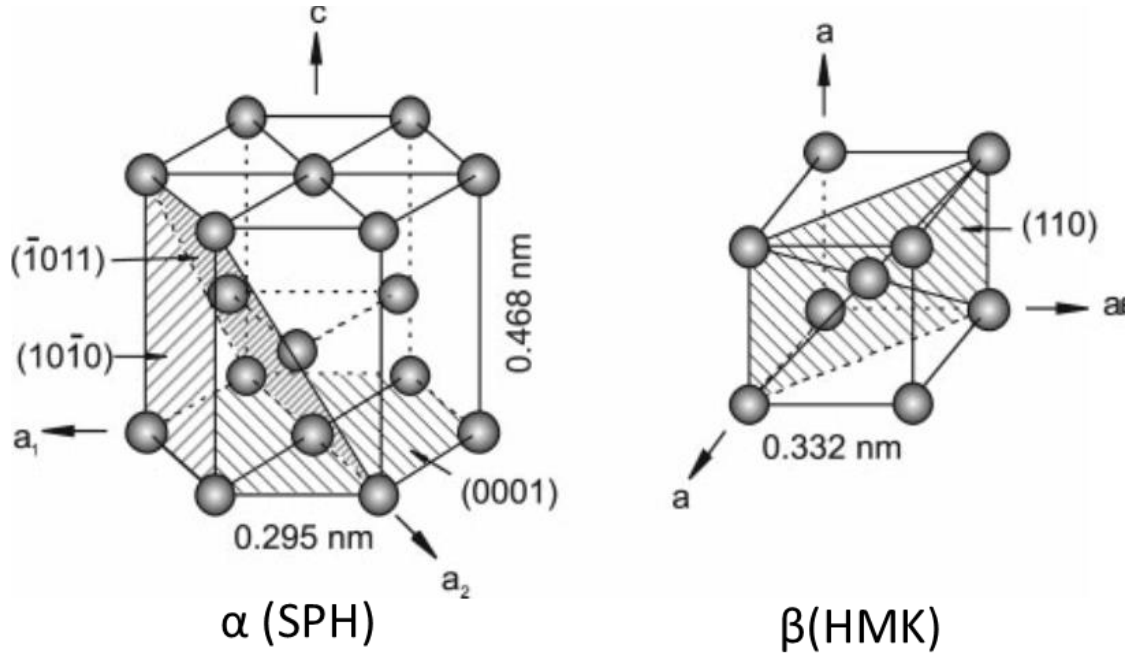


Şekil 2.4 Titanyum Spongedan ingot eldesi süreci (Pederson, 2002).

2.2. Kristal Yapısı

Titanyum allotropik özelliğe sahip bir malzemedir. Farklı sıcaklıklarda farklı kristal yapılarda olabilir. Saf titanyum malzemeler oda sıcaklığında sıkı paket hegzagonal (SPH) yapıda bulunur. Bu yapıya α titanyum adı verilir. Yüksek sıcaklıklarda ise bu yapı hacim merkezli kübik (HMK) yapıya dönüşür. Bu yapıya ise β titanyum adı verilir. Saf titanyum için α - β dönüşüm sıcaklığı 882°C 'dir. α ve β fazlarının kafes yapıları Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Leyens ve Peters, 2003). Belirtilen kafes parametreleri C, O, N gibi arayer atomlarının yapıya katılması ile değişiklik gösterebilir. Titanyum alaşımlarında bulunan bu

iki faz ve fazların oranları yapı özelliklerini önemli ölçüde belirlemektedir. Çeşitli alaşım elementleri bu fazların oluşum kinetiklerini ve yapıdaki oranlarını etkilemektedir.

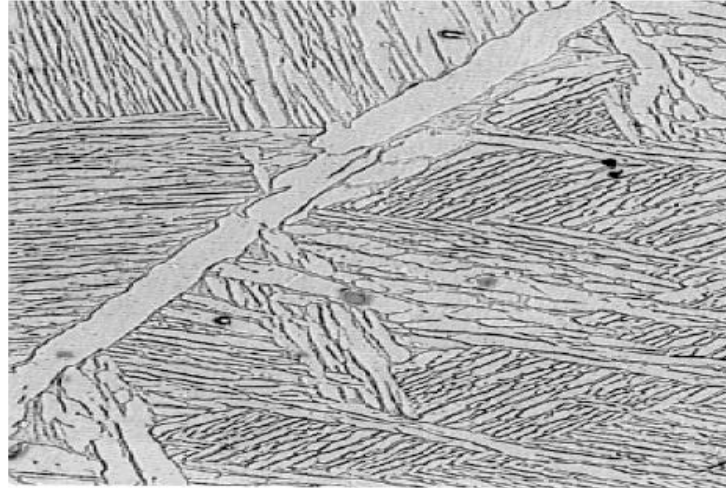


Şekil 2.5. Saf Titanyum kristal Kafes Yapısı (Leyens ve Peters, 2003).

Bu fazların oranı titanyum alaşımlarının plastisite özelliklerini de yakından etkilemektedir. SPH yapının ağırlıkta olduğu titanyum alaşımlarını oda sıcaklığında hasara uğratmadan deforme etmek oldukça zordur. Bu durumun temel sebebi ise kübik kafes yapıları arasındaki kayma düzlemleri farkıdır.

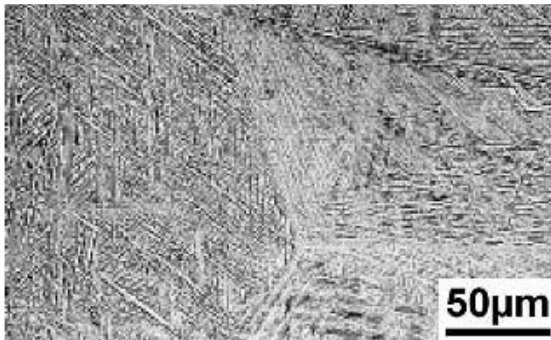
2.3. Faz Dönüşümü

Dönüşüm sıcaklığı üzerine ısıtılan titanyum alaşımları soğuma ile β fazından α fazına dönüşüm gösterir. SPH yapıdan HMK yapıya dönüşüm az miktarda atomik çarpılmaya neden olur ve makroskopik olarak hacim artışı gözlemlenebilir. Dönüşümde uzun β tanelerinde α fazı lameller şeklinde dönüşür. Lamelli yapıda sepet örgüsü şeklinde mikroyapı (Şekil 2.6) elde edilir.



Şekil 2.6 Ti6Al4V alaşımı sepet formundaki lamelli mikroyapı (Leyens ve Peters, 2003).

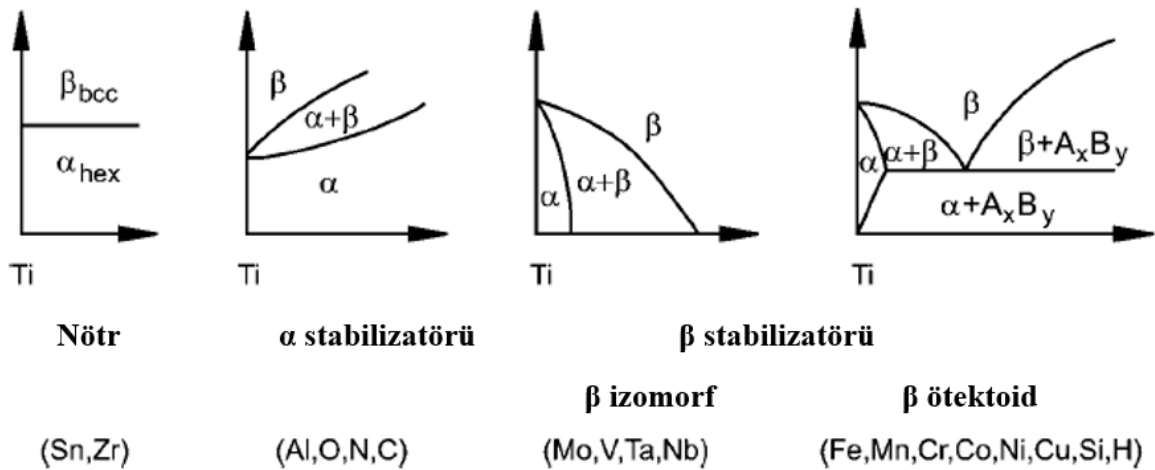
SPH yapıdaki α fazının difüzyon katsayısı β fazına göre önemli ölçüde düşüktür. Bu fark faz oranlarındaki farkın mekanik özellikleri, plastisite özelliklerini, sıcak şekil verilebilirliğini ve sürünme gibi özellikleri etkiler. β dönüşüm sıcaklığı altında ise difüzyon süreci önemli ölçüde yavaştır. Hızlı soğutma ince taneli lamelli yapıya dönüşümü sağlarken yavaş soğutma da kaba lamelli yapı elde edilir. Eğer yeterli soğuma hızı sağlanırsa difüzyonsuz martenzitik dönüşüm de sağlanabilir. Bu dönüşümde HMK yapıdaki β fazı SPH yapıdaki α fazına difüzyonsuz olarak dönüşür yapı ise yarı kararlı ince lamelli yapı ya da asiküler martenzit şeklinde olur. Çeliklerin aksine martenzitik dönüşüm titanyum alaşımlarında kırılma yol açmaz. Dayanımları α titanyumuna göre bir miktar artar. Martenzit yapı hegzagonal α' ve ortorombik α'' olarak tanımlanabilir. Ortorombik α'' martenziti iyi deformasyon özellikleri gösterir. Bu yapı 900°C 'den oda sıcaklığına hızlı soğutma ile elde edilebilir. Mikro yapısı ise ince sepet örgüsü yapısı ve iğnemsî yapısı ile tanınabilir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. β faz bölgesinden hızlı soğutulmuş "Asiküler" martenzit (Ti6Al4V) (a) Işık mikroskobu (b) TEM (Lütjering ve Williams, 2007).

2.4. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Farklı amaçlar için geliştirilmiş yüzün üzerinde titanyum alaşımı mevcuttur, pratik kullanımda ve bulunabilirlikleri göz önüne alındığında ise temel olarak 30 farklı titanyum alaşımı ticari olarak kullanılmaktadır. Titanyum alaşımları farklı kimyasal bileşimde ve özelliklerde bulunmaktadır. Titanyum alaşımları, saf (%99-100 Ti), alfa alaşımları (%90-95 Ti), alfaya yakın alaşımlar, alfa beta alaşımları (%80-90 Ti), beta alaşımları ve betaya yakın alaşımlar (%80<Ti) olarak gruplandırılabilir. Titanyum alaşımlarında farklı sıcaklıklardaki fazların oranlarını yapıya katılan alaşım elementlerinin türü ve miktarı belirler. Şekil 2.8’de farklı alaşım elementlerinin faz diyagramına olan etkisi gösterilmiştir (Leyens ve Peters, 2003).



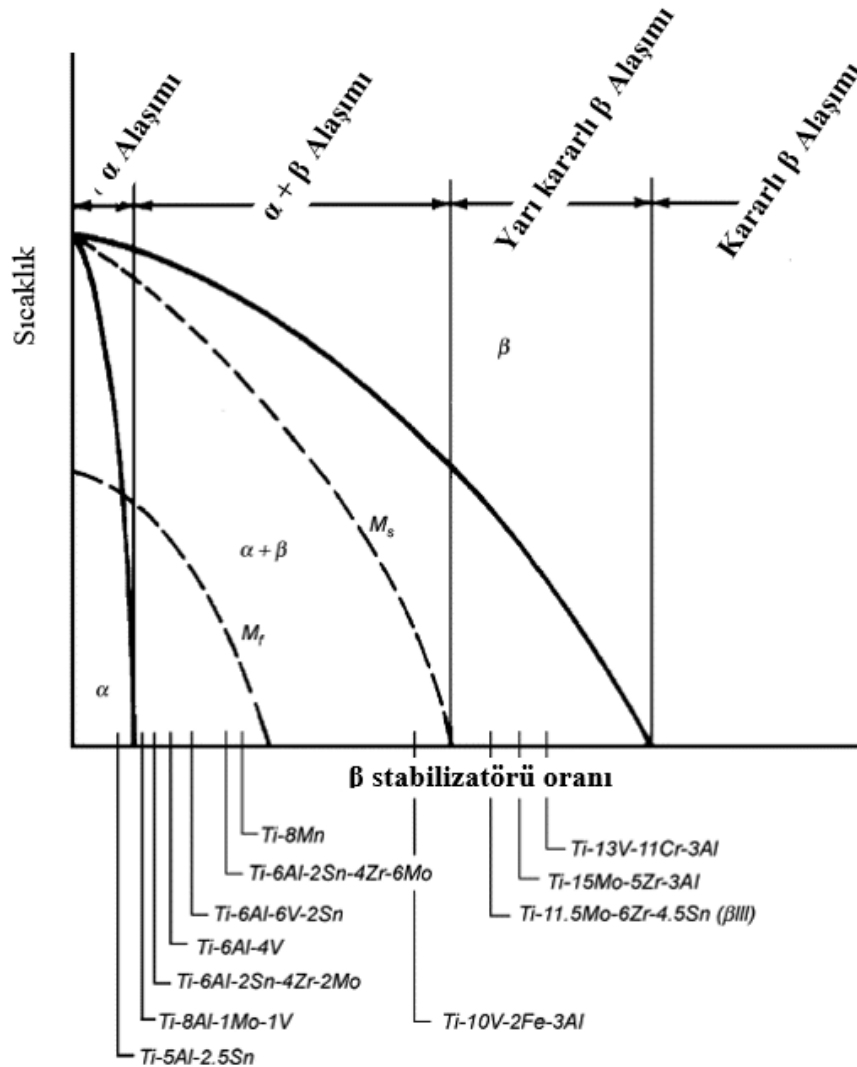
Şekil 2.8. Alaşım elementlerinin Titanyum alaşımlarının faz diyagramına olan etkisinin sematik gösterimi (Lütjering ve Williams, 2007).

Alaşım elementleri α stabilizatör ve β stabilizatör olarak sınıflandırılabilir. Alfa stabilizatörleri α fazının daha yüksek sıcaklıklara kadar korunmasını sağlar, beta stabilizatörleri ise β dönüşüm sıcaklığını düşürür. Başlıca α stabilizatörü alüminyumdur. Alüminyumun yanında arayer elementleri C, O ve N da alfa stabilizatörü olarak çalışırlar. Bu elementler α fazının bulunduğu sıcaklığı artırmanın yanında iki fazlı $\alpha + \beta$ yapısı oluşmasını da teşvik eder. Başlıca β stabilizatörleri ise β izomorfuz (Mo, V, Ta, Nb) ve β ötektoid (Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, Si, H) olarak sınıflandırılır. Sn ve Zr ise alfa beta dönüşümünde rol oynamazlar fakat α fazının mukavemetini artırma amacıyla alaşıma

katılabilirler. Titanyum alaşımlarına katılan başlıca elementler Çizelge 2.2’de ticari olarak kullanılan farklı titanyum alaşımlarının faz diyagramları Şekil 2.9’da verilmiştir.

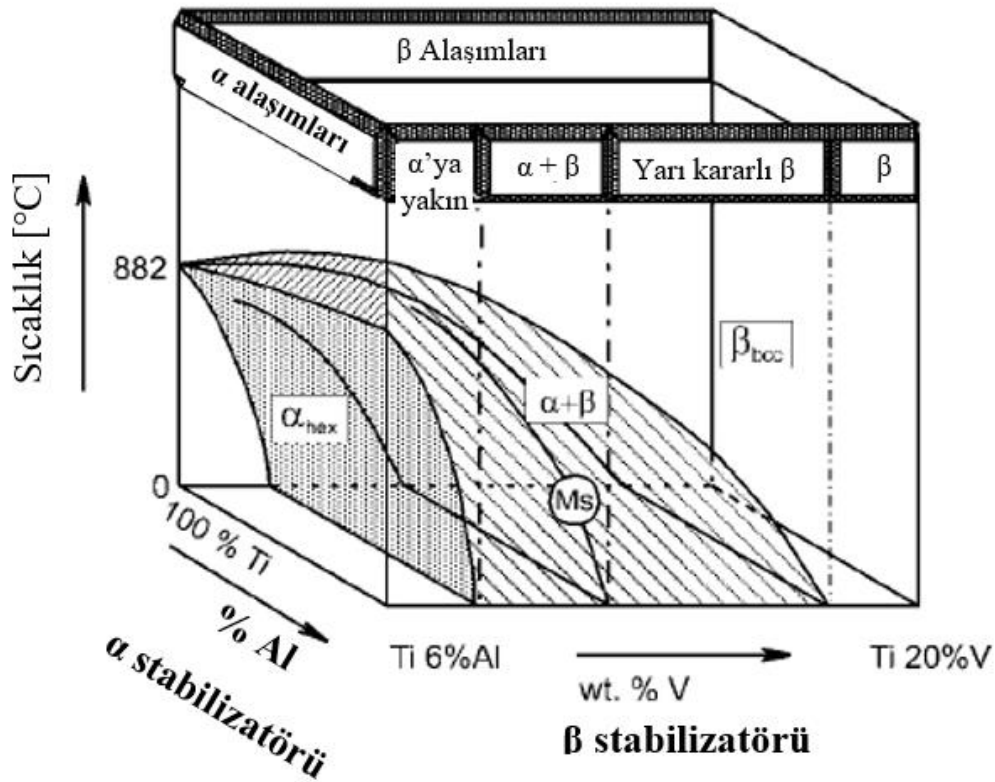
Çizelge 2.2. Başlıca Titanyum alaşım elementleri.

Alfa Stabilizatörleri	Beta Stabilizatörleri	Etkisi olmayanlar
Al, O, N	β isomorfuz (Mo, V, Ta, Nb) β ötektoid (Fe, Mn, Cr, Co, Ni, Cu, Si, H)	Zr, Si, Sn



Şekil 2.9. Titanyum alaşımlarının pseudobinary h-isomorphous faz diyagramı (Zhecheva, vd., 2005).

Ticari saflıktaki titanyum ile alfa stabilizatörleri içeren alaşımlar alfa alaşımları olarak adlandırılır. Eğer az miktarda beta stabilizatörü alaşıma katılmışsa alfaya yakın alaşımlar olarak sınıflandırılır. Alfa ve beta fazının bir arada olduğu $\alpha + \beta$ alaşımları ise oda sıcaklığında önemli ölçüde (%5-40 arası) β fazı içerir. β yapıcı alaşım elementleri belirli oranın üzerinde yapıda yer alırsa hızlı soğutma ile martenzit elde edilmesi imkânsız hale gelir. Bu durumdaki alaşım halen iki fazlıdır. β fazı yarı kararlı haldedir. Bu durumdaki alaşımlarda bile %50 den fazla α fazı bulunur. β yapıcı alaşımlama elementi ilavesine devam edilirse sadece β fazının olduğu yapıya da ulaşılabılır. Alaşım elementleri olarak Al elementi α fazı oluşumunda, Mo ve V elementleri ise β fazı oluşturmada kuvvetli etkiye sahiptirler. Yapıya katılan diğer alaşım elementlerinin etkileri bu element eşiti olarak ampirik formüllerle tanımlanıp belirlenmeye çalışılır. α stabilizatörü olan alaşım elementleri için Al eşiti, β stabilizatör olan alaşım elementleri için de Mo ya da V eşiti hesaplanarak alaşım elementlerinin faz yapısına etkisi ön görülebilir (Banerjee ve Mukhopadhyay, 2007). Şekil 2.10 yapıya katılan alaşım elementi miktarına göre ortaya çıkan alaşım türlerini özetlemektedir (Leyens ve Peters, 2003).



Şekil 2.10. Titanyum alaşımlarının sınıflandırıldığı şematik grafik (Leyens ve Peters, 2003).

Farklı alaşım elementlerinin α ve β stabilizatörü alaşım elementleri Al ve Mo eşiti olarak ifade edilen bir ampirik formül (2.3) ve (2.4) te verilmiştir (Welsch vd., 1994).

$$[Al]_{eş}=[Al] + [Zr]/3 + [Sn]/3 + 10[O] \quad (2.3)$$

$$[Mo]_{eş}=[Mo] + [Ta]/5 + [Nb]/3,6 + [W]/2,5 + [V]/1,25 + 1,25[Cr] + 1,25[Ni] + 1,7[Mn] + 1,7[Co] + 2,5[Fe] \quad (2.4)$$

Titanyum alaşımlarının özellikleri α ve β alaşımlarının mikro yapıdaki yerleşimi, yapıdaki oranları ve özellikleri tarafından belirlenmektedir. HMK yapıdaki β fazının yanında α fazı SPH yapıdadır ve anizotropik karakter gösterir. β fazına kıyasla α fazının yapıya kattığı başlıca özellikler: plastik deformasyon direncini artırma, sünekliği düşürme, mekanik ve fiziksel özelliklerde anizotropiyi teşvik etme, difüzyon hızını düşürme ve üstün sürünme direnci sağlamaktır.

Titanyum alaşımları için 100'den fazla farklı alaşım ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bugün 30 kadar ticari alaşım halinde piyasada bulunmaktadır. %50'lik Pazar payı ile en yaygın kullanılan titanyum alaşımı ise Ti6Al4V alaşımıdır. Titanyumun %20-30'u ise saf halde kullanılmaktadır (Lütjering ve Williams, 2007). Çizelge 2.3'de farklı türdeki titanyum alaşımlarının karşılaştırmalı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Titanyum alaşımlarının karşılaştırmalı özellik Çizelgesi (Leyens ve Peters, 2003).

	α	$\alpha+\beta$	β
Yoğunluk	+	+	-
Mukavemet	-	+	++
Süneklik	-/+	+	+/-
Kırılma tokluğu	+	-/+	+/-
Sürünme Dayanımı	+	+/-	-
Korozyon dayanımı	++	+	+/-
Oksidasyon Davranışı	++	+/-	-
Kaynak Edilebilirlik	+	+/-	-
Soğuk deforme edilebilirlik	--	-	-/+

2.4.1. α alaşımları

Alfa alaşımlarının endüstride başlıca kullanım alanı kimyasal işlemenin görüldüğü sektörlerdir. Alaşımın bu sektörlerde önemli pay bulmasının başlıca nedeni ise sahip olduğu üstün korozyon direncidir. Yaygın olarak ticari saflıkta piyasaya sunulan titanyumun farklı kalitelerde olmasının en önemli nedeni oksijen içeriğidir. Titanyumda oksijen arayer atomu olarak görev yapar, yapıdaki oksijen oranının artması yapının mukavemetini artırırken sünekliğini azaltır. Ticari saflıkta satılan alaşımlara istenilen oranda katılan tek alaşım elementi oksijendir, oksijen dışındaki diğer alaşım elementleri (C, N, Fe) empürite olarak değerlendirilir. Grade 1'den 4'e kadar olan titanyum kaliteleri ticari saflıktaki titanyumu ifade etmek için kullanılır. Bu kalitelerin çekme dayanımı 240 MPa-740 MPa arasında yer alır. Grade 1 en düşük dayanıma ve üstün soğuk şekil verilebilirliğe sahip olan kalitedir. Özellikle derin çekme uygulaması ile düşük dayanımlı tank imalatında yaygın kullanılır. Grade 2'nin çekme dayanımı ise 390 MPa ile 540 MPa arasında yer alır saf titanyum kaliteleri arasında en yaygın kullanılanıdır. Grade 3 basınçlı kap uygulamalarında yaygın olarak kullanılır ve soğuk deformasyonu mümkündür. Grade 4 ise 740 MPa'a kadar çıkabilen dayanımı ile genellikle bağlantı elemanı olarak kullanılır. Bu kalitenin şekillendirilebilmesi için 300°C'lık bir sıcaklığa ihtiyaç duyulur (Lütjering ve Williams, 2007).

Ticari saflıktaki titanyum alaşımları olan, alfa titanyum ve alfaya yakın titanyum alaşımlarına ısıl işlem uygulanamaz, kaynak edilebilir, orta düzeyde mukavemet sağlar, iyi çentik direnci ve tokluk sunar, yüksek sıcaklıklarda iyi sürünme dayanımları vardır. Saf titanyum alaşımları %99,0-99,5 oranında SPH yapıda α fazı içerir. Yapıda bulunabilen diğer elementler ise Fe ve arayer elementleri olarak kabul edilen C, O, N, H elementleridir. Yapıdaki oksijen oranı sınıfı ve dayanımı belirler. C, N, H atomları empürite olarak sınıflandırılır. Özellikle hidrojenin varlığı kırılganlığa yol açar. Sınıflandırma açısından bu elementler oksijen eşleniği (2.5) ile ifade edilir (Leyens ve Peters, 2003).

$$\%O_{eş} = \%O + 2,0 \%N + 0,67 \%C \quad (2.5)$$

α alaşımları nitrik asit, nem ve klora karşı üstün korozyon dayanımı gösterir. Asitlere (HCl, H₂SO₄, H₃PO₄) karşı korozyon direncini artırmak için ise %0,2 Pd ile alaşımlandırılır.

Başlıca uygulama alanları uçak gövde parçaları, ısı değiştiriciler, kimyasal işlem tankları, denizcilik uygulamaları, ameliyat malzemeleri ve implantlardır (Leyens ve Peters, 2003).

2.4.2. α ya yakın alaşımlar

Alfaya yakın alaşımlar genellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilir. Bu alaşımlar α alaşımlarının üstün sürünme dayanımı ile α ve β alaşımlarının üstün mukavemet özelliklerini bir arada sunar. Bu alaşımların kullanım sıcaklıkları 500°C-550°C ile kısıtlıdır. Bu bağlamda geliştirilen ilk titanyum alaşımı Ti-8-1-1'dir. Bu alaşımın yüksek miktarda alüminyum içermesinin gerilmeli korozyon hasarına yol açtığı tespit edilmiştir. Bu tespitten sonra tüm titanyum alaşımlarında kullanılabilir en büyük alüminyum alaşım oranı %6 olarak sınırlandırılmıştır. Alüminyum alaşımına ilave olarak %0,5'e kadar silisyum ilavesinin de sürünme davranışını iyileştirdiği saptanmıştır. Timet 834 alaşımı yaklaşık 600°C de yeterli sürünme ve oksidasyon dayanımını gösterebilmektedir.

2.4.3. $\alpha + \beta$ Alaşımları

$\alpha + \beta$ alaşımları arasında en bilineni ve en yaygın kullanılanı Ti6Al4V alaşımıdır. Tüm titanyum alaşımları arasında Ti6Al4V'un kullanım oranı yaklaşık %50'dir. Ti6Al4V alaşımının bu denli yaygın kullanılmasının en önemli nedeni dengeli özelliklere sahip olması ve pek çok koşulda (saha ve laboratuvar) test edilmiş olmasıdır. Bu özelliği havacılık ve biyomedikal gibi sektörlerde kullanımı açısından oldukça önemlidir. Ti-6-6-2 ve IMI 550 dayanımı artırılmış diğer $\alpha + \beta$ alaşımları olarak sayılabilir. Ti-6-2-4-6 alaşımı diğerlerinden farklı olarak yüksek dayanım ve tokluk sağlamaktadır. Ti-6-2-2-2-2, Ti-55-24-S ya da Ti-17 alaşımları ise 400°C ye kadar olan havacılık uygulamalarında sahip oldukları mekanik özellikler nedeniyle tercih edilmektedir.

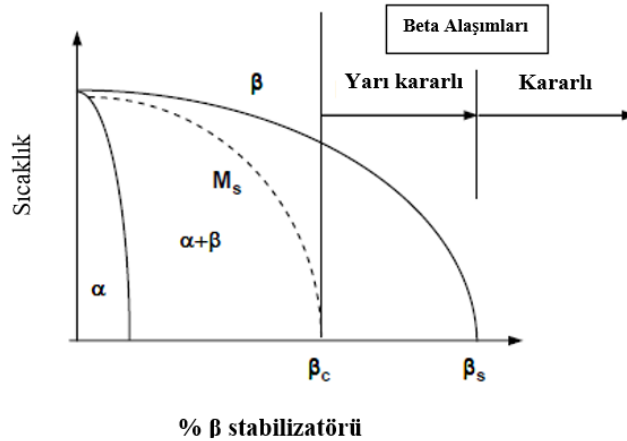
2.4.4. β alaşımları

β alaşımları titanyum alaşımları arasında en esnek yapıdaki alaşımlardır. Beta alaşımları üstün özgül dayanım sunarlar. Bunun yanında dayanım, tokluk ve yorulma dayanımını oldukça kalın kesitler için de sağlarlar. $\alpha + \beta$ alaşımlarına nazaran yoğunlukları fazla, ürün hacimleri düşük ve maliyetleri yüksektir. Beta alaşımı olarak kullanılan başlıca

alaşım Ti-10-2-3, Beta C, Ti-15-3, TIMETAL 21S ve BT 22 yapısal parçalarda, Ti 17 alaşımı ise gaz türbinde kullanılır.

Alaşım elementi olarak vanadyum ve molibdenin katılması ile β geçiş sıcaklığı düşürülebilir. β alaşımlarında dahi yapının tamamen β fazında olması istenmez. Yapı β stabilizatörleri ile alaşımlanır, mukavemet artışı ise yarı kararlı β fazının hızlı soğutması ve katı eriyik yöntemi ile dayanım artırılmasına dayanır.

Beta titanyum alaşımlarında yapının tümünün β fazında kalmasını sağlayacak kadar β stabilizatörü olan alaşım elementleri bulunmaktadır. Şekil 2.11'deki diyagramdan da anlaşılacağı üzere β stabilizatör miktarı arttıkça yapı daha kararlı hale gelmektedir. Bunu belirleyen unsur da (2.6)'de verilen alaşım miktarının molibden eşitliğidir. Yarı kararlı β alaşımları ısıl işlem ile sertleştirilebilirken; kararlı olanlar sertleştirilemezler.



Şekil 2.11. β titanyum faz denge diyagramı (Lütjering ve Williams, 2007).

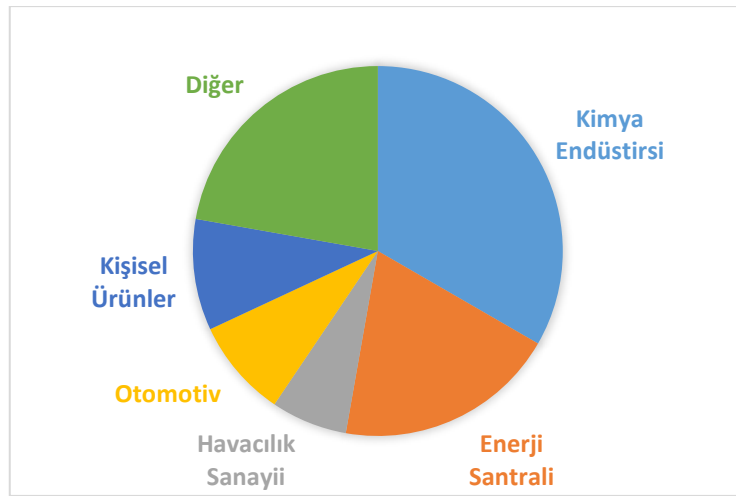
$$Mo_{eş\%} = 1,0 Mo + 0,67 V + 0,44 W - 0,28 Nb + 0,22 Ta + 1,6 Cr + \dots -1,0 Al \quad (2.6)$$

Yarı kararlı β alaşımlarının önemi giderek artmaktadır. Bu alaşımlar sertleştirilerek 1400 MPa gibi oldukça yüksek çekme dayanımı değerleri gösterebilmektedir. Bu alaşımlar yüksek dayanım ya da yüksek tokluk, imal edilebilirlik gibi özelliklerin ayarlanması bakımından oldukça esnektir. Örneğin TIMETAL 15-3 oda sıcaklığında ince folyo şekline getirilebilmektedir. TIMETAL 21S ise özel olarak oksidasyon direncini iyileştirilmek için tasarlanmıştır. Özel amaçlar için geliştirilen pek çok alaşım olmasına rağmen yarı kararlı β alaşımlarının yaygın kullanımını etkileyen başlıca etmenler; özgül yoğunluğunun nispeten

fazla olması, kaynak edilmesinin zor olması, oksidasyon direncinin düşük olması ve sahip olduğu karmaşık yapısıdır.

2.5. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Uygulama Alanları

Titanyum alaşımlarının başlıca kullanıldığı sektörler: Havacılık uzay sanayi, medikal, gıda ve kimyasal işleme sektörü, mücevher ve kişisel eşyalar olarak belirtilebilir. Titanyum alaşımları 1940'lı yıllarda Amerika'da havacılık sektöründe kullanılmak için geliştirilmeye başlanmıştır. Günümüzde havacılık sektöründe gövde parçalarının yaklaşık %7'si ve motor parçalarının ise %36'sında titanyum alaşımları kullanılmaktadır (Leyens ve Peters, 2003). Titanyum alaşımlarının farklı sektörlerde kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. İhtiyacın artmasının imalat teknolojilerini ve pazarı büyüterek ürün maliyetini düşürmesi beklenmektedir. Titanyum alaşımlarının sahip olduğu üstün özellikler ile farklı sektörlerde performans artırma ağırlık hafifletme gibi uygulamalarda da tercih edilmektedir. Havacılık sektörünün büyümesinin yanı sıra havacılık sektörü dışındaki sektörlerdeki titanyum kullanımı artmaktadır. Bu anlamda havacılık sektörü dışında titanyum kullanımının arttığı ve öne çıkmaya başladığı başlıca sektörler: Kimyasal işleme sektörü, medikal uygulamaları, enerji ve taşıma teknolojileri, mimari uygulamaları, spor ekipmanları, mücevher, saat gibi kişisel ürün sektörleri olarak sayılabilir. Şekil 2.12'de silindirik çubuk malzeme olarak titanyum alaşımlarının kullanım alanları gösterilmiştir.

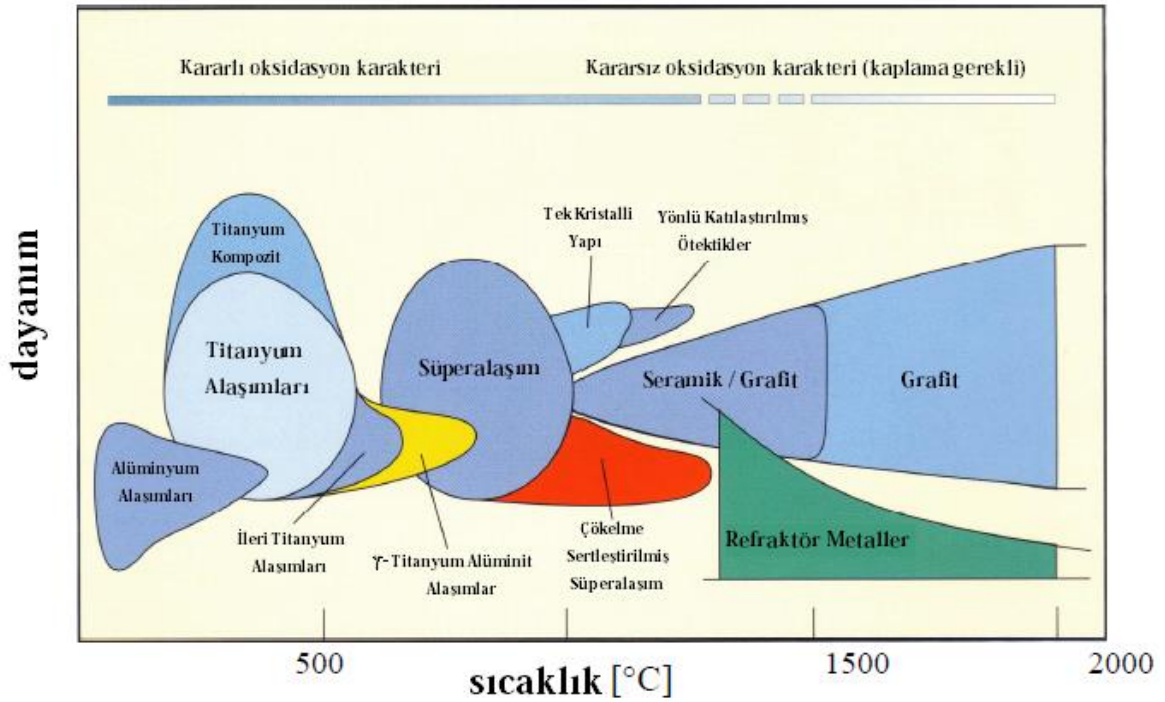


Şekil 2.12. Titanyum Alaşımları kullanım alanları (Udomphol, 2007).

Titanyum alaşımlarının başlıca özellikleri (Sha ve Malinov, 2009), (Kıvak, 2012) (Leyens ve Peters, 2003):

- Atmosferik ortamda ve bazı kimyasallara karşı mükemmel korozyon direnci
- Yüksek özgül dayanım
- 550-600°C'ye kadar termal kararlılık
- Düşük sıcaklık dayanımı
- Düşük termal ve elektriksel iletkenlik
- Düşük manyetik etkileşimi
- Yüksek yorulma dayanımı
- Biyo uyumluluk

Şekil 2.13'de gösterilen farklı alaşımların sıcaklığa göre dayanım ve oksidasyon direnci incelendiğinde ise 500°C'ye kadar kararlı oksit oluşurması ve sunduğu dayanım ile titanyum alaşımları ön plana çıkmaktadır.



Şekil 2.13. Çeşitli alaşımların sıcaklığa bağlı dayanım ve oksidasyon durumu.

2.5.1. Kimyasal işleme, gıda ve petrokimya endüstrisi

Titanyum alaşımlarının oksijene karşı reaktif olması yüzeyinde temiz ve kalıcı bir oksit (TiO_2) tabakası oluşmasını sağlamaktadır. Yüzeyini kaplayan bu oksit tabakasının da katkısı ile titanyum alaşımlarının korozyon dayanımı oldukça yüksektir. Bu oksit tabakası hasar alması durumunda bile hızlı bir şekilde yenilenir. Üstün korozyon dayanımı titanyum alaşımlarının kimyasal işleme ve gıda işleme sektöründe kullanımını sağlamaktadır. Titanyum alaşımlarının asetik asit, nitrik asit, aseton gibi asidik ortamlarda kullanımı mümkündür. Ayrıca farklı tuz ortamları ve alkalın ortamlarında da güvenle kullanılabilir. Her ne kadar kimya işleme ve gıda sektörü düşünüldüğünde en yaygın kullanılan malzeme östenitik paslanmaz çelik olsa da titanyum alaşımları östenitik paslanmaz çeliklerin yeterli korozyon dayanımı gösteremediği durumlarda tercih edilmektedir. Bu kapsamda titanyum alaşımları depolama kapları, karıştırıcılar, pompalar, ısı değıştiriciler, borular, depolama tankları, soğutucular, basınçlı reaktörler gibi farklı uygulamalarda kullanılmaktadır (Leyens ve Peters, 2003).

2.5.2. Medikal uygulamaları

Medikal uygulamalarda titanyum ve alaşımlarının kullanılmasının temel nedeni insan vücudu ile toksin reaksiyona girmemesi yani biyo uyumlu olmasıdır. Bunun yanında vücut sıvılarına karşı gösterdiği üstün korozyon direnci, kemik ve kas dokusu ile uyumlu çalışabilmesi de diğer avantajlarıdır. Titanyum alaşımlarının elastik özellikleri özellikle ince film ya da hücre (tel gibi) şeklinde kullanımını mümkün kılmaktadır. İmplantlar gibi özellikle yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda üstün özgül dayanımı ve yüksek yorulma ömrü özellikleri titanyum alaşımlarını cazip kılmaktadır. Sahip olduğu düşük elastisite modülü insan kemiği ile yakın değerlerde olabilmekte ve rijitlik esneklik dengesinin sağlanmasında katkıda bulunabilmektedir. Özellikle kalça ve eklem protezlerinde ve kırıklarda sabitleme amacıyla kullanılan civatalarda bu özellik öne çıkmaktadır. Biyomedikal uygulamaları ile ilgili çalışmalar Ti6Al4V alaşımı ile başlamıştır. Geliştirilen yeni uygulamalarda ise vanadyum elementinin toksin etkisinden arındırılmış yeni titanyum alaşımları (Ti-5Al-2.5Fe, Ti-12Mo-6Zr-2Fe, Ti-15Mo-3Nb-3Al, Ti-6Al-7Nb, Ti-13Nb-13Zr, Ti-35Nb-7Zr- 5Ta, veTi-30Ta) geliştirilmiştir. Bunun yanında $\alpha+\beta$ alaşımları yerini yavaş yavaş β alaşımlarına bırakmaktadır. β alaşımlarının elastisite

modülünün insan kemiğine daha yakın olması avantaj sağlamaktadır. Diş ve dişçilik uygulamalarında da titanyum alaşımlarından yaygın olarak faydalanılmaktadır. Bu uygulamalarda yaygın olarak Grade 1 titanyum alaşımları tercih edilmektedir. Ayrıca bu alaşımları; Amalgam, altın gibi diğer metaller ile karıştırılarak da kullanılabilir. Diş implantlarında kullanılan titanyum alaşımlarının özellikle oksit filmi oluşturarak korozyon direnci sağlaması, oluşan oksitin tadının suya benzer olması ve termal iletkenlik değerinin insan dişine yakın olması sıcak ya da soğuk yiyecekler tüketildiğinde önemli termal gerilme oluşturmaması önemli avantajlarındandır.

Titanyumun kullanıldığı bir diğer malzeme grubu ise şekil hafızalı alaşımlardır. Şekil hafızalı Ni-Ti alaşımları medikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlar sıcaklık ve basıncın etkisi ile büyük miktarda elastik deformasyon gösterebilmekte ve uygulanan ısı etki ile öğretilen hallerine geri dönebilmektedir. Titanyum alaşımları gibi Ni-Ti alaşımları da biyo uyumludur.

2.5.3. Havacılık uygulamaları

Titanyum alaşımlarının en yaygın kullanıldığı alanlardan birisi de havacılık ve uzay sanayiidir. Titanyum alaşımları sahip oldukları korozyon direncinin yanında üstün özgül dayanım özellikleriyle de havacılık sektöründe ön plana çıkmaktadır (Boyer, 1996). Modern uçak motorlarında titanyum alaşımının ağırlık olarak payı yaklaşık %25 düzeyindedir. Titanyum alaşımından üretilen motordaki temel parçalar ise fan, kompresör, diskler ve kanatçıklar olarak sayılabilir. Titanyum alaşımları 500°C'ye kadar olan ortamlarda kullanılmaktadır (Lütjering & Williams, 2007). Bu durum motorda kullanılabileceği bölgeleri kısıtlamaktadır. Motor uygulamalarının yanında gövde uygulamalarında da bağlama elemanı olan cıvatalardan iniş takımlarına kadar pek çok parçada titanyum alaşımları tercih edilmektedir. Örneğin Boeing 777 uçağında titanyum alaşımları gövde de ağırlık olarak %10'luk bir paya sahiptir (E.F.A.D, 2002).

Titanyum alaşımları havacılık uygulamalarında ağırlık hafifletme amacıyla çelik alaşımlarının yerini alarak kullanılmaya başlamıştır. Günümüzde ise hacim kısıtı olan yerlerde alüminyum alaşımlarının yerine de kullanımına başlanmıştır.

