

**Ti-6Al-4V SAÇLARIN MİKROYAPI DEĞİŞİMİ VE  
GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**GÜNER ÇETİN**



**T. C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Ti-6Al-4V SAÇLARIN MİKROYAPI DEĞİŞİMİ VE GERİ YAYLANMA  
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**GÜNER ÇETİN**

Orcid No:0000-0002-7414-7756

Doç. Dr. Rukiye ERTAN

(Danışman)

Orcid No:0000-0002-9631-4607

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BURSA-2019**

## TEZ ONAYI

Güner ÇETİN tarafından hazırlanan "Ti-6Al-4V SAÇLARIN MİKROYAPI DEĞİŞİMİ VE GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Rukiye ERTAN

**Başkan** : Doç. Dr. Rukiye ERTAN  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi  
Otomotiv Müh.

  
İmza

**Üye** : Prof. Dr. Deniz UZUNSOY  
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve  
Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve  
Malzeme Müh.

  
İmza

**Üye** : Doç. Dr. Gökhan SEVİLGİN  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi  
Otomotiv Müh.

  
İmza

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN  
Enstitü Müdürü

...

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

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

**beyan ederim.**

20/08/2019

**Güner ÇETİN**



## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### Ti-6Al-4V SAÇLARIN MİKROYAPI DEĞİŞİMİ VE GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

### GÜNER ÇETİN

Bursa Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Rukiye ERTAN

Titanyum metalinin biz mühendisleri ilgilendiren en önemli özellikleri; yüksek korozyon, mukavemet dayanımı, yüksek sertlik değerleri ve yüksek ısıl dayanımı ile birlikte düşük yoğunluğa sahip olmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda şekillendirilmesi istendiğinde meydana gelen geri yaylanma açıları da şekillendirilebilirliğinin zor olduğunu kanıtlamaktadır. Korozif dayanımı sayesinde deniz suyu, atmosfer etkisi, asitli ve alkali ortamlarda kullanımı yaygındır. Jet motorları, uçak gövdesi, zırhlı hava taşıtları, füzeler ve mekanizma içerisinde çalışırken aşırı sıcaklığa maruz kalan parçaların diğer metallerle karşılaştırılması yapıldığında üstünlük sergilemesi sebebiyle tercih edilirligini arttırmaktadır. Metalin iç yapısına bakıldığında alfa ve beta olmak üzere iki farklı türde yapı bulunduğu görülebilir.

Alfa sıkı düzen hekzagonal, beta ise hacim merkezli kübik yapıdadır. 885°C'ye kadar alfa fazında bulunan saf titanyum metalinin bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında ise beta fazına dönüştüğü bilinmektedir. Faz dönüşümü titanyumun türüne göre yani içerisinde bulunan diğer elementlerin miktarına göre farklı sıcaklıklarda oluşmaktadır.

Bu tez çalışmasında, titanyum ve alaşımlarının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri; iç yapı özellikleri; üretim yöntemleri; ısıl işlemleri ve kullanıldığı alanlar incelenmiştir. Mikroyapı karakterizasyonu ve sıcak şekillendirilmesi hakkında daha fazla bilgi sahibi olmayı gerektiren önemli alaşımlardan biri olan Ti6Al4V türünde ki malzemenin, farklı sıcaklıklarda ısıtılıp preslendikten sonra oluşturulan U profilden alınan numunelerde, mikroyapı değişimlerine bağlı olarak malzemenin yaptığı geri yaylanma açıları ve çekme grafiklerindeki sonuçlar değerlendirilerek Ti6Al4V'un şekillendirilebilirliği araştırılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Titanyum alaşımları, Ti-6Al-4V, Sıcak Şekillendirme, Geri yaylanma, mekanik özellikler, mikroyapı.

**2019, vi + 63 sayfa**

## **ABSTRACT**

### **MSc Thesis**

Investigation Springback Behavior and  
Microstructural Evolution of Ti-6Al-4V Sheets

**Güner ÇETİN**

Bursa Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

**Supervisor:** Asst. Prof. Rukiye ERTAN

The most important properties of titanium metal that concern us engineers; high corrosion and erosion resistance with high thermal and specific strength and low density. Due to its corrosive resistance, it is widely used in sea water, atmospheric effect, acidic and alkali environments. When the internal structure of the metal is examined, it can be seen that there are two different types of structures, alpha and beta. It is known that pure titanium metal which is in alpha phase up to 885°C turns into beta phase when this temperature is exceeded. The phase conversion occurs at different temperatures according to the type of titanium, the amount of other elements contained therein.

In this thesis, chemical, physical, and mechanical properties of titanium and their alloys; internal structure characteristics; production methods; heat treatments and their application areas were examined. One of the important alloys which requires more knowledge about microstructure characterization and hot forming is that the samples taken from U profile formed after heating and pressing at different temperatures of 1 mm sheet Ti-6Al-4V type due to the complex deformation properties in the dual phase ( $\alpha+\beta$ ) region, microstructural changes due to the material made by the springback angles and the results of tensile graphs were evaluated and the formability of Ti-6Al-4V was investigated.

**Keywords:** Titanium alloys, Ti-6Al-4V, Hot Forming, Springback, Mechanical properties, Microstructure.

**2019, vi + 63 pages**

## TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimi ile çalıőmalarımı yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Rukiye ERTAN'a sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Deney numunelerinin hazırlanması iőleminde yardımcı olan değerli DURMAZLAR alıőanı Taner ÇETİN'e teşekkür ederim.

Son olarak çalıőmalarım sırasında manevi olarak en büyük desteği veren aileme en içten sevgi ve teőekkürlerimi sunarım.

Güner ÇETİN

20/08/2019

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Titanyumun Önemi .....	3
2.2. Dünyada Titanyum Endüstrisi.....	4
2.3. Türkiye'de Titanyum Endüstrisi.....	7
2.4. Titanyum ve Alaşımlarının Uygulama Alanları .....	9
2.4.1. Enerji ve Kimya Sanayi .....	9
2.4.2. Uzay ve Havacılık Sanayi .....	10
2.4.3. Denizcilik Uygulamaları .....	11
2.4.4. Medikal Uygulamalar .....	13
2.5. Titanyum ve Alaşımlarının İçyapı Özellikleri .....	14
2.5.1. Saf Titanyum .....	16
2.5.2. Titanyum Faz Yapılarına Göre Türleri .....	20
2.6. Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri .....	26
2.7. Titanyum ve Alaşımlarının Üretim Yöntemleri .....	30
2.7.1. Titanyumun Hammadde Olarak Elde Edilmesi .....	30
2.7.2. Titanyum Yarı Mamullerin Üretimi .....	33
2.7.3. Titanyum ve Alaşımlarının Geleneksel Üretim Yöntemleri .....	35
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	43
3.1. Fiziksel ve Kimyasal Özellikler .....	43
3.2. Yapılan İşlemler .....	44
4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....	46
4.1. Geri Yaylanma Açısı İncelenmesi .....	46
4.2. Mikro Yapı İncelemeleri .....	47
4.3. Mekanik İnceleme .....	50
5. SONUÇLAR .....	52
KAYNAKLAR .....	54
ÖZGEÇMİŞ .....	56



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Dünyada Titanyum Rezervleri.....	4
Çizelge 2.2. Toplam titanyum dioksit üretiminin kapasitesinin başlıca üretici firmalar itibariyle dağılım.....	5
Çizelge 2.3. Dünya Devletleri Titanyum Üretimi .....	6
Çizelge 2.4. Türkiye Titanyum Rezervleri .....	7
Çizelge 2.5. Ruhsat Sahaları Bazında Titanyum Rezervleri .....	8
Çizelge 2.6. MTA genel müdürlüğü tarafından Batı Anadolu'da bulunan titanyum rezervleri .....	8
Çizelge 2.7. Yıllara göre Türkiye Rutil Üretimi.....	9
Çizelge 2.8. Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri .....	16
Çizelge 2.9. Bazı Titanyum Alaşımlarının Kütük Dövme Sıcaklıkları .....	34
Çizelge 2.10. Bazı Titanyum Kütüklerin Son Sıcak Hadde İşlem Sıcaklıkları .....	35
Çizelge 2.11. Ti-6Al-4V alaşımından yapılan bir jet motoru parçasının talaşlı işlem parametreleri.....	38
Çizelge 2.12. Titanyum ve Alaşımları için Şerit Testere Parametreleri .....	39
Çizelge 2.13. Döküm, dövme ve TM ile üretilen bazı titanyum parçaların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması .....	41
Çizelge 3.1. Ti-6Al-4V alaşımının iç yapı kompozisyonu .....	43
Çizelge 3.2. Ti-6Al-4V alaşımına ait bazı mekanik özellikler .....	43

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Tabaka tipi ısı değiştirici .....	9
Şekil 2.2. Kimya sanayi için ısı değiştirici .....	10
Şekil 2.3. Buhar türbini bıçakları .....	10
Şekil 2.4. Enerji tesisleri için kondanser .....	10
Şekil 2.5. V2500 turbofan motoru .....	11
Şekil 2.6. Buhar türbini kafesi .....	11
Şekil 2.7. Roketlerde kullanılan yakıt tankı .....	11
Şekil 2.8. Denizaltı araçların basınca dayanıklı dış kabuklarında .....	12
Şekil 2.9. Balık çiftliklerinde .....	12
Şekil 2.10. Deniz kenarı korkuluklarında .....	12
Şekil 2.11. Çeşitli protez parçaları .....	13
Şekil 2.12. Kalay, Alüminyum, Molibden ve Manganın Titanyum ile faz diyagramları .....	15
Şekil 2.13. Eşeksenli ve iğnesel içyapı örneği .....	17
Şekil 2.14. HMK kafes yapısının SDH kafes yapısına dönüşümü .....	18
Şekil 2.15. Martenzitik $\alpha$ yapısı .....	18
Şekil 2.16. İğnemsiz $\alpha$ oluşumu (Widmanstatten yapısı oluşumu) bir düzlemden ve birçok düzlemden .....	19
Şekil 2.17. Widmanstatten yapısının oluşumu .....	20
Şekil 2.18. $\alpha$ ve $\beta$ faz yapılarının özellikler üzerindeki etkileri .....	22
Şekil 2.19. $\alpha$ Titanyum alaşımının tavlama sonrası, hızlı soğutma sonrası iğnemsiz iç yapı ve yavaş soğutma sonrası plakalı iç yapı .....	23
Şekil 2.20. $\alpha$ + $\beta$ titanyum alaşımının tavlama sonrası, yavaş soğutma sonrası eşeksenli iç yapı ve hızlı soğutma sonrası iç yapı .....	24
Şekil 2.21. Ti6Al4V alaşımını için temsili faz diyagramı .....	27
Şekil 2.22. Ti6Al4V'nin havada soğutulurak elde edilen yapısı .....	28
Şekil 2.23. Ti6Al4V alaşımına su verilerek martenzit yapı oluşumu yaşlandırma sonrası yapı.....	28
Şekil 2.24. Sıcak işlenmiş ve tavlama sonrası Ti6Al4V alaşımını .....	29
Şekil 2.25. Kroll işleminin şeması .....	31
Şekil 2.26. Uçaklarda Kullanılan Bir Titanyum Parçanın İmal Usullerinin Karşılaştırılması .....	36
Şekil 3.1. Düz sacların U profil olarak basıldığı kalıp .....	44
Şekil 3.2. U profildeki geri yaylanmanın şematik gösterimi .....	45
Şekil 4.1. Oda sıcaklığı, 350°C, 450°C, 550°C, 650°C, 750°C, 850°C and 950 °C sıcaklıklara kadar ısıtılan Ti-6Al-4V alaşımının geri yaylanma açıları .....	46
Şekil 4.2. Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapı görüntüleri oda sıcaklığı, 350°C, 450°C, 550°C, 650°C, 750°C, 850°C ve 950 °C .....	47
Şekil 4.3. Ti-6Al-4V alaşımını fırınlanmamış numunenin çekme grafiği .....	50
Şekil 4.4. Ti-6Al-4V alaşımının sertlik değerleri grafiği .....	51

## 1. GİRİŞ

Ti6Al4V alaşımı biyomedikal, uzay ve havacılık, otomotiv parçaları, savunma sanayi, deniz ve kimyasal endüstriler gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Uçakların yapısal parçalarında özellikle de motor gibi yüksek ısıya maruz kalan kısımlarda, çok düşük sıcaklıklarda yüksek mukavemet sağlaması gereken kanat bağlantı noktalarında, biyolojik uyumluluğu sayesinde implantlarda ve protezlerde kullanıldığı bilinmektedir.

Birçok jet motorunda, titanyum esaslı alaşımlar net ağırlığın %20 ila %30'unu oluşturur. Ayrıca titanyum alaşımlarının düşük ağırlığı, yüksek korozyon direnci, düşük termal iletkenliği, yüksek sıcaklıklarda ki dayanımı, yüksek mukavemet, düşük elastisite modülü, uzun servis ömrü ve kompozit yapılarla rekabet edici özelliklere sahip olması bu alaşımların uçak, uzay, denizcilik, otomotiv, kimya, petrokimya, biomedikal ve spor ekipmanları endüstrisi ve mühendisliği gibi pek çok alanda kullanımını yaygınlaştırarak daha da çok arttırmıştır (Nouari ve Makich 2013).

Titanyum alaşımlarının endüstride hızla yaygınlaşmıştır. Korozyon dayanımı ve metale göre % 56 daha düşük yoğunlukta olmasına rağmen yüksek mukavemetli bir yapıya sahip olması bunda büyük bir etken olsa da esas olarak endüstriyel uygulamalarda titanyum alaşımının seçimi, mikro yapı dönüşümüne göre yapılmaktadır (Ramesh ve ark. 2008).

Ti-6Al-4V malzemesi, titanyum alaşımları içinde en çok kullanılan malzemedir. Uzay ve medikal endüstrilerinde %80, global üretimde ise %50'den fazla kullanıma sahiptir (Shokrani ve ark. 2016). Ancak bu olumlu özelliklerinin yanında kayma, sertlik ve aşınmadaki zayıf performansı, zor tedarik edilmesi gibi olumsuz özellikleri de vardır. Ti6Al4V alaşımı zayıf ısı iletkenliği, yüksek sıcaklıklardaki dayanımı ve takım malzemeleri ile kimyasal reaktifliği gibi sebeplerden kaynaklı zor işlenebilen bir malzeme türüdür (Garbiec ve ark. 2016, Armendia ve ark. 2010).

Birçok ek yüksek maliyet gerektirmelerine karşın kimyasal ve mekanik özelliklerinde ki avantajlarından dolayı, akış davranışı ve mikroyapı fiziği hakkında daha fazla bilgi sahibi olmayı gerektiren önemli alaşımlardan biri, ikili faz ( $\alpha + \beta$ ) bölgesinde ki karmaşık deformasyon özelliklerinden dolayı bu çalışmada da kullanılan Ti6Al4V'dur (Souza ve ark. 2019).

Bu tez çalışmasında önemi ve kullanım alanı gittikçe artan Ti-6Al-4V alaşımının farklı sıcaklıklardaki şekillendirilebilirliği, mikroyapısındaki faz değişimleri ve mekanik özellikleri ile ilişkisi üzerinde durulmuştur. Deneysel çalışma sonuçları incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1 Titanyumun Önemi

İlk defa 1791 yılında saf olmayan titanyum dioksit William Gregor tarafından siyah kumlardan beyaz metal oksit olarak ayrıştırılarak elde edilmiştir. William'ın gözlem ve sonuçlarına göre siyah olan kum %51 oranında demir dioksit ve %45.25 oranında ise titanyum dioksiti yapısında bulundurmaktaydı. 1795 yılına kadar bu ayrıştırma işlemi pek önemli olarak gözükmese de Klaproth'un bu malzemenin Macar ve Çeklerin rutil rezervlerinden alınan numunelerle yüksek oranda benzeştiğini belirtmesinden sonra bu keşif değer kazanmıştır (Anonim 2019a).

Titanyum yeryüzünde bulunan diğer metal ve elementlerle kıyaslanırsa, metaller arasında 4. ve elementler arasında ise 9. sırada bulunmaktadır. Yerkabuğunun %0,6'sını oluşturan titanyum elementine Ay'dan getirilen kaya parçalarında da %12 oranında titanyum dioksit şeklinde rastlanmıştır (Büyük Larousse).

Titanyumun oksijen ve azota karşı aşırı ilgisi oldukça yüksektir. Bu da titanyumun saf olarak elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Ancak titanyum tetra klorürün koruyucu bir atmosfer içerisinde magnezyum ile indirgenmesi yöntemini gerçekleştiren Kroll sayesinde titanyumu saf olarak elde etmek kolaylaşmıştır. Kroll yöntemi ile elde edilen titanyumun yapısı gözenekli haldedir ve bu sebeple titanyum metaline "titanyum süngeri" adı da verilmiştir (Anonim 2019b).

Titanyum yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım sergileyen, mekanik özelliklerini büyük oranda koruyan bir metal olduğundan özellikle askeri ve savunma amaçlı alanlarda kendisine göre daha yüksek yoğunluğa sahip metallere alternatif olarak değerlendirilmiştir. ABD'de 1952 yılında DC-7 tipi uçağın motorunda yanma odası ve uçağın kanatlarında motor bağlantı yerleri için kullanılmıştır. İlerleyen zamanlarında ve günümüzde bu alaşım kompresör diskleri, hem askeri hem de ticari hava taşıtlarının motor pervane kanatları ve gövde yapısında yerini almıştır (Anonim 2019b).

Dökme titanyum ise 1970'li yıllarda uzay uygulamaları için dayanım ve hafifliğinden dolayı vazgeçilmez malzeme haline gelmiş ve dökme titanyum yaygınlaşmıştır. Uzay uygulamalarında kullanılan titanyumun %70'ini, ticari olarak kullanılan titanyumun ise %30'unu oluşturmaktadır (Büyük Larousse).

Yaygın açıdan titanyumun kullanım alanı uzay, uçak, deniz ve savunma sanayi olarak bilinse de son zamanlarda titanyum ve titanyum alaşımları sağlık alanında da kullanım açısından bir sıçrayış göstermiştir. İşleme tekniklerinin gelişmesi ve maliyetlerin düşürülmesi ile birlikte biyomedikal aparatlar ve çeşitli implantlarda kullanımı giderek artmaktadır (Anonim 2019c).

## 2.2 Dünyada Titanyum Endüstrisi

Rutil ve ilmenit en önemli titanyum mineralleridir. İlmenit sahil kumu ve farklı cevherlerden oluşturulabilirken rutil genellikle sahil kumlarından elde edilir ve bu sebeple ilmenit yeryüzünde daha fazla bulunmaktadır. Avustralya, Hindistan ve Meksika rutil yatakları, Avustralya, Norveç, ABD, Kanada ve Brezilya ise ilmenit kaynakları bakımından oldukça zengindir (Anonim 2019 b). Farklı kaynaklardan toplanan verilere göre titanyum rezervlerinin dünyada ki dağılımı Çizelge 2.1'de verilmiştir (Anonim 2019g).

