



**TİTANYUM GRADE 2 SAC MALZEMESİNİN SICAK
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

ŞABAN GÖKMEN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİTANYUM GRADE 2 SAC MALZEMESİNİN SICAK
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

ŞABAN GÖKMEN
Orcid No: 0009-0009-7242-7576

Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL
(Danışman)
Orcid No: 0000-0001-8589-6931

YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TİTANYUM GRADE 2 SAC MALZEMESİNİN ŞEKLİLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Şaban GÖKMEN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL

Saf titanyum (CP2), yüksek dayanım, yüksek korozyon direnci, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklıklarda dayanımını koruyabilme ve yorulma dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Sahip olduğu bu özelliklerinden dolayı, medikal uygulamalar ve otomotiv gibi alanlarda tercih edilmektedir. Son yıllarda bu malzeme üzerinde yapılan araştırma ve geliştirmeler birçok ülke tarafından yakından takip edilmektedir. Ancak titanyum malzemelerinin üretim maliyetlerinin yüksek olması ve sınırlı şekillendirilebilirlikleri bir dezavantaj olduğundan dolayı kullanım alanları sınırlı kalmaktadır. Saf Titanyum (CP2) malzemesinin yüksek şekillendirme sıcaklıklarında nasıl davranış gösterdiğide belirsizliğini korumaktadır.

Bu tez çalışmasında; titanyum grade 2 (CP2) sac malzemesinin sıcak şekillendirilebilirliği incelenmiştir. U profil kalıbı üzerinde 1 mm sac titanyum plakaların farklı sıcaklıklarda preslenmesi ile sıcak şekillendirme işlemi uygulanmıştır. Sac malzemenin haddelme yönü boyunca U-plakaların alt kısmından ASTM 8'e göre numuneler alınmıştır. Daha sonrasında sırasıyla çekme testleri, mikrosertlik ölçümleri ve mikroyapıdaki değişimler incelenmiştir. Sonuç olarak; yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça, mikroyapıda ve mekanik özelliklerde önemli ölçüde değişimlerin olduğu gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda, malzemenin mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler gözlemlenmiştir. 1000°C sıcaklıkta malzemenin çekme dayanımının ve sertliğinin arttığı ve malzemenin gevrekleştiği görülmüştür. Saf titanyum (CP2) malzemesinin en iyi şekillendirme sıcaklığının ise 500°C'de olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlara bakıldığında; saf titanyum (CP2) malzemesinin farklı şekillendirme sıcaklıklarındaki tokluğu, sünekliği ve gevrekliği ile ilgili net bilgiler elde edilmiştir. Böylece malzemenin farklı sıcaklıklarda şekillendirilebilirliğide yorumlanmıştır. Bu tez çalışması, farklı sıcaklıklarda şekillendirilmiş saf titanyum (CP2) malzemesinin mekanik ve mikroyapı özelliklerindeki değişimin, kullanım alanına göre bir fikir vereceği konusunda fayda sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Titanyum, Sıcak Şekillendirme, Sac Metal Şekillendirme, Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri

2023, vi + 51 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF HOT FORMING ON TITANIUM GR2 SHEET MATERIAL

Şaban GÖKMEN

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

Supervisor: Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL

Pure titanium (CP2) has properties such as high strength, high corrosion resistance, low density, ability to maintain its strength at high temperatures and fatigue resistance. Due to these characteristics, it is preferred in medical applications and industries such as automotive. In recent years, research and development on this material has been closely followed by many countries. However, the high production costs and limited formability of titanium materials restrict their areas of use. The behaviour of Pure Titanium (CP2) material at high temperatures remains uncertain.

In this thesis; The effect of the formability of pure titanium (CP2) at different temperatures on mechanical properties was investigated. The hot forming process was carried out by pressing 1 mm sheet titanium plates at different temperatures on the U-profile mold. Samples according to ASTM 8 were taken from the bottom of the U-plates along the rolling direction of the titanium sheet material. Subsequently, tensile tests, microhardness measurements and microstructure changes were examined. Significant changes in the mechanical properties of the material were observed at high temperatures. It was observed that the tensile strength and hardness of the material increased, and it became more brittle at a temperature of 1000°C. The optimum forming temperature for pure titanium (CP2) material was determined to be 500°C. Based on the results obtained from this thesis, clear information regarding the toughness, ductility, and brittleness of pure titanium (CP2) material at different forming temperatures was obtained. Thus, the formability of the material at different temperatures was interpreted. This thesis has provided insights into the changes in the mechanical properties and microstructure of pure titanium (CP2) material formed at different temperatures, which can be useful in determining its application-specific characteristics.

Key words: Titanium, Hot Forming, Sheet Metal Forming, Mechanical and Microstructure Properties

2023, vi + 51 pages.

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesinden, yazımına, sonuçlandırılmasına kadar tüm süreçte değerli katkılarını esirgemeyen, yeri geldiğinde her türlü sıkıntılı süreçlerimde yanımda yer alan değerli danışman hocam Prof. Dr. Hande GÜLER ÖZGÜL'e ve projenin başlangıcından sonuna kadar takibiyle, çalışmalarımda sağladığı desteği ile sayın Prof. Dr. Rukiye ERTAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ailem.. Bugünlere gelmemde emeği olan, bana emek vermenin, çabalamanın değerli olduğunu öğreten, hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, bu süreçte her türlü sıkıntılarımda varlıklarını hep yanımda hissettiren çok değerli annem, babam ve kız kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım.

Şaban GÖKMEN
19/06/2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Titanyum'un Tarihçesi ve Önemi	3
2.2. Titanyum'un Genel Özellikleri	3
2.3. Titanyum'un Dünya'daki Rezerv Durumu	4
2.4. Titanyum'un Türkiye'deki Rezerv Durumu	6
2.5. Titanyum ve Alaşımlarının Faz Yapıları.....	7
2.5.1. Saf Titanyum.....	9
2.5.2. Alfa ve alfa'ya yakın alaşımlar	12
2.5.3. Alfa+Beta alaşımları	13
2.5.4. Beta Alaşımları.....	15
2.6. Titanyum'un Şekillendirme Kabiliyeti	16
2.7. Titanyum Metalinin Üretim Yöntemi	17
2.7.1. Kroll yöntemi	17
2.7.2. Hunter yöntemi.....	19
2.7.3. Van Arkel yöntemi.....	19
2.7.4. Elektroliz yöntemi.....	19
2.8. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları	20
2.8.1. Titanyum ve alaşımlarının havacılıkta kullanımı.....	21
2.8.2. Titanyum ve alaşımlarının otomotivde kullanımı	22
2.8.3. Titanyum ve alaşımlarının medikalde kullanımı.....	23
2.8.4. Titanyum ve alaşımlarının diğer alanlarda kullanımı	24
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	26
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	26
3.2. Numunelerin Hazırlanması	26
3.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi İçin Uygulanan Testler	30
3.3.1. Çekme testi.....	30
3.3.2. Sertlik testi	31
4. BULGULAR.....	32
4.1. Çekme Deneyi Sonuçlarının İncelenmesi	32
4.2. Sertlik Ölçümlerinin İncelenmesi	33
4.3. Mikroyapıların İncelenmesi	34
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	42
KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Titanyum elementinin sıcaklığa bağlı olarak sahip olduğu iki temel kristal yapı	8
Şekil 2.2. Titanyum ve alaşımlarının eşeksenli (a) ve iğnesel (b) iç yapı görüntüleri	10
Şekil 2.3. Martenzitik alfa yapısı	11
Şekil 2.4. İğnemsli alfa yapısının tek düzlemdeki (a) ve çoklu düzlemdeki (b) oluşumları	11
Şekil 2.5. Alfa titanyum alaşımının tavlanmasıyla (a), hızlı soğutma sonrası mikroyapısı (b) ve yavaş soğutma sonrası mikroyapısına (c) ait görüntüler	12
Şekil 2.6. Alfa+beta titanyum alaşımının tavlanmasıyla (a), yavaş soğutma sonrası oluşan eşeksenli mikroyapısı (b) ve hızlı soğutma sonrası iğnemsli mikroyapısına (c) ait görüntüler	14
Şekil 2.7. Ti6Al4V'nin a) 1050°C'den c) 800°C'den e) 600°C'den yavaş soğutma sonucunda, b) 1050°C'den d) 800°C'den f) 600°C'den hızlı soğutma sonucunda meydana gelen mikroyapı görüntüleri....	15
Şekil 2.8. Kroll işleminin şematik görünümü	18
Şekil 2.9. Titanyum metali üretim prosesi	20
Şekil 2.10. Atatürk havalimanı çelik hangarda bakım yapılan DC-7 uçağı	22
Şekil 2.11. Bir uçak motorunda titanyum kullanımı	22
Şekil 2.12. Medikalde implant kullanımı	24
Şekil 2.13. Fukuoka Dome beyzbol stadı	25
Şekil 3.1. Geleneksel ısıtma işlem fırını	27
Şekil 3.2. U-profil kalıbına sahip hidrolik pres makinası	27
Şekil 3.3. U-kalıpta şekillendirilmiş sac levhaların bazı sıcaklıklardaki görüntüleri A) Oda sıcaklığı B) 600°C C) 1000°C	28
Şekil 3.4. Haddeleme yönünde alınan numune	28
Şekil 3.5. Haddeleme yönüne dik alınan numune	29
Şekil 3.6. 400°C'de haddeleme yönüne dik numunelerin alındığı çalışmanın bir görseli	29
Şekil 3.7. Sıcak bakalite gömülmüş yüzeyi parlatılmış numune	29
Şekil 3.8. Utest Universal marka çekme deneyinin yapıldığı cihaz	31
Şekil 3.9. Metkon Duroline-M marka sertlik ölçümünün yapıldığı cihazı	31
Şekil 4.1. Haddeleme yönündeki çekme dayanımı grafiğı	32
Şekil 4.2. Haddeleme yönüne dik çekme dayanımı grafiğı	33
Şekil 4.3. Haddeleme yönündeki sıcaklık-sertlik grafiğı	34
Şekil 4.4. Haddeleme yönüne dik sıcaklık-sertlik grafiğı	34
Şekil 4.5. Farklı sıcaklıklardaki haddeleme yönündeki mikroyapıları A) RT B) 400 °C C) 500°C D) 600°C E) 700°C F) 800°C G) 900°C H) 1000°C	37
Şekil 4.6. Farklı sıcaklıklardaki haddeleme yönüne dik mikroyapıları A) RT B) 400 °C C) 500°C D) 600°C E) 700°C F) 800°C G) 900°C H) 1000°C	41

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Titanyum'un fiziksel özellikleri	4
Çizelge 2.2. Titanyum elementinin mekanik özelliklerinin diğer metallerle karşılaştırılması	4
Çizelge 2.3. Dünya ilmenit rezerv dağılımları	5
Çizelge 2.4. Dünya rutil rezerv dağılımları	5
Çizelge 2.5. Türkiye'deki titanyum rezervleri	7
Çizelge 2.6. Titanyum'a etki eden alaşım elementleri	8
Çizelge 2.7. Farklı kalitelerdeki saf titanyumun özellikleri	10
Çizelge 2.8. Alfa ve alfa'ya yakın titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri ..	13
Çizelge 2.9. Titanyum ve alaşımlarının kullanım alanları	21
Çizelge 2.10. Titanyum'un otomotiv sektöründe kullanımı	23
Çizelge 3.1. Saf titanyum'un (CP-Ti) kimyasal bileşeni (kütle,%)	26
Çizelge 3.2. Saf titanyum'un (CP-Ti) fiziksel özellikleri	26

1. GİRİŞ

Titanyum ve alaşımları, yüksek dayanım, düşük yoğunluk, korozyon dayanımı yüksek, yüksek sıcaklıklarda dayanımını koruyabilme ve yorulma dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Sahip olduğu bu özelliklerinden dolayı, havacılık, denizcilik, medikal uygulamalar ve otomotiv gibi alanlarda tercih edilmektedir. Son yıllarda bu malzeme üzerinde yapılan araştırma ve geliştirmeler birçok ülke tarafından yakından takip edilmektedir (Materials Park, 1990, pp. 586–591). Titanyum ve alaşımları alfa (α), beta (β) ve alfa+beta ($\alpha+\beta$) fazlarından oluşmaktadır (Mpumlwana, Msomi, ve Fourie, 2021). Ticari olarak kullanılan saf titanyum (CP) alfa fazına yakın alaşım olarak adlandırılmaktadır ve kendi içinde G1-G4 aralığında dört farklı kaliteye sahiptir (Smith, 1993).

Titanyum alaşımlarının şekillendirilebilirliği, sıcaklık parametresinde etkisiyle mekanik özellikler ve mikroyapıda değişikliğe sebep olmaktadır. Araştırmacılar, şekillendirilebilirliğin titanyum alaşımlarında oluşturduğu plastik deformasyonlar ve içyapı değişiklikleri ile ilgili birçok araştırma yapmıştır.

Tekin, Ertan ve Özgül Güler (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı sıcaklıklarda U-kalıpta şekillendirilmiş CP2 titanyum malzemesinin, üst ve yan yüzeylerindeki mekanik özelliklerini incelemişler. Alt numunelerin mukavemet ve sertliğinin yan duvar numunelerinden daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Böylece sacın kalıptaki konumunun mekanik özellikleri etkilediğini buldular.

Öztürk ve diğerleri (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, 0.6 mm kalınlığındaki CP titanyum sac malzemesini elektrikli rezistans ile 600, 650 ve 680°C'ye ısıtarak sıcak şekillendirmişlerdir. Sıcak şekillendirilen numunelerin mikroyapılarında belirgin bir değişikliğin olmadığını belirtmişlerdir.

Çetin (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, 350, 450, 550, 650, 750, 850 ve 950°C'ye kadar ısıtılan 1 mm'lik Ti-6Al-4V sac levhaların U kalıpta şekillendirilebilirliğini incelemiştir. Elde ettiği sonuçlarda, 850°C'de malzemenin sünekliğinin artmasının şekillendirmeyi kolaylaştırdığını ve bu duruma mikroyapıdaki yeniden kristalleşmenin etki ettiğini gözlemlemiştir.

Yan, Li, Zhang ve Kong (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, Ti-4Al-2V (TA17) alaşımına oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda uygulanan tavlama işleminin, şekillendirme karakteristiği üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Gheysarian ve Abbasi (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, 1 mm kalınlığındaki Ti-6Al-4V sac malzemedede uygulanan yaşlandırma işleminin mekanik özellikler ve şekillendirilebilirliğe etkisini araştırmışlar. Yaşlandırma işleminin sünekliği ve şekillendirilebilirliği azalttığını tespit etmişlerdir. Yaşlandırma işleminden önce yapılan tavlama işleminin ise şekillendirilebilirliği artırdığını gözlemlemişlerdir.

Nawaya, Beck ve Hehl (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, en iyi şekillendirme sıcaklığını belirlemek için yüksek sıcaklıklarda Exhaust-XT ve KS1.2ASNEX olarak adlandırılan α -titanyum alaşımlarının ve saf titanyum grade 4 malzemesinin gerilme-gerinim davranışlarını incelemişlerdir. Her üç malzeme içinde 700°C’de şekillendirmenin uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen literatür çalışması sonucunda; titanyum malzemelerin şekillendirilmesinde sıcaklığın önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında; titanyum grade 2 (CP2) sac malzemesinin sıcak şekillendirilebilirliği incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda U-kalıpta şekillendirilen sac levhaların alt tabanından, haddeleme yönünde (0°) ve haddeleme yönüne dik (90°) numuneler kesilmiştir. Elde edilen numuneler üzerinde çekme testleri, sertlik testleri ve mikroyapıdaki değişimler incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Titanyum'un Tarihçesi ve Önemi

1791 yılında William McGregor tarafından bulunan Titanyum dünyada bulunan elementlerin %0,6'sını oluşturan bir elementtir (Yücel, 2018). Doğada en çok bulunan elementler arasında 9. sırada yer alan Titanyum saf halde 1910'da kimyacı Matthew Hunter tarafından elde edilmiştir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü , 2018).