2.5.4. Diğer uygulama alanları

Titanyum alaşımlarının üstün korozyon direnci denizcilik uygulamalarında, sahip olduğu üstün özgül dayanım otomotiv uygulamalarında kullanım payını giderek artırmaktadır. Titanyum alaşımları özellikle ağırlık azaltma amacıyla çeliğin yerine kullanılmaktadır. Titanyum alaşımlarının çeliğe kıyasla özel üretim yöntemleri gerektirmesi ve maliyetinin yüksek olması özellikle lüks araçlarda kullanımının daha yaygın olmasının nedenidir. Güncel kullanım bulduğu ürün grupları ise; valfler, aktarma organları, yay elemanları, eksoz sistemleri olarak sayılabilir.

Mimari uygulamalarda da titanyum alaşımlarının kullanım örneklerine rastlanmaktadır. Özellikle aşırı korozif atmosferik koşullarda tercih edildikleri uygulamalar görülmektedir. Özellikle denize yakın yerleşim yerlerinde ve asit yağmurlarının sık görüldüğü bölgelerde dış cephe kaplaması olarak kullanılmaktadırlar. Titanyum alaşımlarının üstün yalıtım ($21,6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) özelliği de yapısal uygulamalarda kullanılmasına neden olmaktadır. Maliyeti yüksek olduğu için özel uygulamalar ve butik projelerde kısıtlı kullanım alanı bulmaktadır.

Yüksek performans gerektiren spor uygulamaları da titanyum alaşımlarının giderek daha yaygın olarak tercih edildiği alanlardan birisidir. Golf sopaları, tenis racketleri, beyzbol sopaları, bisiklet kadroları, dağcılık uygulamalarında kullanılan çekiçler ve bıçaklarda da titanyum alaşımlarının kullanımı yaygındır (Leyens ve Peters, 2003; Niinomi, 1998).

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde titanyum alaşımlarının farklı metotlarla yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, imal edilebilirlik, özellikleri, korozyon direnci, biyo uyumluluk gibi pek çok farklı özelliğin incelenmesi, yapılarında meydana gelen değişimlerin karakterize edilmesi üzerine farklı çalışmalar mevcuttur. Titanyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler ve bu ısıt işlemlerin malzeme özelliklerine olan etkileri büyük oranda bilinmektedir ancak titanyum alaşımlarının kriyojenik işleme tabi tutulması ve kriyojenik işlemin titanyum alaşımlarının özelliklerine etkisi ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Kriyojenik işlemin takım çelikleri üzerine olan etkileri yaygın olarak araştırılmakta olsada demir dışı malzemeler ile ilgili çalışmalar ise görece daha kısıtlıdır. Ancak bu konudaki araştırmalar tüm dünyada devam etmektedir. Bu kısımda deneysel olarak yapılacak çalışmalara incelenecek yöntemler ve kullanılacak parametrelere yönelik teorik altyapı oluşturulmuş ve sonuçların irdelenmesinde ve deneylerin gerçekleştirilmesinde faydalanılan kaynaklardan kısaca bahsedilmiştir.

Titanyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemlerin aşınmaya etkisi ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, ısıt işlemin titanyum alaşımlarının aşınma direncine önemli ölçüde etki ettiği görülmektedir. Gu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımına 3, 24, 48 ve 72 saat sürelerle kriyojenik işlem uygulanmış daha sonra kuru şartlar altında pin on disk düzeneği ile aşınma testine tabi tutulmuştur. Bu çalışmada karşı malzeme olarak 60 HRC sertliğinde GCr15 çeliği kullanılmıştır. Aşınma testlerinin numunede meydana getirdiği değişim hassas terazide test öncesi ve sonrasında ölçülen ağırlık farkı üzerinden değerlendirilmiştir. Numunelere kriyojenik işlemin iç yapıya olan etkilerini belirlemek için XRD analizi yapılmakla beraber faz değişim yüzdeleri verilmemiştir. Bu çalışmada elektron mikroskobu yardımıyla incelenen numunelerde mikroyapıda gözlenebilir bir değişim olmadığı belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmada kriyojenik işlem ile mikro sertlik artışı gözlenmiş ancak raporlanan en ciddi artış 72 saat derin kriyojenik işlem için 15 HV düzeyinde olmuştur. Bu artışın kayda değer olmadığı söylenebilir. Yapılan aşınma testlerine göre derin kriyojenik işlemin sıg kriyojenik işleme göre sürtünme katsayısını düşürdüğü; referans numuneye göre çelik malzemeye karşı sürtünme ve aşınma özelliklerinin iyileştiği raporlanmıştır. Gözlemlenen bu iyileşme etkisi farklı yükler (50-100-200 N) altında denenmiştir. Bu testlerde 72 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numunenin aşınma direnci tüm testlerde iyileşirken 24 ve 48 saat derin kriyojenik işlem

uygulanan numunelerde gözlenen etkiler yük ve temas koşullarına karşı daha değişken olarak gözlenmiştir. Titanyum alaşımlarına kriyojenik işlem uygulanmasının aşınma direncine etkisi üzerine yapılan bir diğer çalışmada 10 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numunede aşınma direncinin kötüleştiği raporlanmıştır (Nasreen, vd., 2014). Bu bağlamda kriyojenik işlem süresinin ve koşullarının titanyum alaşımlarında aşınma davranışı üzerine önemli etkisinin olduğu söylenebilir. Titanyum alaşımının çelik malzemeye karşı aşınma mekanizmasının adhesif karakterde ve aşınan yüzeyin delaminasyon ile ayrılması şeklinde gerçekleştiği raporlanmıştır. Kriyojenik işlemin yüzeydeki kazınma etkisini azaltarak, temas bölgesindeki plastik deformasyonu en aza indirdiği ve daha düzgün aşınma yüzeyi oluşumuna katkıda bulunduğu belirtilmiştir. Bu etkileri sağlayan temel mekanizmanın ise β faz miktarındaki azalma ve iç yapıdaki tane boyutu düzenlenmesi olduğu raporlanmıştır (Gu vd., 2014). Bu çalışmanın yanında TZ20 titanyum alaşımı ile yapılan bir başka çalışmada yüksek sıcaklıkta (900°C) tavlama, tavlama sonrası çözeltiye alma işlemleri uygulanarak farklı yükler altında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Liang ve arkadaşları 900°C'de tavlama ve su verme işlemi yapılmış numunelerde diğer numunelere kıyasla aşınma direncinin arttığı ve sürtünme direncinin düştüğünü bildirmiştir. Bu çalışmada uygulanan yük miktarının artması ile plastik deformasyon etkisi arttığından temas gerilmesinin spesifik aşınma oranı değeri üzerinde önemli etkisi olduğunu vurgulamışlardır (Liang vd., 2018). Bu çalışmanın sonucuna göre sağlıklı bir aşınma testi gerçekleştirmek için numunelerin uygun yük altında test edilmesinin numunenin aşınma direncinin saptanmasında önemli olduğu vurgulanmıştır. Ganesh ve arkadaşları Ti6Al4V alaşımına farklı koşullarda yaşlandırma işlemi uygulamış ve bu numuneleri pin on disk düzeneğinde test etmişlerdir. Bu çalışmada tüm numuneler için çözeltiye alma işlemi 950°C'de 1 saat uygulanmış soğutma ortamları fırın, hava ve su olmak üzere farklılaştırılmıştır, yaşlandırma işlemi ise 550°C'de 3 saat gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucuna göre yaşlandırma işlemi aşınma direncini artırırken çözeltiye alma işleminde soğutma hızının artmasının aşınma direncinin artırılmasında etkili olduğu, numuneler arasında suda çözeltiye alma işlemi uygulanan numunenin aşınma direncinin en yüksek olduğu raporlanmıştır (Ganesh, 2012). Titanyum alaşımlarının aşınma direncini iyileştirmek için ısı işlemlerin kullanıldığı çalışmaların yanında yüzey özelliklerinin ve kimyasının değiştirilerek aşınma davranışlarını iyileştirmeyi amaçlayan pek çok çalışma da mevcuttur (Huang vd., 2013; Park vd., 2007; Wu ve Wu, 1997). Malzemenin tümüne ısı işlem uygulanması yerine yalnızca yüzeyine ısı işlem uygulayarak aşınma direncini artırmaya yönelik çalışmalar da mevcuttur. Zieliński ve

arkadaşları kriyojenik koşullar altında Ti6Al4V alaşımını lazer ışını etkisi ile işleme tabii tutmuştur (laser remelting). Yeniden ergitme işleminde ısı kaynağı olarak CO₂ lazer kullanılmıştır. Çalışmanın amacı bu yöntemle elde edilen yüzeyin biyomalzeme olarak kullanılan titanyum alaşımlarının aşınma ve korozyon ortamdaki performansı için uygun olup olmadığının belirlenmesidir. Karbondioksit lazeri ile sürekli şekilde uygulanan işlem 3 ve 6 kW güç ve 0,5 ve 1 m/s tarama hızında yapılmıştır. Mikroyapı, yüzey topoğrafyası, sertlik, mikro sertlik, lineer aşınma oranı ve aşınma ile kaybedilen ağırlık miktarları belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları yer yer yüzey çatlakları görülse de vücut sıvısı benzeri sıvı ile yapılan tribolojik özelliklerin testlerinin sonucuna göre bu işlemin tribolojik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiği rapor edilmiştir (Zieliński vd., 2011).

Titanyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemlerin mekanik özelliklere olan etkisine bakıldığında ise ısı işlemin yapıdaki α/β faz oranını, şeklini ve dağılımını etkilediği için mekanik özellikleri de önemli ölçüde etkilediği söylenebilir. Gu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kriyojenik işlemin Ti6Al4V alaşımının oda sıcaklığında ve statik koşullarda plastik özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada bir grup malzeme 12 saat derin kriyojenik işleme tabii tutulmuş diğer bir grup bu işleme ilave olarak 180°C de 3 saat temperlenmiştir. Bu çalışmada β fazının kriyojenik işlemle α fazına ve kararlı β fazına dönüştüğü raporlanmış ve bu bulgu SEM görüntülerine dayandırılmıştır. Bu çalışmaya göre kriyojenik işlem malzemenin akma ve çekme mukavemetini yaklaşık 25 MPa azaltmakta buna karşın uzama miktarını %10,6 ve kesit daralmasını %13,5 artırmaktadır (Gu vd., 2014). Yapılan bir diğer çalışmada ise kriyojenik işlem ile yaşlandırma işleminin Ti6Al4V malzeme üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada çekme testi ve mikroyapı analizi yapılmıştır. Deney grupları farklı yaşlandırma prosesleri kriyojenik işlem prosesleri ve bunların bir arada uygulanması ile tasarlanan süreçleri içermektedir. Bu çalışmada yaşlandırma öncesi çözeltili alma işlemi uygulanmamıştır. Kriyojenik işlemin tek başına ve yaşlandırma ile birlikte uygulandığı durumda da plastik şekil alma kabiliyetini iyileştirildiği rapor edilmiştir. Bu testlere göre yapılan işlemlerin mikrosertliğe etkisi saptanamamıştır. Meydana gelen değişim yarı kararlı β fazının kararlı β fazına ve α fazına dönüştüğü ortaya koymaktadır. Geçirimli elektron mikroskopu (TEM) analizlerine göre kriyojenik işlemin dislokasyon ağını etkilediği özellikle kriyojenik işlemi takip eden yaşlandırma işleminde dislokasyon yoğunluğunun arttığı ve mikroyapıda ikiz oluşumuna neden olduğu belirtilmiştir (Gu vd., 2013).

Titanyum alaşımlarının başlıca kullanım alanlarından birisi de biyomedikal uygulamalarıdır. Biyomedikal alanda kullanılmadan önce titanyum alaşımlarına pek çok farklı amaç için pek çok farklı yüzey özelliklerini geliştirme yöntemi uygulanır. Uygulan yüzey modifikasyon yöntemleri Liu vd., 2004, tarafından derlenmiştir kullanılan yöntemlerden bazıları: Mekanik yöntemler (Talaşlı imalat, Taşlama, Parlatma, Kuşlama), kimyasal yöntemler (Kimyasal işlem, Asidik işlem, Alkalin işlem, Hidrojen peroksitle işlem, Sol-gel kaplama, Anodik oksidasyon), CVD ve PVD kaplamalar, Termal yöntemlerle kaplamalar, Ion implantasyonu olarak sayılabilir (Liu vd., 2004). Bu yöntemler bazı özel uygulamalarda tercih edilmekle birlikte genellikle sundukları avantajlarının yanında dezavantajları da mevcut olduğundan parametreleri dikkatli ele alarak uygulanması gereklidir.

Titanyum alaşımlarının araştırılmaya ve geliştirilmeye ihtiyaç duyulan bir özelliği de imal edilebilirlikleridir. İmal edilebilirlik kavramı farklı ürünler için farklı anlamlara gelebilmektedir. İmal edilebilirlik, bir ürünün üretilmesi için ihtiyaç duyulan enerji, sarf malzeme ve zaman ihtiyacı olarak ifade edilebilir. İmal edilebilirlik kavramı; plastik şekil verme, talaşlı imalat ile işleme, aşındırıcılar ile şekillendirme, kimyasal frezeleme, elektro erozyon gibi kimyasal ya da elektrokimyasal işlemlerle şekillendirilme gibi pek çok farklı imalat yöntemi için kullanılabilir. Yukarıda bahsedilen yöntemlerin malzemelere şekil verebilmek için kullandıkları mekanizmalar ve bu mekanizmalara karşı malzemelerin gösterdiği reaksiyonlar farklı olmaktadır. İmal edilebilirlik ile ilgili genel yaklaşım görece imalatı kolay olan bir malzemeyi referans kabul ederek bir başka durum için imal edilebilme potansiyelinin izafi olarak ifade edilmesi şeklindedir. Titanyum alaşımlarının düşük termal iletkenlik katsayıları, düşük elastisite modülü, yüksek sıcaklıklarda sertliklerini korumaları ve yüksek kimyasal reaktiflikleriyle yüzeylerinde oksit formu oluşturmaları imal edilebilirliklerinin zor kabul edilmesinin temel nedenleridir (Veiga vd., 2013). Titanyum alaşımlarının türlerine göre imal edilebilirlikleri ile ilgili çalışmalar incelendiğinde genel yaklaşımın α titanyum alaşımlarından $\alpha+\beta$ ve β titanyum alaşımlarına doğru gidildikçe imal edilebilirliğin azaldığı yönündedir (Pramanik, 2014). Malzemelerin ısı işlem etkisi ile imal edilebilirlikleri artırılabilir ancak bunun için kullanılan işlemler malzemelerin mekanik özelliklerini kötüleştirdiği için genellikle nihai ürün haline gelmeden uygulanması tavsiye edilmektedir. Titanyum alaşımlarına mukavemet kazandırmak için uygulanan yaşlandırma işlemi de beklendiği üzere imal edilebilirliği kötüleştirmektedir (Khanna vd.,

2012). Titanyum alaşımlarının talaşlı imalatında artan kesme hızları ile imal edilebilirliklerinin iyileştiğini belirten çalışmalar mevcuttur. Buna karşın reaktif yapısı nedeniyle yanma tehlikesi bulunması da kullanılabilir kesme hızını kısıtlamaktadır. Rahman ve arkadaşları β titanyum alaşımına çözeltiliye alma ve çözeltiliye alıp yaşlandırma işlemi uygulamış daha sonra imal edilebilirliklerini talaşlı imalat yöntemi ile belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmada sertlikteki artışın imal edilebilirliği zorlaştıracak kabulünün belirli ölçüde titanyum alaşımları için geçerli olduğu belirtilmiştir. Buna karşın artan süneklik değerinin de talaş ile kesici uç arasında ilave bir sürtünmeye yol açarak da imal edilebilirliği etkilediğini ve farklı kesme koşullarında imal edilebilirlik anlamında farklı neticelerin gözlemlendiğini belirtmişlerdir (Rashid vd., 2011).

Titanyum alaşımlarının kriyojenik işlemin etkisi ile imal edilebilirliği ile ilgili çalışmalar incelendiğinde bu çalışmaların elektro erozyon yöntemi üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Rupinder Singh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ticari olarak saf titanyum (Titan 15) ASTM Gr.2 malzeme -80°C de yaklaşık 20 saat kadar kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Bu işlemin sonucunda malzemenin işlenebilirliği EDM (Electro Discharge Machining) yöntemi ile belirlenmiştir. Taguchi metodu ile deney tasarımı gerçekleştirilmiş ve çıktı olarak talaş kaldırma oranı (MRR), takım aşınma oranı (TWR), yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk ele alınmıştır. Kriyojenik işlem ile bu parametrelerde sırası ile %60,39, %58,77, %7,99 ve %80,00 iyileşme elde edilmiştir (Rupinder Singh & Singh, 2011). Gill ve arkadaşları bir diğer çalışmada Ti6246 malzemeye -196°C de 24 saat kriyojenik işlem uygulamıştır. Bu uygulamadan sonra EDD (Elektro erozyon ile delik delme) işlemi uygulanmıştır. Delik delme uygulamasında bakır elektrotlar ile 10 mm'lik kör delikler açılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucuna göre malzemelere kriyojenik işlem uygulanması ile malzeme kaldırma oranı (MRR) iyileşmiş, faydalı aşınma oranı (Malzeme aşınma oranı/takım aşınma oranı) ve takım aşınma oranı (TWR) artmıştır. Derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerde açılan deliklerdeki ölçü ve konum toleranslarının iyileştiği de belirtilmiştir (Gill ve Singh, 2010). Jatti ve arkadaşları da şekil hafızalı NiTi alaşımını -185°C de 24 saat kriyojenik işleme tabi tutmuştur. Yapılan çalışmada ayrıca NiTi alaşımının elektriksel iletkenlik değerlerine bakılmış ve işlemin alaşımın elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde artırdığı deneysel olarak raporlanmıştır. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre talaş kaldırma oranı yaklaşık %19 artış göstermiştir (Jatti ve Singh, 2014). Şekil hafızalı alaşımlar ile ilgili yapılan bir diğer çalışmada NiTi alaşımları kriyojenik

koşullar altında 3 saat kadar tutulmuş ve daha sonra mikrosertlik ve faz analizi yapılmıştır. Yapılan çalışma, uygulanan kriyojenik işlem ile mikrosertliğin arttığını ancak faz değişimi ile ilgili net değişim görülemediğini ortaya koymuştur (Kim vd., 2005). Bu çalışmaların yanında Kumar ve arkadaşları farklı işlem parametreleri kullanarak kriyojenik işlem uygulanmış Ti5Al2.5Sn alaşımına elektro erozyon işleminin etkisini incelemiştir. Alfa alaşımı olan bu malzeme test grubu, 24 saat boyunca bir grup numune -110°C da sığ kriyojenik işleme tabii tutulmuş, diğer bir grup ise 24 saat -184°C 'de derin kriyojenik işleme tabii tutulmuştur. Sonuçlar; işleme performansı, talaş kaldırma oranı, mikrosertlik, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmaya göre hem derin hem de sığ kriyojenik işlem görmüş numuneler işlem görmemiş numunelere göre önemli ölçüde performans artışı sağlamıştır. Farklı Edm işlem parametreleri işlemin etkisi üzerine farklı sonuçlar ortaya çıkarmıştır (Kumar vd., 2016). Bu çalışmadaki sonuçlara göre kriyojenik işlemin etkisi görece agresif işleme koşulları altında daha da ön plana çıkmaktadır. Görece ılımlı parametreler ile yapılan denemelerde ise bu fark daha az olarak raporlanmıştır (Kumar vd., 2016). Literatürdeki çalışmalar ışığında titanyum alaşımlarında imal edilebilirliği zorlaştıran düşük termal iletkenlik, sürtünme ve yapışma eğilimi, düzensiz içyapı, yapıdaki artık gerilme miktarı, gibi etmenlerin kontrol altına alınarak imal edilebilirliğin iyileştirilmesinin mümkün olduğu kanaati oluşmuştur.

Titanyum alaşımlarının kimya ve gıda sektörlerinde bu denli yaygın kullanılmasının nedeni hiç şüphesiz sahip oldukları üstün korozyon dayanımlarıdır. Korozyon davranışı malzemenin içinde bulunacağı ortamın türü, sıcaklığı, maruz kalma süresi, bu koşul altında maruz kalacağı gerilme miktarı gibi etmenlerden etkilenmektedir. Gurrappa yaptığı çalışmada Ti6Al4V alaşımının üç farklı ortamdaki korozyon karakteristiklerini ortaya koymayı amaçlamıştır. Bu ortamlar farklı sıcaklıklarda, titanyum alaşımlarının yaygın kullanıldığı kimyasal işlem tankları, deniz koşulları ve endüstriyel ortamları benzetecek şekilde tasarlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda göre titanyum alaşımları düşük ve yüksek sıcaklıklarda bahsi geçen farklı ortamlarda koruyucu bir oksit tabakası oluşturmayı başarmıştır. Çukurcuk ve çatlak korozyonu, çalışılan ortamlardan yalnızca endüstriyel koşullarda korozyona uğrama eğilimi göstermiştir. Bu koşul altında da korozyona yol açan temel mekanizmanın kimyasal olarak indirgeme ve degradasyon olduğu belirtilmiştir (Gurrappa, 2003). Malzemelerin korozyon davranışlarını iyileştirmek için yüzey modifikasyonları yapılması ve yüzeye kaplama uygulanması da yaygın olarak izlenen

metotlardandır. Singh ve arkadaşları titanyum malzeme yüzeyine, lazer kaynağı kullanarak ısıtma işlemi (LSM) uygulamıştır. Yüzeyde oluşturulan tabakanın pasivasyon için gerekli olan akımı düşürdüğü, yüzey sertliğini ve aşınma direncini artırdığı raporlanmıştır. Çalışmada yüzeyde $\alpha+\beta$ fazının uygulanan enerjinin etkisiyle asiküler α fazına dönüştüğü bildirilmiştir ve bu etki ile korozyon davranışının iyileştiği raporlanmıştır (Singh vd., 2006). Titanyum alaşımlarına kriyojenik işlemin korozyon davranışına olan etkilerinin incelenmesi ile ilgili çalışmalar ise oldukça sınırlıdır. K.X Gu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımına 24 ve 48 saat derin kriyojenik işlem uygulamışlardır. Bu numuneler, işlem görmemiş numunelerle beraber korozyon testine tabii tutulmuştur. Korozyon testinde vücut sıvısını temsil etmesi amacıyla “Hank” sıvısı kullanılmıştır. Elektrokimyasal ve korozyon davranışlarını karakterize etmek için polarizasyon ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) test yöntemleri tercih edilmiştir. Test sonucunda elde edilen korozyon yüzeyleri Atomik kuvvet mikroskobu ile incelenmiştir. Bu çalışma sonucuna göre derin kriyojenik işlem uygulanan Ti6Al4V alaşımında korozyon potansiyelleri (Ecorr) pozitif yönde kaymıştır. Korozyon akım yoğunluğu (icorr) değerlerinde de 153,1 nAcm⁻² değerinden 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanmış numunede 86,3 nAcm⁻² ye 48 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numunede ise 43,3 nAcm⁻²’ye düştüğü raporlanmıştır. Bunun yanında korozyona uğrayan yüzeylerin pürüzlülükleri AFM ile incelendiğinde derin kriyojenik işlemin daha düzgün yüzey bıraktığı gözlenmiştir. Bu çalışmada raporlanan deney sonuçlarına göre kriyojenik işlem Ti6Al4V alaşımında hank sıvısı altındaki korozyon mekanizmasını değiştirmemiş ancak korozyona karşı direncini artırmıştır. Yazarlar bu iyileşmeyi sağlayan etmenleri ise β faz oranının azalmasına, dislokasyon yoğunluğunun düzenlenmesine ve yapıdaki kalıntı gerilme miktarının azalmasına bağlamışlardır (Gu vd., 2018).

Literatürde kriyojenik işlem ve titanyum ile ilgili yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde bu çalışmaların titanyum alaşımlarının kriyojenik koşullar altında aşınma testleri ve (Basu vd., 2009 ; El-Tayeb vd., 2010a ; Hübner vd.,1998; Bozet, 1993; El-Tayeb vd., 2010b) kriyojenik unsurlarla (sıvı azot, kuru buz) imalat işlemleri üzerine odaklandığı gözlenmiştir (Caudill vd., 2014 ; Venugopal vd., 2007 ; Venugopal vd., 2007 ; Birmingham vd., 2011; Hong ve Ding, 2001; Sun vd., 2010).

4. TİTANYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER VE KRIYOJENİK İŞLEM

Farklı türdeki titanyum alaşımlarına farklı özellikler kazandırmak için geleneksel olarak uygulanan ısıtım işlemleri mevcuttur. Titanyum alaşımlarında ısıtım işlemi genellikle $\alpha+\beta$ ve β titanyum alaşımlarına uygulanmaktadır. Isıtım işlemde temel amaç $\alpha\rightarrow\beta$, $\beta\rightarrow\alpha$ faz dönüşümü ile malzemede istenilen özellikleri elde etmektir. Tavlınmış haldeki titanyum alaşımlarında dayanım, alaşım elementi miktarı ile artmaktadır. Titanyum alaşımlarına su verilmesi ile martenzitik dönüşüm meydana gelir ve su verme işlemi alaşımın beta dönüşüm sıcaklığına ısıtılması ya da alfa beta aralığına ısıtılması ile yapılabilir. Düşük alaşımlı titanyum malzemeler için beta dönüşüm sıcaklığının üzerine ısıtılan malzemenin hızlı soğutulması ile maksimum dayanım elde edilebilirken yüksek alaşımlı titanyum alaşımlarında ise beta dönüşüm bölgesinden su verildiğinde dayanım istenen ölçüde artmamaktadır. İstenen dayanım için su verme işlemi takiben yaşlandırma işlemi yapılarak maksimum dayanım elde edilmektedir.

4.1. Titanyum alaşımlarına uygulanan geleneksel ısıtım işlemleri

Titanyum alaşımlarına ısıtım işlemi uygulanması için geliştirilen yöntemler demir esaslı alaşımlara uygulanan yöntemlere göre biraz daha karmaşık yapıdadır. Titanyum alaşımlarının kimyasal olarak reaktif olmaları, uygulanan ısıtım sürecinin kontrollü olmasını gerektirmektedir. Havada bulunan oksijen, su buharı, karbon dioksit ve sudan ayrılan hidrojen titanyum ile reaksiyona girmektedir. Bu nedenle titanyum alaşımlarına vakum altında ya da soy gaz ortamında ısıtım işlemi yapılması önerilir. Atmosferik fırınlarda ısıtım işlemi yapılması durumunda; oksijen ile titanyum reaksiyona girmekte ve parça yüzeyinde oksijen zengin ve gevrek bir oksit tabakası oluşmaktadır. Bu tabakanın ürün kullanılmadan önce mutlaka temizlenmesi gereklidir (ASM International, 2007). Titanyumun oksijen ile reaksiyona girmesinden daha tehlikeli olan durum ise hidrojen ile reaksiyona girmesidir. Hidrojenin belirli miktarda üzerinde yapıda yer alması halinde yapının gevrekleşmesi ve bu durumun sonucu olarak malzemenin çentik darbe dayanımının düşmesi söz konusu olmaktadır (ASM International, 2007).

Titanyum alaşımlarına yapılan ısı işlem doğrulanması ise yapılan ısı işlemin istenen etkiyi sağlayıp sağlamadığının kontrolü için gereklidir. Metallerde ısı işlem doğrulanması ile ilgili genel yaklaşım, işlem görmüş numuneden sertlik ölçümü almak ve sertliğin istenen aralıkta olduğu durumda, işlemin başarılı olduğunu kabul etmektir. Ancak titanyum alaşımlarında sertlik değişimleri ısı işlemlerin doğrulanması için yeterli değildir. Bunun yerine biraz daha zahmetli olan mekanik özellik testleri (Çekme, kırılma tokluğu) ve metalografik analizlere başvurulur. Bu işlemler asıl malzemeye tahribatlı olarak yapılabileceği gibi malzeme ile birlikte aynı işlemleri gören bir kupon kullanarak da gerçekleştirilebilir (ASM International, 2007).

Titanyum alaşımlarına aşağıdaki özellikleri elde etmek için ısı işlemler uygulanabilir (ASM Handbook Committee & ASM International, 1978):

- Üretim sırasında yapıda biriken kalıntı gerilmeleri gidermek,
- Yapıda istenen özelliklerin (Süneklik, talaşlı imalatla işlenebilirlik boyutsal ve yapısal kararlılık) sağlanması için yumuşatma tavlama,
- Dayanımın artırılması için çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemi,
- Özel uygulamalarda belirli özelliklerin (Kırılma tokluğu, yorulma dayanımı, sürünme dayanımı v.b.) iyileştirilmesi için uygulanan ısı işlemler.

Bahsedilen ısı işlemlerin tüm titanyum alaşımlarına uygulanabilmesi mümkün değildir. Alfa ve alfaya yakın titanyum alaşımlarına gerilme gidermesi ya da yumuşatma tavlama yapılabilir ancak bu alaşımlarda yüksek dayanım ısı işlem ile sağlanamaz. Beta alaşımları ise yapılarında yarı kararlı β fazı barındırır, bu faz yaşlandırma yöntemi ile dayanım artışı sağlayabilmektedir. Yaşlandırma işleminde β fazı yapıda çözünür. Beta alaşımlarında yaşlandırma yöntemi ile β fazı kararlı hale getirilebilir, yaşlandırma işlemi çözeltiye alma ve yumuşatma tavlamaları kullanılarak istenilen dayanım-süneklik özellikleri elde edilebilir. β fazı miktarının fazla olması kalın kesitlerde de bu etkilerin elde edilebilmesini sağlar. Alfa beta alaşımları ise ısı işlem uygulanabilmesi konusunda alfa ve beta alaşımlarının arasında yer alır β alaşımlarında olduğu gibi kararsız β fazı çözünerek yaşlandırma yöntemi ile dayanım artışı sağlanabilir. Sağlanan etki yapıda daha az β fazı olduğu için beta alaşımlarına göre kısıtlıdır.

4.1.1. Gerilme giderme

Titanyum alaşımlarına uygulanan gerilme giderme tavlamaının dayanımı ya da sünekliği düşürme gibi olumsuz bir etkisi yoktur. Gerilme giderme tavlamaı ile; sıcak dövme işlemleri sırasında düzensiz kuvvet uygulanması, soğuk halde yapılan düzeltme, şekil verme işlemleri, soğuma sırasında meydana gelen ve dengesiz talaşlı imalat gibi etkilerden kalan kalıntı gerilmelerin giderilmesi amaçlanır. Yapıdaki kalıntı gerilmelerin giderilmesi, boyutsal kararlılığın korunması ve beklenmeyen dayanım düşüşlerini önlemek bakımından önemlidir.

Gerilme giderme işlemleri, uygulanacak malzemeye göre, belirlenen sıcaklıkta belirli bir süre parçanın bekletilmesi ve takiben kontrollü olarak soğutulması adımlarından oluşur. İşlem sıcaklığı malzemenin dayanımının belirli oranda düşmesi ve gerilme gidermenin meydana gelebileceği kadar yüksek, istenmeyen fazların çökmesini deformasyon yaşanması ya da istenmeyen yeniden kristalleşme olmayacak kadar da düşük seçilmelidir. Kinetik olarak bakıldığında genellikle sıcaklık ve zaman etkisi birlikte düşünölmelidir. Soğumanın düzenli olması önemlidir. Gerilme giderme tavlamaında 480°C-315°C sıcaklık bandına kadar olan soğutma işlemleri havada ya da fırında yapılmalıdır suda ya da yağda soğutma kullanılmamalıdır (ASM Handbook Committee ve ASM International, 1978).

4.1.2. Yumuşatma (Annealing) tavlamaı

Titanyum alaşımlarının yumuşatma tavlamaı uygulanması oda sıcaklığında kırılma tokluğunda ve süneklikte iyileşme sağlar, boyutsal kararlılık, termal kararlılığı ve sürünme dayanımını iyileştirir. Piyasaya sürölen pek çok titanyum alaşımı yumuşatma tavlamaı yapılmış olarak satılır. Pek çok durumda yapılan özel ısıl işlemler bir özelliği iyileştirirken bir başka özelliği olumsuz etkileyebilmektedir. Titanyum alaşımlarına uygulanan farklı yumuşatma tavlamaaları da vardır. Yaygın olarak kullanılanlardan bazıları Çizelge 4.1'de verilmiştir (ASM International, 2007):

- Mil yumuşatma tavlamaı
- İkincil yumuşatma tavlamaı
- Üçlü yumuşatma tavlamaı

- Yeniden kristalleştirme yumuşatma tavlaması
- Beta bölgesi yumuşatma tavlaması

Mill tavlaması genel amaçlı bir işlemdir silindirik formdaki parçalara uygulanır. Tam olarak yumuşatma tavlaması değildir içyapıya bakıldığında soğuk ya da sıcak işlem izlerini gözlemlemek mümkündür. İkili, üçlü ve beta yumuşatma tavisine fazların şekillerini ve dağılımlarını etkiler. Bu işlem ile sürünme dayanımı ve kırılma tokluğu değerleri iyileştirilmektedir. Yeniden kristalleştirme tavlaması ve beta yumuşatma tavlamasının amacı kırılma tokluğunu iyileştirmektir. Beta yumuşatma tavlaması beta geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılmaktadır.

Çizelge 4.1. Titanyum Alaşımlarına uygulanan geleneksel ısı işlemler (ASM International, Davis, & ASM International, 2007)

Isıl işlem Adı	Isıl işlem Çevrimi	Mikroyapı
İkincil Yumuşatma tavlaması	T_{β} dönüşüm sıcaklığının 50-75°C altında çözeltiliye alma, havada soğutma ve 540-675°C arasında 2-8 saat yaşlandırma	Primer α + Widmanstaten α + β faz bölgeleri
Çözeltiliye Alma ve Yaşlandırma	T_{β} dönüşüm sıcaklığının 40°C altında çözeltiliye alma, su verme ve 540-675°C arasında 2-8 saat yaşlandırma	Primer α + temperlenmiş α' veya α + β karışımı
Beta bölgesi yumuşatma tavlaması	T_{β} dönüşüm sıcaklığının 15°C üstünde çözeltiliye alma, havada soğutma ve 650-760°C arasında 2 saat stabilizasyon tavlaması	Widmanstaten α + β faz koloni mikroyapısı
Beta bölgesinden su verme	T_{β} dönüşüm sıcaklığının 15°C üstünde çözeltiliye alma, havada soğutma ve 650-760°C arasında 2 saat stabilizasyon tavlaması	Temperlenmiş α'
Yeniden kristalleştirme yumuşatma tavlaması	925°C de 4 saat ısıtma, 50°C/saat soğutma hızıyla 760°C'ye kontrollü soğutma, havada oda sıcaklığına soğutma	Eş eksenli α fazı tane sınırlarında β fazı
Mill Yumuşatma Tavlaması	α + β faz bölgesinde termomekanik işlem sonrasında ise 705°C de 30 dakikadan az olmamak kaydıyla uzun süre tavlama ve havada oda sıcaklığına soğutma dakika tavlama	Yeniden kristalleşmesi tamamlanmamış α fazı ve düşük hacim yoğunluğunda β fazı

Titanyum parçalarda bazı durumlarda düzeltme ölçüye getirme gibi işlemler yumuşatma tavlaması ile birlikte yapılmaktadır. Bu işlemlerin temel amacı istenen boyutsal ölçüleri yakalamaktır. Oda sıcaklığında titanyum malzemelere düzeltme işlemi yapmak çok kolay değildir. Elastik yaylanma etkisi oldukça baskındır. Bu nedenle yumuşatma tav sıcaklığı pek çok titanyum alaşımı için sürünme direncinin düşük olduğu bir sıcaklıktır. Bu durum doğrultma, düzeltme işlemlerinin bu sıcaklıklarda yapılmasını mümkün kılar. Bu işlem bazen parça üzerine ağırlık koyarak bazen de uygun sabitleme teknikleri kullanılarak parçanın istenen formda sıkılması ile gerçekleştirilir. Uygulamanın 540°C - 650°C bandında yapılması durumunda malzemenin sürünme direnci belirli ölçüde korunduğu için istenen doğrultmanın elde edilmesi için gereken işlem uzun sürmektedir (ASM International, 2007).

Stabilizasyon tavlaması $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarında termal kararlılık doğrudan β fazının dönüşümü ile ilgilidir. Tav sıcaklığından soğutma sırasında β fazı belirli koşullar altında kırılğan ω fazına dönüşebilir. Bu tavlamanın amacı β fazını kararlı hale getirerek yüksek sıcaklıklarda özellikle servis koşullarında faz dengesinin korunmasını sağlamaktır. Ti6Al4V gibi $\alpha+\beta$ alaşımları nispeten az miktarda β fazı içerir. Bu alaşım tav sıcaklığından havada soğutma ile özelliklerinde bozulma olmadan soğutulabilir. Ti6Al4V alaşımının fırında soğutulması ise metaaller arası Ti_3Al oluşumuna yol açabilir ki, bu yapı da gerilme korozyonuna karşı dayanımı düşürmektedir. Tavlama sırasında belirli soğutma hızında tav sıcaklığından 540°C ye kontrollü soğutma (56°C/saat) ile dayanımda küçük artışlar (34 MPa'a kadar) elde edilebilmektedir.

4.1.3. Çözeltiye alma ve yaşlandırma

Yaşlandırma işlemi çökelti ile sertleştirilebilen malzemelerde yaygın olarak kullanılan bir dayanım artırma yöntemidir. Yaşlandırma işlemindeki ilk aşama çözeltiye alma işlemidir bu adımda yapıdaki ara faz ana matris içerisinde çözünür, çözülmüş halden eğer yavaş soğutulursa tekrar yapıda dağılır ve bir araya gelerek ara fazlar oluşturabilir. Bu durumun önüne geçmek için hızlı soğutma ile çözeltiye alınmış çökelti yapıda hapsedilir ve aşırı doymuş katı çözelti yapısı elde edilir. Bu aşamadan sonra yaşlandırma aşamasına geçilir yaşlandırma oda sıcaklığında ya da çalışma sıcaklığında doğal olarak ya da yüksek sıcaklıklarda yapay olarak yapılabilir. Yaşlandırma aşamasında çökelti içyapıda yayınarak metaller arası partiküller oluştururlar. Zaman ve sıcaklığın etkisi ile bu partiküller

büyümeye başlarlar ve belirli bir boyuta ulaştıklarında güçlendirici yapı etkisi ile yapıda maksimum dayanımı sağlarlar. Bu aşamada yaşlandırma işlemine son verilmezse dayanım azalmaya başlar ve aşırı yaşlanmış yapı ortaya çıkabilir. Çözeltiye alma ve yaşlandırma uygulanan malzemelere örnek olarak 2000, 6000 ve 7000 serisi alüminyum alaşımları, nikel esaslı alaşımlar ve paslanmaz çelikler verilebilir (Callister vd., 2014).

Çözeltiye alma ve yaşlandırma yöntemleri kullanılarak $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarında geniş bir dayanım bandında farklı ürünler elde edilebilir. Bu alaşımların ısı işlemi ile özelliklerinin değiştirilebilmesini sağlayan temel etki yüksek sıcaklıklarda oluşan β fazının daha düşük sıcaklıklarda kararsız davranmasıdır. $\alpha+\beta$ alaşımını çözeltiye alma sıcaklığına ısıtmak β fazının oranının artmasını sağlar. Soğutma ile oluşan yapı α fazı, β fazı ve martenzitik α' fazına dönüşür. Bu işlemi takip eden yaşlandırma işlemi ile kararsız haldeki martenzitik α' ve düşük miktarlardaki artık β fazı yapıda çözünür, bu durumun sonucu olarak yapıda yüksek dayanım elde edilir. Yüksek dayanımı belirli bir süneklik değerini koruyarak elde edebilmek için çözeltiye alma işlemi beta dönüşüm sıcaklığının 30-80 °C altında gerçekleştirmek gereklidir. Eğer yüksek kırılma tokluğunun ya da gerilme korozyon direncinin artırılmasının sağlanması amaçlanıyorsa β faz bölgesinde tavlama ya da β çözeltiye alma işlemi tercih edilir. Çözeltiye alma sıcaklığında meydana gelecek değişiklik β fazı miktarını ve sonuç olarak yaşlandırma işleminin sonucunu etkilemektedir. Çözeltiye alma sıcaklığı genellikle yaşlandırmadan sonra istenen dayanım ve süneklik miktarı göz önüne alınarak seçilir. Çözeltiye alma işlemi β geçiş sıcaklığının hemen altında yapıldığı için sıcaklığın kontrol edilmesi oldukça kritiktir. Eğer beta dönüşüm sıcaklığı aşırsa çekme özellikleri, özellikle de süneklik azalır ve bu azalma ise telafi edilemez. Bu türdeki bir süneklik azalması istenmemekle birlikte bazı durumlarda kabul edilebilir. Alfaya yakın α ve β alaşımları genellikle β dönüşüm sıcaklığı altında çözeltiye alınır. Bu yöntem ile ısı işlem sonrasında elde edilen süneklik, tokluk ve sürünme dayanımı değerleri optimize edilmiş olur. β alaşımları üreticilerden çözeltiye alınmış, çözeltiye alınıp yaşlandırılmış, dövüldüğü halde ya da yumuşatma tavlama uygulanmış olarak piyasaya sunulabilir. Bu malzemelerin tekrar ısıtılması gerekirse bekletme süreleri tam çözünmenin sağlanabileceği kadar uzun olmalıdır. β alaşımlarında β dönüşüm sıcaklığında ikinci bir faz olmadığı için tane irileşmesinin hızlı bir şekilde gerçekleşme tehlikesi de mevcuttur (ASM International, 2007).

