

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TİTANYUM SERT-ALFA FAZININ DEĞİŞİK
YÖNTEMLERLE ÜRETİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Metalurji ve Malzeme Müh. Selda Üçüncüoğlu

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Üretim Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanları: Prof. Dr. Ahmet EKERİM
Doç. Dr. Ali Arslan KAYA

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iii
KISALTMA LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiii
1 GİRİŞ	1
2 TİTANYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	5
3 TİTANYUM ALAŞIMLARININ FİZİKSEL METALURJİSİ	8
3.1 Titanyum Alaşımlarında Dönüşümler	10
3.1.1 Martenzit Dönüşümler	11
3.1.2 Difüzyon İçeren Dönüşümler.....	12
4 TİTANYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI	14
4.1 Alaşımlandırılmamış Titanyum	14
4.2 Alfa Alaşımları	15
4.3 Yaklaşık Alfa Alaşımları	15
4.4 Alfa-Beta Alaşımları.....	15
4.5 Beta Alaşımları	16
5 SERT ALFA FAZININ TANIMI.....	17
6 HAVACILIK VE UÇAK SANAYİNDE TİTANYUM ALAŞIMLARININ KULLANIMI.....	21
7 DİFÜZYONLA BİRLEŞTİRME	23
8 ULTRASONİK MUAYENENİN TANIMLANMASI VE DİFÜZYONLA BİRLEŞTİRME ÜRÜNLERİNE UYGULANAN ULTRASONİK TEST YÖNTEMLERİ.....	26
9 ELEKTRO-EROZYON İLE İŞLEME TEKNOLOJİSİ.....	32
10 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	36
10.1 Deney Detayları	36
10.2 Yöntem.....	36
10.3 Ana Malzeme	38
10.4 Deneysel Sonuçlar	38
11 SONUÇLAR ve İRDELEMELER	69
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	78

SİMGE LİSTESİ

α	Alfa
β	Beta
HRB	Brinell sertlik değeri
HV	Vickers sertlik
GPa	Giga paskal
MPa	Mega paskal
nm	Nanometre
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
cm	Santimetre
dak	Dakika
db	Desibel
N	Newton
kV	Kilovolt
kHz	Kilohertz
Hz	Hertz
MHz	Megahertz
pSi	Pound/inçkare
kSi	Kip/inçkare
dm	Difüzyon düzleminde kütle transferi
D	Difüzyon katsayısı
c/x	difüzyon düzleminde konsantrasyon değişim ölçüsü
A	Yüzey
dt	Süre

KISALTMA LİSTESİ

VHP	Vacuum Hot Press (Vakum Altında Sıcak Presleme)
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TEM	Transmission Electron Microscope (Geçirimli Elektron Mikroskobu)
AFM	Atomic Force Microscope (Atomik Kuvvet Mikroskobu)
XRD	X-Ray Diffractometer (X-Işını Difraktometresi)
EPMA	Electron Probe Microanalysis (Elektron Prob Mikro Analizör)
HSP	Hegzagonal Sıkı Paket
HMK	Hacim Merkezli Kübik
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
YMO	Yüzey Merkezli Ortorombik
HMT	Hacim Merkezli Tetragonal
M _s	Martenzit Başlangıç Sıcaklığı
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer (Fiber Takviyeli Polimer)
EDM	Electro Discharge Machining (Elektro-Erozyon ile İşleme)
EAH	Elektrot Aşınma Hızı
PVD	Physical Vapour Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi)
SAED	Selected Area Electron Diffraction (Seçilmiş Alan Elektron Difraksiyonu)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 α -titanyum ve β -titanyum fazlarının kristal yapıları	6
Şekil 3.1 Alaşım elementlerinin Titanyum alaşımlarının faz eğrilerine olan etkileri.....	8
Şekil 3.2 Burger ilişkisine göre β/α dönüşümü	9
Şekil 3.3 Şematik Ti-6Al-4V faz eğrisi	10
Şekil 5.1 (a) 1010°C sıcaklık altında ısıtılmış Ti-7Al-2Mo-1V alaşımı yüzeyindeki sert-alfa fazına ve (b) 925°C sıcaklıkta difüzyonla birleştirilmiş Ti-6Al-4V alaşımının birleşme yüzeyindeki sert-alfa fazına ait mikro yapı görüntüleri	19
Şekil 6.1 Karbon Fiber Takviyeli Polimer (CFRP), alüminyum, titanyum ve demir alaşımı malzemelerin uçak iskeleti ve motor yapımında kullanım oranları.....	22
Şekil 7.1 Difüzyonla birleştirme prosesinin aşamaları	24
Şekil 7.2 Katı-hal difüzyonunun şematik gösterimi ve formülasyonu	25
Şekil 8.1 Tipik A tarama sistemi	28
Şekil 8.2 Tipik B tarama sistemi.....	29
Şekil 8.3 Tipik C tarama sistemi.....	29
Şekil 8.4 Tipik birleştirme hataları	31
Şekil 9.1 EDM'deki iş parçası yüzeyinde oluşan katmanlar	33
Şekil 9.2 Dielektrik uygulama yöntemleri (a) Elektrot içinden püskürtme, (b) Elektrot içinden emme, (c) Statik, (d) Yanal püskürtme	35
Şekil 10.1 Ti-6Al-4V (a) dövme ve (b) biyet blokların ışık mikroskobu görüntüleri	38
Şekil 10.2 (a) 1250°C-2.5 saat / suda soğutma, (b) 1250°C-2.5 saat / havada soğutma, (c) 1250°C-8 saat / havada soğutma, (d) 950°C-1.5 saat / suda soğutma, (e) 950°C-1.5 saat / havada soğutma ve (f) 950°C-4.5 saat / havada soğutma sonrası numunelerin kesitinden alınan ışık mikroskobu görüntüleri.....	40
Şekil 10.3 (a) 1250°C-2.5 saat / suda soğutma, (b) 1250°C-2.5 saat / havada soğutma, (c) 1250°C-8 saat / havada soğutma, (d) 950°C-1.5 saat / suda soğutma, (e) 950°C-1.5 saat / havada soğutma ve (f) 950°C-4.5 saat / havada soğutma sonrası numunelerin kesitinden alınan SEM görüntüleri.....	41
Şekil 10.4 Ti-6Al-4V numune üzerinde azot gazı altında gerçekleştirilen (a)1250°C-2.5 saat / havada soğutma, (b)1250°C-2.5 saat / suda soğutma, (c)1250°C-8 saat / havada soğutma ısıt işlemleri sonrası yüzeyden alınan XRD paternleri	41
Şekil 10.5 Ti-6Al-4V numune üzerinde azot gazı verilmeksizin gerçekleştirilen (a) 950°C-1.5 saat / havada soğutma, (b)950°C-15 saat / suda soğutma, (c)950°C-4.5 saat / havada soğutma ısıt işlemleri sonrası yüzeyden alınan XRD paternleri	42
Şekil 10.6 Vakum altında 1200°C/2 saat ısıt işlem görmüş Ti-6Al-4V alaşımının ışık mikroskobu görüntüleri. (a) Fırın tabanına oturan yüzey, (b), (c) ve (d) fırın atmosferine maruz kalan yüzeyler.	43
Şekil 10.7 Yüzeyleri parlatıldıktan sonra vakum fırınında yük altında 1200°C/2 saat ısıt işlem görmüş Ti-6Al-4V alaşımlarının ışık mikroskobu görüntüleri. (a) ve (b) Başka bir yüzey ile temas eden yüzeyler, (c), (d), (e) ve (f) fırın atmosferine maruz kalan yüzeyler.....	44

Şekil 10.8 Lazer nokta kaynağın uygulandığı (A) Kaynaktan etkilenen (B) Kaynak içi, (C) Kaynaktan etkilenmeyen ve (D) Kaynak bölgelerine ait ışık mikroskobu görüntüleri.....	45
Şekil 10.9 'Sarı' sert-alfa fazı üzerinde 'beyaz' sert-alfa fazını oluşturmak amacı ile yapılan ısıtım işlem çifti sonrası elde edilen yapının ışık mikroskobu görüntüleri; (a) ve (b) Azot gazı altında 1250°C / 8 saat ısıtım işlemi, (c) ve (d) Azot gazı altında 1250°C / 8 saat ısıtım işlemi ve düşük oksijen basıncı altında 950°C / 8 saat ısıtım işlemi kombinasyonu	46
Şekil 10.10 'Beyaz' sert-alfa fazı üzerinde 'sarı' sert-alfa fazını oluşturmak amacı ile yapılan ısıtım işlem çifti sonrası elde edilen yapının ışık mikroskobu görüntüleri; (a) ve (b) Düşük oksijen basıncı altında 950°C / 4,5 saat ısıtım işlemi, (c) ve (d) Düşük oksijen basıncı altında 950°C / 8 saat ısıtım işlemi ve azot gazı altında 1250°C / 8 saat ısıtım işlemi kombinasyonu.	47
Şekil 10.11 950°C–15 saat / havada soğutma ısıtım işlemi sonrası yapılan mikro sertlik taraması ve taramanın yapıldığı kesitlerin ışık mikroskobu görüntüleri.	49
Şekil 10.12 950°C–17 saat / havada soğutma ısıtım işlemi sonrası yapılan mikro sertlik taraması ve taramanın yapıldığı kesitlerin ışık mikroskobu görüntüleri	50
Şekil 10.13 950°C–19 saat / havada soğutma ısıtım işlemi sonrası yapılan mikro sertlik taraması ve taramanın yapıldığı kesitlerin ışık mikroskobu görüntüleri	51
Şekil 10.14 950°C–21 saat / havada soğutma ısıtım işlemi sonrası yapılan mikro sertlik taraması ve taramanın yapıldığı kesitlerin ışık mikroskobu görüntüleri	52
Şekil 10.15 950°C–21 saat / havada soğutma ısıtım işlemi sonrası kesitten kesite ışık mikroskobu görüntüsü.	53
Şekil 10.16 Ti-6Al-4V numune üzerinde (a) Azot gazı altında gerçekleştirilen 1250°C-8 saat / havada soğutma, (b) Azot gazı verilmeden gerçekleştirilen 950°C-4.5 saat / havada soğutma ısıtım işlemleri sonrası elde edilen yüzeylerin üç boyutlu AFM ve üst yüzey görüntüleri.....	54
Şekil 10.17 Ti-6Al-4V numune üzerinde (a) 950°C-4.5 saat / havada soğutma, (b) Azot gazı altında 1250°C-8 saat / havada soğutma ısıtım işlemleri sonrası elde edilen ve (c) PVD tekniği ile ticari olarak TiN kaplanmış yüzeylerin Confocal RAMAN Spektrometre görüntüleri.	56
Şekil 10.18 Ti-6Al-4V numune üzerinde (a) PVD tekniği ile TiN kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımı numune, (b) Azot gazı altında gerçekleştirilen 1250°C-8 saat / havada soğutma, (c) Azot gazı verilmeden gerçekleştirilen 950°C-4.5 saat / havada soğutma ısıtım işlemleri sonrası yapılan scratch test sonrası yüzeyde oluşturulan çiziklerin SEM görüntüleri	57
Şekil 10.19 Azot gazı altında 1250°C sıcaklık ve 2 saat süre ile ısıtım işlemine maruz bırakılarak yüzeyinde 'sarı' sert-alfa fazı oluşturulmuş Ti-6Al-4V alaşımının EPMA-haritalama görüntüsü	59
Şekil 10.20 Azot gazı verilmeden kontrollü atmosfer altında 950°C sıcaklık ve 4.5 saat süre ile ısıtım işlemine maruz bırakılarak yüzeyinde 'beyaz' sert-alfa fazı oluşturulmuş Ti-6Al-4V alaşımının EPMA-haritalama görüntüsü	59
Şekil 10.21 (a) Azot gazı verilmeden kontrollü atmosfer altında 950°C sıcaklık ve 4.5 saat süre ile (b) Azot gazı altında 1250°C sıcaklık ve 2 saat süre ile ısıtım işlemine maruz bırakılarak yüzeyinde sert-alfa fazı oluşturulmuş Ti-6Al-4V alaşımının EPMA-kalitatif analiz sonuçları	60

Şekil 10.22 Ti-6Al-4V numune üzerinde azot gazı verilmeden gerçekleştirilen 950°C-4.5 saat / havada soğutma ısıt işlemleri sonrası yüzeyde oluşturulan 'beyaz' sert-alfa fazına ait (a) aydınlık alan TEM, (b) ve (c) iki ayrı zon ekseninde alınan difraksiyon paternleri.....	61
Şekil 10.23 Ti-6Al-4V numune üzerinde azot gazı altında gerçekleştirilen 1250°C-8 saat / havada soğutma ısıt işlemleri sonrası yüzeyde oluşturulan 'sarı' sert-alfa fazına ait (a) aydınlık, (b) karanlık alan TEM ve (c) sert-alfa üzerinden alınan SAED paterni.....	62
Şekil 10.24 TiN ve α -titanyum fazlarının kristal yapıları.....	62
Şekil 10.25 Yüzeyi ön hazırlandıktan sonra 950°C 19 saat süre ile ısıt işleme gören numunenin yüzeyinden alınan ışık mikroskobu görüntüleri	63
Şekil 10.26 'Beyaz' sert alfa fazını içeren blok ve ısıt işlem görmemiş titanyum alaşımı blok arasında VHP sonrası oluşan yapışma ara yüzeyinin farklı büyütme ölçeklerinde çekilmiş ışık mikroskobu görüntüleri.	64
Şekil 10.27 VHP tekniği ile birleştirilmiş blok üzerindeki sertlik taraması sonrası elde edilengrafik ve ışık mikroskobu görüntüsü.....	65
Şekil 10.28 'Sarı' sert alfa fazını içeren blok ve ısıt işlem görmemiş titanyum alaşımı blok arasında VHP sonrası oluşan yapışma arayüzeyinin (a) (SEM) ve (b) ışık mikroskobu görüntüleri.....	65
Şekil 10.29 Çeşitli büyüklüklerde ve küp şeklindeki beyaz sert alfa fazından oluşan yapay hataların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri	66
Şekil 10.30 Yapay hata içeren Titanyum bloğa ait teknik resim ve ultrasonik muayene C-scan görüntüsü	68

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1Elementel titanyumun mekanik ve fiziksel özellikleri	5
Çizelge 2.2 Titanyum alaşım gruplarına göre mekanik, fiziksel ve teknolojik özelliklerinin kıyaslanması.....	7
Çizelge 10.3 'Sarı' ve 'Beyaz' sert-alfa fazının sertlik ve ortalama kalınlık değerleri.....	42
Çizelge 10.4 Çeşitli titanyum alaşımlarına ait ultrasonik hız, akustik empedans ve yoğunluk değerleri	67

ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanmasında bana yol gösteren ve destek vererek yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Ahmet EKERİM'e ve Sayın Doç. Dr. Ali Arslan KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Özgür DUYGULU'ya, VHP işlemlerini gerçekleştiren İstanbul Teknik Üniversitesi öğretim görevlisi Sayın Doç. Dr. Filiz Çınar ŞAHİN'e, deneysel çalışmalarımda bana yardımcı olan TÜBİTAK Elektron Mikroskobu Laboratuvarı Başteknisyeni Sayın Orhan İPEK'e, İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü teknisyeni Sayın Hasan DİNÇER'e, TÜBİTAK Mekanik Testler Laboratuvarı uzman teknisyenleri Sayın Aygün GÜNGÖR ve Sayın Hasan TAŞCAN'a teşekkür ederim.

Ayrıca aileme, göstermiş oldukları sabır ve duyarlılıktan ötürü teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak, 2008

Selda ÜÇÜNCÜOĞLU

ÖZET

Döküm ya da ısıtıl işlemler sırasında ortamda bulunabilen az miktardaki oksijen veya azotun difüzyonla yapıya girmesi sonucu titanyum alaşımlarında ‘alfa-case’ veya ‘hard-alfa’ olarak adlandırılan kırılğan ve kararlı yapıda yeni sert bir alfa fazı oluşur. Sert-alfa, yorulma dayanımını, darbe direncini ve sünekliği düşürücü etkisinden dolayı numune yüzeyinde ise, haddelme veya dekopaj (yüzey temizleme) ile kaldırılır. Bu çalışmada söz konusu fazın, malzeme içerisinde mevcudiyetinin ultrasonik muayene ile tespitinde kullanılmak üzere Ti-6Al-4V alaşımı standart test blokları içerisinde bilinen konum, şekil ve boyutlarda yapay hata olarak üretimi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, yapay hata olarak üretilen hard-alfa fazının oluşturulması için optimum ısıtıl işlem koşulları ve ultrasonik muayenede standart test blokları olarak kullanılacak kitle malzeme içerisine bu hataları yerleştirilmek üzere kullanılan Vakum Sıcak Pres (vacuum hot press – VHP) metodu için uygun presleme parametreleri belirlenmiştir. Titanyum alaşımı numunelerin yüzeyinde iki ayrı gaz ortamında ısıtıl işlemle oluşturulan sert- α fazının karakterizasyon çalışmalarında Işığ mikroskobu, Taramalı elektron mikroskobu (SEM), Geçirimli elektron mikroskobu (TEM), Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), Elektron prob mikro analizör (EPMA), X ışınları difraksiyonu (XRD), Çizik testi (Scratch Test), Mikro sertlik ve Confocal raman spektrometresi kullanılmıştır. Yapay hata içeren titanyum alaşımı bloklar son olarak ultrasonik muayeneye tabi tutulmuşlardır.

Anahtar Kelimeler: Sert-alfa, Vakum altında sıcak presleme.

ABSTRACT

Minute amounts of oxygen and nitrogen that may be present in the medium during melting or heat treating diffuses into the structure and forms a brittle and stable new phase named alpha-case or hard-alpha in titanium alloys. Since hard-alpha adversely affects fatigue resistance, impact strength, and ductility this phase, when forms on the surface, is normally removed via chemical milling or machining. The aim of this study is to produce hard-alpha phase to be employed as synthetic defects of known size, shape and location in Ti-6Al-4V material that is to be used as a reference block in ultrasonic inspection of aircraft engine parts.

This study focused on establishing the optimum heat treatment for the formation of hard-alpha synthetic defect material, and the time, temperature and pressure parameters for vacuum-hot-pressing (VHP) as the method of incorporation of defects into the bulk materials. The hard-alpha phases produced by two methods were characterized using optical microscopy, Scanning electron microscopy (SEM), Transmission electron microscopy (TEM) Atomic force microscopy (AFM), Electron probe micro analysis (EPMA), X-Ray diffraction, Scratch test and Confocal raman spectroscopy techniques. Finally, titanium blocks containing artificially introduced hard-alpha defects were subjected to ultrasonic inspection.

Keywords: Hard-alpha, Vacuum hot press.

1. GİRİŞ

Titanyum, 1791 yılında İngiliz kimyager William Gregor tarafından keşfedilmiştir. Nehirden elde ettiği manyetik kumu inceleyen W. Gregor, kumun bileşiminde bulunan mıknatıslı demiri uzaklaştırmış ve kumu hidroklorik asit ile işlemiştir. Yapılan işlemler sonrası yepyeni bir elementin oksidini üretmiş ve bu elemente mekanit adını vermiştir. W. Gregor'un keşfinden yıllar sonra Alman kimyager Martin Heinrich Klaproth rutil olarak bilinen mineralden titanyum oksidi yalıtmayı başarmış ve bu yeni elemente titanyum adını vermiştir. Titanyum, 1900'lü yılların başlangıcına kadar arıtilamamış ve ancak yirminci yüzyılın ikinci yarısından sonra geniş kapsamda kullanılmaya başlanmıştır.

Titanyum, alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dünyada en çok bulunan dördüncü yapısal metal olmasına rağmen yüksek konsantrasyonda çok nadir bulunur, saf halde ise bulunması imkansızdır. Arıtılmasındaki zorluklar titanyumun pahalı bir malzeme olmasına sebep olmaktadır (M.Peters, vd. 2003).

Fiyat dezavantajına rağmen şu avantajları bulunmaktadır;

- Çelik veya nikel bazlı süper alaşımlara nazaran %60 kadar daha az yoğunluğa sahiptir.
- Gerilme dayanımı martenzitik çelikler ile mukayese edilebilir, östenitik veya ferritik çeliklere göre ise üstündür.
- Mali olarak paslanmaz çeliğin dört katı daha değerli ve süper alaşımlarla mukayese edilebilir seviyededir.
- Oldukça yüksek korozyon dayanımına, özellikle kuru olmayan klor içeren ortamlara karşı yüksek dirence sahiptir. Çoğu ortamlarda korozyon dayancı paslanmaz çeliğinkini geçebilir ve insan vücudu içerisinde diğer malzemelere göre çok daha yüksek korozyon direncine sahiptir.
- Standard tekniklerle dövülebilir, işlenebilir ve dökülebilir.
- Kaynak, lehimleme, yapıştırma ve difüzyon bağlanması (diffusion bonding) ile birleştirilebilir.

- Toz metalurjisi ile şekillendirilebilir ve tüm bu özellikleri ile oldukça geniş bir kullanım alanı vardır.

Erime noktası 1660°C olan titanyumun genel olarak çalışma sıcaklığı 538°C altındadır. Allotropik bir elementtir. Birden fazla kristalografik yapıya sahiptir. Oda sıcaklığında hegzagonal sıkı paket kristal yapıdadır ve α fazı olarak adlandırılır. Bu yapı 888°C’de yüzey merkezli kübik yapıya dönüşür ve β fazı olarak adlandırılır.

Titanyum alaşımları genellikle;

- Alaşımlandırılmamış Titanyum
- α Alaşımları
- Yaklaşık- α alaşımları
- $\alpha+\beta$ Alaşımları
- Kararlı β alaşımları

olarak gruplandırılır. Farklı titanyum grupları farklı karakteristik özelliklerdedir (Matthew J. Donachie, JR. 2000).

Ti-6Al-4V Titanyum alaşımı; $\alpha+\beta$ alaşım grubundadır ve düşük yoğunluk, yüksek gerilme, elastisite, biyouyumluluk ve korozyon direnci özelliklerine sahiptir (Bernd Rauschenbach 1994; Iryna Pohrelyuk vd., 2007). Tipik kullanım alanları, hava ve otomobil sanayi, kompresör pervaneleri, enerji sistemleri, dişçilik ve tıp uygulamalarında cerrahi protezler olarak sayılabilir (Joanne L. Murray, 1987; R.W. Evans vd.,1996; A.Czyrska-Filemonowicz 2005).

$\alpha+\beta$ alaşım grubu kırılgandır fakat yüksek korozyon dayanımına sahiptir. Ara yer (interstitial) alaşım elementlerinden oksijen ve azot, titanyumun mukavemetini artırır, fakat bu elementlerin düşük çözünürlükleri titanyum içine girmelerini zorlaştırmaktadır.

Oksidasyon yüksek sıcaklık operasyonlarında problemdir. Ancak yüksek sıcaklık, titanyumun yalnızca oksidasyonuna değil, oksijenin ya da azotun yüzeye difüze olmasından kaynaklanan katı-çözelti sertleşmesine de neden olur. Titanyum ve alaşımları oksijen veya azot ortamında ısıtıldığında, yüzey sertleşmesi bölgesi oluşur.

Yüzey sertleşmesi tabakası literatürde alfa-kabuk (α -case) veya sert-alfa (hard- α) olarak adlandırılır (Matthew J. Donachie, JR. 2000). Yorulma dayanımını ve sünekliği düşürücü etkide olması nedeni ile bu tabaka genellikle istenmeyen bir durumdur ve haddeme veya dekopaj (yüzey temizleme) ile bu tabaka yüzeyden temizlenir (George F. Vander Voort, 2004).

Titanyum alaşımlarının askeri ve ticari havacılık sektöründe oldukça geniş kullanımı söz konusudur. Bu sektörde güvenliğin son derece önemli olması nedeni ile mühendislik bileşeni olarak kullanılan titanyum alaşımı malzemelerin inklüzyon, çatlak, boşluk ve herhangi bir hasara sebebiyet verebilecek diğer yapısal kusurları içermemesi gerekmektedir. Bileşenlerdeki hasar felaketlerle sonuçlanacak kazalara yol açabilir. Bu nedenle üretim sonrası mutlaka muayene yapılması gerekmektedir. Titanyum alaşımlarındaki hasarların bir nedeni de sert-alfa fazıdır. Sert-alfa inklüzyonları onu çevreleyen ana metalden çok daha yüksek sertlikte olan oksijen ve/veya azot empüriteleri ile kontamine olmuş bölgelerdir. Bu kırılgan bölge, malzeme içerisinde yüksek gerilim konsantrasyonlarına sebep olarak yapıda meydana gelecek çatlak başlangıcının kaynağı olabilir (F.J. Margetan, 2002).

Yapıda meydana getireceği mekanik özellik değişimleri nedeniyle sert-alfa fazının oluşup oluşmadığının tespiti uygulamada son derece önemli bir konudur. Bu faz mikroyapıda istenilmeyen bir kusur, yani 'inklüzyon' olarak kabul edilmelidir. Sert-alfa inklüzyonlarının tespiti; (1) sert-alfa ve hasarsız ana malzemelerden alınan ultrasonik empedansa ve (2) ana malzemenin kristal mikro yapısından gelen empedansa bağlıdır. Birinci madde sert-alfa hatasından gelen ultrasonik yankının boyutu, ikinci madde ise tane sınırlarından gelen yankının boyutu ile sınırlıdır. Uçak motorlarının dönen parçalarında titanyum içerisindeki sert-alfa inklüzyonlarının tespiti aynı boyut ve şekle sahip açık metal kusurlarına (çatlaklar ve boşluklar) göre çok daha zordur. Ancak, bu tür kritik boyutlandırılmış kusurların tespiti ne kadar zor da olsa döngüsel gerilim ve yüksek sıcaklık altında malzemenin performansını önemli ölçüde düşürdükleri için mutlaka tespit edilmelidirler (W.P. Conrardy, 1996; J.F. Wildey, 1991; M.Gigliotti, 1994).

Bu tez çalışmasının amaçları sırası ile;

- Ti-6Al-4V alaşım sistemi içinde yapay hata olarak üretilen sert-alfa fazının oluşturulması için optimum ısı işlem koşullarının belirlenmesi,
- Üretilen yapay hatanın, özellikleri bilinen ve ultrasonik muayenede standart test blokları olarak kullanılacak aynı alaşımlı kitle malzeme bloklar içerisine yerleştirilmesi,
- Hataların kitle malzeme içerisine yerleştirilmesinde kullanılacak Vakum Sıcak Pres (vacuum hot press – VHP) metodunun uygun yük-sıcaklık-süre parametrelerinin belirlenmesi,
- VHP ile birleştirilmiş, sert-alfa yapay hataları içeren referans bloklarının ultrasonik muayenede kullanılabilirliklerinin tespiti.

Çalışmanın konusu, üretim prosesi ile ilgili doğru parametrelerin belirlenmesini gerektirir. Çalışmada, havacılık ve uçak sanayiinde kullanılan Ti-6Al-4V alaşımına odaklanılmış, sert-alfa fazı olarak bilinen yapay hata üretimi ve VHP (Vakum altında Sıcak presleme) yöntemi kullanılarak, aralarına yapay hatalar yerleştirilen iki titanyum bloğun birbirleri ve aradaki sert-alfa yapay hata fazı ile mükemmel yapışması için uygun koşullar belirlenmiştir. Çalışma içerisinde karakterizasyon yöntemleri olarak Işık Mikroskobu, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Elektron Prob Mikro Analizör (EPMA), X Işınları Difraksiyonu (XRD), Çizik Testi (Scratch Test), Mikro Sertlik ve Confocal Raman Spektrometresi teknikleri kullanılmıştır.

2. TİTANYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ:

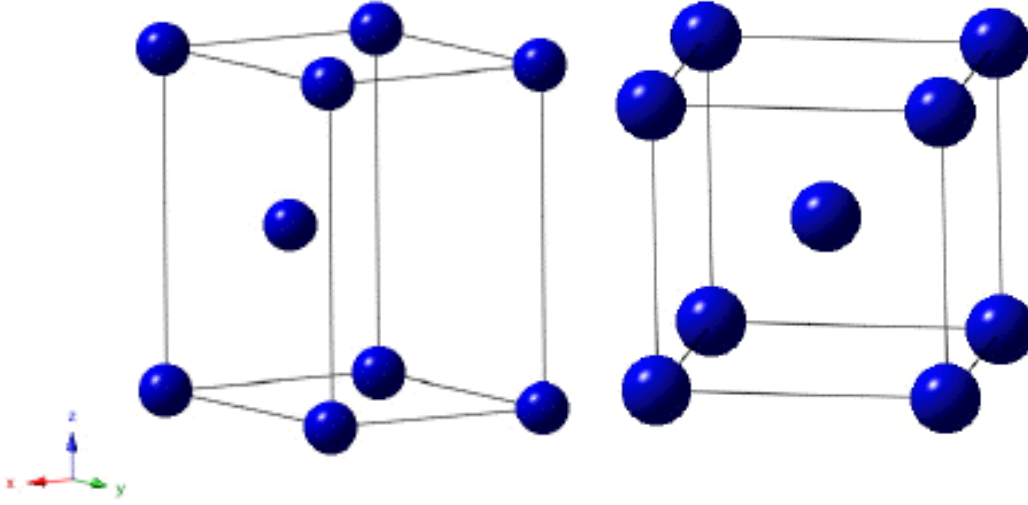
Titanyum hafif metaller arasında en iyi dayanıma sahip olan metaldir. Çok reaktif bir metal olan titanyum bu özelliği sebebi ile çoğunlukla diğer metallerin alaşımlandırılmasında veya deoksidasyonunda kullanılır. Çelik için silis veya mangana göre çok daha güçlü bir deoksidasyon elementidir. Çelikten %40 daha hafif, alüminyumdan %60 daha ağırdır. Yüksek dayanım ve düşük ağırlık kombinasyonu titanyumu son derece kullanışlı bir metal yapmaktadır. Çizelge 1’de elementel titanyumun mekanik ve fiziksel özellikleri verilmektedir.

Çizelge 2.1. Elementel titanyumun mekanik ve fiziksel özellikleri (Matthew J. Donachie, JR. 2000).

Özellik	Tanım veya Değer
Atom Numarası	22
Atom Ağırlığı	47.90
Kristal Yapısı Alfa ($\leq 882^{\circ}\text{C}$) Beta ($\geq 882^{\circ}\text{C}$)	Hegzagonal sıkı paket Hacim Merkezli Kübik
Yoğunluk	4,51 g/cm ³
Erime Noktası	1668 $\pm$ 10 $^{\circ}\text{C}$
Kaynama Noktası	3260 $^{\circ}\text{C}$
Termal İletkenlik	11.4 W/m.k
Sertlik	70-74 HRB
Young Modülü	120 Gpa (17x10 ⁶ psi)
Poisson Oranı	0.361
Çekme Dayanımı	240 Mpa (35 ksi) min
Elektrik İletkenliği	%3 IACS (bakır için bu değer %100’dür).

Titanyum, diğer bir çok metal gibi (kalsiyum, demir, kobalt, zirkonyum, kalay, ve hafniyum.. v.b.) birden çok kristal yapıya sahiptir. Kristal yapıdaki her değişiklik sadece

belirli sıcaklık aralığında kararlıdır. Bir başka kristal yapıya dönüşüm ‘allotropik dönüşüm’ ve dönüşüm sıcaklığı ise ‘transus sıcaklığı’ olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1’de α ve β -titanyum fazlarının kristal yapıları şematik olarak verilmektedir. Titanyum alaşımlarının çoğu gibi saf titanyum düşük sıcaklıklarda α -titanyum olarak bilinen hegzagonal sıkı paket (HSP) kristal yapısındadır. Yüksek sıcaklıklarda hacim merkezli kübik (HMK) yapıda kararlı olan titanyum β -titanyum olarak adlandırılır.



Şekil 2.1. α -titanyum ve β -titanyum fazlarının kristal yapıları [1].

Plastik deformasyon, hegzagonal sıkı paket kristal yapıda hacim merkezli kübik yapıya göre çok daha zordur. Bu durum; hegzagonal sıkı paket kristal yapıdaki α -titanyumun, hacim merkezli kübik yapıdaki β -titanyuma kıyasla sınırlandırılmış plastik deformasyona sahip olması ile açıklanabilir.

Titanyum alaşımlarının özellikleri α ve β fazlarının özelliklerine bağlıdır. Hegzagonal sıkı paket α -titanyum, hacim merkezli kübik yapıdaki β ile kıyaslandığında;

- Plastik deformasyona karşı yüksek dayanç,
 - Azaltılmış süneklik,
 - Anizotropik mekanik ve fiziksel özellikler,
 - Yüksek çatlak dayanımı
- özelliklerine sahiptir.

Çizelge 2’de titanyumun üç farklı alaşım grubunun mekanik, fiziksel ve teknolojik özelliklerindeki farklar verilmektedir (M.Peters, vd. 2003).

Çizelge 2.2 Titanyum alaşım gruplarına göre mekanik, fiziksel ve teknolojik özelliklerinin kıyaslanması.

ÖZELLİKLER	α ALAŞIMLARI	β ALAŞIMLARI	$\alpha+\beta$ ALAŞIMLARI
Yoğunluk	+	+	-
Dayanım	-	+	++
Süneklik	-/+	+	+/-
Kırılma Tokluğu	+	-/+	+/-
Akma Dayanımı	+	+/-	-
Korozyon Davranışı	++	+	+/-
Oksidasyon Davranışı	++	+/-	-
Kaynaklanabilirlik	+	+/-	-
Soğuk Şekillendirme	--	-	-/+

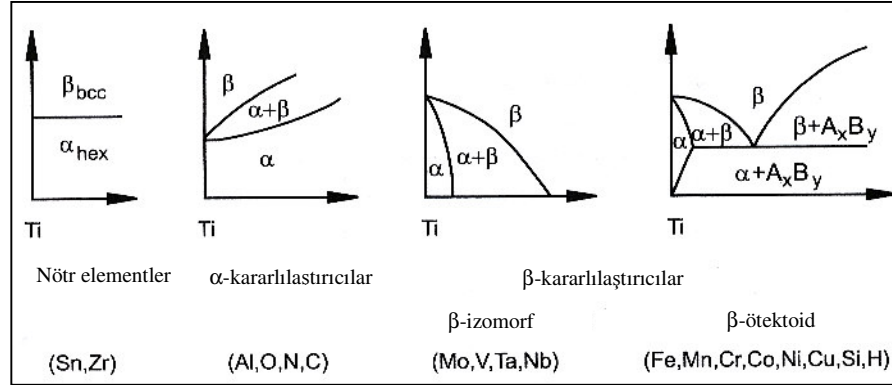
Titanyum kendisini kırılğan hale getiren oksijen, hidrojen ve azot gazlarına karşı aşırı duyarlı olduğundan imali oldukça zordur. Bu gazların titanyum içerisine difüzyonunu engellemek için yüksek sıcaklık prosesleri mutlaka özel koşullar altında uygulanmalıdır. Ticari titanyum ürünleri levha, boru, sac, tel, ekstrüzyon ve dövme ürünleri şeklinde olmakla beraber dökümü doğal reaktifliği sebebi ile mutlaka vakumlu fırınlarda yapılmalıdır [2].

Ağırlık oranına göre yüksek dayanımı sebebi ile uçak sanayinde ve spor malzemelerinde oldukça yaygın kullanımı vardır. Ayrıca yüksek korozyon direnci ile kimyasal proseslerde, tuz gidermede, valf-pompa parçalarında, denizcilik donanımlarında ve protez malzemesi olarak kullanımı söz konusudur.

3. TİTANYUM ALAŞIMLARININ FİZİKSEL METALURJİSİ:

Saf Titanyum 882°C’de polimorfik bir dönüşüme uğrar. Bu sıcaklık geçildiğinde; düşük sıcaklık fazı olan hegzagonal sıkı paket (HSP) yapıdaki α fazı, yüksek sıcaklık fazı olan hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki β fazına dönüşür. Titanyum alaşımlarında eklenen alaşım elementleri, bu fazlar içindeki çözünürlüklerine veya dönüşüm sıcaklığına olan etkilerine bağlı olarak α veya β kararlaştırıcıları olarak sınıflandırılabilirler. Oksijen, azot ve karbon gibi ara yer elementleri ve alüminyum α -kararlaştırıcılarıdır. Bakır, vanadyum, krom, mangan, demir, kobalt, nikel ve molibden ise β -kararlaştırıcı elementlerdir. Hidrojen ise en önemli ara yer β -kararlaştırıcı alaşım elementidir.

Şekil 3.1’de verilen faz eğrisindeki etkilerine göre, Mo, V, Ta, Nb β -izomorf elementler ve Fe, Mn, Cr, Co, Ni Cu, Si, H ise β -ötektoid elementlerdir. α/β faz çizgisinde neredeyse hiç etkileri olmadığından Sn ve Zr nötr elementler olarak bilinmektedirler. Ancak dayanç söz konusu olduğunda bu elementlere nötr demek mümkün değildir çünkü α fazının dayancını arttırmaktadırlar.



Şekil 3.1 Alaşım elementlerinin Titanyum alaşımlarının faz eğrilerine olan etkileri (M.Peters, vd. 2003).

Ticari Titanyum alaşımları baskın olan fazın varlığına bağlı olarak (α), ($\alpha + \beta$) veya (β) alaşımları olarak sınıflandırılırlar ve en bilindik örnekler sırasıyla Ti-Al-Sn, Ti-6Al-4V ve Ti-Mo alaşımlarıdır (C. Hammond & J. Nutting, 1977).

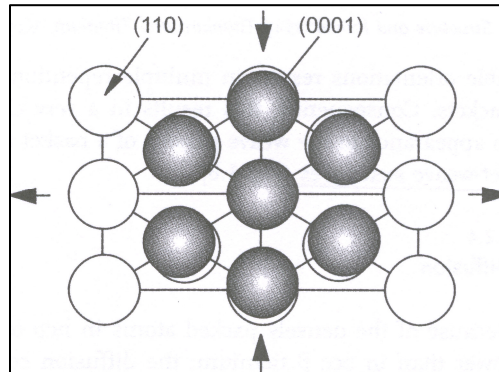
Titanyumun β fazı bölgesinden soğutma sırasında, HMK fazının en yoğun düzlemleri olan $\{110\}$ düzlemleri, hegzagonal yapıdaki α fazının taban düzlemi olan $\{0001\}$ düzlemlerine dönüşürler. α fazının taban düzlemindeki mesafeler, β fazının denk gelen mesafelerinden biraz daha büyüktürler ve bu sebeple β/α dönüşümü hafif bir çarpılma gösterir. Bu çarpılma hsp α fazının a-eksenine göre c-ekseni yönünde hafif bir daralmaya sebep olarak c/a oranını hegzagonal yapılardaki ideal oranın altında bir değere azaltır.

α titanyumda HSP kristal yapısının kafes parametreleri $a = 0.295\text{nm}$ ve $c = 0.4768\text{nm}$ 'dir ve c/a oranı 1.587'dir. hsp kristal yapısında ideal c/a oranı 1.633'dür. bcc β titanyumun kafes parametresi ise 900°C 'de $a = 0.332\text{nm}$ 'dir.

bcc β titanyumun kayma düzlemlerinin hsp α titanyumun taban düzlemlerine dönüşmesine denk gelen kayma düzlem ve yönü ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} \{0001\}_\alpha // \{110\}_\beta \\ \langle 1120 \rangle_\alpha // \langle 111 \rangle_\beta \end{aligned}$$

Burger vektörü kayma yönünü de tarif edeceğinden yukarıda verilen ilişki Burger ilişkisi olarak bilinmektedir. Şekil 3.2. Burger ilişkisine göre β/α dönüşümünü göstermektedir.

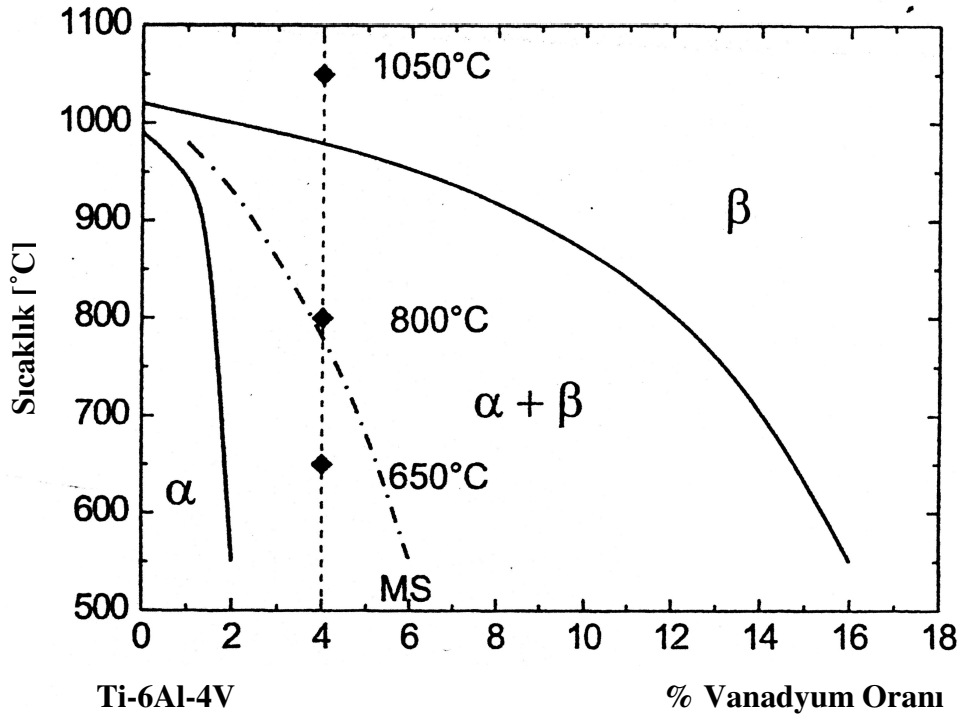


Şekil 3.2. Burger ilişkisine göre β/α dönüşümü (M.Peters, vd. 2003).

β titanyum birim kafesteki altı kayma düzlemi ve iki kayma yönü toplamda on iki değişik biçim yaratarak α ile olan oryantasyonunda on iki seçenek sunar. Bu oryantasyonların çeşitliliği metalografik mikroyapılara da yansımıştır. Bir kaç mm büyüklükte olabilen önceki β tanelerinde, α tabaka paketlerinin her biri bu bahsedilen 12 farklı oryantasyona göre çekirdeklenir ve büyür. Her bir tabaka paketi kendi içinde ortak bir oryantasyon gösterir. Bu 12 farklı oryantasyon, tabakalı paketlerin çoklu tekrarlarıyla sonuçlanır. Sonuç olarak, bu da sepet örgüsünü andıran çok karakteristik bir mikroyapıyla sonuçlanır ve bu yapılara sepet örgüsü yapısı denilir (M.Peters, vd. 2003).

3.1. Titanyum Alaşımlarında Dönüşümler:

Titanyum alaşımlarında dönüşüm tek faz β bölgesinden $\alpha + \beta$ iki fazlı bölgesine soğutma sırasında, kararsız β fazı α fazına ya difüzyon içeren çekirdeklenme ve büyüme mekanizmasıyla ya da daha hızlı soğutma hızları kullanılarak M_s sıcaklığının geçilmesi suretiyle martenzit tipinde bir dönüşümle gerçekleşir (C. Hammond & J. Nutting, 1977).



Şekil 3.3. Şematik Ti-6Al-4V faz eğrisi (C. Hammond & J. Nutting, 1977).

3.1.1. Martenzit Dönüşümleri:

Genel olarak, $\beta \rightarrow \alpha$ martenzit dönüşümüyle hsp yapıda α^I , ortorombik yapıda α^{II} oluşur. Bazı alaşımlarda yüzey merkezli kübik (YMK) ve yüzey merkezli ortorombik (YMO) yapıda martenzitlerin varlığı da literatürde yer almaktadır.

Yüksek M_s sıcaklığına sahip alaşımlarda (örneğin α alaşımları), martenzit birbirine paralel plakalardan meydana gelmiş koloniler şeklinde oluşmaktadır. Genel olarak her koloni β fazıyla aynı biçimli Burger oryantasyon ilişkisindedir ve birbirlerinden küçük açılı tane sınırlarıyla ayrılırlar.

Azalan M_s sıcaklığı, diğer bir deyişle artan miktarda β -kararlaştırıcı alaşım elementleriyle ve artan soğuma hızlarıyla, plakalar her biri farklı oryantasyon ilişkisinde değişik biçimler olarak ayrı birimler olarak oluşurlar. Aynı zamanda plakaların içyapıları dislokasyonlardan $\{10\text{-}11\}_\alpha$ ikizine ve habit düzlemi de $\{334\}_\beta$ dan $\{344\}_\beta$ ya değişir (C. Hammond & J. Nutting, 1977; C.Hammond and P.M.Kelly, 1969).

Hegzagonal martenzit; çubuk martenzit ve iğnemsî (acicular) martenzit olmak üzere iki farklı morfoloji göstermektedir (J.C.Williams, 1973). Yüksek M_s sıcaklıklı alaşımlarda gözlenen çubuk martenzit optik olarak ayırt edilebilen kolonilerden meydana gelir. Bu koloniler birbirine paralel martenzit plakalarından oluşur ve hepsi de oryantasyon ilişkisinin aynı değişik biçimindedir. Plakalar arasındaki sınırlar dislokasyon duvarlarından, plaka içleri ise dislokasyon ağlarından oluşmaktadır. Artan çözünmüş madde miktarı veya azalan M_s sıcaklığı ile çubuk martenzitin koloni boyutları azalır ve alaşımdan alaşıma değişen belli bir çözünmüş madde miktarında koloniler tamamen bozularak, iğnemsî morfolojide bireysel plakalara dönüşürler. Morfolojisinin içerdiği hata cinsinin ve M_s sıcaklığının çözünen miktarına bağımlılığı açısından titanyum alaşımları ve çelikler önemli benzerlik gösterirler.

Ortorombik α^{II} martenzitin 900°C altında sıcaklıklardan su verilmek suretiyle oluştuğu gözlenir ve iyi şekillendirilebilme özelliği ile tanımlanırlar (M.Peters, vd. 2003).

Çeşitli ($\alpha + \beta$) ve (β) alaşımlarında, YMO ve YMK yapıda martenzit fazlarının varlığı literatürde bilinmektedir. YMO martenzit morfolojik özellikleriyle $\{10\text{-}11\}_{\alpha}$ ikizli HSP martenzit görünümündedir ve hegzagonal yapıdan yüzey merkezli ortorombik yapıya olan çarpılmanın sebebi, karbonlu çelik martenzit örneğinde olduğu gibi karbon ara yer atomlarının HMK yapıdan hacim merkezli tetragonal (HMT) yapıya çarpılmayı yarattıkları mekanizmaya benzer bir mekanizmayla ara yer atomların yarattığı sıkışma olarak öne sürülmüştür (C. Hammond & J. Nutting, 1977).

3.1.2. Difüzyon İçeren Dönüşümler:

Yavaş soğutma hızlarında, kristalografik olarak dislokasyonlu martenzite benzer olan Widmanstaten α oluşumu gerçekleşir. Yüksek dönüşüm sıcaklıklarında ve yavaş soğutma hızlarında, Widmanstaten α büyük koloniler veya paralel plakalardan oluşmuş paketler olarak ve her koloni kaba hizalanmış α yapısı olarak isimlendirilen α tane sınırından çekirdeklenmiş olarak oluşurlar. Düşük dönüşüm sıcaklıklarında (artan β -kararlaştırıcı alaşım elementleriyle veya artan soğutma hızlarında), bu koloniler giderek ufalırlar ve daha az paralel plakalar içerirler ve tane sınırlarından bağımsız olarak çekirdeklenirler. Kolonilerin bu tarzda β/α oryantasyon ilişkisinin tüm değişik biçimlerini verecek şekilde dağılımları sepet örgüsü yapısına sebep olur (C. Hammond & J. Nutting, 1977).

Difüzyon içeren dönüşümlerde, tabakalı mikroyapı β -transus dönüşüm sıcaklığından soğutma suretiyle, eşeksenli mikroyapı ise yeniden kristalleşme işleminden sonra elde edilir. β -transus sıcaklığının hemen altında bir sıcaklıkta yapılan çözeltiye alma ısıtma işlemi tabakalı yapıdaki $\alpha + \beta$ ana fazında görülen öncü eşeksenli α fazlarının birlikte görüldükleri iki yapının karışımı anlamında bimodal (M.Peters, 1983) yapıyı oluşturmaktadır. α tanelerinin iğnemsî morfolojileri yüksek sıcaklıklarda haddeleyerek veya döverek daha eşeksenli bir şekle değiştirilebilirler (C.G.Rhodes, 1986).

Eşeksenli ve bimodal mikroyapılar arasındaki farklılık deformasyondan sonra farklı ısıtma işlemlerin uygulanması yüzündendir. Eşeksenli yapının aksine, bimodal yapı iki aşamalı ısıtma gerektirir. Hacimsel oranlar olarak $50\%\alpha$ ve $50\%\beta$ elde etmek için yeniden

kristalleşme sıcaklığı 955°C seçilmelidir. Bu sıcaklıktan su verildiğinde β martenzit dönüşümüyle dönüşür. Uzun difüzyon mesafeleri sebebiyle, daha düşük bir sıcaklıktaki (800°C) ikinci ısıtma işlemi, öncü α tanelerinin boyutlarında ciddi bir değişim yapmaz ancak martenzit tabakalı ($\alpha + \beta$) yapısına ayrışır (M.Peters, 1983).

4. TİTANYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI:

Titanyum, hegzagonal sıkı paket (HSP) kristal kafes sistemindeki α -titanyum ve hacim merkezli kübik (HMK) kristal kafes sistemindeki β -titanyum olmak üzere iki farklı kristalografik yapıya sahiptir. Saf titanyum için, α -fazı 882°C sıcaklık üzerinde β -fazına dönüşmektedir. α -titanyum fazının β -titanyum fazına dönüştüğü sıcaklık ' β Dönüşüm Sıcaklığı' olarak adlandırılmaktadır. Bu dönüşüm sıcaklığını arttıran alaşım elementleri α -kararlaştırıcılar, düşüren alaşım elementleri ise β -kararlaştırıcılar olarak adlandırılmaktadırlar.

Alaşım elementlerinin ilavesi ile titanyum alaşımlarının α veya β -fazları kararlı hale getirilebilir. Alaşım elementlerinden; alüminyum (Al), galyum (Ga), azot (N) ve oksijen (O) α -fazını kararlı hale getirirken, Molibden (Mo), vanadyum (V), tungsten (W), tantal (Ta) ve silis (Si) ise β -fazını kararlı hale getirir [3].

Titanyum alaşımları genellikle;

- Alaşımlandırılmamış Titanyum (Saf Titanyum)
- α Alaşımları
- Yaklaşık- α alaşımları
- $\alpha+\beta$ Alaşımları
- Kararlı β alaşımları

olmak üzere gruplandırılır (Y. Honnarat, 1996).

4.1. Alaşımlandırılmamış Titanyum:

Alaşımlandırılmamış Titanyumun ergime sıcaklığı 1650°C ve yoğunluğu 4,51g/cm³'tür. Özellikle yüksek dayanım düşük ağırlık birleşiminin istendiği yüksek sıcaklık operasyonlarında kullanılmaya uygundur. Üzerinde oluşan pasif oksit film tabakası alaşımlandırılmamış titanyumun mükemmel korozyon dayanımına sahip olmasını sağlamaktadır (H.Bhadesia, 1998).

Ticari saf titanyum olarak da bilinen grup ASTM Sınıf1, 2, 3, 4 ve ASTM7 olmak üzere 5 sınıftan oluşmaktadır. Her sınıf farklı oranlarda empürite bileşimine sahiptir. Sınıf1'den 4'e doğru saflık azalmaktadır. Çekme dayanımı Sınıf1 için 172MPa iken Sınıf4 için 483MPa değerindedir [2].

4.2. Alfa Alaşımları:

Ticari saflıktaki titanyum alaşımları olarak da bilinen grubun birincil alaşım elementleri oksijen ve demirdir. Akma dayanımı 170–480MPa arasında değişmektedir (R.R. Boyer, 1996). Ana kullanımları yüksek korozyon ortamlar veya çok düşük sıcaklıklardaki uygulamalardır. Isıl işlenebilirlikleri kötüdür ve kaynaklanabilirlikleri mükemmeldir.

4.3. Yaklaşık Alfa Alaşımları:

Bu gruptaki alaşımlar, α -kararlaştırıcı Al ve Sn gibi alaşım elementlerinin yanında, küçük oranda β -kararlaştırıcı Mo ve V elementlerini de içermektedir. Oda sıcaklığında mikro yapıları α -fazının yanında çok az oranda β -fazını içermektedir. Yaygın alaşımları; Ti-8Al-1Mo-1V (Ti-8-1-1) ve Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti-6-2-4-2S)'dir. İkinci alaşımdaki silis ilavesi S ile ifade edilmiştir. Silis ilavesi yüksek sıcaklıklarda akma dayanımını artırır. Yaklaşık- α alaşımları genellikle 400-520°C sıcaklık aralığında kullanılmaktadır (E.O. Ezugwu vd., 1997).

4.4. Alfa-Beta Alaşımları:

α ve β fazlarının birlikte görüldüğü mikro yapısı ile karakterize edilir. Yaklaşık alfa alaşım grubuna göre daha yüksek dayanım, iyi şekillendirilebilirlik gösteren gruba Ti-6Al-4V (Ti-6-4) ve Ti-6Al-2S (Ti-6-6-2) alaşımları örnek gösterilebilir. Alüminyum alaşımlarına ve düşük alaşımlı çeliklere göre yüksek korozyon direncine sahip olan alfa-beta alaşım grubu havacılık ve uçak sanayinde genellikle çelik ve alüminyuma göre tercih edilmektedir.

4.5. Beta Alaşımları:

Bu alaşım grubu zengin β -kararlaştırıcı elementlerin oranı nedeni ile yüksek sertleştirilebilirliğe sahiptir. Gerilmeli korozyon direnci yüksek olan beta alaşımları yüksek dayanım için ısııl işleme tabi tutulabilirler ve kolaylıkla soğuk haddeleme ile imal edilebilirler. Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr ve Ti-10V-2Fe-3Al alaşımları bu alaşım grubundadır (E.O. Ezugwu vd.,2003). β -alaşımlarının ısııl işlem sonrası sunekliği ve yorulma dayanımı düşktr.

α - β alaşım grubunda bulunan Ti-6Al-4V alaşımı havacılık ve uçak sanayinde en yaygın kullanım alanı olan titanyum alaşımı olmakla beraber toplam titanyum üretiminin %60'ını oluşturmaktadır.