Titanyumun saf olarak elde edilmesi hem maliyetli hem de yüksek bir teknoloji gerektirmektedir. Titanyum'un kullanılmasında ve yaygınlaştırılmasında önemli bir isim olan Dr. Wilhelm Kroll'un 1938-1940 yılları arasında geliştirdiği çalışmalar, ABD Maden Bürosu tarafından desteklenmiştir. Büronun desteğiyle Tiyanumun özellikleri tespit edilmiş olup, ticari olarak ilk kullanımı 1946'da Soğuk Savaş dönemi olarak adlandırılan 2. Dünya Savaşı sonrasında olmuştur. Titanyumun yüksek sıcaklıkta ergiyen bir metal olması ABD Silahlı Kuvvetlerinin ilgisini çekmiş, bu sayede titanyum askeri donanımlar için kullanılmaya başlamıştır. 1952 yılında Titanyum ilk kullanıma yönelik üretimi havacılık sektöründe gerçekleşmiştir. Ticari ve askeri amaçlı uçakların jet motorlarının pervane kanatlarında kullanılması, kompresör disklerinde kullanılması titanyumun dünya genelinde hızlı bir şekilde yayılmasında sebep olmuştur. Tüm bu gelişmeler ile birlikte titanyum endüstrisi dünyada oluşmaya başlamıştır (Yaman, 2018).

Titanyum üstün fiziksel ve kimyasal özellikler göstermektedir. Titanyumun elde edilmesi ve işlenmesi hem maliyetli hem de yüksek teknoloji gerektirdiğinden kullanımı maalesef ki sınırlıdır. Titanyum plastik, kağıt, boya, kimya, uzay, uçak sektörlerinde ve askeri alanda kullanılan stratejik öneme sahip bir hammaddedir (İstanbul Maden İhracatçıları Birliği , 2018).

2.2. Titanyum'un Genel Özellikleri

Titanyum, hafif, korozyona dayanıklı, dayanımı yüksek, parlak, iyi yorulma dayanımı, yüksek ergime sıcaklığına sahip bir geçiş elementidir. Sembolik gösterimi Ti'dir. Periyodik cetvelde 4.grupta yer alan titanyumun atom numarası 22'dir. Yer kabuğunda en çok bulunan 6. elementtir. Ergime noktası 1660°C, kaynama noktası 3287°C, özgül ağırlığı 4,5 gr/cm³, atom ağırlığı 47,9 gr'dır. Metallere göre en iyi özgül ağırlık – sertlik

dayanımına sahiptir. Çelikten %45 hafif ve alüminyumdan %60 daha ağırdır (Duman, 2010). Titanyumun fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Titanyum’un fiziksel özellikleri (Majumdar ve Manna, 2015)

Element	Sembol	Atom Numarası	Yoğunluk (g/cm ³)	Atom Ağırlığı (gr)	Kaynama Noktası (°C)	Ergime Noktası (°C)
Titanyum	Ti	22	4,5	47,9	3287	1660

Titanyumun, diğer metallerle karşılaştırıldığı özellikler Çizelge 2.2’de gösterilmiştir. Titanyumun sahip olduğu üstün özelliklerine rağmen maliyeti yüksektir. Titanyumun oksijenle tepkimeye girme isteği yüksek olduğundan dolayı maliyetini yüksek kılmaktadır. Titanyum oksijenle tepkimeye girdiğinde, titanyum alaşımlarının kullanıldığı sıcaklık değeri 600°C’dir. 600°C üzerindeki sıcaklıklarda titanyumda oksitlenmeler görülmektedir. Bu durumda oksijenin fazla olduğu bölgelerin gevrekleşmesine neden olacaktır (Lütjering ve Williams, 2007).

Çizelge 2.2. Titanyum elementinin mekanik özelliklerinin diğer metallerle karşılaştırılması (Kıral, 2014)

Element	Ti	Al	Ta	Zr	Alaşımsız Çelik	CrNi Çeliği
Ergime Noktası (°C)	1660	660	2996	1852	1500	1450
Kafes Yapısı Yüksek Sıcaklık	HMK (beta)	-	-	HMK (beta)	HMK > 1392°C	3000
Kaynama Noktası (°C)	3260	2330	5425	3578	3000	3000
Beta Dönüşüm Sıcaklığı (°C)	882	-	-	862	906-1392 (gama)	-
Kafes Yapısı Oda Sıcaklığı (°C)	Hekzagonal (alfa)	YMK	YMK	Hekzagonal (alfa)	HMK (alfa)	HMK
Isı İletkenliği (Wm-1K-1)	16,5	240	54	19	52,5	16,5

2.3. Titanyum’un Dünya’daki Rezerv Durumu

Dünya’da pek çok ülke zengin titanyum yataklarına sahiptir. ABD, Çin, Kanada, Hindistan, Avusturalya, Güney Afrika, Norveç, Brezilya, Ukrayna, Mozambik, Sri Lanka ve Vietnam dünyada en önemli titanyum yataklarına sahip ülkelerdir (Maden Tetkik ve

Arama Genel Müdürlüğü, 2023). USGS (United States Geological Survey) tarafından açıklanan 2020 verilerine göre; metal titanyum rezervinin dünyadaki toplam miktarı 820 Mton'dur. Görünür ve muhtemel rezervin toplamı ise 2 milyar ton olduğu düşünülmektedir, bunun yaklaşık %89'u ilmenit, %11'i ise rutilden oluşmaktadır. Toplam ilmenit rezervlerin %60'ına Avustralya ve Çin sahiptir (İstanbul Maden İhracatçıları Birliği , 2018). İlmenit rezervlerinin dünya genelindeki ve önemli seçilen 6 ülkedeki dağılımı Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Dünya ilmenit rezerv dağılımları (İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, 2018).

Rezerv (İlmenit)		
Ülkeler	Rezerv (Mton)	Pay (%)
Avustralya	250	32,47
Çin	230	29,87
Hindistan	85	11,04
Brezilya	43	5,58
Norveç	37	4,81
G. Afrika	35	4,55
Kanada	31	4,03
Mozambik	14	1,82
Madagaskar	8,6	1,12
Ukrayna	5,9	0,77
ABD	2	0,26
Vietnam	1,6	0,21
Kenya	0,85	0,11
Diğer	26	3,38
Toplam	770	100

Dünya rutil rezervlerinin dağılımı ise Çizelge 2.4'de verilmiştir. Avustralya tek başına rezervlerin yarısından fazlasına sahiptir (İstanbul Maden İhracatçıları Birliği , 2018).

Çizelge 2.4. Dünya rutil rezerv dağılımları (İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, 2018)

Rezerv (Rutil)		
Ülkeler	Rezerv (Mton)	Pay (%)
Avustralya	29	61,7
Hindistan	7,4	15,74
Kenya	0,38	0,81
Mozambik	0,88	1,87
S. Leone	0,49	1,04
G. Afrika	6,1	12,98

Çizelge 2.4. Dünya rutil rezerv dağılımları (devam)

Ukrayna	2,5	5,32
Türkiye	2,73	5,81
Diğer	0,4	0,85
Toplam	47	100

Mevcut durumda dünyada titanyum cevheri üretiminde ve arzında herhangi bir sorun bulunmamaktadır. Ancak, titanyum üretiminde kullanılan teknolojilerin karmaşık olmasından dolayı ürün fiyatları yüksektir. Bu da titanyumun kullanım sahasını kısıtlamaktadır (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2023).

2.4. Titanyum'un Türkiye'deki Rezerv Durumu

Ülkemizde Manisa, İzmir ve Uşak illerinde plaserlerde, Hakkari'de bulunan kuvarsitlerde ve Trakya'nın Karadeniz sahillerindeki plaj kumlarında titanyum minerallerine rastlanmıştır (Terzi, 2012). Titanyum ile ilgili ilk çalışma Şile'de gerçekleştirilmiştir. Şile etrafı Karadeniz kumsalında manyetit ile birlikte büyük miktarda titano-manyetit ve zikron içeren bir manyetit plaser cevheri bulunmuştur. Ancak bu cevherin ekonomik olarak bir değer taşımadığı 1940 yılında Dr. H. Kleinsorge tarafından raporlaştırılmıştır (İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, 2018). Bu çalışmanın sonrasında ülkemizde; Karadeniz kıyı plaserlerinde ve Küçük ve Büyük Menderes havzalarında çalışmalar yapılmıştır.

1996 yılında MTA Genel Müdürlüğü, Türkiye Titanyumu Aramalar Projesi'nde primer (kayaç) ve sekonder (plaser) titanyum yataklarını keşfetmeye yönelik araştırmalarda bulunmuştur. (Yücel, 2018). Primer tipindeki yataklar üzerine yapılan araştırmalar, Menderes, Kazdağları, Kütahya-Tavşanlı bölgelerinin metagabro, gabro ve amfibol birimlerinde yürütülmüştür. Sekonder tipe yönelik yapılan araştırmalar ise kum potansiyeline sahip ve ağır minerallerin çokça görüldüğü Sakarya deltası ile Karasu sahil plaserleri, Kızılırmak ve Yeşilirmak deltaları ile Ünye-Çarşamba sahil plaserleri, Seyhan ve Ceyhan deltaları ile Çukurova bölgesindeki sahil plaserlerinde yapılmıştır.

Çalışmalar sonucunda; Manisa-Alaşehir gabro kütlelerinin ortalama %5'i kadar TiO_2 primer yatak, Samsun-Çarşamba ve Sakarya-Karasu sahil plaserlerinde ortalama %1'i kadar TiO_2 sekonder yatak olarak potansiyel oluşturduğu tespit edilmiştir (İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, 2018). Ülkemizde görünür bazda titanyum rezervleri aşağıdaki Çizelge 2.5'de verilmiştir (Yücel, 2018).

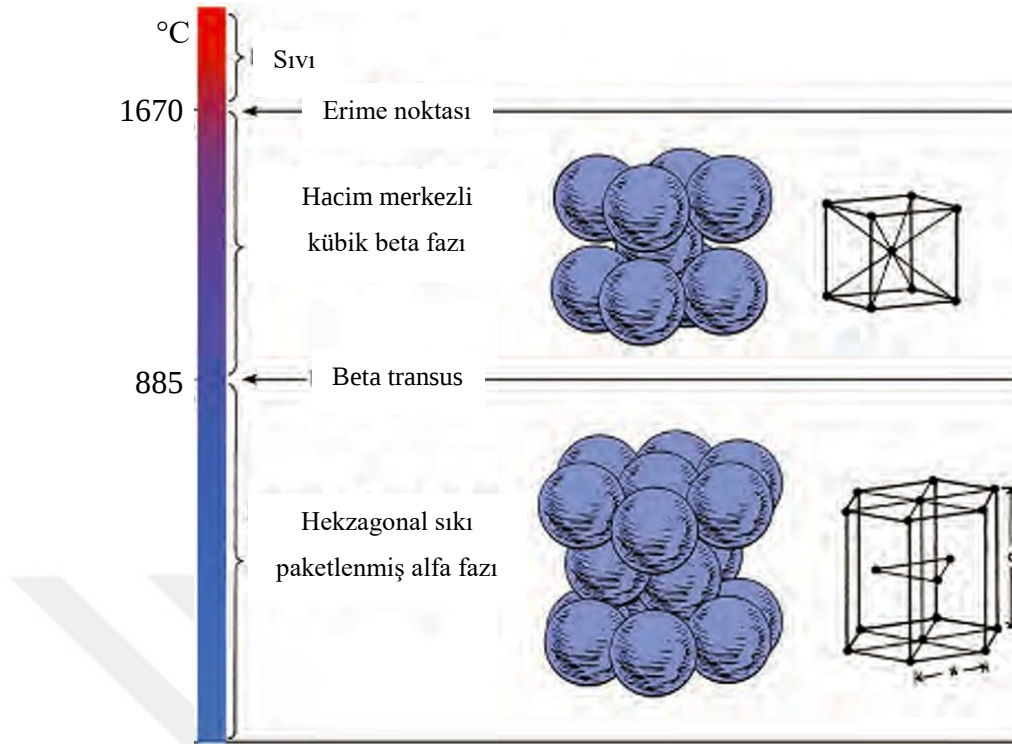
Çizelge 2.5. Türkiye'deki titanyum rezervleri

Yeri	Rezerv (Görünür) (ton)	Tenör ve Yatak Tipi
Sakarya – Karasu	161,348,413	%0,87-0,98 TiO_2 , Plaser
Manisa – Alaşehir	5,131,969	%4,95 TiO_2 , Primer

Ülkemizde bulunan titanyum oluşumlarının hemen hemen hiçbir yerinde tenör seviyeleri %1'i aşmamaktadır (Terzi, 2012). Türkiye tüm dünya titanyum rezervlerinin %0,33'üne sahiptir ve bu noktada fakir olarak addedilebilir (İstanbul Maden İhracatçıları Birliği, 2018). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü ülkemizde daha önce titanyum'u araştırma projeleri yürütmesine rağmen, ülkemizde kaliteli ve ekonomik olarak işletilebilir boyutlu primer veya sekonder titanyum yatağı bulunamamıştır. Ülkemizin titanyuma yönelik ihtiyacı tamamen ithalat ile karşılanmaktadır (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2023).

2.5. Titanyum ve Alaşımlarının Faz Yapıları

Titanyum, sıcaklıkla kristal dizilimi değişen allotropik bir yapıya sahiptir. Oda sıcaklığında, alfa fazı olarak adlandırılan hekzagonal sıkı paketlenmiş (hcp) bir kristal yapıda iken, 885°C sıcaklık üzerinde beta fazıyla adlandırılan hacim merkezli kübik (hmk) kristal yapıya dönüşür. Bu sıcaklık "beta transus geçiş sıcaklığı" olarak adlandırılır. Titanyumu, alaşımlandırılmamış (Saf), alfa ve alfa'ya yakın, alfa+beta ve beta olmak üzere dört farklı grupta inceleyebiliriz (Donachie, 1988). Titanyumun, hekzagonal sıkı paketlenmiş ve hacim merkezli kübik birim hücre yapıları Şekil 2.1'de gösterilmektedir (Leyens ve Peter, 2003).



Şekil 2.1. Titanyum elementinin sıcaklığa bağlı olarak sahip olduğu iki temel kristal yapı (Froes, 2015’den değiştirilerek alınmıştır.)

Saf titanyuma eklenen alaşım elementleri, alfa ve beta fazlarının oluşacağı sıcaklığa etki eder. Etki eden alaşım elementler alfa dengeleyiciler, beta dengeleyiciler ve nötr eklemeler olarak üç gruba ayrılmaktadır. Bu alaşım elementleri Çizelge 2.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Titanyuma etki eden alaşım elementleri (Froes, 2015)

Element	N	O	C	Al	Zr	Sn	Fe	Cr	Mn	Mo	W	V	Nb	H
Alfa Dengeleyiciler	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nötr Dengeleyiciler	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Beta Dengeleyiciler	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+

Alfa dengeleyici alaşım elementleri, alfa fazınının betaya dönüşüm sıcaklığını artırmaktadır. Alüminyum a fazını daha kararlı hale getiren en önemli alaşım elementidir. Diğer elementler azot, karbon ve oksijendir. Bu elementler saf titanyumun mukavemetini artırıp; sünekliğini düşürür.

Beta dengeleyici alaşım elementleri, dönüşüm sıcaklığını düşürerek beta fazını daha düşük sıcaklıkta dengeler. Beta fazındaki titanyum niyobyum ile izomorf yapıya sahiptir. Yeterli miktarda alaşım elementi eklendiğinde; düşük sıcaklıklarda titanyumun yapısının tamamında beta fazı olabilir. Örneğın beta fazını 400°C’de dengelemek için %56 Nb’ye ihtiyaç vardır. Hem alfa hemde beta fazları, 800°C’de ağırlıkça belli oranlarda niyobyum içerdiklerinde bir arada bulunurlar. Yapılacak ısıt işlemler istenilen sıcaklığa getirilerek, bu yapıları bir arada görmek mümkündür.

Alaşım elemntlerinin son grubu olan zirkonyum ve kalay nötr eklemeler olarak bilinir. Bu alaşım elemntleri bazen beta dengeleyici olarakta adlandırılmaktadır. Bunun sebebi beta geçiş sıcaklığını düşürmeleridir. Ayrıca alfa matriks alaşımlarına eklendiğinde, alüminyum gibi alfa dengeleyicilerin özelliğini alabilirler (Froes, 2015).