Ti6Al4V'un yaşlandırılması için farklı kaynaklarda farklı işlem adımları önerilmiştir (Lee vd., 2017). Bu kaynaklara göre önerilen parametreler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Genel olarak 1" numune kesit çapı için 900°C üzerinde 1 saat çözeltiliye alma sonrasında oda sıcaklığında suda su verme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemi takiben yaşlandırma işlemi yapılır. Yaşlandırma işleminin 500°C-700°C aralığında sıcaklığa göre belirlenen bir sürede gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Çizelge 4.2. Ti6Al4V yaşlandırma parametreleri

Standart	Aşamalar	Çözeltiliye Alma	Yaşlandırma
AMS-H-81,200 A (AMSH81200D, 2014)	Sıcaklık °C	900-970	480-690
	Süre (Saat)	1	2-8
	Soğutma Hızı	Suda Su Verme	Havada Soğutma
AMS-2801 (AMS2801B, Heat Treatment of Titanium Alloy Parts, 2014)	Sıcaklık °C	954	482-704
	Süre (Saat)	0,25-1	4-9
	Soğutma Hızı	Suda Su Verme	Havada Soğutma
Metal handbook (ASM International, 2007)	Sıcaklık °C	955-970	480-760
	Süre (Saat)	1	2-8
	Soğutma Hızı	Hızlı Soğutma	Havada Soğutma

Yaşlandırma işlemi titanyum alaşımlarında ısıl işlemin son aşamasıdır. İşlem genellikle yaşlandırma sıcaklığına (425 - 650 °C) kontrollü ısıtma ile başlar. Yaşlandırma işleminde beta stabilizatörü içeren $\alpha+\beta$ alaşımında, β fazının ω fazı olarak adlandırılan yarı kararlı faza dönüşme riski vardır. Yapıda kalan artık ω fazı yapıda kırılabilirliğe yol açar, bu fazın yapıda bulunması istenmez. Bu fazın oluşması alaşımın su vermeyi takiben ani olarak 425°C sıcaklığa ısıtılması ile önlenir. Bu yöntemle kaba α taneleri oluşur ancak bu işlem istenen dayanım özelliklerini sağlamayabilir. Bu konudaki tecrübeler yaşlandırma süresi ve sıcaklığının α fazının çökmesini ve ω fazının dönüşmesini sağlama konusunda yeterli olmaktadır. En az 425°C'de yaşlandırma işlemi yapmak kırılabilir ω fazından kurtulmak için genellikle yeterlidir. Yaşlandırma işleminin yumuşatma tav sıcaklığına yakın yapılması ise aşırı yaşlanma ile sonuçlanabilir. Aşırı yaşlanma durumu titanyum alaşımlarda boyutsal kararlılık ve toklukta önemli değişim olmadan mukavemeti az miktarda artıran bir yöntemdir (ASM International, 2007).

4.1.4. Titanyum alaşımlarına uygulanan özel ısıl işlemler

Geleneksel işlemlerin yanında malzemede bazı özellikleri (çentik darbe dayanımı, kırılma tokluğu, yorulma dayanımı) iyileştirmek için özel ısıl işlem metotları geliştirilmiştir. Bu metotlar genel olarak bir özelliği iyileştirirken bir başka özelliğin kötüleşmesine neden olabilmektedir.

- Çözeltili alma ve aşırı yaşlandırma, Ti6Al4V: 955°C'ye 1 saat ısıtılıp su verilmesi, daha sonra 705°C'ye 2 saat kadar ısıtılması sonrasında havada soğutulmaya bırakılması. Tavlama koşullarında elde edilen mukavemeti koruyarak çentik dayanımı, kırılma tokluğu ve sürünme dayanımını iyileştirir.
- Yeniden kristalleştirme tavlaması, Ti6Al4V ya da Ti6Al4V-ELI: 4 saat ya da daha fazla 925°C-955°C sıcaklığa ısıtılır. Fırında ortamında 760°C ye soğutulur buradaki soğutma hızının 56°C/Saat'ten daha hızlı olmaması gerekir. 760°C den 480°C ye en az 370°C/Saat hızla soğutulur. Daha sonra bu sıcaklıktan oda sıcaklığına hava soğutması ile soğutulur. Bu işlemle kırılma tokluğu ve yorulma çatlak ilerlemesi iyileştirilir ancak mukavemet belirli ölçüde azalır. Bu işlem genellikle ELI (Ekstra Low Interstitial) kalite yani düşük empürite içeren kalite alaşıma uygulanır.
- Beta bölgesinde yumuşatma tavlaması, Ti6Al4V, Ti6Al4V-ELI: 5 dakikadan 1 saate kadar 1010°C-1040°C sıcaklığa ısıtılır. Daha sonra en az 85°C/dakika hız ile 650°C ye soğutulur. Daha sonra 730°C-790°C ye ısıtılır 2 saat bu sıcaklıkta tutulur ve havada oda sıcaklığına soğutulur. Bu işleme kırılma tokluğunu, yüksek frekanslı yorulma dayanımını, sürünme dayanımını ve sulu ortam gerilme korozyonuna karşı direnci artırır (ASM International, 2007).

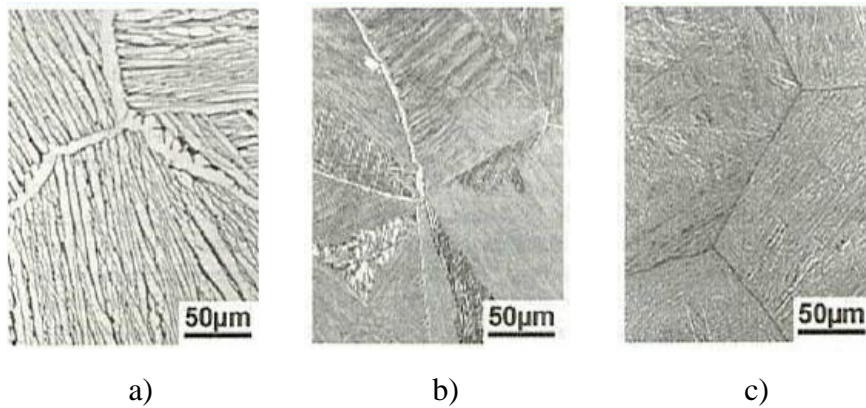
Saf Titanyum ve α titanyum alaşımlarının ısıl işleminde ise β dönüşüm sıcaklığına ısıtıldıktan sonra ve yüksek sıcaklıklarda tavllanması ile Şekil 4.1'deki gibi yapı elde edilir. Isıtılmayı takiben su verme işlemi suda yapılırsa SPH yapıyı hegzagonal martenzitik α' fazı ve kalıntı β fazı elde edilir. Soğutma işlemi havada yapılırsa ise β fazından Windmanstatten α plakaları oluşur (Lütjering ve Williams, 2007).



a) 700°C'de tavllanmış b) β bölgesinden su verilmiş c) β bölgesinden havada soğutulmuş

Şekil 4.1. Alfaya yakın alaşımların ısıl işlemi (Lütjering ve Williams, 2007).

Bu alaşımlarda ısıl işlemden sonuç alınabilmesi için Mo ya da V gibi beta stabilizatörü alaşım elementlerinin alaşımın ısıl işleme cevap verebilmesi için yapıda az da olsa bulunması gerekir. $\alpha + \beta$ faz bölgesine kadar ısıtma işlemi yapılır. Yapıdaki α fazının bir kısmı ısıtmanın etkisi ile β fazına dönüşür. Dönüşen β fazı alaşımın havada soğutulması durumunda Windmanstatten α fazına dönüşür. Soğuma hızı artırılırsa α' fazına dönüşüm gerçekleşir. Yaşlandırma işlemi ise yapıdaki α fazının dağılımını düzenler. Havada soğutma ile elde edilen Windmanstatten yapısı sepet benzeri, parmak izi görünümlü bir yapı sunar. Bu yapıda α fazı, β fazı tarafından örülmüştür. Ti6242 alaşımının farklı soğutma hızlarında elde edilen mikroyapılar Şekil 4.2'de verilmiştir.

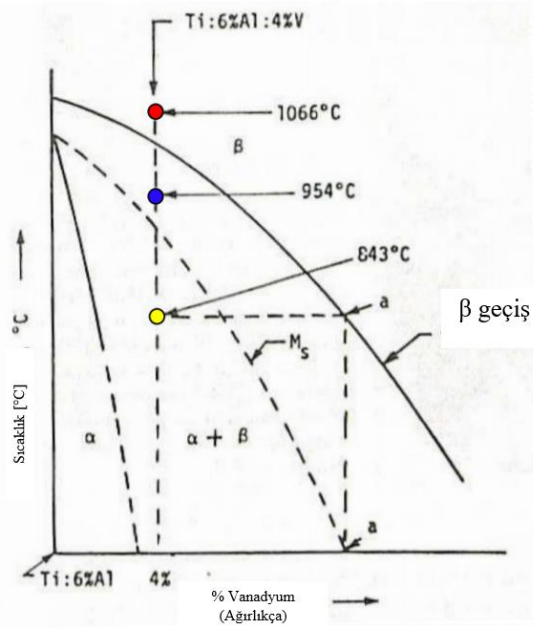


Şekil 4.2. Ti6242 Alaşımı için β fazından farklı soğutma hızlarında elde edilen mikroyapılar a) 1°C/min b) 100°C/min c) 8000°C/min (Lütjering ve Williams, 2007).

$\alpha + \beta$ titanyum alaşımları yapılarında α ve β stabilizatörü alaşım elementlerini bulundurur. α stabilizatörleri yapıya dayanım katarken yapıda bulunan β stabilizatörleri ise

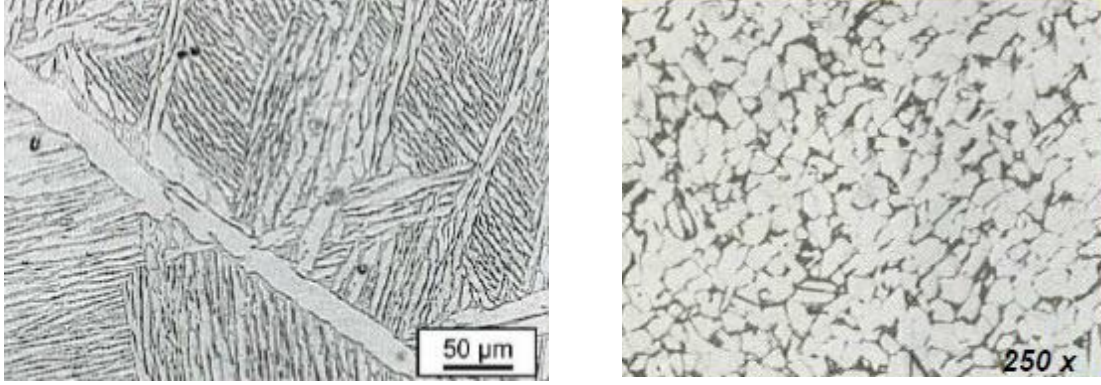
oda sıcaklığında bile β fazının korunmasını sağlar. Bu alaşımların α alaşımlarına kıyasla dayanım ve şekillendirilme kabiliyetleri daha iyidir.

Mikroyapıları kimyasal kompozisyonları, işlem geçmişleri, uygulanan ısıl işlemlere göre değişiklik gösterir. Isıl işleme en elverişli titanyum alaşımları bu gruptadır. Termomekanik işlem yapılarak da özellikleri iyileştirilebilir. $\alpha+\beta$ titanyum alaşımları alüminyum oranı %6 için faz diyagramı Şekil 4.3’de verilmiştir kesikli olarak gösterilen doğru da Ti6Al4V alaşımını temsil etmektedir.



Şekil 4.3. Ti %6Al için farklı Vanadyum oranları Faz diyagramı (Udomphol, 2007).

Titanyum alaşımlarında elde edilecek yapılar tavlama sıcaklığı ile yakından ilgilidir. β fazının olduğu bölgede yapılan tavlama lamelli sepet yapı üretir. Bu yapı Şekil 4.4 (a)'da gösterildiği üzere lameller β ve α fazlarının plakalar halinde yerleştiği durumdadır.

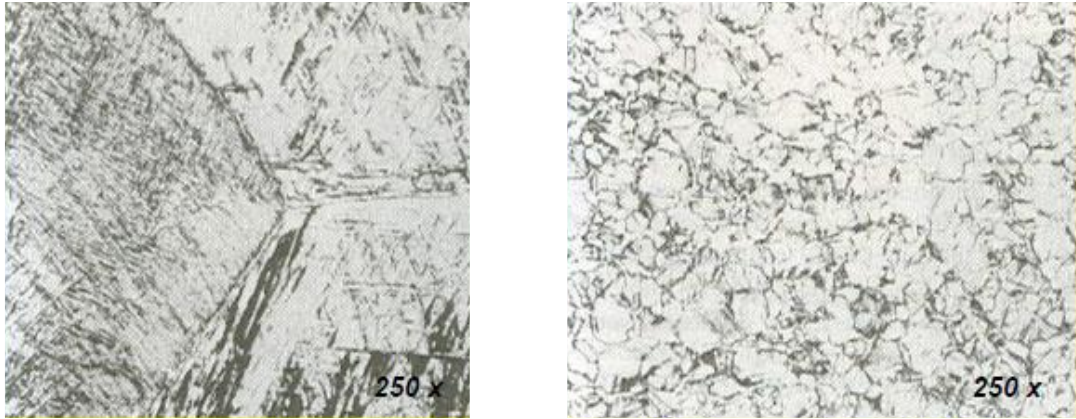


a)

b)

Şekil 4.4. a) β faz bölgesinde tavllanmış Ti6Al4V mikroyapısı b) $\alpha+\beta$ faz bölgesinde tavllanmış Ti6Al4V mikroyapısı (Lütjering ve Williams, 2007).

β faz dönüşüm sıcaklığına kadar ısıtılan malzemede $\alpha+\beta$ bölgesinde yapılan tavlama işleminde lamelli yapı yerine α fazının matriste yer aldığı kalıntı β fazı oluşur (Şekil 4.4) (b). β faz dönüşüm sıcaklığına ısıtılan alaşımın havada soğutması ile β fazının bir kısmı ince iğnesel α fazına dönüşür. Beta sıcaklığına ısıtılan alaşımın havada soğutulması ise dönüşmüş β fazının oluşturduğu matrise dağılan birincil α fazını oluşturur (Şekil 4.5).



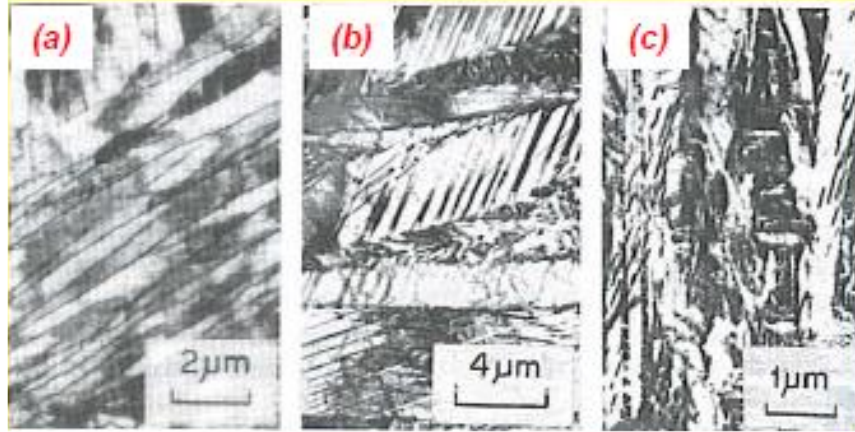
a)

b)

Şekil 4.5. a) β faz bölgesine ısıtılıp havada soğutma ile elde edilen mikroyapı b) $\alpha+\beta$ faz bölgesine ısıtılıp havada soğutma ile elde edilen mikroyapı (Lütjering ve Williams, 2007).

Temel olarak $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarına yapılan ısıtılma işlemlerinde parça β fazı bölgesine ya da $\alpha+\beta$ fazı bölgesine ısıtılır ve bu sıcaklıkta belirli bir süre tutulur. Daha sonra havada ya da suda oda sıcaklığına soğutulur. Eğer yapıda titanyum martenziti oluşmuş ise martenzitin temperlenmesi ile yarı kararlı β fazının ayrıştırılması sağlanır. β fazı bölgesinde alaşıma su verildiğinde soğuma hızı M_s 'i (Martensite start) geçecek kadar hızlı ise yapıda

martenzitik α' yapıları gözlemlenir. Bu yapının temel özelliği SPH ve ikizlenme mekanizmalarının görünür olmasıdır. Bu dönüşüm yapının dayanımını artırır ama çelikteki dönüşüm kadar baskın bir etkisi olmaz. Oluşan martenzitik yapı yaşlandırma ya da temperleme işlemine tabii tutulursa yapıda çözünür ve miktarı azalır. Martenzit malzemenin yapısında α' ve α'' fazı olarak bulunabilir. Bu yapıların geçirimli elektron mikroskopunda alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Isıl işleme tabii tutulan malzemenin $\alpha+\beta$ bölgesinden soğutulması durumunda beta dönüşüm sıcaklığının altında M_s sıcaklığının üstünde kalacak şekilde suda soğutulmasında yapıda birincil α fazı ve β fazından dönüşen martenzitik α' fazı yer alır (Şekil 4.7). M_s sıcaklığını kesmeyecek kadar yavaş suda soğutmada yapıda birincil α fazı ve az miktarda kalıntı ya da dönüşmemiş β fazı görülür.



Şekil 4.6. a) Hekzagonal α' b) Lenticular α' c) Ortorombic α'' (Lütjering & Williams, 2007).



a)

b)

Şekil 4.7. a) Ti6Al4V alaşımı 954°C de çözeltiye alma sonrası su verilmiş, b) 843°C de çözeltiye alınmış su verilmiş (Lütjering ve Williams, 2007)

Martenzitin Temperlenmesi işleminde ise martenzitik yapı ısıtıldığı zaman çözünmeye uğrar. Su vermeyi takiben elde edilen kalıntı β fazı yaşlandırma işlemi ile yapıda çözünür ve mukavemeti artırır. Yarı kararlı β fazı ise dengeli α fazına ancak yüksek yaşlandırma sıcaklıklarında dönüşebilir. Yaşlandırma işleminde su verme sonrası kararsız β fazının izotermal olarak 500°C civarında yaşlandırılmasıyla β fazı yapıya çok ince şekilde yayılır. Bu işlem yaşlandırma ile dayanım artışı sağlar. Kararsız β fazı ancak yüksek sıcaklıklarda yaşlandırılırsa α fazına dönüşebilir, bu durumun nedeni ise HMK yapıdaki β matriste SPH yapıdaki α fazının oluşumunun zor olmasıdır. Yaşlandırma işlemi ile yapıdaki β fazının dönüşümü alaşım elementi düzeyine ve uygulanan sıcaklığa göre görülen faz dönüşümleri denklem Şekil 4.8'te verilmiştir. Eğer alaşımda yeterli β stabilizatör elementi yoksa kırılabilir olan ω fazı oluşumu tehlikesi vardır. Bu fazın yapıda bulunması arzu edilmez. β fazı ayrıca doğrudan ya da dolaylı olarak α fazına dönüşür.

Orta düzeyde alaşım içeriği

100-500°C $\beta \rightarrow \beta + \omega \rightarrow \beta + \alpha$

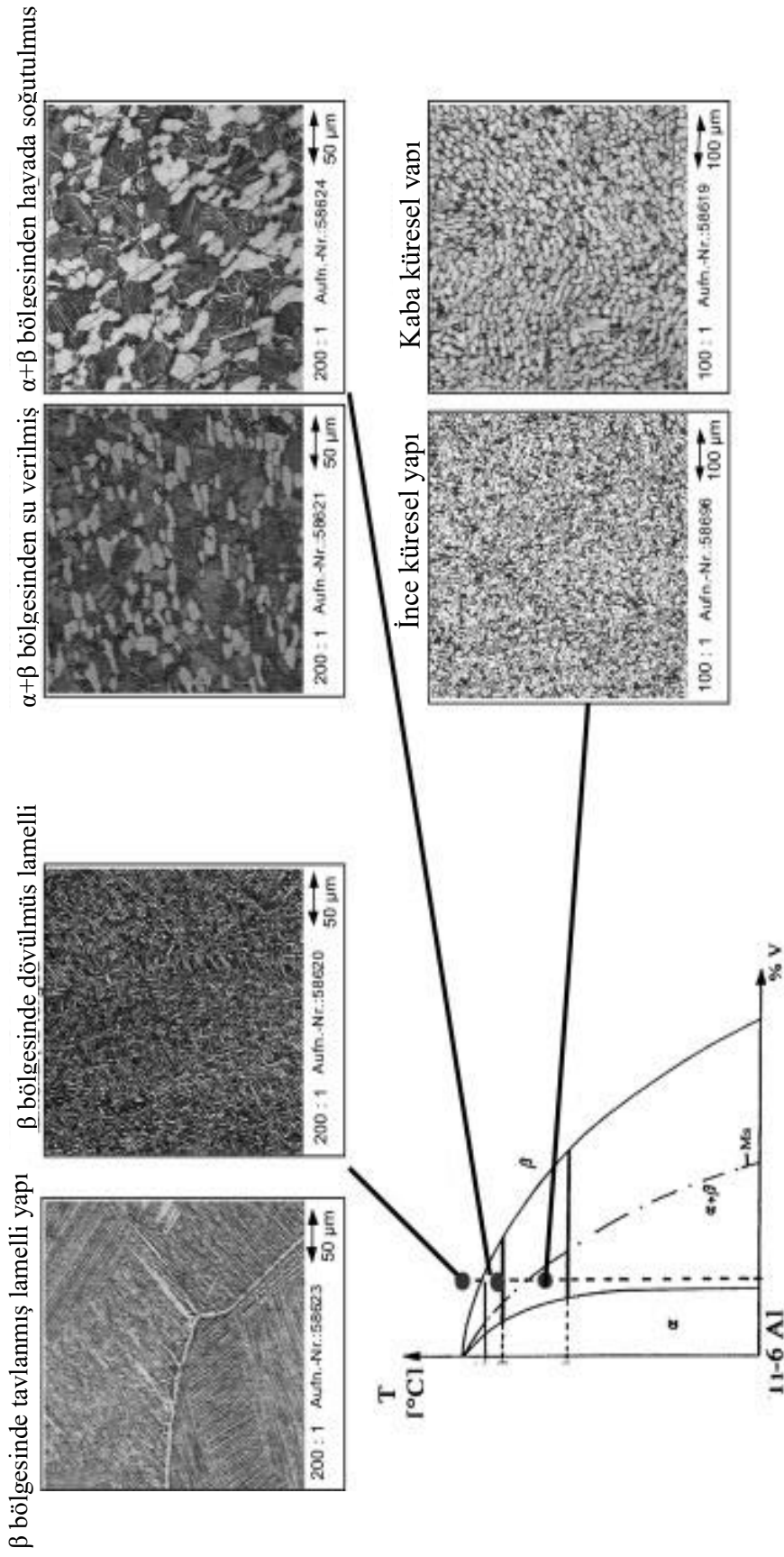
Daha az alaşım içeren yapılar

200-500°C $\beta \rightarrow \beta + \beta_1 \rightarrow \beta + \alpha$

> 500°C $\beta \rightarrow \beta + \alpha$

Şekil 4.8. Kararsız β fazının alaşım elementi miktarına göre dönüşüm şeması.

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'da ise Ti6Al4V alaşımının farklı ısı işlem ve soğutma ortamlarında elde edilen iç yapılar gösterilmiştir. Bu resimden de anlaşılacağı üzere mikroyapıda tavlamanın β ya da $\alpha+\beta$ bölgesinden yapılması, termomekanik işlemin varlığı su vermenin yapılması ya da havada soğutulması gibi etmenler iç yapıyı önemli şekilde etkilemektedir.



Şekil 4.9. Farklı işlemler ile Ti6Al4V alaşımında elde edilen mikroyapılar (Leyens ve Peters, 2003) .

4.2. Kriyojenik Isıl İşlemler

Farklı malzemelerde istenilen özelliklerin elde edilmesi için yapılması gereken ısıl işlemler büyük ölçüde bilinmektedir. Bununla beraber kriyojenik işlem yapılarak metallerin mekanik özelliklerinin ve aşınma karakterlerinin iyileştirilmesi için yapılan çalışmalar ise nispeten yeni bir alandır. Kriyojenik işlem ticari olarak takım sanayi, silah sanayi, akustik ekipmanlar v.b gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Kriyojenik işlemin iddia edilen iyileştirmeleri ne şekilde sağladığı ile ilgili belirli mekanizmalar üstüne araştırmacılar odaklanmakla birlikte işlemin mekanizması tam olarak bilinmemektedir (ASM International, 2007). Çelik malzemelerin soğuk bir ortamda bekletilerek mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi fikri oldukça eskidir. İsviçreli saat üreticilerinin ürettikleri saatlerde kullandıkları parçaların özelliklerini iyileştirmek için bu parçaları kara gömdükleri rivayet edilmektedir. Bunun yanında özellikle takım üreticilerinin takım performanslarını artırmak için takım malzemelerini bir süre soğutucu kabinlerde sakladığı bilinmektedir.

Kriyojenik işlem, işlem görecektir olan malzemenin yavaşça -196°C ' a kadar soğutulması, bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletilmesi, oda sıcaklığına kontrollü olarak ısıtılması ve daha sonra temperlenmesi olarak uygulanan işlemdir. Geleneksel ısıl işlemlere ilave olarak uygulanması tavsiye edilmektedir. En bilinen mekanizması çelikler için, su verme sonrası yapıda kalan kalıntı östenitin martenzite dönüştürülmesidir. Yine çelikler için açıklanabilen temel mekanizma düşük sıcaklıklarda kafesin gerilmesi, kafesteki karbon gibi atomların kafesten difüze olarak karbür yapıcı elementlerle bir araya gelerek çok küçük boyutlarda karbürler oluşturmasıdır.

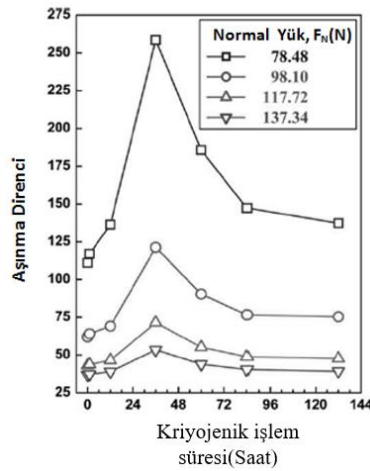
Kriyojenik işlem malzemenin yüzey özelliklerinin yanında içyapısını da değiştirdiği pek çok çalışmada vurgulanmıştır. İşlem çok düşük sıcaklıkta gerçekleştiği için işlem süreleri özellikle büyük parçalar için oldukça uzundur. Kriyojenik işleme tabi tutularak özelliklerin iyileştiği iddia edilen pek çok akademik olmayan rapor ve reklam mevcuttur. Çelikler, alüminyum, bakır gibi pek çok metalin bu işlemde etkilendiği bilinmektedir. Kriyojenik ısıl işlem geleneksel ısıl işlemlerin yerini alacak bir işlem olmaktan ziyade bu işlemlere ilave olarak yapılması öngörülen bir işlemdir. İşleminde kullanılan sıvı azot ve uygulamaları dikkatli şekilde yapılmalı ve mümkünse sıvı azot malzeme yüzeyi ile doğrudan temas etmemelidir.

Farklı malzemeler için kriyojenik işlemin üstün özellikler sağladığı iddia edilmekle beraber yapılan çalışmalarda alınan sonuçlar zaman zaman çelişmektedir. Kriyojenik işlemin sonuçları önceden büyük doğrulukla kestirilememektedir (Zhirafar, 2005). Bu nedenle kriyojenik işlem yapılması düşünülen malzemenin faz yapısı, mukavemetlendirme mekanizmaları, ısıtma işlem yöntemleri gibi bilgilere hâkim olunması ve bu bilgiler eğer mevcutsa da öncül çalışmalar derlenerek bir işlem prosedürü hazırlanması işlemden maksimum faydanın sağlanabilmesi için gereklidir.

4.2.1. Kriyojenik ısıtma işlemin demir esaslı malzemeler üzerine uygulamaları

Kriyojenik ısıtma işlemin çelikler ve diğer malzemeler için uygulanması ve etkileri uzun zamandır tartışma konusu olmuştur. İşlemin etkileri yaygınlaşmaya yeni yeni başladığı yıllarda metalürji mühendisleri tarafından sorgulanmaktaydı (ASM International, 1991). Buna karşın yapılan güncel çalışmalar ile etki etme mekanizmaları ortaya koyuldukça işlemin kapasite ve sınırları hakkındaki bilgi her geçen gün artmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar genel olarak aşınma iyileştirme amacı güdülen takım çelikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Yapılan çalışmalar kriyojenik ısıtma işlemin uygulandığı sıcaklığa göre yaklaşık -85°C sığ (shallow) ve yaklaşık -185°C derin (deep) kriyojenik ısıtma işlem adını almaktadır.

Kriyojenik işlemin uygulanma kinetiğinde işlem sıcaklığı kadar işlem süresi de önem taşımaktadır. Das ve arkadaşları AISI D2 sınıfı çelik malzeme üzerinde yapılan çalışma sonucuna göre -196°C de aşınma direnci 36 saate kadar kriyojenik işlem uygulanan numunelerde artış gösterirken 36 saatten daha uzun kalan numunelerde aşınma direnci tekrar düşüş eğilimi gösterdiğini bildirmiştir. Yapılan çalışmada kriyojenik koşullarda bekleme süresinin ikincil karbürlerin çökmesini etkilediğini ikincil karbürlerin miktarı ve dağılımının da aşınma miktarını etkilediğini belirtmişlerdir, bu çalışmada verilen farklı yükler için aşınma direnci kriyojenik işlem süresi grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir (Das vd., 2009).



Şekil 4.10 Farklı yükler altındaki aşınma direncinin kriyojenik işlem sıcaklığı ile değişimi (Das vd., 2009)

EN 19 çelik malzeme ile yapılan bir diğer çalışmada (Referans) numunelere geleneksel ısıtılardan sonra 24 saat kriyojenik işlem uygulandığında sıg kriyojenik işlem uygulanan numunelerde aşınma direncinde %118, derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerde %214 artış görüldüğü raporlanmıştır. Ayrıca kriyojenik ısıtılardan sonucunda sürtünme katsayısı azalmış ve en düşük sürtünme değeri -196°C da işlem gören numunelerde elde edilmiştir (Senthilkumar ve Rajendran, 2011).

4.2.2. Kriyojenik ısıtılardan işlemin demir dışı malzemeler üzerine uygulamaları

Kriyojenik işlemin demir dışı malzemelerde de pek çok farklı uygulaması vardır. Bu uygulamaların başında akustik ve elektriksel özelliklerin kriyojenik işlem ile iyileştiği raporlanan bakır alaşımları gelmektedir. Nadig ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada elektriksel iletkenliği çok yüksek olan bakır alaşımının pratikte kullanım için maruz kaldığı işlemlerin yapısında kalıntı gerilmeye yol açtığı ve yapıdaki dislokasyon miktarını artırdığı bu etkilerin de elektriksel ve ısıtılardan iletkenliği olumsuz etkileyerek nihai ürün performansını düşürdüğü belirtilmiştir. Derin kriyojenik işlemin nihai haldeki ürünlere 24 saat uygulanması ve 150°C 'de temperlenmesiyle atomik yapıdaki düzenlenmelerle yapıdaki dislokasyonların düzene girdiği ve kalıntı gerilmelerin azalmasıyla elektriksel iletkenlik değerlerinde önemli iyileşmeler görüldüğü raporlanmıştır. Bakır alaşımı (Cu76.12Al23.88) üzerine yapılan bir diğer çalışmada ise 25°C 'den 600°C 'ye kadar kriyojenik işlemin ısıtılardan difüzyon katsayısına, ısıtılardan kapasitesine, ısıtılardan iletkenlik katsayısına ve termal genleşme

katsayısına olan etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada bakır numuneler 800°C'ye ısıtılmış ve takiben 10 dakika derin kriyojenik işlem uygulanmıştır. Yapılan çalışma sonucuna göre kriyojenik işlemin; ısı difüzyon katsayısı ısı iletkenliği, ısı genleşme katsayısını artırdığı diğer özellikleri ise önemli ölçüde etkilemediği raporlanmıştır (Wang vd., 2011). Benzer sonuçlar farklı çalışmalar tarafından da raporlanmıştır (Isaak ve Reitz, 2007) . Bu çalışmaların yanında kriyojenik işlemin direnç nokta kaynağı uygulamalarında kullanılan bakır elektrotların performanslarını artırdığına dair çalışmalar da mevcuttur (Zhisheng vd., 2003).

Kriyojenik işlemin demir dışı malzemelere uygulanmasında yaygın kullanılan bir diğer grup da WC-Co kesici uçlardır. Bu alanda yapılan çalışmada tungsten karbür (WC-Co) kesici uçlar üzerine sıg ve derin kriyojenik işlemlerin etkisi, işlem mekanizması açıklanarak incelenmiştir. WC-Co malzemesinin sıg ve derin kriyojenik işlemi sonucunda elde edilen içyapılar, yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu (HRTEM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak incelenmiş ancak mikroyapıda herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. Fakat karbür ucun yapısındaki bağlayıcı Co elementinin kriyojenik işlemlerle, martenzitik dönüşüme (α -Co (fcc) - ϵ -Co (hcp)) uğradığı X-ışını difraksiyonu (XRD) yöntemiyle belirlenmiştir. Elektrokimyasal yöntemlerle yüzeydeki W elementi çözdürüldükten sonra XRD paterni alınmış elde edilen sonuçlar Rietveld analizinde ϵ -Co oranının derin kriyojenik işlemde sıg kriyojenik işlemde ve işlenmemiş numuneden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ek olarak, kriyojenik işlemde sonra tavlamanın martenzitik dönüşüm miktarını azalttığı tespit edilmiştir (Sert ve Celik, 2019).

Bir başka çalışmada ise WC/Fe/Ni karbür malzemesi 2, 12 ve 24 saat süreyle derin kriyojenik işleme tabii tutulmuştur. Bu çalışmada da kriyojenik işlemin etkilerinin gözlenebilmesi için seçilimli elektrolitik korozyon testi uygulanmıştır. Malzemedeki iç sürtünme karakteristiği, mekanik, aşınma ve korozyon özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda bağlayıcı yapının (Fe-Ni) martenzitik dönüşüme uğradığı ve W elementinin de bu yapıda çökeldiği raporlanmıştır. Bu çalışmada aşınma oranı ve sürtünme katsayısının ciddi şekilde düştüğü ancak buna karşın kırılma tokluğu değerinin de bir miktar azaldığı raporlanmıştır (Gao vd., 2016).

Kriyojenik işlemin polimerler üzerine de etkisinin olduğu yapılan çalışmalar ile raporlanmıştır. Kalia'ya göre kriyojenik işlem uygulanmış plastikler daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmaktadır. Plastiklerin üretimi sırasındaki katılaşma sırasında bazı moleküllerin gelişi güzel bir düzenle birbirlerine bağlanması hadisesi yaşanmaktadır. Buna karşın kriyojenik işlem uygulandığında moleküllerin yavaşça hareket ederek daha sıkı, daha yoğun ve yeniden konumlanmış bir yapı oluşturduğu raporlanmıştır. Daha sonra oda sıcaklığına numuneler tekrar ısıtıldıklarında moleküllerin bu hallerini büyük ölçüde koruduğu ve kafeslerin arasındaki boşlukların azaldığı yeni bir yapının ortaya çıktığı bildirilmiştir. Bu durumun da moleküller arası bağları değiştirerek aşınma karakteristiğini iyileştirdiği rapor edilmiştir (Kalia, 2010).

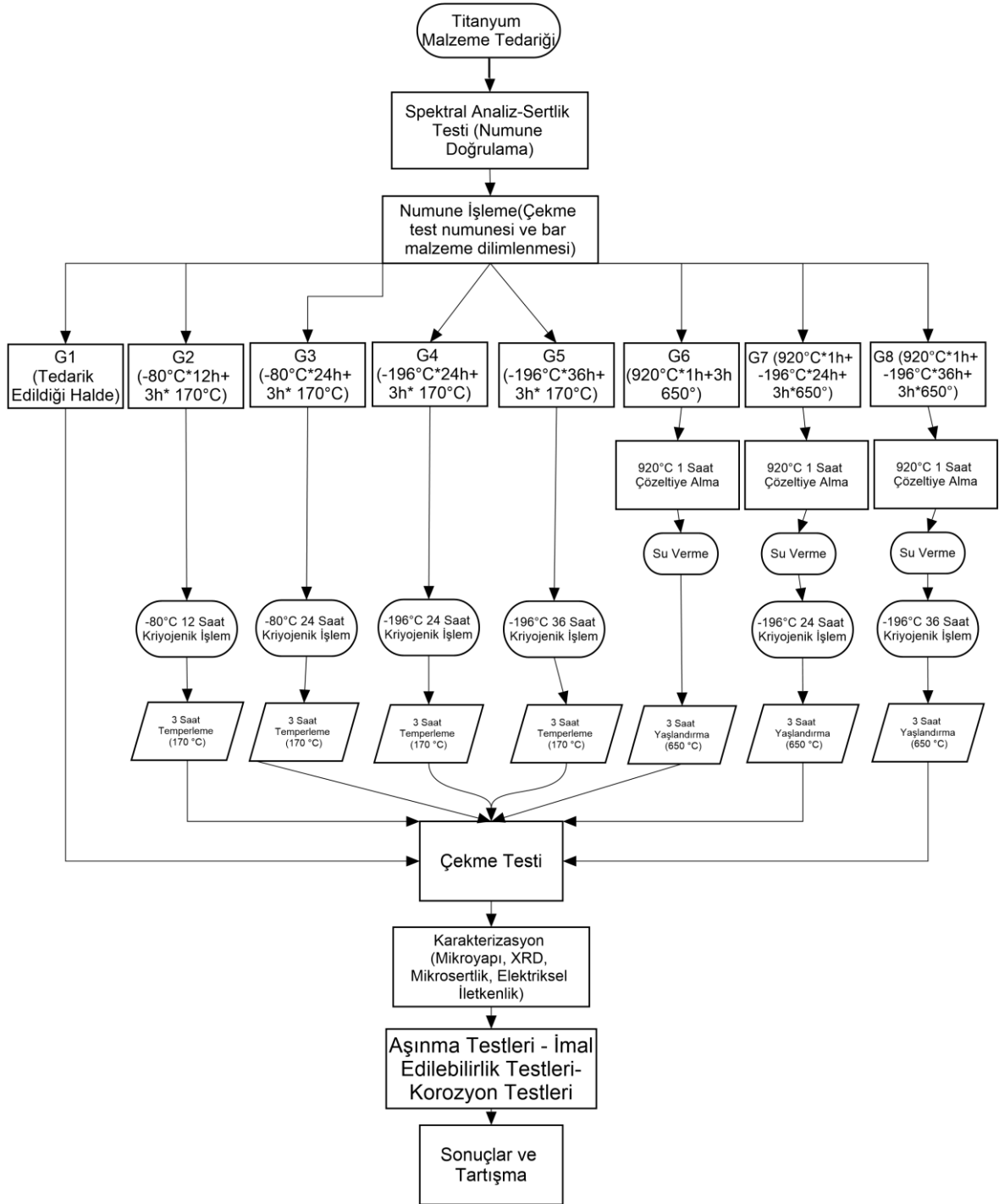
5. MATERYAL VE YÖNTEM

Mühendislik uygulamalarında geliştirilen yeni malzeme ve yöntemlerin nihai ürün üzerine olan etkilerini ön görebilmek için geliştirilen bazı testler ve yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler zamanla kabul görerek endüstriyel standart halini almaktadır. Bu çalışmada izlenen yöntem belirlenirken standartlardan ve literatürdeki öncül çalışmalardan faydalanılmıştır. Bu bölümde tez kapsamında kullanılan titanyum alaşımlarına uygulanan kriyojenik işlemin yapıda meydana getirdiği değişimleri karakterize edebilmek için kullanılan yöntemlere yer verilmiştir. Bu kapsamda öncül çalışmalar ve literatürde kullanılan bazı teknikler aktarılmış ayrıca deneysel çalışmalarda kullanılan ekipmanlar, deneysel parametrelerin ne şekilde belirlendiği, elde edilen sonuçların hangi yöntemlerle işlendiği aktarılmıştır.

Ti6Al4V alaşımına kriyojenik etkilerin incelenmesi için silindirik çubuk ve sac malzeme sertifikalı olarak tedarik edilmiştir. Tedarik edilen Ti6Al4V alaşımı 700°C’de tavlanmıştır. Ti6Al4V alaşımının özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bu özellikler tedarik edilen malzeme ile ASTM B348 standardının izin verdiği ölçüde değişim gösterebilir. Çizelge 5.1’de verilen değerlerden genel hesaplama ve karşılaştırmalarda faydalanılmıştır. Deneysel olarak verilen sonuçlar ise aynı koşullar altında test edilen diğer gruplarla karşılaştırılarak sunulmuştur. Çalışma kapsamında izlenen adımlar Şekil 5.1’de şematik olarak verilmiştir.

Çizelge 5.1. Ti6Al4V alaşımı özellikleri (ASM Material Data Sheet, 2019).

Özellik	Değer
Sertlik (Vickers)(Yaşlandırılmış)	350
Akma Dayanımı (MPa)	880
Çekme Dayanımı (MPa)	950
Kopma Uzaması (%)	14
Kesit Daralması (%)	36
Elastisite Modülü (GPa)	113,8
Poisson Oranı	0,342
Charpy Darbe Enerjisi (J)	17
Yoğunluk (g/cm ³)	4,43
Termal iletkenlik katsayısı (W/m-K)	6,7
Ergime sıcaklığı (°C)	1604
Kaynama Noktası (Tahmini) (°C)	3260
Dönüşüm sıcaklığı (°C)	980
Elektriksel Direnç (ohm.cm)	0,000178



Şekil 5.1 Akış Şeması

Kriyojenik işlem uygulanan numuneler ve yaşlandırma öncesi kriyojenik işlem uygulanan numuneler olmak üzere iki ana deney grubu belirlenmiştir. Titanyum alaşımı silindirik çubuk ve plaka olarak ASTM B348 ve ASTM B265 standardında Grade 5 olarak tedarik edilmiştir. Bu standarttaki alaşımlar tedarik edildiği haliyle işlem görmeden 700°C’de yumuşatma tavlama yapılmış haldedir. Tedarik edilen numuneler doğrulandıktan sonra her grupta kullanılan numuneler tel erozyon yöntemi kullanılarak yarı malzeme halinden test numunesi haline dönüştürülmüştür. Bu işlemler yapılırken numune hazırlama süreci etkilerinin nihai ürüne etki etmemesine özen gösterilmiştir. Yapılan testler farklı gruplar için tekrarlı olarak homojen koşullar altında gerçekleştirilmiştir. Süreçler numune doğrulanması, ısıl işlem uygulanması, performans testleri ve sonuçlar olarak ana gruplara ayrılmıştır.

Ti6Al4V alaşımına kriyojenik etkilerin incelenmesi için 2 ana kategoride toplamda 8 grup numune hazırlanmıştır. Ana gruplar yalnızca kriyojenik işlem uygulanan G2-G5 ve yaşlandırma işlemine tabii tutulan G6-G8 olarak ayrılmıştır. İlk grup referans numune olarak seçilmiş ve tedarik edildiği haliyle bırakılmıştır. İkinci ve üçüncü grup numuneler sırasıyla 12 ve 24 saat süreyle sığ kriyojenik işleme tabii tutulmuş, dördüncü ve beşinci grup numuneler ise 24 ve 36 saat derin kriyojenik işleme tabii tutulmuştur. Altıncı gruba yalnızca yaşlandırma işlemi uygulanmış, yedinci ve sekizinci gruplara yaşlandırma işlemine ek olarak çözeltiye alma ve su verme işleminden sonra 24 ve 36 saat süreyle derin kriyojenik işlem uygulanmıştır. Bu yöntemle kriyojenik işlem ile birlikte yaşlandırma işleminin etkilerinin de incelenmesi amaçlanmıştır. Altıncı, yedinci ve sekizinci grup numuneler yaşlandırma işlemi için 920°C’de 1 saat çözeltiye alma işlemi uygulandıktan sonra altıncı grup numunelere doğrudan 650°C’de 3 saat yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Yedinci ve sekizinci grup numunelere su verme sonrası yaşlandırma öncesi -196°C’de kriyojenik işlem uygulanmıştır.