5. SERT ALFA FAZININ TANIMI:

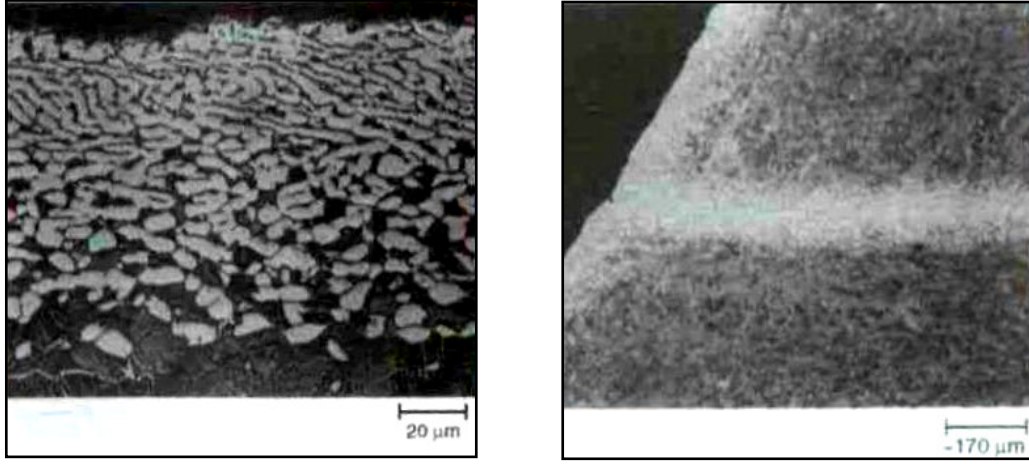
Titanyum alaşımlarının askeri ve ticari havacılık sektöründe oldukça geniş kullanımı söz konusudur. Bu sektörde güvenliğin son derece önemli olması nedeni ile mühendislik bileşeni olarak kullanılan titanyum alaşımı malzemelerin inklüzyon, çatlak, boşluk ve herhangi bir hasara sebebiyet verebilecek diğer yapısal kusurları içermemesi gerekmektedir. Bileşenlerdeki hasar felaketle sonuçlanacak kazalara yol açabilir. Bu nedenle üretim sonrası mutlaka muayene yapılması gerekmektedir. Titanyum alaşımlarındaki hasarların bir nedeni de titanyum ve alaşımlarının kullanımında devamlı olarak ortaya çıkan ve sert-alfa olarak bilinen, metal içindeki oksijen ve/veya azot empüritelerinden meydana gelen kırılkan fazdır. Titanyum dökümünde ortaya çıkan ve sistem dışı katı hata olarak da tanımlanan sert-alfa fazı yapıda kesinlikle istenmeyen bir inklüzyondur. Bu inklüzyonlar, alfaca zengin titanyum alaşımlarının oksijenle kesme, kaynak veya diğer operasyonları sırasında ergimiş metalin atmosferle temas etmesi sonucu meydana gelen, çatlak oluşturuıcı kararlı partiküllerdir. Sert-alfa inklüzyonları çevresel operasyonlar sonucu bir kez üretildikten sonra kaçınılmaz olarak ergiyik içerisine çeşitli transfer mekanizmaları yardımı ile girerler. Azot ve/veya oksijenin ilavesi bu hataların ergime noktasının temel alaşımın ergime noktasının üzerine çıkmasına sebep olur (J.D. Cotton vd., 2006). Bu faz, havacılık ve uçak sanayinde birincil kalite problemi olarak sayılmaktadır (R.G. Reddy, 1988). Sert-alfa inklüzyonları onu çevreleyen ana metalden çok daha yüksek sertlikte olan oksijen ve/veya azot empüriteleri ile kontamine olmuş bölgelerdir. Bu kırılkan bölgeler, malzeme içerisinde yüksek gerilim konsantrasyonlarına sebep olarak yapıda meydana gelecek çatlak başlangıcının kaynağı olabilir.

Çatlak oluşturuıcı etkisi olan titanyum set-alfa inklüzyonları ergimiş ana malzemenin sistem dışı kirliliklerinden ve bu kirliliklerin dökümhane kaynaklarından gelmektedir. Örneğin, sert-alfa inklüzyonunun oluşması için Shamblen ve arkadaşları tarafından 28 farklı kaynak tanımlanmıştır (Shamblen vd., 1989). En sık görülen sert-alfa oluşum kaynağı, alaşım artığı içeren kütle malzemenin eski haline geri dönmesi (tersinmesi), alevle kesilen malzemenin tersinmesi, kaynak sırasında havayla temas etme sonucu oluşan kontaminasyonlar ve önceki döküm veya ergitme operasyonlarında kullanılan

vakum odacığının yeterli temizlenememiş olmasıdır. Titanyum redüksiyon ve ergitme ekipmanlarındaki hava sızıntısı da oksijen ve azot kaynağı olarak sayılabilir. Oksijen, azot ve karbon gibi çatlak oluşturu elementler, sert-alfa titanyum inklüzyonlarının kırılğan ve kararlı hale getirmektedirler. Oksijen, azot veya karbon içeren sert-alfa inklüzyonları hassas döküm ile şekillendirilmiş Ti-6Al-4V alaşımının alfa-beta ikili mikroyapı içerisinde, yer çatlak oluşturu elementlerin döküm sıcaklığından soğuma sırasında veya sıcak izostatik presleme (Hot Isostatic Press-HIP) sırasında ana yapıya difüzyonları nedeni ile titanyum ana matris ile birlikte bulunmaktadır [4].

Yüksek sıcaklıkta azot gazının titanyum alfa fazını kararlı hale getirmesinden kaynaklanan ve metalurjik bir anormallik olan sert-alfa fazının mikro yapısı, azot miktarı ve ortam sıcaklığına bağı olarak tek fazlı alfa titanyum ya da çift fazlı alfa titanyum ve TiN veya Ti₂N şeklinde olabilir. Oda sıcaklığında azot gazının titanyum içerisinde çözünürlüğü %1'den daha azdır. Ağırlıkça %17 ve üzerindeki azot miktarını içeren ve sert-alfa olarak adlandırılan yapı bütünüyle TiN fazından oluşacaktır (P.J. Laz vd., 2003). Azotça zengin olan bu sert-alfa fazı kırılğan bir yapıdadır ve mikro çatlak oluşumuna son derece yatkındır. Dolayısı ile uçak gaz türbini endüstrisinde kullanılan Titanyum alaşımı malzemelerde herhangi bir şekilde sert-alfa fazının varlığı, üretilen malzemenin yapısal bütünlüğünü bozacaktır.

Uzun yıllardan beri sert-alfa fazının özellikleri ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan birinde sert-alfa fazının ağırlıkça %3.5-14 oranında azot (N) ve % 2.5 üzerinde oksijen içerdiği saptanmışsa da (F.W. Wood, 1969) fazın kimyasal ve kompozisyonel tanımı mevcut değildir. Fakat genel olarak sert-alfa fazının çok düşük miktarda (örneğin ağırlıkça %3-4 gibi) azot içerdiği kabul edilmektedir (K.S. Chan vd., 2000). Şekil 5.1'de sert-alfa fazına ait literatür kaynaklı mikro yapı görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5.1. (a) 1010°C sıcaklık altında ısıtılmış Ti-7Al-2Mo-1V alaşımı yüzeyindeki sert-alfa fazına ve (b) 925°C sıcaklıkta difüzyonla birleştirilmiş Ti-6Al-4V alaşımının birleşme yüzeyindeki sert-alfa fazına ait mikro yapı görüntüleri (George F. Vander Voort, 2004).

Sert-alfa fazı ile ana metalin yoğunluklarındaki küçük değişimlerin radyografik olarak tespiti mümkün değildir. Fakat malzemenin yüzeyindeki ve iç yapısındaki boşluklar ultrasonik muayene teknikleri ile kolaylıkla tespit edilmektedir (J.D. Cotton vd., 2006).

Ultrasonik muayene yöntemi kullanılarak sert-alfa inklüzyonlarının tespiti;

- (1) Sert-alfa ve hasarsız ana malzemelerden alınan ultrasonik empedansa
- (2) Ana malzemenin kristal mikro yapısından gelen empedansa

bağlıdır.

Birinci madde sert-alfa hatasından gelen ultrasonik yankının boyutu ile ikinci madde ise tane sınırlarından gelen yankının boyutu ile sınırlıdır. Uçak motorlarının dönen parçalarında titanyum içerisindeki sert-alfa inklüzyonlarının tespiti aynı boyut ve şekle sahip açık metal kusurlarına (çatlaklar ve boşluklar) göre çok daha zordur. Ancak, bu tür kritik boyutlandırılmış kusurların tespiti ne kadar zor da olsa döngüsel gerilim ve yüksek sıcaklık altında malzemenin performansını önemli ölçüde düşürdükleri için

mutlaka tespit edilmelidirler (W.P. Conrardy, 1996; J.F. Wildey, 1991; M.Gigliotti, 1994).

Sert-alfa fazı oksijen ve azotun titanyum içerisinde alfa fazını kararlı hale getirmesi ile oluşur. Azotun yüzde ağırlık oranındaki artış ile sert-alfa inklüzyonunun ultrasonik hızı, sertliği, yoğunluğu ve kırılgenliği oransal olarak artmaktadır. Sertliğin ve kırılgenliğin artması ise malzemede hasar oluşumu riskini artırır (Joanne L. Murray, 1987; Shamblen vd., 1989; E.M. Grala, 1968). Literatürden edinilen bilgiye göre, sertlik değeri 32-36 Rockwell C olan Ti-6Al-4V malzemesi içerisinde, ağırlıkça %3.5-14 oranında azot içeren inklüzyonun sertliği 50-80 Rockwell C değerindedir. Ana malzeme ile sert-alfa inklüzyonu arasındaki bu sertlik farkı ultrasonik yansıtıcılığı ve dolayısı ile hatanın algılanabilirliğini arttırmaktadır (F.J. Margetan vd., 2002).

Titanyum parçaların tahribatsız muayenesi ile sert-alfa fazının algılanması ultrasonik teknikleri içermektedir. Bunun için; öncelikle içerisinde bilinen kompozisyon ve fiziksel özelliklerde olan ve hiçbir şekilde boşluk veya çatlak içermeyen yapay sert-alfa fazlarını barındıran, titanyum alaşımdan yapılmış referans bloklarının geliştirilmesi zorunludur. Yapay sert-alfa fazlarının boşluk ve çatlak içermemesi çok önemlidir. Çünkü herhangi bir süreksizlikten veya kusurdan yansıyan sinyaller malzemenin mikro yapısından yansıyan sinyallere oranla daha büyük olacak ve dolayısı ile bu süreksizliklerden gelen sinyaller malzemeye ait sinyallerin önüne geçecektir. Bu da kalibrasyon blokları içerisinde oturan yapay sert alfa fazlarının algılanmasını imkansızlaştıracaktır. Bu fazların algılanabilmesi için bir diğer önemli faktör de içerisine konulacakları kalibrasyon bloklarının birbiri ile hiçbir süreksizlik barındırmayacak şekilde birleştirilmesidir.

6. HAVACILIK VE UÇAK SANAYİNDE TİTANYUM ALAŞIMLARININ KULLANIMI:

Son yıllarda titanyum alaşımlarının gelişimi üzerine yapılan çalışmalar, titanyumun havacılık ve uçak sanayindeki kullanımı konularına kaymıştır (V.Henriques vd., 2005). Üstün dayanımları, yükseltilmiş sıcaklık performansları ve korozyon dayanımları göz önüne alındığında titanyum alaşımları havacılık ve uçak sanayi için en geniş pazara sahiptir. Ayrıca daha az yakıt daha hafif olmayı gerektirdiğinden, daha hafif parçaların kullanımı pazarı titanyuma itmiştir. Titanyum bu sanayide genel olarak uçak, uçak iskeleti, gaz türbini motoru, helikopter ve bazı uzay uygulamalarında kullanılmaktadır (M.Peters vd., 2003).

Titanyum alaşımlarının havacılık ve uçak sanayinde kullanımının ana nedenleri olarak:

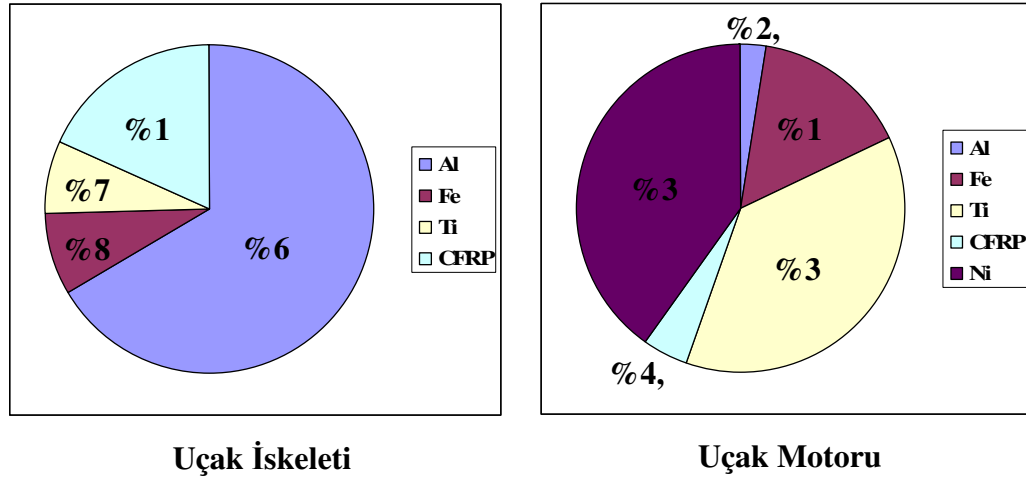
1. Ağırlık tasarrufu (Çelik veya Nikel bazlı süper alaşımlara kıyasla).
2. Yüksek sıcaklık kullanımı (Alüminyum alaşımları, Nikel bazlı süper alaşımlar ve çeliklere kıyasla).
3. Korozyon dayanımı (Alüminyum alaşımları ve düşük alaşımlı çeliklere kıyasla).
4. Polimer matrisli kompozitlerle galvanik uyumluluk (Alüminyum alaşımlara kıyasla).

özellikleri sayılabilir (R.R. Boyer vd., 1994).

Havacılık ve uçak sanayinde malzeme tasarımı diğer mühendislik uygulamalarına kıyasla belki de çok daha zorlu kriterlere göre yapılmaktadır. Ağırlık tasarrufu söz konusu olduğunda düşük yoğunluklu titanyum, daha yüksek dayanıma sahip olan çeliğe tercih edilebilir. Alüminyumun maksimum çalışma sıcaklığı olan 130°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ağırlık tasarrufu amacıyla alüminyum yerine titanyum alaşımları tercih edilmektedir. Çelik ve nikel bazlı süper alaşımlar ekonomik olmaları ve kolay preslenebilmeleri açısından titanyuma karşı alternatif malzemelerdir. Fakat bu malzemeler titanyumun 1.7 katı kadar yüksek yoğunluğa sahiptirler. Titanyumun sahip olduğu yüksek korozyon dayanımı, korozyona karşı koruyucu etkisi olan kaplamaların veya boyaların uygulanmasını gereksiz kılar (P.J. Andersen vd., 1980). Tüm bu

nedenlerden dolayı titanyum alaşımları, havacılık ve uçak sanayinde geniş kullanım alanına sahiptir.

Şekil 2.1’de ticari uçaklarda uçak motoru ve uçak iskeleti imalinde kullanılan malzemelerin dağılımını gösteren grafikler verilmektedir. Uçak iskeleti yapımında en çok alüminyum kullanılmaktadır. Çelik ve titanyumun kullanım oranı ise hemen hemen eşittir. Motor malzemesi olarak ise nikel bazlı alaşımların hemen arkasından yüksek bir oranda titanyum gelmektedir.



Şekil 6.1. Fiber Takviyeli Polimer (CFRP-carbon fiber reinforced polymer), alüminyum, titanyum ve demir alaşımı malzemelerin uçak iskeleti ve motor yapımında kullanım oranları (M.Peters vd., 2003).

Malzemelerin özelliklerine ilave olarak, maliyet de malzeme tasarımının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Mekanik özelliklerinin yanı sıra; dökülebilirlik, işlenebilirlik, plastik şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik gibi özellikler o malzemenin maliyetini belirleyen faktörler arasında sayılabilirler. Uçak ve titanyum üreticileri maksimize edilmiş malzeme performansının ve düşük maliyetin bir arada olduğu kombinasyonlar için çalışmaktadır (J.C. Williams, 1999).

593°C sıcaklık üzerinde çalışan jet motorları ve uçak iskeletinin diğer kritik yapısal parçaları için en yaygın malzeme olan titanyumun en geniş kullanımı uçak türbin motorlarındadır. Çoğu jet motorlarında titanyum bazlı alaşımların kullanılması ile ağırlıkta %20–30 arasında tasarruf sağlanmaktadır [5].

7. DİFÜZYONLA BİRLEŞTİRME:

Difüzyonla birleştirme, benzer ve/veya benzer olmayan iki malzemenin katı halde birleştirilebildiği bir imalat yöntemidir. Birleşme bölgesindeki mekanik özelliklerin kritik önem taşıdığı havacılık ve uçak sanayinde geniş uygulama alanı vardır. Bu uygulamalarda, kesitlerin ulaşılabilir yerlerde olmaması veya malzemelerin farklı olması gibi nedenlerle alışlagelmiş kaynak yöntemlerinin kullanılması mümkün değildir. Aynı malzemelerin difüzyonla birleştirilmesinde, esas malzemenin dayanım değerlerine yaklaşık olarak ulaşmak mümkündür (Kaynak Teknolojisi İkinci Sempozyumu, 1999). Birbirleriyle kırılğan metaller arası bileşikler (intermetallics) oluşturan metal alaşımları, ergime sıcaklıkları ve elastiklik sınırları çok farklı malzemeler, metal veya metal olmayan malzemeler de bu yöntemle birleştirilebilir (Mühendis Makine Dergisi, 1994). Difüzyonla birleştirmede, birbirleri ile temasta olan yüzeyler, minimum makroskobik deformasyon ile belirli bir süre erime noktalarının altındaki sıcaklıklarda yeterli sürelerde temasta bırakılıp difüzyona imkan verilerek birbirlerine tutturulurlar (M.T. Salehi, 1990). Bu tanımdan da anlaşılacağı gibi, yöntemin temel parametreleri sıcaklık, basınç ve süredir. Bununla beraber birleştirilecek parçaların yüzey şartları, ortam atmosferi ve soğuma hızı birleştirme kalitesine etki eden önemli parametrelerdir.

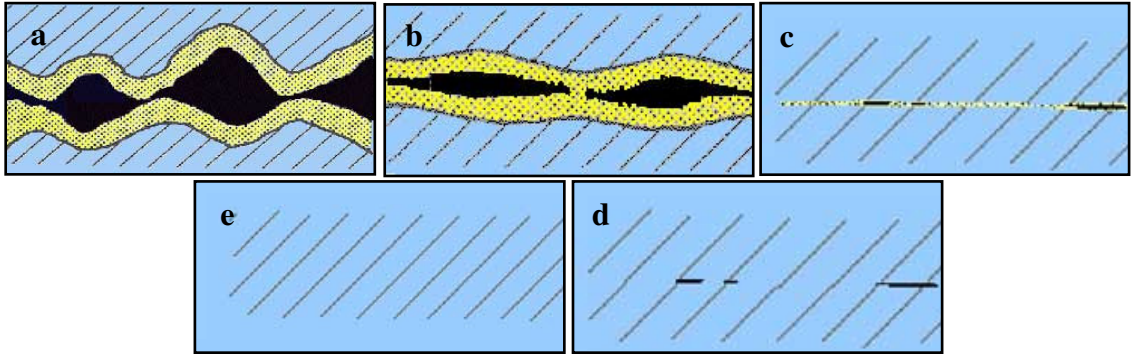
Sıcaklık, oksidasyonu, deformasyon miktarını, allotropik dönüşümü, tane boyutunu, yeniden kristalleşmeyi ve birleştirme süresini doğrudan etkilediğinden difüzyon ile birleştirme için en önemli parametredir. Birleştirilecek aynı cins malzemeler için difüzyonla birleştirme işlem sıcaklığı yaklaşık olarak ergime sıcaklığının 0.5–0.7 katı olarak alınmaktadır (R.Kara vd., 2006)

Yöntemin lehimlemeden farkı, lehimlemenin düşük ergime sıcaklığına sahip üçüncü bir metal içermesi ve bu üçüncü metalin eritilip katılaştırılması ile iki malzemenin birbirine kaynatılması tekniğine dayanmasıdır. Lehimlemede, boşluk kapamak için kullanılan sıvı metalin ince bir filmi, kapiler kuvvet ile yapışma ara yüzeyi içine işleyerek boşlukları doldurur. Bu film çok ince olmadığı takdirde yapışma tamamen dayanıksız olur (Ho-Sung Lee vd., 2007).

Difüzyonla birleştirmede ergime ve makroskobik deformasyon meydana gelmediğinden ve ara yüzeyler arasındaki birleşme atomik bağ ile gerçekleştiğinden ara yüzey metalurjik süreksizlik içermez ve dolayısı ile birleşme bölgesindeki mekanik özellikler ve mikro yapı ana metal ile benzerlik gösterir (M.F. Islam ve N.Ridley, 1998). Şekil 7.1’de difüzyonla birleştirme prosesinin aşamaları şematik olarak verilmektedir.

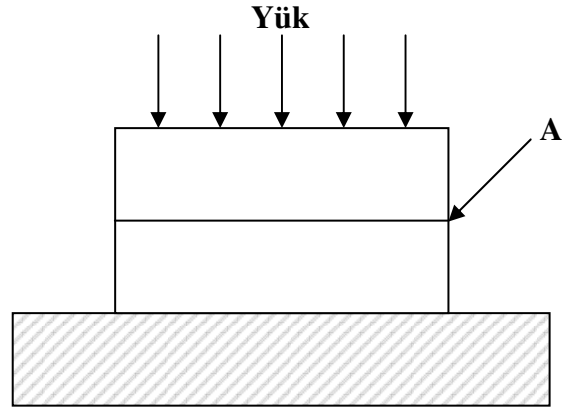
Ti-6Al-4V titanyum alaşımı düşük yoğunluk, yüksek dayanım, mükemmel korozyon direncine sahiptir. Bunların dışında, belirli koşullar altında plastik deformasyona izin veren ve süperplastik özellik gösteren Ti-6Al-4V alaşımı, süperplastik şekil verme ve difüzyonla yapışma proseslerinin kombinasyonu ile havacılık ve uçak sanayi uygulamalarında oldukça sık kullanılan bir malzemedir. Ti-6Al-4V titanyum alaşımının difüzyonla birleştirilmesi genellikle 900–950°C sıcaklık, 1.3–13.8 MPa (200–2000 psi) yük ve 1–6 saat aralığında yapılmaktadır.

Şekil 7.2’de ise difüzyonla birleştirme prosesi formülasyonları ile şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.1. Difüzyonla birleştirme prosesinin aşamaları;

- a) İlk nokta temas, kalıntı oksit tabakası içeren yüzeyler.
- b) Akma ve sürünme, daha ince kalıntı oksit tabaka ve küçük boşluk.
- c) Sonuç akma ve sürünme, çok ince kalıntı oksit tabaka ve az sayıda boşluk.
- d) Sürekli boş yer difüzyonu, kalıntı tabaka tamamen ortadan kalkmış ve çok az sayıda boşluk.
- e) Birleşme tamamlanmış (M.F. Islam ve N.Ridley, 1998).



dm: Difüzyon düzleminde kütlesi transferi

D: Difüzyon katsayısı

c/x: difüzyon düzleminde konsantrasyon değişim ölçüsü

A: yüzey

dt: süre

$$dm = -D \frac{c}{x} / A \cdot dt$$

Şekil 7.2. Katı-hal difüzyonunun şematik gösterimi ve formülasyonu [6].

8. ULTRASONİK MUAYENENİN TANIMLANMASI VE DİFÜZYONLA BİRLEŞTİRME ÜRÜNLERİNE UYGULANAN ULTRASONİK TEST YÖNTEMLERİ:

Tahribatsız muayenenin amacı, malzeme içerisindeki süreksizlikleri ve bunların boyutlarını, o malzemeyi tahrip etmeden bulmaktır. Malzemenin sağlamlığına ve güvenilir bir şekilde kullanılmasına, malzeme içinde var olan süreksizliklerin değerlendirilmesinden sonra karar verilir. Süreksizliklerin tip ve boyutları standartlarla karşılaştırılır ve standartların izin verdiği sınırı aşan süreksizlikler hata olarak kabul edilir.

Tahribatsız test yöntemleri, çeşitli fiziksel prensiplere dayanmakta olup, farklı şartlar altında uygulanmaktadırlar. Yöntem, test edilen malzemeye ve aranan süreksizliğin türüne göre seçilmektedir (Sabri Tuncel, 2005).

Havacılık ve uçak sanayinde:

- (a) Sıvı Penetrant (girinim),
- (b) Manyetik parçacık,
- (c) Girdap Akımları (Eddy Current),
- (d) Radyografi,
- (e) Kaçak testi,
- (f) Akustik Emisyon
- (g) Ultrasonik muayene yöntemleri kullanılmaktadır (Md. Alahi Uddin Khan, 1999).

Bu çalışmanın kapsamı gereği, ultrasonik test yöntemi tanımlanmış ve difüzyon ile birleştirilmiş ürünlere uygulanan ultrasonik test yöntemlerine aşağıda değinilmiştir.

İnsan kulağının duyamayacağı, 0.2Mhz ile 800Mhz aralığında yer alan sesler ‘ultrasonik’ olarak adlandırılırlar. Ultrasonik test yöntemi, metalik, metalik olmayan, manyetik ve manyetik olmayan çoğu malzemeye uygulanabilen, oldukça hassas bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu test yöntemi malzemelerdeki yüzey ve iç hataların tespitinde kullanılır. Malzemenin sahip olduğu çok küçük boyuttaki hatalar bu yöntem

kullanılarak tespit edilebileceği gibi hataların yeri ve boyutları saptanabilir. Birbirine paralel yüzeylerde ultrasonik test yöntemi kullanılarak kalınlık ölçümü de yapılabilmektedir. Testin etkin sonuçları incelenen numunenin yüzey durumuna, tane boyutu ve yönüne, numunenin akustik empedansına doğrudan bağlıdır (ASNT-Nondestructive Testing Handbook, Vol:10, 1996).

Ultrasonik test yöntemi genel olarak, yansıyan ve iletilen ses dalgaları prensibine dayanmaktadır. Ses, numune içerisinden geçerken sabit bir hıza sahiptir, fakat malzemenin akustik empedansındaki herhangi bir değişiklik, sesin hızında da değişikliğe sebep olacaktır. Dolayısı ile ses dalgaları belirli enerji kaybı ile malzeme boyunca ilerler ve son olarak ara yüzeyden yansır. Yansıyan demet, malzeme içindeki hataların varlığını ve yerini tanımlamak için incelenir (J. Krautkramer ve H. Krautkramer, 1969).

Yansımanın derecesi, karşı yüzeyi oluşturan malzemenin fiziksel haline ve bu malzemenin fiziksel özelliklerindeki küçük değişimlere bağlıdır. Örneğin, ses dalgaları metal-gaz ara yüzeyinden neredeyse tamamen yansır. Metal-sıvı veya metal-katı ara yüzeylerinde ise kısmi yansıma gerçekleşir. Yansıyan enerjinin spesifik oranı genel olarak karşı yüzeyi oluşturan malzemenin kesin olan özelliklerinin oranına bağlıdır (ASNT-Nondestructive Testing Handbook- Vol:9 1996).

Ultrasonik test yöntemleri ile çatlaklar, tabakalanmalar, çekilme boşlukları, talaşlar, yapışma hataları, boşluklar ve diğer tüm süreksizlikler kolaylıkla saptanabilir. İnklüzyon ve yapı içerisindeki homojenliği bozan diğer unsurlar yine kısmi yansıma veya ultrasonik ses dalgalarının saçılması ile tanımlanabilir. Çoğu ultrasonik inceleme, insan kulağının duyabileceği ses frekansı aralığının (20Hz–20kHz) çok üzerinde olan 1–25MHz frekans aralığında yapılmaktadır. Yöntem genel olarak malzeme içerisindeki hataların karakterizasyonu, yüzeye yakın hataların saptanması, yapışma ara yüzeyinin karakterizasyonu, kalınlık ölçümü, fiziksel özelliklerin ve tane boyutunun belirlenmesinde kullanılmaktadır (D. Ensminger, 1973).