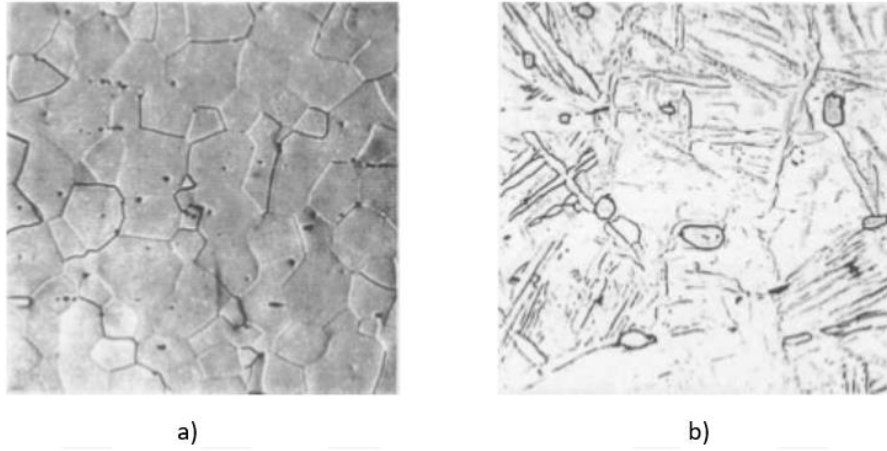
2.5.1. Saf Titanyum

%98,63 - %99,5 oranında titanyum içeren ticari saflıktaki titanyum, korozyon dayanımı ihtiyacı olan yüksek dayanım gerektirmeyen uygulamalarda tercih edilmektedir. Kimyasal yapısında bulundurduğu bazı elementlerin miktarı saf titanyumun mekanik özelliklerine etki etmektedir. Örneğın; oksijen ve karbon miktarının fazla olması malzemenin sünekliğini azaltırken dayanımını artırmaktadır. Saf titanyumun mikroyapısında %100 α fazı bulunmaktadır. Saf titanyuma 650-700°C’de uygulanan tavlama ısıt işleminde sonra mikroyapı içerisinde ince eş eksenli α tanecikleri görülmektedir. Fakat saf titanyum beta transus geçiş sıcaklığına ısıtılırsa; tane büyümesi meydana gelir ve soğumanın etkisiyle kaba tırtıllı α şekillendirilir. Tavlama yöntemi saf titanyumda en çok kullanılan ısıt işlem yöntemidir (Kaya, 2010). Farklı kalitelerdeki saf titanyumun genel özellikleri Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Farklı kalitelerdeki saf titanyumun özellikleri (Kilerci, 2011’den değiştirilerek alınmıştır.)

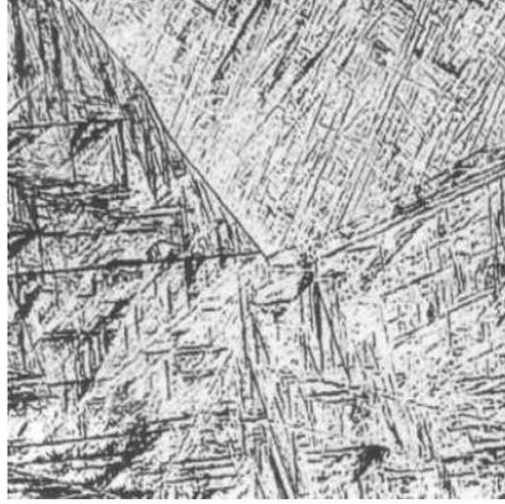
ASTM Standardı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Alaşım Elementleri				
			Alfa	Beta	N	C	H	O	Fe
Grade 1	170	240	888	880	0,03	0,10	0,015	0,18	0,20
Grade 2	280	340	913	885	0,03	0,10	0,015	0,25	0,30
Grade 3	380	450	920	900	0,05	0,10	0,015	0,35	0,30
Grade 4	480	550	950	905	0,05	0,10	0,015	0,40	0,50

Alaşımsız saf titanyumun tavllanmasıyla, eş eksenli ve iğnesel yapıda tanecikler meydana gelmektedir. Beta fazından alfa fazına dönüşüm sırasında uygulanan soğuma işlemi iğnesel yapıda alfa yapılarının oluşumunu sağlamaktadır. İğnesel alfa yapılarının genişliği soğuma hızı arttıkça azalmaktadır. Yeniden kristalleşme tavlaması uygulandığı durumlarda ise eşeksenli alfa yapıları ortaya çıkmaktadır. Ayrıca iğnesel alfa yapının ortaya çıkmasında malzemenin beta transus geçiş sıcaklığına kadar ısıtılması da etki etmektedir (Tanrıöver ve Taşçı). Eşeksenli ve iğnesel iç yapıya sahip görüntüler Şekil 2.2’de verilmiştir.



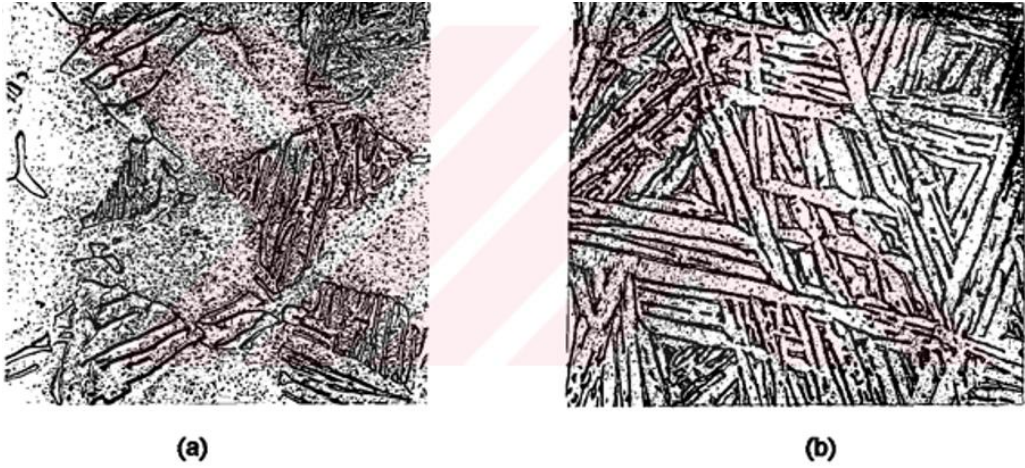
Şekil 2.2. Titanyum ve alaşımlarının eşeksenli (a) ve iğnesel (b) iç yapı görüntüleri (Akyol, 2007)

Beta fazından alfa fazına dönüşüm sırasında saf titanyumun kristal yapısı değişmektedir. Bu dönüşüm sırasında aşırı doymuş ve kararsız olan martenzitik alfa yapısı ortaya çıkmaktadır. Oluşan iğnemsî yapı görüntüsü çelikte oluşan martenzit yapıya benzemektedir. Bu martenzit yapıyı daha eğri olan iğnemsî alfa yapısına benzemektedir. Bu yüzden bu iki yapının ayırt edilmesi zordur. Ancak iğnemsî alfa yapısının kenarları daha yuvarlak iken martenzitik alfa yapısının kenarlarının düz olduğu söylenebilir (Metals Park, 1972). Martenzitik alfa yapısının görüntüsü Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Martenzitik alfa yapısı (Boyer, Welsch ve Collings, 1994)

Saf titanyumun ısıtılma işlem görmesiyle iç yapısında beta fazından dönüşmüş alfa yapılarının yanında, ısıtılma işleminden önce dönüşmeyen alfa yapıları da görülmektedir. Bu alfa yapıları “birincil alfa” olarak adlandırılmaktadır. Sonradan dönüşen bu alfa yapısı iğnemsisi, tırtıllı, widmanstatten veya martenzit yapılar olarakta bilinmektedir (Brooks, 1986). Tek bir düzlem içerisinde ve birden fazla düzlem içerisinde yer alan iğnemsisi alfa yapıları (Widmanstatten alfa) Şekil 2.4’de gösterilmiştir.

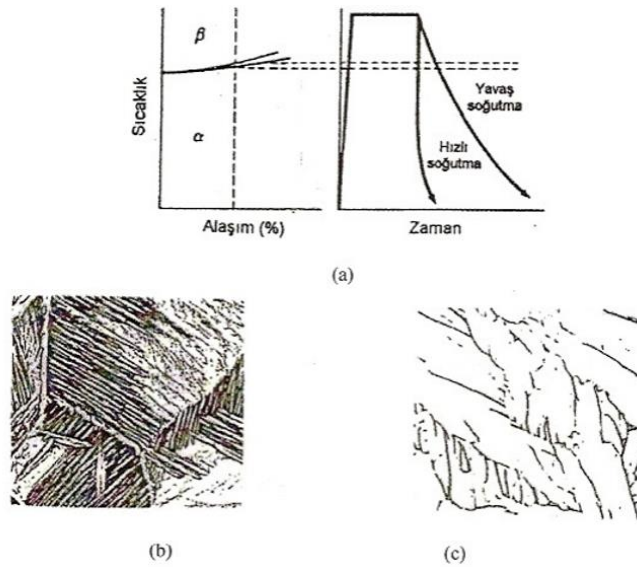


Şekil 2.4. İğnemsisi alfa yapısının tek düzlemdeki (a) ve çoklu düzlemdeki (b) oluşumları (Boyer, Welsch ve Collings, 1994)

2.5.2. Alfa ve alfa'ya yakın alaşımlar

Alfa titanyum alaşımları, kimyasal yapısında genellikle kalay veya zirkonyum içermektedir. Çok yüksek sıcaklık veya çok soğuk ortamlarda kullanılmaktadır. Beta alaşımlarına göre yüksek sıcaklıkta sürünmeye karşı daha dirençlidir. Çok düşük sıcaklıklarda az miktarda arayer atomu içeren alfa alaşımları süneklik ve tokluk özelliklerini kaybetmezler

Kararlı bir yapıya sahip olan alfa alaşımları, $\alpha + \beta$ alaşımları ve β alaşımlarının aksine ısıtılma işlemiyle sertleştirme yapılamamaktadır. Fakat soğutma işleminden sonra kalıntılarda oluşan gerilmelerin giderilmesi için tavlama işlemi veya yeniden kristalleşme tavlama yapılmaktadır. Çok düşük dövülebilme kabiliyetine sahip olan alfa alaşımlarına dövme işlemi uygulandığında yüzey çatlakları görülmektedir. Bu durumu önlemek için alfa alaşımlarına sürekli tavlama işlemi uygulanması ve deformasyon miktarının minimum seçilmesi gerekmektedir (Khan, Kazmi, Farrokh ve Zupan, 2007). Oda sıcaklığında ve 300°C'ye kadar olan sıcaklıklarda yüksek şekillendirilebilme kabiliyetine ve yüksek dayanıma sahip olan alfa alaşımına örnek olarak Ti5Al2.5Sn gösterilebilir (Ezugwu ve Wang, 1997). Alfa titanyum alaşımının tavllanmasıyla, hızlı soğutma sonrası mikroyapısı ve yavaş soğutma sonrası mikroyapısına ait görüntüler Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Alfa titanyum alaşımının tavllanmasıyla (a), hızlı soğutma sonrası mikroyapısı (b) ve yavaş soğutma sonrası mikroyapısına (c) ait görüntüler (Moiseyev, 2006)

Yapısında yüksek kararlılıkta alfa fazına sahip olan alfaya yakın alaşımlarının yapısı sınırlı miktarda beta kararlaştırıcı elementler içermektedir. Molibden ve vanadyum beta kararlaştırıcı elementlerdir. Bu elementler, alfaya yakın alaşımların oda sıcaklığında beta fazı bırakması için alaşıma eklenir. Böylece alüminyum miktarı azalırken dayanımları korunmaktadır (Polmear, 1996). Alfa'ya yakın alaşımlara Ti-8Al-1Mo-1V ve Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.25Si gibi alaşımlar örnek verilebilir. Alfa alaşımlarına benzer özellik gösteren alfa'ya yakın alaşımlar yüksek dayanım ihtiyacı olan uygulamalarda kullanılmaktadır. Sıcaklığın 400-520°C olduğu durumlarda en iyi dayanımı göstermektedir (Ezugwu ve Wang, 1997). Alfaya yakın bazı alaşımlar Çizelge 2.8'de gösterilmiştir.

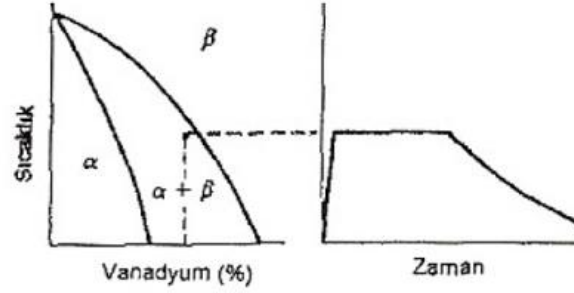
Çizelge 2.8. Alfa ve alfa'ya yakın titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri (Kilerci, 2011'den değiştirilerek alınmıştır.)

Titanyum Alaşımı	Isıl İşlemler	Deney Sıcaklığı (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	% Kesit Daralması	% Uzama
Ti8Al1Mo1V	Çift tavllanmış	315	790	620	38	20
Ti6Al1Mo2Cb1Ta	-	540	690	500	-	19
Ti6Al2Sn4Zr2Mo	-	315	770	585	42	16
		425	700	515	55	21
		540	650	490	60	26
Ti5Al5Sn	975°C yarım saat havada soğutulmuş	315	790	565	-	15
Ti2Zr2Mo0,2Si	600°C 2 saat havada soğutulmuş	425	780	530	-	17

2.5.3. Alfa+Beta alaşımları

Titanyum alaşımları arasında en çok kullanılan alaşımlardır. Bu alaşımlarda, alfa ve beta fazlarının kararlılığını artıran alaşım elementleri bulunmaktadır. Bu alaşım elementleri oda sıcaklığında uygun bir şekilde ayarlanmasıyla alfa ve beta fazlarını içeren bir mikroyapı elde edilir. Alfa beta alaşımlarına uygulanan tavlama ısı işleminden sonra malzemede yüksek dayanım, homojenlik ve yüksek süneklik sağlanır. Bu tavlama işlemi

beta dönüşüm sıcaklığının hemen altında gerçekleşmektedir. Buradaki amaç küçük miktarlarda alfa tanelerinin oluşmasını sağlamak ve beta fazındaki tane büyümesini önlemektir (Askeland, 1994). Alfa/beta titanyum alaşımının sırasıyla tavllanması, yavaş soğutma sonrası eşeksenli mikroyapısı ve hızlı soğutma sonrası iğnemsî mikroyapısına ait görüntüler Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



(a)



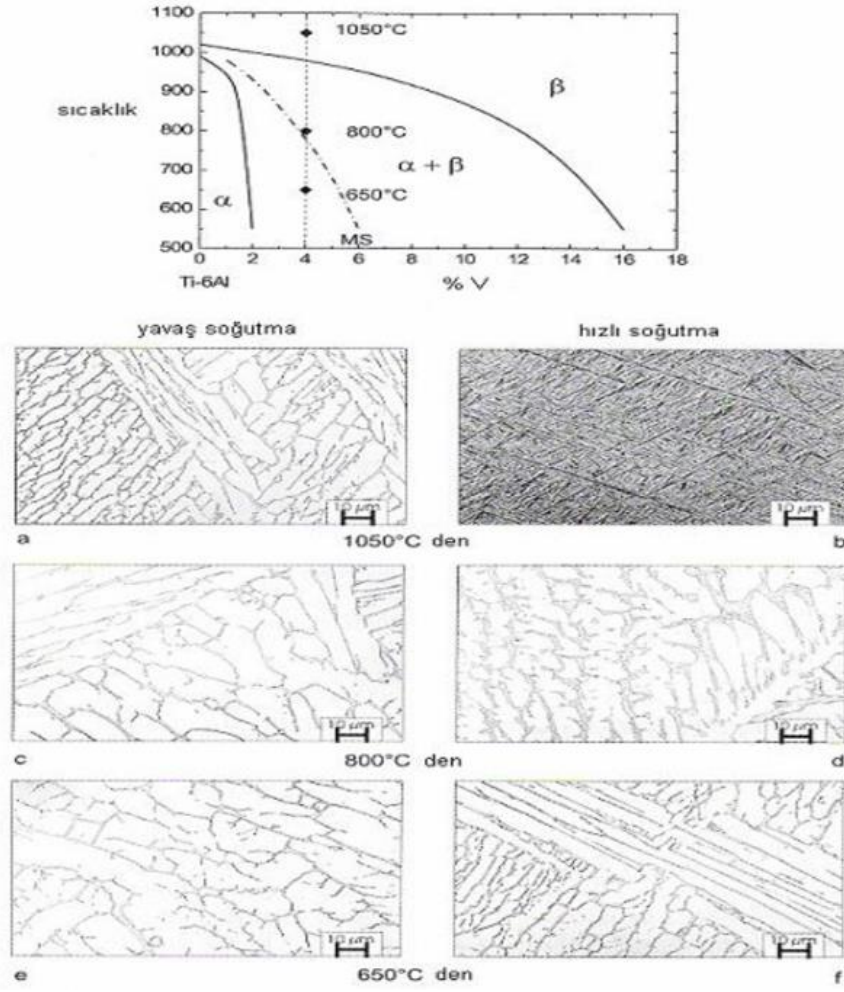
(b)



(c)

Şekil 2.6. Alfa+beta titanyum alaşımının tavllanmasıyla (a), yavaş soğutma sonrası oluşan eşeksenli mikroyapısı (b) ve hızlı soğutma sonrası iğnemsî mikroyapısına (c) ait görüntüler (Metals Park, 1972)

Yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılan, titanyum üretiminin %45’lik kısmından fazlasını oluşturan en önemli alfa/beta alaşımı Ti6Al4V alaşımıdır. Bu alaşımın dayanımını artırmak için öncelikle aşırı doymuş hale getirilmelidir. Daha sonra çözelti içerisinde alma sıcaklığından hızlıca soğutularak; 500°C’de yaşlandırılmaktadır. Böylece mikroyapı içerisindeki aşırı doymuş alfa ve beta yapıları çözünerek düzgün bir şekilde alaşım içerisinde dağılır ve dayanım artışı sağlanmış olur (Askeland, 1994). Ti6Al4V alaşımının farklı sıcaklıklardaki yavaş soğutma ve su verme işlemiyle soğutma sonucunda meydana gelen mikroyapıları Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Ti6Al4V'nin a) 1050°C'den c) 800°C'den e) 600°C'den yavaş soğutma sonucunda, b) 1050°C'den d) 800°C'den f) 600°C'den hızlı soğutma sonucunda meydana gelen mikroyapı görüntüleri (Kilerci, 2011)

2.5.4. Beta Alaşımları

Beta alaşımlarının iç yapısında yüksek miktarda beta fazını kararlı hale getiren alaşım elementleri mevcuttur. Sahip oldukları soğuk şekillendirilebilirlik, dövülebilirlik gibi özelliklerinden dolayı diğer titanyum alaşımlarından ayırt etmek kolaydır. Oda sıcaklığında alfa/beta alaşımlarıyla benzer mukavemet değerlerine sahipken; yüksek sıcaklıklarda daha yüksek mukavemet değerlere çıkabilmektedir (Ezugwu & Wang, 1997).