Uygulanan ısıl işlemlerden sonra tüm numuneler oda sıcaklığında statik koşullarda çekme testi uygulanmıştır. Çekme testleri sac numuneler kullanılarak yapılmış olup bunun dışındaki tüm testler silindirik çubuk malzemeden elde edilen numuneler vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Çekme testi gerçekleştirildikten sonra optik mikroskop ve XRD tekniği kullanılarak karakterizasyon işlemine geçilmiştir. Bu işlemleri takiben elektriksel iletkenlik ve mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon için yapılan bu testlerden

sonra ise performans testlerine geçilmiştir. Aşınma testi, imal edilebilirlik testleri ve korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların raporlanması ve sonuçların yorumlanması ile süreç tamamlanmıştır. Çizelge 5.2’de uygulanan ısıt işlemler kısaca özetlenmiştir.

Çizelge 5.2. Numunelere uygulanan ısıt işlem prosedürü

Grup Numarası	Isıt İşlem Durumu
G1	Tedarik edildiği halde (700°C’de yumuşatma tavlama görmüş)
G2	12 saat -80°C Kriyojenik İşlem 3 Saat 170°C temperleme
G3	24 saat -80°C Kriyojenik İşlem 3 Saat 170°C temperleme
G4	24 saat -196°C Kriyojenik İşlem 3 Saat 170°C temperleme
G5	36 saat -196°C Kriyojenik İşlem 3 Saat 170°C temperleme
G6	920°C 1 saat Çözeltiyeye Alma Su verme 3 Saat 650°C Yaşlandırma
G7	920°C 1 saat Çözeltiyeye Alma Su verme 24 saat -196°C Kriyojenik İşlem 3 Saat 650°C Yaşlandırma
G8	920°C 1 saat Çözeltiyeye Alma Su verme 36 saat -196°C Kriyojenik İşlem 3 Saat 650°C Yaşlandırma

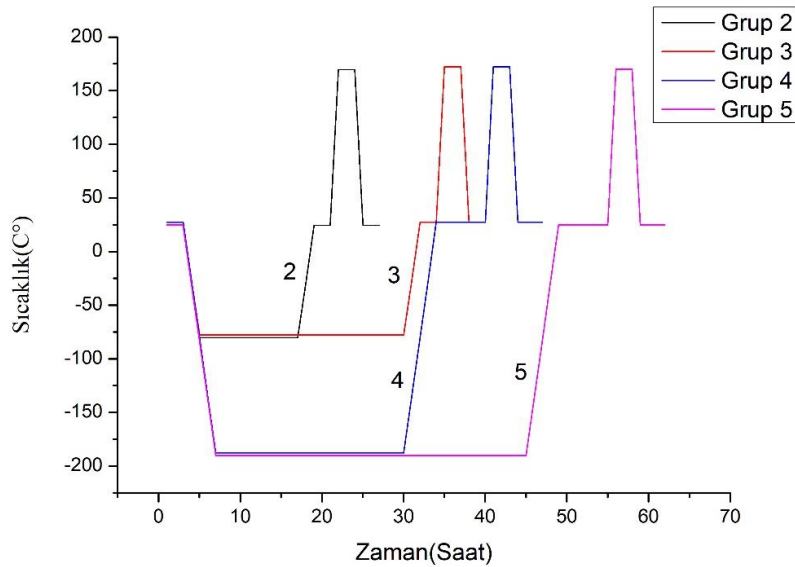
5.1. Titanyum Alaşımlarına Kriyojenik İşlem ve Yaşlandırma Uygulanması

Numunelere uygulanan kriyojenik işlemler MMD Teknoloji firması tarafından Şekil 5.2’de gösterilen düzenek ile Çizelge 5.2’deki parametrelere göre uygulanmıştır. Kriyojenik işlemde numunelerin ani soğuması ve işlem sonrası ani ısınması çarpımalara ve malzeme hasarına neden olabilmektedir. Bu durumun önlenmesi için ısıtma ve soğutma işlemi bilgisayar kontrollü bir düzenek vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Soğutma ve ısıtma işlemi kontrollü olarak 1°C/dk hızında gerçekleştirilmiştir.

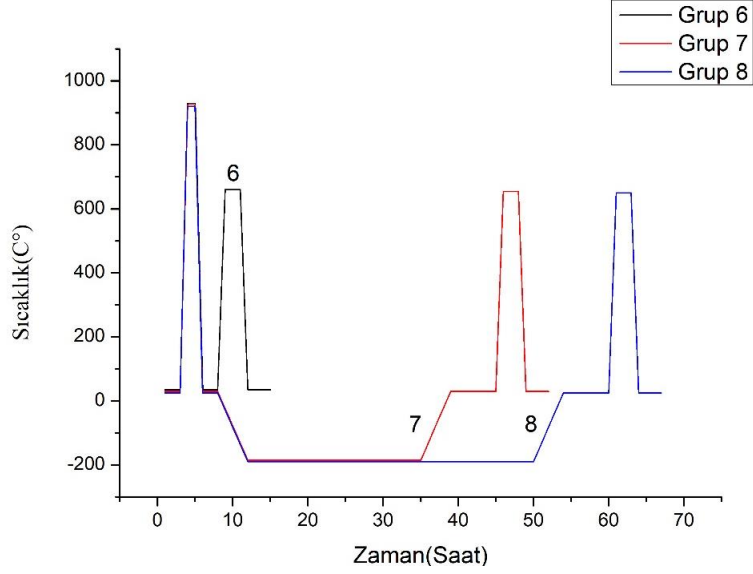


Şekil 5.2. Kriyojenik işlem Düzeneği

Numunelere uygulanan ısıl işlemler sıcaklık zaman diyagramı olarak yalnızca kriyojenik işlem uygulanan numuneler için Şekil 5.3'te, yaşlandırma ve kriyojenik işlem uygulanan numuneler için Şekil 5.4'te verilmiştir. Malzemeler ısıl işleme tabi tutulmadan önce kesilerek test numunesi haline getirilmiştir. Her işlem için üçer numune işleme tabii tutulmuşlardır. Kriyojenik işlemler sıvı azot ortamında -196°C 'de derin kriyojenik işlem ve gaz azot ortamında -80°C 'de sığ kriyojenik işlem olarak uygulanmıştır. Kriyojenik işleme tabii tutulan tüm numuneler 3 saat süreyle 170°C 'de temperlenmiştir. Kriyojenik işlem parametreleri literatürdeki çalışmalar ve öncül denemeler yapılarak belirlenmiştir.



Şekil 5.3. Yalnızca kriyojenik işlem uygulanan numunelerin sıcaklık zaman grafiği



Şekil 5.4. Yaşlandırma ve kriyojenik işlem uygulanan numunenin sıcaklık zaman grafiği

Yaşlandırma işleminde izlenecek yöntem Çizelge 4.2’de verilen farklı kaynaklardaki yaşlandırma parametre tavsiyeleri göz önüne alınarak belirlenmiştir. Çözeltiye alma işlemi için numuneler $\alpha+\beta$ bölgesine (920°C) ısıtılmış, numune boyutları göz önüne alınarak bu sıcaklıkta 1 saat tutulmuştur. Çekme testinde kullanılan sac numuneler için literatürdeki tavsiyeler göz önüne alınarak bu süre denge haline geldikten sonra 6 dakika olarak belirlenmiştir (ASM International, 2007). Çözeltiye alma işlemi takiben yağ ortamında su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yaşlandırma öncesi kriyojenik işlem uygulanan numuneler, çözeltiye alma işlemi takip eden 24 saat içerisinde 24 ve 36 saat süreyle derin kriyojenik işleme tabii tutulmuştur. Daha sonra çözeltiye alma işlemi yapılan tüm numunelere 650°C ’de 3 saat yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.

5.2. Optik ve Elektron Mikroskobu ile Karakterizasyonu

Malzemelerin karakterizasyonu için kullanılan ilk metot optik mikroskop ile inceleme tekniğidir. Bilindiği üzere optik mikroskopta görüntü almak için yapılması gereken birtakım işlemler mevcuttur. Titanyum alaşımlarının metalografik hazırlık süreçleri demir esaslı alaşımlara göre farklılıklar göstermektedir. Doğru sonuçlar alınabilmesi için metalografik hazırlık süreçlerinde dikkat edilmesi gereken noktalar vardır. Titanyum alaşımları kesme sırasında çok çabuk ısınarak ısıl hasara uğrayabilir, sahip olduğu sünek yapı nedeniyle mekanik etkilerle deformasyona ve çizilmeye karşı direnci düşüktür.

Numune alma aşamasından zımparalama ve parlatma süreçlerinin tümünde bu duruma göre hareket edilmelidir. Kesme sırasında titanyum alaşımları sürekli talaş oluşturma eğilimindedirler. Sürekli talaş oluşumu kesme bölgesine soğutma sıvısının ulaşmasını engelleyerek malzeme yüzeyinin aşırı ısınmasına ve içyapının bozulmasına neden olabilir (Taylor ve Weidmann, 2015).

Kesme: Titanyum alaşımları yüksek süneklikleri nedeniyle talaşlı imalat ile ya da abrasif disk ile kesildiklerinde uzun talaş oluşturma eğilimindedirler. Bu nedenle geleneksel alüminyum oksit disklerle kesmek yerine silisyum karbür diskler ile kesilmeleri önerilir. Kesme sırasında aşırı ısınma durumu gözlenebilir ve garip koku çıkabilir.

Kalıplama: Titanyum alaşımların kalıplanması gerekli olduğu durumlarda, fenolik reçine ile sıcak ya da soğuk olarak yapılabilir.

Zımparalama Parlatma: Aşırı sünek yapısı titanyum alaşımlarının zımparalama ve parlatma işlemlerinde deforme olmasına ve özellikle çizilmesine yol açabilir. Zımparalama için silisyum karbür içeren zımparaların kullanımı önerilir. El ile zımparalama için devir sayısının 150 dev/dk'dan az olması, mümkünse her zımparalama işlemi için yeni zımpara kâğıdı kullanılması önerilir. Aksi durumda aşınan taneler malzeme yüzeyinde sıvanmaya yol açar ve sıvanmanın etkisi yapıda soğuk deformasyon hasarı olarak görülür. Zımparalama işleminin yüksek uygulama basıncı ve düşük devir sayısında yapılması önerilir. Zımparalama işlemi yüzeyin durumuna göre kademeli olarak yapılmalıdır. Zımparalama işlemine 120 ya da 240 grit zımpara ile işleme başlanması ve sırasıyla 320 ve 600 grit zımpara ile işleme devam edilmesi önerilir. Titanyum alaşımlarında parlatma işlemi daha zahmetli olduğu için 1200 ya da 2400 gritlik zımpara ile ince zımparalama yapılması da tavsiye edilir. Zımparalamada aşırı ısınmanın önlenmesi için soğutma sıvısı ya da şebeke suyu kullanımı önerilir. Bu nedenle özellikle parlatma işleminde tekrar edilebilen sonuçlar alabilmek için mekanik yerine kimyasal ya da elektrolitik parlatma teknikleri önerilir. Mekanik parlatmada ise ipek gibi kumaşların tercih edilmesi önerilmiştir. Titanyum alaşımlarında istenen özelliklerin mikroyapıda ortaya çıkması için geliştirilen kimyasal dağlayıcılar mevcuttur. Titanyum alaşımları için yaygın kullanılan dağlayıcılar ve bu dağlayıcıların içerikleri Çizelge 5.3.'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Titanyum Alaşımlarında yaygın olarak kullanılan dağlayıcılar

Dağlayıcı	İçeriği	Notlar
Kroll's	1,5 mL HF 4 mL HNO ₃ 94 mL H ₂ O	Genel amaçlı α ve β dağlayıcı
Oksalik	20 mL HF 20 g oxalic 98 mL H ₂ O	Ti6Al4V için 15 saniye tatbik edilir
Amonyum biflorür	1 gr NH ₄ FHF 99 mL H ₂ O	
Laktik hidrat	5 mL laktik asit ile 5 mL stok çözeltisini karıştır (3 ml HF, 97 mL HNO ₃)	Ticari saflıktaki titanyum hidrürlerde kullanılır

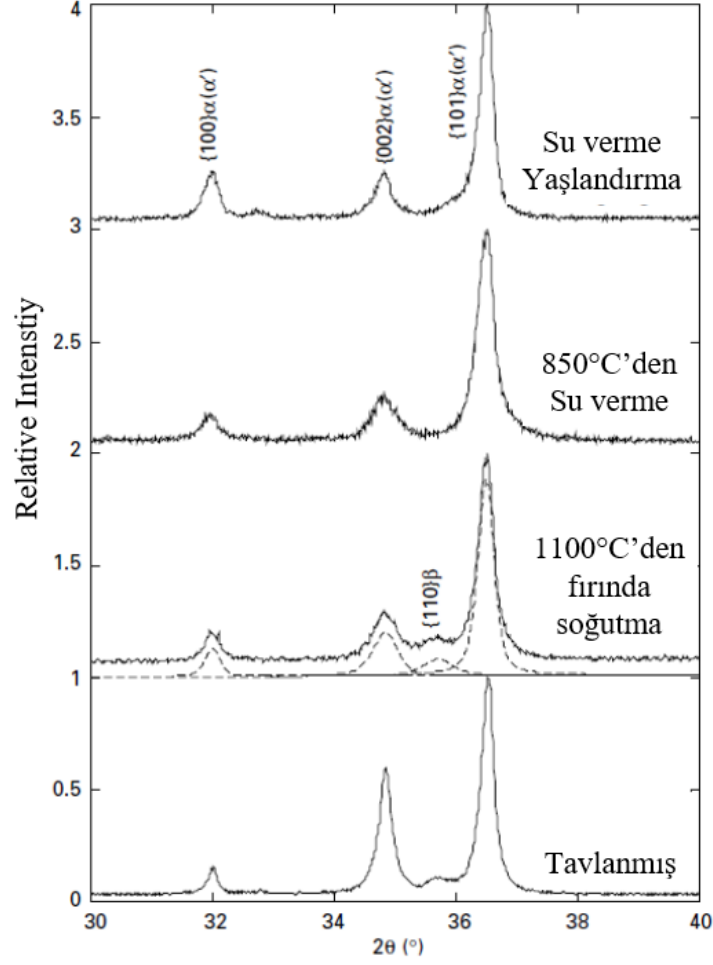
Charaponski ve Szkliniarz yaptıkları çalışmada 2 faz içeren $\alpha+\beta$ alaşımı Ti-6Al-2Mo-2Cr-Fe alaşımının mikroyapısını incelemiştirlerdir. Faz analizini optik mikroskop ve SEM'den elde edilen görüntüleri kullanarak, α ve β fazı arasındaki kontrast farkı yardımıyla görüntü analiz yazılımı ile işlemişlerdir. Uygulanan yöntemin faz oranlarının kantitatif analizinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Chrpański ve Szkliniarz, 2001).

Bu çalışmada mikroyapı analizi yapılacak olan numuneler silindirik çubuk malzemedden tel erozyon tekniği kullanılarak 22 mm'lik dilimler halinde kesilmiştir. Tel erozyon yönteminin malzeme yüzeyindeki yapıyı etkileyebileceği düşünülerek; bu dilimlerin ortasından radyal yönde hassas kesme diski kullanarak ayrıca kesme işlemi yapılmıştır ve incelemelerde dik kesit yüzeyler kullanılmıştır. Kesme işlemlerinde demir dışı metaller için kullanımı tavsiye edilen SiC esaslı Streurs 10S25 kesme diski kullanılmıştır. Metalografik hazırlama işlemlerinde pnömatik destekli StruersTegraforce 4500 sistemi kullanılmıştır. Zımparalama işlemi 10'ar dakika süre 15 N baskı kuvveti altında dört kademe (220, 600, 1200, 2400) otomatik olarak yapılmıştır. Parlatma işleminde de uzun tüylü çuha ile 3 μ m'lik elmas solüsyon kullanılmıştır. Dağlama işleminde ise laboratuvar da hazırlanan Kroll dağlayıcısı kullanılmıştır. Mikroyapı analizleri Nikon Eclipse L150 optik mikroskobu ve Clemex görüntü analiz sistemi kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen mikroyapı görüntüleri IMAJEX yazılımı kullanılarak işlenmiş ve faz oranları tayini görüntü işleme tekniği ile gerçekleştirilmiştir.

5.3. X-Ray Difraksiyon Yöntemi Kullanılarak Ti6Al4V Alaşımının Karakterizasyonu

Titanyum alaşımlarının karakterizasyonu için kullanılan yöntemlerden birisi de X ışını difraksiyonu yöntemidir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle oda sıcaklığında yapılan analizlere ağırlık verildiği yüksek sıcaklıktaki çalışmaların ise daha kısıtlı olduğu görülebilir (Sha ve Malinov, 2009). Bu bölümün amacı titanyum alaşımlarında X ışınları kullanılarak faz tayini ve faz oranlarının analizi ile ilgili bilgi vermek ve kriyojenik işlemin faz yapısı üzerine olan etkilerinin ortaya konmasında kullanılan yöntemleri ifade etmektir.

Sha ve Malinov yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımına farklı ısıl işlemler uygulamışlar ve bu ısıl işlemler sonucunda ortaya çıkan yapıların XRD analizlerini gerçekleştirmişlerdir (Sha & Malinov, 2009a). Bu çalışmadaki deney grupları: Birinci grup Yumuşatma tavlaması uygulanmış durumdaki numune, ürün tedarik edildiği haldedir. Bu durumdaki ürün $\alpha+\beta$ fazının bulunduğu sıcaklıkta en az %60 haddelenmiş ve bu haddelemeyi takiben 800 °C de 2 saat yeniden kristalleşme uygulanmış haliyle test edilmiştir. İkinci grup 1100 °C de β homojenizasyonu yapılmış ve bu sıcaklıktan fırında yaklaşık 0,5 °C/s hız ile oda sıcaklığına soğutulmuştur. Üçüncü grup numunelere ise 1100°C de homojenizasyon tavlamasına uygulanmış ve takiben suda su verilmiştir. Dördüncü grup numuneler 1100 °C'de homojenizasyon işlemi sonrasında 850°C'ye soğutulmuş ve buradan, yani $\alpha+\beta$ bölgesinden, su verilmiştir. Bu numuneler için 30-40° arasında elde edilen XRD pikleri Şekil 5.5'de verilmiştir.



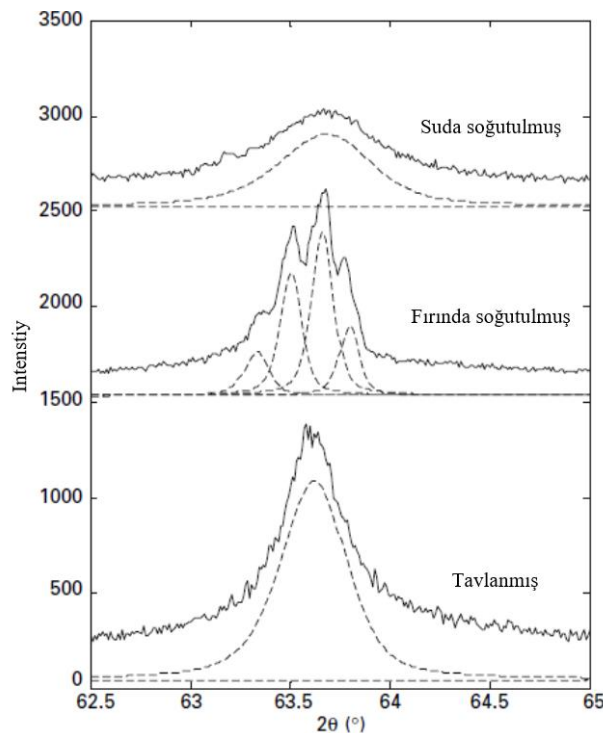
Şekil 5.5. Oda sıcaklığında farklı ısıl işlemler görmüş Ti6Al4V alaşımı için XRD pikleri (Sha ve Malinov, 2009).

Ti6Al4V alaşımı en yaygın kullanımı olan $\alpha+\beta$ alaşımıdır. Isıl işlem etkisi ile yapıdaki faz oranları ve özellikleri değiştirilebilmektedir. Yumuşatma tavlama uygulanmış haldeki numune ana faz α fazıdır bu faza ek olarak az miktarda, tavlama sıcaklığına bağlı olarak, yaklaşık %5 β fazı da bulunmaktadır. Fırında soğutma halinde ise β fazı az miktarda yapıda bulunmuştur ($35,6^\circ$) civarında bulunan pik. Yavaş soğutma ile birlikte alaşım elementlerinin dağılımı ile β fazının β stabilizatörleri (Vanadyum bu alaşım için) ile zenginleştirilmesi ile az miktarda oda sıcaklığında kararlı β fazı oluşmuştur. Fırında soğutma ile oda sıcaklığında elde edilen β fazının oranı yaklaşık olarak %7'dir. Bu koşullar altında ölçülen kafes parametreleri Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Farklı ısı işlem görmüş Ti6Al4V alaşımının kafes parametreleri (Sha ve Malinov, 2009).

Alaşım	Faz	Kafes Parametresi	Tavlanmış	β bölgesinden fırında soğutulmuş	β bölgesinden suda soğutulmuş	$\alpha + \beta$ bölgesinden suda soğutulmuş	
Ti6Al4V	α	a	0,2935	0,2938	0,2935	0,2938	
			c	0,4673	0,4701	0,4668	0,4673
					0,4684		
					0,4668		
					0,4655		

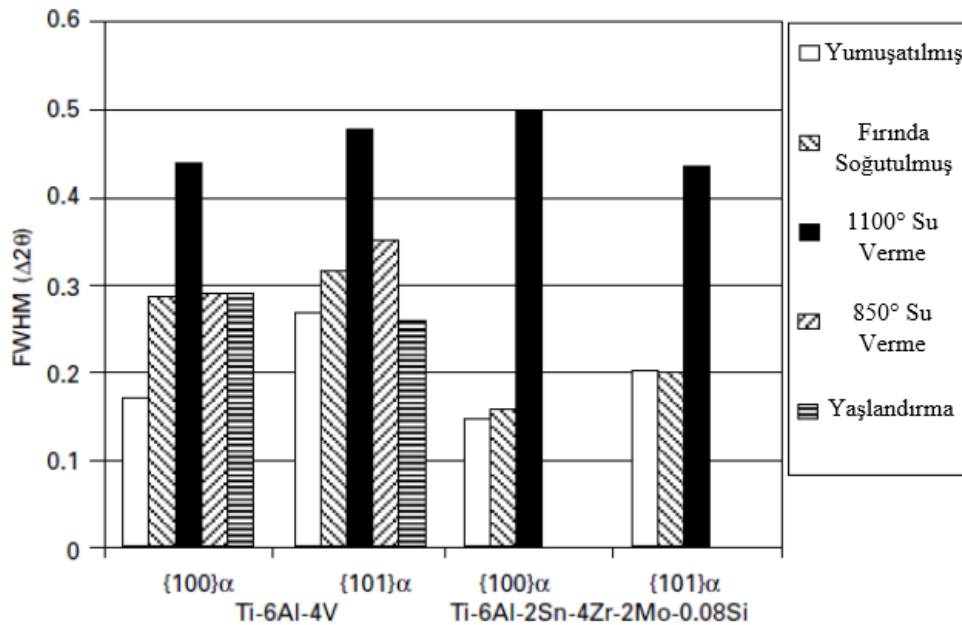
Fırında yapılan düşük hızlı soğutmadan sonra α fazı farklı a ve c parametreleri ile oluşmuştur. Fırında soğutma ile a parametresi 0,2938 c parametresi ise 4 ufak pikte görüldüğü üzere 0,4701, 0,4684, 0,4668 ve 0,4655 nm'dir. Bu gözlem β fazının α fazına dönüşümü ile ifade edilebilir. Farklı soğutma ortamlarının XRD sonuçlarına olan etkisi Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Farklı soğutma koşullarının 63° deki pik şiddetine etkisi (Sha ve Malinov, 2009).

Titanyum alaşımlarında β fazının α fazına dönüşümü monovaryant şekilde olur yani farklı sıcaklıklarda farklı oranlardaki α ve β fazları dengededir. Sürekli soğumada farklı oranlardaki α fazı çöktürülebilir. Farklı sıcaklıklarda çöktürülen α fazı farklı morfoloji

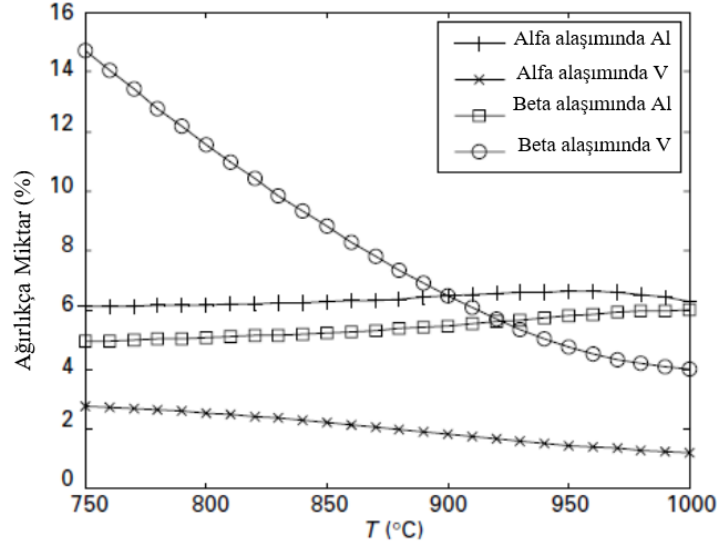
gösterir. İnce lamelli yapı daha düşük sıcaklıklarda meydana gelen dönüşümlerde gözlenir. Bu durumda farklı sıcaklıklarda çökelen α fazlarının kalıntı gerilme miktarları da farklılaşır. Farklı koşullarda oluşan α fazının, içerdiği alaşım elementleri miktarları da belirli oranlarda farklıdır. Bu durum c kafes parametresinin farklı olmasının sebebi olarak gösterilebilir. Şekil 5.8’de farklı sıcaklıklarda α ve β fazlarının kimyasal içeriği verilmiştir. β bölgesinden su verilen ya da $\alpha + \beta$ bölgesinden su verilen numunelerde de yalnızca SPH α fazı bulunur, β fazı bulunmaz. Bu yapıda difüzyonla az miktarda β fazı α fazına dönüşür ve yapının büyük kısmı da difüzyon olmaksızın β fazından α' fazına dönüşür. Bu difüzyonsuz dönüşüm 700-750°C’nin altında gerçekleşir ve martenzitik yapıya (α') dönüşür. Bu durum XRD analizindeki daha geniş pikler vasıtası ile tespit edilebilir. α fazlarının “full-width half maximum” (FWHM) değerleri fırında soğutulan ya da yumuşatma tavlaması uygulanmış haldeki değerlerin neredeyse iki katına eşittir. Şekil 5.7’de bu durum grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Ti6Al4V ve Ti6Al2Sn4Zr2Mo0.08Si alaşımları için farklı ısıl işlemleri FWHM değerleri (Sha ve Malinov, 2009).

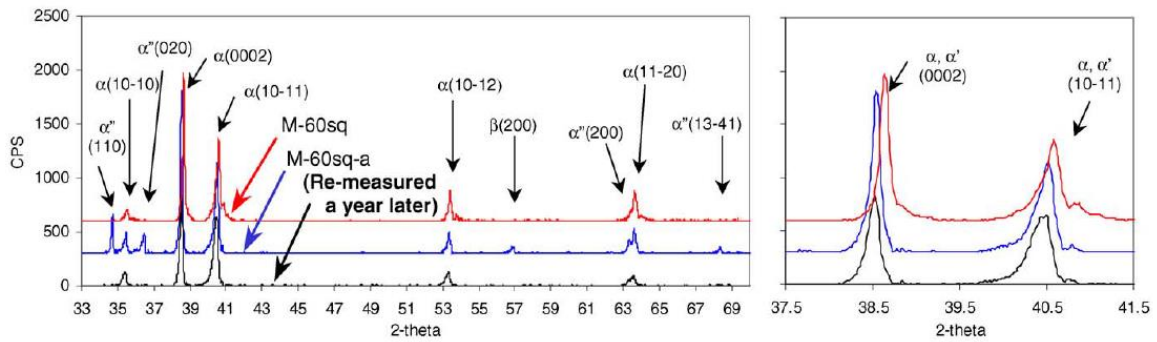
Yapılan diğer çalışmalar 750-900°C bandında Ti6Al4V’a su verilerek ortorombik martenzit (α'') elde edilebileceği göstermektedir. 850°C’de su verilen malzemenin 600°C’de yaşlandırılması difraksiyon patterninde küçük değişikliklere sebep olmuştur. Sol tarafta (101) düzleminde α yansıması bir dirsek şeklinde görülmüştür. Ayrıca 37,75°’de yeni bir

yansıma gözlemlendiği ($d=0,2483$ nm) raporlanmıştır. Bu yapının da α' fazından çökelen yeni bir faz olabileceği ve α'' fazı olduğu tahmin edilmektedir.



Şekil 5.8. Ti6Al4V alaşımı için farklı sıcaklıklar için hesaplanmış α ve β fazlarının kimyasal bileşim diyagramı (Sha ve Malinov, 2009).

Titanyum malzemelerin XRD analizleri de diğer malzemelerdeki gibi üretim yöntemi ısıl işlemi gibi malzeme geçmişinden etkilenir. Zeng ve Bieler yaptıkları çalışmada Ti6Al4V tel malzemeye farklı ısıl işlemler, soğuk deformasyon, yaşlandırma işlemleri uygulamıştır. Yapının tekstür olması ve uygulanan işlemler ile farklı fazlar (α'' , α' , α , β , ω) gözlemlenmiştir. Çalışmada Ti6Al4V alaşımının dönüşüm gösterebileceği fazlar ve bu fazlara ait kafes parametrelerine yer verilmiştir. Faz dönüşümlerinin ve piklerin konumları açısından çalışma faydalı olmakla birlikte farklı işlemler sonucunda elde edilen faz oranlarına çalışmada yer verilmemiştir. Şekil 5.9'te bu çalışma için ölçülen kafes parametreleri ve fazlar verilmiştir. Çalışmada M (Middle) harfi ölçümün haddelenen numunenin ortasından alındığını x (Extrusion) harfi ekstrüzyonla üretilen numune olduğunu sq (Solutionization and Quenching) harfleri çözeltiye alma ve su verme için a (Aging) harfi de yaşlandırma işlemini ifade etmek için kullanılmıştır (Zeng ve Bieler, 2005).



İşlem	α (Å)		β (Å)	α'' (Å)		
	a	c		a	b	c
M	2,9131	4,6572	3,2415			
Mx	2,9164	4,654	3,2463			
M-60sq	2,9223	4,669				
Mx-60sq	2,9217	4,6676				
M-60sq-a	2,9214	4,6672	3,2552	3,0327	4,9238	4,6672
Mx-60sq-a	2,9212	4,6676	3,2553	3,0334	4,9246	4,6676
M-60sq-a (1 Yıl sonra)	2,9247	4,6708				
Mx-60sq-a (1 yıl sonra)	2,9251	4,6708				

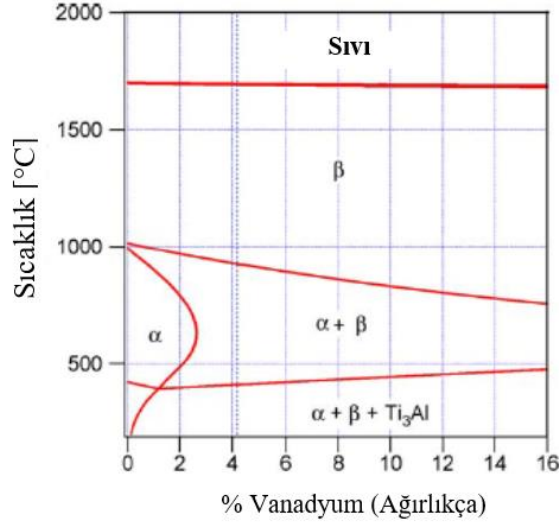
Şekil 5.9. Ti6Al4V Alaşımının farklı koşullarda ölçülen XRD paternleri ve Kafes parametreleri (Zeng ve Bieler, 2005).

Yapılan bir başka çalışmada (Qazi vd., 2003) Ti6Al4V alaşımına farklı hidrojen oranlarında hazırlanan ortamlarda su verme işlemi yapılmış yapıda ortaya çıkan fazlar (α'' , α' , α , β) XRD tekniği de kullanılarak analiz edilmiştir.

Ti6Al4V alaşımında $\beta \rightarrow \alpha$ dönüşümü DSC (Differential scanning calorimetry) kullanılarak (Malinov vd., 2001) modellenmiştir. Yapılan çalışmada farklı soğuma hızları (5°C, 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, ve 50°C /dk) kullanılmıştır. Elde edilen deneysel veriler matematiksel olarak modellenmiş ve soğuma hızının faz dönüşümüne etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma XRD analizleri ile desteklenmiş ve sürekli soğuma (CCT) ve Zaman Sıcaklık Dönüşüm (TTT) diyagramları önerilmiştir.

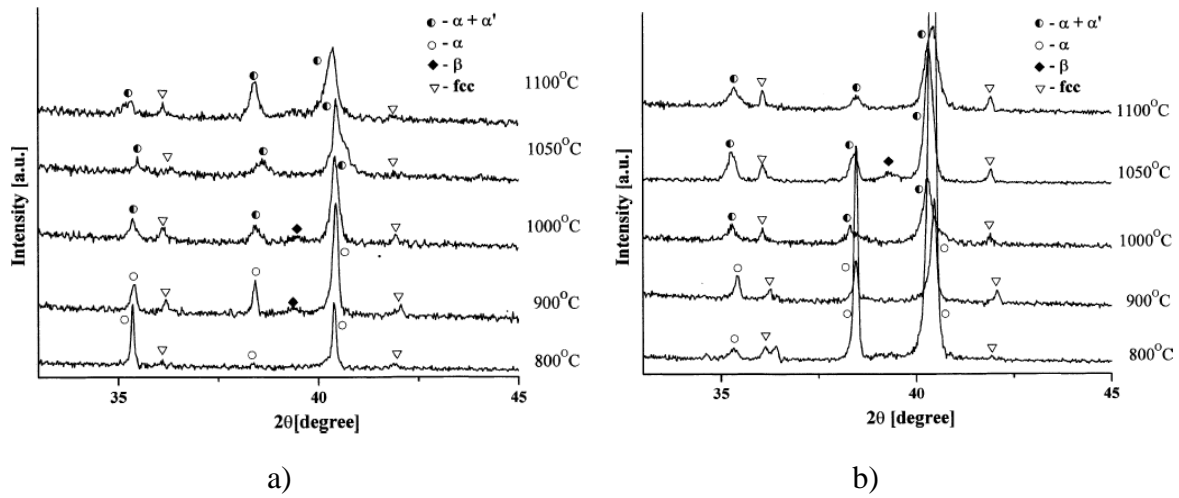
Elmer ve arkadaşları (2005) yaptıkları çalışmada ısıtma durumunda In situ yani sürekli olarak yapılan X-ray difraksiyon ölçümleri ile Ti6Al4V malzemesinde $\alpha \rightarrow \beta$ faz dönüşümü modellemiştir. Farklı ısıtma hızları ile yapılan çalışmada kafes parametreleri ve

dönüşüm gözlenmiştir. 500-600°C arasında beklenmeyen etkiler gözlenmiş bu etkilerin tavlama sırasında oluşan kalıntı gerilmeden kaynaklandığı iddia edilmiştir. Yapılan çalışma ısıtmada $\alpha \rightarrow \beta$ dönüşümü anlama konusunda oldukça faydalıdır. Bu çalışma ayrıca XRD tekniği ile faz tayini ve dönüşüm kinetiğini ifade etmiştir. Şekil 5.10'da aynı çalışmada verilen farklı vanadyum oranları için ikili denge diyagramı mevcuttur.



Şekil 5.10. Titanyum alaşımlarındaki α ve β faz dönüşümüne vanadyum bileşiminin etkisini gösteren temsili ikili diyagram (Elmer vd., 2005).

Jovanovic ve arkadaşları (2006) yaptıkları çalışmada hassas döküm yöntemi ile üretilen $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alaşımlarına yapılan farklı sıcaklıklardaki tavlama işlemi ve farklı soğutma hızları kullanılarak elde edilen yapıları araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada 1 saat süre ile 800, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100°C'lerde tavlama işlemi yapılmış daha sonra bu numuneleri havada ve suda soğutarak ortaya çıkan yapıları metalografi, mekanik testler ve XRD tekniği kullanarak incelemişlerdir. Bu çalışmada mikroyapı kullanılarak faz analizi yapılmıştır ayrıca faz oranlarını belirlemek için kantitatif analiz de gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları Şekil 5.11.'de verilmiştir. Çalışmanın sonucuna göre β bölgesinden suda su verilen numunelerde martenzitik α' fazı yapıda baskın olduğu gözlenirken aynı ortamda tavlama sıcaklığında $\alpha + \beta$ faz bölgesinde su verildiğinde ise α fazının baskın hale geldiği görülmektedir. Havada soğutmada ise β bölgesinden soğutulan numunelerde asiküler α fazı yapısı görülmüş tav sıcaklığı azaldıkça asiküler α fazı miktarı azalmış, α fazı miktarı daha baskın hale gelmiştir. Fırında soğutmada ise α fazı baskın olarak görülmüş yapı $\alpha + \beta$ faz yapısından oluşmuştur.



T (°C)	Suda Su Verme	Havada Soğutma	Fırında Soğutma
1100	1,3 (β) α' = 98,7	14,7 (α) β + α _{AC} = 85,3	95 (α) β = Kalan
1050	5 (β) α' = 95	34,5 (α) β + α _{AC} = 65,5	97 (α) β = Kalan
1000	7,8 (β) α' = 92,2	50,9 (α) β + α _{AC} = 49,1	90 (α) β = Kalan
950	42,2 (α) α' ~ 50-57,8 β ~ 8	72,2 (α) β + α _{AC} = 28,8	95 (α) β = Kalan
900	63,1 (α) α' ~ 26,9 β ~ 10	81,3 (α) β + α _{AC} = 18,7	95 (α) β = Kalan
850	80 (α) α' ~ 10 β ~ 10	84,5 (α) β + α _{AC} = 15,5	95(α) β = Kalan

Şekil 5.11. Farklı tavlama sıcaklıklarından a) Havada, b) Suda soğutma sonucu elde edilen XRD difraksiyon paternleri ve faz oranları (Jovanović vd., 2006).

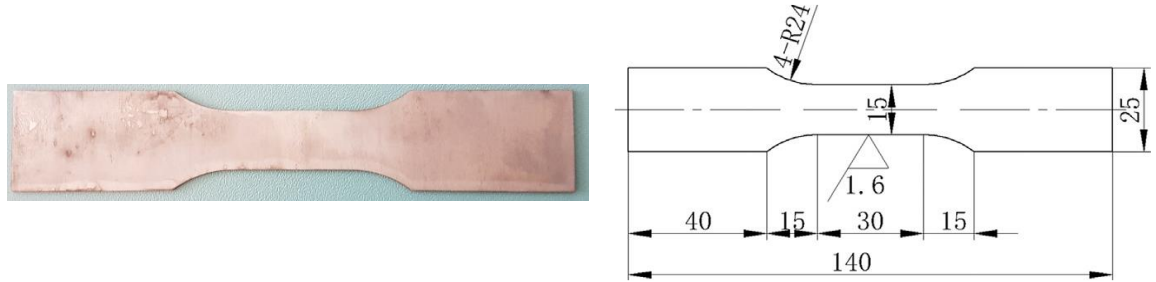
Bu tez kapsamında yapılan çalışmada XRD tekniği ile analiz edilecek olan numuneler silindirik çubuk malzemeden hassas kesme diski ile kesilmiş ve optik mikroskopta incelenen numunelere benzer şekilde hazırlanmıştır. Tarama için tüm numunelerin merkezleri esas alınmış ve tüm numuneler aynı şartlar altında ardışık olarak taranmıştır. Literatürdeki çalışmalar da dikkate alınarak tarama aralığı 25-90° arasında olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar MAUD yazılımı ve oluşması muhtemel fazlar için CIF (Crystallography Information File) dosyaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmaların XRD piklerinin FWHM (Full Width Half Maximum)

değerleri Origin Pro yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır. Ayrıca piklerdeki kayma ve genişleme gibi etkilerin numuneler arasında kıyaslanması için de Origin Pro yazılımı kullanılmıştır.

5.4. Mekanik Özelliklerin ve Sertliğin Belirlenmesi

5.4.1. Çekme testi

Çekme testi malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için en yaygın uygulanan yöntemlerden birisidir. Çekme testi için numune hazırlanması malzemenin yapısında bulunabilecek anizotropi durumu düşünülerek farklı doğrultularda gerçekleştirilebilir. Bu testler ayrıca malzemenin çalışma koşulları düşünülerek farklı hız ve ortam sıcaklıklarında da yapılabilir. Bu çalışma kapsamında tedarik edilen Ti6Al4V sac malzemenin hadde doğrultusunda Şekil 5.12'deki ölçülerde çekme numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler 1 mm kalınlığındaki sac malzemenin tel erozyon yöntemi kullanılarak aynı yönde işlenmiştir. Boyutsal hassasiyeti yüksek olan bu metotta elde edilen ölçüler ve numune yüzey kaliteleri de testlerden önce kontrol edilmiştir.



Şekil 5.12. Çekme test numunesi ve ölçüleri.

Mekanik testler ile ilgili güncel eğilim küçük numuneler ve hassas cihazlar kullanarak testlerin gerçekleştirilmesi ve elde edilen değerlerin ise pratik uygulamalarda belirli düzeltme katsayılarıyla kullanılması yönündedir. Bu yaklaşımın avantajı test için harcanan maliyetin, zamanın ve emeğin azalmasıdır, dezavantajı ise hazırlanan numunelerde meydana gelebilecek küçük hataların nihai sonuçlara çok ciddi etkilerinin olma riskidir.



Şekil 5.13. Shimadzu AG-IS 250 kN çekme cihazı.