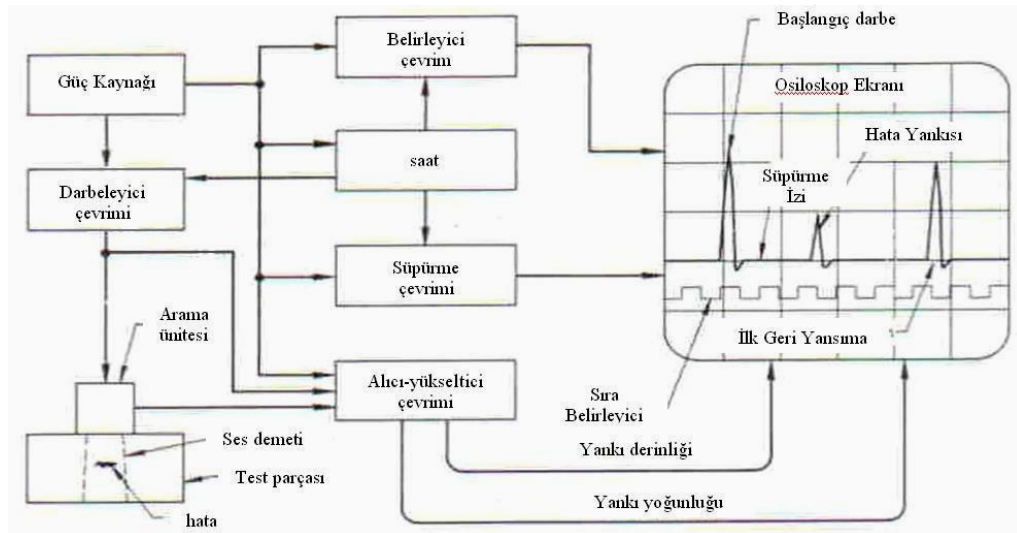
Ultrasonik enerji demeti test nesnesi üzerine direk olarak gönderildikten sonra ya enerji ölçülen kalınlığın başından sonuna kadar iletilir ya da enerji ölçümü yapılmak istenen nesne içerisindeki süreksizliklerden yansır (Paul McIntire, 1991).

İletilen veya yansıyan akustik enerji 3 farklı şekilde görüntülenir ve kaydedilir.

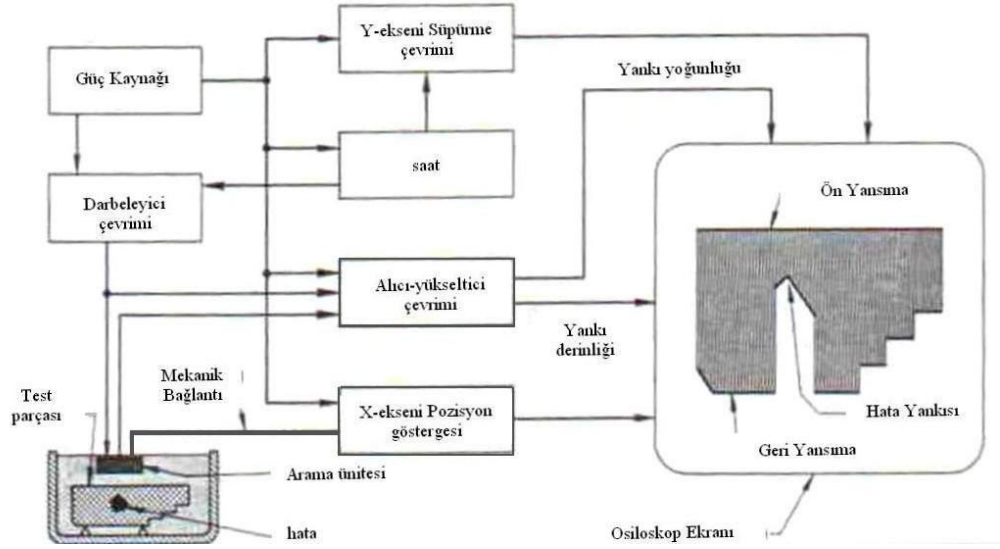
- (1) **A tarama:** Darbe-yankı sisteminin basit bir bileşenidir. Bazı radar ekipmanlarında benzer teknik kullanılır. Video, katot ışın tüpü veya LCD monitörden oluşur. Sonuç sürekli olmayan derinlik ve sinyal genliği şeklinde görüntülenir.
- (2) **B Tarama:** Sonuçlar sürekli olmayan derinlik ve kesit görüntüsü dağılımı şeklinde görüntülenir.
- (3) **C Tarama:** Sonuçlar sürekli olmayan düz taslak olarak görüntülenir (J.C. Smack, 1954).

Bu çalışmada, içerisine sert-alfa yapay hataları yerleştirilmiş bloklar üzerinde difüzyonla birleştirme sonrası yapılan ultrasonik muayenede C Tarama görüntüleri kullanılmıştır.

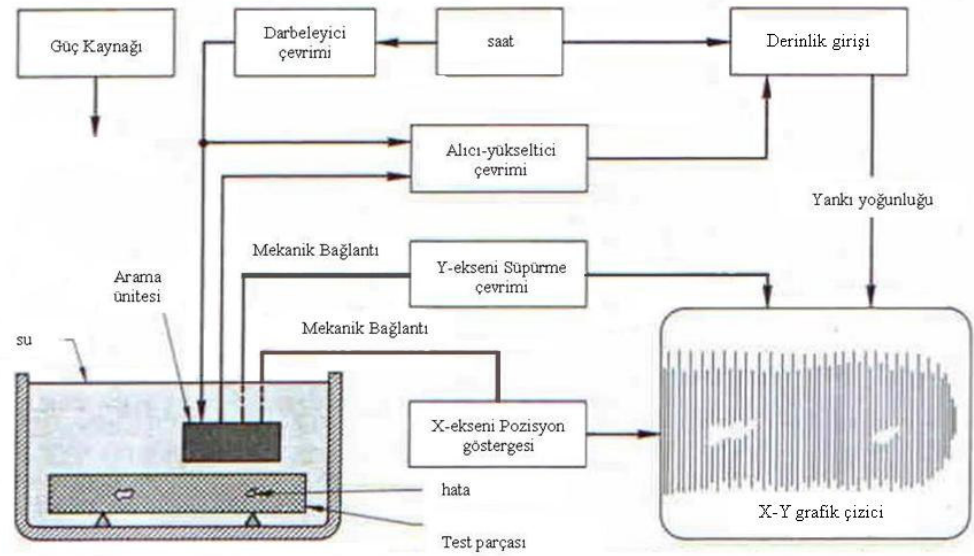
Şekil 8.1. Şekil 8.2. ve Şekil 8.3.'de A, B, C tarama sistemleri şematik olarak verilmektedir.



Şekil 8.1. Tipik A tarama sistemi (J.C. Smack, 1954).



Şekil 8.2. Tipik B tarama sistemi (J.C. Smack, 1954).



Şekil 8.3. Tipik C tarama sistemi (J.C. Smack, 1954).

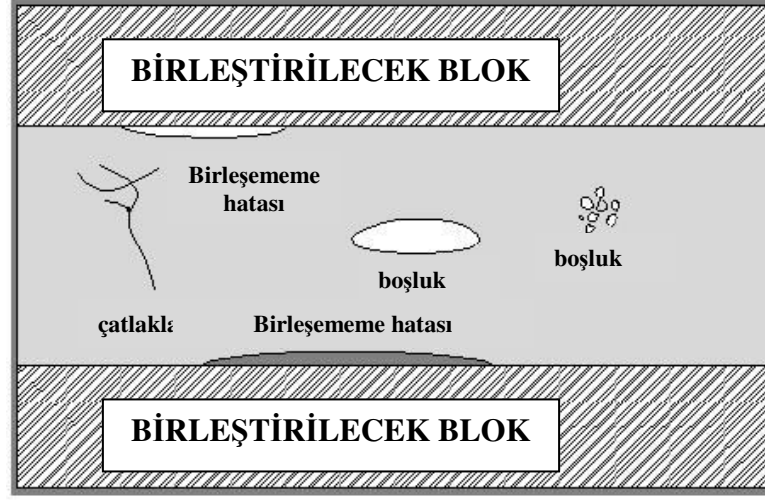
Difüzyonla birleştirme yöntemi, kaynak ve perçinleme gibi diğer yöntemlere kıyasla pek çok avantajı bulunan, yaygın bir metalurjik birleştirme yöntemidir. Bu yöntem kullanılarak benzer veya farklı metalik parçalar, sıcaklık ve basınç etkisi ile birleştirilebilirler. Difüzyonla birleştirme prosesi, birleşme yüzeyleri olabildiğince düz olacak şekilde hazırlanan iki parçanın, yüksek sıcaklık altında belli bir basınç ile bekletilmesi prensibine dayanır. Difüzyon, iki parçanın en yüksek noktalarının teması ile bu noktadan başlar. Basınç ve sıcaklık arttıkça plastik deformasyon ara yüzeyin yalıtılmış bir boşluğa dönüşmesine sebep olacak, sonuçta difüzyon hızı artacak ve birleşme bölgesi genişleyecektir. Atomik difüzyon maksimum hıza ulaştıktan sonra ara yüzeydeki boşluklar tamamen kapanacaktır. Proses genellikle malzemelerin ara yüzeyinde oluşan dokular arası veya ara yer difüzyonu ile tamamlanır.

Yapıştırma ile oluşturulan yapılar, modern endüstride, özellikle de uçak ve roket sanayinde oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler. Birleştirilmiş yapıların emniyetli ve güvenli olduğundan emin olmak için etkin ve uygun tahribatsız muayene yöntemleri ile incelemeleri zorunludur. Mükemmel montajlarda dahi hedef, hem zararsız olan kusurların hem de ilk yüksek yükleme hatalarının olası sebeplerinin veya azaltılmış servis ömrünün saptanmasıdır (John W.Parks, 1976). Birleştirilmiş yapıların üretimindeki birincil problem yapışma bölgelerinin kalite kontrolü için kullanılan tahribatsız muayene yönteminin uygunluğudur (T. Chernobelskaya vd., 1979). Difüzyonla birleştirilmiş malzemeler de, diğer yöntemlerle birleştirilmiş malzemelerdeki gibi tahribatsız muayene yöntemleri, özellikle ultrasonik test yöntemleri kullanılarak test edilmektedirler. Malzemelerin ve ara yüzeylerin akustik özellikleri elastik özellikleri ile ilişkili olduğundan ultrasonik test yöntemleri, kullanılan tüm tahribatsız muayene yöntemleri arasında en yüksek hassasiyete sahip olan muayene yöntemidir (E.E. Jamieson, 2000).

Tanelerden gelen güçlü saçılım ve düşük sinyal-gürültü oranı nedeni ile difüzyonla birleştirilmiş titanyum alaşımlarının kalitesinin, ultrasonik yöntemlerle değerlendirilmesi oldukça güçtür. Bu tür malzemelerin ultrasonik muayenesinde; test sisteminin tasarımı ve kristal çap, odak uzunluğu, odaksal kolonun çapı ve odaksal

kolonun uzunluğu gibi parametrelerin optimizasyonu oldukça önemlidir (L Lin vd., 2006).

Birleştirilmiş malzemelerde gözlenen hatalar, iki farklı parçanın birleşme ara yüzündeki inklüzyonlar, boşluklar, çatlaklar sebebi ile oluşmaktadır. şekil 8.4.'de tipik birleşme hatalarının birlikte gösterildiği şematik çizim verilmektedir.



şekil 8.4. Tipik birleştirme hataları [7].

9. ELEKTRO-EROZYON İLE İŞLEME TEKNOLOJİSİ:

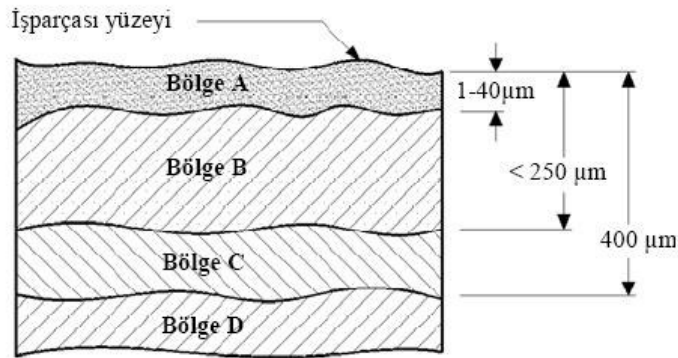
Bu çalışmanın amacı olan yapay hatalı muayene bloklarının imalatının önemli bir kademesi olması nedeniyle elektro-erozyon yöntemi aşağıda kısaca ele alınmıştır. Böylelikle kullanılan materyal ve/veya proseslere yapısal ve/veya boyutsal etkisinin daha iyi anlaşılması hedeflenmiştir.

Günümüz teknolojisinde elektro-erozyon ile işleme yaygın olarak kullanılan bir malzeme işleme yöntemidir. Özellikle çok sert malzemelerin ve karmaşık biçimlerin kolaylıkla işlenebilmesi bu yöntemin kullanım alanını genişletmiştir. Elektro-erozyon ile işleme sert malzemeleri ve karmaşık şekilleri, doğru boyutlarda işlemenin mümkün olduğu bir imalat yöntemidir. EDM (Electro discharge machining) ile işlenecek iş parçalarının elektrik iletkenliği olmalıdır. İşleme özellikleri malzemenin sertlik, tokluk ve mukavemet değerlerinden bağımsızdır. Buna karşın işleme verimi malzemenin erime sıcaklığı ve ısı iletkenliğine bağlıdır. EDM %80 ağırlıklı olarak takım endüstrisinde kullanılmaktadır. Göreceli olarak az oranda da çeşitli özel imalat işlerinde kullanılmaktadır (M. Kutz, 1998).

EDM yöntemi, iletken olmayan dielektrik sıvı içerisine tamamen daldırılmış ve birbirine değmeyecek konumda yerleştirilmiş elektrik iletken elektrot ile iş parçası arasında oluşan elektrik kıvılcımlarının iş parçası yüzeyinden çok küçük kraterleri eritmesi ve buharlaştırması esasına dayanır. Her bir kıvılcımın ‘krater eritme ve buharlaştırma’ görevini tamamlamasının ardından oluşan işleme artıkları ortamdan dielektrik sıvı tarafından uzaklaştırılır. Kıvılcımların işleme yüzeyinde farklı bölgelerde tekrarlanması ile iş parçası oyulur. Geleneksel imalat yöntemleriyle işlenmesi çok zor veya imkansız olan sert malzemeleri ve karmaşık geometrik şekillere sahip parçaları rahatlıkla işleyebilmesinden dolayı bu işleme yönteminin özellikle kalıp, takım imalatında, havacılık uzay ve otomotiv sanayiinde kullanım alanı hızla gelişmektedir. İşleme sırasında elektrot ile iş parçası arasında herhangi bir dokunma olmadığından, kesme kuvvetinin olumsuz etkileri (deformasyon, hassasiyet bozuklukları v.b.) mevcut değildir. Bundan dolayı EDM yöntemi, işleme sırasında kırılabilir ve gevrek parçaları işleme açısından da önemli bir yere sahiptir. Bunlar dışında bu yöntemle

eğilimli veya eğrisel yüzeylere çok küçük delikler delinebilmektedir (Mc Geough, 1988; G.F. Benedict, 1987).

EDM sonrasında iş parçası doğrudan kullanılacaksa elde edilebilecek son yüzey pürüzlülüğü çok önemli bir özelliktir. Elektro-erozyon ile işlenen yüzeyler mikroskop altında incelendiğinde, yüzeylerin kıvrılcımların oluşturduğu üst üste binmiş kraterlerden meydana geldiği görülür. Bu kraterlerin boyutları ve şekilleri doğrudan yüzey pürüzlülüğünü belirlemektedir. Bundan dolayı, yüzey pürüzlülüğünü karakterize etmede en önemli katkı, krater geometrilerinin (çap ve derinlik özellikleri) incelenmesi ile sağlanabilir. Kıvrılcımların etkisi ile hızlı ısınan ve ergiyen, dielektrik sıvı ile hızlı soğuyan iş parçası yüzeyi tamamen farklı metalurjik yapıdaki ve sertlikteki katmanlardan oluşur (Şekil 9.1). Isı dağılımının ve metalurjik değişimlerin homojen olmamasından dolayı iş parçası yüzeyinde kalıcı gerilmeler meydana gelir. Bu gerilmeler de yüzeyde mikro çatlakların oluşmasına sebep olmaktadır. Parçanın kullanımı esnasında oluşacak çevrimsel yüksek gerilmeler veya işleme sonrası parçaya uygulanacak ısıl işlemler bu çatlakları ilerleterek parçanın hasar görmesine veya tamamen kullanılamayacak hale gelmesine sebebiyet vermektedir. Bu nedenlerden dolayı, EDM'in planlanması esnasında, işleme parametrelerinin doğru seçimi çok önemlidir. İşleme hızı, yüzey pürüzlülüğü, yüzey katmanları ve elektrot aşınma karakteristikleri dikkate alınarak seçilen işleme parametreleri, EDM yönteminin boyutsal hassasiyeti yüksek, uzun ömürlü, işlevsel ve maliyeti düşük parçalar üretmesini sağlar (R.K. Springborn, 1967; [8]; Z.E. Ergün ve C.Çoğun, 2006).



Şekil 9.1. EDM'deki iş parçası yüzeyinde oluşan katmanlar (Bölge A: ergimiş-katılaşmış katman, Bölge B: ısıl olarak etkilenmiş katman, Bölge C: geçiş katmanı, Bölge D: ana metal) (Z.E. Ergün ve C.Çoğun, 2006).

EDM teknolojisinde iş parçası işlenirken doğal olarak elektrotta da aşınma meydana gelmektedir. Vurum jeneratörlerindeki son teknolojik gelişmeler ve işleme parametrelerinin ayarlanması üzerine yapılan çalışmalar elektrot aşınmasını çok küçük değerlere düşürmesine rağmen tamamen ortadan kaldıramamıştır. İşleme sırasında elektrotta oluşan aşınma, iş parçası kalıp boşluğunu doğrudan etkileyerek şekil bozulmasına neden olmaktadır.

Elektrot aşınmasının tanımlanmasında kullanılan elektrot aşınma hızı (EAH) terimi:

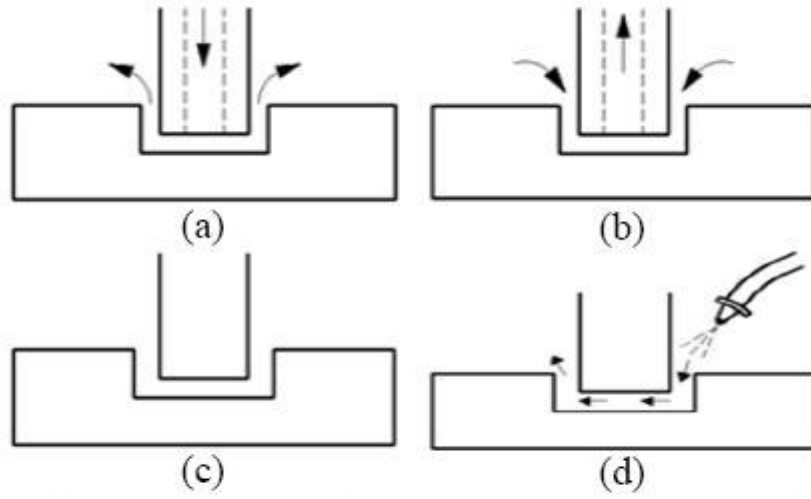
$$EAH [mm^3/dak]=\text{elektrottan aşınan hacim} / \text{işleme süresi} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Elektrottaki geometrik aşınma, farklı bölgelerde farklı geometrik bozulmalar (değişimler) şeklinde ortaya çıkmaktadır. Elektrot yan yüzeylerindeki, köşelerindeki, kenarlarındaki ve ön yüzeylerindeki aşınmaların farklı karakterde olduğu bilinmektedir (Tricarico vd., 1988; J.R. Crookall, 1979; C. Çoğun ve Ş. Akaslan, 2002). EDM işleminin ana problemlerinden biri olan elektrot aşınmasının tam olarak anlaşılabilmesi için, işleme parametrelerinin değişimiyle elektrot aşınma hızının ve ön yüzey aşınmasının değişiminin bir bütün olarak değerlendirilmesi gerekir.

EDM'de akımdaki artış boşalım enerjisini arttıracığından elektrot yüzeyinde oluşacak kraterden daha fazla malzeme ergimesine ve buharlaşmasına neden olur. Bu da EAH değerini artırır (C. Çoğun ve O. Poyrazoğlu, 2001; Y. Chen and S.M. Mahdavian, 1999). Vurum süresinin düşük değerlerindeki artışlar boşalım enerjisini arttırdığından dolayı EAH değerini de artırır (S.L. Chen, 1999). Uzun vurum sürelerinde EAH değerinin artmadığı, hatta birçok işleme koşulunda azaldığı görülür. Bunun nedeni boşalım kanalında akım yoğunluğunun azalması ve elektrottaki ısı transferi süresinin artmasıyla vurum süresine oranla kraterlerden daha az malzemenin buharlaşabilmesi ve ergimesidir.

Elektrot aşınması üzerine yapılan çalışmalarda dielektrik olarak gaz yağı kullanımı yaygındır. Bazı deneysel çalışmalarda dielektrik olarak saf suyun yanı sıra şeker, glikol, gliserin, polietilen glikol gibi maddelerin sulu çözeltileri de kullanılmıştır. Gaz yağında

akımın artışı ile EAH artarken diğer sıvılarda EAH azalmıştır (W. König and L. Jörres, 1987). Dielektriğin elektrot içinden püskürtme veya emme tipinde uygulanması (Şekil 9.2), yanal püskürtme uygulamasına göre daha düşük EAH vermektedir [9].



Şekil 9.2. Dielektrik uygulama yöntemleri (a) Elektrot içinden püskürtme, (b) Elektrot içinden emme, (c) Statik, (d) Yanal püskürtme [9].

10. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

10.1. Deney Detayları

Metalik bloklar ticari olarak uçak motoru parçalarında kullanılmak üzere üretilmiş ve proseslenmiş Ti-6Al-4V alaşımından kesilmiştir. Yapay hataların yerleştirileceği yarı küresel ve yarı küp formundaki boşluklar, blokların her iki yarısında da üst üste gelecek şekilde işlenmişlerdir. Boşluklar blok yüzeyine, elektro-erozyon (Electro discharge Machining-EDM) yöntemi kullanılarak açılmıştır.

Üretilen yapay hataların karakterizasyon çalışmaları Işık Mikroskobu, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Elektron Prob Mikro Analizör (EPMA), X Işınları Difraksiyonu (XRD), Çizik Testi (Scratch Test), Mikro Sertlik ve Confocal Raman Spektrometresi teknikleri kullanılarak yapılmış, VHP sonrası içerisine yapay hata yerleştirilen referans bloklar ultrasonik muayeneye tabi tutulmuşlardır.

10.2. Yöntem

Üretilen numuneler metalografik ve ultrasonik muayene yöntemi ile kontrol edilmişlerdir. Ayrıca, vakum altında sıcak presleme sonrası metal blok-hata ara yüzeyi ve metal alt blok -metal üst blok ara yüzeyleri de metalografik olarak incelenmiştir. Malzemelerin tane boyutları X100 büyütmede alınan optik mikroskop görüntüleri ASTM tane boyutu skalası ile karşılaştırılmıştır.

Ultrasonik muayene incelemeleri esnasında, 3.5” odak uzaklığı ile 10MHz I3 transducer kullanılmıştır. Boyuna ses demeti numunenin yüzeyinde odaklanmış ve kalibrasyon kazancı %80Amplitude+3db değerlerine set edilmiş arka cidar yansıması ile belirlenmiştir.

Farklı koşullarda oluşturulan sert-alfa fazlarını birbirleri ile kıyaslamak için ışık mikroskobu, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X Işınları Difraksiyonu (XRD), yanı sıra Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Elektron Prob Mikro Analizör (EPMA),

Confocal Raman Spektroskopisi, Mikro Sertlik, Çizik Testi (Scratch test) ve Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) yöntemleri de kullanılmıştır.

Isıl işlemler sonrası üretilen ‘sarı’ ve ‘beyaz’ sert alfa fazlarının kıyaslanması amacı ile numuneler, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu çalışmaları öncesinde metalografik tekniklerle hazırlanmıştır. SiC ile zımparalama ve 1µm elmas pasta ile kaba parlatmadan sonra 0.5 µm koloidal silika ile ince parlatma yapılmıştır. Bu şekilde hazırlanan numuneler özellikle sert-alfa tabakasının belirginleştirilmesi için 50ml H₂O, 50 ml %10’luk oksalik asit ve 1ml HF’den oluşan çözelti ile dağlanmıştır.

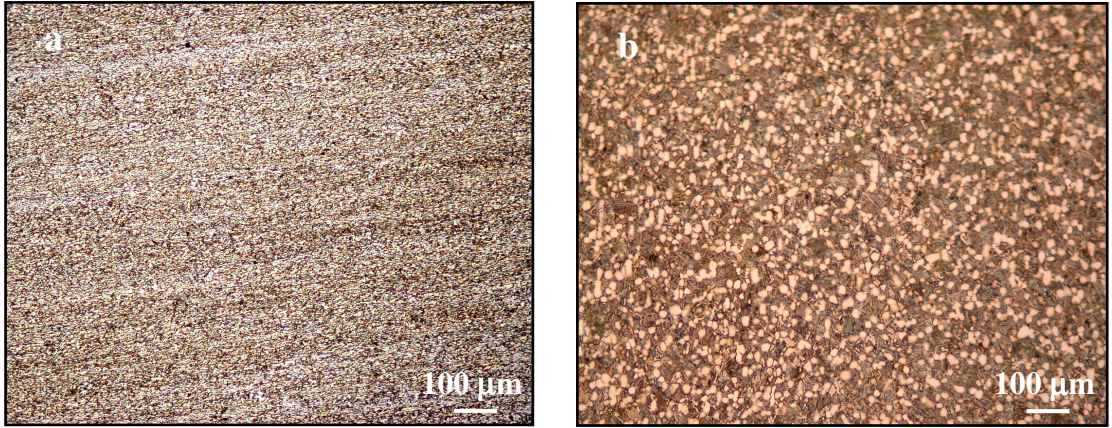
Optik mikroskop incelemeleri için Nikon L150 model ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu incelemeleri için JEOL JSM 6335F model Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) kullanılmıştır. İncelemeler sonrasında her bir numune için, numune yüzeyinde oluşan sert-alfa tabakası üzerinden ve matris üzerinden 300gram yük altında mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Scratch test, CSM microscratch test cihazı kullanılarak, 200µm çapında elmas ucun 0.25 mm/dak. hızla numune üzerinde çizik oluşturması prensibine dayanarak gerçekleştirilmiştir. Test bitiminde numuneye uygulanan son yük 30N olup, yükleme hızı 3N/dak. olarak seçilmiştir. Quesant USPM model AFM cihazında 40x40 µm boyutundaki alan 3 Hz hız ile taranmış ve her iki tip numune için yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. XRD çalışmaları ise Shidmatzu XRD 6000 kullanılarak yapılmıştır. EPMA çalışmaları için CAMECA SX-100 model mikroskop, Confocal Raman Spektroskopisi çalışmaları için ise TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü’nde dizayn edilen Confocal Lazer Raman ve Fotoluminesans Mikrospektrometre Cihazı kullanılmıştır.

Geçirimli Elektron Mikroskobunda yapılan incelemeler için her bir gruptan numuneler, ~120µm kalınlığa inceltildikten sonra kesit alan yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan kesit numuneleri her iki tarafından da oyuklandırma yöntemi ile (dimple grinding) merkezde ~5 µm kalınlık olacak şekilde inceltirilmiştir. Elektron geçirgenliği için inceltme iyonla parlatma sistemi ile Gatan 691 PIPS- Precision Ion Polishing System (4°-3kV) kullanılarak sağlanmıştır. Hazırlık aşaması tamamlanan numuneler

JEOL 2100 HRTEM (Yüksek Çözünürlüklü Geçirim Elektron Mikroskobu) ile 200kV değerinde incelenmiştir.

10.3. Ana Malzeme

Biyet ve dövme olmak üzere iki farklı proses ürünü Ti-6Al-4V alaşımı malzeme kullanılmıştır. Tane boyutu ölçümleri malzemedeki alfa fazı baz alınarak yapılmıştır. Titanyum alaşımı biyet parçalar eşeksenli ve plaka şeklinde alfa tanelerinden oluşmaktadırlar. Tane boyut analizi için eşeksenli taneler göz önünde bulundurulmuş, tane boyutu bu malzemelerde ASTM8 olarak ölçülmüştür. Titanyum dövme malzemeler ise ASTM13–14 boyutunda tamamen eşeksenli tanelerden oluşmaktadırlar (A.A. Kaya vd., 2006). (Şekil 10.1).



Şekil 10.1. Ti-6Al-4V (a) dövme ve (b) biyet blokların ışık mikroskobu görüntüleri.