Kararsız bir yapıya sahip olan beta alaşımlarını sertleştirmek için alfa fazı beta matrisi içerisinde çökeltilir. Yapısında korozyona karşı direnci artıran molibden alaşım elementi mevcuttur. Ayrıca iyi işleme özelliğine, yüksek tokluğa ve ısı işleme yatkınlığıyla ön

plana çıkmaktadır (Black ve Hastings, 1998). En çok ve sürekli kullanılan beta alaşımı $Ti_{13}V_{11}Cr_3Al$ 'dir. Bu alaşımlara, yüksek dayanımlarda kullanılabilmesi için çözündürme ısı işlemi ve yaşlandırma işlemi uygulanır. Böylece yaklaşık 1450 Mpa'lara ulaşarak titanyum alaşımları içerisindeki en yüksek dayanıma sahip olurlar (Türen, 2010).

2.6. Titanyum'un Şekillendirme Kabiliyeti

Titanyum belirli sıcaklıklarda şekillendirilebilme kabiliyeti olan bir malzemedir. Oda sıcaklığında şekil vermesi zor olan titanyumun, şekil verildikten sonra eski haline dönme isteği çok fazladır. Sıcak şekil verme yöntemi kullanıldığında, malzemede oluşan iç gerilmeler giderilebilmekte ve eski haline dönme isteğini azaltmaktadır. Bu sebepten 595-815°C aralığında uygulanan sıcak şekil verme işleminin iyi bir alternatif olduğu belirlenmiştir. Titanyum alaşımları yaklaşık olarak 900-950°C'ye ısıtıldığında süper plastisite özelliğine sahip olmakta ve yaklaşık 10 kat bölgesel olarak kopma noktasına kadar uzamaktadır.

Saf titanyumlar soğuk da şekillendirilebilirler. %2-5 şekil verme oranına sahip olduklarında; 200-350°C aralığında ön ısıtma uygulanır. Eğer ki şekil verme oranı %5'ten büyükse; 300-350°C aralığında ön ısıtma uygulanır. %5 ve üzeri şekil verme oranlarında ise; malzemeye yumuşatma tavlama uygulanır. Şekil verme işleminden önce malzemenin yüzeyinde kir, yağ, oksit kalıntıları gibi kirlerden temizlenmelidir. Yüzeyin metalik ve parlak bir görünüme sahip olması sağlanmalıdır.

Titanyum alaşımları alfa, alfa-beta ve beta alaşımları olarak sınıflandırılmaktadır. Bu alaşım türlerine göre şekil verilebilirlikte farklılık göstermektedir. Örneğin; ön ısıtma ile sıcak şekil verme işlemi alfa ve alfa-beta alaşımları için uygundur. Çünkü bu alaşımlar yüksek elastisiteye sahiptir ve soğuk şekillendirme için uygun değildirler.

Titanyum ve alaşımları şekil verme işleminden sonra ilk hallerine dönme eğilimleri sertliğin artmasıyla artmaktadır. Bu eğilimi azaltmak için şekil vermeden önce işlem göreceğ parçanın et kalınlığına uygun kalıplar tercih edilmeli ve bu parça kalıba tamamiyle oturana kadar bekletilmelidir. Uygulanacak diğer yöntem ise iş parçasının büküleceği açığı büyütmek olacaktır. Bu sayede malzemenin ilk haline dönme eğiliminden dolayı istenen değer aralığında kalması sağlanır. Soğuk bükme işlemi saf

titanyumlarda uygulanabilir. Burada et kalınlığı arttıkça malzemenin göstermiş olduğu tepkinin değiştiği görülecektir. Dayanımları ve sertliği yüksek olan titanyum alaşımlarında sıcak bükme işlemi uygulanabilir (Kıral, 2014).

Sacın büküm yönünde dikkate alınması gerekmektedir. Büküm yönünde, ortaya çıkacak sonuçları etkilediği yapılan çalışmalarla desteklenmiştir. Chen ve Chiu, (2005) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, oda sıcaklığında, 100, 200 ve 300°C’de 0.5 mm kalınlığındaki CP titanyumun, derin çekme işlemindeki mekanik davranışları incelenmiştir. Haddeleme yönüne 0°, 45° ve 90°’deki numunelerde, belirtilen sıcaklıklarda çekme testi gerçekleştirmiştir. Oda sıcaklığında ve haddeleme yönüne 0° ‘de şekillendirilebilirliğin uygun olduğunu belirtmiştir.

2.7. Titanyum Metalinin Üretim Yöntemi

Titanyum cevher olarak çıkarıldıktan sonra 4 ana işlem uygulanarak parça haline getirilmektedir. Öncelikle titanyum cevheri ‘‘sünger metal’’ olarak adlandırılan hale getirilir. Sonrasında bu sünger metal ingot oluşturmak üzere eritilir. Oluşan ingotlar işlenerek yarı mamullere dönüştürölür ve son olarak yarı mamüller talaşlı ve talaşsız imalat yöntemleri ile şekillendirilerek parça üretimi gerçekleştirilmiş olur. Bu işlemler yapılırken titanyumun mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen durumlar mevcuttur. Malzeme içindeki alaşım elementleri, ısıl işlem parametreleri ve şekil verme işlemleri titanyumu etkileyen en önemli parametrelerdir (American Society for Metals, 1980).

Titanyum metalı, %93’ü ilmenit mineralinden, kalan kısım ise rutil mineralinden oluşmaktadır. Bu minerallerin prosesiyle, zengin titanyum içeriğine sahip sentetik rutil eldesi ve bu sentetik rutillerin proses edilmesiyle metal ve pigment elde edilir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2023). Titanyum metalinin üretim yöntemleri kroll yöntemi, hunter yöntemi, van arkel yöntemi ve elektroliz yöntemi olarak sıralanabilir.

2.7.1. Kroll yöntemi

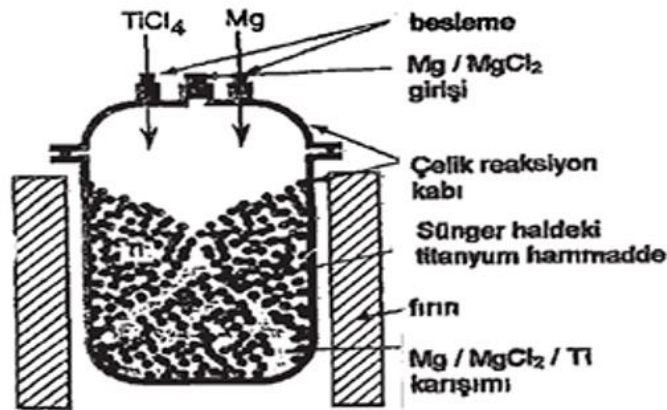
Titanyum metalinin üretilmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemin ana minerali rutildir ve 4 aşamada gerçekleşir; sırasıyla rutilin kok tozuyla karıştırılmasıyla, rutil bir bağlayıcıyla peletlenmektedir. Peletler yaklaşık olarak 150°C’de kurutulduktan sonra bir akışkan yatağa konularak önceden 800-900°C’ye kadar

ısıtılmış olan klor gazı ile klorlama işlemine tutulmaktadır. Bu işleme ‘‘klornasyon’’ adı verilmektedir. Bu işlem klor gazının akış hızına bağlı olarak yaklaşık 3-5 saat sürer. Yapılan bu işlemin sonucunda karbondioksit ve titanyum tetraklorür (TiCl₄) gazı elde edilir.

Elde edilen gaz toz tutucuların etkisiyle soğutularak TiCl₄ saf hale getirilir. Bu işlemin sonucunda ortaya ekzotermik bir tepkime çıkar. Tepkimede ‘‘sünger metal’’ ismiyle titanyum ve sıvı halde MgCl₂ oluşmaktadır. Titanyumun yoğunluğu sıvı haldeki MgCl₂’den düşük olduğundan MgCl₂ yüzeyinde yüzer. Yapılan soğutulma işlemi ile ortaya çıkan ürünler katılaşmaktadır. Titanyumun etrafında kalın bir tabaka oluşturan MgCl₂’nin belli bir kısmı kırılarak, titanyum MgCl₂’den ayrılır. Oluşan tepkime aşağıdaki gibidir:



Bu işlemde MgCl₂’nin sıvı halde kalmasını sağlamak amacıyla reaksiyon hızını artırmak için 800-900°C arasında çalışılmaktadır. Ortamdaki reaksiyonda maddeler birbiri içerisinde çözünmemektedir. Titanyumun reaksiyon tamamlandıktan sonra tepkime içerisinde yer alan Mg ve MgCl₂’den ayrılması gerekir. Öncelikle MgCl₂ ergitme yöntemiyle ayrılır. Sonrasında Mg’nin ayrılması için 1200°C’de vakum altında destilasyon işlemi yapılır (Gazquez, Bolivar, Tenorio ve Vaca, 2014). Kroll yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Kroll işleminin şematik görünümü (Okabe ve Waseda, 1997)

2.7.2. Hunter yöntemi

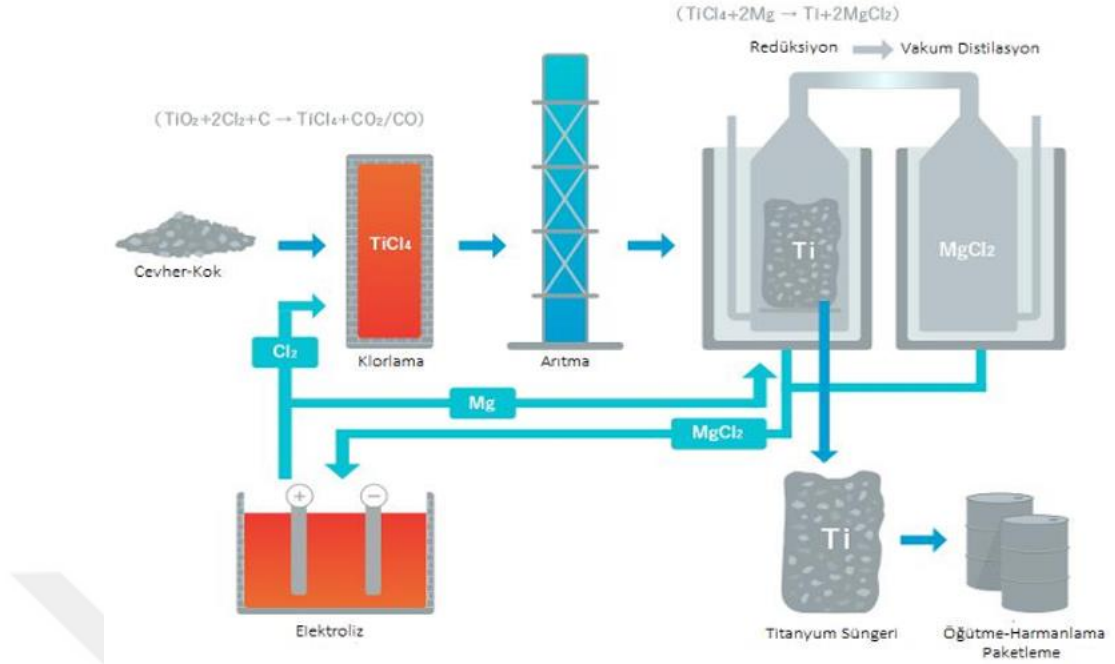
Temel olarak Kroll yöntemine benzemektedir. İndükleyici madde olarak Na kullanılmaktadır. Na metali ile $TiCl_4$ 'ün reaksiyonu Mg'ye göre daha ekzotermiktir. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken durum tepkimenin 810-880°C sıcaklıkları arasında gerçekleşmesidir. Çünkü Na metali 880°C'de kaynamaya başlarken NaCl'de 810°C'de ergimektedir. Sıcaklık aralığının sınır olması sebebiyle bu tepkime iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada $TiCl_2$ 2NaCl sıvısı 250°C'de sürekli elde edilir. İkinci adımda 900°C'de stokiometrik oranda Na tepkimeye katılır ve metalik görünümlü sünger halinde titanyum oluşur. Son olarak sünger metal kırılarak; yıkanır ve kurutulma işlemi gerçekleştirilir. Kroll yöntemine göre avantajı saf kristalin titanyumun elde edilmesidir (Zhou, Sohn, Whiting ve Leary, 1993).

2.7.3. Van Arkel yöntemi

Bu yöntem metal bileşiklerin termal olarak bozunma ilkesine dayanmaktadır. Titanyum iyodürün sıcak bir metalin üzerinden geçirelerek saf titanyumun elde edilmesi sağlanır. Ham titanyum havası boşaltılmış cam bir düzenek içerisinde stokiometrik oranda iyot ile ısıtılır. Oluşan titanyum iyodür gazı sıcak bir metal filemente temas ederek bozunur ve titanyum metali ortaya çıkar (Zhou, Sohn, Whiting ve Leary, 1993).

2.7.4. Elektroliz yöntemi

Bu üretim teknolojisinin temeli Kroll prosesine dayanmaktadır. Öncelikle Kroll yöntemine göre $TiCl_4$ elde edilir. $TiCl_4$ kovalent bağlı olduğundan dolayı direkt elektroliz edilemez. Eğer ki ortamda ergimiş klorürler mevcut ise; sınırlı bir şekilde çözünür ve elektroliz işlemi uygulanabilir. Bu prosesin en büyük avantajı daha az enerji kullanarak yüksek kalitede titanyumun üretilmesidir. Bu yöntem işlem basamakları Şekil 2.9'da gösterilmiştir (Yücel, 2018).



Şekil 2.9. Titanyum metali üretim prosesi (Yücel, 2018)

2.8. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Titanyum ve alaşımları; endüstriyel, kimyasal, uzay ve denizcilik ile ilgili uygulamalarda geniş bir üstünlüğe sahiptir. Sahip olduğu yüksek dayanım, düşük yoğunluk, düşük özgül ağırlığı, korozyona karşı direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı sayesinde kullanımı uçak, uzay ve denizcilik alanlarında yaygınlaşmasına neden olmuştur. Son yıllarda titanyum ve alaşımları, dental uygulamalarda ciddi oranlarda kullanılmaya başlanmıştır (Lauer ve diğerleri, 2001).