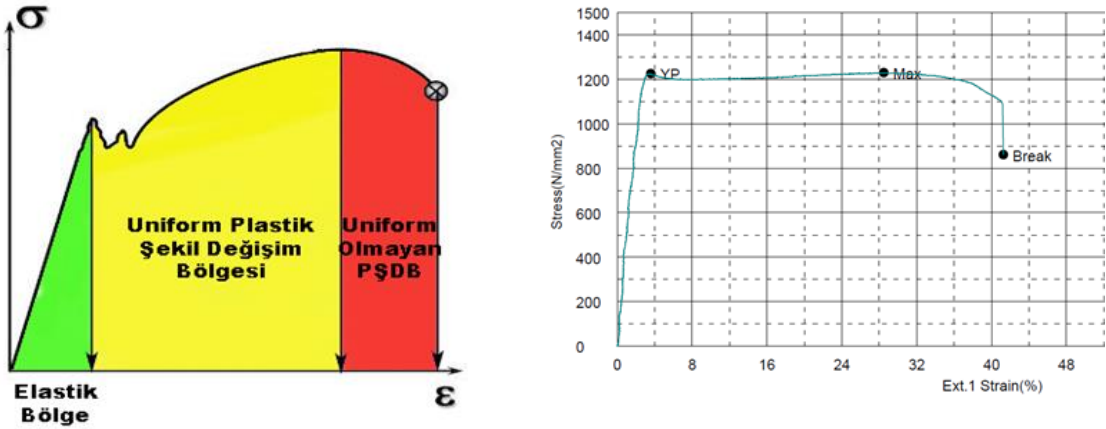
Çekme testindeki temel parametreler: Test edilecek numune boyutu, test sıcaklığı ve test hızıdır. Çekme testi kontrollü bir ortamda ve sıcaklıkta bir ucu sabit olan numunenin tek bir ekseninde sabit bir hızla çekilmesi ve bu süreçte ihtiyaç duyulan yük miktarının ve buna karşılık gelen uzama miktarının kayıt edilmesi prensibiyle çalışır. Bu işlem için gerekli olan kuvvetler malzeme kesitine bölünerek gerilme miktarı, uzama değerleri ölçü boyuna bölünerek gerilme değerleri hesaplanır. Testlerin farklı sıcaklık ve farklı gerilme hızlarında yapılması çekme eğrisinin karakteristiğini ciddi şekilde etkiler.

Bu çalışma kapsamında Çekme testi Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan universal çekme cihazında (Shimadzu AG-IS 250 kN) oda sıcaklığında ve statik koşulları temsil edecek şekilde 3 mm/dk hız ile yapılmıştır. Tel erozyon yöntemi ile hazırlanan numune boyutları Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Kullanılan numunelerin kalınlığı 1 mm olan sacdan üretilmiş olup ölçü genişliği 15 mm ölçü boyu ise 22 mm olarak belirlenmiştir. Ölçü boyu numunenin 15 mm genişliğindeki bölümün ortasına işaretlenmiştir. Testlerde kullanılan çekme cihazı ise Şekil 5.13’da gösterilmiştir.

Testlerde akma-çekme dayanımının yanında Şekil 5.14’de gösterildiği üzere Tokluk ve Plastik şekil verme kabiliyeti de hesaplanmıştır. Numunelerin tokluk değerleri deneyin başladığı andan kopmanın gerçekleştiği ana kadar denklem (5.1)’e göre hesaplanmıştır. İntegral alma işlemi nümerik olarak gerçekleştirilmiştir.

$$Tokluk = \int_0^{\varepsilon_k} \sigma d\varepsilon \quad (5.1)$$

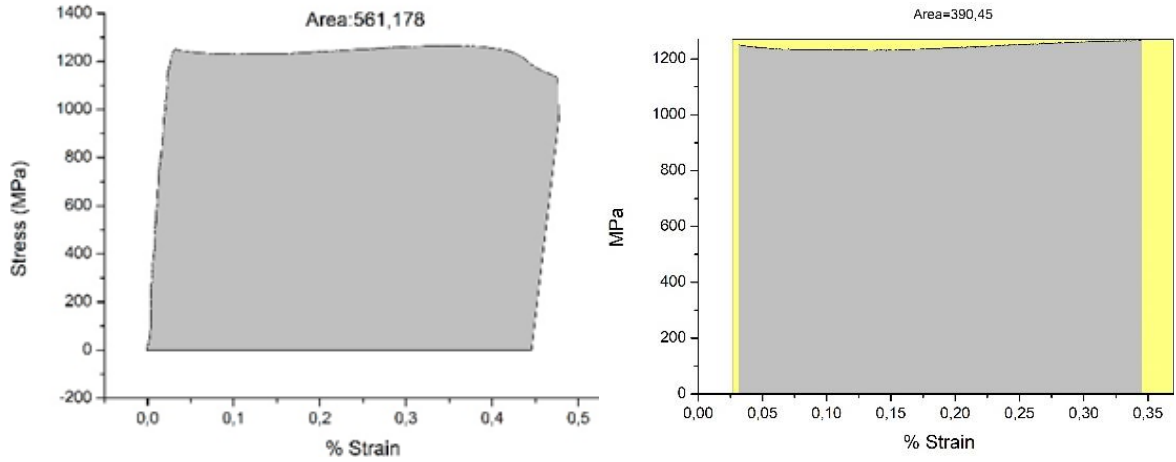
Farklı malzemeler farklı çekme eğrisi karakterizasyonu göstermektedir. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme-gerinme diyagramı elastik bölge, üniform plastik şekil değişim bölgesi ve üniform olmayan plastik şekil değişim bölgesi olarak üçe ayrılabilir. Bu bölgeler ve pratik olarak elde edilen çekme diyagramı örnek bir çekme diyagramı Şekil 5.14’da verilmiştir. Bu diyagramda yatay eksen gerinmeyi (ε) dikey eksen gerilmeyi (σ) göstermektedir.



Şekil 5.14. Çekme grafiği.

Plastik şekil verme uygulamalarında imal edilebilirlik kabiliyetinin iyi olması numunelerin akma anında uygulanması gereken kuvvetin dalgalanmamasına, geniş ve kararlı bir Uniform Plastik Şekil Değişim Bölgesi (2. Bölge) sunmasına bağlıdır. Çekme testinde maksimum yük noktası aşıldıktan sonra kopmanın ne zaman olacağını teorik olarak öngörülmesi oldukça zordur. Bu nedenle akma ile çekme gerilmesi noktalarının arasında kalan Şekil 5.14’de sarı renk ile ifade edilen 2.bölgenin mümkün olduğunca geniş olması arzu edilir.

Bu çalışmada plastik şekil verme kabiliyetinin bir ölçüsü olarak da üniform plastik şekil verme bölgesi alanı hesaplanmıştır. Hesaplamada deneysel olarak elde edilen gerilme ve gerinme noktaları kullanılmıştır. Bu noktalardan akma ve çekme noktaları arasında kalan kısım filtrelenmiştir. Bu kısmın altında kalan alan nümerik integral yöntemiyle Origin Lab Pro yazılımı yardımıyla hesaplanmış ve raporlanmıştır. Tokluk ve üniform plastik şekil değişim bölgesi hesabı için kullanılan örnek yaklaşım olarak izlenen metot Şekil 5.15’de gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Çekme deneyi numuneleri değerlendirme metodolojisi.

5.4.2. Sertlik Testleri

Sertlik; numunelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direncin bir göstergesidir. Sertlik testi numunelere uygulanan işlemlerin etkilerinin gözlenmesindeki en pratik yöntemlerden birisidir. Titanyum alaşımlarında uygulanan ısıl işlemlerin doğruluğu doğrudan sertlik ölçümü ile kontrol edilememekle birlikte yaşlandırma işlemi gibi uygulamalarda ölçülen sertlik değerleri yapılan işlem ve işlemin başarısı ile ilgili fikir vermektedir. Bu çalışma kapsamında öngörülen sertlik değişimleri görece küçük değişimler olduğundan bu değişimlerin gözlenebilmesi için mikrosertlik ölçüm yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu testler için silindirik çubuk numune yüzeyinden radyal yönde numuneler kesilmiş, metalografi yöntemleri kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin farklı bölgelerinden ölçüm alınarak sonuçların ortalama değer olarak verilmesinin uygun olacağı düşünülmüştür. Kullanılan cihaz ve uygulanan parametreler Şekil 5.16’de gösterilmiştir.



Baticı Uç: Elmas Piramit 136°

Uygulanan Yük: 100 gf

Bekleme Süresi: 10 saniye

Şekil 5.16. Numunelerin ortalama sertlik değerleri (HV).

5.5. Aşınma Testleri

Aşınma testleri malzeme çiftlerinin ve ortamların tribolojik özelliklerini karakterize etmek için kullanılan etkili bir yöntemdir. Aşınma davranışlarının belirlenmesi ve aşınma ömrünün tayini için geliştirilmiş farklı test metotları mevcuttur. Belirli bir uygulama için uygun olan test yöntemi ve test parametreleri, bu malzemelerin çalıştığı ortam koşulları ve malzeme özellikleri göz önüne alınarak belirlenir. Bu çalışmada Titanyum alaşımlarına uygulanan ısıtma işlemlerinin malzemede meydana getireceği tribolojik değişimlerin gözlenmesi amaçlanmıştır. Aşınma test numunelerinin maruz kalacağı yük düşünülerek aşınma numunelerinin silindirik çubuk numuneden hazırlanmasına karar verilmiştir. Numuneleri kaba olarak dilimlenmesinde kullanılan tel erozyon yönteminin yüzeyi etkilemiş olabileceği düşünülerek tel erozyon ile kesilen 22 mm lik dilimlerin ortasından numunelere herhangi bir işlem uygulanmadan önce hassas kesme diski ile alından ve çaptan kesme işlemi uygulanmıştır. Numuneler yaklaşık çeyrek daire olacak şekilde hazırlanmıştır. Numuneler test sırasında daha kolay tutulması ve yüzeyler arasındaki paralelliğin hassas şekilde sağlanması amacıyla kalıplanmıştır. Kalıplanan numuneler kontrollü olarak SiC zımpara ve elmas solüsyon ile parlatma işlemleri yapılarak hazırlanmıştır. Tüm numunelerin yüzeyleri test başlangıcında benzer durumda olabilmesi için tüm numunelere aynı işlem prosedürü uygulanmıştır. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,02 μm 'nin altında olacak şekilde hazırlanmıştır.

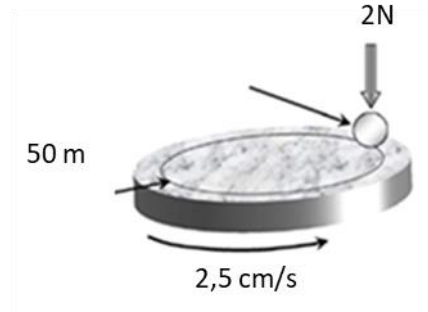


Şekil 5.17. Aşınma test düzeneği.

Testlerde kullanılacak olan yük miktarı Hertzian temas teorisi kullanarak belirlenmiştir, hız ve mesafe değerleri ise yapılan öncül çalışmalarla belirlenmiştir. Aşınma testlerinde anlamlı sonuçlar elde edebilmek için nispeten düşük yükler altında (2N) görece uzun mesafede (50m) kuru koşulda testler yapılmıştır. Yapılan öncül aşınma testinde kullanılan parametreler ile anlamlı sonuçlar elde edilebileceği düşünülmüş olup kullanılan aşınma testi düzeneği Şekil 5.17’de parametreleri Çizelge 5.5’de verilmiştir.

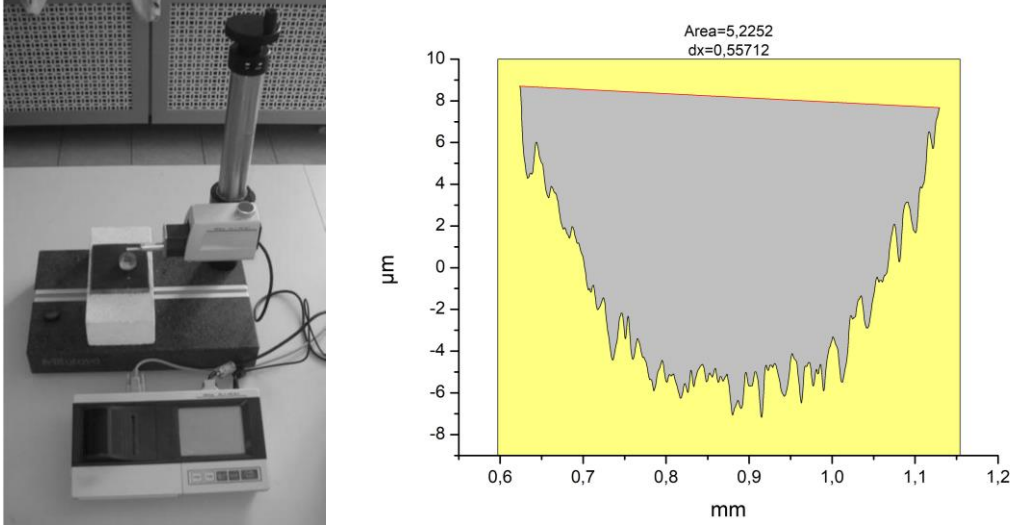
Çizelge 5.5. Aşınma test parametreleri.

Aşınma Test Parametresi	Büyüküğü
Yük	2 N
Gerilme	1,2 GPa
Mesafe	50 m
Dönme yarıçapı	2,5 mm
Hız	2,5 cm/s
Sıcaklık	21°C
Koşullar	Kuru
Karşı Cisim Özellikleri	Ø 3 mm WC Küre



Aşınma testleri, ball-on-disk geometrisinde DIN 50324 standardında göre yapılmıştır. Deneyleerde karşı cisim olarak Ø 3 mm, WC- %6 Co bilye kullanılmıştır. Bilyelerin sertliği 91,6 HRA, elastisite modülü 690 GPa, poisson oranı 0,22 olarak ürün sertifikasında verilmiştir. Bilyelerin küresellikleri ve bileşimleri de sertifika ile garanti altına alınmıştır. Deneyleerde bu düzeyde sert karşı cisim kullanılarak; aşınmanın sadece altlık malzemede oluşması hedeflenmiştir. Testlerde titanyum alaşımlarına uygulanması gereken yük miktarı alaşımın maruz kalacağı gerilme değeri hesaplanarak bulunmuştur, alaşımının poisson oranı 0,34 elastisite modülü de 113,8 GPa olarak alınarak temas gerilmesi Hertzian

temas teorisine (Takadoum & Takadoum, 2008) göre hesaplanmış yaklaşık olarak 1,2 GPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5.18. Aşınma testi ölçüm düzeni ve örnek aşınma alanı.

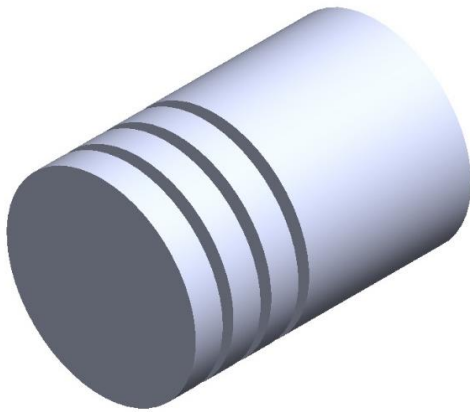
Testler Eskişehir Osmangazi Üniversitesi bünyesindeki Triboloji laboratuvarında Şekil 5.17’te gösterilen düzenekte yapılmış aşınma kanal genişliği ve derinliği hassas yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazıyla ölçülmüştür. Elde edilen veriler Origin Lab Pro yazılımı yardımıyla işlenerek aşınma kesit alanları hesaplanmıştır. Şekil 5.18’ te gösterilen düzenekle aşınan numune kesiti kanala dik gelecek şekilde farklı noktalardan ölçülmüş, bu ölçümlerden alınan veriler Origin Lab Pro yazılımıyla işlenmiştir. Aşınma alanı hesabında gauss filtresi ile filtrelenen ham verilerin oluşturduğu Şekil 5.18’de gri renkle gösterilen aşınma kesitinin alanı hesaplanmıştır. Aşınma kesiti ölçümü farklı noktalardan yapılarak ortama değerler alınmış ve bu ortalama aşınma alanı kullanılarak aşınma hacmi denklem (5.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Spesifik aşınma oranı ise test sonuçlarını yük ve mesafe gibi test parametrelerinden arındırarak daha universal bir hale getiren bir yaklaşımdır. Spesifik aşınma oranı da denklem (5.3) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_{aşınma} = 2\pi r A_{ort} \quad (5.2)$$

$$Spesifik\ Aşınma\ Oranı = \frac{V_{aşınma}}{Yük.Mesafe} \quad (5.3)$$

5.7. İmal Edilebilirlik Testleri

İmal edilebilirlik genel anlamda tüketilen kaynak (Enerji, takım, sarf malzeme, zaman vb) miktarına karşın elde edilen ürün miktarıyla ilişkilidir. İmal edilebilirlik testi için kullanılacak uygulama olarak tel erozyon yöntemi seçilmiştir. Bu seçimde numunelerin imal edilebilirlik karakterinin gözlenmesinin kolay olması ve zor işlenen malzemeler için elektro erozyon yöntemlerinin yaygın kullanılması etkili olmuştur. İmal edilebilirlik testleri için önceden dilimlenmiş silindirik çubuk numuneden tel erozyon yöntemi ile Şekil 5.19'daki geometride hazırlanmıştır. 22 mm kalınlığında imal edilebilirlik test numunesi olarak kesilmiş işlem uygulanmış numuneler kullanılmıştır. Bu numunelerin uç kısımlarından 5 mm genişliğinde kesimler molibden tel kullanılarak kesilmiştir. İşlem süresince ve sonrasındaki işlem performansı ve yüzey kalitesi gözlenerek raporlanmıştır. Her grup için 3'er numune test edilmiştir. Sonuçlar ortalama değerler üzerinden verilmiştir.



a)



b)

Şekil 5.19. Tel erozyon test numunesi temsili gösterimi (a) testlerde kullanılan tel erozyon tezgâhı (b).

İmal edilebilirlik testi Yılmazlar Makine bünyesindeki tel erozyon (CNC Multiple Cut WEDM 4050T6H40-GOLD SAN CNC) tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Testlerde elektrot malzemesi olarak 0,18 mm kalınlığındaki molibden tel kullanılmıştır. Testler 35 mm çapındaki numunelerin radyal yönde dilimlenmesi şeklinde tatbik edilmiştir. İşleme parametreleri tüm numuneler için sabit tutulmuş uygulanan ısıl işlemlerin, işleme performansı ve ürün kalitesine olan etkileri incelenmiştir. Testlerde kullanılan işlem parametreleri Çizelge 5.6' da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Tel Erozyon işlem parametreleri.

Deneysel Parametreler	Açıklama
İş Parçası Malzemesi	Ti6Al4V
Elektrot Malzemesi	Molybdenum Tel Ø 0,18mm
Polarite	İş parçası –ve Elektrot +ve
Peak Akımı	4A
Peak Gerilimi	26V
Gap Voltajı	6V
Pulse on time	220µs
Pulse off time	80µs
Dielektrik Sıvı	JR3a-Su 1:40 oranda
Dielektrik Sıvı	0,5 kg/cm ² basınçla Tel üzerinden akan sıvı
Kesme Derinliği	Ø35mm
Tel Hızı	11 m/s

İşleme parametreleri numune boyutları ve literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak ve firma yetkilisinin de tavsiyeleri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Kesme işleminde açık kısımdan tel ile iş parçası arasında ark oluşumu ile sağlanmıştır. İlerleme hızı tel erozyon tezgâhı tarafından elektro erozyon hızına göre otomatik olarak kontrol edilmiştir.

İmal edilebilirlik testi olarak gerçekleştirilen bu testte numuneler aynı kesme parametreleriyle tekrarlı olarak kesilmiştir. Her işlemde kesme zamanı arkın başladığı andan bittiği ana kadar geçen süre süreölçer ile kayıt altına alınmıştır. İşlem öncesi tüm numuneler hassas terazi kullanılarak tartılmış Malzeme Kaldırma Oranı MKO (Material remove rate) olarak hesaplanmıştır. Takım aşınması oranı da ölçülmek istenmiş ancak kullanılan işleme parametrelerinde 2 metre uzunluğundaki molibden telde anlamlı ölçüde ağırlık kaybı gözlenememiştir. Denklem (5.4)'e göre ölçülen süre dakikaya çevrilmiş ve malzeme yoğunluğu olarak da 4,43 g/cm³ alınarak malzeme kaldırma oranı hesaplanmıştır.

$$MKO \left(\frac{mm^3}{dk} \right) = \frac{(W_{ilk} - W_{son}) * 1000}{\rho * t} \quad (5.4)$$

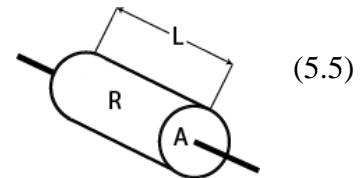
İmalat edilebilirlik ölçütlerinden birisi de ortaya çıkan yüzeylerin kalitesidir. Yüzeylerin karakterizasyonu ise yüzey pürüzlülüğü, sertlik dağılımı, yüzey ile ana malzeme arasındaki mikroyapı farkı gibi parametrelerin gözlenmesiyle izlenir. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertlikleri de ölçülüp raporlanmıştır.

5.8. Korozyon ve Elektrokimyasal Özelliklerin İncelenmesi

5.8.1. Elektrik iletkenliği testleri

Elektriksel iletkenlik numunenin içyapısı, dislokasyon yoğunluğu, dislokasyon dağılımı ve malzemenin iç geriliminden etkilenen bir özelliktir. Genellikle elektriksel iletkenlik termal iletkenlikle de paralel karakter göstermektedir. Bu anlamda uygulanan ısı işlemlerin, malzemenin imal edilebilirliğine ve içyapıya olan etkilerinin gözlenmesi için izlenebilecek bir parametredir. Elektriksel iletkenlik ölçümü silindirik çubuk olarak tedarik edilen ve daha öncesinde 22 mm kalınlığa dilimlenmiş halde ısı işlem uygulanan numunelerden alınan 35 mm çapında 5mm genişliğinde kuponlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektriksel iletkenlik testi 4 nokta ölçüm tekniği kullanılarak GOM-802 elektriksel iletkenlik ölçüm cihazı ile belirlenmiştir. Bu cihaz 4 nokta kullanarak test için bağlanan cismin elektriksel direncini mohm cinsinden ölçmektedir. Kullanılan yöntemde ölçülen direnç değeri, test edilen numune boyutlarıyla orantılıdır. Bu durumun önüne geçmek için ölçülen değerler denklem (5.5) yardımıyla numune boyutundan bağımsız hale getirilmiş ve elektriksel iletkenlik hesabında kullanılmıştır.

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L}$$



Şekil 5.20 Elektriksel iletkenlik hesabında kullanılan formül

Denklem (5.5) ile ifade edilen formülde R ölçülen direnci, A silindirik numune kesit alanını L ise silindirik numune uzunluğunu ifade etmektedir. Bu işlemin doğası ve kullanılan metot gereğince ölçüm yapılacak olan numunelerin boyutları ölçüm sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle ölçüm için kullanılacak numuneler tel erozyon yöntemiyle yüzeyler arasındaki paralellığe dikkat edilerek hassas olarak $5 \pm 0,02$ mm kalınlığa dilimlenmiştir. Bu işlemden sonra numuneler hassas terazide tartılarak ortaya çıkan küçük farklar da numunelerin aynı çapa sahip olduğu kabulüyle uzunluk farkına yansıtılarak telafi edilmiştir.

5.8.2. Korozyon testleri

Titanyum alaşımları üstün korozyon direncine sahip olmalarıyla tanınırlar. Metaller arasında Titanyum standart olarak galvanik karakterde 1,63 voltluk bir karakter gösterir ki bu değer alüminyuma oldukça yakındır. Bu açıdan titanyumun üstün bir soy yapı gösterdiği söylenemez. Buna rağmen titanyumun pek çok farklı ortamda üstün korozyon direnci gösterdiği bilinmektedir. Bu durumunun temel nedeni titanyumun yüzeyinde oluşan kararlı ve koruyucu tabakadır. Bu tabaka genellikle TiO_2 den oluşan oksit tabakasıdır. Bu tabaka pek çok durumda yapısal bütünlüğünü korur, hasara uğradığında ise hızlı bir şekilde tekrar oluşur. Oksit filminin oluşmasına imkân sağlayan ortamlarda titanyum korozyona karşı oldukça dirençlidir. Bu ortamlara örnek olarak tuz çözeltileri (klorürler, hipoklorürler, sülfatlar ve sülfürler), nitrik ve kromik asit çözeltileri verilebilir. Buna karşın titanyum alaşımı oksit tabakasının kırıldığı indirgen ortamlarda korozyona karşı dirençli değildir. Bu ortamlara örnek olarak sülfürik, hidroklorik ve fosforik asitler verilebilir. Titanyum alaşımlarının korozyon direncini artırmak için yüzey filminde oksit tabakasını etkileyecek işlemler yapılır. Pasivasyon olarak bilinen bu işlemde, ürün yüzeyde oksit tabakası oluşturulmuş halde piyasaya sunulur. Titanyum borular ve kaplarda korozyon direncini artırmak için bu yöntem yaygın olarak kullanılır. Pasivasyon yapılmış titanyumun deniz suyundaki potansiyeli nikel alaşımlarına yakındır. Titanyum alaşımlarının yapılarında karbür, sülfür, oksit gibi özel yapılar çok fazla olmadığı için de özellikle çukurcuk (pitting) korozyonuna karşı nikel alaşımlarından daha üstün korozyon dayanımı gösterirler (Leyens ve Peters, 2003).

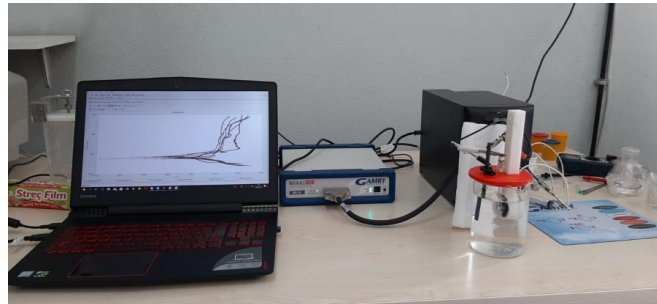
Titanyum alaşımları farklı ortamlarda gösterdiği korozyon dayanımının yüzey yapısını ve içyapıyı etkileyen işlemlerden etkilenmesi olasıdır. Bu nedenle kriyojenik işlemin diğer özelliklere olan etkilerinin yanında korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi de oldukça önemlidir. Bu amaçla korozyon testi yapılmasına karar verilmiştir. Korozyon testleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Triboloji Laboratuvarında bulunan Şekil 5.21’de gösterilen GAMRY Interface 1000 model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları aynı üniteye bulunan Gamry Echem Analyst yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Testlerde kullanılan numuneler korozyon testine uygun soğuk kalıplama malzemesi kullanılarak kalıplanmıştır. Tüm numunelerin test edilen yüzeyleri silindirik çubuk numuneden eksenel yönde hassas

SiC kesme diski ile dilimlenen örneklerden seçilmiştir. Numuneler kalıplandıktan sonra metalografik olarak homojen koşullarda hazırlanıp testlere tabii tutulmuşlardır. Teste tabii tutulan numunelerin yüzey alanı 1 cm² olacak şekilde hazırlanmıştır. Testler oda sıcaklığında 500 mL'lik beherde %0,9 izotonik sodyum klörür serum kullanarak gerçekleştirilmiştir. Bu sıvının seçilmesindeki amaç bu elektrolitin vücut sıvısına benzer karakter göstermesi dolayısıyla korozyon etkisinin biyomedikal koşullar için incelenmesi için uygun olmasıdır (Kimura, 2000). Vücut sıvısının ve izotonik çözeltinin karşılaştırması Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Korozyon testlerinde kullanılan izotonik çözelti ve vücut sıvısının karşılaştırılması.

[mEq/l]	Vücut Sıvısı	İzotonik Sodyum klörür çözeltisi
Na ⁺	140	154
K ⁺	6	-
Ca ⁺	4	-
Mg ⁺	2	-
Cl ⁻	102	154

Testlerde numuneye birlikte standart bir gümüş klörür elektrodu referans elektrot olarak ve bir grafit çubuk da karşı elektrot olarak kullanılmıştır. Aynı koşullar altında numuneler iki farklı teste tabii tutulmuşlardır. Bu testlerden ilki açık devre potansiyel (The open circuit potential (OCP)), ikincisi potansiyodinamik polarizasyon testidir. Testlerde anlık olarak her 0,5 saniyede bir veri alınarak E_{corr} zaman eğrisi elde edilmiştir. Testler iki grup için de 1 saat sürecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik testi de 1 V ile + 4 V aralığında 2 mV/s tarama hızı kullanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.21. Korozyon test düzeneği.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara neden olduğu düşünülen etkilerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Değerlendirmeler her bir test için münferit olarak gerçekleştirilmiş ve raporlanmıştır.

6.1. Karakterizasyon Çalışmaları

Karakterizasyon çalışmaları kapsamında yapılan ilk işlem tedarik edilen numunelerin doğrulama işlemidir. Şekil 5.1’de verilen akış diyagramındaki prosedür izlenmiştir. Malzeme tedarik edildikten sonra sertifikaları kontrol edilmiş ve mikroyapı ve sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Silindirik çubuk ve sac malzemeler için sertifikalarda verilen kimyasal kompozisyon oranları Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2 de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre numune doğrulaması sac ve silindirik çubuk malzeme için yapılmıştır.

Çizelge 6.1 Ti6Al4V Silindirik çubuk numunesi sertifikadaki kimyasal kompozisyon bilgileri

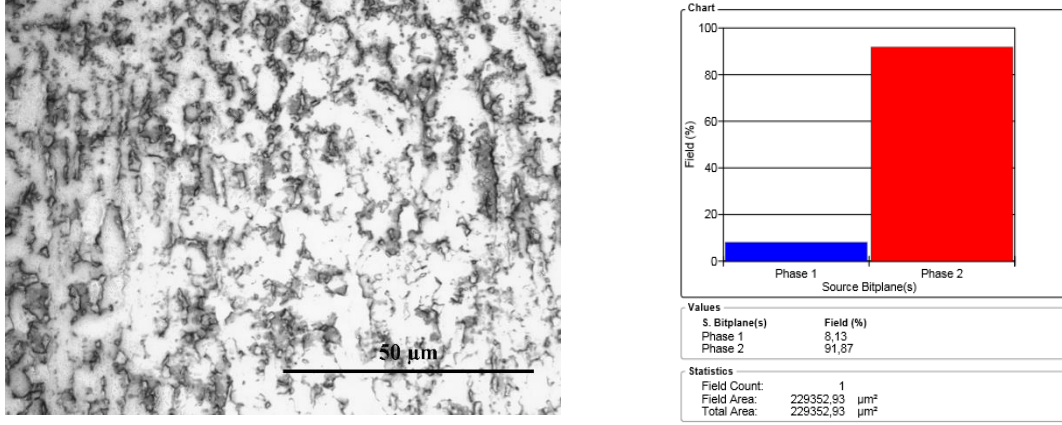
Element %	Al	V	C	Fe	O	Ti
Ortalama	5,5 – 6,75	3,5 – 4,5	≤ 0,080	≤ 0,40	≤ 0,20	Kalan

Çizelge 6.2. Ti6Al4V Sac numunesi sertifikadaki kimyasal kompozisyon bilgileri

Element %	Al	V	C	Fe	O	Ti
Ortalama	5,5 – 6,75	3,5 – 4,5	≤ 0,080	≤ 0,40	≤ 0,20	Kalan

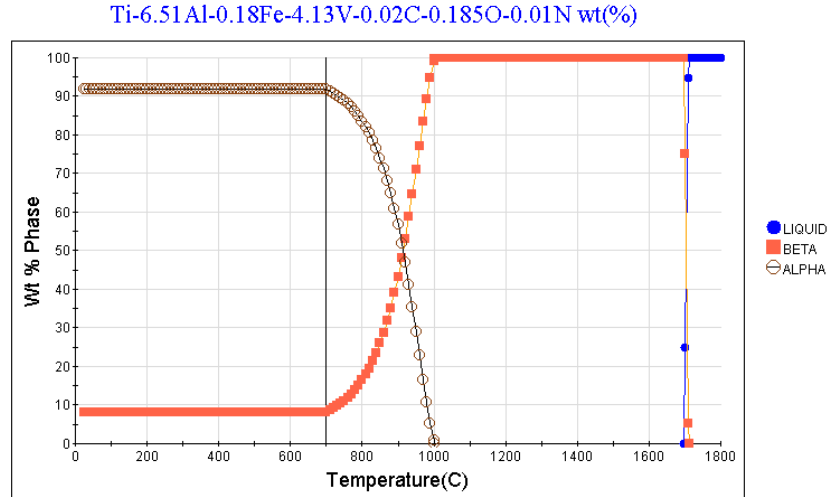
Titanyum silindirik çubuk ve plaka Grade 5 ve ASTM B265 standardında tedarik edilmiştir. Bu standarttaki alaşımlar işlem görmeden 700°C’de yumuşatma tavlama yapılmış haldedir. Bu alaşım ve tavlama sıcaklığına göre teorik olarak beklenen faz dağılımı yaklaşık olarak %92 α , %8 β fazı şeklindedir. Yapının faz oranları miktarında uygulanan tavlama sıcaklığı ve malzeme ısı işlem geçmişi oldukça önemlidir.

Bu aşamada tedarik edilen silindirik çubuk malzemeden mikro yapı analizi ve α - β kontrast farkından faydalanarak öncül bir faz analizi testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analize göre alınan mikro yapı ve faz oranları Şekil 6.1’te verilmiştir.



Şekil 6.1 Referans Ti6Al4V malzeme mikro yapısı ve faz oranları

Malzemenin tane boyutu ve tavlama sıcaklığı kullanılarak CALPAD (Hesaplamalı faz diyagramı) tekniği ile hesaplanan faz diyagramı Şekil 6.2’te verilmiştir. Bu diyagrama göre yapıdaki α fazının β fazına dönüşümü 700°C ’de başlamaktadır ve yapıdaki α fazının tamamı 1000°C ’de β fazına dönüşmüş olmaktadır.



Şekil 6.2 Ti6Al4V Faz dönüşüm diyagramı

Bu yöntemde koyu renkteki faz β fazını açık renkteki matris ise α fazını göstermektedir. Bu sonuçlara göre Şekil 6.2’te gösterilen diyagrama göre 700°C ’deki yumuşatma tavlama sonrasında yapıda %8 civarında olması beklenen β fazının oranı,

tedarik edilen numunede bu değere oldukça yakın olarak tayin edilmiştir. Bu verilere ve malzeme sertifikalarına göre numune doğrulama işlemi tamamlanmıştır.

6.1.1. Optik mikroskop ile yapılan çalışmalar

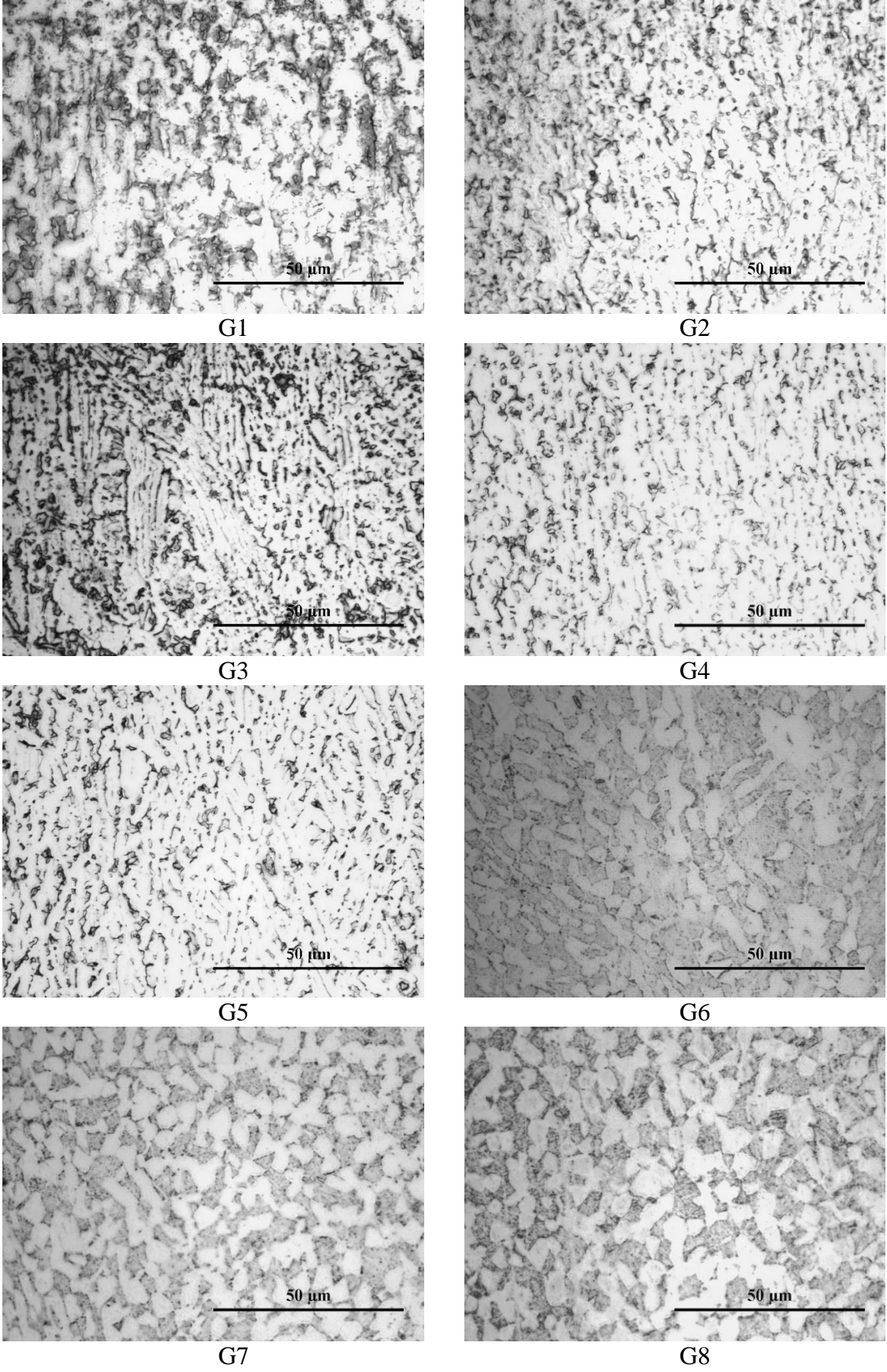
Optik mikroskopta inceleme yapmak için silindirik çubuk numunelerden alınan numuneler kullanılmıştır. Görüntü alma öncesi numuneler bir daireyi dörde bölecek şekilde kesme diski kullanarak kesilmiş ve yine alın yüzeyleri üzerinden incelemeler gerçekleştirilmiştir. Titanyum numunelere ısıl etki minimum olacak şekilde kesilebilmesi için Silisyum karbür (SiC) disk kullanılmıştır. Seçilen numuneler kesme diski ile soğutma sıvısı yardımıyla kesildikten sonra yaklaşık 180°C sıcaklıkta 3 dakika süre ile sıcak olarak kalıplanmışlardır. Numunelerin yüzeyi Struers Tegraforce otomatik zımparalama ve parlatma cihazında hazırlanmıştır. Kaba zımparalama işlemi iki kademedede 220, 600 grid manyetik zımpara ile soğutmada su kullanılarak yapılmıştır. Titanyum yüzeyi kolay çizilen bir malzeme olduğu için ilave olarak 1200 ve 2400'lük zımpara ile ince zımparalama işlemi yapılmıştır. Her kademe zımparalama işleminde bir numune üzerine 15 N yük uygulanmış ve 10 dakika sürede pnömatik tutucu kullanılarak zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Parlatma işlemi de benzer şekilde pnömatik destekli cihaz yardımıyla yapılmıştır. İnce zımparalanmış numunelerin parlatılması için 3 µm elmas solüsyonu ve uzun tüylü çuha kullanılmıştır. Parlatılan numuneler, Kroll dağlayıcısı ile kontrollü olarak dağlanmıştır. Dağlama işlemi numunelerin yüzeylerinin zarar görmemesi için daldırma yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan mikroyapılar incelendiğinde kriyojenik işlemin optik mikroskop yardımıyla göz ile ayırt edilebilecek bir değişime yol açmadığı görülmüştür. Yaşlandırma işlemi gören numunelerde β fazının toplanarak sepet görünümüne benzer yapı oluşturduğu görülmüştür. Kriyojenik işlemin mikroyapıda açık ve koyu renkteki bölgelerin oranını etkilediği saptanmıştır. Bu amaçla 1000X büyütme alınan mikroyapılar kullanılarak faz analizi gerçekleştirilmiştir.

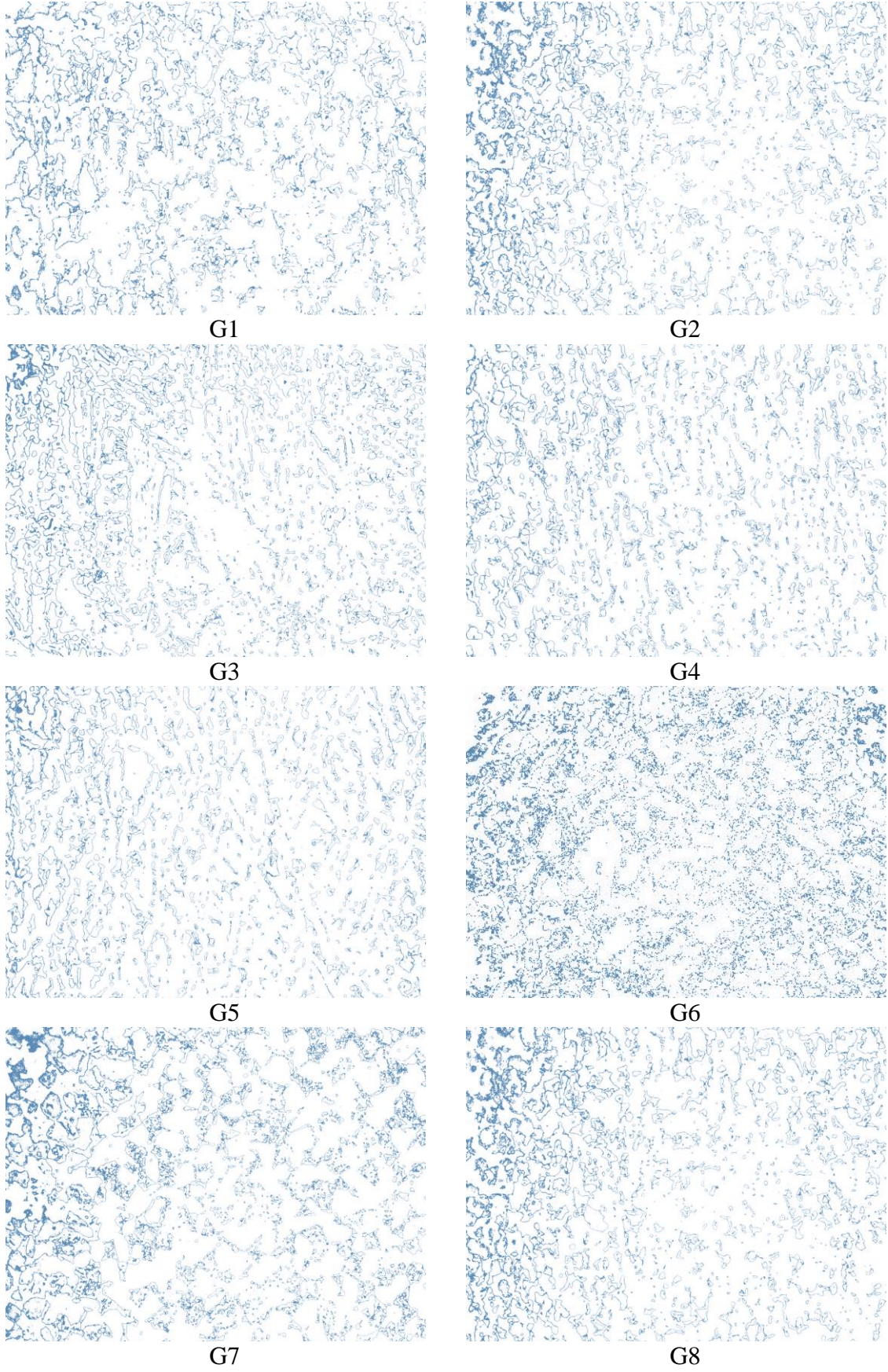
Şekil 6.3'de 1000X büyütme ile alınan mikroyapılar verilmiştir. Elde edilen mikroyapılar görüntü işleme tekniği kullanılarak işlenmiştir. β fazı mavi renkli α fazı ise açık renkli olacak şekilde fazların yüzey alanları ölçülüp oranlanmıştır. Bu işlemin sağlıklı olarak yapılabilmesi için tüm numunelerin mikroyapıları aynı ışık ve ortamda alınmıştır. Tedarik edildiği haldeki numunenin yapısında olması beklenen β faz oranı %8,1 olacak şekilde

renklendirme ve filtreleme işlemi yapılarak görüntü işleme yazılımı kalibre edilmiştir. Bu kalibrasyon diğer numuneler için de kullanılmıştır. Bu işlemler için IMAJEX yazılımı kullanılmıştır.