**Çizelge 2.1.** Dünyada titanyum rezervleri (Anonim 2019g).

Dünya Titanyum Rezervleri(x1000 ton)					
	İlmenit			Rutil	
	Ülkeler	Rezervler		Ülkeler	Rezervler
	ABD	2.000		Avustralya	29.000
	Avustralya	250.000		Hindistan	7.400
	Brezilya	43.000		Kenya	13.000
	Kanada	31.000		Mozambik	880
	Çin	220.000		Senegal	30
	Hindistan	85.000		Sierra Leone	490
	Kenya	54.000		Güney Afrika	8.300
	Madagaskar	40.000		Ukrayna	2.500
	Mozambik	14.000		Diğer Ülkeler	400

**Çizelge 2.1 devamı**

	Norveç	37.000		TOPLAM(II)	62.000
	Senegal				
	Güney Afrika	63.000			
	Ukrayna	5.900			
	Vietnam	1.600			
	Diğer Ülkeler	26.000			
	TOPLAM(I)	870.000			
Dünya Titanyum Rezervleri Toplamı(I+II) = 932.000					

Çizelge 2.1'den de görüleceği üzere 870 milyon ton ilmenit ve 62 milyon ton rutil ile toplam 932 milyon ton titanyum rezervi mevcuttur ve ilmenit %89'luk bir kısmına sahiptir. Toplam dünya kaynakları ise 2 milyar tondan çok daha fazladır.

Avustralya'nın doğu ve batı kıyıları titanyum kaynaklarının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Sonrasında sırasıyla ABD, Mozambik ve Yeni Zelanda gelmektedir. Teknolojik gelişmelere ve savunma sanayinde kullanımı da göz önüne alındığında ABD en fazla titanyum tüketimi gerçekleştiren ülkedir. Norveç Avrupa titanyum üretiminin %95'ini tek başına oluştursa da Avrupa ülkeleri titanyum ihtiyacını ithalat ile tamamlamaktadır (Anonim 2019e).

Titanyum dioksit üretimi dünya çapında az sayıda büyük ve kapsamlı şirketlerin tekelinde toplanmış durumdadır. Dünya genelinde firma bazında dağılımı Çizelge 2.2'de gösterilmiştir (Anonim 2019f).

**Çizelge 2.2.** Toplam titanyum dioksit üretiminin kapasitesinin başlıca üretici firmalar itibariyle dağılım (Anonim 2019f).

Üretici	Kapasite(1000 ton/yıl)
<b>Dupont(Amerika)</b>	<b>530</b>
<b>Tioxide(Avrupa,Kanada,Avustralya,G.Afrika)</b>	<b>416</b>
<b>SCM Chemicals(ABD,Avustralya,Avrupa)</b>	<b>341</b>
<b>NL Chemicals(Avrupa,Kanada)</b>	<b>280</b>
<b>Kemira (Avrupa,ABD)</b>	<b>170</b>

**Çizelge 2.2 devamı**

<b>Bayer(Avrupa,Brezilya)</b>	<b>150</b>
<b>Ashthra(Asya)</b>	<b>125</b>
<b>Rhone Poulenc (Avrupa)</b>	<b>105</b>
<b>Kerr Mc Gee(ABD)</b>	<b>70</b>
<b>Sachtleben(Avrupa)</b>	<b>68</b>
<b>Diğerleri</b>	<b>440</b>
<b>TOPLAM</b>	<b>2695</b>

**Çizelge 2.3. Dünya Devletleri Titanyum Üretimi (Anonim 2019g)**

Dünya Titanyum Üretimi(x1000 ton)				
	Ülkeler	Maden Üretimi		
		2016	2017	
İlmenit	ABD	100	100	
	Avustralya	780	900	
	Brezilya	48	50	
	Kanada	595	475	
	Çin	840	800	
	Hindistan	180	200	
	Kenya	280	375	
	Madagaskar	92	140	
	Mozambik	540	550	
	Norveç	260	260	
	Senegal	250	300	
	Güney Afrika	1.020	1.300	
	Ukrayna	210	350	
	Vietnam	240	300	
	Diğer Ülkeler	71	90	
	Toplam(I)		5.500	6.200
	Rutil	Avustralya	380	450
Hindistan		19	20	
Kenya		84	80	
Mozambik		7	7	
Senegal		9	10	



### Çizelge 2.3 devamı

Rutil	Sierra Leone	130	160
	Güney Afrika	67	65
	Ukrayna	95	90
	Diğer Ülkeler	8	15
Toplam(II)		800	900
Genel Toplam(I+II) (İlmenit+rutil)		6.300	7.100

Çizelge 2.3'te de görüldüğü gibi 2017 yılında ilmenit üretiminde; 1.300.000 ton ile Güney Afrika, 900.000 ton ile Avustralya, 800.000 ton ile Çin; rutil üretiminde ise 450.000 ton ile Avustralya, 160.000 ton ile Sierra Leone, 90.000 ton ile Ukrayna önde gelen ülkelerdir.

İlmenit ve rutilin dünyada toplam üretimi 2016'da 6.3 milyon ton, 2017'de ise 7.1 milyon ton seviyesine ulaşmıştır.

### 2.3 Türkiye'de Titanyum Endüstrisi

"Cumhuriyet Dönemi Madenciligi" ait bir raporlamada, Türkiye'de bulunan metalik madenler ve endüstriyel hammaddeler çizelgesinde titanyum rezervlerine yer verilmiştir.

Çizelge 2.4'te bilgiler görülmektedir.

### Çizelge 2.4. Türkiye Titanyum Rezervleri (Kartalkanat 2012)

Yeri	Rezerv(Görünür)	Tenör ve Yatak Tipi
Sakarya-Karasu	161.348.413	%0.87-0.98 TiO <sub>2</sub> , Plaser Yatak
Manisa-Alaşehir	5.131.969	%4.95 TiO <sub>2</sub> , Primer Yatak

Maden İşleri Genel Müdürlüğü ruhsat verileri baz alındığında ise Manisa'da işletme ve Afyonkarahisar'da arama ruhsatına haiz iki titanyum sahasında 113 milyon tona yakın görünür rezerv bulunmaktadır. Çizelge 2.5'te ruhsat sahaları bazında titanyum rezervlerine ait bilgiler gösterilmiştir (Anonim 2019h).

**Çizelge 2.5.** Ruhsat Sahaları Bazında Titanyum Rezervleri (Anonim 2019h)

Yeri	Rezerv Türü	Miktarı (ton)
Manisa	Görünür Rezerv	111.540.000
Afyonkarahisar	Görünür Rezerv	1.312.500
Toplam		112.852.500

Aydın, Muğla, Manisa şehirlerinde bulunan iki adet işletme ruhsatlı rutil sahası MİGEM-2017 verilerine göre bulunsa da rezerv verilerine ulaşamamıştır.

1980'li yıllarda yapılan araştırma ve incelemelere göre ekonomik bir üretimin yapılamayacağı ortaya konmuştur. Batı Anadolu'da bulunan titanyum rezervleri Çizelge 2.6'da gösterilmiştir (Kayakıran ve ark. 2010).

**Çizelge 2.6.** MTA genel müdürlüğü tarafından Batı Anadolu'da bulunan titanyum rezervleri (Kayakıran ve ark. 2010)

YÖRE		REZERV (ton)	%TiO <sub>2</sub>
İzmir-Ödemiş-Aktaş Deresi	2	3.200.000	1,2
İzmir-Ödemiş-Rahmanlar	2	7.200.000	1,2
İzmir-Ödemiş-Işıklar Deresi	2	600.000	1,8
Manisa-Gördes-Demirci	1	1.272.000	1,11
Köseler-Benlieli	2	45.000.000	0,5
Manisa-Gördes-Demirci-Demirci Çay	2	1.700.000	0,5
Manisa-Gördes-Gördes Çayı	2	6.800.000	0,5
Manisa-Salihli-Turgutlu	3	30.000.000	1
Uşak-Eşme	3	12.000.000	1-2

1: Görünür 2: Muhtemel 3: Kaynak (Rezerv+Potansiyel+Bilinmeyen Kaynaklar)

Türkiye'de birkaç yıllık rutil üretimi de Çizelge 2.7'de verilmiştir.

**Çizelge 2.7.** Yıllara göre Türkiye Rutil Üretimi(ton/yıl)[35]

2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
241	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	6.706

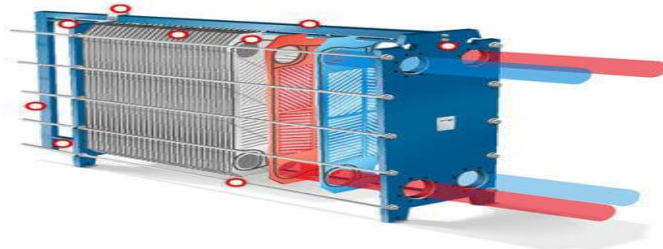
Türkiye'de boya, tekstil, kağıt, plastik elektrot, ticari sanayi, savunma sanayi gibi bölümlerde metalik titanyum gereksinimi oldukça fazladır. Gelişmekte olan ve kendi savunma sanayisini oluşturmakta olan Türkiye yüksek miktarda titanyumu dışarıdan ithal etmektedir. Her ne kadar gün geçtikçe dünya genelinde titanyum metalinin kullanım alanları ve talep artsa da dünyada ve Türkiye'de maden kaynakları sınırlıdır. Bu da gelecekte biz mühendisleri yapay rutil ve ilmenit ve bunların alaşımlarının yaygınlaştırılmasına yönelteceğini söylemek mümkündür (Anonim 2019e).

## **2.4 Titanyum ve Alaşımlarının Uygulama Alanları**

Bu bölümde, çok geniş kullanım alanına sahip olan titanyum ve alaşımlarının çeşitli uygulama örnekleri özetlenmiştir. Resimler (Anonim 2019ı) kaynağından alınmıştır.

### **2.4.1. Enerji ve Kimya Sanayi**

Enerji ve kimya uygulamalarında korozyon dayanım mekanik dayanıma göre daha ön plandadır ve bu nedenle saf titanyum daha fazla kullanılır. Korozyon dayanımından kaynaklı saf titanyum daha düşük maliyetli ve ekonomiktir. Şekil 2.1 ve 2.2'de saf titanyumdan elde edilmiş ısı değiştiriciler, 2.3'de buhar türbin bıçakları ve 2.4'te nükleer enerji santrallerinde kullanılan yüksek sızdırmazlık yeteneği ve ömrü dolayısı ile tercih edilen kondansörler gösterilmiştir.



**Şekil 2.1.** Tabaka tipi ısı değiştirici



**Şekil 2.2.** Kimya sanayi için ısı değiştirici



**Şekil 2.3.** Buhar türbini bıçakları



**Şekil 2.4.** Enerji tesisleri için kondanser

#### **2.4.2. Uzay ve Havacılık Sanayisi**

Özgül dayanım, yorulma dayanımı, sürünme dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerinin yüksek olması uzay ve havacılık sanayisinde titanyum ve titanyum alaşımlarının kullanımını arttırmaktadır. Şekil 2.5, 2.6 ve 2.7'de düşük yoğunluk avantajları nedeniyle tercih edilen turbofan motoru, buhar türbini kafesi ve roket yakıt tankı verilmiştir. Ayrıca yapılan çeşitli incelemeler sonucunda yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerde

alışan titanyumun sürünme dayanımı değerleri arttırılarak hem verimlilikleri hem de kullanım süreleri uzatılmıştır.



şekil 2.5. V2500 turbofan motoru



şekil 2.6. Buhar türbini kafesi



şekil 2.7. Roketlerde kullanılan yakıt tankı

### 2.4.3. Denizcilik Uygulamaları

Yüksek korozif dayanım ve mekanik özelliklerin beklendiği denizcilik alanında da kullanımı yaygındır. Denizaltıların dış gövdelerinde, deniz kenarlarında kullanılan korkuluklarda ve deniz çiftliklerinde titanyumun farklı türleri kullanılmaktadır.



**Şekil 2.8.** Denizaltı araçların basınca dayanıklı dış kabuklarında



**Şekil 2.9.** Balık çiftliklerinde



**Şekil 2.10.** Deniz kenarı korkuluklarında

#### 2.4.4. Medikal Uygulamalar

Vücut sıvılarının sebebiyet verdiği korozyona karşı olan dayanıklılığı sebebiyle de medikal uygulamalarda büyük kullanım alanı bulmaktadır. Yapay kan pompaları ve kalpler, kemik yapıları ile sağlam ve uzun süreli bağ oluşturabildikleri içinde protezlerde kullanımı yaygındır.



Şekil 2.11. Çeşitli protez parçaları

## 2.5. Titanyum ve Alaşımalarının İyapı Özellikleri

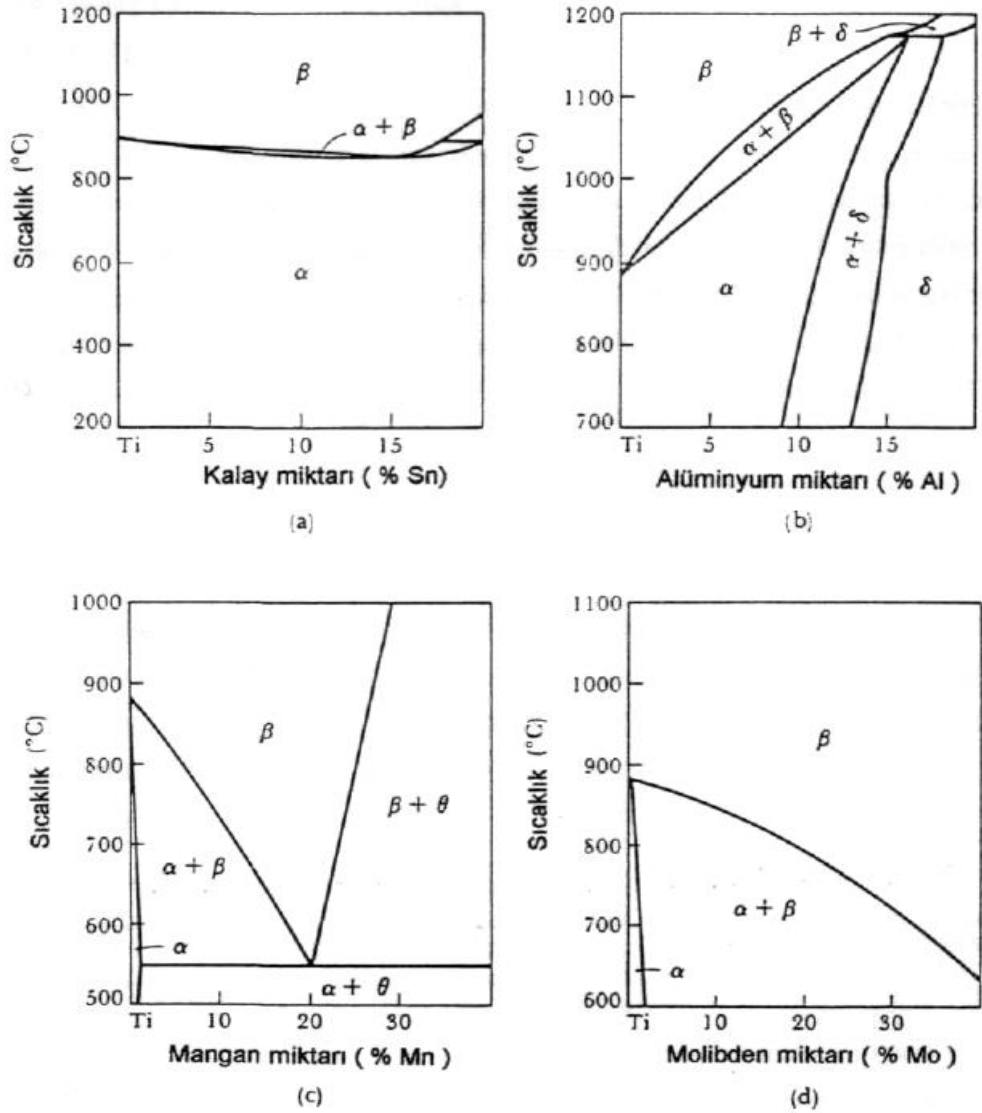
Oda sıcaklığında sıkı düzen hekzagonal (SDH) kristal yapıda  $\alpha$  fazına sahip olan titanyum allotropik bir malzeme olmasından kaynaklı 885°C'de hacim merkezli kübik (HMK)  $\beta$  fazına dönüşmektedir. Bu sıcaklıkta ki faz dönüşümü saf titanyum için geçerlidir. Alaşım elementlerine ve bu elementlerin miktarına göre faz dönüşüm sıcaklığının değişeceği unutulmamalıdır. Oksijen, azot ve karbon  $\alpha$  fazının daha kararlı olmasını sağlar ve faz dönüşüm sıcaklığını yukarıya çekmektedir (Anonim 2019i).

Farklı elementlerin farklı yönde faz dönüşüm sıcaklığına etkisi iki şekilde isimlendirilmiştir. Dönüşüm sıcaklığının altında yapı tamamen  $\alpha$  olduğundan " $\alpha$  faz dönüşümü sıcaklığı", üstünde tamamen  $\beta$  olduğundan " $\beta$  faz dönüşüm sıcaklığı" denilmektedir. Bu tek faza dönüşüm sıcaklıkları arasında kalan sıcaklık değerlerinde ise malzemenin mikro yapısında  $\alpha+\beta$  fazları birlikte bulunmaktadır (Anonim 2019i).

Oksijen, azot ve karbon elementlerine ek olarak alüminyum, galyum ve germanyum gibi elementlerde  $\alpha$  fazını kararlı hale getirir ve dönüşüm sıcaklığını yukarıya çeker. Bu dönüşüm sıcaklığının düşmesini sağlayarak  $\beta$  fazının daha kararlı bir hale gelmesini sağlayan elementler de vardır. Ötektoid grup ve izomorf grup olarak iki sınıfa ayrılırlar. İzomorflar  $\beta$  yapısı içerisinde tamamen çözünen molibden, vanadyum, tantal ve kolombiyum elementleridir. Ötektoidler ise mangan, demir, krom, kobalt, nikel, bakır ve silisyum elementleridir ve ötektoid sıcaklığını saf titanyumun sahip olduğu faz dönüşüm sıcaklığının 333°C altına çekebilirler. Her iki grupta  $\alpha$  fazında çok düşük bir çözünürlüğe sahip olduğundan dönüşüm sıcaklığını aşağıya çekebilmektedirler. Özellikle yüksek sıcaklıkların olduğu alanlarda kullanılan metallerde görülen metaller arası bileşik oluşumu izomorf grup elementleri alaşıma katılarak azaltılabilir ve daha kararlı bir  $\beta$  fazı oluşturulur (Leyens ve Peters 2003.)