10.4. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada, titanyum referans bloklar içine yerleştirilecek yapay hata olarak titanyumun kırılğan bir fazı olan sert-alfa fazı kullanılmıştır. Hatalar, kontrollü atmosfer altında, ısıt işlem yoluyla üretilmiştir. Çalışmanın bir bölümünde ısı kaynağı olarak lazer kaynağı (laser welding) kullanılmıştır.

Isıl işlem sırasında sert-alfa fazı malzeme yüzeyinde difüzyon etkisiyle oluştuğundan, tabaka kalınlığını belirlemek için numunenin kesitinde sertlik taraması yapılmıştır.

Yapılan sertlik taraması sonrasında, yüzeyden itibaren sertliğin düştüğü noktaya kadar olan uzaklık sert-alfa tabakasının kalınlığı olarak belirlenmiştir.

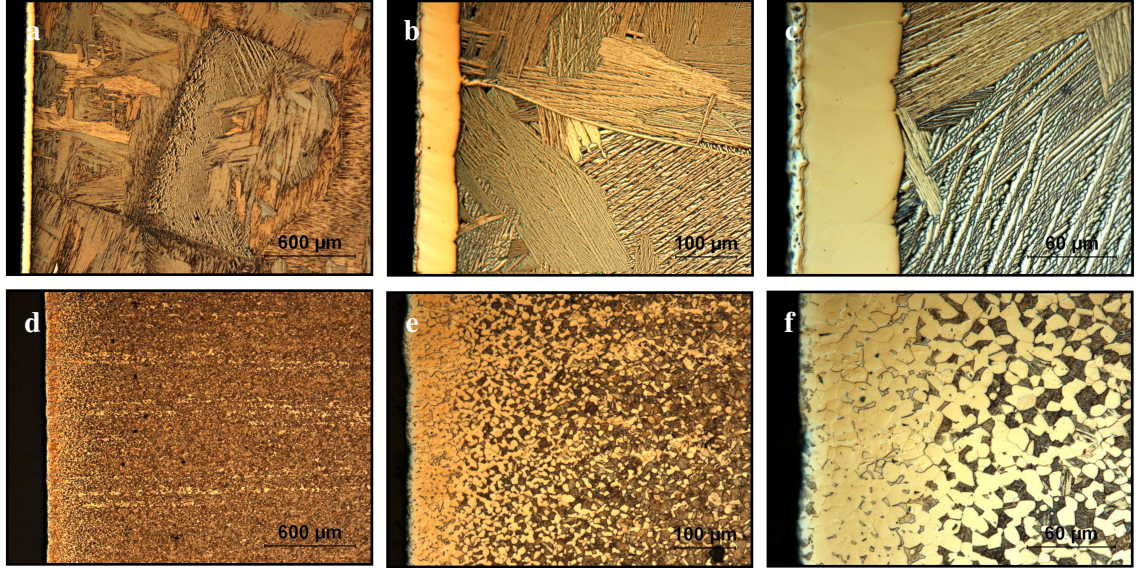
Sert-alfa fazı literatürde alfa tabakası olarak da geçmektedir ('hard- α ' veya ' α -case'). Gerçekte bu fazın ağırlıkça %3.5-14 oranında azot (N) ve % 2.5 üzerinde oksijen içerdiği saptanmışsa da (F.W. Wood, 1969) sert-alfa fazının kimyasal ve kompozisyonel tanımı mevcut değildir. Ancak literatürden sert-alfa fazının mikro yapısının, azot miktarı ve ortam sıcaklığına bağlı olarak tek fazlı alfa titanyum ya da çift fazlı alfa titanyum ve TiN veya Ti₂N şeklinde olabileceği bilinmektedir. Dolayısı ile bu çalışmada TiN fazı da sert-alfa hata fazı olarak kabul edilmiş ve iki tip sert-alfa fazı üretilmiştir. TiN fazı sarı renginden dolayı çalışmada 'sarı' sert-alfa olarak isimlendirilmiş, diğer sert-alfa fazı ise ışık mikroskobu altında beyaz renkte görüldüğü için 'beyaz' sert-alfa olarak isimlendirilmiştir. (TiN) 'sarı' sert-alfa azotça, ve α -titanyum 'beyaz' sert-alfa ise oksijence zengin fazlardır.

Ti-6Al-4V alaşımı numune, yüzeyinde sert-alfa tabakası oluşturmak amacı ile ilk olarak azot gazı altında 1250°C–2.5 saat / havada soğutma ısıl işlemine tabi tutulmuş, ısıl işlem sonrası numune yüzeyinde oldukça düzgün sarı renkte bir sert-alfa tabakası gözlenmiştir. Soğutma pratiğinin numune yüzeyinde oluşturulan sert-alfa tabakasına etkisini görmek amacı ile soğutma hızının artırıldığı, azot gazı altında 1250°C–2.5 saat / suda soğutma ısıl işlemi yapılmıştır. Son olarak, oluşturulan sert-alfa tabakasının kalınlığını arttırmak amacı ile ısıl işlem süresinin 2.5 saatten 8 saate çıkarılmış, ısıl işlem sonrası numune havada soğutulmuştur. Azot gazı altında yapılan ısıl işlemler sonrasında, numune yüzeyinde oluşan sert-alfa tabakası sarı renkli ve kırılgan TiN fazıdır.

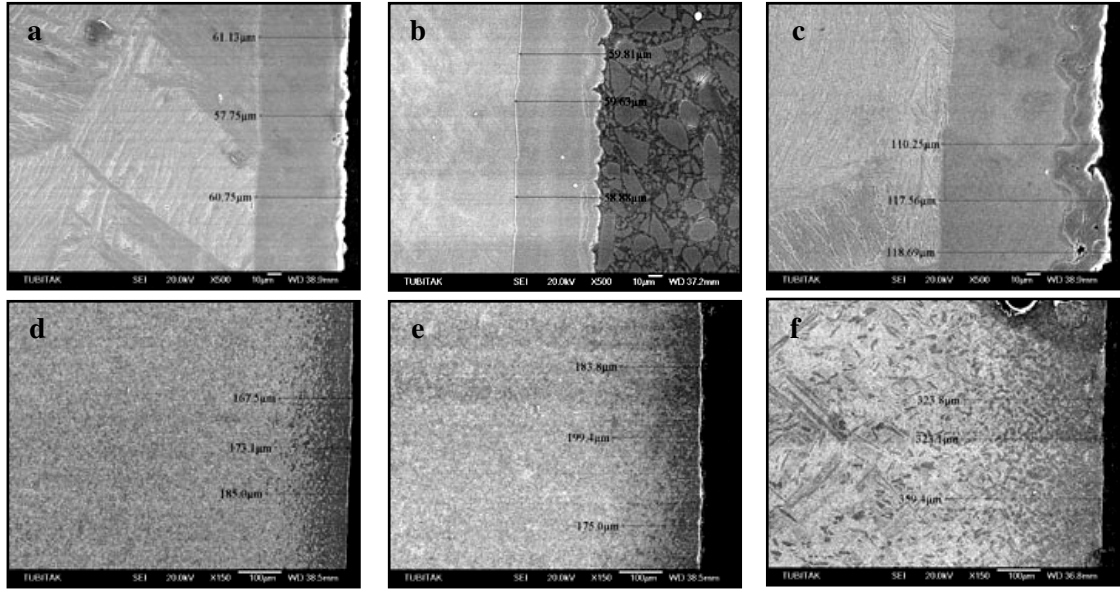
Azot gazı verilmeksizin gerçekleştirilen 950°C–1.5 saat / havada soğutma ısıl işlemi sonrası numune kesitinde yapılan mikro yapı çalışmaları sonucu numune yüzeyinden içeri doğru, sarı sert-alfa olarak adlandırılan tabaka kadar keskin sınırları olmayan bir difüzyon tabakası gözlenmiştir. Soğutma pratiğinin sert-alfa tabakasına etkisini görmek için ısıl işlem azot gazı verilmeksizin 950°C–1.5 saat / suda soğutma koşullarında gerçekleştirilmiş, yapılan mikro yapı çalışmaları sonucu her iki tip ısıl işlem prosesi için

de suda soğutma pratiğinin sert-alfa tabakası kalınlığına bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Son olarak, ‘beyaz’ sert-alfa tabakasının kalınlığını arttırmak amacı ile ısıtım işlem süresi 1.5 saatten 4.5 saate çıkarılmış, ısıtım işlem sonrası numune havada soğutulmuştur. Azot gazı verilmeksizin yapılan ısıtım işlemler sonrasında, numune yüzeyinde oluşan tabaka beyaz kontrast veren ve içinde oksijen çözünmüş olan α -titanyum fazıdır. Düşük oksijen basıncı, ısıtım işlem esnasında fırın içerisine yerleştirilen zirkonyum folyo sayesinde sağlanmıştır.

Şekil 10.2’ de çeşitli proses koşullarında üretilen ‘sarı’ ve ‘beyaz’ sert-alfa tabakalarına ait ışık mikroskobu, Şekil 10.3’de ise SEM görüntüleri verilmektedir.

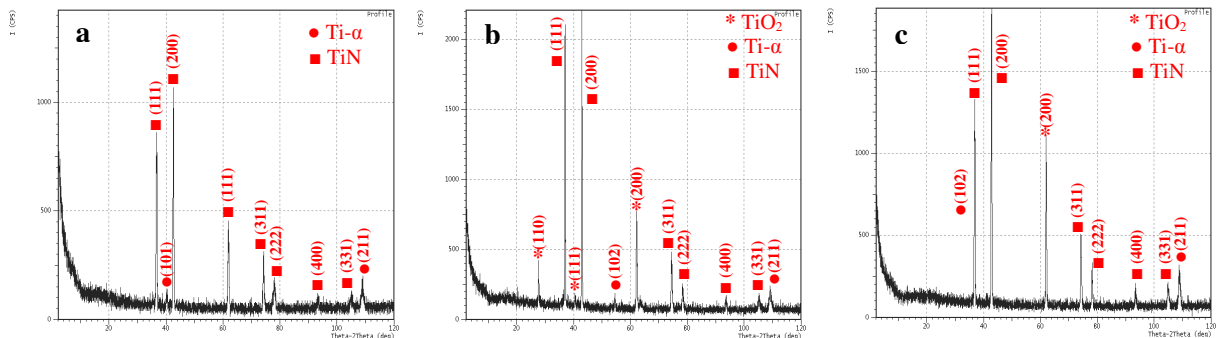


Şekil 10.2. (a) 1250°C-2.5 saat / suda soğutma, (b) 1250°C-2.5 saat / havada soğutma, (c) 1250°C-8 saat / havada soğutma, (d) 950°C-1.5 saat / suda soğutma, (e) 950°C-1.5 saat / havada soğutma ve (f) 950°C-4.5 saat / havada soğutma sonrası numunelerin kesitinden alınan ışık mikroskobu görüntüleri.

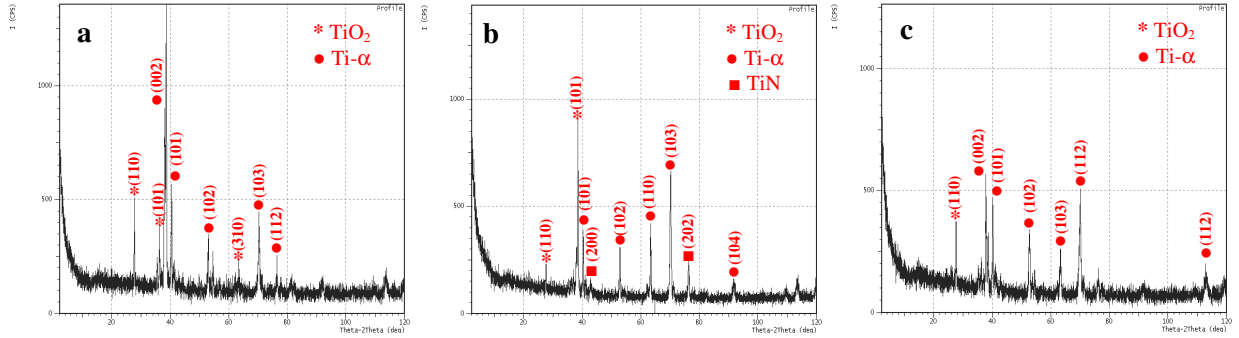


Şekil 10.3. (a) 1250°C-2.5 saat / suda soğutma, (b) 1250°C-2.5 saat / havada soğutma, (c) 1250°C-8 saat / havada soğutma, (d) 950°C-1.5 saat / suda soğutma, (e) 950°C-1.5 saat / havada soğutma ve (f) 950°C-4.5 saat / havada soğutma sonrası numunelerin kesitinden alınan SEM görüntüleri.

Şekil 10.4’de azot gazı altında gerçekleştirilen ısı işlemler sonrası, Şekil 10.5’de ise azot gazı verilmeden gerçekleştirilen ısı işlemler sonrası numunelerine ait XRD spektrumları verilmektedir. X ışınları difraksiyon paterni sonuçlarına göre azot gazı verilerek düşük atmosfer basıncı altında 1250°C’de yapılan ısı işlem numunelerinin tümünde TiN fazı tespit edilmiştir. Azot gazı verilmeden düşük atmosfer basıncı altında 950°C’de yapılan ısı işlemde ise α -Ti fazı görülmüştür (S. Üçüncüoğlu vd., 2005).



Şekil 10.4. Ti-6Al-4V numune üzerinde azot gazı altında gerçekleştirilen (a)1250°C–2.5 saat / havada soğutma, (b)1250°C–2.5 saat / suda soğutma, (c)1250°C-8 saat / havada soğutma ısı işlemleri sonrası yüzeyden alınan XRD paternleri.



Şekil 10.5. Ti-6Al-4V numune üzerinde azot gazı verilmeksizin gerçekleştirilen (a)950°C-1.5 saat / havada soğutma, (b)950°C-1.5 saat / suda soğutma, (c)950°C-4.5 saat / havada soğutma ısı işlemleri sonrası yüzeyden alınan XRD paternleri.

Çizelge 10.3’de ısı işlem sonrası numune üzerinde yapılan mikro yapı ve mikro sertlik çalışmalarına ait sonuçlar verilmektedir.

Yapılan mikro yapı ve mikro sertlik çalışmaları sonucunda, azot gazı altında ve 1250°C sıcaklıkta gerçekleştirilen ısı işlemler sonrası oluşan ‘sarı’ sert-alfa tabakasının kalınlığının, diğer yöntem ile oluşturulan ‘beyaz’ sert-alfa tabaka kalınlığından çok daha ince ve oldukça yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

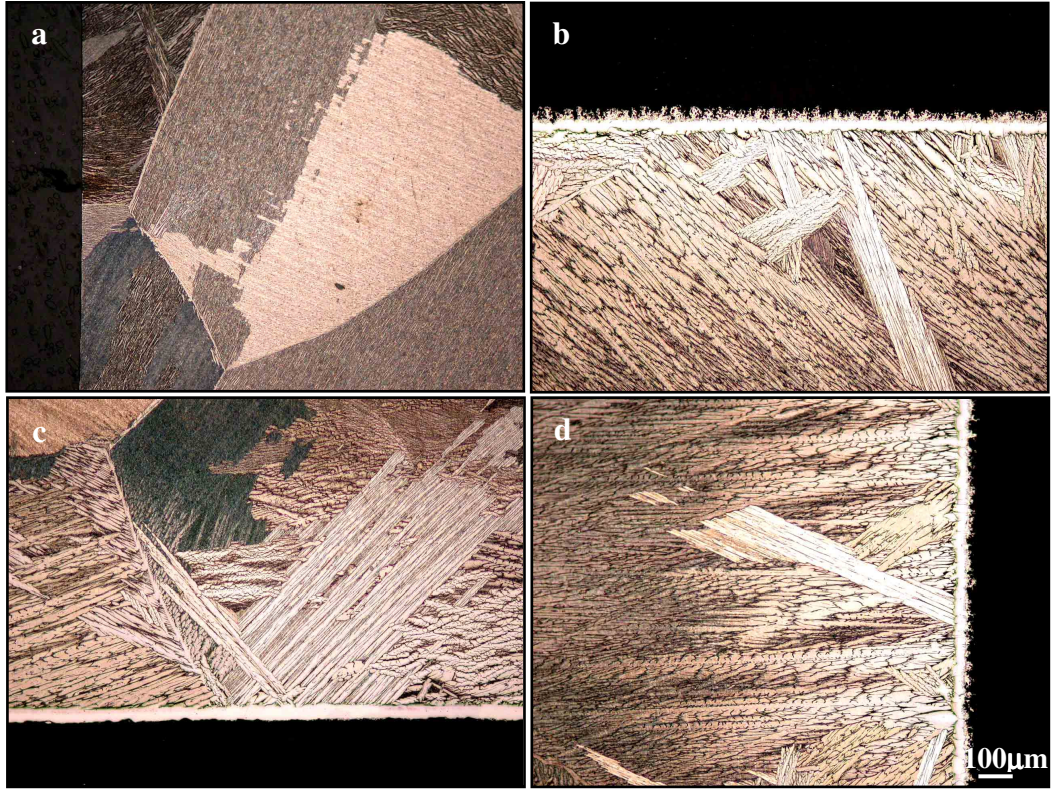
Çizelge 10.3. ‘Sarı’ ve ‘Beyaz’ sert-alfa fazlarının sertlik ve ortalama kalınlık değerleri.

Isıl işlem	Sertlik		Sert α Kalınlığı
	Matris	Sert α	
Azot atmosferi altında 1250°C–2.5 saat / havada soğuma	379 HV	857 HV	60µm
Azot atmosferi altında 1250°C–2.5 saat / havada soğuma	429 HV	806 HV	60µm
Azot atmosferi altında 1250°C–8 saat / havada soğuma	446 HV	790 HV	120µm
Düşük kısmi oksijen basıncında 950°C–1.5 saat / havada soğuma	366 HV	524 HV	180-200µm
Düşük kısmi oksijen basıncında 950°C–1.5 saat / suda soğuma	405 HV	514 HV	110 µm
Düşük kısmi oksijen basıncında 950°C–4.5 saat / havada soğuma	394 HV	677 HV	320-380µm

Vakum altında sıcak presleme işlemi (VHP) temelde, ‘beyaz’ sert alfa-fazının olduğu düşük oksijen basıncı ile aynı koşulu sağlayan, düşük vakum altındaki bir ısı işlemidir.

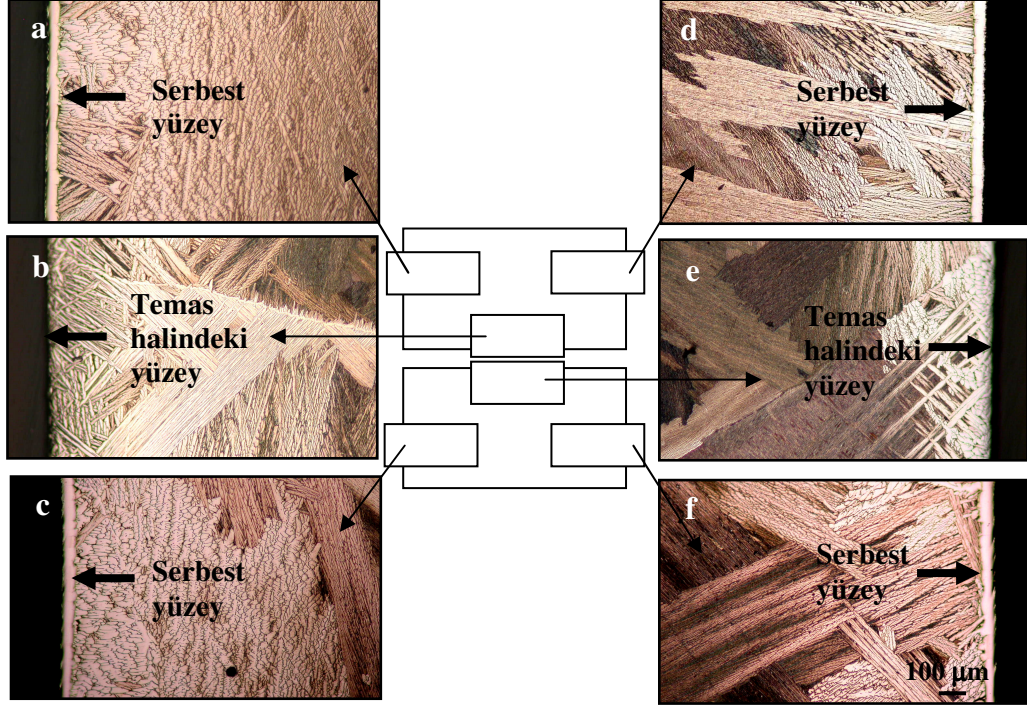
Dolayısı ile bilinen şekil ve kalınlıkta oluşturulan yapay hata fazının özelliklerini değiştirebilecek olan VHP prosesinin koşullarının belirlenmesi son derece önemlidir. Bu nedenle ısıtıl işlem görmemiş titanyum alaşımı bloklar üzerinde vakum fırında VHP koşulları sağlanarak kontrollü ısıtıl işlem denemeleri yapılmıştır. Titanyum alaşımı blok sıcaklık, süre ve düşük vakum atmosferi koşulları sağlanarak ısıtıl işleme tabi tutulmuştur.

Şekil 10.6 ve 10.7’de yapılan ısıtıl işlem denemeleri sonrası elde edilen mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Yapılan ilk denemede titanyum alaşımı blok, VHP prosesinde malzemenin karşılaşacağı sıcaklık, süre ve atmosfer koşulları sağlanarak fırın içerisine yerleştirilmiştir. Mikro yapı çalışmalarına göre; titanyum alaşımı bloğun hava ile temas halinde olan tüm yüzeyleri sert-alfa fazı ile kaplanmıştır.



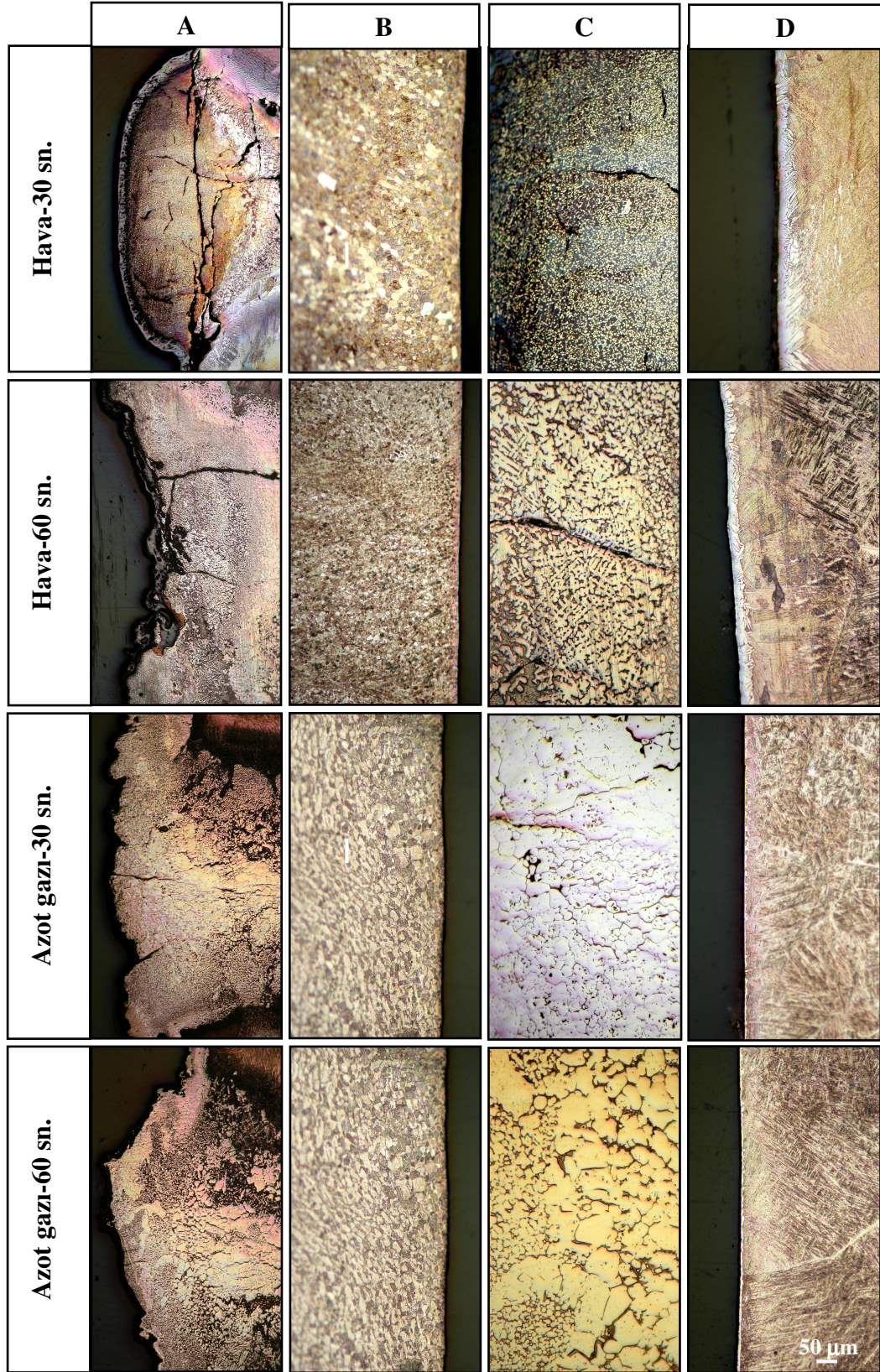
Şekil 10.6. Vakum altında 1200°C/2 saat ısıtıl işlem görmüş Ti-6Al-4V alaşımının ışık mikroskobu görüntüleri. (a) Fırın tabanına oturan yüzey, (b), (c) ve (d) fırın atmosferine maruz kalan yüzeyler.

İkinci denemede yüzeyleri ön hazırlanmış titanyum alaşımların, VHP koşullarında maruz kalacakları basınç hesaplanmış ve üst üste konulmuş bloklar belli bir yük altında, VHP sıcaklık ve süresine sadık kalınarak 1200°C / 2saat ısıtılma tabi tutulmuşlardır. Yapılan ısıtılma işlem sonrası her bir numune kesitten incelenmiş, numunelerin başka bir yüzey ile temas eden yüzeyleri dışındaki tüm yüzeylerinin sert-alfa fazı ile kaplandığı görülmüştür.



Şekil 10.7. Yüzeyleri parlatıldıktan sonra vakum fırınında yük altında 1200°C/2 saat ısıtılma görmüş Ti-6Al-4V alaşımlarının ışık mikroskobu görüntüleri. (a) ve (b) Başka bir yüzey ile temas eden yüzeyler, (c), (d), (e) ve (f) fırın atmosferine maruz kalan yüzeyler.