Şekil 6.4'de işlenen mikroyapılarda β fazı mavi renk ile gösterilmiştir. Bu aşamada izlenen yol ise benzer bir çalışmada aktarıldığı (Gu vd., 2013) şekilde uygulanmıştır.



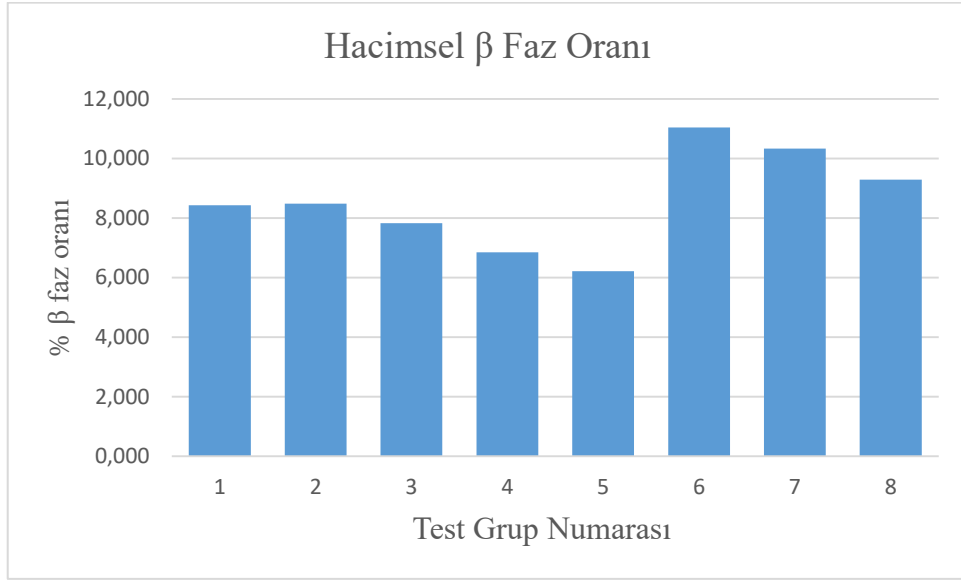
Şekil 6.3. Numunelere ait mikroyapı (1000X) görüntüleri



Şekil 6.4. Görüntü işleme işlemi sonucunda düzenlenen mikroyapılar 1000X.

Görüntü işleme tekniği ile elde edilen mikroyapılar

Şekil 6.4'de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda farklı numunelerin β fazı miktarının tüm yapıya olan oranını grafiksel olarak Şekil 6.5'da gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre sıg kriyojenik işlem uygulanmasının yapıdaki faz oranında önemli bir değişime yol açmadığı ancak derin kriyojenik işlem uygulanmasının β - α faz dönüşümünde etkili olduğu söylenebilir. Yaşlandırma işlemi uygulanması da β fazı oranını artırmıştır. Yaşlandırma işleminde çözeltiliye alma öncesinde kriyojenik işlem uygulanması ise yapıdaki β fazının oranını azaltmıştır. Bu sonuçlara baktığımız zaman β fazının kriyojenik işlem ile birlikte dönüşüme uğradığı yapıdaki miktarı ve dağılımının değiştiği söylenebilir.

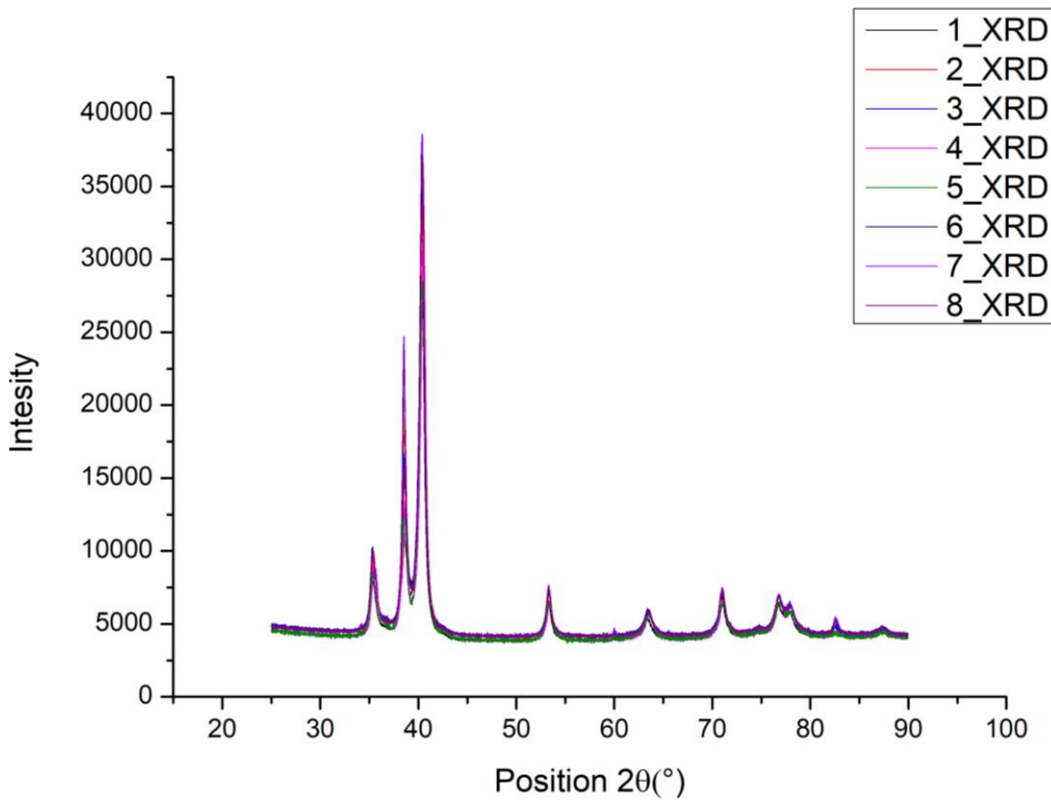


Şekil 6.5. Numunelerden görüntü işleme tekniği ile elde edilen β faz oranları.

Uygulanan derin kriyojenik işlemin etkisi ile β fazının α fazına dönüşmesinin faz-sıcaklık diyagramı göz önüne alındığında beklenen bir durum olduğu söylenebilir. Kriyojenik sıcaklıklardaki difüzyon hızının ve dislokasyon hareketlerin yavaş olmasından dolayı işlem süresinin faz dönüşümü üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Gözlenen dönüşüm trendi literatürdeki öncül çalışmalarla uyumludur (Gu v.d 2013).

6.1.2. XRD tekniği ile yapılan çalışmalar

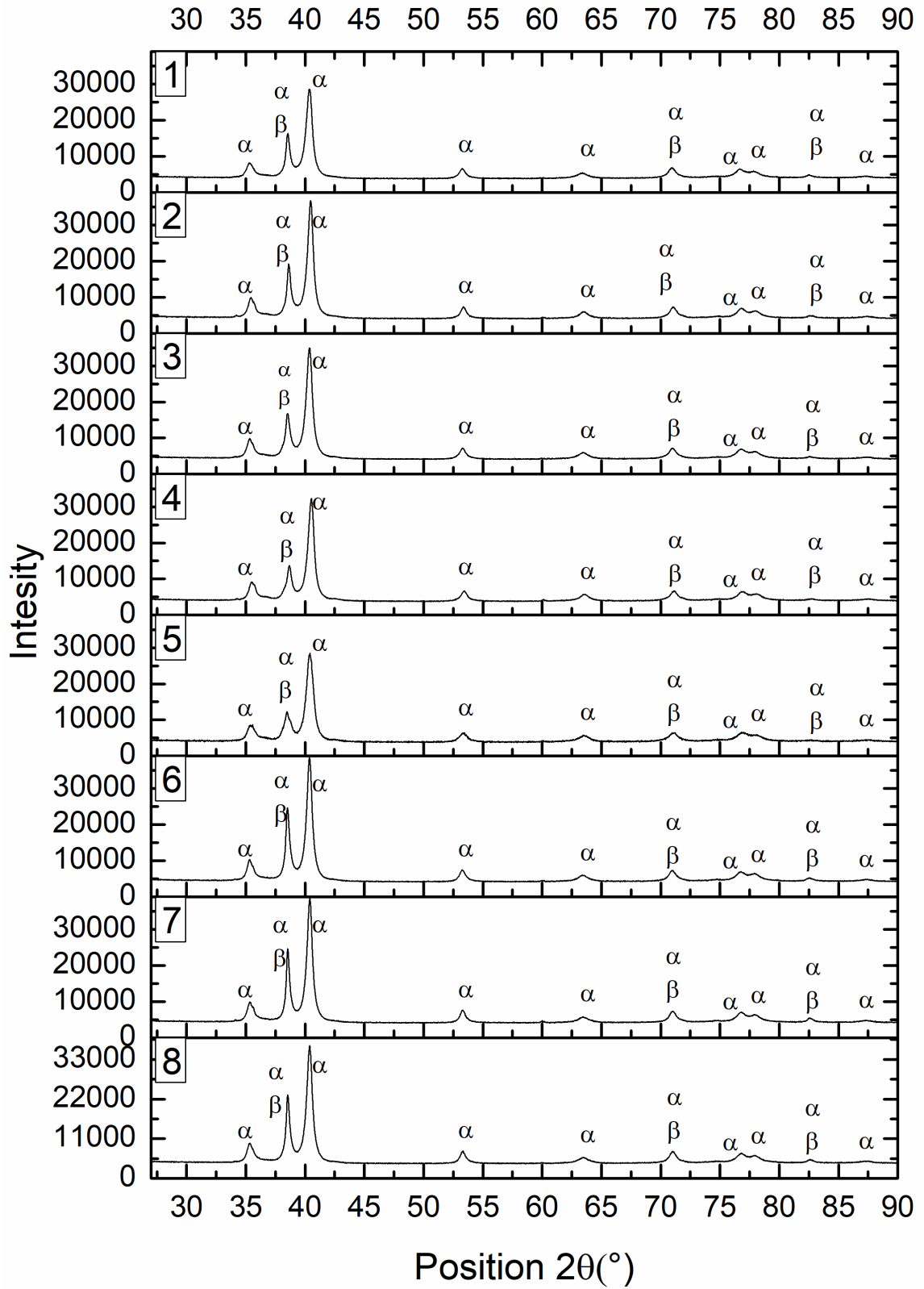
Kriyojenik işlemin malzemenin içyapısında meydana getirdiği değişimleri ortaya koymak için izlenen bir diğer yol da X işını difraksiyon yöntemidir. Bu yöntemle analiz edilen yüzey, optik mikroskop kullanılarak analiz edilen yüzey ile aynı doğrultuda seçilmiştir. XRD analizi silindirik çubuk numunelerden hassas kesme diski ile kesilen dilimlerin merkezinden lum alacak şekilde hazırlanmıştır. Numunelerden elde edilen piklerin aynı grafikte çizilmiş hali şekil 6.6'da ayrı ayrı çizilmiş olan hali ise şekil 6.7'de verilmiştir.



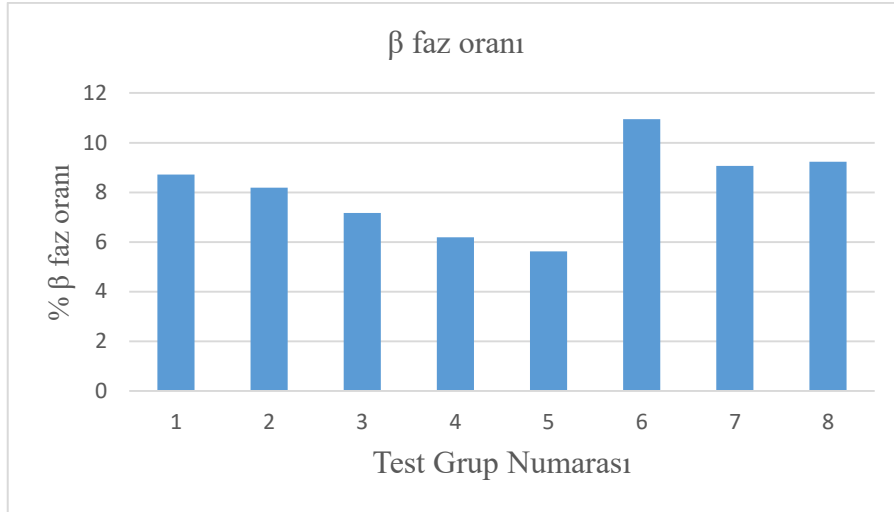
şekil 6.6 XRD paternlerinin st üste gösterimi.

XRD paternlerindeki piklerin genişlikleri ve şiddetleri yüzey bütünlüğü kalıntı gerilme miktarı ve tane yapısı ile ilgili bilgi vermektedir (Vashista ve Paul, 2012). Mikroyapı analizinde kriyojenik işlem etkisi ile $\beta \rightarrow \alpha$ faz dönüşümü meydana geldiği optik mikroskoptan alınan yapılar incelenerek ve faz analizi yapılarak belirlenmişti. Görüntü işleme tekniği ile yapılan faz analizinin yanında, bu etkinin XRD tekniği ile elde edilen difraksiyon paternlerinden faydalanılarak da saptanması için elde edilen pikler analiz edilmiştir. Bu işlemin yapılabilmesi için numunelerin XRD paternleri ölçülmüştür. Bu

paternlerin karşılaştırılması için yapıda bulunabilecek tüm fazlar için, literatürdeki veritabanları incelenmiştir. Yapıda olması muhtemel tüm fazlar için CIF (Cristallography information File) dosyaları temin edilmiştir Kullanılan CIF dosyaları PDF-4+ 2018 yazılımı yardımıyla üretilmiştir. XRD paternleri ve CIF dosyaları MAUD yazılımı kullanılarak Rietveld analizi yapılmıştır. Şekil 6.7.'de tüm numuneler için ayrı ayrı XRD paternleri verilmiştir. Rietveld analizi ve literatürdeki veriler kullanılarak da hangi pikin hangi fazdan kaynaklandığı Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Yapılan Rietveld analiz sonucuna göre farklı numuneler için β faz oranları Şekil 6.8'da verilmiştir.

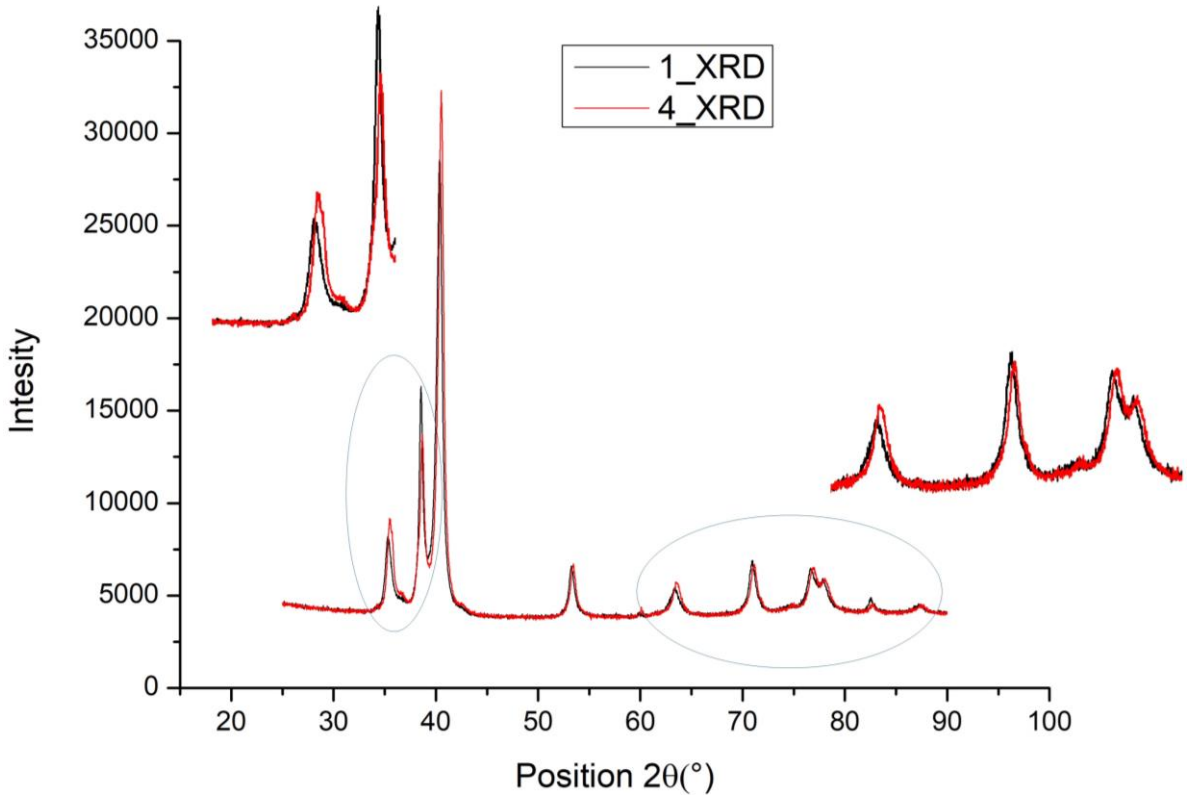


Şekil 6.7. Numunelerin XRD paternlerinin ayrı gösterimi.



Şekil 6.8. Rietveld Analizine göre β faz oranları.

XRD paternlerinin yazılım kullanılarak analiz edilmesinin yanında, piklerin üst üste çizdirilerek, yapılan işlemlerin piklerde meydana getirdiği değişimlerin münferit olarak ve referans numunedeki piklerle karşılaştırmalı olarak da incelenmesi mümkün olmuştur. Şekil 6.9’da referans Grup ile 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanmış numunenin pikleri üst üste çizilmiş halde gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde 4.gruba ait olan piklerin referans gruba ait piklere göre genişlediği ve bir miktar sağa doğru kaydığı görülmektedir. Özellikle 38° deki baskın olan β pikindeki şiddetin azalması β fazının dönüşümü ile ilgili bulguları desteklemektedir. Alfa fazının baskın olduğu $35^\circ, 42^\circ$ ve 63° de ise piklerin şiddeti artmış, genişlemiş ve bir miktar sağa doğru kaymıştır. Bu gözlemler ise α fazı oranındaki artışı ve tanelerin düzenlenmiş (refine) olduğunu göstermektedir. Piklerin kayması ise yapıdaki iç gerilmelerin azaldığına yapının daha kararlı hale geldiğine işaret etmektedir. Referans numuneye göre kriyojenik işlem görmüş numunelerin piklerinde gözlenen değişimlerin sığ kriyojenik işlem görmüş numunelerde daha az; derin kriyojenik işlem görmüş numunelerde daha belirgin olduğu belirlenmiştir. XRD analizlerinden gözlemlenen bu bulguların yanında literatürde kriyojenik işlemin ikizlenme mekanizmasını artırdığı (Gu vd., 2018), kalıntı gerilme miktarını azalttığı, dislokasyonları düzenleyerek malzemelerde elektriksel iletkenliğinin artmasında da (Nadig vd., 2012) önemli etkisi olduğu literatürde yapılan çalışmalarda raporlanmıştır (Gu vd., 2014).

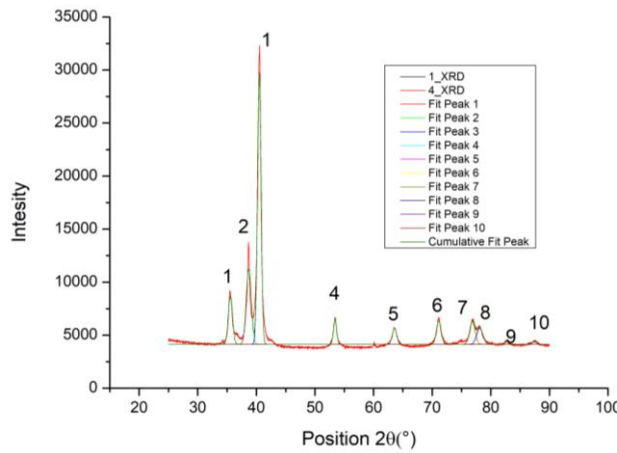


Şekil 6.9. G1 ve G4 ün XRD analizleri.

Grup 5'in XRD analizine baktığımızda ise β - α faz dönüşümünün etkin olduğu gözlenmektedir. β fazının baskın olduğu piklerin şiddetinde ise azalma gözlenmiştir. Grup 4 ve Grup 5'in XRD analizleri karşılaştırıldığında artan kriyojenik işlem süresi ile piklerin genişlemesi ya da kayması etkisi bariz olarak gözlemlenmemiştir. Bu bağlamda Grup 5'in XRD analizinin Grup 4'e oldukça benzer yapıda olduğu söylenebilir. Bu sonuçlar da faz analizi sonuçlarıyla da uyumludur. Titanyum faz dönüşüm sıcaklık diyagramında denge halinde sıcaklığın azalmasıyla yapıdaki β fazının α fazına dönüşme eğilimi artmaktadır. Kriyojenik işlem sıcaklığının azalması ve işlem süresinin artması ile dönüşüm daha bariz olarak gözlenmiştir.

Elde edilen analiz sonucunun β ve α fazlarının piklerinde gözlenen değişimlerin yanında FWHM (full width at half maximum) değerlerindeki değişimler de yapıda meydana gelen değişimlerin anlaşılması için faydalıdır. Literatürde pik şiddetleri ve piklerin FWHM değerlerinin bazı malzeme özellikleri ile korelasyon gösterdiğini belirten çalışmalar mevcuttur. FWHM ölçümleri tane çarpılması, dislokasyon yoğunluğu ve kalıntı gerilme miktarı gibi durumlardan etkilendiği için malzemelerin durumu ile ilgili önemli ipuçları

vermektedir (Vashista & Paul, 2012). Tane kusurlarındaki artış, tane yapısını etkilemekte ve FWHM değerinde artışa neden olmaktadır (Tung vd., 2009). Yapıda bulunan artık çekme gerilmesi FWHM değerinin artmasına neden olurken yapıdaki zararlı kalıntı çekme gerilmesinin azalması FWHM değerlerinin düşmesine neden olur (Rai vd., 1999). Bu çalışmalara göre FWHM değerinin azalması istenen bir durumdur. Bu nedenle Grup 1 ve Grup 4'ün tüm pikleri analiz edilmiş ve FWHM değerleri hesaplanarak Şekil 6.10'da verilmiştir. Değerler incelendiği zaman α fazının etkin olduğu açılarda Grup 4'ün XRD analizinde Grup 1'e göre FWHM değerlerinin düştüğü yalnızca β fazının etkin olduğu 2,6 ve 9 numaralı piklerde artış olduğu gözlenmiştir. Bu artışın sebebi piklerin şiddetlerinin β fazının azalmasıyla birlikte zayıflamasıdır. Diğer piklerde α faz oranı artmasına rağmen görülen düşüş ise yapının düzenlendiği ve kalıntı gerilme miktarının azaldığına işaret ettiği düşünülmektedir. Kalıntı gerilmeler cevher halinden yarı mamül haline gelirken ya da nihai ürüne dönüşürken uygulanan deformasyon ve talaşlı imalat işlemlerinin sonucu olarak ortaya çıkar. Temel nedeni üniform olmayan soğuma koşulları, uygulanan deformasyon etkisiyle yapının kalıntı gerilme oluşturmasıdır. Kriyojenik işlemde çok düşük sıcaklıklarda malzeme moleküller arası boşluklar azalmakta yapıdaki taneler ve dislokasyonlar düzenlenmektedir. Bu düzenlenme etkisi de kalıntı gerilme miktarını azaltmaktadır.

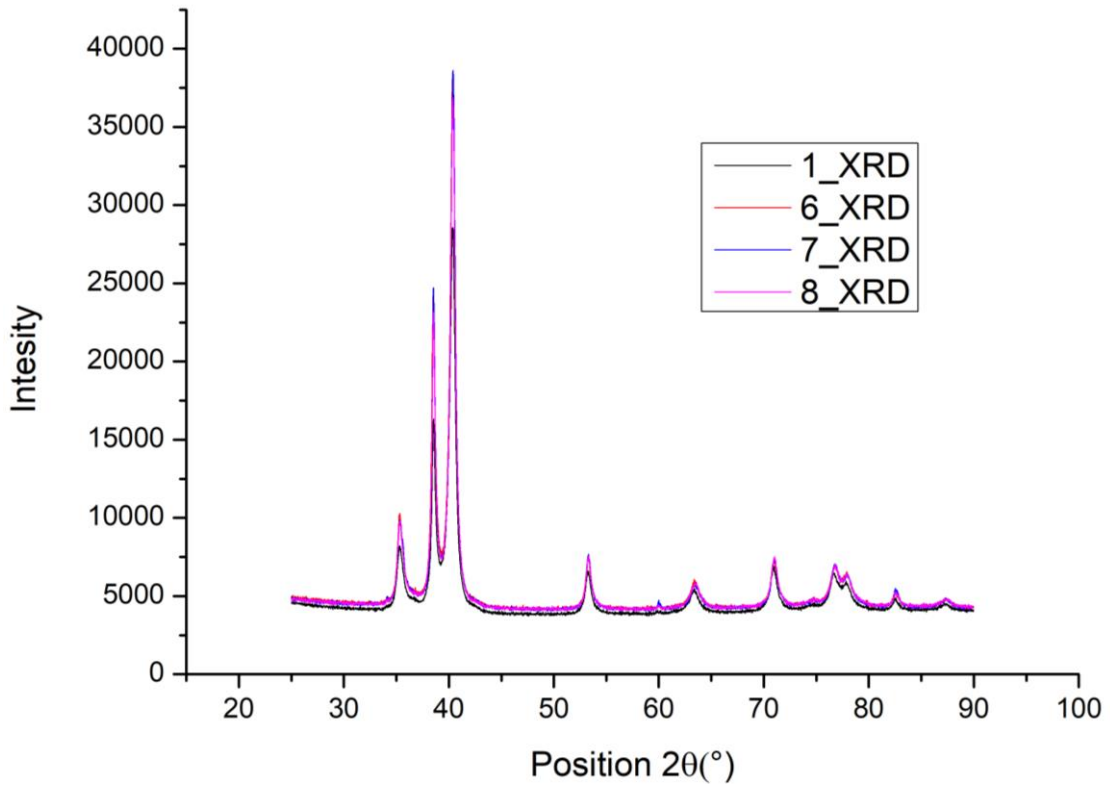


Pik	FWHM 1	FWHM 4
1	0,89733	0,83417
2	0,71206	1,0016
3	0,77022	0,71773
4	0,63672	0,63851
5	0,9746	0,8849
6	0,90573	0,93062
7	1,06886	1,08319
8	1,28913	1,22086
9	0,66798	0,67439
10	0,95696	0,98813

Şekil 6.10. G1 ve G4 için FWHM değerleri.

Yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerin XRD paternleri incelendiğinde ise yapıdaki β faz oranının yaşlandırma işlemi ile arttığı belirlenmiştir. Bu etkiyi de β fazının etkin olduğu 38-70 ve 83°'lerdeki piklerdeki şiddetlenme ve Rietveld analiz sonuçları desteklemektedir. Yaşlandırma işleminde su verme işlemi sonrasındaki kriyojenik işlem

uygulanması ise β faz oranını sadece yaşlandırma uygulanan numuneye göre bir miktar azaltmıştır. Grup 6 ve Grup 8'in XRD paternleri incelendiğinde ise β fazının etkin olduğu pik şiddetlerinin azaldığı ancak sadece kriyojenik işlem uygulanan numunelerde gözlenen pik genişlemesi ile tane düzenlenmesi etkisinin yaşlandırma uygulanan numunelerde aynı ölçüde baskın olmadığı görülmüştür. Bulunan sonuçlar literatürdeki çalışmalarla da uyumludur (Gu vd., 2018). Benzer şekilde piklerin pozisyonları da önemli ölçüde değişmemiştir. Dolayısıyla çözeltiliye alma sonrası uygulanan kriyojenik işlemin içyapıdaki kalıntı gerilme ve dislokasyon yoğunluğuna olan etkisi de yalnızca kriyojenik işlem uygulanan numunelere göre daha kısıtlıdır. XRD sonuçlarına göre yaşlandırma uygulanan numunelerde kriyojenik işlemin su verme sonrası uygulanması faz oranlarını etkilemekle birlikte yaşlandırma işleminin kristalografik özelliklerin belirlenmesinde daha baskın rol oynadığı düşünülmektedir.



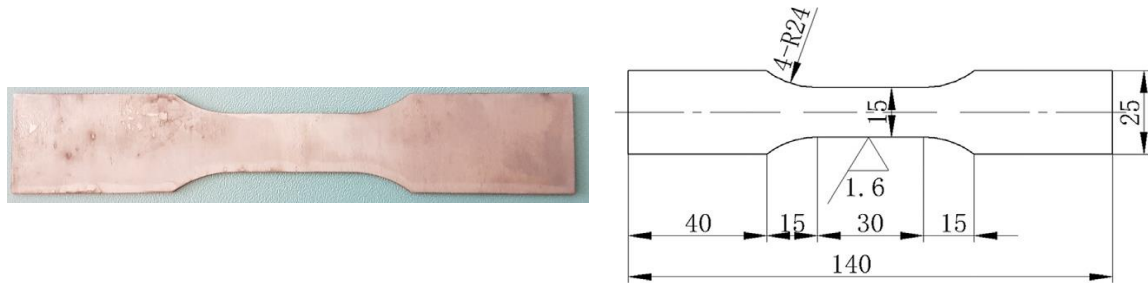
Şekil 6.11. G1, G6, G7, G8 in XRD analizleri.

Yapılan karakterizasyon çalışmalarında uygulanan ısıl işlemlerin önemli değişikliklere yol açtığı düşünülmektedir. XRD testlerinde gözlenen etkilerin malzemenin özelliklerine etkilerini belirlemek amacıyla mekanik testler gerçekleştirilmiştir.

6.2. Mekanik Özelliklerin ve Sertliğin Belirlenmesi

6.2.1. Numunelere çekme testi uygulanması

Çekme testi için tedarik edilen Gr5 ASTM B265 standardında üretilen 1 mm kalınlığındaki sac malzeme kullanılmıştır. Sac malzeme tel erozyon yöntemi ile Şekil 6.12'deki geometride hazırlanmıştır. Her grup için 3'er numune test edilmiştir. Sonuçlar ortalama değerler üzerinden verilmiş olup sapma miktarları hata barı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Çekme test numunesi ve ölçüleri.

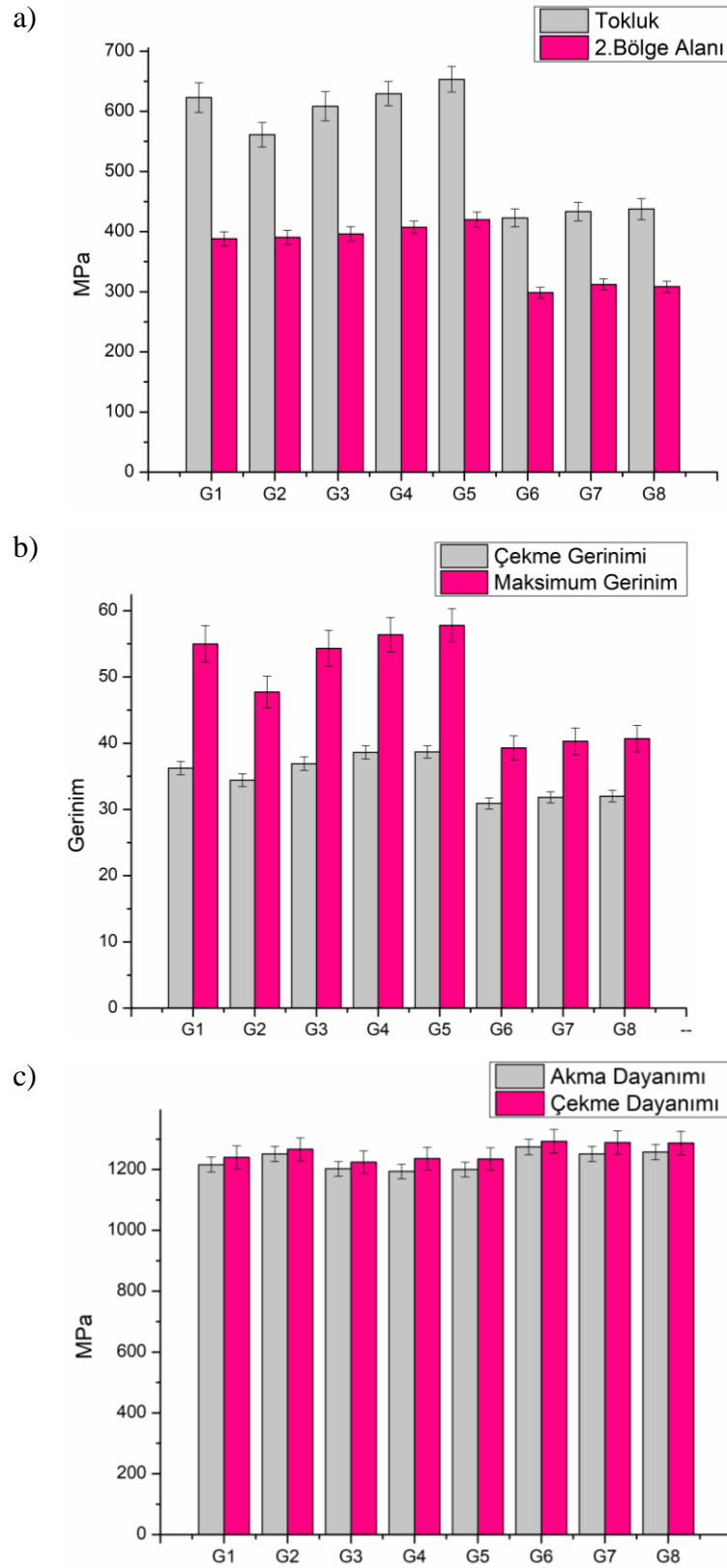
Çekme testi Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümündeki universal çekme cihazında (Shimadzu AG-IS 250 kN) oda sıcaklığında ve statik koşulları temsil edecek şekilde düşük hızda (3mm/dak) gerçekleştirilmiştir. Ölçü boyu numune boyutları göz önüne alınarak 22 mm olarak belirlenmiş ve numunelerin üzerine işaretlenmiştir. Bu işaretler cihazdaki kamera sistemi ile izlenerek hesaplamalar bilgisayar kontrollü olarak otomatik şekilde yapılmıştır. Çekme deneyi farklı işlemlerin uygulandığı 8 grup için üçer tekrarlı yapılmıştır ortalama sonuçlar ise Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Çekme Deneyi Sonuçları.

	Akma Dayanımı (MPa)	Akma Gerinimi (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Gerinimi (%)	Maksimum Gerinim (%)	Tokluk (J/mm ³)	2.Bölge Alanı
1	1216	4,0	1240	36,2	54,9	622	388
2	1251	4,1	1266,67	34,4	47,7	561	390
3	1202	4,4	1224,48	36,9	54,3	608	396
4	1194	4,6	1235,94	38,6	56,4	630	407
5	1200	4,4	1234,38	38,7	57,8	653	420
6	1274	4,8	1292,79	30,9	39,3	423	299
7	1251	4,8	1288,45	31,8	40,3	433	312
8	1258	4,7	1286,83	32,0	40,6	438	308

Çekme testi sonuçlarına göre yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerde yaklaşık %5 akma dayanımı ve %4 çekme dayanımı iyileşmesi sağlanmıştır. Kriyojenik işlem uygulanan numunelerde ise %2'den az olmak üzere akma dayanımında düşüş gözlenmiştir. Plastisite ve tokluk özelliklerine bakıldığında ise kriyojenik işlemin özellikle -196°C 'de tatbik edilen 4. ve 5. Gruplarda önemli bir iyileşme sağladığı gözlenmiştir. Tokluk ve Plastik şekil verme kabiliyeti tüm çekme diyagramı eğrisi altında kalan alan ve akma ile çekme noktaları arasında kalan 2.bölge alanının hesaplanması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Bu hesaplama göre 36 saat derin kriyojenik işlem uygulan numunelerin akma ile çekme noktası arasında kalan ikinci bölgenin alanı %8 kadar arttığı gözlenmiştir. 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerde ise %5 iyileşme sağlandığı gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre Ti6Al4V alaşımlarına derin kriyojenik işlem uygulanması oda sıcaklığında plastik şekillendirilme kabiliyetini ve tokluğu artırdığı gözlenmiştir. Bu durumu sağlayan temel etkilerin β fazının α fazına dönüşmesi XRD analizinde gözlenen iç gerilme azalması etkilerine bağlanabilir. Bunun yanında kriyojenik sıcaklıklarda dislokasyon bağlarının yeniden oluşması ve daha düzenli hale gelen iç yapı ile dayanımın bir miktar azalması ancak tokluk ve plastik şekil verme kabiliyetinin artması sağlanmıştır. Bu sonuçlar literatürdeki öncül çalışmalarla da uyumludur (Gu v.d 2013). Yaşlandırma işleminde ise beklendiği üzere tokluk değerinde %20 civarında azalma gözlenmiştir. Yaşlandırma işlemi öncesi kriyojenik işlem uygulanması bu tokluk azalmasını bir miktar telafi etmekle birlikte 4 ve 5. Gruplardaki kadar baskın bir iyileşme gözlenmemiştir.

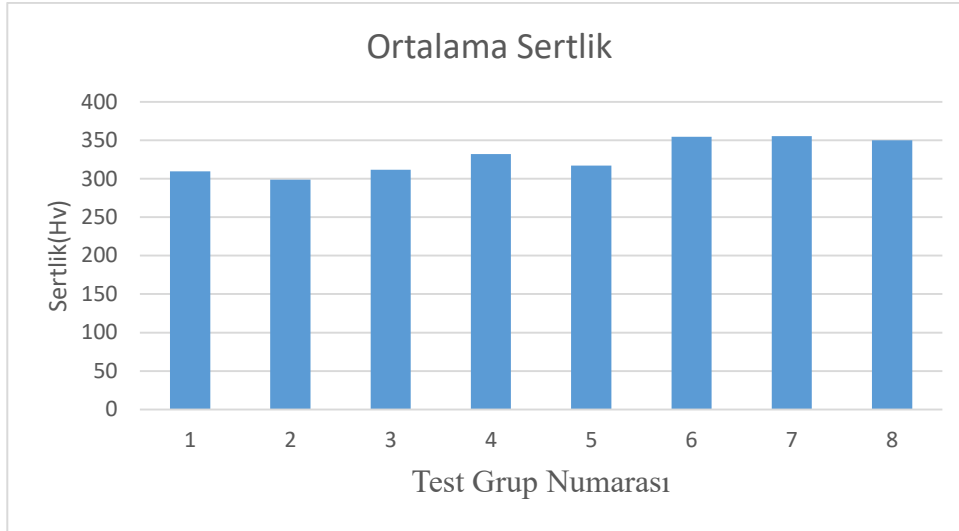


Şekil 6.13 Çekme Deneyi Sonuçları a) Tokluk ve 2.Bölge Alanı b) Çekme Gerinim ve Maksimum Gerinim c) Akma dayanımı ve Çekme Dayanımı.

Kriyojenik işlemin etkisinin, test edilen numunenin boyutlarıyla ilişkili olduğu ve cidar kalınlığı arttıkça etkisinin azalabileceği düşünülmeyle birlikte sac malzemelerin plastik şekil verme özelliklerini iyileştirmek için 24-36 saat derin kriyojenik işlem uygulanmasının etkili olabileceği söylenebilir. Çekme testlerinin sonuçları literatürdeki öncül çalışmalar ile uyumlu olarak tespit edilmiştir (Gu vd., 2013). Ayrıca numune boyutları ve çekme testi ile elde edilebilecek özellikler de literatürdeki bilgilerle uyumludur (ASM International, Davis, & ASM International, 2007). Titanyum alaşımları incelendiğinde genel olarak soğuk şekil vermenin tercih edilmediği malzeme durumuna göre tavlama sıcaklığına yakın 200-400°C arasında şekil vermenin uygulamada tercih edildiği görülmektedir. Soğuk olarak şekillendirilen titanyum alaşımlarına örnek olarak da Grade 1 α titanyum alaşımı gösterilebilir. Kriyojenik işlem ile sağlanan tokluk ve plastisite iyileşmesi düzenlenen dislokasyonlara ve içyapıda meydana gelen kalıntı gerilme azalmasına bağlanabilir. Bu etki deformasyona engel olarak malzeme mukavemetini artıran unsurların azalmasıyla malzeme dayanımına bir miktar olumsuz etki yapmıştır ve malzemelerin akma dayanımının da %2 düzeyinde bir azalmaya yol açmıştır. 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numunelere göre 36 saat derin kriyojenik işlem görmüş numunelerde bu etki daha da baskındır.

6.2.2. Sertlik testi uygulanması

Sertlik testleri silindirik çubuk numune yüzeyinden radyal yönde farklı uzaklıklardan alınmış ve ortalama değerler sunulmuştur. Tedarik edilen numune tavllanmış halde olduğu için cidardan merkeze kadar tüm numuneler kendi içerisinde tutarlı sonuçlar vermiş anlamlı bir sertlik farkına rastlanmamıştır. Mikro sertlik yöntemi kullanılarak Vickers skalasında sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 100 grf yük ve 10 saniye bekleme süresi ile sertlik ölçümleri yüzey üzerinden 10 farklı nokta alınarak yapılmış olup sonuçlar Şekil 6.14'de ortalama olarak verilmiştir.



Şekil 6.14. Numunelerin ortalama sertlik değerleri (HV).