İzomorf molibden, ötektoid mangan;  $\alpha$  faz yapısını daha kararlı hale getiren kalay ve alüminyumun faz diyagramları Şekil 2.12'de gösterilmektedir (Anonim 2019j).





Şekil 2.12. Kalay, Alüminyum, Molibden ve Manganın Titanyum ile faz diyagramları (M.J.D.R. 1988)

Hem  $\alpha$  hem de  $\beta$  yapısında izomorf olan elementlerde vardır ve titanyumun kardeşleri olarak nitelendirilirler. Bunlar zirkonyum ile hafniyum elementleridir. Benzer olarak  $\alpha$  ve  $\beta$  yapılarında yüksek çözünürlüğe sahip olan alüminyum ve kalay elementleri de vardır. Bu elementler  $\alpha+\beta$  alaşımlarında yaklaşık olarak her iki faza da eşit dağılırlarken, sadece  $\beta$  fazında ki alaşımı daha kararlı hale dönüştürmektedir. Bilindiği üzere neredeyse bütün titanyum alaşımları bu elementlerden bir yada daha fazlasını yapısında bulundurmaktadır.  $\beta$  yapısında ki titanyum  $\alpha$  ile kıyaslandığında daha fazla

element çözebilir ve özellikle  $\beta$  izomorf elementleri yüksek sıcaklıklarda metaller arasında bileşik oluşumunu azalttığı için daha çok tercih edilir (Boyer ve ark 1994).

### 2.5.1. Saf Titanyum

Ticari olarak saf kabul edilen titanyumun farklı sınıflarının  $\alpha$  ve  $\beta$  faz dönüşüm sıcaklıkları Çizelge 2.8'de gösterilmiştir.

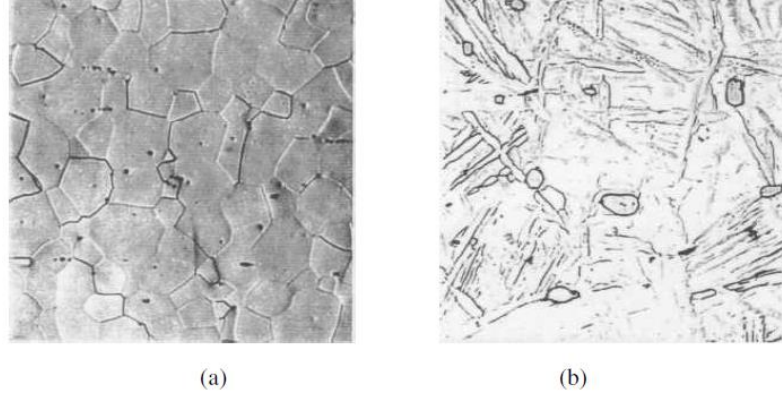
**Çizelge 2.8.** Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri(Anonim 2019j).

ASTM Standardı	Akma Day. (MPa)	Çekme Day. (MPa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Katkı Elementi ( max % ağırlıkça)				
			Alfa	Beta	N	C	H	Fe	O
Grade 1	170	240	888	880	0.03	0.10	0.015	0.20	0.18
Grade 2	280	340	913	890	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25
Grade 3	380	450	920	900	0.05	0.10	0.015	0.30	0.35
Grade 4	480	550	950	905	0.05	0.10	0.015	0.50	0.40
Grade 7	280	340	913	890	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25

Korozif dayanımın önemli olduğu ancak mekanik dayanım gerektirmeyen ve fiziksel yüke maruz kalmayan yerlerde kullanılacak olan malzemelerde saf titanyum tercih edilmektedir. Çizelge 2.8'de saf titanyum sınıfları ve bunların akma dayanımı değerleri gösterilmiştir. Demir ve oksijen elementlerinin miktarları ile doğru orantılı olarak oran arttıkça dayanımlarının yükseldiği görülmektedir (Anonim 2019j).

İçerisinde hiçbir alaşım elementi bulundurmayan titanyumun içyapısı incelendiğinde oda sıcaklığında tamamının  $\alpha$  fazında olduğu görülür. Alaşım elementleri katılmaya başladığında özellikle de demir elementinin oranı artırıldığında içyapıda, tane sınırlarında artan miktarda  $\beta$  faz yapısı görülür. Hiçbir alaşım içermeyen tavllanmış titanyumun içyapısı iğnesel veya eşeksenli olarak görünür. Bu iğnesel alfa fazının oluşması  $\beta$  fazında ki titanyumun soğuma süresiyle ilgilidir. Süre düşürüldükçe iğnesel  $\alpha$  plakalarının kesitleri daralacaktır. Yeniden kristalleşme tavlama yapılan

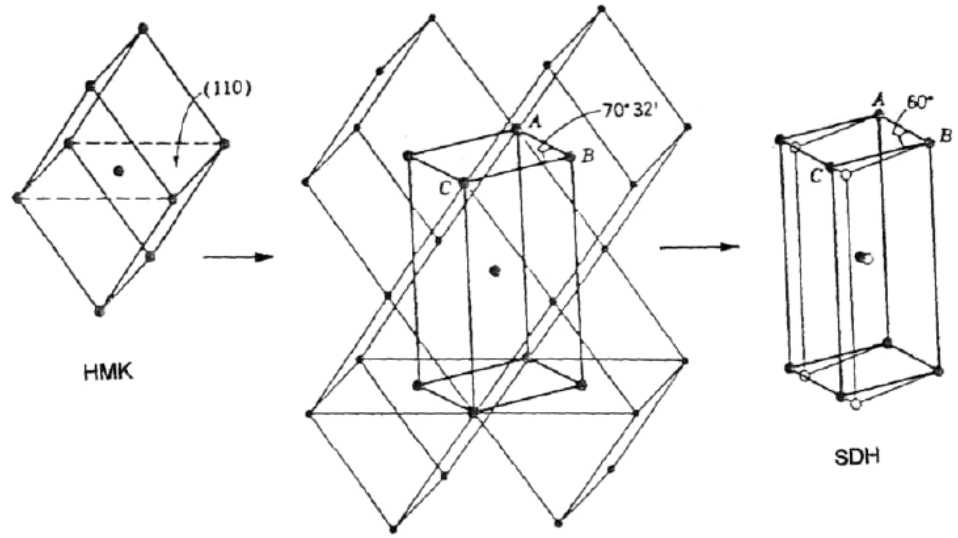
malzemelerde ise eşksenli yapı görülmektedir. Eğer mikroskop altında çekilen fotoğrafta iğnesel alfa yapısı görülüyorsa bu o malzemenin  $\beta$  faz dönüşüm sıcaklığının üzerindeki bir noktaya kadar çıktığını bize ispatlamaktadır. Şekil 2.13'te eşksenli ve iğnesel  $\alpha$  yapısı gösterilmiştir (Leyens ve Peters 2003).



**Şekil 2.13.** Eşksenli (a) ve iğnesel (b) içyapı örneği (Leyens ve Peters 2003)

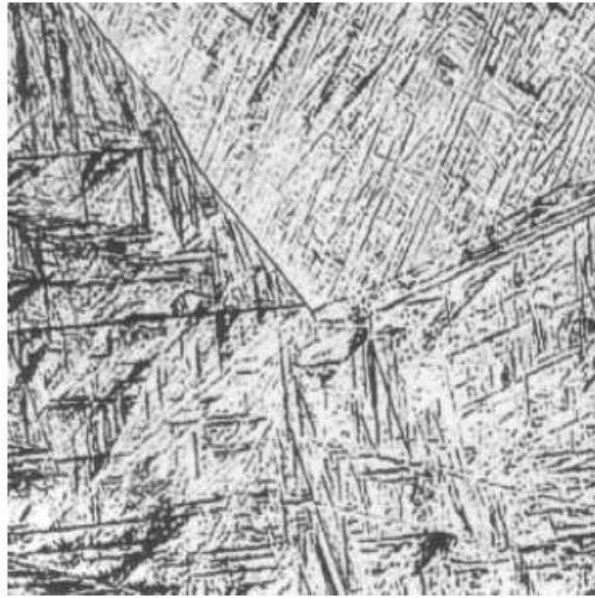
Eşksenli içyapıya sahip olan malzeme; yüksek süneklik ve dayanım, şekillendirme kabiliyetinin fazla olması, çatlak oluşumuna gösterilen direnç, tuzlu ortamlarda gerilmeli korozyona gösterilen yüksek direnç gibi özelliklere sahipken iğnesel yapıda ki titanyum malzeme; iyi sürünme direnci, kırılma tokluğunun yüksekliği, çatlak oluşumu ve yüksek korozif dirence sahipken mukavemetinde bir miktar düşüş meydana gelmektedir (Williams 1982).

Soğuma hızına bağlı olarak  $\beta$ 'dan  $\alpha$ 'ya olan dönüşümün gerçekleşmeyeceği ve çok hızlı soğuma yapıldığında oda sıcaklığında dahi  $\beta$  faz yapısının kalacağı düşünülebilse de saf titanyumda  $\alpha$  dönüşümünü engellemek mümkün değildir. Kimyasal olarak iki faz arasında bir fark olmasa bile kristal kafes yapıları farklıdır ve kristal yapı dönüşümü kesinlikle gerçekleşecektir. Şekil 2.14'te HMK  $\beta$  yapısının SDH  $\alpha$  yapısına dönüşümü gösterilmiştir.  $\alpha$  fazı burada martenzitiktir (Ohkubo ve ark. 2000).



**Şekil 2.14.** HMK kafes yapısının SDH kafes yapısına dönüşümü (Ohkubo ve ark. 2000)

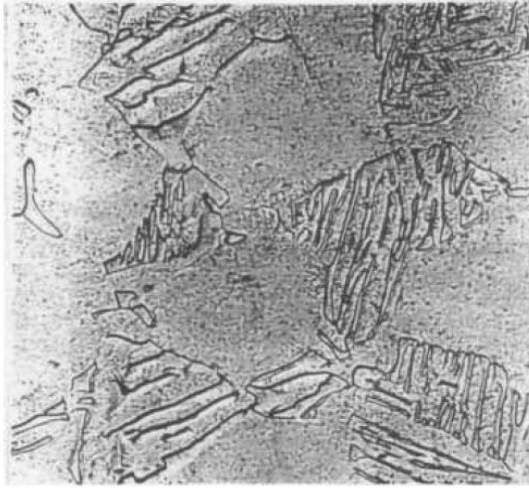
Martenzitik  $\alpha$ ,  $\beta$  yapısının difüzyonsuz dönüşümü sonucu oluşan aşırı doymuş ve kararlı olmayan bir  $\alpha$  fazıdır. Çoğu zaman iğnemi  $\alpha$  ile martenzitik  $\alpha$  yapısını birbirinden ayırt etmek oldukça zor olsa da, iğnemi  $\alpha$ 'nın kenarları biraz daha yuvarlak ve martenzitik  $\alpha$ 'nın bir miktar daha düz kenarları olduğu söylenebilmektedir. Martenzitik  $\alpha$  yapısının görünümü şekil 2.15'te verilmiştir (Ezugwu ve Wang 1997).



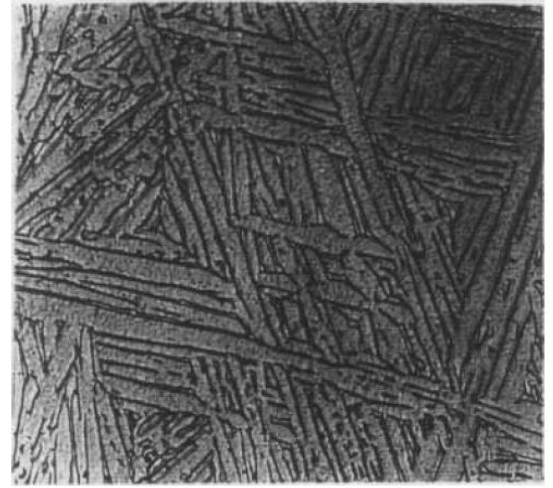
**Şekil 2.15.** Martenzitik  $\alpha$  yapısı (Boyer ve ark. 1994)

Titanyum malzeme ve titanyum alaşımları ısıtılma uğradıktan sonra ıçyapıda hem  $\beta$ 'dan dđnüşmüş hem de ısıtılma uğramadan önce ki  $\alpha$  yapısı bulunmaktadır. Önceden kalan  $\alpha$  yapısına "birincil  $\alpha$ " (primary  $\alpha$ ) adı verilmektedir. Dđnüşen  $\alpha$  fazı iğnemsisi, tırtılı, plak, Widmanstatten ve martenzit türünde gözlemlenebilmektedir. Bu farklı türdeki  $\alpha$ 'lar ve oda sıcaklığında yapı ıçerisinde kalan  $\beta$  yapıları ıçin "dđnüşmüş  $\beta$ " tanımlaması kullanılır. Widmanstatten ve iğnemsisi  $\alpha$  isimlendirmeleri ise aynı ıçyapı ıçin kullanılmaktadır (Çakır ve Ensarioğlu 2005).

En sık görülen ıçyapı soğuma esnasında  $\beta$  yapısından dđnüşen iğnemsisi  $\alpha$  yapısıdır.  $\beta$  matrisinde bir düzlem ıçinde veya birçok düzlem ıçinde çekirdeklenecek büyüyen  $\alpha$  taneleri oluşturmaktadır.Şekil 2.16'da bir ve birçok düzlem ıçerisinden iğnemsisi  $\alpha$  (Widmanstatten) verilmiştir (Ribeiro ve ark. 2003).



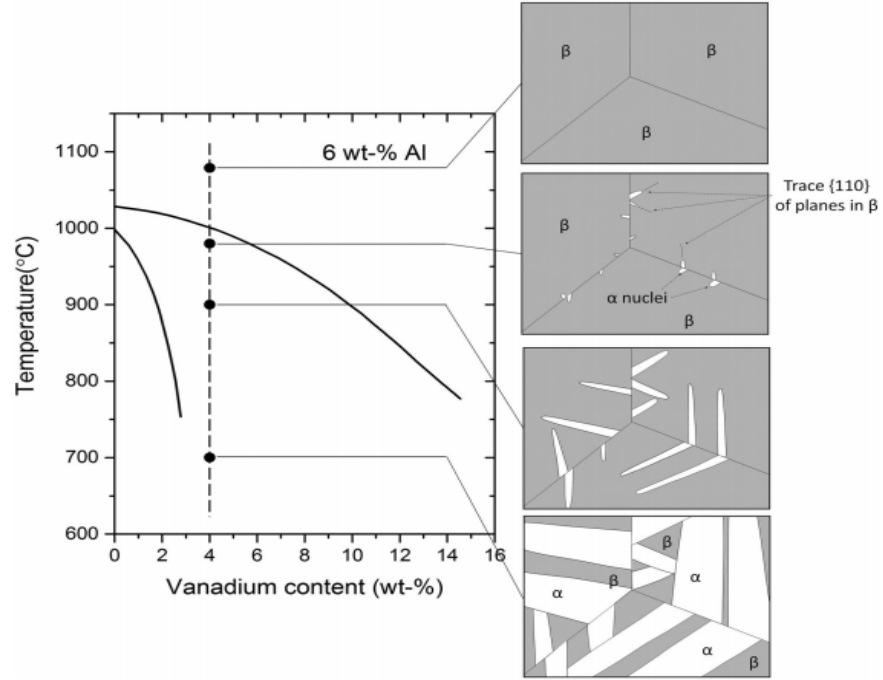
(a)



(b)

**Şekil 2.16.** İğnemsisi  $\alpha$  oluşumu (Widmanstatten yapısı oluşumu) (a) bir düzlemden (b) birçok düzlemden (Boyer ve ark. 1994)

Widmanstatten yapısının oluşumu şekil 2.17'de gösterilmiştir. Ti6Al4V alaşımının  $\beta$  fazındayken soğutulmasıyla birlikte  $\alpha$  taneleri ıçyapıda büyümeğe başlamıştır.  $\beta$  tanelerinin ıçerisinde atom yoğunluğunun en fazla olduğu [1,1,0] düzleminde ilerlediği görülmektedir. Bu şekilde Widmanstatten, yani iğnemsisi  $\alpha$ 'nın, formunda dđnüşmüş olan  $\beta$  fazı meydana gelmektedir (Leyens ve Peters 2003).



Şekil 2.17. Widmanstatten yapısının oluşumu (Brooks 1982)

### 2.5.2. Titanyum Alaşımlarının Faz Yapılarına Göre Türleri

$\alpha$ ,  $\alpha+\beta$  ve  $\beta$  fazında ki titanyum olarak titanyum metali üç türde incelenebilmektedir. İsimlerinden de anlaşılacağı gibi oda sıcaklığında içyapısında  $\alpha$  büyük bir çoğunluğu  $\alpha$ 'yı,  $\beta$ 'da  $\beta$ 'yı içerir.  $\alpha+\beta$  alaşımının yapısında ise her iki faz yapısı da bulunmaktadır. Eğer daha fazla  $\alpha$  içeriyorsa near-alpha, lean-beta veya süper-alfa isimleri de bu alaşımlar için kullanılmaktadır (M. J. D. R. 1988).

Birçok ticari titanyum alaşım metalinde az miktarda  $\beta$  fazını kararlaştırıcı elementler olsa da alüminyum elementi  $\alpha$  alaşımlarının asıl alaşım elementidir. Tıpkı bunun gibi  $\beta$  alaşımlarında da miktarları oldukça az olmasına karşın  $\alpha$  faz yapısını kararlaştırıcı elementler vardır (Anonim 2019i).

Su buharı, çeşitli asit solüsyonları ve asit içerikli ortamlar yada hidrokarbon bulunduran çevrelerde en küçük atomlu element olmasından kaynaklı titanyum hidrojeni yapı içerisine alabilmektedir. Hidrojen titanyum metalinin daha gevrek olmasına ve

sünekliğinin azalmasına sebebiyet vermektedir. Dolayısı ile bunun önüne geçilmesi amacıyla titanyum metali tavlanan yerlerde vakum ortamı oluşturulmalıdır (Ohkubo ve ark. 2000)

Karbon, oksijen ve azot ise titanyumun dayanımını arttırmaktadır. %0.3 oranından fazla katılan karbonun herhangi bir dayanımı artırıcı etkisi bulunmamaktadır.

Saf titanyum için içerisinde ki alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak Brinell sertliğini ortaya çıkaran ampirik bir formülde Brown tarafından ortaya çıkarılmıştır (Çakır ve Ensarioğlu 2005).

$$BHN = 196 \cdot (\%N)^{1/2} + 158 \cdot (\%O)^{1/2} + 45 \cdot (\%C)^{1/2} + 20 \cdot (\%Fe)^{1/2} + 57$$

Kafes yapıları ile bağlantılı olarak faz yapılarının özellikler üzerinde nasıl bir etkiye sahip oldukları şekil 2.18'de verilmiştir.