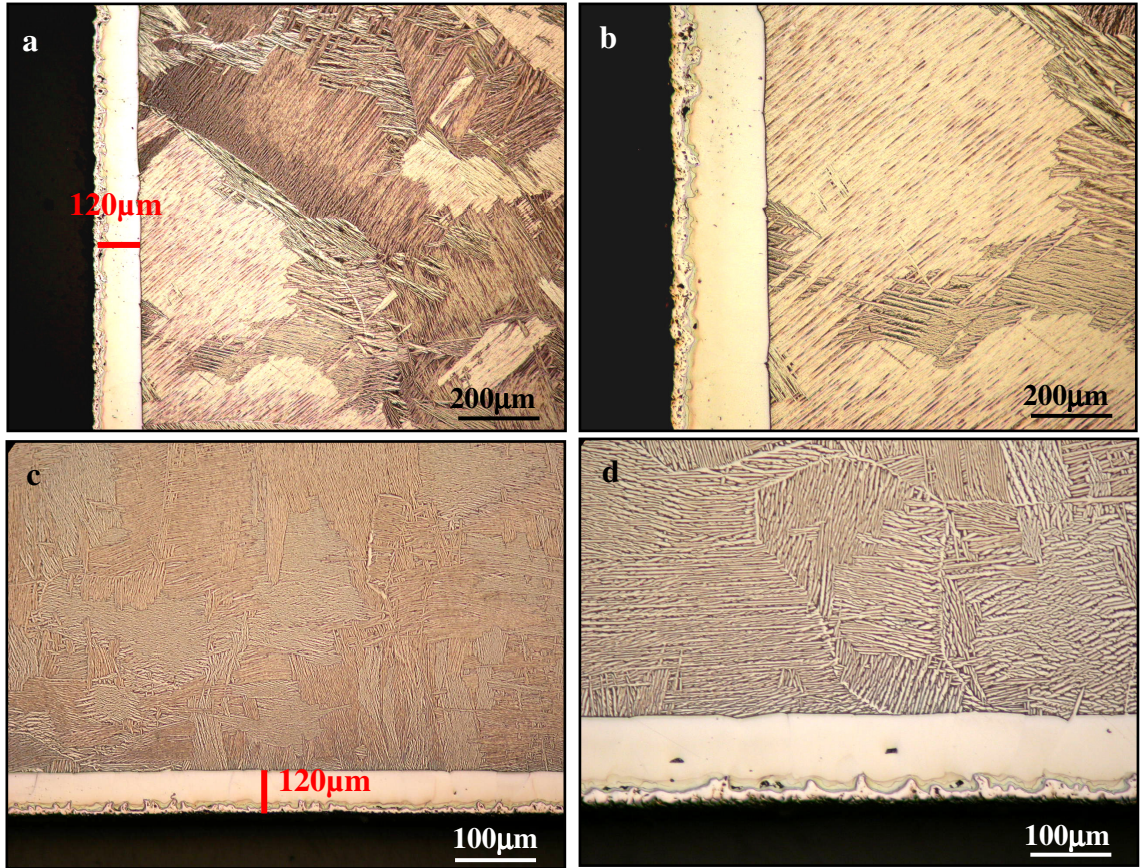
Kütlesel sert-alfa fazının üretimi, kullanışsız işleme prosedürlerinin yanı sıra aşırı uzun ısıtılma işlemleri de içermektedir. Bu nedenle sert alfa fazının numune yüzeyleri üzerinde bölgesel olarak üretilmesi denemelerine karar verilmiştir. Bu denemelerde, titanyum alaşımı yüzeylere ‘beyaz’ sert-alfa fazı için hava, ‘sarı’ sert alfa fazı için ise azot gazı altında tekrarlı lazer kaynağı vurumları yapılmıştır. Her iki tip sert-alfa fazı, (hava altında ‘beyaz’ ve azot gazı altında ‘sarı’ sert-alfa fazları) başarılı bir şekilde üretilmişlerdir. Şekil 10.8’de lazer nokta kaynak uygulanan bölgelerin ışık mikroskobu görüntüleri verilmektedir.



Şekil 10.8. Lazer nokta kaynağın uygulandığı (A) Kaynaktan etkilenen, (B) Kaynak içi, (C) Kaynaktan etkilenmeyen ve (D) Kaynak bölgelerine ait ışık mikroskobu görüntüleri.

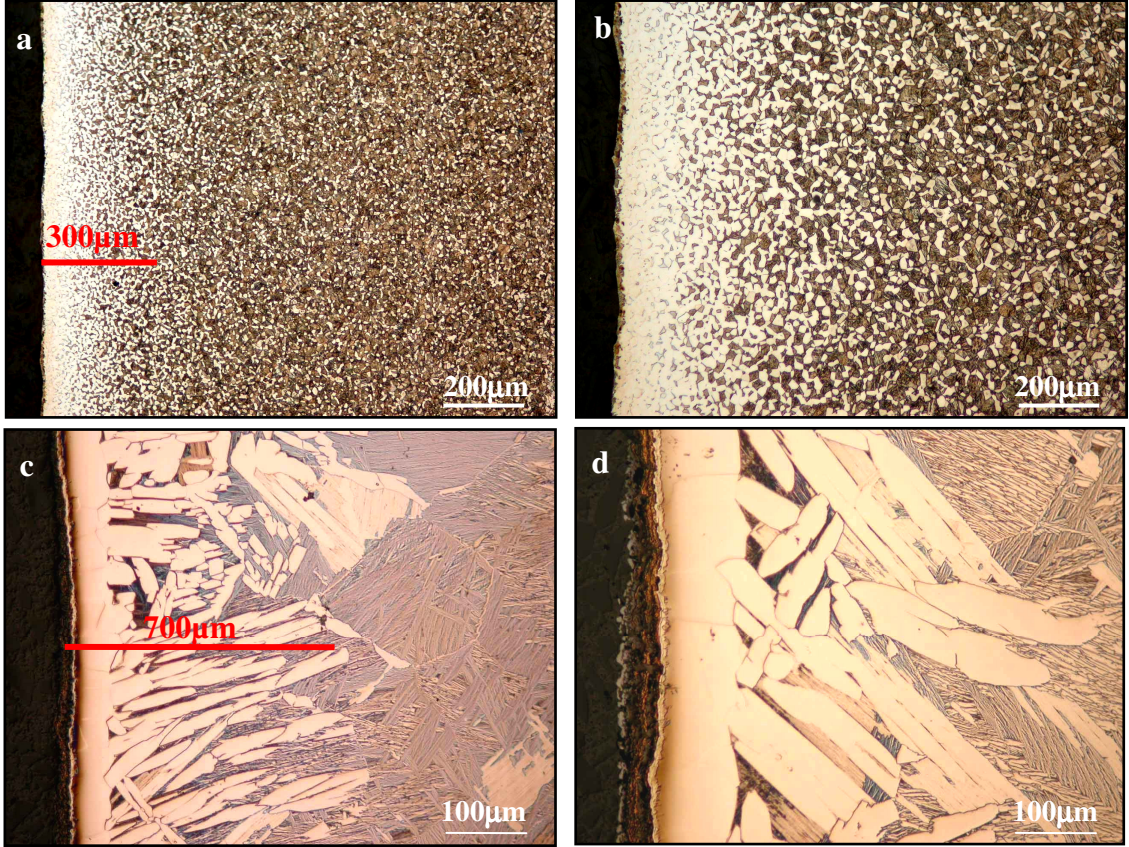
Saf sert-alfa fazının doğal koşullarda oluşumunun simülasyonu amacıyla ‘beyaz’ sert-alfa fazının ‘sarı’ sert-alfa üzerinde ve ‘sarı’ sert-alfa fazının ‘beyaz’ sert-alfa üzerinde oluşturulduğu ısıtıl işlem çifti denemeleri de yapılmıştır.

İlk ısıtıl işlem denemesinde titanyum alaşımı numune, azot gazı altında 1250°C / 8 saat ısıtıl işlemine tabii tutularak yüzeyinde tamamen ‘sarı’ sert-alfa fazı oluşturulmuştur. Bu işlemden sonra 950°C / 1.5 saat ısıtıl işlemi gerçekleştirilmiştir. Isıtıl işlemler sonrası numune mikro yapısı incelendiğinde, yapının sadece 120µm kalınlığında ‘sarı’ sert-alfa fazından oluştuğu, ‘sarı’ sert-alfa fazı üzerinde ‘beyaz’ sert-alfa fazının büyüemediği gözlenmiştir. (Şekil10.9).



Şekil 10.9. ‘Sarı’ sert-alfa fazı üzerinde ‘beyaz’ sert-alfa fazını oluşturmak amacı ile yapılan ısıtıl işlem çifti sonrası elde edilen yapının ısıtıl mikroskobu görüntüleri; (a) ve (b) Azot gazı altında 1250°C / 8 saat ısıtıl işlemi, (c) ve (d) Azot gazı altında 1250°C / 8 saat ısıtıl işlemi ve düşük oksijen basıncı altında 950°C / 8 saat ısıtıl işlemi kombinasyonu.

Bu denemenin ardından ‘beyaz’ sert-alfa fazı üzerinde ‘sarı’ sert-alfa fazının büyüüp büyüyeceğini anlayabilmek için, titanyum alaşımı numuneler üzerinde sırası ile düşük atmosfer basıncı altında 950°C / 4.5 saat ve azot gazı altında 1250°C / 8 saat ısıt işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan ilk ısıt işlem sonrası yapı 300µm kalınlığında ‘beyaz’ sert-alfa fazından oluşmaktadır. İkinci ısıt işlem sonunda ise ‘sarı’ sert-alfa fazı, ‘beyaz’ sert-alfa fazı üzerinde büyümüş, toplam kalınlık yaklaşık 700µm olarak belirlenmiştir. (Şekil 10.10).



Şekil 10.10. ‘Beyaz’ sert-alfa fazı üzerinde ‘sarı’ sert-alfa fazını oluşturmak amacı ile yapılan ısıt işlem çifti sonrası elde edilen yapının ışık mikroskobu görüntüleri; (a) ve (b) Düşük oksijen basıncı altında 950°C / 4.5 saat ısıt işlemi, (c) ve (d) Düşük oksijen basıncı altında 950°C / 8 saat ısıt işlemi ve azot gazı altında 1250°C / 8 saat ısıt işlemi kombinasyonu.

Deneyler ‘sarı’ sert-alfanın kalınlığındaki artışın zor olduğunu göstermektedir. Süresi uzatılmış ısıt işlemler numunenin mikro yapısında değişikliklere ve sert-alfa tabakası direkt olarak yapay hata bloğunu oluşturacak plakaların iki bileşeninden birinin yüzeyi

üzerinden büyütüldüğü için numune yüzeyinde çarpılmalara sebep olmaktadır. Yapay hata olarak kullanılacak ‘sarı’ sert-alfa fazı ayrı olarak ve numune içine VHP ile birleştirilmiş olarak büyütülmelidir.

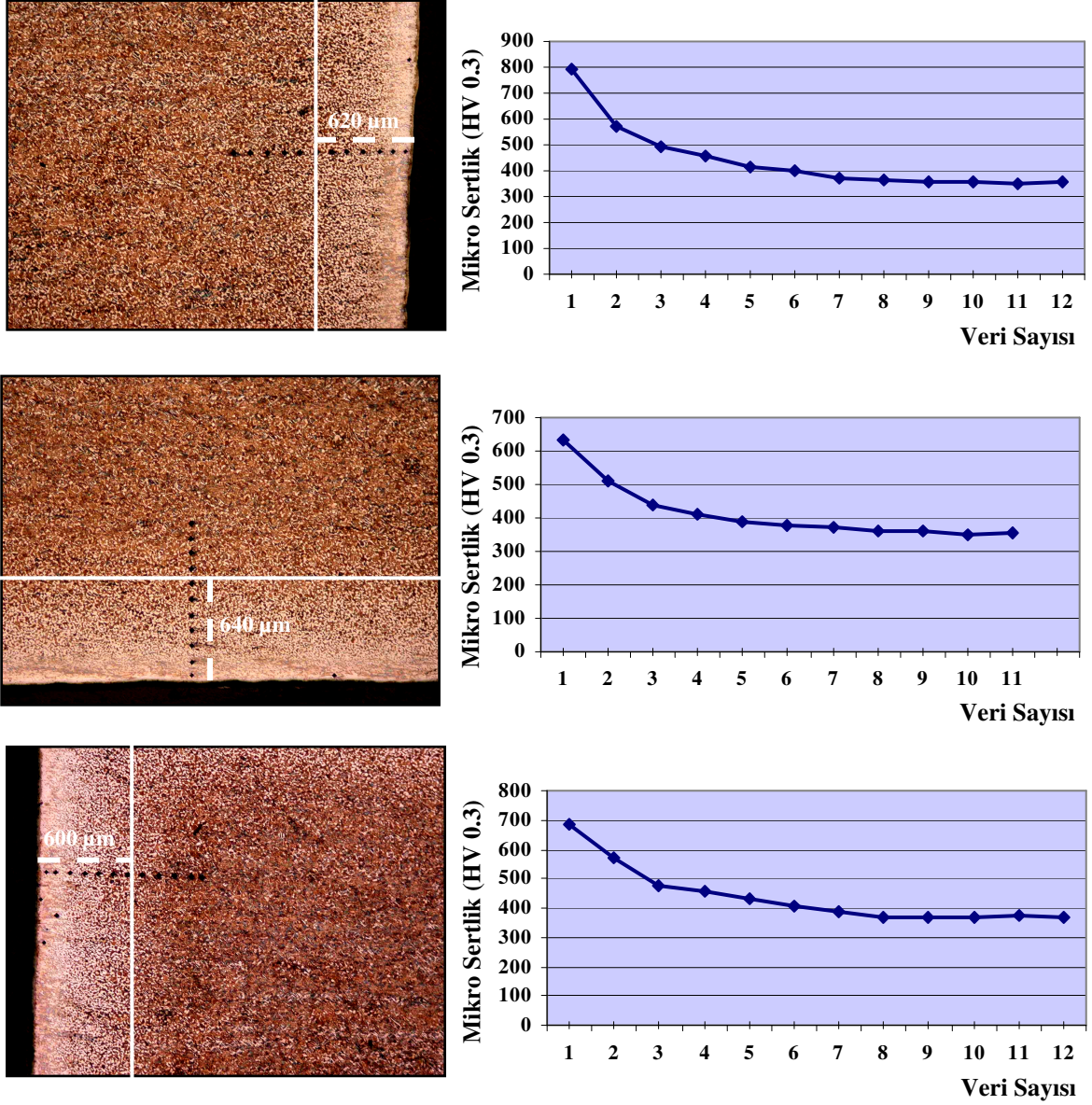
Diğer tip sert-alfa fazı; TiN ya da ‘sarı’ sert-alfa olarak adlandırdığımız faza nazaran daha düşük sıcaklıklarda oluşmaktadır. ‘Beyaz’ sert-alfa fazının büyümesi için 950°C sıcaklıkta, düşük oksijen basıncı altında havada soğutma koşullarında farklı süreler de ısıt işlemler yapılmıştır. ‘Beyaz’ sert-alfa fazı bir difüzyon tabakası olduğu için kalınlık ölçümünde yüzeyden içeri doğru mikro sertlik taraması yapılmış ve bu tarama sonucu sertlik değerinin sabitlendiği noktaya kadar olan uzaklık, sert-alfa tabakası kalınlığı olarak belirlenmiştir.

Şekil 10.11’de düşük oksijen basıncı altında 950°C-15 saat/havada soğuma ısıt işlemi sonrası yüzeyden merkeze doğru yapılan mikro sertlik tarama sonuçları verilmektedir. Uygulanan ısıt işlem sonrası ‘beyaz’ sert-alfa fazının kalınlığı ortalama 600–650µm olarak ölçülmüştür.

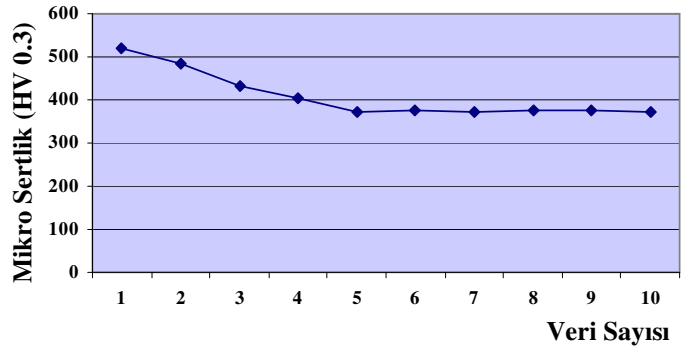
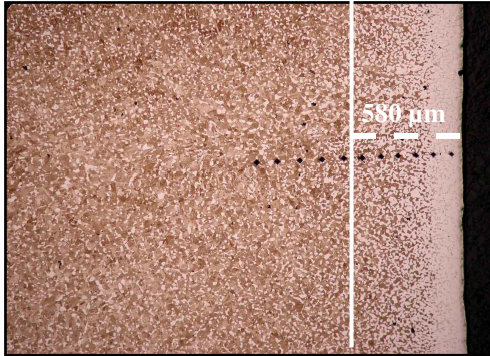
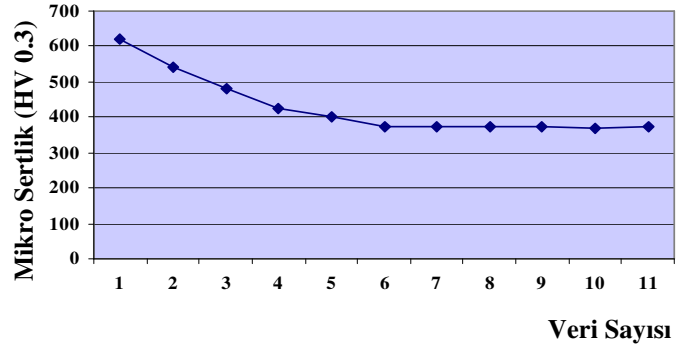
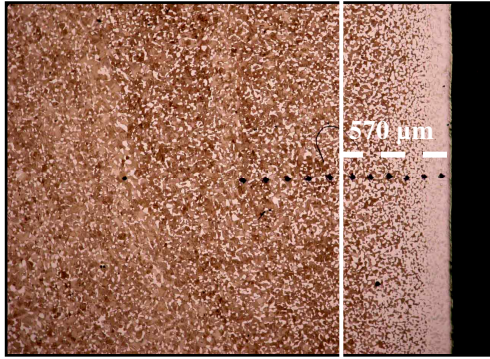
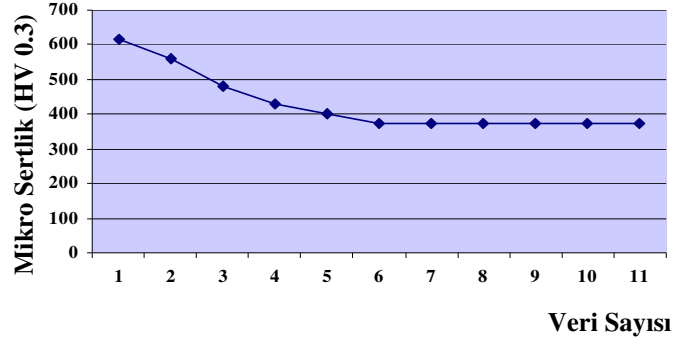
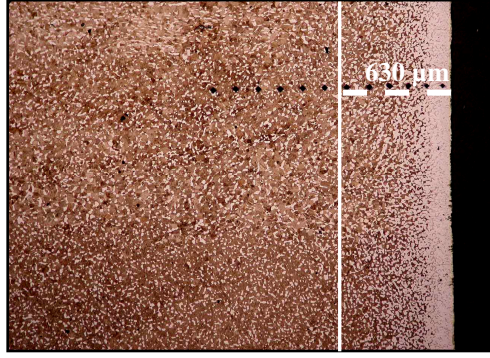
Sert-alfa kalınlığını arttırma denemelerine devam edilmiş, titanyum alaşımı bloklar düşük oksijen atmosferinde 950°C sıcaklık ve 17 saat süre ile ısıt işleme tabi tutulmuşlardır. Isıt işlem sonrası yapılan mikro sertlik taramasında ‘beyaz’ sert-alfa kalınlığı 570–630µm olarak ölçülmüştür (Şekil 10.12).

Şekil 10.13’de ısıt işlem süresinin biraz daha uzun tutulduğu, 950°C sıcaklık ve 19 saat süre ile gerçekleştirilen ısıt işlem sonrası oluşan yapının ışık mikroskobu görüntüleri ve mikro sertlik tarama değerleri verilmektedir. Isıt işlem sonrası ‘beyaz’ sert-alfa kalınlığı ortalama 660–700µm olarak ölçülmüştür (S. Üçüncüoğlu vd., 2006).

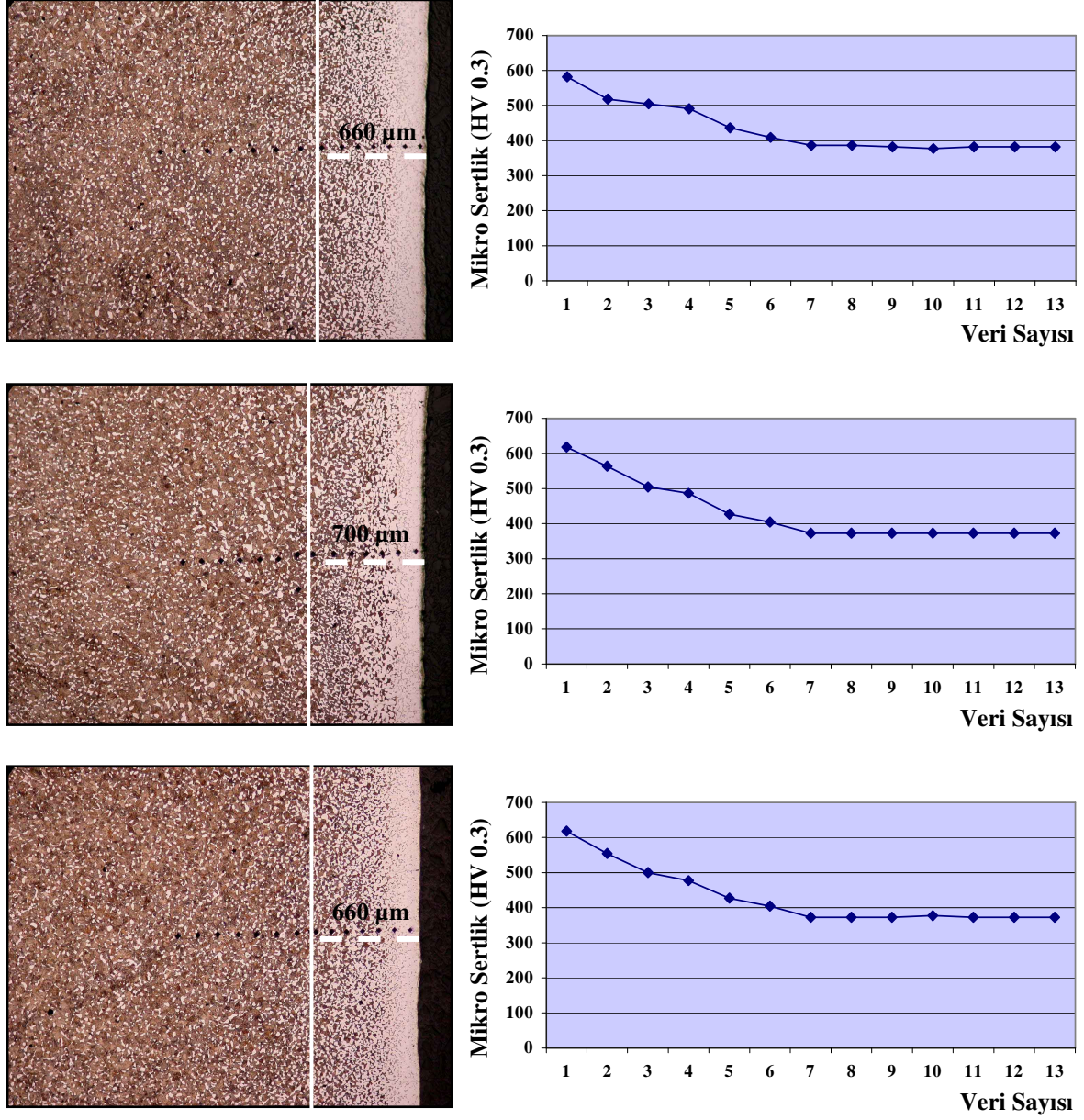
‘Beyaz’ sert-alfa fazının kalınlığını arttırmak için yapılan son deneme, 950°C sıcaklıkta 21 saat süreli ısıt işlemdir. Numune kesitinde yapılan mikro sertlik taramaları sonucu ‘beyaz’ sert-alfa fazı kalınlığı 1600µm olarak ölçülmüştür (Şekil 10.14). Bununla beraber yapı sadece kesitten kesite incelendiğinde, tamamıyla sert-alfa fazından oluşmaktadır sonucu çıkartılmaktadır. (Şekil 10.15).



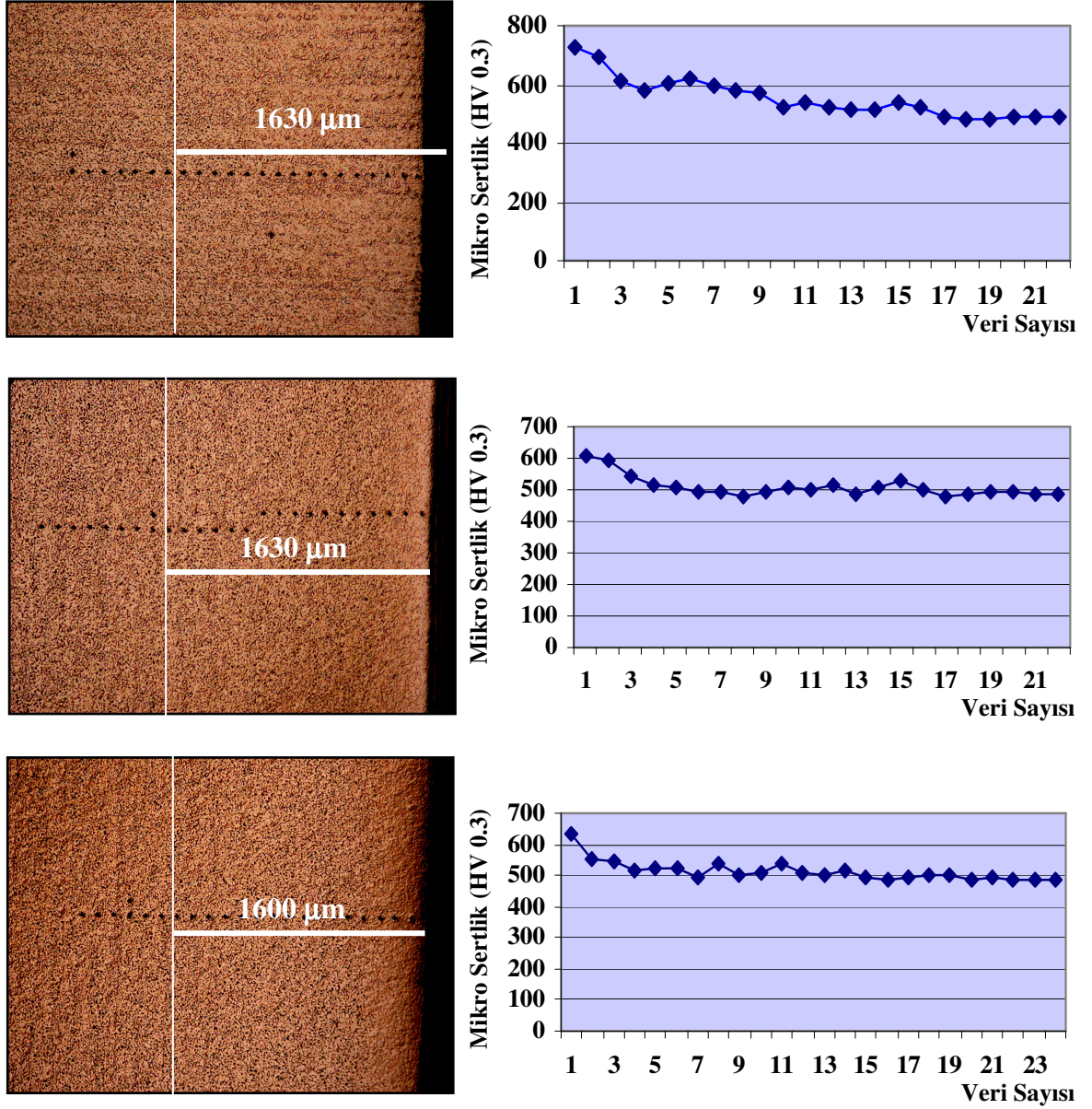
Şekil 10.11. 950°C–15 saat / havada soğutma ısıt işleminin sonrası yapılan mikro sertlik taraması ve taRamanın yapıldığı kesitlerin ışık mikroskobu görüntüleri. Siyah noktalardan oluşan sıra, mikro sertlik izlerini belirtmektedir.