Titanyum ve alaşımları kullanılacağı uygulama alanlarına göre farklılık göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımı gerektiren durumlarda, titanyumun α alaşımları ve süper alfa alaşımları tercih edilirken korozyon dayanımı gerektiren durumlarda saf titanyum tercih edilmektedir. Çok yüksek şekillendirilebilme kabiliyeti ve yüksek tokluk istenildiği durumlarda çoğunlukla her alanda kullanılan titanyumun $\alpha + \beta$ alaşımları tercih edilmektedir. Çok yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda ise titanyumun ısıtıl işlem uygulanmış beta alaşımları kullanılmaktadır (İşler, 1999). Bazı titanyum ve alaşımlarının kullanım alanları Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.9. Titanyum ve alaşımlarının kullanım alanları (Subaşı ve Karataş, 2012)

Kullanıldığı alan	Titanyum alaşımı
Gaz türbin motoru	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo Ti-4Al-4Mo-2Sn-0,5Si
Jeotermal borular	Ti-6,8Mo-4.5Fe-1,5Al
Medikal uygulamalar	Vanadyumsuz ve Ti-6Al-4V eşdeğer alaşımlar
Uçak gövdesi	Ti-10V-2Fe-3Al Ti-15Mo-2,8Al-3Nb-0,2Si
Spor malzemeleri (hafif ve yüksek dayanımlı)	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al
Balistik zırh	Ti-6Al-1,8Fe-0,2Si

2.8.1. Titanyum ve alaşımlarının havacılıkta kullanımı

Titanyum sahip olduğu 1660°C’deki yüksek ergime sıcaklığından dolayı, ilk defa yüksek sıcaklıklarda çalışan modern motorların imalatında kullanılmıştır. Titanyum üretiminin %45’lik kısmı modern motor imalatında kullanılmaktadır. Ek olarak Amerika Hava Kuvvetleri hızlı soğuma teknolojisiyle az yoğunluğa sahip yüksek sıcaklıklara dayanıklı titanyum üretimini planlamaktadır (Gazquez, Bolivar, Tenorio ve Vaca, 2014).

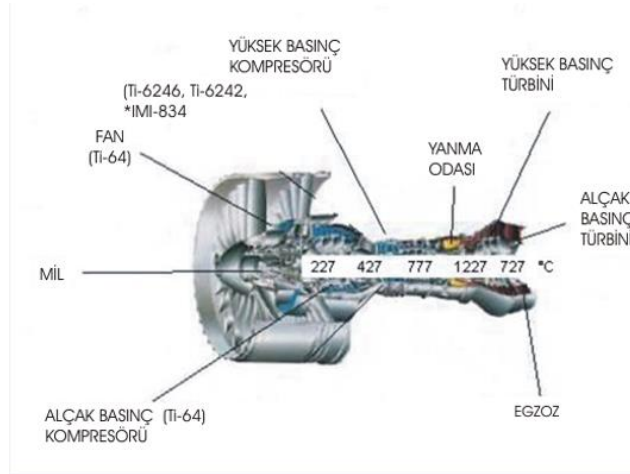
Titanyum ve alaşımları ilk olarak uçak ve uzay sanayisinde kullanılmaya başlanmıştır. Sonrasında sahip olduğu üstün özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılmaya devam etmektedir. Havacılık sektöründe ihtiyaç duyulan korozyon direnci, yüksek sıcaklığa dayanım, hafif ve yüksek mukavemet gibi özelliklerinden dolayı titanyum tercih edilmektedir (Leyens ve Peter, 2003).

Ticari uçakların gövde yapısında ortalama olarak %5-9 arasında titanyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Fakat çalışma sıcaklığının yüksek önem gerektirdiği uçak motorlarında ise titanyum ve alaşımlarının kullanımı ortalama %33-38 seviyesindedir. Uçak motorlarının genelinde hacimsel olarak bakıldığında titanyum alaşımlarının kullanıldığı görülmektedir. Havacılık sanayisinde, mekanik özellikler ne kadar önemliyse kullanılan parçaların ömürleride bir o kadar önemlidir. Titanyum alaşımlarının sahip olduğu yüksek yorulma dayanımı parçalara uzun kullanım ömrü sağlamaktadır. Böylece uçak gövdelerinde yorulma çatlağı oluşumu engellenmiş olur (Leyens ve Peter, 2003). Titanyum ve alaşımlarının ilk uygulaması, ilk uçuşunu 1952 yılında yapan DC-7 tipindeki uçağın motor yanma odasında ve uçağın kanatlarındaki motor bağlantı yerlerinde

yapılmıştır. Zaman geçtikçe geliştirilen titanyum ve alaşımları; askeri veya ticari uçaklarda kullanılan jet motorlarının pervane kanatları ile bu uçakların gövdelerinde kullanılmıştır (ASM International, 1990). İlk titanyum ve alaşımının uygulamasının yapıldığı DC-7 tipindeki uçağın görseli ve ticari uçaklarda kullanılan bir uçak motoru görseli sırasıyla Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Atatürk havalimanı çelik hangarda bakım yapılan DC-7 uçağı (Anonim 2023a, 2021)



Şekil 2.11. Bir uçak motorunda titanyum kullanımı (Erdem ve Aydın, 2006)

2.8.2. Titanyum ve alaşımlarının otomotivde kullanımı

Emisyon miktarının azaltılması ve yakıt tasarrufu sağlayan taleplerin artmasıyla; araç performansının artırılması ve aracın hafifletilmesi yönünde çalışmalar yapılmıştır.

Titanyum, sahip olduğu yüksek korozyon direnci, yüksek dayanım ve düşük yoğunluk gibi özelliklerinden dolayı otomotiv alanında tercih edilmeye başlanmıştır. Ancak titanyumun maliyetli olmasından dolayı, otomotiv sektöründeki kullanımını sınırlandırmıştır. Bu sebepten çoğunlukla otomobil yarış araçları ve Formula 1 araçları gibi maksimum performans ve yüksek dayanıklılık gerektiren araçlarda kullanılmaktadır (Fuji, Takahashi ve Yamashita, 2003). Otomotiv sektöründe titanyum kullanımı Çizelge 2.10’da gösterilmektedir.

Çizelge 2.10. Titanyum’un otomotiv sektöründe kullanımı (Leyens ve Peter, 2003’den değiştirilerek alınmıştır.)

Yıl	Kullanılan parça	Malzeme	Üretici	Model	Yıllık tüketim
1998	Fren kılavuz pimleri	Grade 2	Mercedes Benz	S-Sınıfı	8 ton/yıl
1998	Salmastra rondelası	Grade 1	Volkswagen	Tümü	40 ton/yıl
1998	Vites kolu	Grade 1	Honda	S2000 Roadster	Bilinmiyor
1999	Biyel kolu	Ti-6Al-4V	Porsche	GT3	1 ton/yıl
2000	Valf kapakları	Beta titanyum alaşımları	Mitsubishi	Tümü	Bilinmiyor
2001	Egzoz sistemi	Grade 2	General Motors	Corvette Z06	>150 ton/yıl

2.8.3. Titanyum ve alaşımlarının medikalde kullanımı

Titanyum ve alaşımları implant ve protez üretiminde kullanılmaktadır. Son yıllarda araştırmacılar insan vücudunda kullanılan metaller arasında titanyum ve alaşımlarını sahip oldukları üstün özelliklerinden dolayı tercih etmektedirler. Titanyum ve alaşımlarının medikal alanda kullanımlarını sağlayan faktörler aşağıdaki gibidir:

- Vücutta deri içine yerleştirmede üstün biyouyumluluk
- Düşük olumsuz reaksiyon verme olasılığı
- Çoğu metale göre düşük yoğunluk
- Az alerjik olması
- Küçük boyutlu üretilbilme
- Yüksek korozyon dayanımı

- Elastik modulünün kemiğe yakın olması gibi faktörler medikal sektörde kullanım için avantaj sağlamaktadır (Zümrüt, 2009).

Kemiğin içinde kullanılan implantlar saf veya alaşımlı titanyum alaşımlarından üretilmektedir. İmplant yüzeylerinde kullanılan titanyum alaşımlarının yüzeyinde bir oksit tabakası oluşmaktadır. Oluşan bu tabaka insan vücudundaki proteinin, sert ve yumuşak dokunun metal yüzeyine çok iyi yapışmasını sağlamaktadır. Bu durum canlı dokuların ve implantın fonksiyonel ve statik birleşmesi osseointegrasyon olarak adlandırılmıştır (Sıcakyüz, 2007). Medikalde implant olarak kullanımı Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Medikalde implant kullanımı (Anonim 2023b, 2017)

2.8.4. Titanyum ve alaşımlarının diğer alanlarda kullanımı

Titanyum, alüminyum elementinin üçte biri, paslanmaz çeliğin ise yarısı kadar bir ısı genleşme katsayısına sahiptir. Bu durum; yapı inşasında fazla cam ya da beton kullanılan binalarda titanyum kullanımı ön plandadır. Titanyumun düşük ısı genleşme katsayısına sahip olmasından dolayı hareket eden çatılar gibi titanyum yapılarında, gece-gündüz ısı farkının sebep olduğu gerilim minimuma çekilebilmektedir (Lütjering ve Williams, 2007). Japonya’da bulunan ve saf titanyumdan üretilmiş hareketli çatıya sahip Fukuoka Dome beyzbol stadı Şekil 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Fukuoka Dome beyzbol stadı (Lütjering ve Williams, 2007)

Titanyum alaşımları yüksek performanslı malzemelerdir. Titanyum ve titanyum alaşımlarının kullanıldığı başlıca diğer alanlar; golf, tenis, bisiklet, su altı sporları, dağcılık, trekking ve kış sporlarıdır. Örneğin; golfün amacı topu mümkün olduğunca uzağa atmaktır. Bu durumu sağlayabilmek için golf sopasının ucu burada büyük önem taşımaktadır. Geçmiş yıllarda golf sopasının uçları ağaç kullanılarak üretilirken; sonraki yıllarda çelik kullanılarak üretilmiştir. 1990'ların ortalarına gelindiğinde golf sopalarının ucu ilk kez titanyumdan üretilerek piyasaya sürülmüştür. Bu sayede golf sopasının hafifletilmesi sağlanmıştır. Bu tarz üretimlerde genellikle Ti6Al4V gibi $\alpha+\beta$ alaşımları kullanılmaktadır (Lütjering ve Williams, 2007).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, sac kalınlığı 1 mm olan saf titanyumun (CP-Ti) Gr 2 kalitesindeki malzeme kullanılmıştır. Kullanılan bu malzemenin kimyasal bileşimi (kütle oranı, %) ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 3.1 ve 3.2’de verilmiştir. Numunelerin hazırlanması için 400x500 mm boyutlarında haddeleme yönü boyunca düz sac levhalar kullanılmıştır. Şekil verme işleminden önce RT, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C ve 1000°C sıcaklıklara ısıtılacak olan sac levhalardan 16 adet kesilmiştir. Daha sonra herbir sıcaklık için haddeleme yönünde ve haddeleme yönüne dik numuneler hazırlanmıştır.

Çizelge 3.1. Saf titanyumun (CP-Ti) kimyasal bileşeni (kütle, %) (Anonim 2023c)

Malzeme	C	Fe	H	N	O	Ti
CP2	0,1	0,3	0,015	0,03	0,25	99,3

Çizelge 3.2. Saf titanyumun (CP-Ti) fiziksel özellikleri (Anonim 2023c)

Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Vicker’s Sertliği (HV)
CP2	344	275-410	105	145

3.2. Numunelerin Hazırlanması

Birinci aşamada numuneler ısıtılıp şekillendirildikten sonra ikinci aşamada şekillendirilmiş sac levhalar üzerinden çekme testi, sertlik testi ve mikroyapı incelemeleri için numuneler alınmıştır.

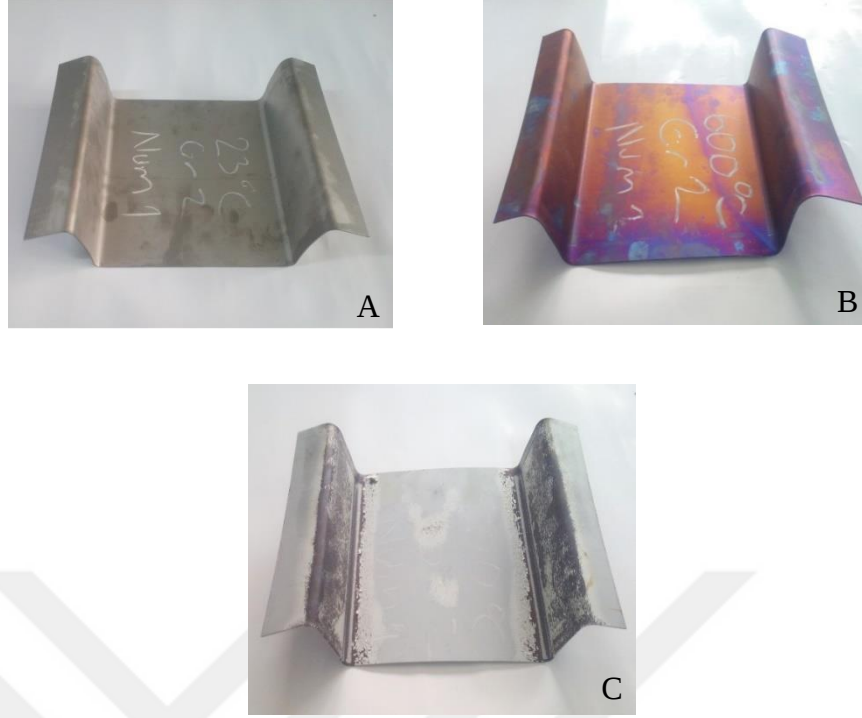
Saf titanyumun (CP-Ti) Gr 2 kalitesindeki sac levhalar Şekil 3.1’de gösterilen geleneksel bir fırında 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C ve 1000°C sıcaklıklarda ısıtılmıştır. Herbir sıcaklıkta 10 dakika bekletilmiştir. Şekillendirilecek iki adet sac levha oda sıcaklığında şekillendirileceği için herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmamıştır. Oda sıcaklığında olan ve ısıtılan sac levhalar Şekil 3.2’de gösterilen U-profil kalıbına sahip olan 200 tonluk Hidro-Metal marka hidrolik pres makinasına aktararak şekillendirilmiştir. U-kalıpta şekillendirilmiş sac levhaların bazı sıcaklıklardaki görüntüleri Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Geleneksel ısıt işlem fırını

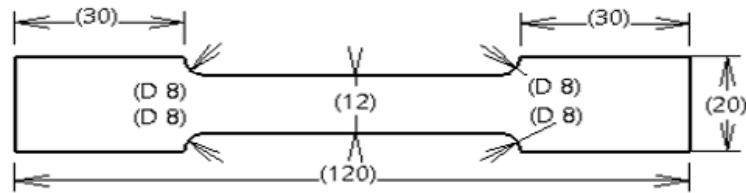


Şekil 3.2. U-profil kalıbına sahip hidrolik pres makinası

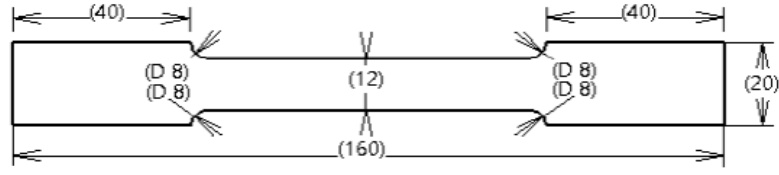


Şekil 3.3. U-kalıpta şekillendirilmiş sac levhaların bazı sıcaklıklardaki görüntüleri
A) Oda sıcaklığı **B)** 600°C **C)** 1000°C

U-kalıpta şekillendirilmiş sac levhalar üzerinden hadde yönünde ve hadde yönüne dik numuneler alınmıştır. Farklı sıcaklıklarda şekillendirilmiş her sac levhanın alt tabanından testlerde kullanılmak üzere minimum 4 adet numune lazer kesim yöntemiyle kesilmiştir. ASTM E8 standartlarına göre elde edilen numunelerin boyutları Şekil 3.4 ve 3.5’de belirtilmiştir. Ayrıca 400°C’de haddeleme yönüne dik numunelerin alındığı çalışmanın bir görselide Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Haddeleme yönünde alınan numune

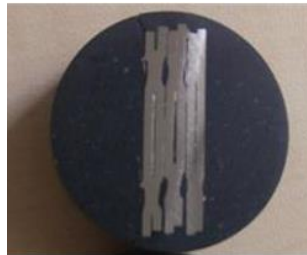


Şekil 3.5. Haddeme yönüne dik alınan numune



Şekil 3.6. 400°C’de haddeme yönüne dik numunelerin alındığı çalışmanın bir görseli

Elde edilen numuneler, çekme testinden sonra; sertlik ölçümü ve mikroyapıda kullanılmak üzere bazı kesme ve metalografik işlemlerden geçirilmiştir. Öncelikle aşındırıcı su jeti kullanılarak, numunelerin uç kısımlarından 2x20 mm boyutunda küçük parçalar kesilmiştir. Elde edilen bu parçalardan 5-6 adet birleştirilerek Metkon Metapress-M marka numune gömme cihazında sıcak bakalite alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Herbir sıcaklık için haddeme yönünde ve haddeme yönüne dik olacak şekilde toplamda 16 adet numune hazırlanmıştır. Sıcak bakalite gömülmüş yüzeyi parlatılmış numune görseli Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Sıcak bakalite gömülmüş yüzeyi parlatılmış numune

Sertlik ölçümlerinden ve mikroyapı incelemelerinden önce sıcak bakalite alınmış numunelere metalografik işlemler uygulanmıştır. Bu işlemlerin amacı kesilen parçalarda talaş veya kesmeden kaynaklı deforme olmuş yüzeyleri yok etmektir. Bunun için sıcak bakalite alınmış numunelere, Metkon - Forcipol 2V marka parlatma cihazında öncelikle yüzeyde oluşan talaşlar için zımparalama işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için her bir numuneye sırasıyla 180, 400, 600, 1200 ve 2000 grite kadar kum zımparalar kullanılmıştır. Daha sonra zımparadan kaynaklı yüzeyde oluşan çizikleri yok etmek için parlatma işlemi uygulanmıştır. 1 mikron elmas solüsyonu uygulanarak yapılan mekanik parlatma işlemi sayesinde ayna gibi bir görünüm elde edilmiştir. Bu işlemler her bir numune için 250 dev/dk hızda 3 dk boyunca uygulanmıştır. Son olarak parlatılmış yüzeyler, 2 ml HF, 8 ml HNO₃ ve 90 ml H₂O karışımından oluşan bir reaktif kullanılarak 15 sn boyunca dağlanmıştır. Uygulanan metalografik işlemlerden sonra numunelerin mikro yapıları Nikon Eclipse MA100 marka optik mikroskopta incelenmiştir. Bu incelemelerde 200µm, 100µm, 50µm ve 20µm'lik mikroyapı fotoğrafları elde edilmiştir.