( $\alpha$ ) Sıkı Düzen Hegzagonal yapı (SDH)



( $\beta$ ) Hacim Merkezli Kübik yapı (HMK)

Alfa stabilizatörü elementler

Örnek

Alüminyum  
Oksijen  
Nitrojen

Beta stabilizatörü elementler

Örnek

Molibden  
Venadyum  
Demir  
Krom  
Mangan

Artan alfa fazı stabilizatörleri ile alfa fazı oluşumu



Artan beta fazı stabilizatörleri ile beta fazı oluşumu

Alfa Yapısı	Yakın Alfa (Az Beta)	Karışık (Alfa+Beta)	Yakın Beta (Az Alfa)	Beta Yapısı
-------------	----------------------	---------------------	----------------------	-------------

Saf Ti

Ti-  
5Al-  
2.5Sn

Ti-  
5Al-  
6Al-  
6Sn-  
2Zr-  
4Zr-  
1Mo-  
2Mo  
0.2Si

Ti-  
6Al-  
6Al-  
4V  
6V-  
2Sn

Ti-  
6Al-  
2Sn-  
4Zr-  
6Mo-

Ti-  
8Mn

Ti-  
8Mo  
8V-  
2Fe-  
3Al

Ti-  
11.5Mo-  
6Zr-  
4.5Sn  
Ti-  
13V-  
11Cr-  
3Al

Yoğunluk artar

Isıl işleme duyarlılık artar

Kısa süreli dayanım artar

Sürünme dayanımı artar

Gerinim hassasiyeti artar

Kaynak kabiliyeti artar

Üretim kolaylığı artar

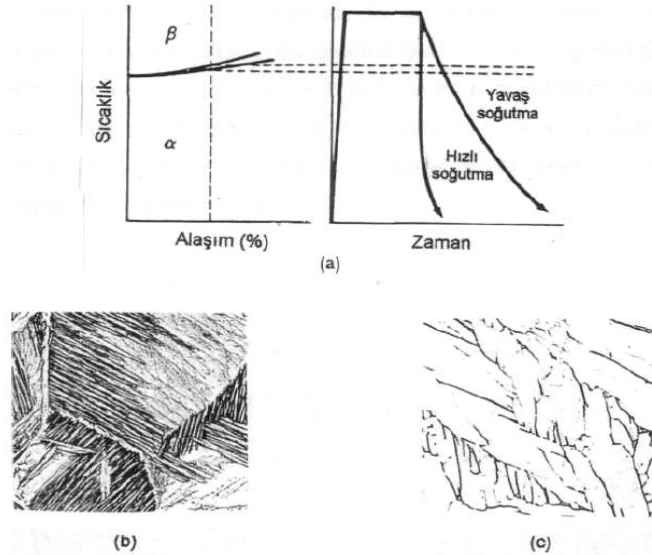
Şekil 2.18.  $\alpha$  ve  $\beta$  faz yapılarının özellikler üzerindeki etkileri (Leyens ve Peters 2003)



Kütlesel olarak az oranlarda ara yer atomu içerse bile  $\alpha$  faz yapısında ki titanyum, süneklik ve tokluk özelliğini düşük sıcaklıkta ki ortamlarda dahi devam ettirebilmektedir. Alüminyum, kalay ve zirkonyum elementlerini içeren  $\alpha$  yapıları çok soğuk ve aşırı yüksek sıcaklığa maruz kalınan ortamlarda kullanılmaktadır.  $\beta$  yapısına sahip titanyuma göre bu tarz ortamlarda daha dayanıklıdır ve aynı zamanda yüksek sıcaklıkta  $\beta$ 'ya kıyasla sürünme direnci daha yüksektir (Anonim 2019i).

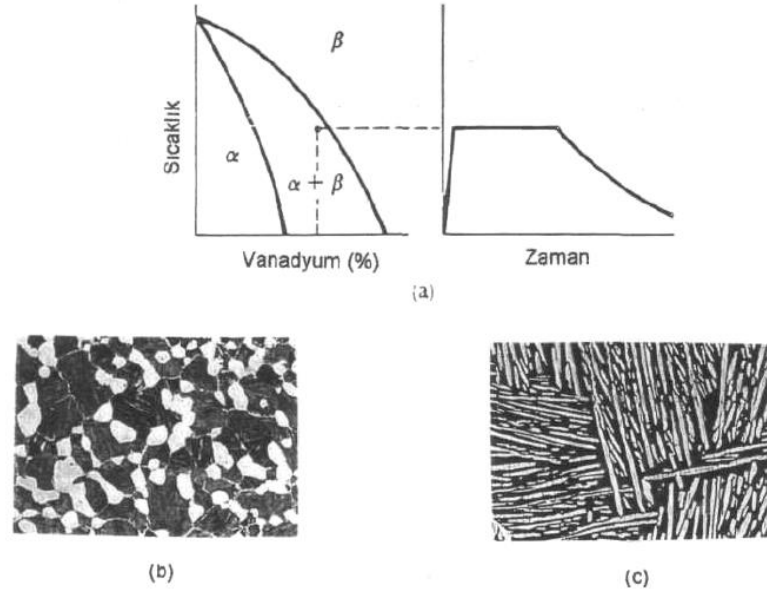
$\alpha$  yapısındaki malzemenin dövülme yetenekleri oldukça sınırlıdır ve dövme sıcaklık aralığı  $\alpha+\beta$  ve  $\beta$  yapısındaki titanyum malzeme ile kıyaslandığında oldukça dardır. Dövülürken oluşan merkezdeki kırılma ve yüzeydeki çatlaklar bu durumun ispatı olarak açıklanabilmektedir. Bu çatlama ve kırılmalardan kaçınmak için deformasyon miktarının az olması ve malzemenin belirli aralıklarla da ısıtılması kaçınılmaz olmaktadır. Ancak  $\alpha$  yapısına sahip alaşımlar,  $\alpha+\beta$  ve  $\beta$  yapısındaki alaşımlarına karşın daha karardır ve ısıl işlem ile sertlikleri arttırılamamaktadır (M.J.D.R. 1988).

Tavlama prosesinden sonra  $\alpha$  alaşımının içyapısında soğuma süresine göre değişim gerçekleşmektedir. Şekil 2.19'da az sürede soğuma ile iğnemi, daha uzun sürede soğutma ile plaklı  $\alpha$  içyapısının oluştuğu gösterilmiştir (Moiseyev 2006).



**Şekil 2.19.**  $\alpha$  Titanyum alaşımının tavlama(a), hızlı soğutma sonrası iğnemi iç yapı(b), yavaş soğutma sonrası plakalı iç yapı(c) (Moiseyev 2006).

$\alpha+\beta$  yapısına sahip alaşımlarda ise bir veya birkaç tane  $\alpha$  fazını kararlaştırıcı veya bir yada birkaç tane  $\beta$  fazını kararlaştırıcı ile  $\alpha$  yapısı içerisinde çözünen elementleri içerisinde taşımaktadır. Her iki fazında kararlaştırılmasını sağlayan elementlerin ayarlanması ile birlikte  $\alpha+\beta$  fazlarına sahip bir içyapı elde etmek mümkündür. Tavlama işlemi yapılarak da daha homojen yapı ile birlikte süneklik ve dayanım arttırılabilmektedir. Bu proseste  $\alpha$  tanelerinin oluşmasını sağlamak ve aynı zamanda  $\beta$  fazındaki tanelerin büyümesi istenmediği için  $\beta$  faz dönüşümünün gerçekleştiği sıcaklığın bir miktar altına kadar çıkılabilmektedir. Yavaş ve hızlı soğutma prosesleri ile oluşan iç yapılar şekil 2.20'de verilmiştir (Boyer ve ark. 1994).



**Şekil 2.20.**  $\alpha+\beta$  titanyum alaşımının tavlama (a), yavaş soğutma sonrası eşeksiz iç yapı (b), hızlı soğutma sonrası iç yapı (c) (Boyer ve ark. 1994).

$\alpha+\beta$  alaşımlarından en çok kullanılanları Ti-6Al-4V ile Ti-4Al-2Sn-4Mo-0.5Si alaşımlarıdır ki; sadece Ti-6Al-4V malzemesi toplam titanyum üretiminin % 45'inden fazlasını oluşturmaktadır. Bu tip yapıdaki ( $\alpha+\beta$  yapısı) malzemelerin mukavemet değerlerinin yukarıya çekilebilmesi için ısıl işlem yapılabilmektedir. Dolayısıyla  $\alpha+\beta$  yapısı 350-400°C'lerdeki sıcaklıklarda ve yüksek mukavemete ihtiyaç duyulan yerlerde tercih edilmektedir (İşler 1999).

Mukavemetin ve dayanımın arttırılabilmesi için malzeme ilk başta yarı kararlı hale gelmesi için çözeltiye alma sıcaklığından itibaren çok hızlı bir şekilde soğutulmakta sonraki adımda ise 500°C'de yaşlandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Bu esnada aşırı doymuş  $\alpha$  ve  $\beta$  fazları çözünüp içyapıya homojen olarak dağılır ve istenen mukavemet ve dayanım değerlerindeki artış gerçekleştirilmiş olur (Williams 1982).

Son faz yapısı türü olan  $\beta$  yapısına sahip alaşımlar da sertleştirilebilme, dövülebilme, soğuk şekillendirilebilme gibi yeteneklere sahip olmalarının yanında yüksek yoğunlukları ile de farklı titanyum metali alaşımlarından ayırt edilebilirler. Oda sıcaklığında  $\alpha+\beta$  faz yapısındaki alaşımlar ile benzer mukavemet ve dayanıma sahip olsalar da sıcaklık yükseldikçe  $\alpha+\beta$  yapısındaki metaller gibi dayanım değerlerini koruyamazlar (Ribeiro ve ark. 2003).

Ancak  $\alpha+\beta$  alaşımları ile işlenebilme yönünden kıyaslandıklarında daha üstündürler ve ısıl işlem uygulanabilme yetenekleri daha yüksektir. Molibden içeren  $\beta$  yapılarının korozyon ortamlara karşı gösterdikleri dirençte yüksektir (Ribeiro ve ark. 2003).

## 2.6. Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri

Titanyum metaline ve titanyumun alaşımlarına kullanılacak yere ve ortam koşuluna göre istenen dayanım ve mukavemete ulaşılması hedefiyle yapılan ısıl işlemler şu Şekilde sıralanabilir:

1. Üretim esnasında oluşan artık i gerilmeleri önlemek (gerilme giderme),
2. Süneklik, boyutsal ve yapısal kararlılık ve talaş kaldırmaya uygunluk gibi önemli parametrelerin optimizasyonu (tavlama)
3. Mukavemeti artırmak (zeltiye alma ve yaşlandırma).

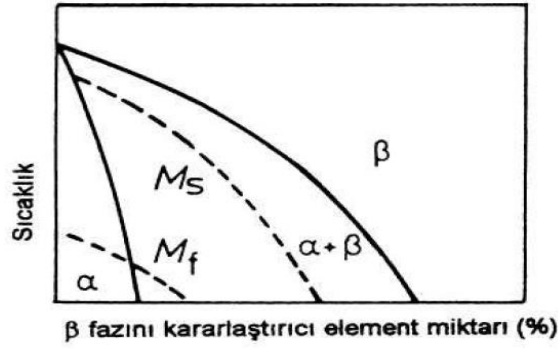
Gerilme giderme ile tavlama prosesleri korozyon dayanımını yükseltmek, çarpılma ve atıklık oluşumları gibi problemlerin önüne geçmek için kullanılırken; tavlama, çözeltiye alma ve yaşlandırma prosesleri aynı zamanda titanyum metalinin mekanik özelliklerini de iyileştirmek için yapılan işlemlerdir (Ezugwu ve Wang 1997).

$\alpha$  ve  $\beta$  faz yapılarının farklı yoğunluklarda bulunmasına göre  $\alpha+\beta$  yapısındaki faz alaşımlarının ısıl işlem esnasında ortaya koydukları davranışlar değişmektedir. Her ne kadar sadece  $\beta$  alaşımlarında olduğu kadar sertleşme durumu oluşmasa da  $\alpha+\beta$  yapısındaki titanyum metalleri de yaşlandırma prosesi süresince  $\beta$  fazı sayesinde belirli bir miktar sertleşme eğilimi gösterirler (Anonim 2019j).

Son ısıl işlem prosesi gerçekleştirilen  $\alpha+\beta$  faz yapısı içeren titanyum metalinin içyapısı incelendiğinde  $\beta$  fazının süper- $\alpha$ 'ya göre daha fazla yoğunlukta olduğu görülür. Bunun nedeni hem ısıl işlemin türü hem de metal içerisindeki  $\beta$  fazını kararlaştırıcı elementlerin oranıyla direk olarak ilişkilidir.  $\alpha+\beta$  faz yapısındaki alaşımların sertleştirme prosesleri çözeltiye alma ve yaşlandırmadır. Titanyum metali ikili faz bölgesinin sıcaklığına kadar ısıtılır ve sonrasında su, yağ yada farklı bir soğutucu ile sıcaklığı düşürülmektedir. Soğutma süresine göre  $\beta$  faz yapısı aynı kalabilir veya dönüşüm geçirebilir. Bu proses sonucundaki içyapı; titanyum metalinin kompozisyonuna, çözeltiye alma sıcaklığına, soğutma süresine ve malzemenin boyutlarına bağlı olarak değişmektedir.  $\alpha$  ve  $\beta$  fazlarının çok daha homojen bir Şekilde

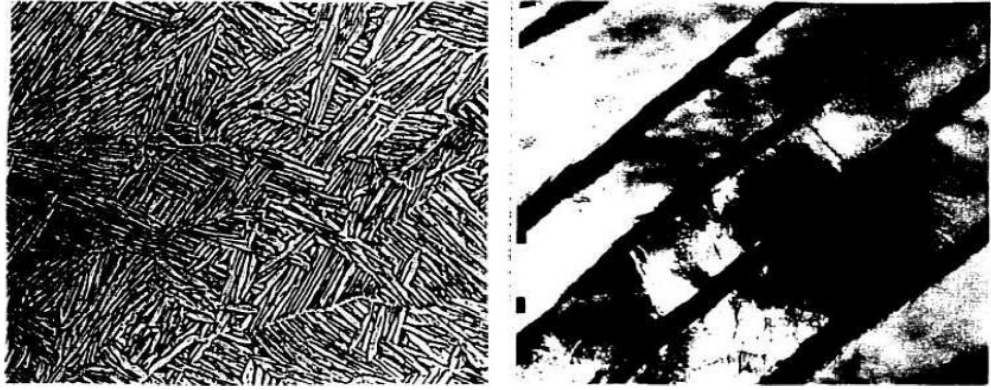
dağılması için 480-650°C aralığında yaşlandırma işlemi de bir sonraki adımda gerçekleştirilmektedir (Leyens ve Peters 2003).

Ti6Al4V türündeki titanyum metali  $\alpha+\beta$  faz yapısındaki alaşımların en yaygın olarak kullanılanıdır. Bu titanyum malzemesinin faz diyagramı şekil 2.21'de verilmiştir ve diyagrama bakıldığında iki ana dönüşümün olduğu rahatlıkla fark edilebilmektedir (Anonim 2019i).



Şekil 2.21. Ti6Al4V alaşımı için temsili faz diyagramı (Anonim 2019i).

$\beta$  faz değişim sıcaklığının üstündeki bir sıcaklığa kadar ısıtılması ve sonrasında  $\alpha+\beta$  faz değişim aralığına kadar soğutulduğunda  $\beta$  fazının  $\alpha$  faz yapısı içerisinde çökmesi ilk gözlemlenen durumdur. Esas olarak bu proses, demir-karbon diyagramına bakılacak olursa ostenitin sıcaklık düştüğünde ferrit yapısını oluşturmasına benzetilebilir. Fakat bu diyagramda Widmanstätten neredeyse tüm sıcaklık düşürme hızlarında daha baskındır. Mesela 1037°C'nin altına düşülmesinden sonra havada serbest soğumaya bırakılan Ti6Al4V metalinin iç yapısının durumu şekil 2.22(a)'da verilmiştir. Açık bölgeler  $\alpha$ , kapalı bölgeler ise  $\beta$  yapılarını sergilemektedir. Birebir aynı yapının elektron mikroskopundan alınan bir başka fotoğrafta şekil 2.22(b)'de verilmiştir ve  $\alpha$  ile  $\beta$  yapıları daha net bir biçimde gözlemlenebilmektedirler. Widmanstätten yapısındaki  $\alpha$  tabakalarının içlerinde kalan ince tabakalı  $\beta$  yapıları kolaylıkla gözlemlenebilmektedir. Yaklaşık olarak aynı yapının fırın yada kontrollü bir ortamda soğutma yapılması ile de oluşacağı farklı araştırmalarda görülmüştür (Ribeiro ve ark. 2003).

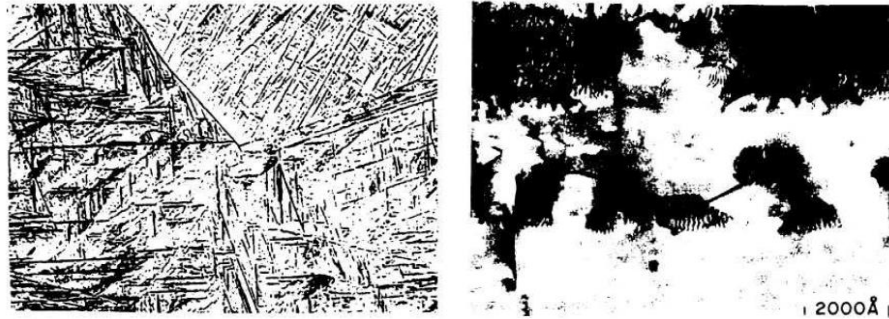


(a)

(b)

**Şekil 2.22.** Ti6Al4V'nin havada soğutularak elde edilen yapısı (Ribeiro ve ark. 2003)

$\beta$  faz yapısından başlanarak suda sıcaklığı düşürülen titanyum metalindeki en önemli ikinci faz değişimi ise malzemede martenzitin oluşmasıdır.  $\beta \rightarrow \alpha'$  olarak ifade edilir ve  $\alpha'$  burada aşırı doymuş sıkı düzen hekzagonal  $\alpha$  faz yapısını sembolize eder.  $1064^\circ\text{C}$ 'den başlanarak suda soğutması yapılan Ti6Al4V'de gerçekleşen martenzit dönüşümü şekil 2.23(a)'da verilmiştir. Aşırı doymuş  $\alpha$  fazını bozmak amacıyla martenzit yapısı difüzyonun oluşabileceği sıcaklık değerlerinde yaşlandırma işlemine tabi tutulur ve  $\beta$  faz yapısının çökelti biçiminde oluşturulması sağlanır.  $1100^\circ\text{C}$ 'den itibaren su verilerek  $600^\circ\text{C}$ 'de bir gün boyunca yaşlandırma işlemine uğrayan Ti6Al4V metalinin iç yapısının elektron mikroskopundan alınan fotoğrafı şekil 2.23(b)'de gösterilmiştir (Ohkubo ve ark. 2000).