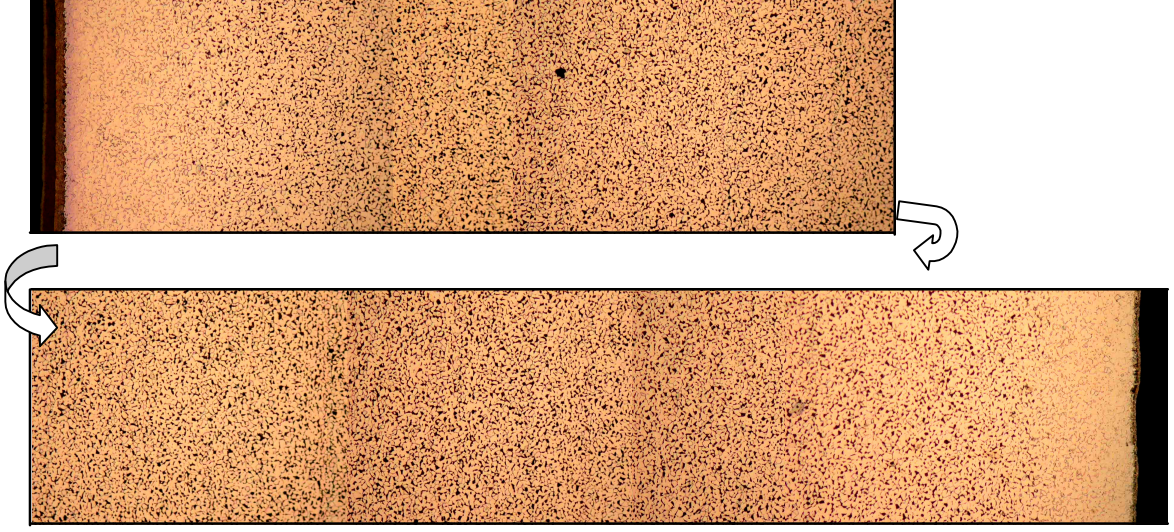
Şekil 10.12. 950°C–17 saat / havada soğutma ısıl işlemi sonrası yapılan mikro sertlik taraması ve taRamanın yapıldığı kesitlerin ışık mikroskobu görüntüleri. Siyah noktalardan oluşan sıra, mikro sertlik izlerini belirtmektedir.



Şekil 10.13. 950°C–19 saat / havada soğutma ısıl işlemi sonrası yapılan mikro sertlik taraması ve taRamanın yapıldığı kesitlerin ışık mikroskobu görüntüleri. Siyah noktalardan oluşan sıra, mikro sertlik izlerini belirtmektedir.



Şekil 10.14. 950°C–21 saat / havada soğutma ısıl işlemi sonrası yapılan mikro sertlik taraması ve taRamanın yapıldığı kesitlerin ışık mikroskobu görüntüleri. Siyah noktalardan oluşan sıra, mikro sertlik izlerini belirtmektedir.



Şekil 10.15. 950°C–21 saat / havada soğutma ısıl işlemi sonrası kesitten kesite ışık mikroskobu görüntüsü. Mikro yapı görüntüsüne göre yapı tamamen sert-alfa fazından oluşmaktadır.

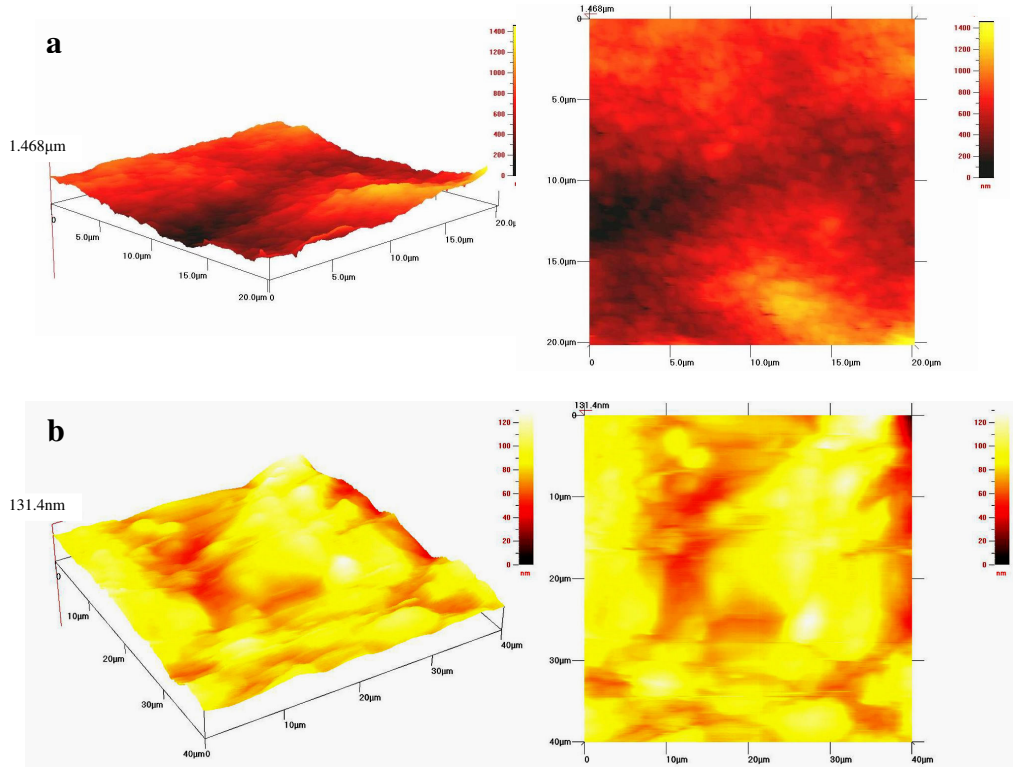
Üretilen ‘sarı’ ve ‘beyaz’ sert-alfa fazlarını birbirleri ile kıyaslamak için ışık mikroskobu, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X Işınları Difraksiyonu (XRD) yanı sıra Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), Confocal Raman Spektroskopisi, Çizik Testi (Scratch Test), Elektron Prob Mikro Analizör (EPMA) ve Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) yöntemleri de kullanılmıştır.

Atomik Kuvvet Mikroskobu yüzey topografisini angström seviyesinden 100 mikrona kadar gösterebilen bir yöntemdir. Çok duyarlı bir iğnenin yüzeyi taramasıyla atomik seviyedeki kuvvetlerde ölçüm yapılabilir. İğne, numune yüzeyinde hareket eder ve iğne-örnek arasındaki itme ve çekme kuvvetlerini ölçer. İğne kantilever denilen yaya tutturulmuştur. Lazer kaynağından gelip kantileverden yansıyan ışın, pozisyona duyarlı foto detektöre gelir. İki fotodiyotun sinyali arasındaki fark lazer spotunun pozisyonunu belirler. Bu cantileverin yükseklik bilgisi bilgisayara gönderilip x-y pozisyonuna karşı kaydedilir ve 3 boyutlu veri kullanılarak topografik grafik görünüm elde edilir [10].

İnce ve kalın kaplamalar, seramikler, kompozitler, camlar, sentetik ve biyolojik membranlar, metaller, polimerler ve yarıiletkenler AFM tekniği kullanılarak yüzey etkileşim özellikleri, elektriksel yük, manyetiklik-hidrofilik özellikler, nanomekanik özellikler, aşınma, adezyon-kapiler davranış, korozyon, pürüzlülük, sürtünme ve/veya

kaplama özellikleri bakımından incelenebilirler (T.R. Albrecht, 1991; Roger W. Philips, 1994; Ingrid De Wolf vd., 2001).

Bu çalışmada Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), ısıtılma sonrası üretilen ‘sarı’ ve ‘beyaz’ sert-alfa tabakalarının yüzey topografyalarının kıyaslanması için kullanılmıştır. Her iki gruptan alınan numuneler 40X40µm’luk alanlar içerisinde taranarak incelenmiştir. Şekil 10.16’da farklı ısıtılma sonrası üretilen tabakaların üç boyutlu yüzey morfolojileri verilmektedir. Farklı ısıtılma işlemlere tabi tutulan numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin de oldukça farklı olduğu açıkça görülmektedir. ‘Sarı’ sert-alfa tabakasının pürüzlülük değeri 131.4nm iken ‘beyaz’ sert-alfa tabakasının pürüzlülük değeri 1.468µm olarak ölçülmüştür.



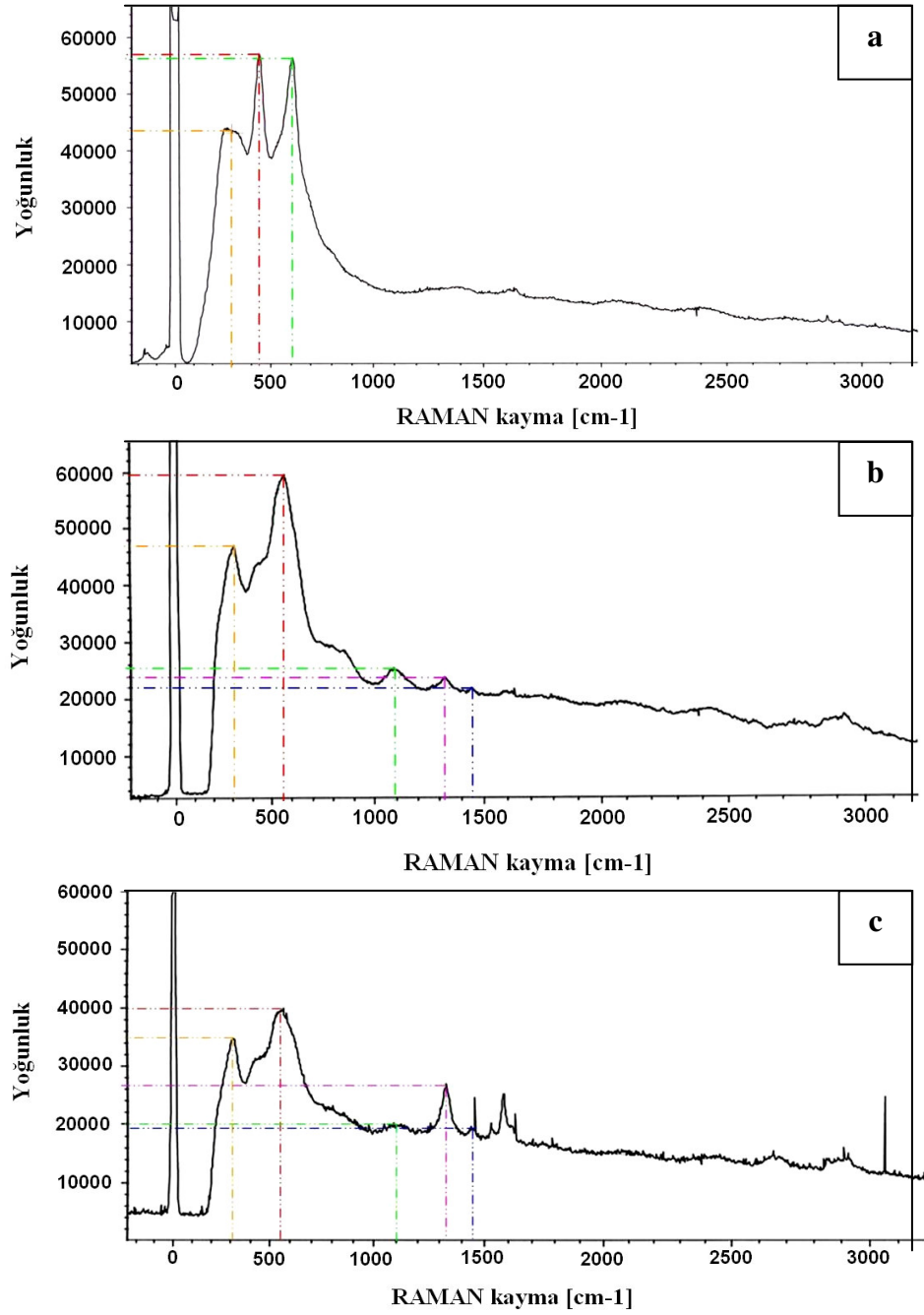
Şekil 10.16. Ti-6Al-4V numune üzerinde (a) Azot gazı altında gerçekleştirilen 1250°C-8 saat / havada soğutma, (b) Azot gazı verilmeden gerçekleştirilen 950°C-4.5 saat / havada soğutma ısıtılma işlemleri sonrası elde edilen yüzeylerin üç boyutlu AFM ve üst yüzey görüntüleri.

Raman Spektrometre tekniği optik bir yöntemdir. Bu teknik organik ve inorganik moleküller hakkında titreşimsel bilgi verir. Yöntemde lazer ışınları proses süresince yüzeye gönderilir ve buradan moleküllerden enerji kopartır. Enerji kaybının oranı ışın saçan fotonun enerjisindeki değişiklik olarak algılanır. Bu enerji kaybı, molekül içindeki her bağ için karakteristiktir ve tam olarak molekülün spektral parmak izini verir. Raman spektroskopisi aynı zamanda kaplama filminin homojenliğini de kontrol edebilir (G. Binnig vd., 1986; C.P. Coustable vd., 1999).

Çalışmada, yüzeyinde ‘sarı’ sert-alfa ve ‘beyaz’ sert-alfa olarak adlandırılan fazları barındıran ve ticari olarak PVD tekniği ile TiN kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımı numuneler TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü’nde dizayn edilen Confocal Lazer Raman ve Fotoluminesans Mikrospektrometresi kullanılarak kıyaslamalı olarak incelenmiştir. İncelemeler sonucunda ticari olarak TiN kaplanmış numune ile azot gazı altında 1250°C 8 saat ısıtılmasına tabi tutulan ve yüzeyinde ‘sarı’ sert-alfa fazını barındıran numunelerin piklerinin birbiri ile mükemmel bir şekilde örtüştüğü gözlenmiştir. Daha önce yapılan X-ışınları difraksiyon paterni incelemesinden de ‘beyaz’ sert-alfa kaplı numunenin Ti- α fazını, ‘sarı’ sert-alfa kaplı numunenin ise TiN fazını içerdiğini biliyorduk. Confocal Raman spektrometre tekniği ile de bu iki yapının birbirinden farklı olduğu kanıtlanmıştır. (Şekil 10.17).

Çizik Testi (Scratch Test) ince yüzey kaplamalarının mekanik özelliklerinin belirlendiği yaygın kullanımı olan bir test yöntemidir (P.J. Burnett ve D.S. Rickerby, 1987). Yöntemde tek nokta temaslı Rockwell C 120 elmas uç kullanılarak numune ve ince kaplama üzerinde plastik deformasyon yaratılır. Testte elmas uç ile numune yüzeyi adım adım (O.S. Heavens, 1950) veya sürekli (P. Benjamin ve J.Weaver, 1960) artan yük altında kaplama kaldırılana kadar çizilir. Elmas ucun deformasyon etkisi ile numune yüzeyinden kaldırılan kaplama, ışık mikroskobu ya da taramalı elektron mikroskobu ile de gözlenebilir (Juhani Valli ve Ulla Makela, 1987).

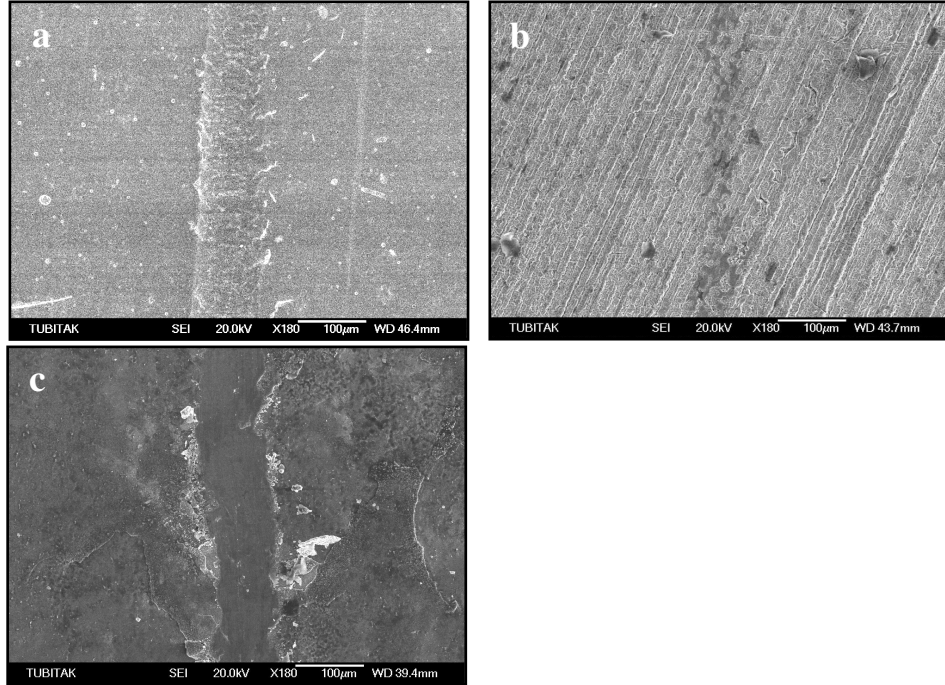
Isıl işlemler sonrası oluşturulan ‘sarı’ ve ‘beyaz’ sert-alfa tabakaları ve ticari olarak PVD tekniği ile TiN kaplanmış Ti-6Al-4V titanyum alaşımı numunelerin yüzeylerinde Scratch test gerçekleştirilmiştir.



Şekil 10.17. Ti-6Al-4V numune üzerinde **(a)** Azot gazı verilmeden gerçekleştirilen 950°C-4.5 saat / havada soğutma, **(b)** Azot gazı altında gerçekleştirilen 1250°C-8 saat / havada soğutma ısı işlemleri sonrası elde edilen ve **(c)** PVD tekniği ile ticari olarak TiN kaplanmış yüzeylerin Confocal Raman Spektrometre görüntüleri.

Şekil 10.18’de numunelerin test sonrası yüzeylerinde oluşturulan çiziklere ait SEM görüntüleri verilmektedir. ‘Sarı’ sert-alfa fazı üzerinde yapılan test sonrası yüzeyde oldukça düzgün fakat devamlı olmayan bir hat gözlenmiştir. ‘Beyaz’ sert-alfa fazı üzerinde oluşturulan çizik ise düzgünlüğünün yanı sıra devamlılık arz etmektedir. PVD tekniği ile TiN kaplanmış numune yüzeyinde scratch test sonrası oluşan çizik ise ‘Beyaz’ sert-alfa kadar devamlı olmayıp ‘sarı’ sert-alfa’ya göre devamlılığı daha iyidir. Numuneler üzerinde oluşan çizik düzgünlüğü ve devamlılığı numune üzerinde oluşan kaplama tipine göre değişmektedir. Daha sert olan kaplamadaki mikro talaşlar daha fazla olacak ve bu durum da çizik boyunca devamsızlığa neden olacaktır (A.A. Kaya, 2007). Test sonrası yüzeydeki çiziklerin karakterlerine göre, azot gazı verilmeden gerçekleştirilen 950°C–4.5 saat / havada soğutma ısıl işlemi sonrasında oluşan ‘beyaz’ sert-alfa fazının, ‘sarı’ sert-alfa fazına göre çok daha yumuşak olduğu kanıtlanmıştır.

Scratch test sonrası yüzeyde oluşturulan çizik devamsızlık göstermesi testte kullanılan tipin, ısıl işlem ile oluşturulan tabaka üzerindeki mikro çizikler üzerinden atlaması ile bağdaştırılabilir.



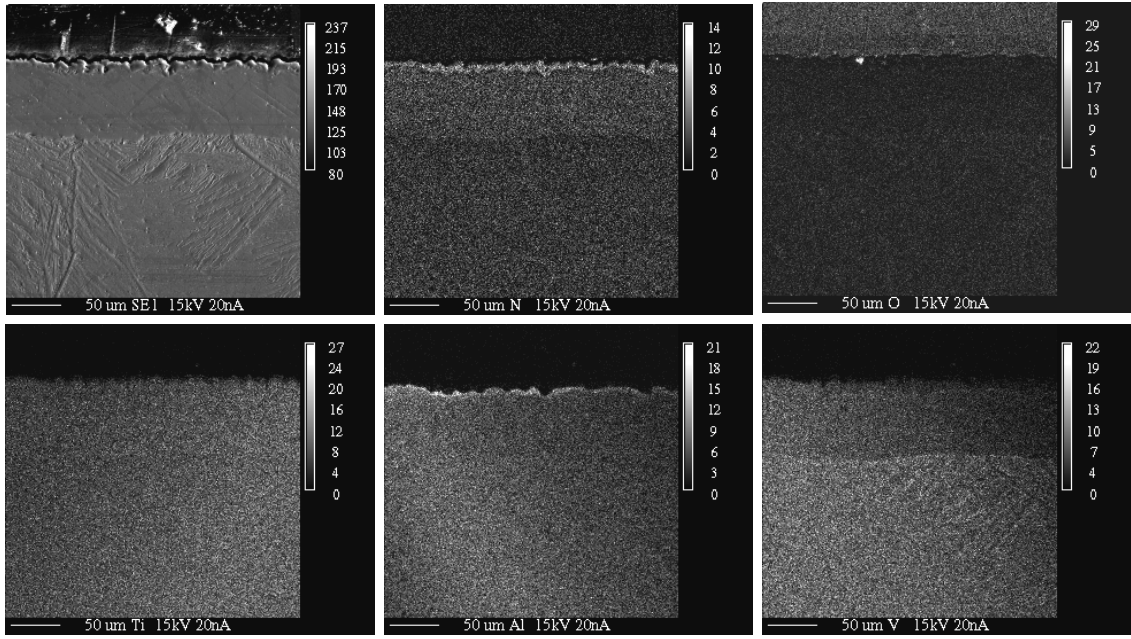
Şekil 10.18. Ti-6Al-4V numune üzerinde (a) PVD tekniği ile TiN kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımı numune (b) Azot gazı altında gerçekleştirilen 1250°C–8 saat / havada soğutma, (c) Azot gazı verilmeden gerçekleştirilen 950°C–4.5 saat / havada soğutma ısıl işlemleri sonrası yapılan scratch test sonrası yüzeyde oluşturulan çiziklerin SEM görüntüleri.

EPMA (elektron prob mikro analizör) malzeme karakterizasyonu ve hata analizi için kullanılan çok yönlü tanısal bir tekniktir. EPMA için, SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve XRF (X-ışını floresans spektrometresi) cihazlarının her ikisinin kabiliyetini de içinde barındıran bir cihazdır tanımı yapılabilir. Ayırım gücü yaklaşık 1µm (Amitava Ray, 2005) olan EPMA, % ağırlık olarak 0.005-0.01 aralığı içerisinde olan elementlerin kantitatif analizine olanak tanımaktadır (T.Toya vd., 1986). Yüksek analitik hassasiyete (ana elementler için >%0.5) sahiptir. Prensip itibari ile oldukça kararlı (akım yoğunluğu, hızlandırma voltajı ve sabit demet çapı) bir elektron demetinin numuneye gönderilmesi sonucunda meydana gelen demet-numune etkileşimiyle açığa çıkan karakteristik x-ışınlarının dalga boylarına göre sınıflandırılmasıyla elementel analiz yapılır. EDS tekniğine göre çok daha yüksek hassasiyette kalitatif ve tam kantitatif analiz yapabilme yeteneği mevcuttur. EPMA kullanılarak periyodik tablodaki çoğu elementin (Berilyumdan Uranyuma kadar olan aralıktaki elementler) analiz edilebilmektedir (J.I. Goldstein, 1992).

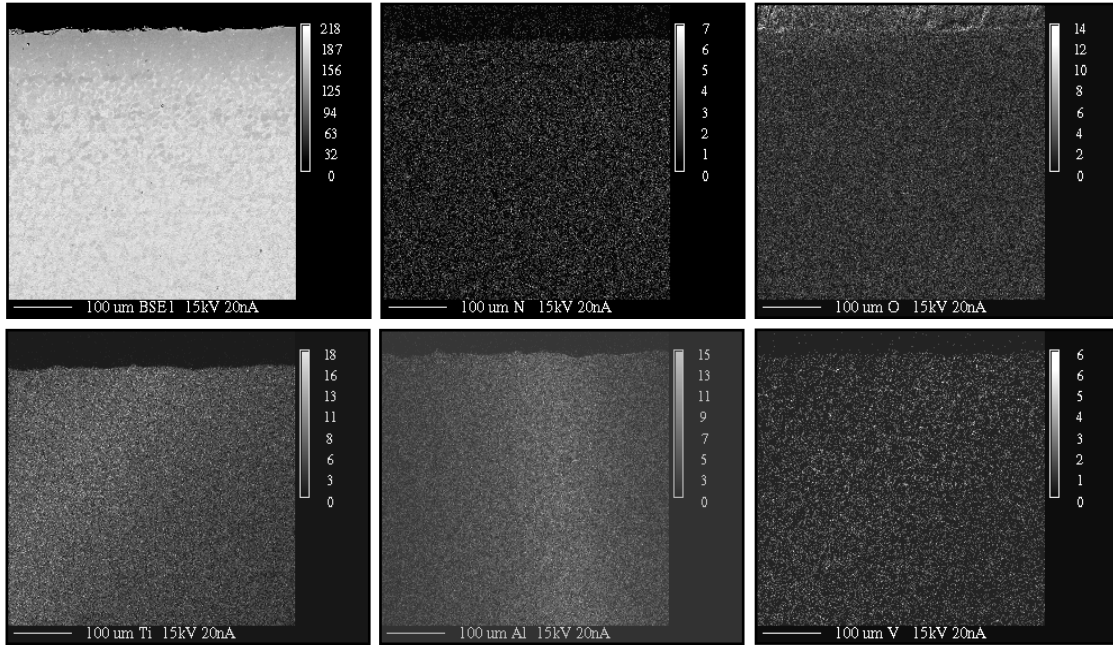
Çalışmada iki farklı yöntemle üretilmiş sert-alfa fazlarının karakterizasyonunda EPMA kullanılmış, numuneler üzerinde öncelikle haritalama (mapping) tekniği kullanılarak azot ve oksijen varlığı her iki numunede de kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Şekil 10.19’da ‘sarı’ sert-alfa olarak adlandırılan sert-alfa fazına ait EPMA-haritalama sonuçları verilmektedir.

Şekilde de görüldüğü gibi, haritalama sonucunda sert-alfa fazının olduğu bölgede azot elementi yoğun olarak saptanmış, oksijen elementinin ise sert-alfa tabakasında matrise oranla oldukça az olduğu gözlenmiştir. Isıl işlem sonrası titanyum ve alüminyumun tüm yüzeyde eşit olduğu, buna karşılık azotun yoğun olduğu tabakada vanadyum elementinin matrise oranla oldukça az yoğunlukta olduğu saptanmıştır. Vanadyumun, alüminyum gibi tüm yüzeyde eşit olarak bulunmaması azotun bu bölgedeki varlığının, vanadyumun titanyum içerisindeki çözünürlüğünü azaltması ile açıklanabilir.

Şekil 10.20’de beyaz sert-alfa olarak adlandırılan sert-alfa fazına ait EPMA-haritalama sonuçları verilmektedir.



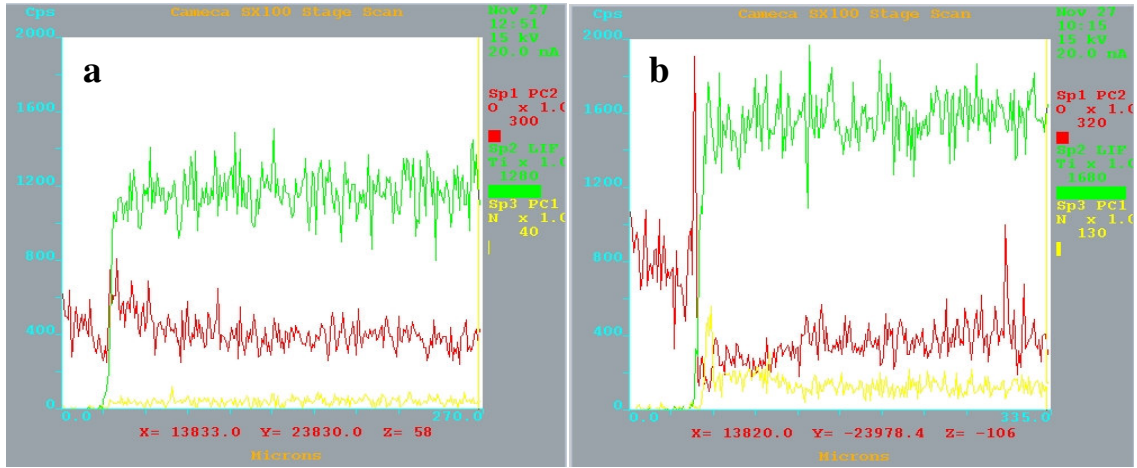
Şekil 10.19 Azot gazı altında 1250°C sıcaklık ve 2 saat süre ile ısıtılma maruz bırakılarak yüzeyinde ‘sarı’ sert-alfa fazı oluşturulmuş Ti-6Al-4V alaşımının EPMA-haritalama görüntüsü.