Sertlik testi sonuçlarına göre sığ kriyojenik işlemin malzeme sertliğinde önemli bir değişime yol açmadığı, derin kriyojenik işlemin ise 24 saat uygulanmasında sertliği küçük bir miktar artırdığı, 36 saat uygulanmasında ise referans numuneye göre anlamlı bir fark olmadığı gözlenmiştir. Yaşlandırma işlemi ile referans numuneye kıyasla bir miktar sertlik artışı beklendiği üzere gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre kriyojenik işlemin sertlikte önemli bir değişime yol açmadığı söylenebilir.

6.3. Tribolojik özelliklerin belirlenmesi

Kriyojenik işlemin tribolojik özelliklere etkisinin izlenmesi için ball on disk aşınma test düzeneği kullanılmıştır. Aşınma test numuneleri silindirik çubuk numuneden hazırlanmıştır. Numuneler kalıplanmış ve parlatılarak yüzey pürüzlülüğü değerleri 0.02 μm 'nin altında olacak şekilde hazırlanmıştır. Testler Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Triboloji laboratuvarında yapılmış, kanal genişliği ve derinliği hassas yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazıyla ölçülmüştür. Elde edilen veriler Origin Lab Pro yazılımı yardımıyla işlenerek aşınma kesit alanları hesaplanmıştır. Aşınma test sonuçları ise Çizelge 5.5'de verilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre tüm numunelerden 2N yük altında 50 metrede anlamlı aşınma sonuçları elde edilmiştir.

Aşınma testleri, ball-on-disk geometrisinde DIN 50324 standardına göre yapılmıştır. Testlerden sonra bilyalar incelenmiş bilyalarda optik mikroskop ile gözlenebilir bir aşınma saptanmamıştır. Deneyler kapalı ortamda aynı gün içerisinde gerçekleştirilmiştir.

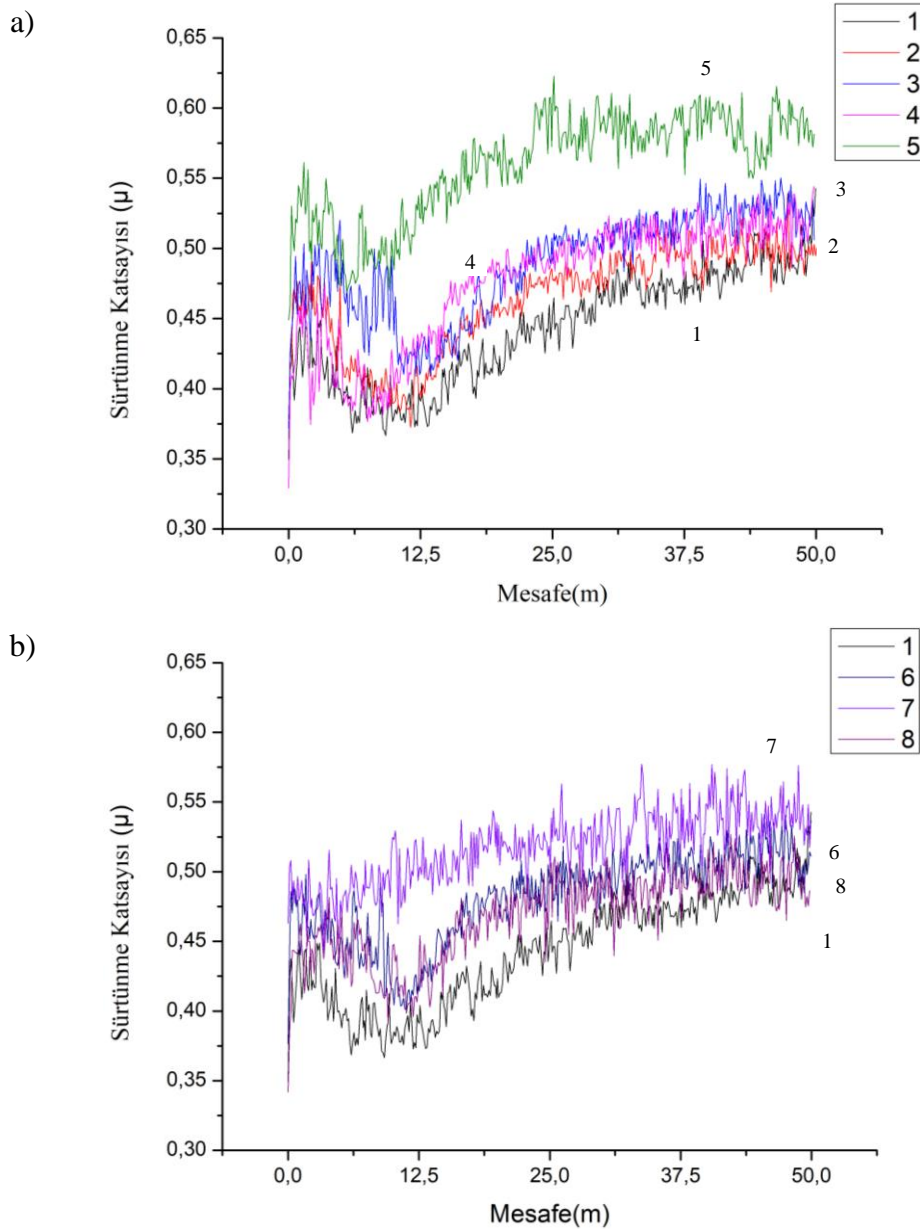
Çizelge 6.4. Aşınma testi sonuçları

	Aşınma Hacmi (mm ³)	Özgül Aşınma Oranı (mm ³ /N/m)	Sürtünme Katsayısı (Ortalama)	Hertzian Gerilmesi (Gpa)
1	7,54672E-05	2,402195	0,44	1,2
2	7,28411E-05	2,318605	0,46	1,2
3	7,11718E-05	2,26547	0,48	1,2
4	6,9691E-05	2,218335	0,47	1,2
5	8,47003E-05	2,696095	0,56	1,2
6	6,87245E-05	2,18757	0,48	1,2
7	6,87308E-05	2,18777	0,52	1,2
8	6,69227E-05	2,130215	0,47	1,2

Aşınma dayanımı belirlenirken Şekil 6.16(a)'da gösterilen aşınma oranı dikkate alınmıştır. Aşınma oranı en düşük yani aşınma direnci en yüksek olan Grup yaşlandırma işlemi öncesi 36 saat kriyojenik işlem uygulanan 8 numaralı Gruptur. 24 saat kriyojenik işlem uygulanan 4 numaralı numunede aşınma direnci referans numuneye göre yaklaşık %8 iyileşmiştir. Sığ kriyojenik işlem uygulanan 2 ve 3 numaralı numunelerde ise sırasıyla %3 ve %5 iyileşme gözlenmiştir. Buna karşın 36 saat kriyojenik işlem uygulanan Grup 5'te referans numuneye göre aşınma direnci %12 azalmıştır. Bu sonuçlara göre kriyojenik işlemin belirli koşullar altında aşınma direncini artırdığı ancak belirli süreden daha fazla uygulandığında olumsuz etki yapabileceği görülmüştür. Artan işlem süresi ile aşınma direncinde gözlenen iyileşmenin azalması literatürde farklı malzemeler ile yapılan çalışmalarda da gözlenen bir durumdur (Das v.d 2009). Titanyum alaşımlarında ise artan işlem süresi ile iç yapıda gözlenen düzenlemelerin malzeme dayanımını bir miktar azalttığı çekme deney sonuçlarıyla belirlenmiştir. Bu etkinin kriyojenik işlem süresinin artmasıyla daha bariz olduğu ve belirli bir süreden sonra düzenlenen iç yapı ve dislokasyon dağılımının malzemenin aşınma dayanımını olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

Yaşlandırma işlemi yapıdaki mukavemeti ve sertliği artırdığı gibi aşınma direncini de artırmıştır. Yalnızca yaşlandırma uygulanan numunede referans numuneye göre aşınma direnci %9 artmıştır, çözeltiye alma sonrası kriyojenik işlem uygulanmasında ise 24 saat

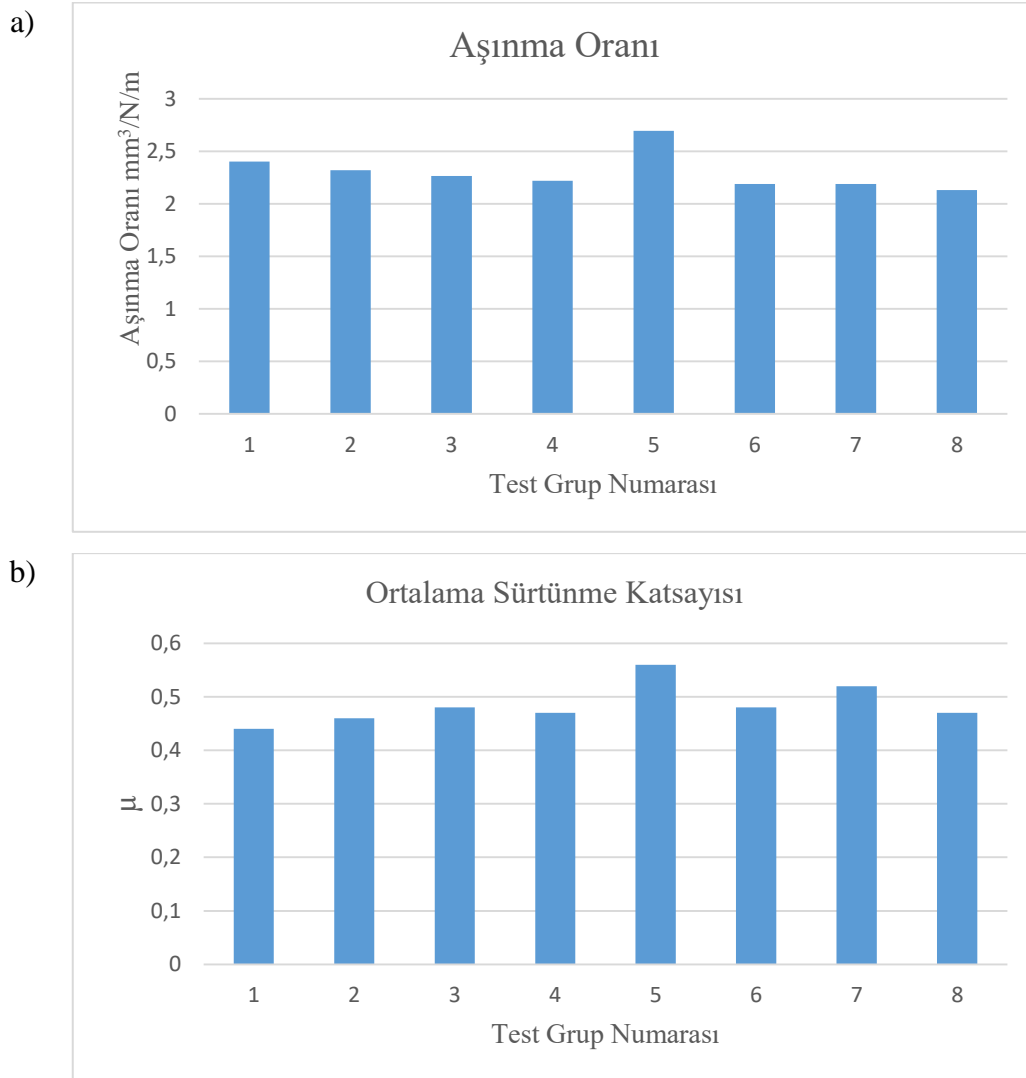
derin kriyojenik işlem uygulanan numunede yalnızca yaşlandırma uygulanan gruba göre az bir miktar iyileşme gözlenmiştir. Benzer olarak çözeltiye alma sonrası 36 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numunede ise yalnızca yaşlandırılan numuneye göre %3'lük bir iyileşme gözlenmiştir. Bu kapsamda kriyojenik işlemin çözeltiye alma sonrası uygulanmasının aşınma direncine olumlu etki yaptığı söylenebilir. Bu durum yaşlandırma işlemi doğasıyla açıklanabilir. Çözeltiye alma işleminde yapı aşırı doymuş hale gelir. Yapılan su verme işlemiyle aşırı doymuş olan faz ince taneler halinde yapıya dağılır ve bu taneler dislokasyon hareketlerine engel olarak dayanımı artırır. Bu aşamada kriyojenik işlem uygulanmasının tane dağılımını düzenleyerek aşınma direncine katkıda bulunduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.15. Aşınma Testi Sonuçları sürtünme katsayısı a) Referans Grup ve yalnızca kriyojenik işlem uygulanmış b) Referans Grup ve yaşlandırma işlemi uygulanmış.

Aşınma testi boyunca anlık olarak sürtünme kuvveti ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçülen sürtünme kuvveti değerleri test yüküne bölünerek anlık sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Ortalama sürtünme katsayıları Şekil 6.16(b)'de verilmiştir. Ortalama sürtünme katsayısı en düşük olan grup işlem görmemiş referans Grup olmuştur. Aşınma direncinin iyileştiği Grup 8 ve Grup 4'te ise ortalama sürtünme katsayısı sırasıyla 0,468 ve 0,476 olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler referans grubun sürtünme katsayısına oldukça yakındır. Bu sonuçlar incelendiğinde ise en düşük sürtünme katsayısı Grup 1'deki referans

numunede (0,44) en yüksek ortalama sürtünme katsayısı ise aşınma hacmi en büyük olan Grup 5’de gözlemlenmiştir.

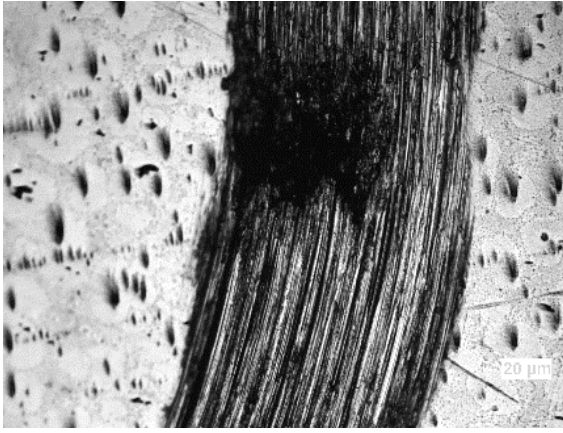


Şekil 6.16. Aşınma test sonuçları grafik gösterimi: a) Aşınma oranı b) Ortalama Sürtünme Katsayısı

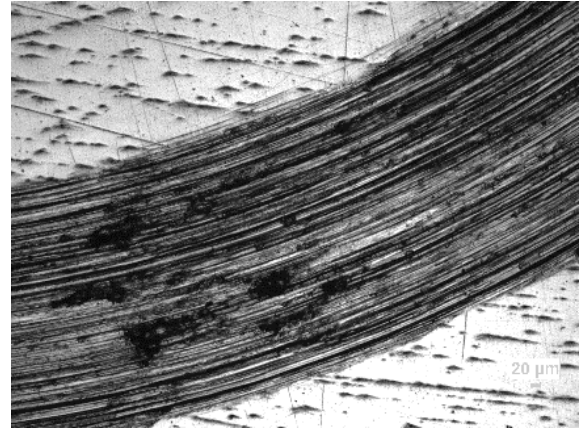
Aşınma mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için aşınma bölgesinin mikroskop altında incelenmesi yapılmıştır. Aşınma bölgesinde yapılan inceleme aşınma bölgesinde atmosferik etkilerle bozulma olmaması için testler gerçekleştirildikten 24 saat içinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma bölgesinden alınan 100 büyütme aşınma izleri (Wear Scar) ise

Şekil 6.17’de verilmiştir. Aşınma bölgesi incelendiğinde numunelerin aşınma karakteristiklerinin benzer olduğu gözlemlenmiştir. Bir başka deyişle kriyojenik işlem

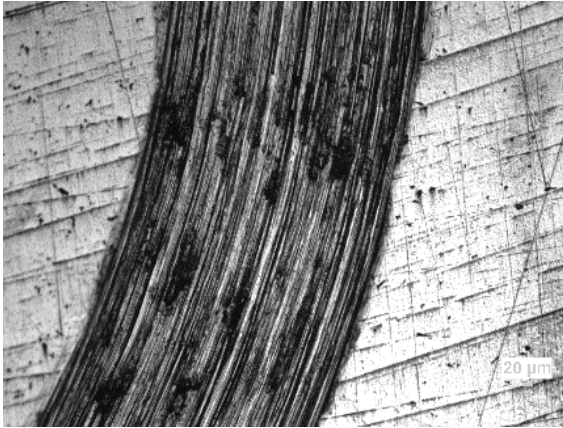
uygulanması ve yaşlandırma işlemi uygulanması test yapılan koşullarda aşınma karakteristiğini etkilemekle birlikte tam olarak değiştirmemiştir. Aşınma testi süresince kaydedilen sürtünme katsayısı grafiğinde belirli frekanslarda dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu gözlenen dalgalanmaların nedeninin ise test boyunca oluşup kırılan adhesif bağların oluşumuna işaret ettiği düşünülmektedir. Aşınma mekanizmasının bu bağların delaminasyonla ayrılması şeklinde gerçekleştiği düşünülmektedir. Adhesif bağlanma ve kopma etkisinin daha az olduğu numunelerde aşınma oranının azalmasıyla aşınma direncinin arttığı görülmektedir.



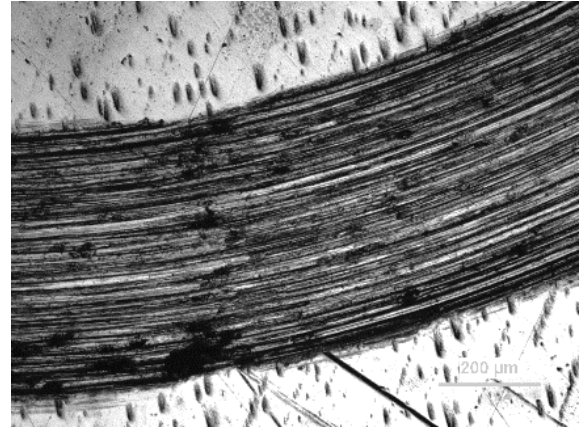
G1



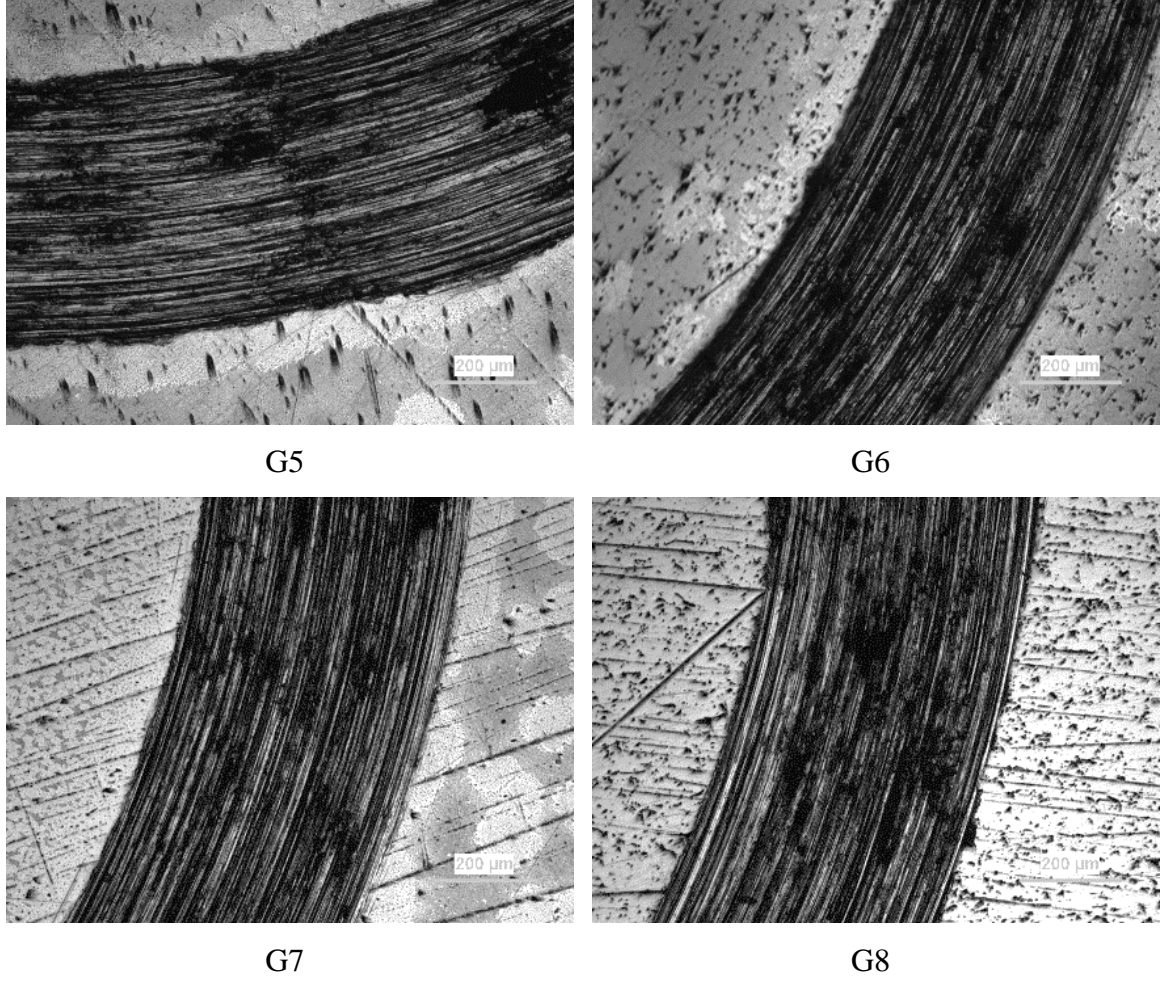
G2



G3



G4

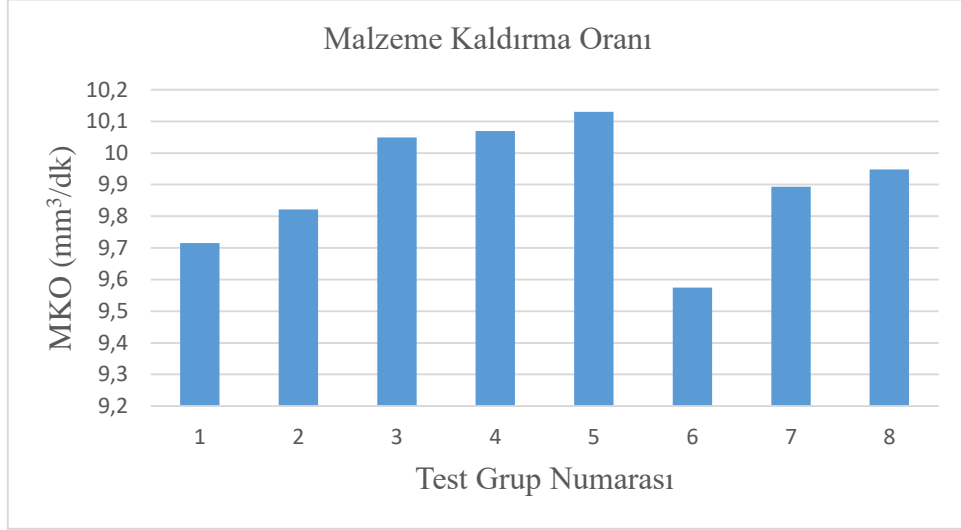


Şekil 6.17. Farklı numunelerin aşınma bölgesi görüntüleri(100X).

6.4. İmal edilebilirlik özelliklerinin incelenmesi

Titanyum alaşımlarının imal edilebilirlik kabiliyetlerini ölçmek için tel erozyon yöntemi kullanılmıştır. Malzeme kaldırma oranının belirlenebilmesi için aynı parametreler altında her grup için tekrarlanan kesimler gerçekleştirilmiştir. Her işlemde kesme zamanı arkin başladığı andan bittiği ana kadar süreölçer ile kayıt altına alınmıştır. İşlem öncesinde teste tabii tutulacak olan tüm numuneler hassas terazi kullanılarak tartılmıştır. Bu işlem imal edilebilirlik testi sonrası tekrar edilmiş ve kaldırılan talaş miktarı ağırlık kaybı olarak saptanmıştır. Saptanan ağırlık farkı, süreölçer ile belirlenen test süresine bölünerek Malzeme Kaldırma Oranı MKO (Material Removal Rate) hesaplanmıştır. Bu çalışmada takım aşınma oranı da ölçülmek istenmiştir ancak testlerde kullanılan 2 metre uzunluğundaki

molibden telde anlamlı bir ağırlık kaybı saptanamamıştır. Denklem (5.4) kullanılarak MKO değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar ise Şekil 6.18’ de verilmiştir.

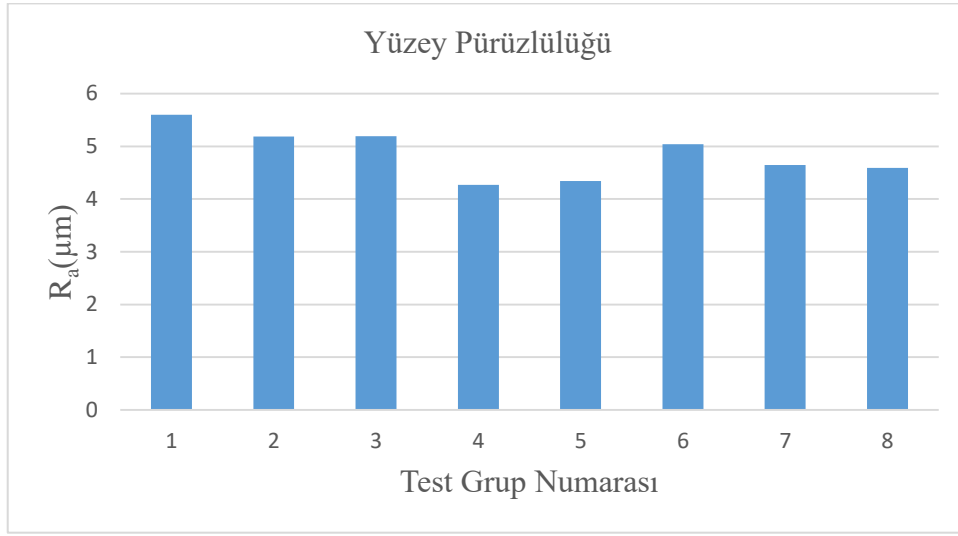


Şekil 6.18. Malzeme kaldırma oranları.

Talaş kaldırma oranının artması, malzemenin daha kolay imal edilebilir olduğunun bir göstergesidir. Bu kapsamda bakıldığında MKO’su en düşük olan malzeme sadece yaşlandırma işlemi 6. Gruptur. Bu sonuçlara göre sığ ve derin kriyojenik işlemin talaş kaldırma oranını artırdığı görülmektedir. En bariz etki ise 36 saat derin kriyojenik işlem uygulanmış numunede gözlenmiştir, bu numunede yaklaşık %5 iyileşme gözlenmiştir. Sadece yaşlandırma işlemi uygulanan numunede MKO düşmekle beraber çözeltiye alma sonrası kriyojenik işlem uygulanan numunelerde sadece yaşlandırma uygulanan numuneye göre %4 iyileşme gözlenmiştir. Literatürdeki sonuçlara bakıldığı zaman gözlenen iyileşme eğiliminin önceki çalışmalarla paralellik gösterdiği söylenebilir (Gill ve Singh, 2010; Jatti ve Singh, 2014). Bu çalışmalardaki sonuçlar değerlendirildiğinde ise işleme parametrelerinin daha agresif olduğu koşullarda kriyojenik işlemin MKO üzerine olan etkisinin arttığı söylenebilir (Kumar vd., 2016).

İmal edilebilirlik ölçütlerinden birisi de imalat sonrası ortaya çıkan yüzeylerin kalitesidir. Yüzeylerin kalitesinin değerlendirilmesi ise yüzey pürüzlülüğü, sertlik dağılımı, yüzey ile ana malzeme arasındaki mikroyapı farkı gibi parametrelerin gözlenmesiyle yapılır. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertlikleri ölçülmüştür. Tel erozyon yönteminde yüzey bütünlüğünü bozduğu için istenmeyen yeniden ergiyen bölge (Recast Layer) tüm

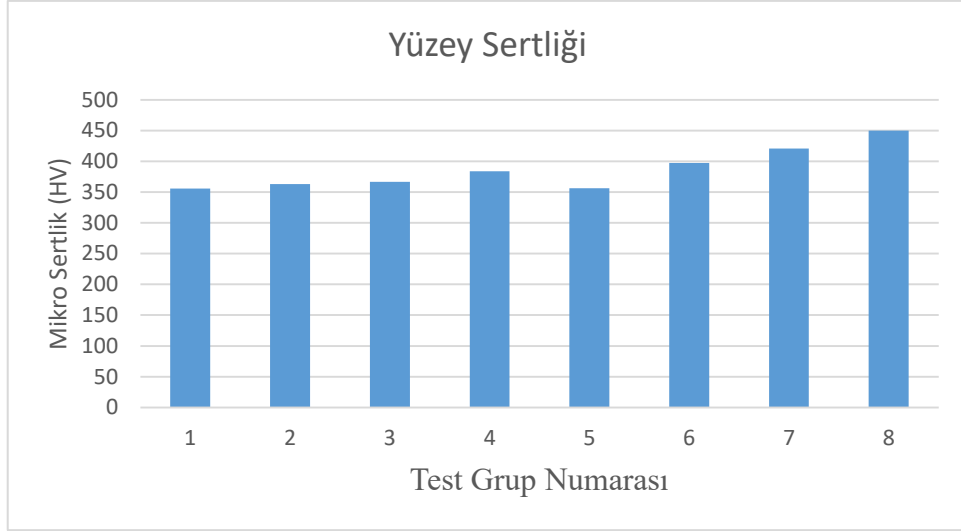
numunelerde oldukça ince olarak (5-10 μ m) gözlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda da tel erozyon yöntemi ile kontrollü parametrelerde işlem yapıldığında recast tabakasının oldukça ince boyutlarda olduğu raporlanmıştır (Aspinwall vd. 2008). Yüzey pürüzlülüğü ölçüm işlemi tüm numunelerde tel ilerleme yönünde gerçekleştirilmiştir. Çok sayıda noktadan yapılan ölçümler sonucu alınan ortalama değerler hesaplanmış sonuçlar Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Ölçümler işlem sonucunda elde edilen dilimler üzerinden gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.19. Tel Erozyon yöntemi ile kesilen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülükleri (R_a).

Bu sonuçlara göre derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerin aynı koşullarda işlem gören referans numunelere göre daha düzgün yüzey verdiği gözlenmiştir. Bu etki en çok derin kriyojenik işlem uygulanan 4 ve 5. Gruplarda ortaya çıkmıştır. Yaşlandırma işlemine ilave olarak uygulanan kriyojenik işlem de yüzey pürüzlülüğüne olumlu etki yapmıştır.

Tel erozyon uygulamalarında üretilen yüzeyin kalitesini gösteren bir başka yöntem de yüzey sertliğinin gözlenmesidir. Yüzey ile ana malzeme arasında sertlik farkının olması üretilen parça yüzeyinin dayanımının bir göstergesi olmaktadır ve özellikle kalıpcılık gibi sektörlerde yüksek sertlik tercih edilmektedir. Bu çalışmada tel erozyonla kesilen yüzeyler kesilerek kesitte yüzeye oldukça yakın ilk ana malzemedan 30 μ m mesafeden ölçümler alınmış ve sonuçlar ortalama olarak verilmiştir.



Şekil 6.20 Tel erozyon yöntemi ile işlenen yüzeylerin ortalama sertlik değerleri.

Yüzeyde oluşan sertleşmenin başlıca nedenlerinden birisi dielektrik sıvı içerisinde bulunan karbonun Titanyum yüzeyine difüze olarak karbür oluşturmasıdır (Kumar v.d 2016). Bir başka neden ise bu bölgede erozyona uğrayan malzemenin hızlıca katılarak sert bir tabaka oluşturması ve yüzeye yakın olan bölgenin ısıl etkiyle sertleşmesidir. Çok ince olan bu tabakalar genellikle yüzey bütünlüğünü bozduğu için kullanım sırasında hızlıca aşınmaktadır ya da kullanım öncesi temizlenmektedir. Bu nedenle ölçümler daha kalıcı olan tabaka üzerinden yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numunenin yüzey sertliği, referans numune yüzey sertliğine göre yaklaşık 30 HV artmıştır. Sığ kriyojenik işlem uygulanmış ve 36 saat derin kriyojenik uygulanan numunelerin yüzey sertliklerinde ise önemli bir fark gözlenmemiştir. Derin kriyojenik işlem uygulandıktan sonra yaşlandırılan numunelerde ise sadece yaşlandırılan numunelere göre tel erozyonla işlenen yüzeylerde 20-50 Vickers yüzey sertliği artışı gözlenmiştir.

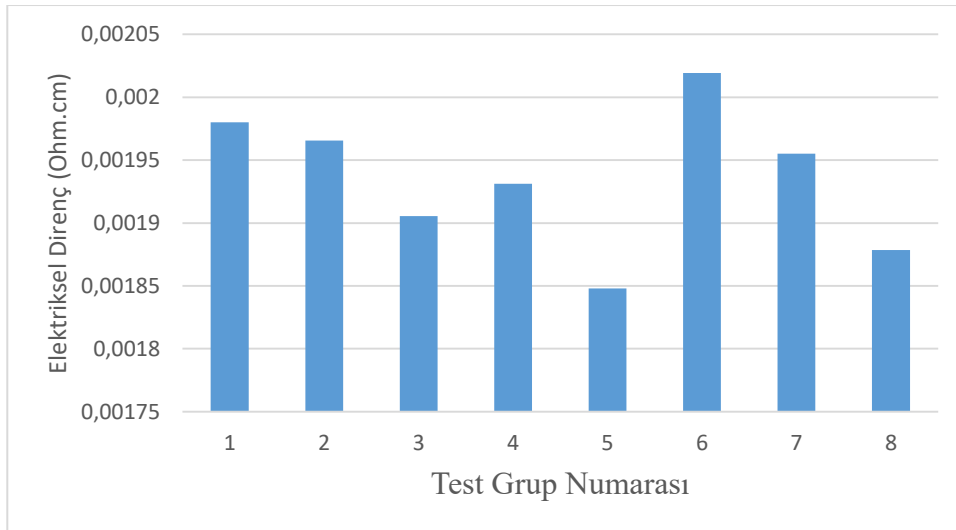
Bu sonuçlara göre kriyojenik işlemin elektro erozyon tekniği ile işlenmede imal edilebilirliğe olumlu etkisi olduğu söylenebilir. Bu iyileşmeyi sağlayan başlıca etkilerin β - α faz dönüşümünün gerçekleşmesi, numunelerdeki kalıntı gerilmelerin azalması ve iç yapının düzenlenmesi olduğu düşünülmektedir.

6.6. Korozyon ve elektrokimyasal özelliklerin incelenmesi

Titanyum alaşımlarının farklı sektörlerde tercih edilmesinin en önemli nedenlerinden birisi de sahip oldukları üstün korozyon dayanımlarıdır. Korozyon testleri ile kriyojenik işlemin korozyon özelliklerine olan etkisinin gözlenmesi amaçlanmıştır. Elektriksel iletkenlik özelliği ise malzemelerin termal özellikleri ile korelasyon içerisindedir. Bunun yanında elektriksel iletkenlik değerleri malzeme içyapısı, kusurları ve kusurların dağılımı ile ilgili de fikir veren faydalı bir göstergedir. Bu kapsamda korozyon ve elektriksel iletkenlik testlerinin yapılması uygun bulunmuştur.

6.6.1. Elektrik iletkenliği testi

Elektriksel iletkenlik testi 4 nokta ölçüm tekniği kullanılarak GOM-802 elektriksel iletkenlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz 4 nokta kullanarak test için bağlanan cismin elektriksel direncini mohm cinsinden ölçmektedir. Kullanılan yöntem gereğince ölçülen direnç değeri numune boyutlarıyla orantılıdır. Dolayısıyla ölçülen değerler denklem (5.5) kullanılarak numune boyutlarından bağımsız elektriksel iletkenlik değerlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Test sonuçları Şekil 6.21’te verilmiştir.



Şekil 6.21. Elektriksel Direnç ölçüm sonuçları

Bu sonuçlara göre kriyojenik işlemin elektriksel direnci azaltarak elektriksel iletkenlik ve ısı iletim katsayısını artırdığı gözlenmiştir. Bu etki özellikle 36 saat derin

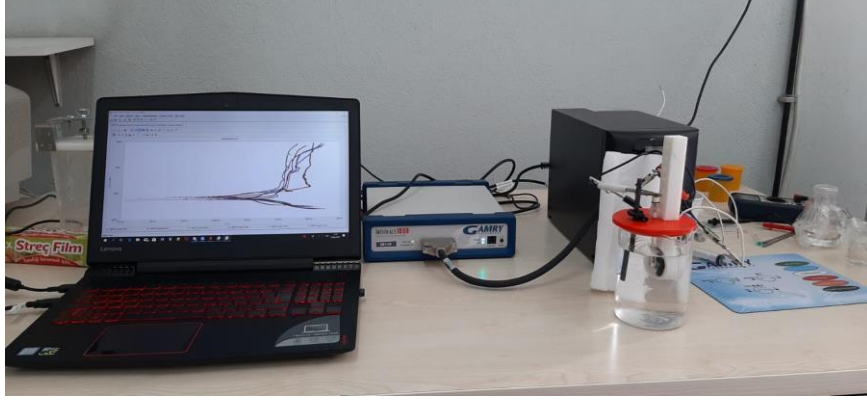
kriyojenik işlem uygulanan numunede %6,7 mertebesinde gözlenmiştir. Sığ kriyojenik işlem uygulanan numunelerde ise 12 saat işlem uygulanan numunede önemli bir iyileşme gözlenmezken 24 saat işlem uygulanan numunede yaklaşık %4 iyileşme gözlenmiştir. Yaşlandırma işlemi uygulanan numunede ise yaklaşık %6 elektriksel iletkenlik değerinin kötüleştiği gözlenmiştir. Buna karşın yaşlandırma işlemi öncesi uygulanan kriyojenik işlem bu olumsuz etkiyi telafi etmiştir. Çözeltiye alma sonrası 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numune, referans gruba yakın bir iletkenlik değeri göstermiş, 36 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numune ise sadece yaşlandırılan numuneye göre elektriksel iletkenliği yaklaşık %7 iyileşmiştir.

Elektriksel iletkenlik, termal iletkenlikle doğrudan orantılı olup imal edilebilirliği doğrudan etkileyen parametrelerden birisidir. Bu etkinin direkt olarak gözleneceği uygulamalardan birisi elektro-erozyon yöntemi ile işleme olacaktır. Benzer şekilde talaşlı imalat uygulamalarında iletkenliği daha yüksek olan malzeme kesme bölgesinde meydana gelen ısıyı bünyesine daha hızlı alacağı için kesme bölgesi sıcaklığının kontrol altında tutulmasına katkıda bulunacaktır. Bu bağlamda kriyojenik işlemin daha önceki çalışmalarda da raporlanan elektriksel iletkenliğe olumlu etkisi Ti6Al4V alaşımında da gözlenmiştir.

6.6.2. Korozyon testi

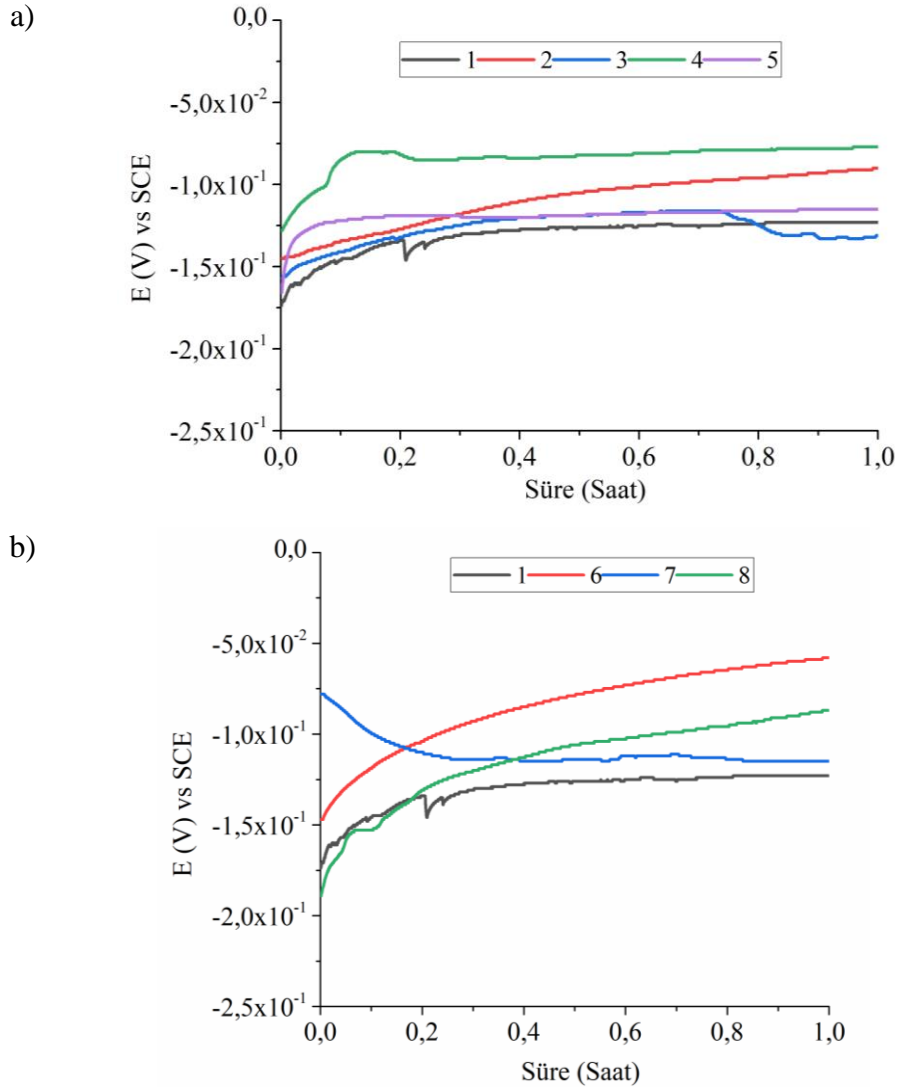
Korozyon testleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Triboloji laboratuvarında bulunan Şekil 6.22’de gösterilen GAMRY Interface 1000 model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Titanyum alaşımlarının sunduğu önemli özelliklerinden biri de farklı ortamlarda sunduğu üstün korozyon dayanımıdır. Bu nedenle kriyojenik işlemin diğer özelliklere olan etkilerinin yanında korozyon özelliklerine etkisi de oldukça önemlidir. Testlerde kullanılan numuneler korozyon testine uygun reçineden üretilen soğuk kalıplama malzemesi kullanılarak kalıplanmıştır. Tüm numunelerin test edilen yüzeyleri silindirik çubuk numuneden aksel yönde hassas SiC kesme diski ile dilimlenen örneklerden seçilmiştir. Numuneler kalıplandıktan sonra metalografik olarak homojen koşullarda hazırlanıp testlere tabii tutulmuşlardır. Teste tabii tutulan numuneler yüzey alanı 1 cm^2 olacak şekilde hazırlanmıştır. Testler oda sıcaklığında 500 mL’lik beherde %0,9 İzotonik sodyum klörür çözeltisi içeren sıvıda gerçekleştirilmiştir. Bu sıvı vücut sıvısına benzer yapısı ile serum olarak da kullanılmaktadır. Bu sıvının seçilmesindeki amaç

bu elektrolitin vücut sıvısına benzer karakter göstermesi dolayısıyla korozyon etkisinin biyomedikal koşullar için incelenmesi için uygun olmasıdır (Kimura, 2000).