3.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi İçin Uygulanan Testler

Numune hazırlama işlemlerinden sonra mekanik özelliklerin belirlenmesi için sırasıyla tüm numunelere çekme testleri ve sertlik ölçümleri uygulanmıştır. Farklı sıcaklıkta şekillendirilebilirliğin, saf titanyumun (CP-Ti) Gr 2 kalitesindeki malzemeye etkisi yorumlanmıştır.

3.3.1. Çekme testi

Çekme testleri, Şekil 3.8'de gösterilen Utest Universal marka çekme test cihazında 10 mm/dk sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Her bir sıcaklık için hazırlanan çekme testi numunelerinden 4'er adet kullanılmıştır. Daha sonrasında ortaya çıkan maksimum çekme dayanımlarının ortalaması alınarak; ortalamaya en yakın numunedeki gerilme ve uzama değerleri testin sonucu olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.8. Utest Universal marka çekme deneyinin yapıldığı cihaz

3.3.2. Sertlik testi

Çekme testinden sonra, herbir sıcaklıkta hazırlanan sıcak bakalite gömülmüş numunelerin Vickers sertlik ölçümleri Şekil 3.9’da gösterilen Metkon Duroline-M marka sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçüm cihazında, numunelere 500 gr darbe yükü ve 10 sn bekleme süresi boyunca belirli aralıklarla 5 adet darbe uygulanmıştır. Uygulanan darbeler ile ortaya çıkan sertlik değerlerinin ortalaması testin sonucu kabul edilmiştir.



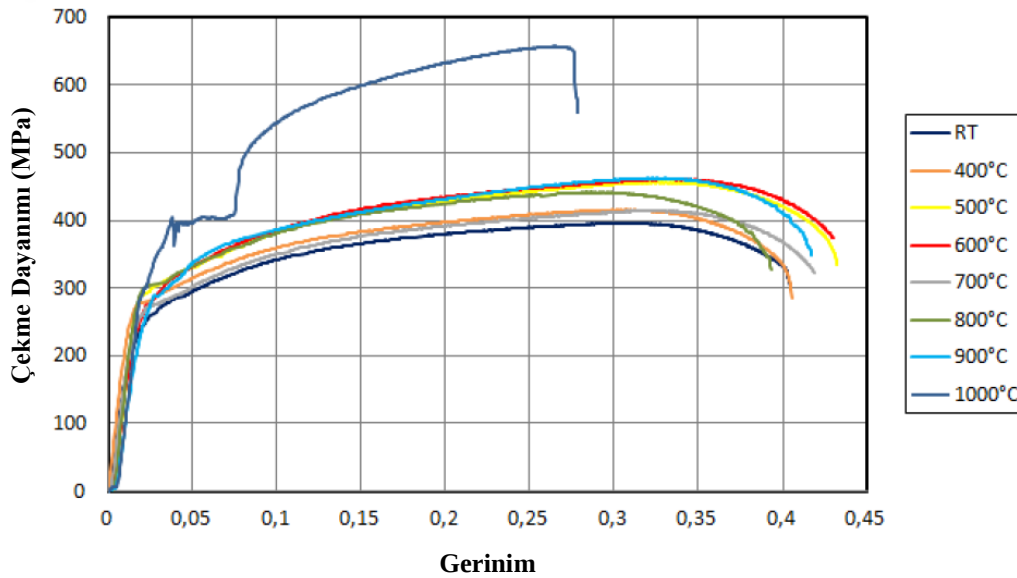
Şekil 3.9. Metkon Duroline-M marka sertlik ölçümünün yapıldığı cihaz

4. BULGULAR

4.1. Çekme Deneyi Sonuçlarının İncelenmesi

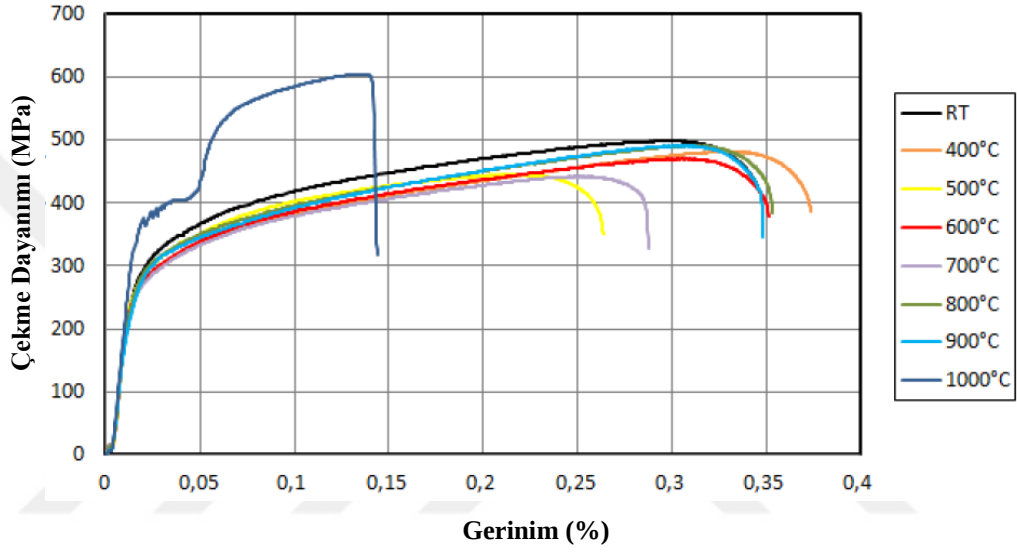
Oda sıcaklığında (RT), 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C ve 1000°C'de sıcak şekillendirilmiş CP2 U-profillerin alt tabanından, haddeleme yönüne dik ve hadde yönünde alınan numuneler oda sıcaklığında çekme testine tabi tutulmuştur. Genel olarak haddeleme yönüne dik ve hadde yönündeki CP2 numunelerin mukavemet ve gerinimlerinin yüksek sıcaklıktan etkilendiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4.1'de gösterilen haddeleme yönündeki CP2 numunelerinin çekme dayanımları, 600°C'ye kadar artmıştır. 700°C'de mukavemetin bir miktar azaldığı gözlemlenmiştir. 800°C sıcaklıkta mukavemetin artmasıyla malzemenin uzama miktarı azalmıştır. 900°C sıcaklıkta ise malzemenin uzama miktarı tekrar artış göstermiştir. 1000°C sıcaklıkta, malzemenin dayanımı yüzde 50 artmış ve uzama miktarı bariz bir şekilde azalmıştır. Sıcaklık-sertlik grafiği incelendiğinde (bkz. Şekil 4.3); 1000°C sıcaklıkta sertliğin maksimum seviyede olduğu görülmektedir. Bu durum malzemenin bu sıcaklıkta gevreklik gösterdiğini doğrulamaktadır.



Şekil 4.1. Haddeleme yönündeki çekme dayanımı grafiği

Şekil 4.2’de gösterilen haddeleme yönüne dik CP2 numunelerinde 400°C’ye kadar mukavemette bariz bir değişiklik olmamıştır. 500°C sıcaklıkta mukavemetin ve gerinimin bir miktar düştüğü görülmektedir. 600°C sıcaklıkta mukavemetin ve gerinimin arttığı, 700°C sıcaklıkta tekrar düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durumda 500°C ve 700°C’de deformasyon miktarının azaldığı görülmektedir. 700°C’den 900°C’ye artan şekillendirme sıcaklığında mukavemetin ve gerinimin arttığı gözlenmiştir. 1000°C’de mukavemet yaklaşık %20 artmıştır. Bu sıcaklıkta deformasyon miktarı bariz bir şekilde azalmıştır.

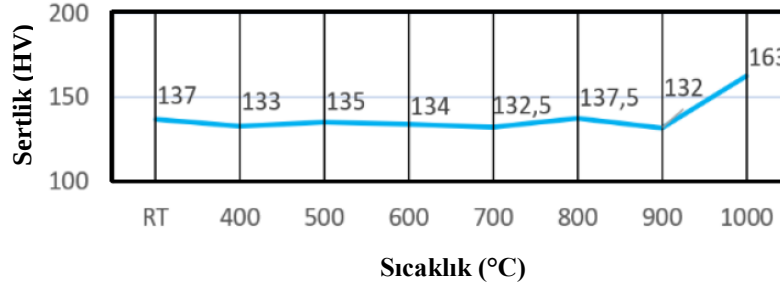


Şekil 4.2. Haddeleme yönüne dik çekme dayanımı grafiği

4.2. Sertlik Ölçümlerinin İncelenmesi

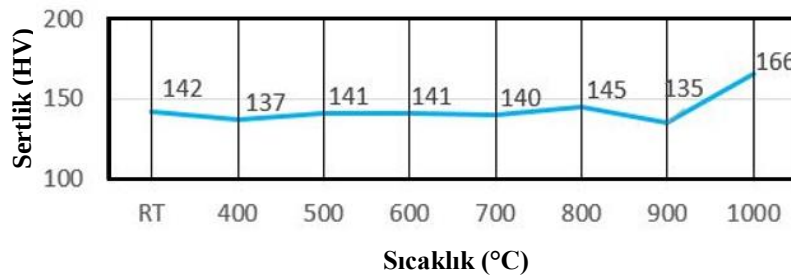
Şekil 4.3’deki sıcaklık-sertlik grafiği incelendiğinde; oda sıcaklığında (RT), 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C ve 1000°C’de sıcak şekillendirilmiş haddeleme yönündeki CP2 numunesinin, oda sıcaklığından 700°C’ye kadar mikrosertliğinde bariz bir değişiklik olmamıştır. 800°C sıcaklıkta sertliğin bir miktar arttığı gözlenmiştir. Sertliğin artmasıyla; 800°C’de sünekliğin bir miktar azalması, bu sıcaklıktaki haddeleme yönündeki çekme dayanımı grafiğiyle (bkz. Şekil 4.1) doğrulanmıştır. 900°C’de sertliğin net bir şekilde düşmesiyle, sünekliğin arttığı görülmüştür. Haddeleme yönündeki çekme dayanımı grafiği incelendiğinde (bkz. Şekil 4.1), 900°C’de eğrinin altında kalan alanın artması; sertliğin azalmasıyla, bu bölgedeki süneklik artışını desteklemiştir. 1000°C’de sertlik %20 artış göstermiştir. 1000°C sıcaklıkta uzama miktarının ve deformasyon

miktarının azalması; sertlik artışıyla gevrekliğin oluştuğunu doğrulamıştır. Bu durum haddeleme yönündeki CP2 numunelerinde pekleşme olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.3. Haddeleme yönündeki sıcaklık-sertlik grafiği

Haddeleme yönüne dik CP2 numunesinin mikrosertlik değişimi Şekil 4.4’de gösterilmiştir. Oda sıcaklığından 800°C’ye kadar CP2 numunelerin mikrosertlik değerlerinde çok fazla değişiklik olmamıştır. 900°C’de sertliğin düştüğü ve malzemenin sünekliğinin bir miktar arttığı gözlenmiştir. Haddeleme yönüne dik çekme dayanımı grafiği (bkz. Şekil 4.2) 900°C sıcaklıkta, süneklik artışını doğrular niteliktedir. 900°C’den 1000°C’ye kadar artan sıcaklık değişiminde haddeleme yönüne dik CP2 numunesinin sertliği %20 artış göstermiştir. 1000°C sıcaklıkta haddeleme yönüne dik çekme dayanımı grafiğinin (bkz. Şekil 4.2) altında kalan alanın net bir şekilde azaldığı, malzemenin tokluğunun düşüp gevrekliğinin arttığı, bu sıcaklıktaki sertlik artışını doğrulamıştır.

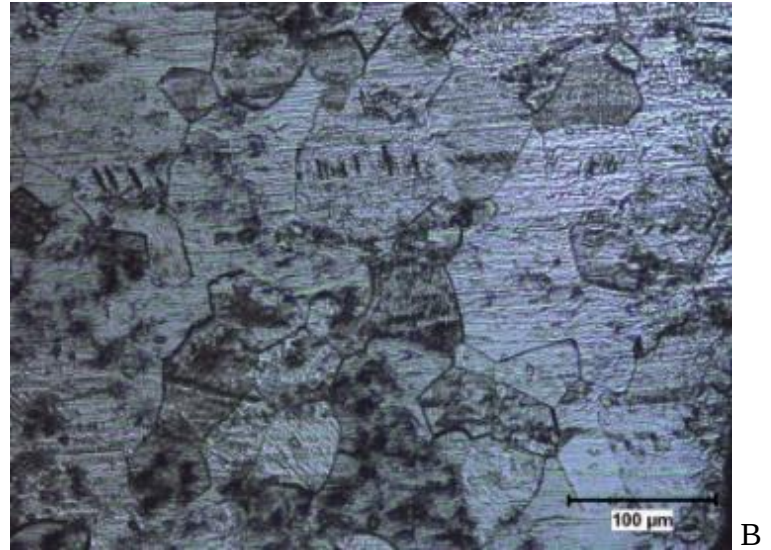
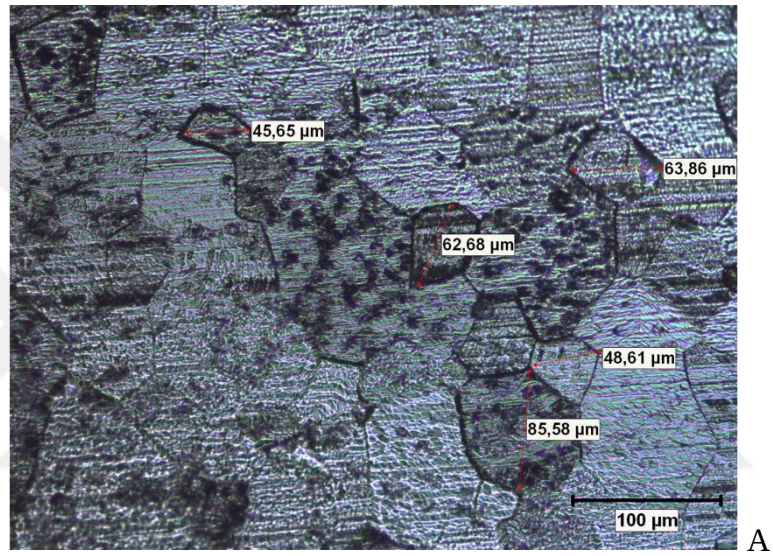