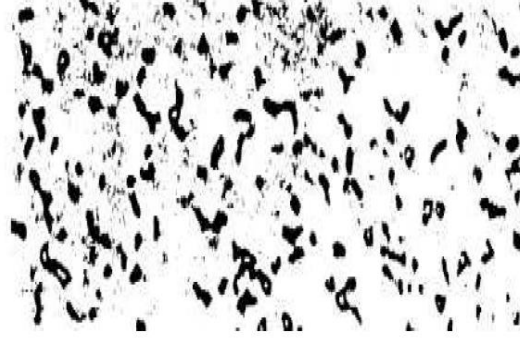


(a)

(b)

**Şekil 2.23.** Ti6Al4V alaşımına su verilerek martenzit yapı oluşumu(a), yaşlandırma sonrası yapı(b) (Ohkubo ve ark. 2000).

Widmanstatten veya martenzitik metallerin mühendislikte tercih edilmediği bilinir. Fakat titanyum metalinin bu yapısını bozmak  $\alpha+\beta$  faz bölgesinde çalışılarak  $\beta$  fazını  $\alpha$  fazına homojen bir şekilde yayarak gerçekleştirilebilir. 700°C'de tavlansarak istenilen hale getirilen bu mikro yapının esas avantajı Widmanstatten yapısındaki  $\alpha$  fazına göre daha sünek bir halde olmasıdır. Yapı şekil 2.24'te verilmiştir (Anonim 2019i).



Şekil 2.24. Sıcak işlenmiş ve tavlansmış Ti6Al4V alaşımı (Anonim 2019i).

$\alpha+\beta$  yapısındaki titanyum metalinin çözeltilmeye alma ve yaşlandırma ile oluşturulan dayanımları; tavlansarak yada aşırı yaşlandırmaya maruz kalan alaşımlara göre %30-50 daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Yine de bu proses ile ulaşılabilecek sertlik değerleri  $\beta$  fazını kararlaştıran elementlerin yoğunluğu ile direk olarak bağlantılıdır ve elementlerin bulunma miktarı yükseldikçe sertleşebilme yeteneği de yükselmektedir (Çakır ve Ensarioğlu 2005).

$\beta$  faz yapısındaki alaşımlar da çözeltilmeye alma işlemi gerçekleştirildikten sonra 450-600°C'de yaşlandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Bu proseslerden sonra ince  $\alpha$  tanecikleri  $\beta$  yapısı içerisine dağılmış halde bulunur ve bu yapı yaşlandırılmış  $\alpha+\beta$  alaşımlarına göre çok daha yüksek dayanım değerlerine sahiptir. Fakat yüksek yoğunluk, dövülebilme yeteneğinin düşmesi ve sürünme direnci değerinin azalması yaşlandırılmış  $\beta$  faz alaşımlarının  $\alpha+\beta$  faz yapısındaki alaşımlara kıyasla dezavantajlarıdır. Buna karşın yaşlandırılma işlemine uğrayan  $\beta$ 'nin kırılma tokluğu değeri  $\alpha+\beta$ 'ya göre daha fazladır. %100 oranında  $\beta$  fazı yapısında olan alaşımlar yüksek şekillendirilebilme yeteneğine ve yüksek tokluk değerlerine sahipken dayanım açısından iyi değildir (Çakır ve Ensarioğlu 2005).

## 2.7. Titanyum ve Alaşımlarının Üretim Yöntemleri

Cevher olarak elde edilen titanyum, kullanılabilir ürün olma süresince 4 esas prosese uğramaktadır:

- 1.Cevherin indirgenme ile "sünger metal" şeklini alması;
- 2.İngot elde etmek için sünger metalin ergitilmesi;
- 3.Yarı mamul eldesi için ingotların işlenmesi;
- 4.Talaşsız ve talaşlı üretim yöntemi ile yarı mamullerin biçimlendirilmesi ve şeklini alması.

Yapılan bu işlemler boyunca titanyumun mekanik ve fiziksel özellikleri değişmektedir. Değişimin sebepleri kısaca şu şekilde belirtilebilir; alaşım yada katkı elementleri ve bunların yapı içerisindeki oranı, eritme prosesinin parametreleri süre ve sıcaklık iyi ayarlanmalı, ingotların yarı mamule dönüşürken uygulanan mekanik işlem özellikleri, şekillendirme ve ısıl işlem parametreleridir. Titanyum malzemenin prosesleri çok önemlidir ve parametrelere, ortam değerlerine önem verilmelidir. Bilindiği üzere titanyum malzeme bulunduğu ortamdan çabuk etkilenir. Dolayısı ile çok farklı alanlarda kullanımı tercih edilse de alaşım yelpazesi oldukça sınırlıdır. Mekanik ve ısıl işlem parametrelerinin farklılaştırılmasıyla değişik özellik ve yeteneklere sahip titanyum metali oluşturulabilir (Anonim 2019b).

### 2.7.1. Titanyumun Hammadde Olarak Elde Edilmesi

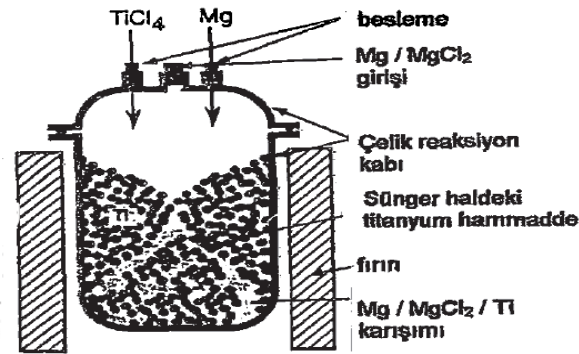
Beyaz rengi, kırılma indisinin yüksekliği ve üzerine gelen ışığı dağıtma özelliğinden dolayı titanyum-dioksit (TiO<sub>2</sub>), kağıt, boya ve plastik sektörlerinde uzun süredir pigment kaynağı olarak tercih edilse de son yıllarda sürekli olarak üretimi artan titanyum metalinin üretilmesinde bu bileşiğin önemi tartışılmaz bir gerçektir (Fantel ve ark. 2012).

Avustralya, Sierra Leone ve Güney Afrika Cumhuriyeti devletlerinde bulunan rutilde %91-95 TiO<sub>2</sub> bulunur. Klorür içeren kimyasal prosesler ve kaynak elektrotlarının örtüsünde de bu rutil cevheri pigment olarak vardır. İlmenit ve lukoksen cevherleri rutil



cevherinden daha fazla miktarda yeryüzünde bulunması ve sülfür içeren kimyasal proseslerde kullanılmasına karşın titanyum üretimi için kullanılmak istendiğinde öncelikle rutil haline getirilmeleri gerekmektedir. Sentetik yada yapay rutil olarak bilinen bu tür, ilmenit cevherinde  $TiO_2$  miktarını oksidasyon ile %90-97 oranına yükseltilmesi ile oluşturulan minerallerdir (Fantel ve ark. 2012).

KROLL yöntemi ile titanyum üretilmesi 20. yy ikinci yarısından itibaren kullanılır.  $TiCl_4$  koruyucu bir atmosfer ortamında magnezyum ile indirgenir. Üretilen metal gözenekli yapıya sahiptir ve bu sebeple "sünger metal" ismi kullanılmaktadır. Karbon yanında bulunan  $800^\circ C$  sıcaklığa sahip rutil yada ilmenitten klor akımı geçişi yapılır. Oluşan klorür yoğunlaştırılır ( $TiO_2 + 2C + 2Cl_2 \rightarrow TiCl_4 + 2CO$ ). Sıvı halde  $TiCl_4$  damıtma yapılarak saflaştırılır ve sonraki aşama olarak atmosfer basıncında,  $800^\circ C$  sıcaklıkta koruyucu gaz altında erimiş magnezyum ile indirgeme işlemi gerçekleştirilir ( $TiCl_4 + 2Mg \rightarrow Ti + 2MgCl_2$ ). Şekil 2.25'te verilmiştir (Büyük Larousse).



Şekil 2.25. Kroll işleminin şeması (Okabe ve Waseda 1997)

Titanyum metalinin elde edilmesi sürecinde kullanılan hammaddelerin denetimi aşırı önem arz etmektedir, çünkü malzemelerin yapısında bulunan az miktardaki bir element dahi titanyum metalinin mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Titanyumun üretiminde kullanılan bu hammaddeler; titanyum süngeri, alaşım elementleri ve arıtılmış hurda şeklinde sıralanabilmektedir (Anonim 2019b).

Karbon, azot, oksijen, silisyum, demir gibi elementlerin titanyum metali içerisinde bulunan en bilindik elementler olmalarının yanında çatlak oluşumunu arttıran titanyum-oksit, titanyum-nitrit yada titanyum-oksi-nitrit gibi sert ve gevrek refrakter partiküller de bulunmaktadır. Titanyum metalinin dayanımını arttırması ve süneklik değerlerini azaltmasından dolayı, şekillendirilebilirlik ve işlenebilirlik yeteneklerini etkilediğinden bu elementlerin oran olarak az miktarlarda olması tercih edilmektedir.

Yüksek yoğunluğa sahip katkı elementlerinin kullanılması tercih edilmez. Hali hazırda titanyum süngeri metalinin yapısında var olan oksijen ve demir elementleri saf titanyum metalinin dayanım değerini belirler ve bu iki elementin yapıya eklenmesi problem oluşturmamakla birlikte karbon, azot gibi elementler malzemeyi daha gevrek hale getirdiği için oran olarak düşük miktarlarda bulundurulması istenmektedir (Anonim 2019b).

Hurda ürünlerden faydalanılarak titanyum elde etmek daha düşük maliyetlidir ve hurdadan elde edilen malzeme jet motorlarının hareketli ve dönen parçalarında bile kullanılmaya uygun seviyede kalitelidir (Anonim 2019b).

Homojen bir yapı eldesi için titanyumu iki defa eritmek yeterli olsa da daha üniform yapıya ulaşabilmek amacıyla üç defa eritilmektedir. Üç defa eritme işlemi ile oksijen, azot elementlerinin oranları da mikro yapı içerisinde düşürülebilmektedir. Genelde elektrik ark fırınında ve vakumlu ortamda titanyum ingot alaşımı iki defa eritilir. İlk adımda titanyum süngeri, hurda ve alaşım elementleri karıştırılarak eritilir ve ingot şeklinde dökülme işlemi gerçekleştirilir. İkinci adım olarak ise ortaya çıkan ingotlar eriyebilme yeteneğine sahip elektrot olarak eritme prosesine katılmaktadırlar. Tüm eritme prosesleri vakum ortamında gerçekleştirilmektedir (Anonim 2019b).

Bilindiği gibi hidrojen titanyumun yapısına çok kolay olarak girebilmektedir ve vakum ortamında gerçekleştirilen eritme prosesi, hidrojen başta olmak üzere birçok uçucu elementin yapıya istenmeyen bir şekilde katılmasını engellemiş olur ve saflığı yüksek oranda ingot malzeme üretimi yapılabilir. Bunlara istinaden eritme sisteminde

oluşabilecek hava ve su kaçağı gibi istenmeyen durumlar ingot malzemenin homojenliğini bozacaktır (Anonim 2019b).

Bir başka önemli faktör de ingotların boyutudur. Normalde 650-900 mm çaplı ingotlar 3600-6800 kg ağırlığındadır. Ekonomik açıdan avantajlı olan ve çapı 1000 mm'ye varan yaklaşık 9000 kg ağırlığında ingotlar da eritilebilmekte ancak daha büyük çaptaki ingotlarda segregasyon oluşumu gözlemlenmektedir (Anonim 2019b).

### **2.7.2 Titanyum Yarı Mamullerin Üretimi**

Yarı mamul üretimi olarak bakıldığında çeliğinkine benzer işlemler olmasına karşın sıcaklık değerlerinin kontrolünde kullanılan özel fırınlar, farklı alaşımların hem sıcak hem de soğuk şekillendirilebilme yeteneklerine göre dizayn edilen presler ile yüzey kalitesinin artırılması amacıyla kullanılan ekipmanlar göz önüne alınırsa titanyum yarı mamul üretimi ile çelik yarı mamul üretimindeki büyük farklılık görülebilmektedir. İngot dökümünden bar, kütük, pleyt, sac, şerit, profiller, boru ve kabloların oluşturulması yarı mamul üretiminin işlemleri olarak değerlendirilmektedir. 1950'lerde ilk yarı mamul üretiminden sonra titanyumun malzeme özelliklerinde herhangi bir değişme olmadığı ve üretimde ki gelişmeler değerlendirildiğinde elde edilen metal ürünün yeteneklerinin yarı mamul üretimi ile yakından ilişkili olduğu kolaylıkla söylenebilir (Anonim 2019b).

İngotlara,  $\beta$  faz yapısında ilk işlem olarak kaba presleme uygulandığı bilinse de modern proseslerde ince taneli kütüklerin elde edilebilmesi adına işlem  $\beta$  faz dönüşüm noktasının altında uygulanmaktadır. Dövme prosesi, yırtılma gibi istenmeyen olası durumları engellemek amacıyla ve daha büyük deformasyonların oluşturulabilmesine imkan vermek için  $\alpha$  fazında yüksek sıcaklık değerlerinde tamamlanır. Çizelge 2.19'da farklı titanyum alaşımları için kütük üretiminde kullanılan dövme sıcaklık değerleri gösterilmiştir (Anonim 2019b).

**Çizelge 2.9.** Bazı Titanyum Alaşımlarının Kütük Dövme Sıcaklıkları (Anonim 2019b).

Alaşımların		Beta Dönüşüm Sıcaklığı (°C)	Dövme Sıcaklıkları (°C)		
Türü	Adı		Kaba Pres	Normal	Bitirme
Saf	Grade 1...4	900-955	955-980	900-925	815-900
$\alpha$	Ti-5Al-2.5Sn	1030	1120-1175	1065-1095	1010-1040
Süper $\alpha$	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	995	1095-1150	1010-1065	955-980
	Ti-8Al-1Mo-1V	1040	1120-1175	1065-1095	1010-1040
$\alpha+\beta$	Ti-6Al-4V	995	1095-1150	980-1040	925-980
	Ti-6Al-6V-2Sn	945	1040-1095	955-1010	870-940
	Ti-7Al-4Mo	1005	1120-1175	1010-1065	955-980
$\beta$	Ti-13V-11Cr-3Al	720	1120-1175	1010-1065	925-980

1970'li yıllarda keşfedilen bir teknik sayesinde  $\beta$  faz dönüşüm sıcaklık değerinin üzerine çıkıldığında yeniden kristalleşme özelliğinden faydalanılan kütüklerden bazıları ikinci dövme; ekstrüzyon yada haddeleme proseslerinden geçerek daha da ince taneli bir içyapıya sahip olabilmektedir. Bu tür kütüklerden elde edilen dövme parçaların ikinci bir ısıl prosese uğramasına gerek olmadan elde edilmek istenen mekanik özellikler ile mikroyapı oluşturabilmek mümkündür (Anonim 2019b).

Titanyum kütüklerin türlerine göre haddeleme esnasındaki sıcaklık değerleri Çizelge 2.10'da gösterilmiştir. İstenen tanelik içyapının elde edilmesi bu sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen haddeleme işlemleri ile mümkündür (Anonim 2019b).

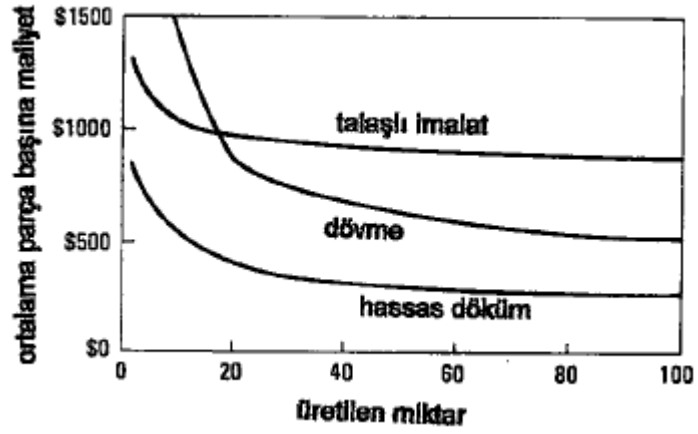
**Çizelge 2.10.** Bazı Titanyum Kütüklerin Son Sıcak Hadde İşlem Sıcaklıkları (Anonim 2019b).

Alaşımanın		Haddelene Sıcaklıkları (°C)		
Türü	Adı	Bar	Pleyt	Sac
Saf	Grade 1...4	760-815	760-790	705-760
$\alpha$	Ti-5Al-2.5Sn	1010-1065	980-1040	980-1010
Süper $\alpha$	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	955-1010	955-980	925-980
	Ti-8Al-1Mo-1V	1010-1040	980-1040	980-1040
$\alpha+\beta$	Ti-6Al-4V	955-1010	925-980	900-925
	Ti-6Al-6V-2Sn	900-955	870-925	870-900
	Ti-7Al-4Mo	955-1010	925-955	925-955
$\beta$	Ti-13V-11Cr-3Al	955-1065	980-1040	730-900

Çapı yaklaşık 100 mm'ye kadar olan barlar tek yönlü haddelenmektedirler ve mekanik özellikleri çoğunlukla deformasyona bağlı olarak değişmektedir. Örneğin 100 mm<sup>2</sup> Ti-6Al-4V kütükten haddelenerek elde edilen 50 mm çapındaki barın çekme dayanımı, aynı kütükten aynı hadde sıcaklıklarında haddelenerek elde edilen 7.8 mm çaplı çubuktan 140-170MPa daha düşüktür (Anonim 2019b).

### 2.7.3 Titanyum ve Alaşımlarının Geleneksel Üretim Yöntemleri

Bütün titanyum türleri döküm prosesine uygundur ve bu sebeple diğer türdeki malzemelerde olduğu gibi döküm prosesine has titanyum alaşım türü yoktur. Diğer dövme veya talaşlı imalat gibi yöntemlere göre maliyetin düşük olması dökümün tercih sebebidir. Bir uçakta kullanılan parçanın farklı üretim yöntemleri ile üretildiğindeki maliyeti şekil 2.26'da gösterilmiştir (Anonim 2019b). Üretimi yapılacak parça adedinin düşük olması, dövmedeki ve talaşlı imalattaki tasarımda oluşacak zorluklar, elde edilmek istenen ürünün yüzeyindeki girinti-çıkıntılarının fazlalığı dökümü diğer yöntemlere göre daha avantajlı kılmaktadır (Anonim 2019k).



**Şekil 2.26.** Uçaklarda Kullanılan Bir Titanyum Parçanın İmal Usullerinin Karşılaştırılması (Anonim 2019b).

Diğer malzemelerden farklı olarak titanyum malzemede, dövme yöntemiyle elde edilen titanyum parçalarla döküm yöntemiyle elde edilen titanyum parçalar kıyaslama yapıldığında neredeyse aynı dayanım değerlerine ulaşılmaktadır. Fakat sünekliği gösteren %uzama ve kesit daralması oldukça düşüktür.