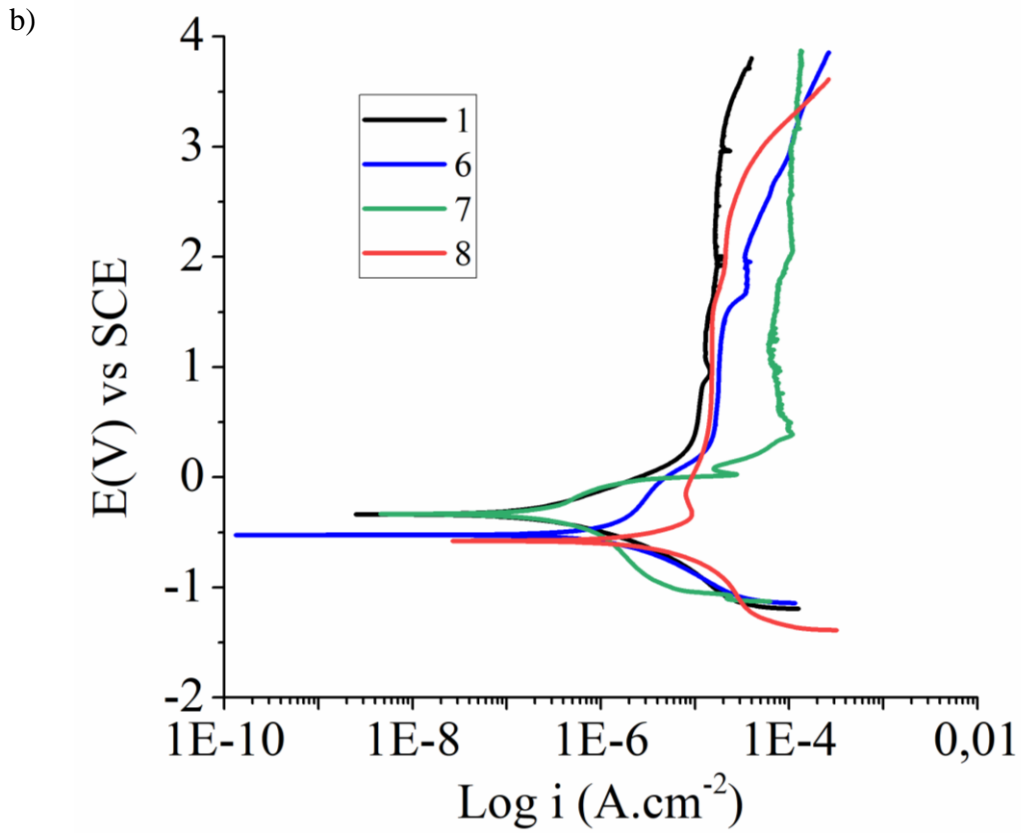
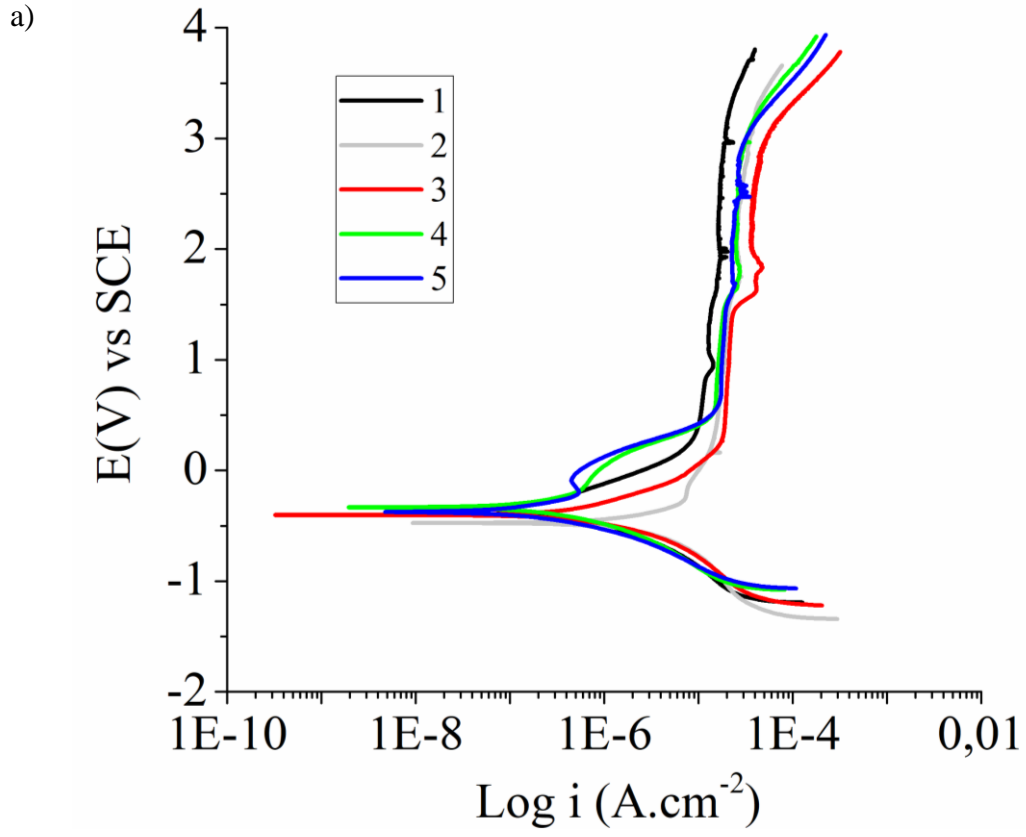
Şekil 6.22. Korozyon test düzeneği.

Titanyum alaşımı ile tuz çözeltisinde yapılan önceki çalışmalar incelendiğinde, işlemin yüzeyde pasif bir film oluşumu şeklinde meydana geldiği belirtilmiştir (Alves vd., 2009), (K.-X. Gu vd., 2018). Şekil 6.23’de tüm numuneler için kaydedilen izole E_{corr} -zaman grafiği verilmiştir. E_{corr} testinin ana amacı belirlenen test koşullarında malzemenin korozyona karşı olan potansiyelinin ölçülmesi ve korozyona karşı kararlı bir tabaka oluşturma potansiyelinin gözlenmesidir. Bu testte testin ilerleyen safhalarında eğride pozitif yönde bir yükselmenin gözlenmesi yüzeyde pasif bir film tabakasının oluşmasına işaret etmektedir (Gurrappa, 2003), bu eğilimin test süresince korunması tabakanın kırılmadığını gösterir eğer test sonucunda negatif yöne doğru potansiyelde azalma gözlenirse bu yüzeyde oluşan filmin hasara uğradığına işaret eder. Test sonuçları incelendiğinde test edilen tüm numunelerin yüzeylerinde koruyucu film oluşturduğu belirlenmiştir. Yalnızca kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin yüzeylerinde test edilen ortamda E_{corr} değerlerinde pozitif yöne doğru bir kayma meylinin olduğu gözlenmiştir. Yaşlandırma uygulanan numunelerin referans numuneye göre E_{corr} değerlerinde pozitif yöne doğru bir kayma olduğu ancak çözeltiye alma sonrası uygulanan kriyojenik işlemin bu etkiyi bir miktar azalttığı gözlenmiştir.



Şekil 6.23. Açık Devre Potansiyel testi Sonuçları a) Referans Grup ve yalnızca kriyojenik işlem uygulanmış b) Referans Grup ve yaşlandırma işlemi uygulanmış.

Yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerde de benzer şekilde yüzeyde koruyucu film oluşumu gözlenmiştir. Tüm yaşlandırılan numunelerde E_{corr} değerleri pozitif yöne doğru kaymakla beraber çözeltiliye alma işlemi sonrasında kriyojenik işlem uygulanmasıyla bu etkinin daha kısıtlı olmasına neden olduğu söylenebilir. Hazırlanan çözelti altında tüm numuneler koruyucu oksit filmi oluşturma konusunda başarılı olmuştur.



Şekil 6.24. Potansiyon dinamik polarizasyon testi sonuçları a) Referans Grup ve yalnızca kriyojenik işlem uygulanmış b) Referans Grup ve yaşlandırma işlemi uygulanmış.

Numunelerin korozyon dayanımı gözlemlenmek için yapılan bir diğer test de Potansiyon dinamik polarizasyon testidir. Şekil 6.24’de test sonucunda elde edilen veriler grafik halinde sunulmuştur. Grafikten I_{corr} ve E_{corr} değerleri test cihazının yazılımı aracılığıyla Tafel yöntemi kullanılarak belirlenmiştir ve Çizelge 6.5’de verilmiştir. Bu testteki sonuçlara bakacak olursak gözlemlenen I_{corr} değerleri numunelerin korozyona uğrama hızının en önemli göstergelerindedir. Bu değerlerin derin kriyojenik işlem görmüş numunelerde önemli ölçüde azaldığı ve gözlemlenen bu etkinin kriyojenik işlem süresi arttıkça daha bariz olarak ortaya çıktığını göstermiştir. Bu sonuçlar ışığında derin kriyojenik işlemin izotonik serum çözeltisinde korozyon ömrünü iyileştirdiği söylenebilir. Bu sonuç literatürde Hank sıvısı ile benzer bir test gerçekleştiren Gu’nun sonuçlarıyla da uyumludur (Gu vd., 2018).

Çizelge 6.5. Potansiyon dinamik polarizasyon testi Sonuçları

	Beta A (V/decade)	Beta C (V/decade)	I_{corr} uA	E_{corr} mV
1	7,322	1,505	7,7	-336
2	6,231	1,09	10,7	-487
3	2,828	7,65E-01	4,88	-411
4	2,822	9,26E-01	3,1	-325
5	2,076	4,80E-01	1,21	-380
6	2,404	5,81E-01	3,51	-527
7	3,109	1,02E+00	9,75	-335
8	5,796	7,63E-01	8,56	-577

Literatüre bakıldığında farklı malzemelerde yaşlandırma sonrası oluşan çökeltilerin korozyon direncine olumsuz etki edebildiği raporlanmıştır (Afzali, Yousefpour, ve Borhani 2016). Bir başka çalışmada ise bu çökeltilerin yaşlanma süresi arttıkça toparlanarak dayanımı düşürdüğü ancak korozyon davranışını iyileştirdiği belirtilmiştir (Zheng vd. 2016). Yapılan izole E_{corr} testinde yalnızca yaşlandırma uygulanan numunelerin referans numuneden de çözeltiye alma öncesi kriyojenik işlem uygulanan numuneden de daha yüksek E_{corr} değeri verdiği belirlenmiştir. Potansiyon dinamik test sonuçları da benzer şekilde gerçekleşmiştir. Yalnızca yaşlandırma uygulanmasının korozyon ömrünü iyileştirdiği, çözeltiye alma öncesi kriyojenik işlem uygulanmasının ise numunelerin korozyon direncini bir miktar azalttığı gözlenmiştir. Bu numunelerde kriyojenik işlemin aşırı doymuş yapıyı teşvik ettiği söylenebilir. Genel olarak bakıldığında kriyojenik işlem, tuz çözeltisindeki Ti6Al4V alaşımının korozyon mekanizmasını değiştirmedeği yalnızca korozyon eğilimini

etkilediği söylenbilir. Buna karşı yapıda gözlenen $\beta - \alpha$ faz dönüşümü, i yapıdaki kalıntı gerilmenin azalması, dislokasyonların düzenlenmesi gibi etkilerin korozyon direncini artırdığı düşünülmektedir. Yaşlandırma işlemi öncesi uygulanan kriyojenik işlemin korozyon direncine bir miktar olumsuz etki etmesinin nedeninin ise tane sınırlarındaki katı eriyik çökeltilerinin korozyona olumsuz etki etmesi olduğu düşünülmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Ti6Al4V alaşımına kriyojenik işlem uygulanmasının malzeme özelliklerinde pek çok değişime yol açtığı gözlenmiştir. Uygulanan kriyojenik işlem ile mikroyapının değiştiği, kararsız β fazının işlem süre ve koşullarına bağlı olarak kararlı β fazına ve α fazına dönüştüğü, yapıdaki iç gerilmelerin azaldığı, tanelerin düzenlendiği yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucunda gözlenmiştir. Ti6Al4V alaşımlarına uygulanan yaşlandırma işlemi bilinen bir mukavemetlendirme mekanizmasıdır. Yaşlandırma işleminin malzeme mukavemetini ve aşınma direncini artırdığı ancak tokluk ve plastisite kabiliyetini azalttığı yapılan deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Yaşlandırma işleminde çözeltiye alma sonrası derin kriyojenik işlem uygulanması, aşınma direncini bir miktar daha artırmış ve malzemenin kaybettiği plastisite kabiliyetinin bir miktarını geri kazanmasını sağlamıştır. Yalnızca kriyojenik işlem uygulanan numunelerde ise, sığ kriyojenik işlem uygulanan numunelerde, bir miktar β - α faz dönüşümü gözlenmekle birlikte, derin kriyojenik işlem uygulan numunelerde daha belirgin faz dönüşümü saptanmıştır. Dolayısıyla sığ kriyojenik işlem uygulanmasının yapıya olan etkisi kısıtlı olduğu söylenebilir. Yapılan içyapı incelemelerinin yanında XRD analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bu analizler incelendiğinde özellikle derin kriyojenik işlem uygulanan numunelerde β - α faz dönüşümü gerçekleştiği Rietveld analizi ile de ortaya konmuştur, ayrıca piklerden gözlenen genişleme ile mikroyapının düzenlendiği ve piklerdeki kayma eğilimiyle de yapıdaki iç gerilmelerin azaldığı düşünülmektedir. Bu bulguları destekler nitelikteki bir diğer sonuç ise yapılan elektriksel iletkenlik testi sonuçlarıdır. Kriyojenik işlem uygulanması ile gözlenen iletkenlik artışı da XRD sonuçlarını desteklemektedir. Ti6Al4V alaşımına derin kriyojenik işlem uygulanması sırasında malzemenin sıcaklığı -196°C 'ye kadar düşmektedir. Bu sıcaklığa inildiğinde malzemede hacimsel olarak termal büzülme meydana gelmektedir. Bu durum moleküler düzeyde kafes yapılarında da sıkışmaya neden olmaktadır. Kafeslerde gözlenen bu sıkışma etkisi HMK yapıdaki β fazında, hareketlerin daha zor olduğu SPH kafes yapısına sahip α fazına göre daha baskın olarak meydana gelmektedir. Bu sıkışma etkisi ise atomsal düzeyde hareketi teşvik etmektedir. β fazının moleküler düzeyde sağladığı etki ile dislokasyonlar daha düşük enerjili ve daha dengeli bir hale gelecek şekilde düzenlenmekte, mikro düzeyde gerilmeler meydana gelerek iç gerilmelerin azalmasını sağladığı düşünülmektedir.

Ti6Al4V alaşımında, yapıda bulunan ve β stabilizatör olarak görev yapan Vanadyumun elementinin bu süreçte etkin rol oynadığı düşünülmektedir. HMK yapıdaki β fazı kafesinin büzülmesiyle, yapıdaki V atomları difüze olmaya başlarlar. Bu işlemin sonucunda yapısında yeteri kadar V elementi kalmayan β fazında bulunan taneler α fazına dönüşürler. Bu dönüşümün sonucunda ortaya çıkan α fazının yapısında çözebileceği V elementi miktarının β fazına oranla çok daha az olması neticesinde V elementi yakınlarında bulunan ve yarı kararlı haldeki β fazlarına taşınırlar. Yarı kararlı yapının içerisindeki V elementinin artması ile içerisindeki β stabilizatörü miktarı artarak yarı kararlı halden kararlı hale geçmektedirler. Uygulanan kriyojenik işlemin etkisi ile yarı kararlı haldeki β fazı önce α fazına ve daha sonra da kararlı β fazına dönüşmektedir. Titanyum alaşımlarında α ve β fazları arasındaki dönüşümler difüzyon temelli dönüşümler olduğu için çok düşük sıcaklıklarda difüzyon hızı düşük olduğu için işlemin etkili olması için uzun süreler gereklidir.

Tribolojik özellikler incelendiğinde ise 24 saat derin kriyojenik işlem uygulanan numuneler kazandıkları aşınma direnci ile ön plana çıkarken sürtünme katsayısında ve aşınma mekanizmalarında referans numuneye göre önemli bir değişim gözlenmemiştir. En yüksek aşınma direnci yaşlandırma uygulanan numunelerde gözlenmiştir. Çözeltiye alma sonrası 36 saat yaşlandırma uygulanan numuneler aşınma direnci en yüksek olan grup olmuştur. Kriyojenik işlemin plastik şekil verme kabiliyetinin gözlenmesi ve işlemin yapının mekanik özelliklerini ne şekilde etkilediğinin belirlenmesi için çekme testleri uygulanmıştır. Bu testlerin sonucuna göre kriyojenik işlemin malzemenin plastisite özelliklerine olumlu etkisi olduğu gözlenmiş 36 saat kriyojenik işlem uygulanan numunelerin plastisite özelliklerinin belirgin şekilde iyileştiği tespit edilmiştir. Ancak 36 saat kriyojenik işlem uygulanan numunelerde gözlenen plastistedeki bu iyileşme akma dayanımını %2 seviyesinde azaltmış ve aşınma ömrüne de olumsuz yansımıştır. Titanyum alaşımlarının bir diğer önemli özelliği üstün korozyon dayanımlarıdır. Kriyojenik işlemin malzemenin korozyon özelliklerine olan etkilerini incelemek için de testler gerçekleştirilmiştir. Korozyon testleri %0,9'luk izotonik çözeltide gerçekleştirilmiştir. Açık devre potansiyel testi sonuçlarına göre tüm gruplarda bu koşullar altında koruyucu oksit filmi oluşması gerçekleşmiştir. Potansiyodinamik testlere göre yalnızca derin kriyojenik işlem uygulanmasının korozyon direncine olumlu etki ettiği ancak yaşlandırma öncesi uygulandığı durumda korozyon potansiyelini bir miktar artırdığı gözlenmiştir. Bu kapsamda

kriyojenik işlemin sıcaklık ve süresinin kontrollü olarak uygulanmasının; mekanik özellikler, imal edilebilirlik, aşınma, korozyon gibi pek çok farklı özelliğe olumlu etki edebileceği görülmüştür. İmal edilebilirlik testi olarak tel erozyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle elde edilen bulgulara göre derin kriyojenik işlem uygulanması yalnızca kriyojenik işlem uygulanan numunelerde de yaşlandırma öncesi kriyojenik işlem uygulanan numunelerde de imal edilebilirliğe olumlu etki yapmıştır. Çekme testi sonuçları da düşünülerek kontrollü olarak uygulanan kriyojenik işlemin Ti6Al4V alaşımının imal edilebilirliğini iyileştirdiği söylenebilir.

Bu tez kapsamında “Ti6Al4V” titanyum alaşımına farklı sürelerde yapılan kriyojenik işlemin, malzemede meydana getireceği; faz dönüşümü, aşınma ve sürtünme özellikleri, mekanik özellikleri, elektriksel özellikleri, imal edilebilirlik, korozyon dayanımı konularına etkileri incelenmiş ve raporlanmıştır. Bu sonuçlara göre yumuşatma tavlama uygulanmış Ti6Al4V alaşımına kontrollü olarak kriyojenik işlem uygulanması aşınma, plastik şekil verme, imal edilebilirlik ve korozyon özelliklerine olumlu etki etmektedir. Bu etkiyi sağlayan ana mekanizma ise β fazının kararsız yapısının kararlı β ve α fazına dönüşmesi ve içyapıdaki artık gerilme ve düzensizliklerin azaltılmasıdır. Bu dönüşüm sırasındaki β fazının boyutları ve dağılımı da sürtünme, aşınma, korozyon, soğuk şekil verilebilirlik, korozyon gibi pek çok özelliği etkilemektedir. Kriyojenik işlemde çok düşük sıcaklıklarda malzeme moleküller arası boşluklar azalmakta yapıdaki taneler ve dislokasyonlar düzenlenmektedir. Bu düzenlenme etkisi de kalıntı gerilme miktarını azaltmaktadır. Yapısal olarak Ti6Al4V alaşımında bulunan Vanadyum elementi β fazı stabilizatörü olarak görev yapmaktadır, yapıdaki β faz miktarının azalması ise kalan β fazının daha kararlı yapıda olmasına hizmet etmektedir. Yaşlandırma işleminde çözeltiye alma sonrası kriyojenik işlem uygulanması çözeltiye alma performansını iyileştirmekte β faz miktarını, dağılımını ve yapısal kusurları düzenleyerek tokluğu ve aşınma direncini belirli miktarda artırmaktadır. Yapılan çalışmaların sonucuna göre elde edilen iyileşmelerin kararsızlığı yüksek β fazı ile yakından ilişkili olduğu düşünülmektedir. Kriyojenik işlemin tane yapısını düzenlediği, iç gerilmeleri azaltarak, elektriksel iletkenliği artırdığı β fazından α fazına dönüşümü teşvik ettiği gözlemlenmiştir. İçyapıda gözlemlenen bu etkilerin ise yapılan performans testlerindeki farkları sağlayan ana etmen olduğu düşünülmektedir.

8. TEZ ÖZETİ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular ve literatürdeki diğer sonuçlar değerlendirildiğinde; titanyum alaşımlarına kontrollü olarak kriyojenik işlem uygulanması ile aşınma direnci, korozyon direnci, elektriksel iletkenlik, plastik şekil verme kabiliyeti ve imal edilebilirlik özelliklerinde iyileşme sağlanabilmektedir. Bu tez kapsamında yapılan karakterizasyon ve mekanik özelliklerin tespiti çalışmaları oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmalar için bu etkinin daha yüksek sıcaklıklardaki etkinliğinin incelenmesi, ayrıca titanyum alaşımlarının yaygın kullanıldığı farklı kimyasal ortamların da etkisinin incelenmesi faydalı olacaktır. Kararsız β fazının yapıda daha fazla bulunduğu β titanyum alaşımları ve ELI (Extra low interstitial) sınıfı alaşımlar için de benzer analizler yapılmasının ilgi çekici sonuçlar doğurabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada test edilen etkilerin yanında kriyojenik işlemin yorulma, sürünme özelliklerine etkilerinin de incelenmesinin literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Yapılan karakterizasyon çalışmalarında gözlenen β - α faz dönüşümünün ve iç yapıdaki düzenlenme etkisinin sıcaklık ve süreye göre değişimi in situ yani anlık olarak XRD tekniği ile gözlenmesinin titanyum alaşımlarına kriyojenik işlemin etki etme mekanizmalarının daha net ortaya konması için faydalı olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada gözlenen plastisite iyileşmesi etkisinin plastik şekil verme uygulamalarında oda sıcaklığında ve tav sıcaklıklarında sahada test edilmesinin de şekillendirme süreçlerine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Yapılan elektriksel iletkenlik testi sonucunda gözlenen iyileşmenin etkisi elektro erozyon testi ile ortaya konulmuştur. Bu etkinin diğer imalat işlemlerine ve takım ömürlerine etkisinin incelenmesinin de literatüre önemli katkı yapacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Afzali, Pooria, Mardali Yousefpour, ve Ehsan Borhani. 2016. "Evaluation of the Effect of Ageing Heat Treatment on Corrosion Resistance of Al–Ag Alloy Using Electrochemical Methods". *Journal of Materials Research* 31 (16): 2457-64. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.218>.
- Alves, V. A., Reis, R. Q., Santos, I. C. B., Souza, D. G., de F. Gonçalves, T., Pereira-da-Silva, M. A., da Silva, L. A. (2009). In situ impedance spectroscopy study of the electrochemical corrosion of Ti and Ti–6Al–4V in simulated body fluid at 25°C and 37°C. *Corrosion Science*, 51(10), 2473-2482. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.06.035>
- AMS2801B, Heat Treatment of Titanium Alloy Parts. (2014, Şubat 27). SAE International.
- AMSH81200D, Heat Treatment of Titanium and Titanium Alloys. (2014, Temmuz 23). SAE International.
- Ashby, M. (2016). *Materials selection in mechanical design* (5th edition). Cambridge, MA: Elsevier.
- ASM Handbook Committee, & ASM International (Ed.). (1978). *Metals handbook* (9th ed). Metals Park, Ohio: American Society for Metals.
- ASM International, Davis, J. R., & ASM International (Ed.). (2007c). *Heat treating* ([10. ed.], 8. print). Materials Park, Ohio: ASM International.
- ASM Material Data Sheet. (t.y.). Geliş tarihi 01 Temmuz 2019, gönderen <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP641>
- Aspinwall, D.K., S.L. Soo, A.E. Berrisford, ve G. Walder. 2008. "Workpiece Surface Roughness and Integrity after WEDM of Ti–6Al–4V and Inconel 718 Using Minimum Damage Generator Technology". *CIRP Annals* 57 (1): 187-90. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.054>.
- B. K. C. Ganesh. (2012). Effect of heat treatment on dry sliding wear of titanium-aluminum-vanadium (Ti-6Al-4V) implant alloy. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 4(2). <https://doi.org/10.5897/JMER11.090>
- Banerjee, S., & Mukhopadhyay, P. (2007). *Phase transformations: Examples from titanium and zirconium alloys*. Geliş tarihi gönderen http://www.123library.org/book_details/?id=38586
- Basu, B., Sarkar, J., & Mishra, R. (2009). Understanding Friction and Wear Mechanisms of High-Purity Titanium against Steel in Liquid Nitrogen Temperature. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40(2), 472-480. <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9721-0>

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Birmingham, M. J., Kirsch, J., Sun, S., Palanisamy, S., & Dargusch, M. S. (2011). New observations on tool life, cutting forces and chip morphology in cryogenic machining Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(6), 500-511. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.02.009>
- Boyer, R. R. (1996). An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering: A*, 213(1-2), 103-114. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10233-1](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10233-1)
- Bozet, J.-L. (1993). Type of wear for the pair Ti6Al4V/ PCTFE in ambient air and in liquid nitrogen. *Wear*, 162-164, 1025-1028. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90116-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90116-4)
- Callister, W. D., Rethwisch, D. D., Genel, K., Bindal, C., Demirkol, M., Artır, R., Bakkal, M., Parasız, S.A., Argun, N., Aydemir, T., Aslan, T., Özen, S. P. (2014). *Materials science and engineering*.
- Caudill, J., Huang, B., Arvin, C., Schoop, J., Meyer, K., & Jawahir, I. S. (2014). Enhancing the Surface Integrity of Ti-6Al-4V Alloy through Cryogenic Burnishing. *Procedia CIRP*, 13, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.042>
- Chrapoński, J., & Szkliniarz, W. (2001). Quantitative metallography of two-phase titanium alloys. *Materials Characterization*, 46(2-3), 149-154. [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(01\)00117-6](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(01)00117-6)
- Das, D., Dutta, A. K., & Ray, K. K. (2009). Optimization of the duration of cryogenic processing to maximize wear resistance of AISI D2 steel. *Cryogenics*, 49(5), 176-184. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2009.01.002>
- E. F. A. D. (2002, Ağustos 13). Titanium Alloys for Aeroengine and Airframe Applications. Geliş tarihi 20 Haziran 2019, gönderen AZoM.com website: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1569>
- Elmer, J. W., Palmer, T. A., Babu, S. S., & Specht, E. D. (2005). In situ observations of lattice expansion and transformation rates of α and β phases in Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 391(1-2), 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.08.084>
- El-Tayeb, N. S. M., Yap, T. C., & Brevern, P. V. (2010a). On the tribo-cryogenic characteristics of titanium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 224(4), 395-409. <https://doi.org/10.1243/13506501JET703>
- El-Tayeb, N. S. M., Yap, T. C., & Brevern, P. V. (2010b). Wear characteristics of titanium alloy Ti54 for cryogenic sliding applications. *Tribology International*, 43(12), 2345-2354. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.08.012>

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gao, Y., Luo, B.-H., Bai, Z., Zhu, B., & Ouyang, S. (2016). Effects of deep cryogenic treatment on the microstructure and properties of WC Fe Ni cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 58, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.03.010>
- Gill, S. S., & Singh, J. (2010). Effect of Deep Cryogenic Treatment on Machinability of Titanium Alloy (Ti-6246) in Electric Discharge Drilling. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(6), 378-385. <https://doi.org/10.1080/10426910903179914>
- Gu, K., Wang, J., & Zhou, Y. (2014). Effect of cryogenic treatment on wear resistance of Ti-6Al-4V alloy for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 30, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.11.003>
- Gu, K. X., Wang, J. J., Yuan, Z., Zhang, H., Li, Z. Q., & Zhao, B. (2014). Effect of cryogenic treatment on the plastic property of Ti-6Al-4V titanium alloy. 42-47. <https://doi.org/10.1063/1.4860602>
- Gu, K., Zhang, H., Zhao, B., Wang, J., Zhou, Y., & Li, Z. (2013). Effect of cryogenic treatment and aging treatment on the tensile properties and microstructure of Ti-6Al-4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 584, 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.07.021>
- Gu, K., Zhao, B., Weng, Z., Wang, K., Cai, H., & Wang, J. (2018). Microstructure evolution in metastable β titanium alloy subjected to deep cryogenic treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 723, 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.003>
- Gu, K.-X., Wang, K.-K., Zheng, J.-P., Chen, L.-B., & Wang, J.-J. (2018). Electrochemical behavior of Ti-6Al-4V alloy in Hank's solution subjected to deep cryogenic treatment. *Rare Metals*. <https://doi.org/10.1007/s12598-018-1163-2>
- Gurrappa, I. (2003). Characterization of titanium alloy Ti-6Al-4V for chemical, marine and industrial applications. *Materials Characterization*, 51(2-3), 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2003.10.006>
- Hong, S. Y., & Ding, Y. (2001). Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(10), 1417-1437. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00026-8)
- Huang, Y.-G., Chen, J.-R., Zhang, M.-L., Zhong, X.-X., Wang, H.-Q., & Li, Q.-Y. (2013). Electrolytic Boronizing of Titanium in Na₂B₄O₇-20%K₂CO₃. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(12), 1310-1313. <https://doi.org/10.1080/10426914.2013.840912>
- Hübner, W., Gradt, T., Schneider, T., & Börner, H. (1998). Tribological behaviour of materials at cryogenic temperatures. *Wear*, 216(2), 150-159. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00187-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00187-7)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Isaak, C. J., & Reitz, W. (2007). The Effects of Cryogenic Treatment on the Thermal Conductivity of GRCop-84. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(1), 82-91. <https://doi.org/10.1080/10426910701524626>
- Jatti, V. S., & Singh, T. P. (2014). Effect of Deep Cryogenic Treatment on Machinability of NiTi Shape Memory Alloys in Electro Discharge Machining. *Applied Mechanics and Materials*, 592-594, 197-201. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.197>
- Jovanović, M. T., Tadić, S., Zec, S., Mišković, Z., & Bobić, I. (2006). The effect of annealing temperatures and cooling rates on microstructure and mechanical properties of investment cast Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design*, 27(3), 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.10.017>
- Kalia, S. (2010). Cryogenic Processing: A Study of Materials at Low Temperatures. *Journal of Low Temperature Physics*, 158(5-6), 934-945. <https://doi.org/10.1007/s10909-009-0058-x>
- Khanna, N., Garay, A., Iriarte, L. M., Soler, D., Sangwan, K. S., & Arrazola, P. J. (2012). Effect of heat Treatment Conditions on the Machinability of Ti64 and Ti54M Alloys. *Procedia CIRP*, 1, 477-482. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.085>
- Kim, J. W., Griggs, J. A., Regan, J. D., Ellis, R. A., & Cai, Z. (2005). Effect of cryogenic treatment on nickel-titanium endodontic instruments. *International Endodontic Journal*, 38(6), 364-371. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2005.00945.x>
- Kimura, Y. (2000). Corrosion fatigue of bio-ceramic sapphire in isotonic sodium chloride solution. *International Journal of Fatigue*, 22(10), 899-904. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(00\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00059-1)
- KIVAK, T. (2012). Kesici Takımlara Uygulanan Kriyojenik İşlemin Ti-6al-4v Alaşımının Delinebilirliği Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *Gazi Üniversitesi*.
- Kumar, S., Batish, A., Singh, R., & Singh, T. (2016). Machining performance of cryogenically treated Ti-5Al-2.5Sn titanium alloy in electric discharge machining: A comparative study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. <https://doi.org/10.1177/0954406215628030>
- Lee, K.-H., Yang, S.-Y., & Yang, J.-G. (2017). Optimization of heat-treatment parameters in hardening of titanium alloy Ti-6Al-4V by using the Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4), 753-761. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9433-3>
- Leyens, C., & Peters, M. (Ed.). (2003). *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications*. Weinheim : [Chichester: Wiley-VCH ; John Wiley]

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Liang, S. X., Yin, L. X., Zheng, L. Y., Xie, H. L., Yao, J. X., Ma, M. Z., & Liu, R. P. (2018). Tribological Behavior and Wear Mechanism of TZ20 Titanium Alloy After Various Treatments. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(9), 4645-4654. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3570-9>
- Liu, X., Chu, P., & Ding, C. (2004). Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 47(3-4), 49-121. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.11.001>
- Lütjering, G., & Williams, J. C. (2007). *Titanium* (2nd ed). Berlin ; New York: Springer.
- Malinov, S., Guo, Z., Sha, W., & Wilson, A. (2001). Differential scanning calorimetry study and computer modeling of $\beta \Rightarrow \alpha$ phase transformation in a Ti-6Al-4V alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(4), 879-887. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0345-x>
- Nadig, D. S., Ramakrishnan, V., Sampathkumaran, P., & Prashanth, C. S. (2012). Effect of cryogenic treatment on thermal conductivity properties of copper. 133-139. <https://doi.org/10.1063/1.4712089>
- Nasreen, H., Mohamed, S. B., & Mohideen, S. R. (2014). Microstructural Analysis and Wear Behavior of Cryogenically Treated Ti-6Al-4V Alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 592-594, 1331-1335. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.1331>
- Niinomi, M. (1998). Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1-2), 231-236. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00806-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00806-X)
- Nishimura, T., Mizoguchi, T., & Itoh, Y. (1984). TITANIUM MATERIALS FOR CRYOGENIC SERVICES. R and D: Research and Development Kobe Steel Engineering Reports, 34(3), 63-66. Geliş tarihi gönderen Scopus.
- Park, Y. G., Wey, M. Y., & Hong, S. I. (2007). Enhanced wear and fatigue properties of Ti-6Al-4V alloy modified by plasma carburizing/CrN coating. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 18(5), 925-931. <https://doi.org/10.1007/s10856-006-0014-0>
- PEDERSON, R. (2002). Microstructure and Phase Transformation of Ti-6Al-4V. Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Engineering Materials.
- Polmear, I. J., Nie, J.-F., Qian, M., & StJohn, D. (2017). *Light alloys: Metallurgy of the light metals* (Fifth edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pramanik, A. (2014). Problems and solutions in machining of titanium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5-8), 919-928. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5326-x>
- Qazi, J. I., Senkov, O. N., Rahim, J., & (Sam) Froes, F. H. (2003). Kinetics of martensite decomposition in Ti–6Al–4V–xH alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 359(1-2), 137-149. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00350-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00350-2)
- Rahman Rashid, R. A., Sun, S., Wang, G., & Dargusch, M. S. (2011). Machinability of a near beta titanium alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(12), 2151-2162. <https://doi.org/10.1177/2041297511406649>
- Rai, S., Choudhary, B. K., Jayakumar, T., Rao, K. B. S., & Raj, B. (1999). Characterization of low cycle fatigue damage in 9Cr–1Mo ferritic steel using X-ray diffraction technique. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 76(5), 275-281. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(98\)00140-9](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(98)00140-9)
- Senthilkumar, D., & Rajendran, I. (2011). Influence of Shallow and Deep Cryogenic Treatment on Tribological Behavior of En 19 Steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 18(9), 53-59. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60034-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60034-X)
- Sert, A., & Celik, O. N. (2019). Characterization of the mechanism of cryogenic treatment on the microstructural changes in tungsten carbide cutting tools. *Materials Characterization*, 150, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.02.006>
- Sha, W., & Malinov, S. (2009). *Titanium alloys: Modelling of microstructure, properties and applications*. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- Singh, Raghuvir, Kurella, A., & Dahotre, N. B. (2006). Laser Surface Modification of Ti—6Al—4V: Wear and Corrosion Characterization in Simulated Biofluid. *Journal of Biomaterials Applications*, 21(1), 49-73. <https://doi.org/10.1177/0885328206055998>
- Singh, Rupinder, & Singh, B. (2011). Comparison of Cryo-treatment Effect on Machining Characteristics of Titanium in Electric Discharge Machining. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 3, 239-248. <https://doi.org/10.15282/ijame.3.2011.1.0020>
- Sun, S., Brandt, M., & Dargusch, M. S. (2010). Machining Ti–6Al–4V alloy with cryogenic compressed air cooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(11), 933-942. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.08.003>
- Takadom, J., & Takadom, J. (2008). *Materials and surface engineering in tribology*. London : Hoboken, NJ: ISTE ; Wiley.
- Taylor, B., & Weidmann, E. (2015). *Metallographic preparation of titanium*. Struers.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed Bar. (t.y.). Geliş tarihi 04 Aralık 2017, gönderen http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=10d463eb3d3d4ff48fc57e0ad1037434
- Tung, H.-M., Huang, J.-H., Tsai, D.-G., Ai, C.-F., & Yu, G.-P. (2009). Hardness and residual stress in nanocrystalline ZrN films: Effect of bias voltage and heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 500(1-2), 104-108. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.006>
- Udomphol, T. (2007). Titanium and its alloys. Program adı: Suranaree University of Technology. Suranaree University of Technology.
- Vashista, M., & Paul, S. (2012). Correlation between full width at half maximum (FWHM) of XRD peak with residual stress on ground surfaces. *Philosophical Magazine*, 92(33), 4194-4204. <https://doi.org/10.1080/14786435.2012.704429>
- Veiga, C., Davim, J. P., & Loureiro, A. J. R. (2013). Review on machinability of titanium alloys: the process perspective. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 34(2), 148-164.
- Venugopal, K. A., Paul, S., & Chattopadhyay, A. B. (2007). Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling. *Wear*, 262(9-10), 1071-1078. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.11.010>
- Wang, P., Lu, W., Wang, Y., Liu, J., & Zhang, R. (2011). Effects of cryogenic treatment on the thermal physical properties of Cu76.12Al23.88 alloy. *Rare Metals*, 30(6), 644-649. <https://doi.org/10.1007/s12598-011-0443-x>
- Welsch, G., Boyer, R., & Collings, E. W. (Ed.). (1994). *Materials properties handbook: Titanium alloys*. Materials Park, OH: ASM International.
- Wu, T. I., & Wu, J. K. (1997). Effects of temperature and current density on the surface hardness and tribological properties of Ti-6Al-4V alloy by molten salt carburization. *Surface and Coatings Technology*, 90(3), 258-267. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(96\)03134-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)03134-9)
- Zeng, L., & Bieler, T. R. (2005). Effects of working, heat treatment, and aging on microstructural evolution and crystallographic texture of α , α' , α'' and β phases in Ti-6Al-4V wire. *Materials Science and Engineering: A*, 392(1-2), 403-414. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.09.072>
- Zhecheva, A., Sha, W., Malinov, S., & Long, A. (2005). Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. *Surface and Coatings Technology*, 200(7), 2192-2207. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.115>

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zheng, C. B., Chen, X., Li, C. L., Shen, X. L., & Cheng, K. (2016). The Effect of Heat Treatment on Corrosion Resistance of 6061 Aluminum Alloy. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, 11(8), 7254-7261.
- Zhirafar, S. (2005). Effect of Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of Steel and Aluminum Alloys. Concordia University, Montreal, Quebec, Canada,
- Zhisheng, W., Ping, S., Jinrui, L., & Shengsun, H. (2003). Effect of deep cryogenic treatment on electrode life and microstructure for spot welding hot dip galvanized steel. *Materials & Design*, 24(8), 687-692. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00029-3)
- Zieliński, A., Jazdzewska, M., Łubiński, J., & Serbiński, W. (2011). Effects of Laser Remelting at Cryogenic Conditions on Microstructure and Wear Resistance of the Ti6Al4V Alloy Applied in Medicine. *Solid State Phenomena*, 183, 215-224. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.183.215>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fatih Hayati ÇAKIR
Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir 25.11.1987
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim : fcakir@ogu.edu.tr, fatihhayaticakir@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise: Eskişehir Anadolu Lisesi 2005

Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü (2010)

Yüksek Lisans: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Konstrüksiyon ve İmalat ABD (2014)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :

TUSAŞ Motor Sanayii İmalat Mühendisliği 2010-2013
Anadolu Üniversitesi Ulaştırma MYO Araştırma görevlisi: 2013 ve 2015-2017
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü: Araştırma görevlisi: 2013-2015
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Eskişehir MYO: Öğretim Görevlisi 2017-

Yayımları (SCI) :

Çakır, F. H., & Çelik, O. N. (2017a). Effect of Isothermal Bainitic Quenching on Rail Steel Impact Strength and Wear Resistance. *Metal Science and Heat Treatment*. <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0144-7>

Çakır, F. H., & Çelik, O. N. (2017b). The effects of cryogenic treatment on the toughness and tribological behaviors of eutectoid steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(7), 3233-3239. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0613-3>

Gürgen, S., Çakır, F. H., Sofuoğlu, M. A., Orak, S., Kuşhan, M. C., & Li, H. (2019). Multi-criteria decision-making analysis of different non-traditional machining operations of Ti6Al4V. *Soft Computing*, 23(13), 5259-5272. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03959-8>

Sofuoğlu, M. A., Çakır, F. H., & Gürgen, S. (2018). An efficient approach by adjusting bounds for heuristic optimization algorithms. *Soft Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3327-2>

Sofuoğlu, M. A., Çakır, F. H., Gürgen, S., Orak, S., & Kuşhan, M. C. (2017). Experimental investigation of machining characteristics and chatter stability for Hastelloy-X with ultrasonic and hot turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1153-9>

Sofuoğlu, M. A., Çakır, F. H., Gürgen, S., Orak, S., & Kuşhan, M. C. (2018). Numerical investigation of hot ultrasonic assisted turning of aviation alloys. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(3). <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1037-4>

Sofuoğlu, M. A., Çakır, F. H., Kuşhan, M. C., & Orak, S. (2018). Optimization of different non-traditional turning processes using soft computing methods. *Soft Computing*. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3471-8>