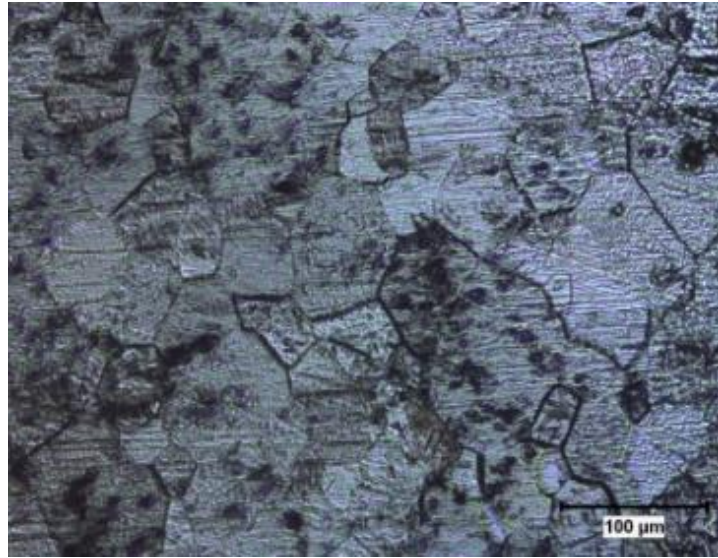
Şekil 4.4. Haddeleme yönüne dik sıcaklık-sertlik grafiği

4.3. Mikroyapıların İncelenmesi

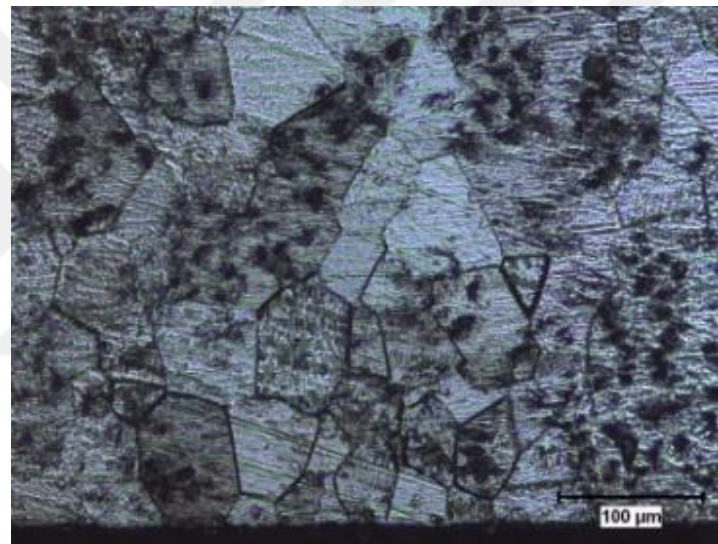
Farklı sıcaklıklarda sıcak şekillendirilmiş, CP2 numunelerinin haddeleme yönündeki mikroyapıları Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Malzemelerin sıcaklık arttıkça tane sınırları ve tane dizilimleri değişmektedir. Alfa fazı tanelerinin beyaz renkte, tane sınırlarında damar

halinde olan beta fazının ise siyah renkte olduğu görülmektedir. Haddeme yönündeki CP2 numunelerinin mikroyapısı 900°C'ye kadar eş eksenli tanelerden oluşmaktadır. Oda sıcaklığında eş eksenli alfa tanelerinin 40-100 µm boyutunda olduğu görülmüştür. 900°C'de alfa tanelerin boyutunda gözle görülür artış gerçekleşmiştir. Haddeme yönündeki sıcaklık-sertlik grafiğinde (bkz. Şekil 4.3), 900°C'de sertliğin düşmesi ve süneklik artışı, bu sıcaklıktaki mikroyapı değişimlerini doğrulamaktadır. 1000°C'de alfa tanelerinin bir kısmı beta tanelerine dönüşürken, boyutları 300 µm'ye varan daha sert ve dayanımı yüksek iğnemsli alfa yapıları da ortaya çıkmıştır.

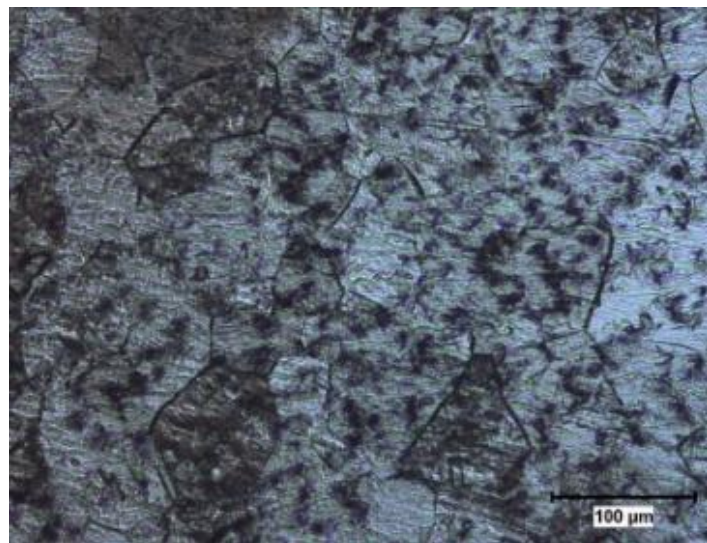




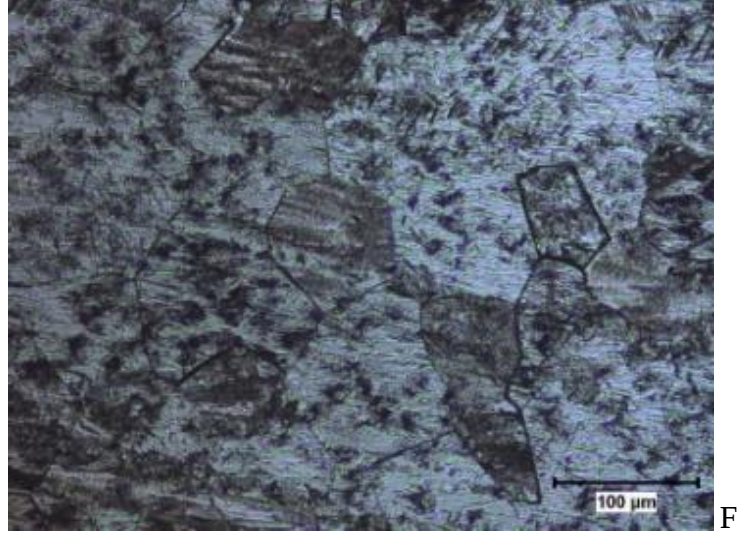
C



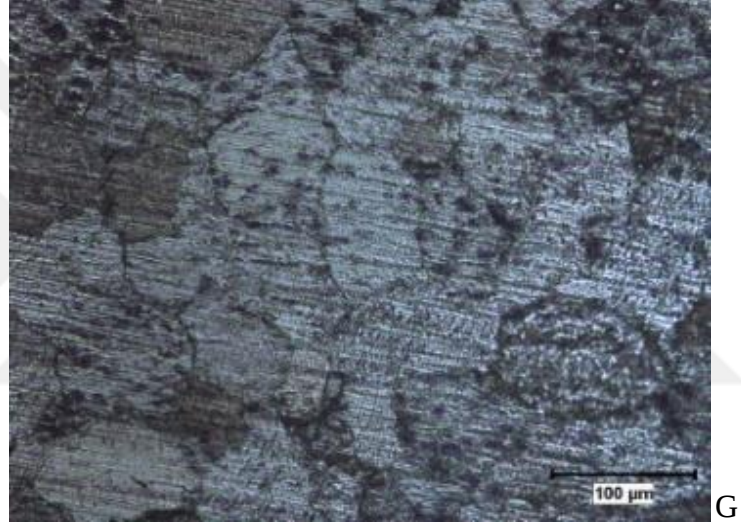
D



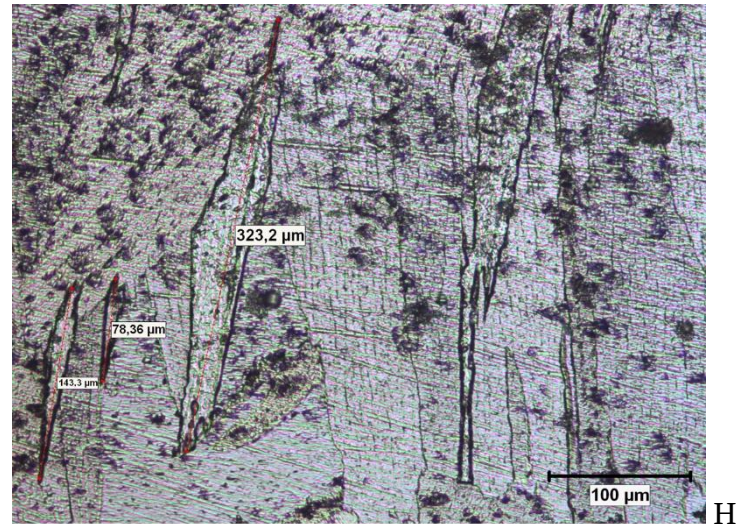
E



F



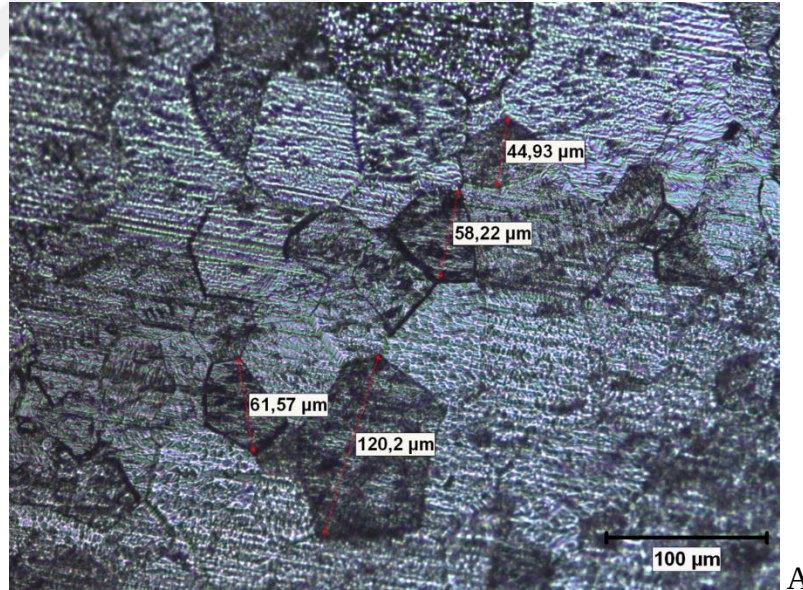
G

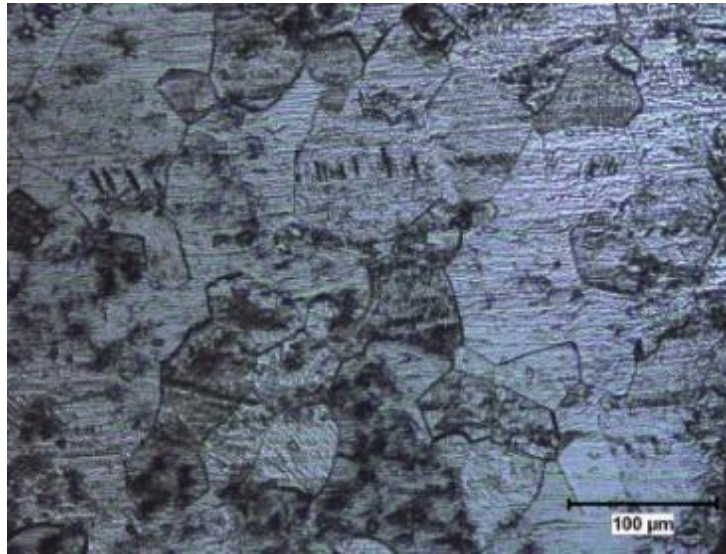


H

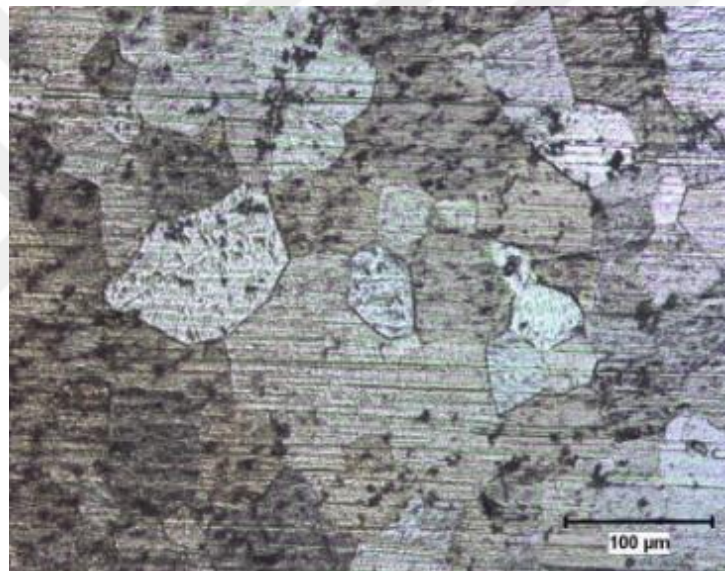
Şekil 4.5. Farklı sıcaklıklardaki haddeleme yönündeki mikroyapıları **A)** RT **B)** 400 °C **C)** 500°C **D)** 600°C **E)** 700°C **F)** 800°C **G)** 900°C **H)** 1000°C

Farklı sıcaklıklarda şekillendirilmiş haddeleme yönüne dik CP2 numunelerinin mikroyapıları Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Buradaki mikroyapı incelemelerine baktığımızda; haddeleme yönüne göre olan numunelerin mikroyapısıyla benzerlik göstermektedir. Haddeleme yönüne dik CP2 numunelerinde 900°C'ye kadar eş eksenli taneler görülmektedir. Boyutları yaklaşık olarak 40-120 μm aralıklarında olan eş eksenli tanelerin Oda sıcaklığından 800°C'ye kadar tane boyutlarında değişiklik olmamıştır. 800°C ve sonrasındaki sıcaklıklarda tane boyutları artmıştır. 1000°C'de oluşan ve boyutları 600 μm 'ye varan iğnemsî alfa taneleri, malzemenin sertliğinin ve dayanımının arttığını göstermektedir. Bu sıcaklıkta, haddeleme yönüne dik sıcaklık-sertlik grafiğinde (bkz. Şekil 4.4), meydana gelen sertlik artışının malzemenin gevrekleşmesine neden olduğunu doğrulamaktadır. Aynı zamanda iğnemsî alfa yapısının yüksek dayanıma ve sertliğe sahip olması, malzemenin gevrekliğini artırmış; şekillendirilebilirliği azaltmıştır. İğnemsî alfa yapısının görülmesi; sıcaklığın beta faz dönüşüm sıcaklığının üzerine çıktığını göstermiştir.