Yorulma dayanımı değerleri kıyaslandığında ise dökme titanyum parçaların dövme ile elde edilen titanyum parçalara kıyasla daha düşük olduğu gözlemlense de belirli ısı işlemler uygulanarak durumun düzeltilebileceği görülmüştür (Anonim 2019b).

Talaşsız şekillendirme yöntemleri de titanyumun şekillendirilmesi için oldukça yaygın kullanılan yöntemlerdir.

**Dövme:** Bu işlem, elde edilmek istenen parçanın son şekline en yakın haline getirildiği üretim yöntemidir. Malzeme daha az işleneceğinden dolayı en optimum derecede malzeme kullanılabilir. Diğer yöntemlerden farklı olarak dövmede malzemenin mekanik özellikleri değişebilmektedir (Anonim 2019k).

Özellikle karmaşık şekilli parçaların dar toleranslar içinde elde edilebilmesi için yapılır. Çapaklı dövme, çapaksız dövme ve damgalama gibi çeşitleri de vardır. Genellikle sıcak dövme işlemi oldukça yaygındır. Parça tavlınır, kalıp boşluğu doldurulur ve çapak oluşur. Ardından çapak alınır. Boyut toleranslarının tam olması ve iyi yüzey çıkması için dövülen parçalar makinede işlem görebilir (Anonim 2019k).

Günümüzde hassas dövme teknolojisi kullanılmakla birlikte dövme prosesinden geçen parça üzerinde fazla işlem yapılmamaktadır ve işçilikte %95, maliyetlerde de %90 azalmalar ile karlılıkta artışlar görülmektedir.

**Ekstrüzyon:** Bu işlemi genel olarak kovan içerisine yerleştirilen bir iş parçasının, bir ıstampa tarafından uygulanan kuvvetle itilip ürün kesitini veren kalıp açıklığından geçirilmesiyle gerçekleştirilen bir plastik şekillendirme işlemi olarak tanımlanabilir. Bu metot ile çeşitli geometrilere sahip dolu kesit profiller üretilebileceği gibi boşluklu ve karmaşık kesitli profiller de üretilebilmektedir (Noorani ve ark. 2005).

Tıpkı döküm prosesi gibi tüm titanyum türleri ekstrüzyon işlemine uygun malzemelerdir. Uzun profil gibi yapılara ve kesitleri daha karmaşık parçaların üretilmesi için uygulanır. Uçakların kanat ve jet motoru parçalarında ekstrüzyon ile üretilen ürünlerde kullanılmaktadır (Anonim 2019k).

Titanyum malzemenin mekanik dayanım ve özellikleri ekstrüzyon oranına, ekstrüzyonun ardından yapılan soğutma işleminin süresine göre değişmektedir. Mesela 10:1 oranında gerçekleştirilen ekstrüzyon titanyum malzemenin çekme ve akma dayanım değerlerini %15 oranında yükseltmektedir. Düşük ekstrüzyon ile kaba taneli içyapı, yüksek ekstrüzyon oranında ise içyapıda bulunan tanelerin daha ince yapılı olmasının dayanım değerinin yükselmesinde esas faktör olduğu bilinmektedir (Pearson ve Parkins 1961).

**Plastik Şekil Verme:** Bu işlem ile çekme ve akma dayanımı değerlerinde yükselme görülen titanyum malzemenin sünekliği azalmakta ve aynı zamanda sertlik değerleri artmaktadır. Titanyum malzemede soğuk şekillendirmede geri yaylanma değeri yüksektir ve bu problemin önüne geçebilmek adına deformasyon oranı arttırılabilir veya şekil verme işlemi yüksek sıcaklık değerlerinde yapılmalıdır (Anonim 2019b).

Yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinde gerçekleştirilen süperplastik şekil verme, her geçen gün daha da çok kullanılan bir yöntem olmaktadır. İşlemde; kalıp ara yüzeyine yerleştirilen ve ön ısıtmadan geçirilmiş titanyum sac, sıcak argon gazının uygun bir basınçta sac üzerine gönderilmesiyle alt kalıp üzerinde şekil verilmektedir. Ti-6Al-4V türü titanyum malzemeye uygulanan süperplastik şekil verme; üretim hızının yüksek oluşu, hafiflik ve az maliyetli oluşu, çok karmaşık yapılara sahip ürünlerin üretilebilmesi

ve montajlanabilmesindeki basitlik gibi durumlar ile diğer üretim yöntemlerine üstünlük sağlamaktadır (Anonim 2019k).

Titanyum malzeme ve alaşımlarının işlenebilirlik yetenekleri oldukça azdır. Örneğin kimyasal aktivitesi fazla olan titanyum işlenirken kesici takıma sıvanmaktadır. 500°C'nin üzerine çıkıldığı talaş kaldırmada ise kesme kuvveti dolayısı ile talaşlar takımlara sanki basınç kaynağı yardımı ile yapışmaktadır. Ayrıca düşük iletkenliğe sahip olan titanyum malzeme takım ile işlenen parça arasındaki sıcaklık değerlerinin yükselmesine neden olur ve takım ömrünün azalmasına sebebiyet vermektedir. Yinede yüksek sıcaklığa karşı gösterdiği direnç işlenebilirlik yeteneğini aşağılara çekmektedir. Bu sebeplerden dolayı takımların sağlamlığının belirlenmesi, kesici takımların uygunluk seviyesi ve soğutma sıvısının yeterince çok olması istenmektedir. Ti-6Al-4V türü titanyum alaşımı malzemenin talaşlı imalat parametreleri Çizelge 2.11'de gösterilmiştir (Ezugwu ve Wang 1997).

**Çizelge 2.11.** Ti-6Al-4V alaşımından yapılan bir jet motoru parçasının talaşlı işlem parametreleri (Ezugwu ve Wang 1997)

Talaş Kaldırma Yöntemi	Takım Malzemesi	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Hızı (mm/dev)	Paso (mm)
Tornalama (kaba)	K20	38	0.25	6.35
Tornalama (son)	K20	50	0.15-0.20	0.25-0.75
Tornalama (son)	K20	76	0.15-0.20	0.25-0.75
Frezeleme (çap: 19-25 mm)	HSS	15	0.07(*)	3.175(**)
Frezeleme (çap: 19-25 mm)	K20	50	0.13(*)	3.8-5(**)
Delme	HSS	7.5	0.13	
Delme	K20	10	0.1	
Raybalama	HSS	5	0.25	
Raybalama	K20	9	0.25	
Diş Açma	HSS	4		
Broşlama	HSS	3	0.07(*)	



(\*) Bu değerler mm/diş uzerinden verilmiştir.

(\*\*) Bu değerler aksenal pasolardır. Radyal yönde paso için bu değerler 2/3 ile çarpılacaktır.

Titanyum malzeme ve alaşımları su jeti, lazer, oksii-asetilen ve şerit testere ile kesilebildiği bilinmektedir. şerit testereyle kesme prosesinin parametreleri izelge 2.12'de verilmiştir (Anonim 2019k).

**Çizelge 2.12.** Titanyum ve Alaşımları için şerit Testere Parametreleri (Anonim 2019k)

Titanyum Malzeme	ap (mm)	şerit Tipi (diş/ii)	şerit Hızı (m/dk)	Talaş Hızı (cm <sup>2</sup> /dk)
Saf	50-130	3	30-38	13-19
	130-200	2-3	30-38	9.6-13
	>200	2-2.5	23-29	6.5-9.6
Alaşım	50-130	3	25	6.5-9.6
	130-200	2-3	25	6.5-9.6
	>200	2-2.5	19-20	3.2-6

15 cm kalınlığında olan titanyum sac oksii-asetilen alevi vasıtasıyla kesilebilir. Fakat kesilmesinden önce sac yüzeyinin mutlaka iyi bir şekilde temizlenmelidir. Aksi halde oluşan yüksek sıcaklık değerlerinde titanyum çevredeki oksijen ile sac uzerindeki oksitleri çözecektir. Tabi ki bununla birlikte sac yüzeyini temizleme maksadıyla kullanılan asidik sıvılardan hidrojen yakalayan titanyum malzemenin gevrekleşebileceği de unutulmamalıdır (Anonim 2019k).

Su jeti ile kesme yönteminde, su 4130 bar basına kadar yükseltilir ve dar bir nozuldan geçmesi sağlanarak 3200 km/h gibi yüksek bir hıza çıkarılarak kesilmek istenen sac yada ürün uzerine gönderilir. Titanyum malzemesi mukavemet ve mekanik dayanımı yüksek olduğundan dolayı küçük aşındırıcı parçacıklarda su içerisinde mevcuttur. Bu yöntem ile malzemeye herhangi bir deformasyon yada hasar verilmezken yüksek kaliteye sahip kesme yüzeyleri de elde edilmektedir. Kağıt kadar ince malzemelerden

0.1m kalınlığa kadar olan parçalar kesilebilmektedir ve ayrıca herhangi bir zehir içermediği için dondurulmuş gıdalar içinde kullanılmaktadır (Woolman 1987).

Birçok titanyum alaşımı kolayca kaynak edilebilmektedir. Titanyum alaşımların kaynağında kaynak bölgesi; sünek olduğu kadar ana metal kadar her türlü evre şartlarında korozyona karşı dayanıklıdır. Ancak kaynak kalitesi düştüğünde bu durumun tam tersi gerçekleşmektedir (Anonim 2019k).

Kaynak sırasında sıcaklığın çok yüksek değerlere çıkmasıyla, oksijen ve azot gibi katkı elementleri, titanyum içerisine ara yer atomları şeklinde nüfuz etmekte ve dolayısıyla malzemenin kaynak bölgesinde gevrekleşmesine neden olmaktadır. Titanyum ve alaşımlarında böyle bir durumun oluşmaması için koruyucu gaz altında kaynak yapılmasına zen gösterilmelidir (Anonim 2019b).

TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı, titanyum alaşımları için kullanılan en yaygın kaynak yöntemidir ve kalınlığı 3 mm'ye kadar olan tüm sacların kaynağı TIG yöntemi ile yapılmaktadır. Daha kalın sacların kaynağında genellikle MIG (Metal Inert Gas) yönteminin kullanılmasına karşın, TIG kaynağı da bu saclar için gerektiğinde kullanılmaktadır. TIG kaynağının avantajları; kaynak bölgesindeki nüfuziyet ve genişlik, sıçramanın olmayışı, ilave metal olsun yada olmasın kaynak görünümünün pürüzsüz ve üniform olması bulunmaktadır (Anonim 2019k).

MIG (Metal Inert Gas) kaynağının titanyum alaşımları açısından avantajı ise birim zamanda eritilen metalin daha fazla olmasıdır. Bu durum, özellikle kalın sacların kaynağında tam bir birleşmenin sağlanması açısından istenen bir olgudur. Titanyum alaşımlarının MIG kaynağı ile yapılan birleştirmelerinde koruyucu gazın büyük bir önemi vardır. Çünkü MIG kaynağının yüksek hızı ve kaynak banyosunun oldukça büyük olması; ortamdaki atmosferin malzemeyi etkilemesine neden olmaktadır (Anonim 2019k).

Nokta direnç kaynağı da aynen diğer metallere uygulandığı gibi titanyum alaşımlarına da uygulanabilmektedir. Kaynak evriminin kısa sürmesi atmosferden korunmayı gerektirmemektedir. Ayrıca titanyumun düşük elektrik ve ısıl iletkenliği sayesinde nokta direnç kaynağı, alüminyum ve elik alaşımlarına göre daha kolay yapılabilmektedir (Anonim 2019k).

Bunların dışında sürtünme kaynağı, elektron ışın kaynağı, lazer kaynağı ve patlatma ile şekillendirme gibi birleştirme yöntemleri de titanyum ve alaşımlarına uygulanabilmektedir (Anonim 2019k).

Toz metalurjisi yöntemi; farklı üretim yöntemleri ile yaygınlık açısından kıyaslandığında daha az kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni ise üretim maliyetlerinin fazla ve proses sürecinin çok uzun olmasından kaynaklıdır. Çizelge 2.13'te döküm, dövme ve toz metalurjisi ile elde edilen parçaların oda sıcaklığında göstermiş oldukları mekanik özellikleri verilmiştir (Anonim 2019b).

**Çizelge 2.13.** Döküm, dövme ve TM ile üretilen bazı titanyum parçaların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Anonim 2019b).

Alaşım Özellikleri	Saf Titanyum			Ti-5Al-2.5Sn (ELI)			Ti-6Al-4V			Ti-6Al-6V-2Sn		
	Dök	Döv	TM(2)	Dök	Döv	TM(3)	Dök	Döv	TM(3)	Dök	Döv	TM(2)
Çekme Dayanımı (MPa)	635	550	480	795	815	795	1025	1000	925	1105	1125	965
Akma Dayanımı (MPa)	510	480	370	725	710	715	880	925	840	965	1055	840
% Uzama	20	18	18	10	19	16	12	16	12	6	16	5
% Kesit Daralması	31	33	22	17	34	27	19	34	27	11	38	5
Kırılma Enerjisi (J)(1)	26	35					19	22		14	20	

(1) -40°C'deki Charpy Kırılma Deneyi sonuçlarını göstermektedir.

(2) Sıkıştırılmış ve tavlanmış numuneden alınan değerler (%94 yoğunlukta)

(3) Sıkıştırılmış, tavlanmış ve dövülmüş numuneden alınan değerler (yaklaşık %100 yoğunlukta)

Titanyum ve alaşımlarının karbon çelikleri üzerine giydirilmesi ise başka bir üretim tipidir. Titanyum metali, maliyetlerin azaltılmasının istendiği kimyasal tesislerde korozyon dayanım ve verimliliğin arttırılmasını sağlayarak istenen hedefleri gerçekleştirmektedir.

İnce bir titanyum tabakanın korozyona dayanım için yeterli olacağı sistemlerde hadde ile giydirme (roll-bond linings) en uygun giydirme yöntemidir. Bu proseste en fazla saf titanyum malzeme Grade 1, 2, 7 ve 11 türleri kullanılmaktadır. Dikişli giydirme (resist-clad linings) yöntemi ise sac veya folyo halindeki herhangi bir titanyum alaşımının dikiş kaynağı ile çeliğe giydirilmesi esasına dayanmaktadır (Anonim 2019k).

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

En yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V titanyum alaşımının sıcaklık değişimi ile oluşan mikroyapı dönüşümleri ve sıcak şekillendirme sonrasında meydana gelen geri yaylanma açılarının incelenmesi Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1. Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

Ti-6Al-4V alaşımının iç yapı bileşimi % olarak Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Ti-6Al-4V alaşımının iç yapı kompozisyonu

Compositio n	Al	V	Fe	O	N	H	C	Ti
Content (%)	5,9	4	0,09	0,14	0,01	0,002	0,01	Bal.

Yine aynı malzeme olan Ti-6Al-4V alaşımına ait mekaniksel özellikler de Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Ti-6Al-4V alaşımına ait bazı mekanik özellikler

Çekme Dayanımı	900 MPa
Akma Dayanımı	830 MPa
Uzama	10 %
Kesit Daralması	20 %
Charpy Kırılma Enerjisi	27 J
Sertlik	362 HV

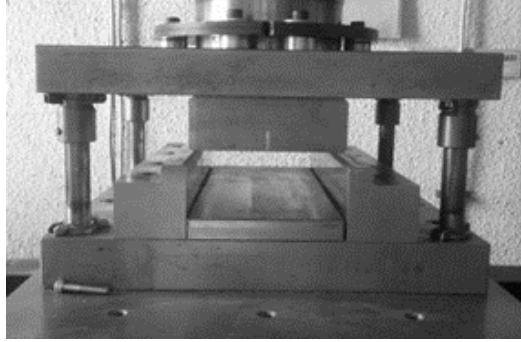
### 3.2. Yapılan İşlemler

Kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri verilmiş 1 mm kalınlığında düz formda ki Ti6Al4V sınıfı sac fırında ısıtılmıştır. 350°C, 450°C, 550°C, 650°C, 750°C, 850°C ve 950°C'ye kadar ısıtılan saclar 10dk homojen bir mikroyapı elde etmek için bu sıcaklıkta bekletildikten sonra fırından alınmıştır.

Fırından çıkarılan düz saclar Hidro-Metal marka bir hidrolik prototip sıcak şekillendirme kalıbında, 6300kN basma kuvveti ve 24 mm/s basma hızında basılarak U profil haline getirilmiştir. 8 adet malzemenin bir tanesi ise hiç fırınlanmadan oda sıcaklığında şekillendirilmiştir. Kalıp kapandıktan sonra 1 dk boyunca saca basma kuvveti uygulanmıştır.

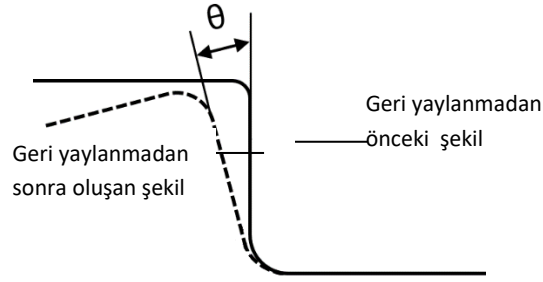
Hidrolik presin motor gücü 10kw, kapatma tonajı 200 ton, baskı hızı 24 mm/s'dir.

Kalıbın resmi şekil 3.1'de verilmiştir.



**Şekil 3.1.** Düz sacların U profil olarak basıldığı kalıp

Olympus dijital kamera beyaz ışık tarama sistemi ile U profilin geri yaylanma davranışlarını belirlemek amacıyla görüntüler çekilmiştir. Alınan dijital görüntülerden tel çerçeve modelleri oluşturulmuş ve Rapidform yazılımı sayesinde haritalama yapılmıştır. Taranan veri, yazılım kullanılarak veri setlerini görüntüleyebilmek için CAD datası olarak kaydedilmiştir. Geri yaylanma miktarı, geri yaylanma öncesi ve sonrasında ki arada kalan boşluğun açısı ( $\theta$ ) ile tanımlanmıştır. (Şekil 3.2)



**Şekil 3.2.** U profildeki geri yaylanmanın şematik gösterimi

Fırında ısıtıldıktan sonra U kalıpta sıcak şekillendirmesi tamamlanan numunelerden 3 mm boyunda kesilen parçalar çapakları da temizlendikten sonra Metkon Metapress-M marka numune gömme cihazında bakalite gömülmüştür. Daha sonra yine Metkon marka Forcipol 2V model parlatma cihazı kullanılarak sırasıyla 120, 200, 400, 600, 1000, 1200 kum zımparalar ile 200d/dk'da 3'er dk süresince parlatılmış ve son olarak 1 mikron alümina solüsyonu dökülmüş 9 dk süresince keçe ile parlatılmıştır. Parlatma işleminin hemen ardından yüzeyde oksidasyona fırsat vermeden, literatürden edinilen bilgilere göre %10 HF, %5 HNO<sub>3</sub> ve %85 H<sub>2</sub>O ile hazırlanan dağlayıcı kullanılarak, dağlayıcı emdirilmiş pamuk ile numuneler dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin içyapı incelemeleri yine malzeme laboratuvarında bulunan Nikon Eclipse MA100 marka optik mikroskopta yapılmış ve Clemex Captiva programı aracılığıyla 200µm, 100µm, 50µm ve 20µm'lik fotoğrafları alınmıştır.