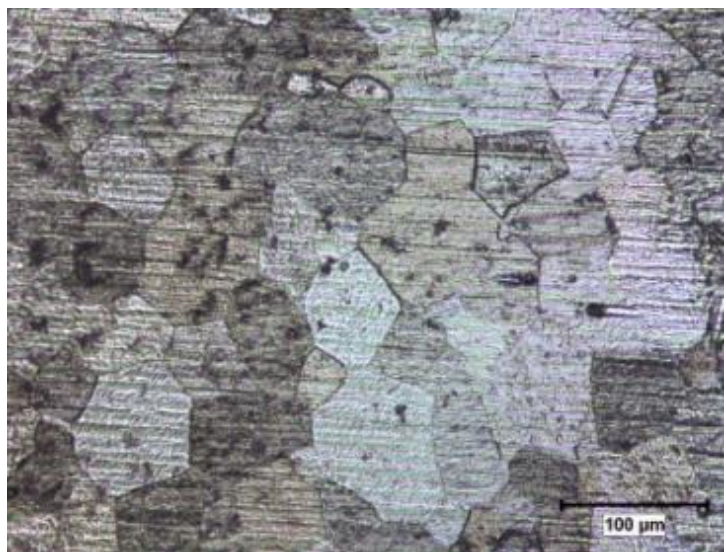




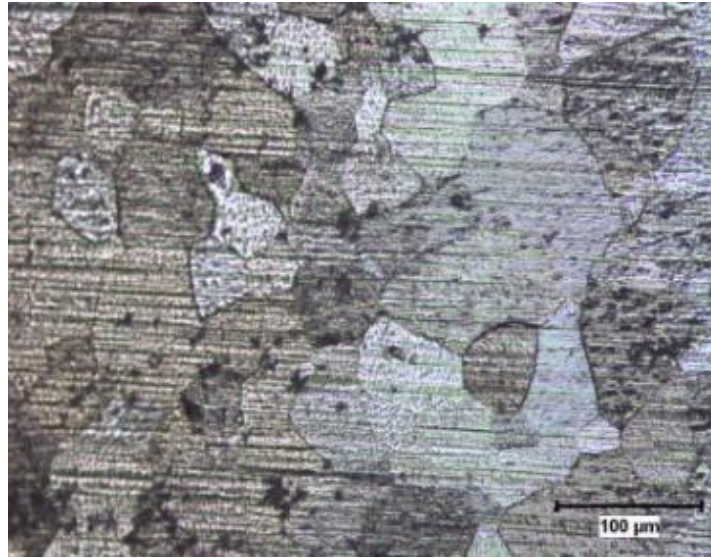
B



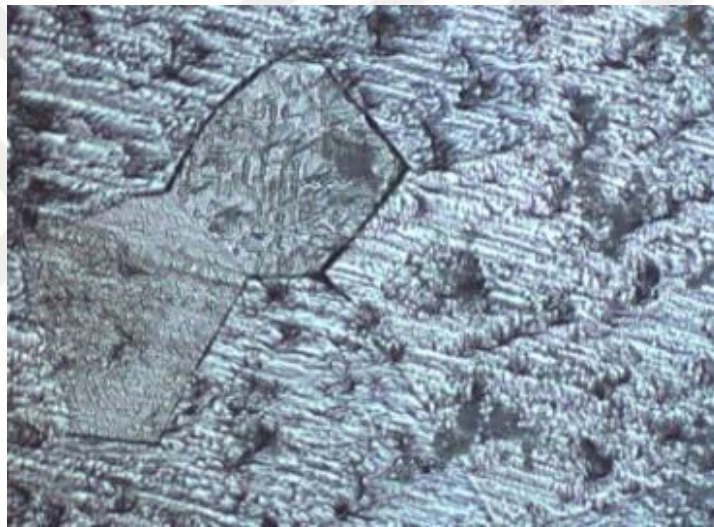
C



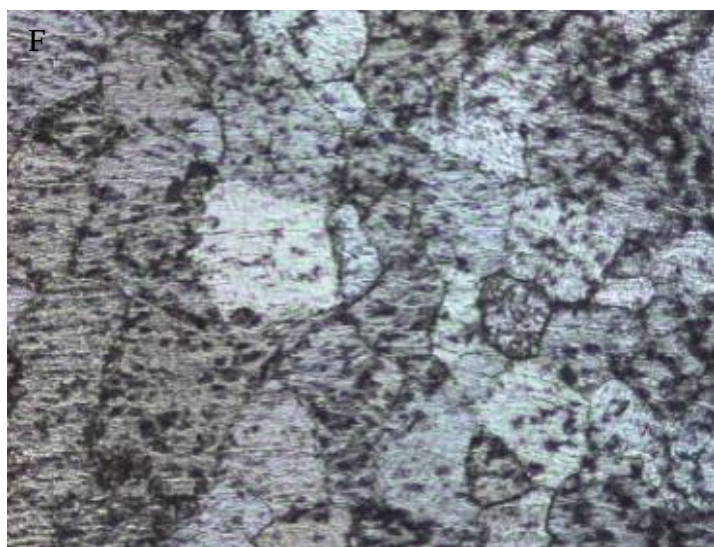
D



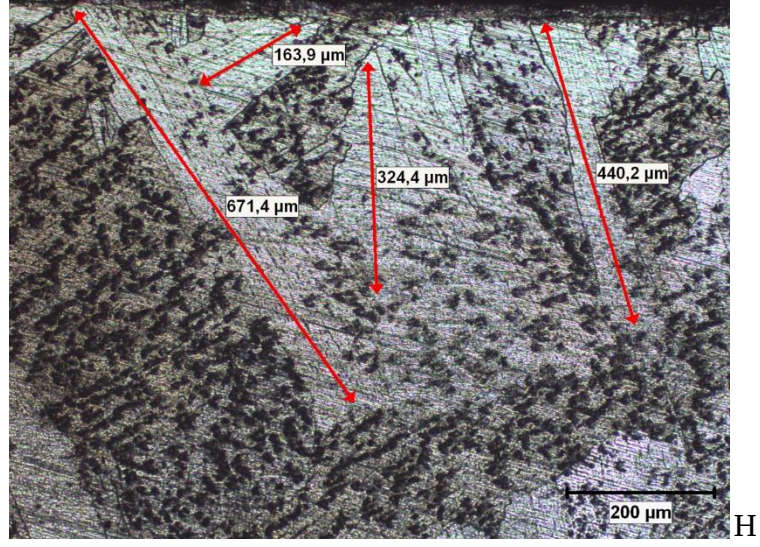
E



F



G



Şekil 4.6. Farklı sıcaklıklardaki haddeleme yönüne dik mikroyapıları **A)** RT **B)** 400 °C **C)** 500°C **D)** 600°C **E)** 700°C **F)** 800°C **G)** 900°C **H)** 1000°C

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında, medikal, otomotiv gibi sektörel alanlarda çok kullanılan saf titanyum (CP2) malzemesinin farklı sıcaklıklarda uygulanan sıcak şekillendirme işleminin, sıcaklığın oluşturduğu deformasyonlar ile mekanik ve mikroyapı üzerindeki değişimlere etkisi yapılan deneylerle ortaya çıkarılmıştır.

Haddeleme yönündeki CP2 numunesinde 800°C'ye kadar ısıtılan numunelerde şekillendirme kabiliyetinin iyi olduğu fakat 900°C ve üzeri sıcaklıkta şekillendirme kabiliyetinin düştüğü görülmüştür. En iyi şekillendirme sıcaklığının sünekliğin en fazla görüldüğü 500°C'deki numunede olduğu tespit edilmiştir. Haddeleme yönündeki CP2 numunesinde 1000°C sıcaklıkta, mukavemetinin %50 arttığı fakat sertliğin maksimum olmasıyla malzemenin gevrekleştiği görüldü. Haddeleme yönüne dik CP2 numunesinde, haddeleme yönündeki CP2 numuneleriyle beraber değerlendirildiğinde benzer özellikler görülmektedir. Haddeleme yönüne dik CP2'de en iyi şekillendirme sıcaklığının, sünekliğin en fazla görüldüğü 400°C'deki numunede olduğu tespit edilmiştir. 1000°C sıcaklıkta, mukavemetinin %20 arttığı ve deformasyon miktarının bariz bir şekilde azaldığı görüldü. Bu durumda malzemenin tokluğunun azaldığı ve gevrekleştiği belirlendi. Haddeleme yönüne dik numunelerde çekme dayanımlarının bir miktarda daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Haddeleme yönünde ve haddeleme yönüne dik numunelerin mikroyapılarında eşeksenli ve yüksek sıcaklıklarda iğnemsî alfa yapıları görülmüştür. Literatürde yapılan araştırmalarda Şekil 2.4'deki görüntüler yapılan deneyleri desteklemektedir. 900°C'ye kadar eş eksenli alfa tanelerinin görülmüştür. Sertliğin 1000°C sıcaklıkta yüksek olmasıyla, bu sıcaklıktaki mikroyapısında; sert ve dayanımı yüksek Widmanstätten α yapılarını ortaya çıkmıştır. Literatürde bahsedilen Çizelge 2.4'deki saf titanyum grade 2 malzemesinin beta transus geçiş sıcaklığının üzerine çıkılmasıyla bu yapıların meydana geldiği desteklenmiştir. Sonuç olarak çekme dayanımları, sertlik ve mikroyapı değişimleri birbirlerini destekler nitelikte sonuçlar ortaya koymuştur. Lüteratürde araştırılan çalışmalarda bu tez çalışmasını destekler niteliktedir.

Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, saf titanyum (CP2) ile yapılacak olan çalışmalarda şekillendirilebilirlik için en uygun sıcaklığın hadde yönünde 500°C, hadde yönüne dik için ise 400°C olduğu bilinmelidir. Beta geçiş sıcaklığının 885°C ve üzerinde olması sebebiyle mikroyapıda meydana gelen faz değişiminden dolayı sert Widmanstatten α yapısının oluşması nedeniyle bu sıcaklığın üzerine çıkılmamasına dikkat edilmelidir. Mikroyapıda gerçekleşen bu faz değişimi, malzemenin sertliğinde artmasıyla şekillendirilebilirliğin azalmasına ve gevrekliğin artmasına sebep olacaktır. Bu durumda şekillendirme için uygun olmayacaktır.



KAYNAKLAR

- American Society for Metals. (1980). *ASM Metals Handbook, 9. Edition, Volume 3 Properties and Selection: Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals Titanium and Titanium Alloys*. USA.
- Akyol, S. (2007). *Titanyum Alaşımının İşlenebilirliğinin Isıl İşlem Yardımıyla Arttırılması (Yüksek lisans tezi)*. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp> (Tez no: 223609)
- Anonim 2023a. (2021, Haziran 2). Erişim adresi: <https://www.airlinehaber.com/douglas-dc-7-ucagi-hava-yolculugunda-nasil-devrim-yaratti/>
- Anonim 2023b. (2017). Erişim adresi: <https://levtems.com/metalik-biyomalzeme-platin-ve-implant-nedir-kullanım-alanları/>
- Anonim 2023c. Erişim adresi: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?basmnum=MTU020>
- Askeland, D. (1994). *The Science and Engineering of Materials*. USA: VNR International.
- ASM International. (1990). *Metals Handbook, 10th Edition, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*. USA: 586-591.
- Black, J., & Hastings, G. (1998). *Handbook of Biomaterial Properties, First Edition*. USA: Springer New York.
- Boyer, R., Welsch, G., & Collings, E. (1994). *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. USA: ASM International, Metals Park.
- Brooks, C. (1986). *Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys*. Ohio, USA.
- Büyük Larousse. (1986). 22(11557). Milliyet Yayınları.
- Chen, F., & Chiu, K. (2005). Stamping Formability of Pure Titanium Sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 170, no. 1-2, 181-186.
- Çetin, G. (2019). *Ti-6Al-4V Sacların Mikroyapı Değişimi ve Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi (Yüksek lisans tezi)*. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp> (Tez no: 594229)
- Donachie, M. (1988). *Titanium: A Technical Guide*. USA: ASM International.
- Duman, D. (2010). *Titanyum talaşından titanyum karbür üretimi ve sert metal üretiminde kullanımı (Yüksek lisans tezi)*. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp> (Tez no: 352419)
- Erdem, M. S., & Aydın, K. (2006). *GAZ TÜRBİNLİ UÇAK MOTORLARINDA TİTANYUM*. *Mühendis ve Makina*, 47(558).
- Ezugwu, E., & Wang, Z. (1997). *Titanium Alloys and Their Machinability*. *Journal Of Materials Processing Technology*, 262.
- Froes, F. (2015). *Titanium: Physical Metallurgy Processing and Applications*. USA: ASM International.
- Fuiji, H., Takahashi, K., & Yamashita, Y. (2003). Application of Titanium and Its Alloys for Automobile Parts. *Nippon Steel Technical Report*, 70-75.
- Gazquez, M., Bolivar, J., Tenorio, R., & Vaca, F. (2014). A Review of the Production Cycle of Titanium Dioxide Pigment. *Materials Sciences and Applications*, 441-458.

- Gheysarian, A., & Abbasi, M. (2017). *The Effect of Aging on Microstructure, Formability and Springback of Ti-6Al-4V Titanium Alloy*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 26, no. 1, 374-382. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2431-7>
- İstanbul Maden İhracatçıları Birliği . (2018). *Titanyum Yataklarının Durumu, İşletmeciliği ve Geleceği* . İstanbul.
- İşler, A. (1999). *Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlem ve Mekanik Özellikleri (Yüksek lisans tezi)*. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp> (Tez no: 100640)
- Kaya, Y. (2010). *Titanyum Sacların Nokta Direnç Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması (Yüksek lisans tezi)*. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp> (Tez no: 266023)
- Khan, A., Kazmi, R., Farrokh, B., & Zupan, M. (2007). *Effect of oxygen content and microstructure on the thermo-mechanical response of three Ti-6Al-4V alloys: Experiments and modeling over a wide range of strain-rates and temperatures*. *International Journal of Plasticity*, 1105-1125.
- Kilerci, İ. (2011). *Titanyum Alaşımlarının Farklı Kaynak Yöntemleriyle Kaynağının İncelenmesi*. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp> (Tez no: 287513)
- Kıral, M. (2014). *Titanyumun kaynak edilebilirliğinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi)*. Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp> (Tez no: 311061)
- Lauer, G., Wiedmann, A., Otten, J., Hübner, U., Schmelzeisen, R., & Schilli, W. (2001). *The titanium surface texture effects adherence and growth of human gingival keratinocytes and human maxillar osteoblast-like cells in vitro*. *Biomaterials* 22, 2799-2809.
- Leyens, C., & Peter, M. (2003). *Titanium and Titanium Alloys: Fundamental and Applications*. Weinheim.
- Lütjering, G., & Williams, C. (2007). *Titanium*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2023, Mayıs 2). *TİTANYUM*. Erişim adresi: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/titanyum>
- Majumdar, D., & Manna, I. (2015). *Laser surface engineering of titanium and its alloys for improved wear, corrosion and high-temperature oxidation resistance*. *Laser Surface Engineering*, 483-521.
- Materials Park. (1990). *ASM Metals Handbook*, vol. 2, 10th edition. Ohio, USA.
- Metals Park. (1972). *ASM Metals Handbook*, 8. Edition, Volume 7, *Atlas of Microstructures of Industrial Alloy*. Ohio.
- Moiseyev, V. (2006). *Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications*, CRC Pres. USA.
- Mpumlwana, D., Msomi, V., & Fourie, C. (2021). *Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties of a 3 mm Commercially Pure Titanium Plate (CP-Ti Grade 2)*. *Hindawi Journal of Engineering*, 8.
- Nawaya, T., Beck, W., & Hehl, A. (2020). *Tensile properties of α -titanium alloys at elevated temperatures*. *MATEC Web of Conferences* 321. Nantes.
- Okabe, T., & Waseda, Y. (1997). *Producing Titanium through an Electronically Mediated Reaction*. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 28.

- Öztürk, F., Ece, R., Polat, N., Köksal, A., Evis, Z., & Sheikh-Ahmad, J. (2016). *Application of Electric Resistance Heating Method on Titanium Hot Forming at Industrial Scale. Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 41, no. 11, 8. doi:<https://doi.org/10.1007/s13369-016-2159-6>
- Polmear, I. (1996). *Recent Developments in Light Alloys. Materials Transactions, JIM*, Vol. 37, No. 1, 12-31.
- Sıcakyüz, Ö. (2007). *Titanyum ve titanyum alaşımlarının anodik oksidasyon davranışı ve karakterizasyonu*. Erşim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp> (Tez no: 252461)
- Smith, W. (1993). *Structure and properties of engineering alloys*, 2nd edition. McGraw-Hill Series in Materials Science.
- Subaşı, M., & Karataş, C. (2012). *Titanyum ve Titanyum Alaşımlarından Yapılan İmplantlar Üzerine İnceleme*. Politeknik Dergisi, 15(2), 87-103.
- Tanrıöver, K., & Taşçı, A. (n.d.). *Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlemi*. Makine Magazin.
- Tekin, M., Ertan, R., & Özgül Güler, H. (2021). Forming Evolution of Titanium Grade2 Sheets. *Research Square*. doi:<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-616163/v1>
- Terzi, M. (2012, Mayıs). *ESAN – ECZACIBAŞI MİLAS FELDSPAT TESİSİ ATIKLARINDAN TİTANYUM MİNERALLERİ KAZANILMASI OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Türen, Y. (2010). *Met 201 Malzeme Ders Notları*. Karabük.
- Yan, B., Li, H., Zhang, J., & Kong, N. (2019). *The Effect of Initial Annealing Microstructures on the Forming Characteristics of Ti-4Al-2V Titanium Alloy*. *Metals*, 9(5), 576.
- Yücel, M. B. (2018). *ÜRETİMİNDEN TİCARİ KULLANIMINA TİTANYUM*. *Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, pp. 63-76.
- Zhou, L., Sohn, Y., Whiting, G., & Leary, K. (1993). *Microstructural Changes in Several Titaniferous Materials During Chlorination Reaction*. *The Metallurgical Society of the AIME, New York*, 1089-1103.
- Zümrüt, Z. (2009). *Tam Faktöriyel Deney Tasarımı Tekniği ile Hidroksiapatit kaplı Titanyum İmplant Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Parametrelerin Etkisi* (Yüksek lisans tezi). Erşim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/giris.jsp> (Tez no: 251010)