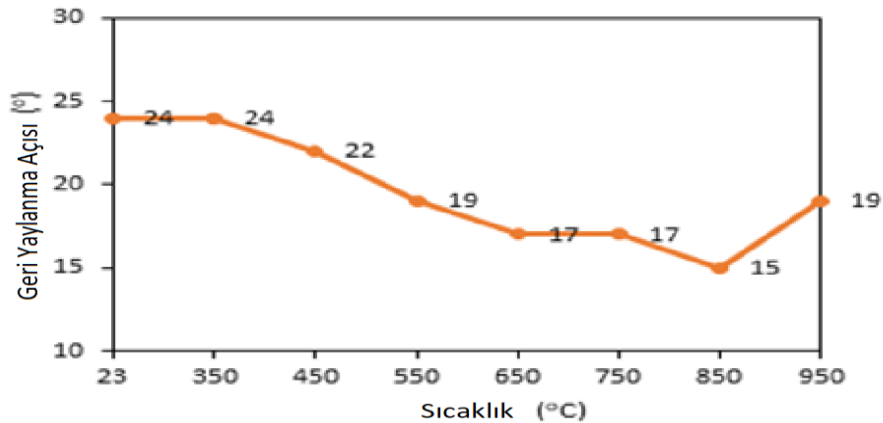
Lazer kesme makinesinde ASTM E8 standardına göre kesilerek hazırlanan numuneler ULUTEST marka çekme testi cihazında 10 mm/dk hız ve 9500N çekme kuvveti ile teste tabi tutulmuştur ve 8 çeşit numune için grafikler oluşturulmuştur.

Ayrıca Metkon Duroline-M marka sertlik ölçme cihazı ile malzemenin sertlik değerleri numunenin boyuna belli aralıklarla yapılan ölçümler ile tespit edilmiştir. 10 saniye boyunca 500g yük uygulanmıştır.

## 4.BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1 Geri Yaylanma Açısı İncelemesi

Farklı sıcaklıklarda oluşan Ti6Al4V alaşımının geri yaylanma açıları şekil 4.1'de verilmiştir. Oda sıcaklığında, 350°C, 450°C, 550°C, 650°C, 750°C, 850°C ve 950°C'ye kadar ısıtılarak işlem gören U-bükme profillerini karşılaştırarak, geri yaylanma açısının sıcaklık artışı ile önemli ölçüde azaldığı görülebilir. Geri yaylanma açısı, oda sıcaklığında 24° iken 850°C'de 15°'ye düşmüştür. 700-850°C arasında uygulanan sıcak deformasyon işlemi esnasında malzemenin iyi süneklik gösterdiği ve daha düşük mukavemet göstermesi, bu sıcaklıklar arasındaki geri yaylanma açısının oldukça düşmesini ve şekillendirilebilme yeteneğinin artmasını sağlamaktadır. Ti-6Al-4V alaşımında ikili faz dönüşümü hakimdir:  $\alpha+\beta$  faz yapısı oda sıcaklığından 1000°C±20'ye kadar hakimken, bu sıcaklık değerinden ergime sıcaklığına kadar  $\beta$  fazı mikro yapıya hakimdir. Yükselen sıcaklık değerinin  $\beta$  faz dönüşüm oranında artışı sağladığı ve akış stresini düşürdüğü bilinmektedir. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda daha düşük mukavemet ve daha düşük akma dayanımı gösterir ve geri yaylanma açısı düşüktür. Bu özellik de yüksek sıcaklıklarda şekillendirilebilirliğini artırır. 950°C'ye kadar ısıtılmış numunede ise grafikten de görülebileceği gibi geri yaylanma açısı tekrar yükselmiştir. Bunun sebebi tekrardan soğuma esnasında oluşan Widmanstatten  $\alpha$  fazıdır. Bu dönüşüm malzemenin mukavemetini artırarak daha sert olmasını ve şekillendirilebilirliğini azaltarak geri yaylanma açısını arttırmıştır.

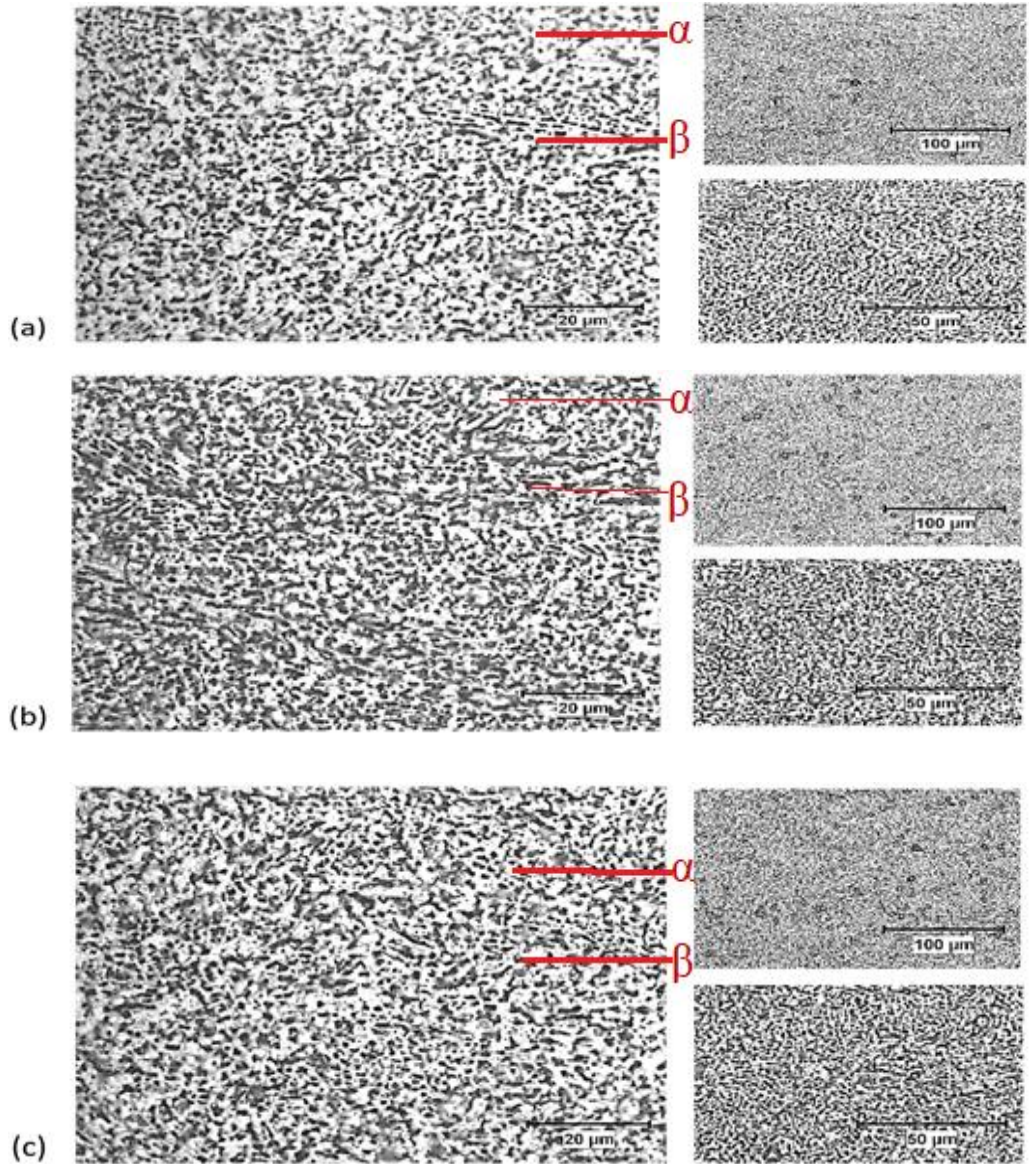


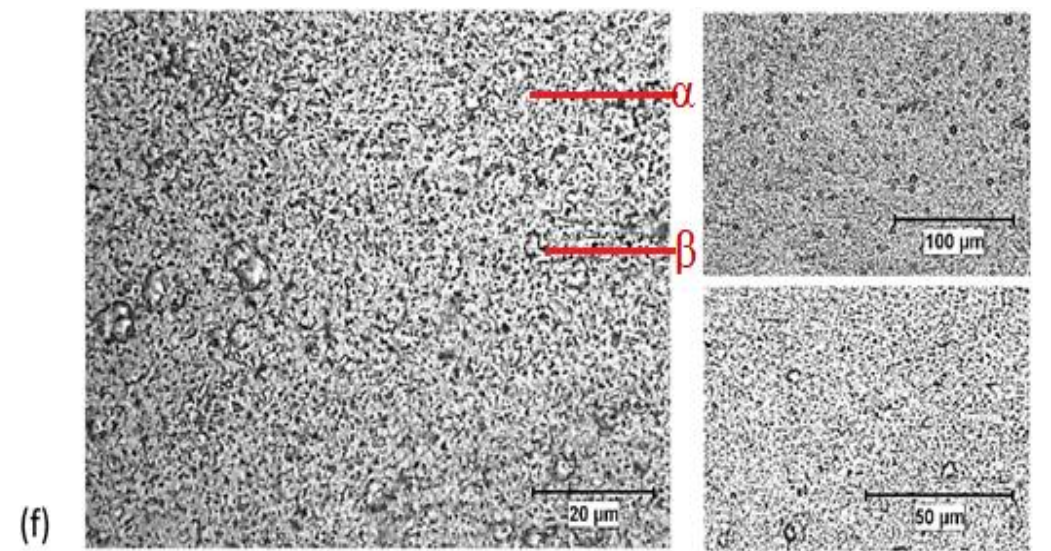
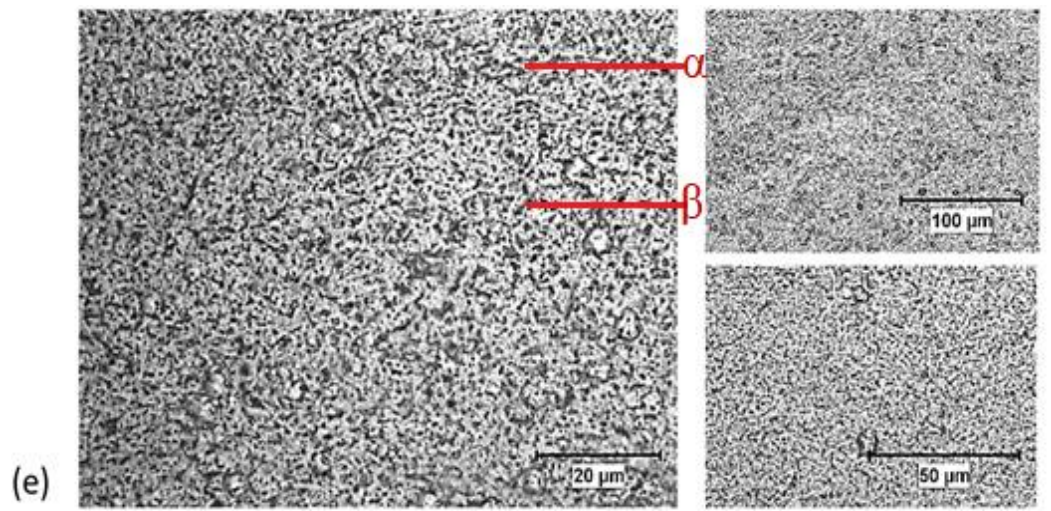
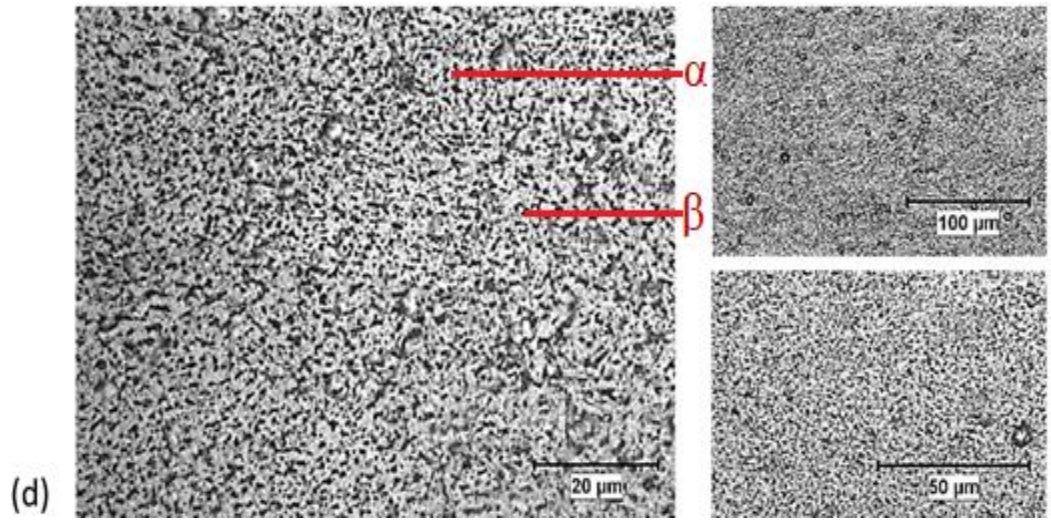
**Şekil 4.1.** Oda sıcaklığı, 350°C, 450°C, 550°C, 650°C, 750°C, 850°C and 950 °C sıcaklıklara kadar ısıtılan Ti-6Al-4V alaşımının geri yaylanma açıları.

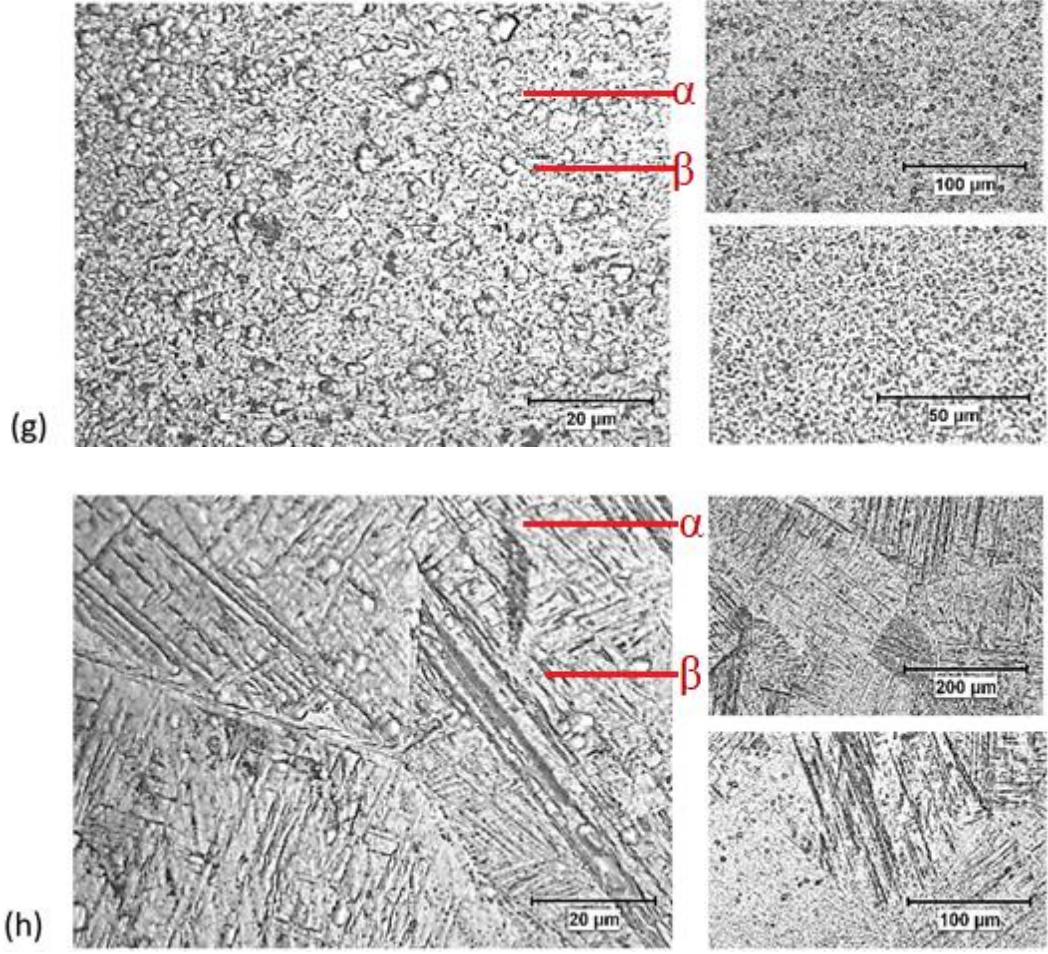


Daha önce 2.5. bölümde şekil 2.17'de de görülebileceği gibi Widmanstatten  $\alpha$  yapısının oluşabilmesi için 850°C sıcaklık değerinin üzerine çıkılmalıdır. 850°C'ye kadar ısıtılan titanyum sacda bu görülemese de 950°C sıcaklığa kadar ısıtılan titanyum sacın hem geri yaylanma açısına bakılarak sertlik değerinin arttığı söylenebilir hem de mikro yapı fotoğraflarına bakıldığında Widmanstatten  $\alpha$  yapısı kolaylıkla görülebilmektedir.

#### 4.2. Mikro Yapı İncelemeleri







**Şekil 4.2.** Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapı görüntüleri (a) oda sıcaklığı, (b) 350 °C, (c) 450 °C, (d) 550 °C, (e) 650 °C, (f) 750 °C, (g) 850 °C ve (h) 950 °C.

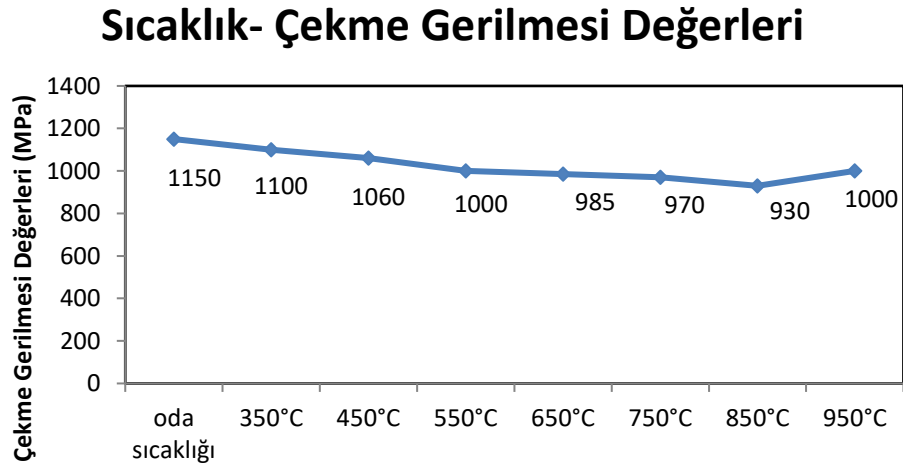
Siyah kısımlar  $\beta$ , gri kısımlar da  $\alpha$  yapılarıdır.

Mikroskoptan alınan fotoğraflar incelendiğinde 550°C'ye kadar ısıtılan malzemenin mikro yapısında ki sıcaklıkla birlikte büyüyen ve daha iri taneler haline gelen  $\alpha$  yapıları rahatlıkla görülebilmektedir. 550°C'de görülmeye başlayan daha iri hale gelen  $\alpha$  yapısının, 650 °C, 750 °C, 850 °C sıcaklıklara kadar fırında ısıtılan malzemelerin mikro yapısına bakıldığında ise giderek büyüdüğünü ve sayısının yani yapı içerisindeki yoğunluğunun arttığını gözlemlemek mümkündür. Bu yapıya ek olarak fotoğraflara dikkatli bakıldığında büyüyen  $\alpha$  taneciklerinin dışında kısımda yükselen sıcaklıklarla tanecikler daha da küçülmüştür. Yeniden kristalleşme olayı meydana gelmiştir ve esas bu sebeple malzemenin sünekliği artmıştır. 950 °C'ye kadar ısıtılan malzemede ise (h)

fotoğrafından da görülebileceği gibi Widmanstatten  $\alpha$  yapısı meydana gelmiştir. Widmanstatten  $\alpha$  yapısı,  $\alpha$  ve  $\beta$  yapısı ile karşılaştırıldığında daha sert ve dayanımı yüksek bir fazdır. Zaten bir önceki bölümde geri yaylanma açıları ve sıcaklık grafiği ile bu bölümdeki mikroskop görüntüleri birlikte değerlendirildiğinde; malzemenin mekanik dayanımı ve dolayısıyla şekillendirilebilme yeteneği ve mikro yapısı arasındaki ilişki açıkça görülmektedir. Widmanstatten  $\alpha$  yapısının oluştuğu numunelerin dayanım değerleri artmıştır.

### 4.3. Mekanik İnceleme

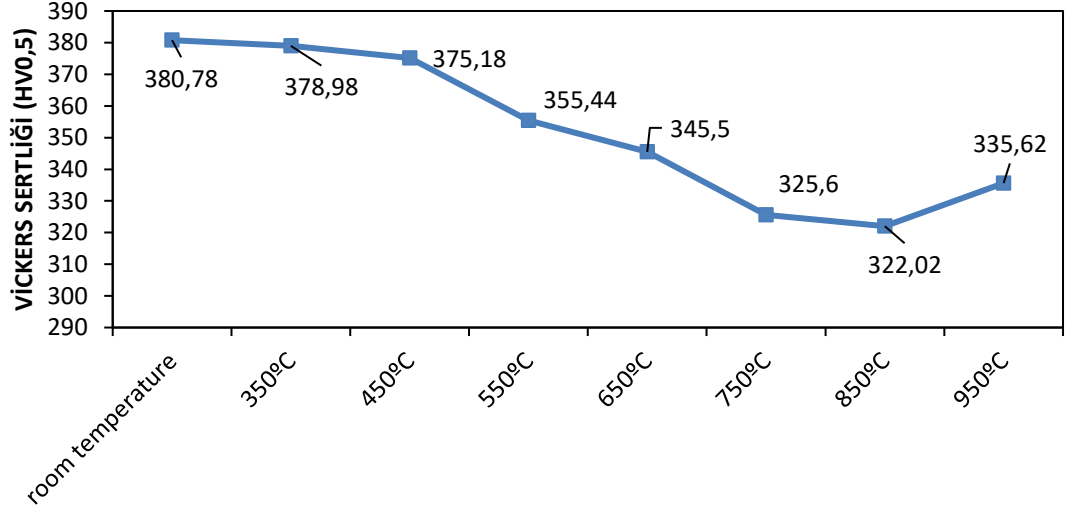
Oda sıcaklığı ve çeşitli sıcaklık değerlerine kadar fırında ısıtılan numunelerin çekme testinden elde edilen maksimum çekme gerilme değerlerinin grafiği aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



**Şekil 4.3.** Ti-6Al-4V alaşımının farklı sıcaklıklarda çekme testinden elde edilen gerilme değerlerinin grafiği

Farklı sıcaklık değerlerine kadar ısıtılan numunelerin çekme grafiğini incelersek, oda sıcaklığından itibaren 850°C'ye kadar ısıtılan malzemenin çekme dayanımı değerlerinin düştüğü ve 950°C sıcaklığa kadar ısıtılan malzemenin çekme dayanımının tekrar yükseldiği gözlemlenebilmektedir. Dolayısı ile sıcaklık değeri arttıkça parça süneklik kazanmış ve şekillendirilebilirlik yeteneği artmıştır. Ancak 950°C sıcaklığa ısıtılan malzemenin mukavemeti ve dayanımı tekrar yükselmiş ve şekillendirilebilme yeteneği düşmüştür. Ayrıca elde edilen sertlik değerleri şekil 4.4'te verilmiştir.

## Ti-6Al-4V SERTLİK GRAFIĞI



Şekil 4.4. Ti-6Al-4V alaşımının mikro sertlik değerleri grafiği

Sertlik grafiği incelenirse tıpkı geri yaylanma açıları ve çekme testi grafikleri gibi 950°C sıcaklığa kadar ısıtılan numunenin sertlik değeri artmıştır. Her ne kadar Widmanstatten  $\alpha$  ve martenzitik  $\alpha$  yapıları birbirine benzese de hem bu tez çalışmasında yapılan kendi kendine havada soğuma ile hem de sertlik değerleri grafiğinden elde edilen verilerle mikroskoptan alınan 950°C'ye kadar ısıtılan numunenin iç yapısının Widmanstatten  $\alpha$  yapısı olduğu bir kez daha ispatlanmış ve literatür bilgilerine göre elde edilen değerlerin de doğruluğu kanıtlanmıştır.

Bölüm 2.5 içersinde Widmanstatten ve martenzitik  $\alpha$  yapılarına değinilmiştir (Boyer ve ark. 1994)

Bu durumun titanyum malzemenin sıcaklığa bağlı olarak faz dönüşümü olayının sonucu açık olduğu mikroskop görüntülerinden alınan mikro yapı karşılaştırmaları sonucunda da açıkça görülmüştür.

## 5. SONUÇLAR

Yüksek sıcaklığa maruz kalan parçaların, korozif dayanım ve mukavemetinin yüksek olması istenen sistem elemanlarının, mukavemeti fazla ve düşük yoğunluklu parçaların istendiği yerlerde titanyum vazgeçilemez bir malzeme türüdür. Tüm bu özelliklerinin yanı sıra kullanım ömrünün de fazla olmasından kaynaklı düşünüldüğünden farklı olarak titanyum düşük maliyet avantajını da sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında da birçok alanda yaygın olarak kullanılan ve gün geçtikçe daha da yaygınlaşan titanyum malzemenin en fazla kullanılan türü Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmış; deformasyon sıcaklığına bağlı olarak değişen mikro yapısının geri yaylanma açısı ve malzemenin mukavemetine yaptığı etkiler deneysel çalışmalar ile ortaya konulmuştur.

Çekme testi grafiğinde oda sıcaklığında ki numunenin dayanımı 350°C'den 850°C sıcaklığa kadar sürekli olarak düşmüş ve 950°C sıcaklıkta tekrar yükselmiş ve malzemenin bu sıcaklıkta dayanımının arttığını göstermiştir. Sertlik değerlerinden alınan sonuç grafiğine bakıldığında da benzer bir şekilde 850°C'ye kadar azalan sertlik değerleri gözlemlenirken, 950°C sıcaklığa kadar ısıtılan numunenin sertlik değeri artmıştır. Bu iki grafik birlikte değerlendirildiğinde aynı durumu geri yaylanma açısında da gözlemlenmek mümkündür. Oda sıcaklığında şekillendirilen numuneden 850°C'de şekillendirilmiş numuneye kadar geri yaylanma açıları düşmektedir ve 950°C'ye kadar ısıtılan numunede geri yaylanma açısı artmaktadır. Kısaca bu grafiklerin birlikte değerlendirilmesi sonucunda 850°C'ye kadar sıcaklık arttıkça doğru orantılı olarak malzemenin şekillendirilebilme yeteneği artmıştır. 950°C'ye kadar ısıtılan malzeme de ise yine grafikler birlikte değerlendirildiğinde malzemenin şekillendirilebilme yeteneği azalmıştır. Bu durum malzemenin iç yapısı mikroskop altında incelendiğinde daha net bir şekilde anlaşılmaktadır. Oda sıcaklığındaki malzemenin mikroyapısında  $\alpha$  ve  $\beta$  faz yapıları birlikte bulunmaktadır. 350 ve 450°C sıcaklığına kadar ısıtılan malzemelerin mikroyapılarında herhangi bir değişim gözlenemezken 550°C'ye kadar ısıtılmış malzemede  $\alpha$  taneleri büyümeye başlamış ve daha iri  $\alpha$  yapıları meydana gelmiştir. Bu yapılar 850°C sıcaklığa kadar hem irileşmiş hem de sayı olarak daha da artmıştır. Bu yapılara ek olarak malzemenin mikroyapı fotoğraflarına daha dikkatli bakıldığında

büyüyen  $\alpha$  taneciklerinin dışında kalan taneciklerde sıcaklık arttıkça sıcaklık arttıkça küçülme meydana geldiğini gözlemlemek mümkündür. Yani malzemenin sünekliğinin artıp daha kolay şekillendirilebilir olmasında yeniden kristalleşme olayı esas etkindir. Dolayısı ile malzemenin sertlik ve dayanım değerleri yukarıda da açıklandığı üzere düşmüş, geri yaylanma açısı azalarak şekillendirilebilirliği arttırmıştır. 950°C sıcaklığa kadar ısıtılan malzemede ise mikroyapı görüntülerinden de görülebileceği gibi Widmanstatten  $\alpha$  yapısı meydana gelmiştir. Bu mikroyapı değişiminden kaynaklı sertlik ve dayanım değerleri artmış, geri yaylanma açısı yükselerek şekillendirilebilirliğin düşmesine neden olmuştur.

Sertlik değerinin birden arttığı 950°C'ye kadar ısıtılan malzemede, mikro yapıda meydana gelen Widmanstatten  $\alpha$  oluşumu kaynaklıdır. Literatürden, bu yapının 900°C±20 sıcaklığında ortaya çıktığı bilgisine ulaşılmıştır. Sadece 950°C'ye kadar ısıtılan malzemenin mikro yapısında eşik sıcaklık değerinin üzerine çıkıldığından bu iç yapı dönüşümü meydana gelerek malzemenin mukavemetini arttırmıştır. Mikro yapı görüntüleri, çekme testi grafikleri, sertlik değerleri ve geri yaylanma açıları birlikte değerlendirildiğinde hepsinden alınan sonuçlar birbirini destekler ve doğrular niteliktedir.

Elde edilen sonuçlar dikkate alınıp ileride yapılacak olan çalışmalarda Ti-6Al-4V malzemesinin şekillendirilebilmesi istenirse faz dönüşümü gerçekleşen 900°C sıcaklığının üzerine çıkılmamaya dikkat edilmelidir. Mikroyapıda meydana gelen değişim neticesinde gevreklik artacak ve malzemedeki beklenen değerlere ulaşamayacaktır.

## KAYNAKLAR

- Anonim 2019a.** [www.pasteltitan.com/tio2-tarihsele%20geli%20C5%9Fim.htm](http://www.pasteltitan.com/tio2-tarihsele%20geli%20C5%9Fim.htm)
- Anonim 2019b.** ASM Metals Handbook, 9. Edition, Volume 3 Properties and Selection: *Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals Titanium and Titanium Alloys*, 352
- Anonim 2019c.** [www.ido.org.tr/default.asp?ID=702](http://www.ido.org.tr/default.asp?ID=702)
- Anonim 2019d.** USGS: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/mcs-2018-titan.pdf>
- Anonim 2019e.** [www.istanbul.edu.tr/eng/maden/linkler/kayanyazilar/titan.htm](http://www.istanbul.edu.tr/eng/maden/linkler/kayanyazilar/titan.htm)
- Anonim 2019f.** T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı, 1990, Kimyasal Madde Araştırması Titanyum Kimyasalları
- Anonim 2019g.** MİGEM (2017) Ankara.
- Anonim 2019h.** <http://www.kobelco.co.jp/english/titan/index.html>
- Anonim 2019i.** ASM Handbook, 10. Edition, Volume 4, Heat Treating, *Heat Treating of Titanium and Titanium Alloys*, 2043
- Anonim 2019j.** ASM Handbook, 10. Edition, Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, *Introduction to Titanium and Titanium Alloys*, 1770
- Anonim 2019k.** International Titanium Association, <http://www.titanium.org>
- Anonim 2019l.** T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, 1996, Diğer Endüstri Mineraller Çalışma Grubu Raporu, 2, 175-186.
- Anonim 2019m.** [www.yapi.com.tr/V\\_Images/arastirma/278mimaridetitanyum.pdf](http://www.yapi.com.tr/V_Images/arastirma/278mimaridetitanyum.pdf)
- Anonim 2019n.** MAPEG: <http://www.mapeg.gov.tr/Istatistik.aspx>
- Armendia, M., Garay, A., Iriarte, L. M., Arrazola, P. J. 2010,** Comparison of the machinabilities of Ti6Al4V and TIMETAL® 54M using uncoated WC–Co tools. *J. Mater. Process. Tech.*, 210: 197-203.
- Azad-Noorani, M., Bakhshi-Jooybari, M., Hosseinipour, S.J., Gorji, A., (2005),** “Experimental and numerical study of optimal die profile in cold forward rod extrusion of aluminum”, *J Mater Process Technol*, 164– 165:1572–1577.
- Brooks CR., 1982** Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys. *Metals Park (OH): American Society for Metals*; 420.
- Brooks, R. C., 1982,** Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys, ASM International, *Metals Park*, USA
- Boyer, R., Welsch, G., Collings, E.W., 1994,** Materials Properties Handbook: Titanium Alloys, ASM International, *Metals Park*, USA
- Çakır, M. C., Ensarioğlu, C., 2005,** Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirlik Etüdü, *Mühendis ve Makine*, Cilt:46, Sayı: 546-547
- Büyük Larousse, 1986.** *Milliyet Yayınları*, 22.cilt, 11557
- Ezugwu, E.O., Wang,Z.M., 1997,** Titanium alloys and their machinability a review, *Journal of Materials Processing Technology* 68, 262-274
- Fantel, R.J., Buckingham, D.A., Sullivan, D.E., 2012** Titanium Minerals Availability-Market Economy Countries, United States Department of the Interior Bureau of Mines, *US Government Printing Office*, Washington DC.
- Fred, L.C., September 1987.** Precision Forging, *Modern Metals*, 8.
- Garbiec, D., Siwak, P., Mróz, A. 2016,** Effect of compaction pressure and heating rate on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered Ti6Al4V alloy. *ACME*, 16: 702-707.



- İşler, A., 1999**, Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlem ve Mekanik Özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Kartalkanat, A. (2012)**. Anadoluda Madencilik Tarihçesi-3 Cumhuriyet Dönemi Madencilik. Ankara: MTA.
- Kayakıran, S., Çokyaman, S., & Kırıkoğlu, M. (2010)**. Türkiye Geneli Titan Arama Projesi. Ankara: MTA.
- Leyens, C. and Peters, M., 2003**, Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications, *Wiley VCH*, Weinheim
- M. J. D. R., Jr., 1988**, Titanium: A Technical Guide, ASM International, *Metals Park*, USA
- M. Nouari, H. Makich, 2013**, Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti-6Al-4V and Ti-555, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 41, 259-269.
- Moiseyev, V.N., 2006**, Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications, *CRC Pres*, Boca Raton
- Ohkubo, C., Watanabe, I., Ford, J.P., Nakajima, H., Hosoi, T., Okabe, T., 2000**, The machinability of cast titanium and Ti6Al4V, *Biomaterials* 21, 421-428
- Okabe, T.H. and Waseda, Y., June 1997**. Producing Titanium through an Electronically Mediated Reaction, *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 28.
- Paul M. Souza, Joseba Mendiguren, Qi Chao, Hossein Beladi, Peter D. Hodgson, Bernard Rolfe, 4 March 2019**, A microstructural based constitutive approach for simulating hot deformation of Ti6Al4V alloy in the  $\alpha + \beta$  phase region. *Materials Science and Engineering: A* volume 748, Pages 30-37.
- Pearson, C.E. and Parkins, R.N., 1961**. *The Extrusion of Metals*, Chapman & Hall Ltd., London.
- Ribeiro, M. V., Moreira, M.R.V., Ferreira, J.R., 2003**, Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining, *Journal of Materials Processing Technology* 143-144, 458-463
- S. Ramesh, L. Karunamoorthy, K. Palanikumar, 2008**, Surface roughness analysis in machining of titanium alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 23, 174-181.
- Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, ST. 2016**, Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *J. Manuf. Process.*, 21: 172-179.
- 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, 1071-1078
- Williams, J. C., Belov, A. F., 1982**, Volume 2, Titanium and Titanium Alloys, *Plenum Pres*, New York
- Woolman, R., October 1987**. Plasma and Water Jet Cutting of Titanium, *Light Metal Age*, 14.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Güner ÇETİN

Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 21.06.1995

Yabancı Dil : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Bursa Şükrü Şankaya Anadolu Lisesi (2009)

Lisans : Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği (2013)

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği (2017~)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : ORHAN OTOMOTİV-ORAU (2019~)

: FEKA AUTOMOTİVE (2018-2019)

İletişim (e-posta) : [gunercetin2@gmail.com](mailto:gunercetin2@gmail.com)

## BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

## TEZ ÇOĞALTMA VE ELEKTRONİK YAYIMLAMA İZİN FORMU

Yazar Adı Soyadı	GÜNER ÇETİN
Tez Adı	Ti-6Al-4V SAÇLARIN MİKROYAPI DEĞİŞİMİ VE GERİ YAYLANMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ
Enstitü	FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Anabilim Dalı	OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
Tez Türü	ORJİNAL ÇALIŞMA
Tez Danışman(lar)ı	Doç. Dr. RUKİYE ERTAN
Çoğaltma (Fotokopi Çekim) İzni Kısıtlama	<input type="checkbox"/> Patent Kısıt (2 yıl) <input type="checkbox"/> Genel Kısıt (6 ay) <input checked="" type="checkbox"/> Tezimin elektronik ortamda yayımlanmasına izin veriyorum.

Hazırlamış olduğum tezin belirttiğim hususlar dikkate alınarak, fikri mülkiyet haklarım saklı kalmak üzere Bursa Uludağ Üniversitesi Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığı tarafından hizmete sunulmasına izin verdiğimi beyan ederim.

Tarih :20/08/2019

İmza: 