Şekil 10.20 Azot gazı verilmeden kontrollü atmosfer altında 950°C sıcaklık ve 4.5 saat süre ile ısıtılma maruz bırakılarak yüzeyinde sert-alfa fazı oluşturulmuş Ti-6Al-4V alaşımının EPMA-haritalama görüntüsü.

Yüzeyinde ‘beyaz’ sert-alfa fazı oluşturulmuş numunede yapılan EPMA-haritalama sonuçlarına göre, numune yüzeyinde tüm elementlerin (incelemenin yapıldığı alan boyunca) varlığı gözlenmiştir.

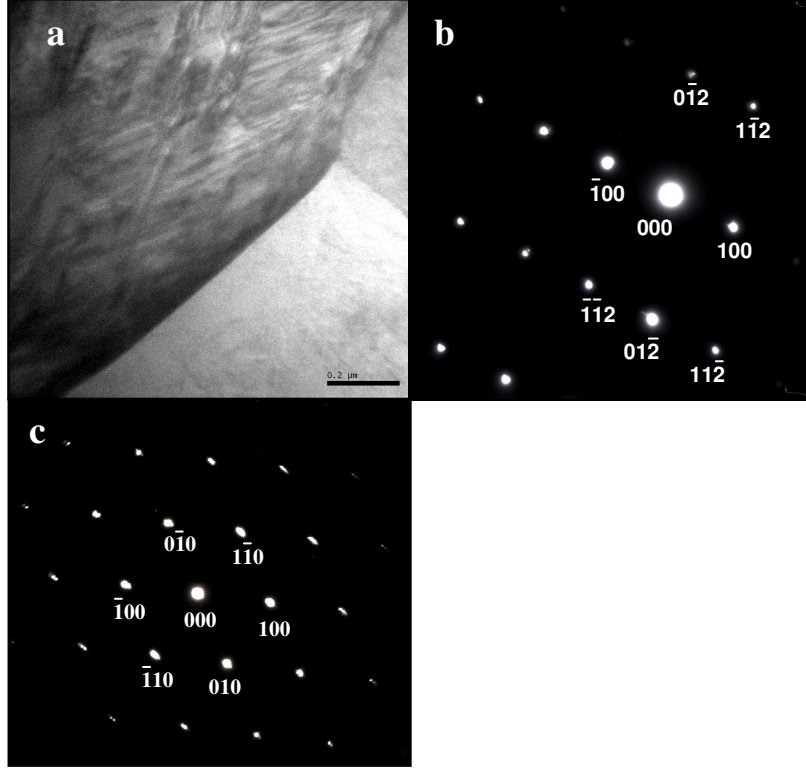
Haritalama sonrasında numunelerde yüzeyden matrise doğru alınan kalitatif analiz sonuçları Şekil 10.21’de verilmektedir. Kalitatif analiz sonuçlarına kıyaslamalı olarak baktığımızda yüzeyinde beyaz sert-alfa fazı oluşturulmuş numunede saptanan azot, oranca ‘sarı’ sert-alfa içeren numuneye göre çok daha azdır. Oksijen oranı ‘sarı’ sert-alfa içeren numunede kaplama kalınlığına matrise oranla daha az görülmektedir. Bunun sebebi ise azot elementinin varlığının (vanadyumda olduğu gibi) oksijenin de titanyum içerisindeki çözünürlüğünü azaltması olarak açıklanabilir. Azot elementinin tabaka boyunca yoğun olarak bulunması yapıda oksijenin ve vanadyumun bu bölgede çözünürlüğünü azaltmış ve bu elementlerin matrise difüze olmalarına neden olmuştur.



Şekil 10.21 (a) Azot gazı verilmeden kontrollü atmosfer altında 950°C sıcaklık ve 4.5 saat süre ile **(b)** Azot gazı altında 1250°C sıcaklık ve 2 saat süre ile ısıtılma maruz bırakılarak yüzeyinde sert-alfa fazı oluşturulmuş Ti-6Al-4V alaşımının EPMA-kalitatif analiz sonuçları.

Son olarak iki farklı ısıtılma işlemi ile yüzeyde oluşturulan sert-alfa fazlarının karakterizasyonu için geçirimsiz elektron mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 10.22’de azot gazı verilmeden gerçekleştirilen 950°C–4.5 saat / havada soğutma ısıtılma işlemi sonrası üretilen α -titanyum fazına ait aydınlık alan TEM görüntüsü ile seçilmiş alan üzerinden

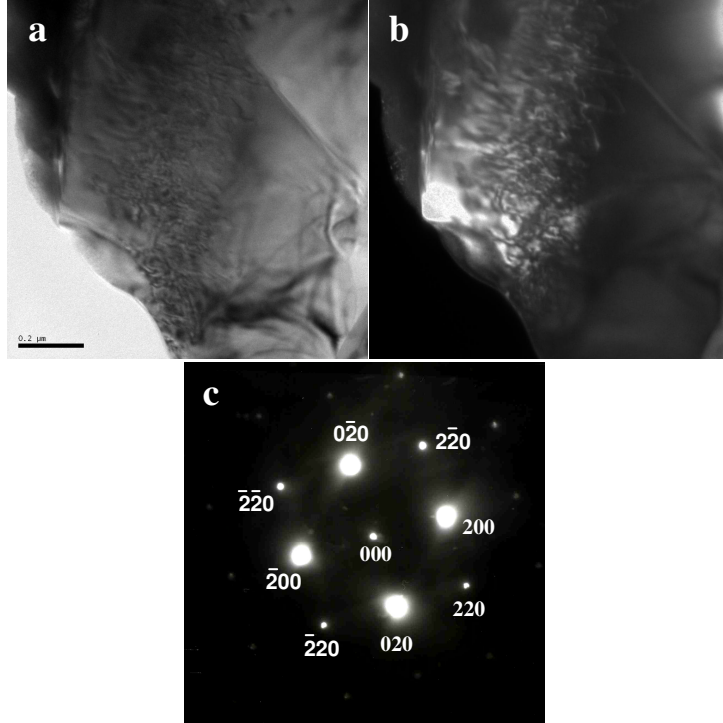
alınan elektron difraksiyon (SAED) paternleri verilmektedir. Yapılan elektron difraksiyonu çalışmalarına göre ‘beyaz’ sert-alfa fazının kristal yapısının ısıtılma işlemi görmemiş Ti-6Al-4V alaşımının kristal yapısı ile aynı olduğu (Hegzagonal kristal yapısı) saptanmıştır (S.Üçüncüoğlu vd., 2007).



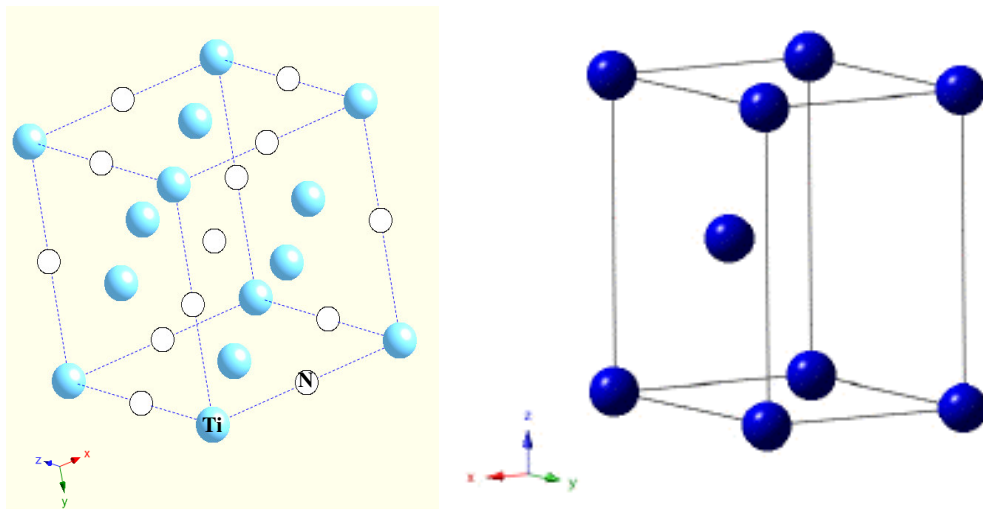
Şekil 10.22. Ti-6Al-4V numune üzerinde azot gazı verilmeden gerçekleştirilen 950°C-4.5 saat / havada soğutma ısıtılma işlemi sonrası yüzeyde oluşturulan ‘beyaz’ sert-alfa fazına ait (a) aydınlık alan TEM, (b) ve (c) iki ayrı zon ekseninde alınan difraksiyon paternleri. bu bölgeden alınan SAED paterni (zon eksenleri sırasıyla [021] ve [001]).

Azot gazı altında 1250°C–8 saat / havada soğutma ısıtılma işlemi sonrası üretilen TiN fazına ait aydınlık ve karanlık alan TEM görüntüleri ve SAED paterni ise Şekil 10.23’de verilmektedir. Yapılan TEM incelemeleri sonucunda ortama azot gazı verilerek difüzyon yolu ile oluşturulan ‘sarı’ sert-alfa tabakasının kristal yapısının TiN ile aynı kristal yapıda olduğu (yüzey merkezli kübik) belirlenmiştir. Sonuç olarak, SAED paterninden elde edilen sonuçlar XRD incelemesinde elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir.

Şekil 10.24'de TiN ve α -Titanyumun kristal yapılarını gösteren şematik çizim verilmektedir.

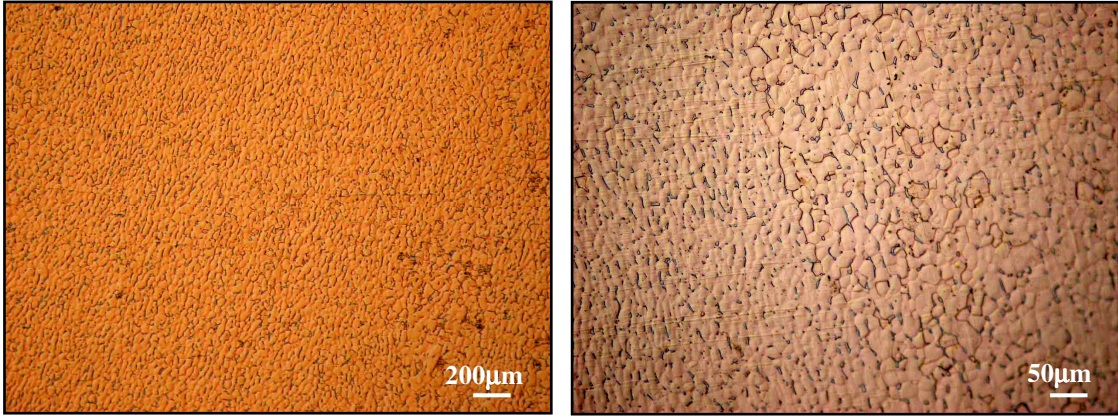


Şekil 10.23. Ti-6Al-4V numune üzerinde azot gazı altında gerçekleştirilen 1250°C-8 saat / havada soğutma ısıl işlemi sonrası yüzeyde oluşturulan ‘sarı’ sert-alfa fazına ait (a) aydınlık alan TEM görüntüsü, (b) karanlık alan TEM görüntüsü, (c) sert-alfa fazı üzerinden alınan SAED paterni ([001] zon eksen).



Şekil 10.24 TiN ve α -titanyum fazlarının kristal yapıları [1].

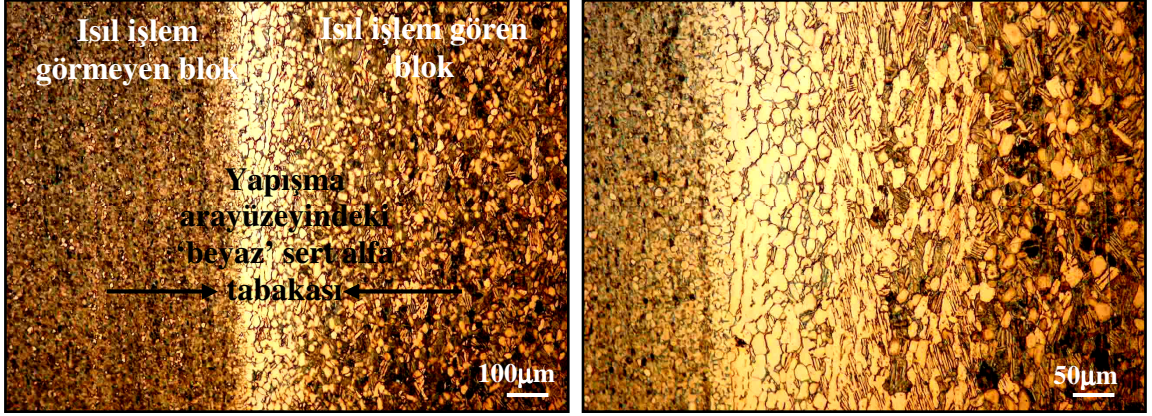
Vakum altında sıcak presleme (VHP) öncesinde ön hazırlanmış (zımparalama ve parlatma aşamalarından geçmiş) 2.5x7.5x7.5 cm ölçülerindeki titanyum numune, yüzeyinde ‘beyaz’ sert-alfa fazı oluşturulması amacı ile düşük oksijen basıncı altında 950°C sıcaklık ve 19 saat süre ile ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Isıl işlem sonrası numune yüzeyinden alınan mikro yapı görüntüleri Şekil 10.25’de verilmektedir.



Şekil 10.25. Yüzeyi ön hazırlandıktan sonra 950°C sıcaklık 19 saat süre ile ısıtılma işlemi gören numunenin yüzeyinden alınan ışık mikroskobu görüntüleri.

Işık mikroskobu görüntülerinden de anlaşılacağı üzere; 950°C sıcaklık ve 19 saat süre ısıtılma işlemine tabi tutulan titanyum blok yüzeyi tamamıyla ‘beyaz’ sert-alfa fazından oluşmaktadır. Isıl işlem sonrası yüzeyinde ‘beyaz’ sert-alfa fazı oluşturulan blok, vakum altında sıcak presleme metodu (VHP) kullanılarak 900°C sıcaklık, 10 ton yük ve 2 saatlik bekleme süresi koşullarında ısıtılma işlemi görmemiş titanyum bloğa yapıştırılmıştır.

Şekil 10.26’da difüzyonla yapıştırma sonrası ‘beyaz’ sert-alfa fazı ile ısıtılma işlemi görmemiş titanyum alaşımı blok arasındaki yapışmanın mükemmel bir şekilde gerçekleştiğini gösteren ışık mikroskobu görüntüleri verilmektedir. Mikro yapıya bakıldığında, yapıştırma işleminin yapıldığı titanyum blokların mikro yapılarının birbirinden oldukça farklı olduğu görülmektedir. ‘Beyaz’ sert-alfa fazını içeren blok, sert-alfa fazının oluşturulması için gerçekleştirilen uzun süreli ısıtılma işlem sonrası soğuma hızına bağlı olarak martenzitik ve eşeksenli fazların karışımından oluşmaktadır. Isıl işlem görmemiş ikinci titanyum alaşımı blok ise sadece küresel tanelerden oluşmaktadır.

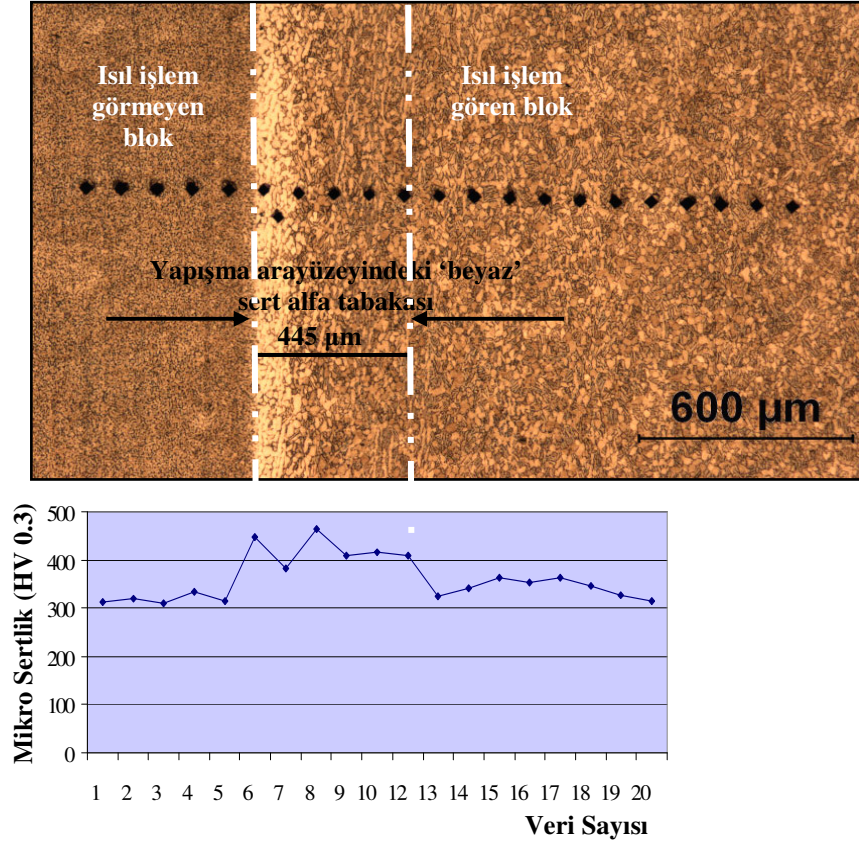


Şekil 10.26. ‘Beyaz’ sert alfa fazını içeren blok ve ısıtılmış titanyum alaşımı blok arasında VHP sonrası oluşan yapışma ara yüzeyinin farklı büyütmelerde çekilmiş ışık mikroskobu görüntüleri.

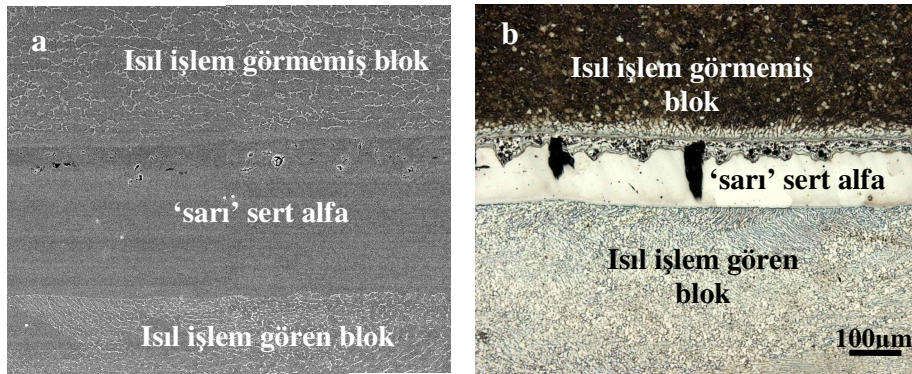
Yapışma ara yüzeyindeki sert-alfa fazının VHP sonrası kalınlık ölçümü için bu ara yüzeyden mikro sertlik taraması yapılmıştır. Sabit iki sertlik arasında kalan alan ‘beyaz’ sert-alfa fazı kalınlığı olarak kabul edilmiştir.

Şekil 10.27’de mikro sertlik taraması sonrası elde edilen grafik ve ışık mikroskobu görüntüleri verilmektedir. Yapılan mikrosertlik taramasına göre başlangıçta 660-700µm kalınlığında olan ‘beyaz’ sert-alfa fazı VHP işlemi sonrasında 444 µm kalınlığa inmiştir. Ayrıca mikro sertlik değeri ortalama 600HV değerinden 400HV değerlerine düşmüştür. Kalınlık ve sertlikteki bu düşüşü VHP sırasında iki bloğun birbirine difüzyon yolu ile bağlanması ve sert-alfa fazına sertliğini veren, yapıdaki oksijen ve azotun diğer bloğa difüzyonu ile açıklayabiliriz.

VHP öncesinde ön hazırlanmış (zımparalama ve parlatma aşamalarından geçmiş) 1.25x2.5x2.5 cm ölçülerindeki titanyum numune azot gazı altında 1250°C sıcaklık ve 8 saat süre ile ısıtılmış ve tutulmuş, numune yüzeyinde oluşturulan ‘sarı’ sert alfa fazı ısıtılmış titanyum alaşımı numuneye 900°C sıcaklık, ~1ton yük ve 2 saat bekleme süresi koşulları altında VHP metodu kullanılarak yapıştırılmıştır. Yapışma sonrası elde edilen ara yüzey kesit mikro yapı görüntüleri Şekil 10.28’de verilmektedir.

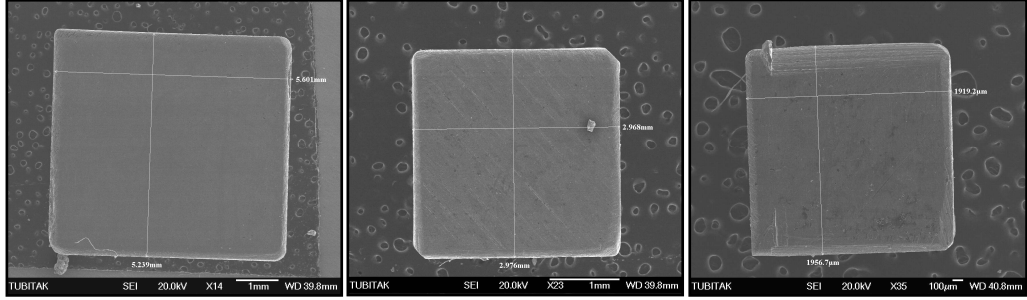


Şekil 10.27. VHP tekniği ile birleştirilmiş blok üzerindeki sertlik taraması sonrası elde edilen grafik ve ışık mikroskobu görüntüsü.



Şekil 10.28. 'Sarı' sert alfa fazını içeren blok ve ısıtıl işlem görmemiş titanyum alaşımı blok arasında VHP sonrası oluşan yapışma arayüzünün (a) Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve (b) ışık mikroskobu görüntüleri.

VHP proses koşulları (ısıtıl işlem gören ve görmeyen bloklar arasındaki mikro yapısal farktan dolayı) yapay hata olarak kullanılacak sert-alfa tabakalarının istenen boyut ve biçimde hazırlandıktan sonra ısıtıl işlem görmemiş bloklar içerisine oturtulduğu bloklarla tekrarlanmış ve VHP ile yapıştırılan bloklar ultrasonik muayeneye tabi tutulmuştur. Şekil 10.29’da titanyum blokların içine yerleştirilen ve tamamıyla beyaz sert-alfa fazından oluşan çeşitli büyüklüklerde ve küp şeklindeki yapay hatalara örnekler verilmektedir.



Şekil 10.29. Çeşitli büyüklüklerde ve küp şeklindeki ‘beyaz’ sert alfa fazından oluşan yapay hataların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

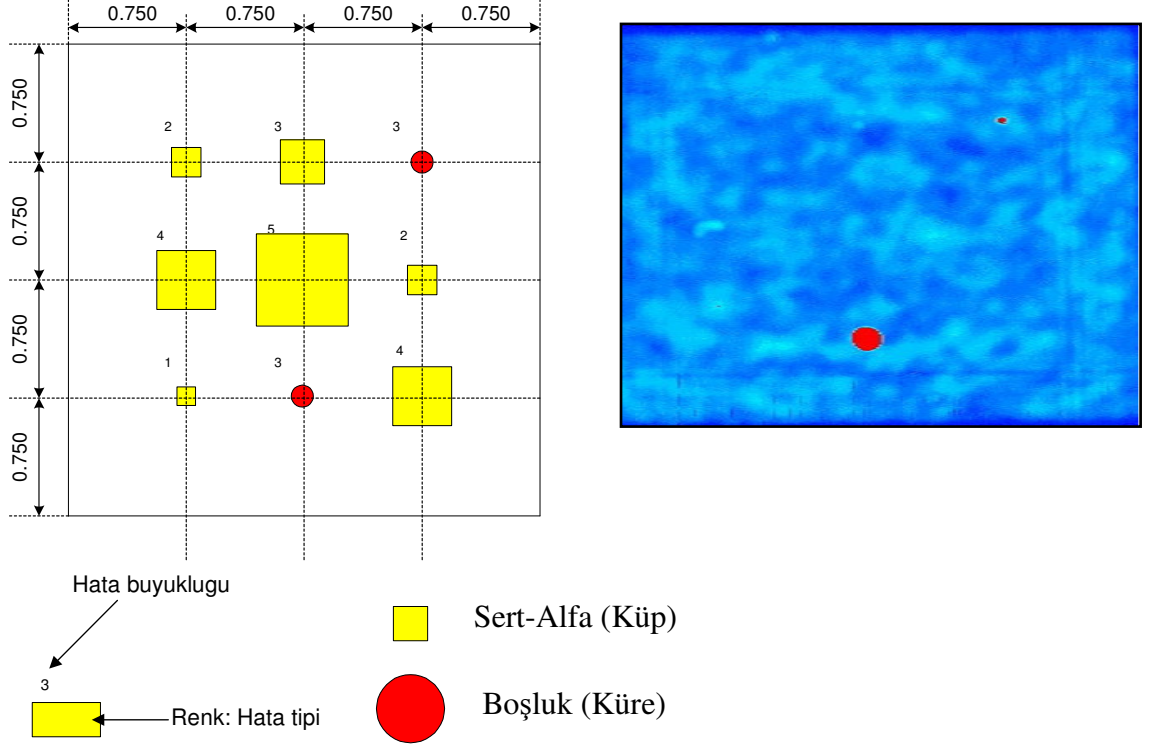
Çizelge 10.4’de çeşitli titanyum alaşımlarına ait ultrasonik hız, akustik empedans ve yoğunluk değerleri verilmektedir. Ultrasonik muayene yöntemi ile sert-alfa inklüzyonlarının tespitinde, sert-alfa fazı ve ana matristen alınan ultrasonik empedans değerleri birbirine ne kadar yakın ise söz konusu hatanın tespiti de o kadar güçleşir. Ayrıca sert-alfa fazı ile ana metalin yoğunluklarındaki küçük değişimlerin radyografik olarak tespiti de mümkün değildir (J.D. Cotton vd., 2006).

Bu çalışmada, yapay hata olarak sadece oksijen zengin α -Ti fazı içeren blokların ultrasonik muayenesi yapılmış ve sonuçları verilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi α -Ti ve Ti-6Al-4V alaşımındaki ultrasonik hızlar birbirine oldukça yakın değerlerdedir. Akustik empedans doğrudan yoğunluk ve ultrasonik hıza bağlı olduğundan bu değerlerin birbirine çok yakın olması C-tarama sonrası hataların tespitini oldukça zorlaştırmaktadır.

Tablo10.4. Çeşitli titanyum alaşımlarına ait ultrasonik hız, akustik empedans ve yoğunluk değerleri.

ÜRÜN ADI	ULTRASONİK HIZ			YOĞUNLUK	AKUSTİK EMPEDANS			REFERANSLAR
	km/sn				g/cm ³			
	V _L	V _R	V _T		kg/m ² sn (x 10 ⁶)			
Ti 6Al-4V, (α,β)				4.42				L.B. Greszczuk, 1966 J.J. Shyne & R.G. Shaver, 1966
("Ti 6-4"; "Timetal 6/4"; Alaşım 4911)	5.83			4.42	25.76		62	J. Couchman, 1976
	5.88	2.86	3.08	4.43	26.0	12.7	13.8	MIL-HDBK-5E, US Department of Defense, 1987
	5.88	2.89	3.11	4.43	26.0	12.8	13.8	Titanium Alloys Handbook, 1978
	5.99	2.85	3.06	4.46	26,7	12.7	13.6	G. A. Alers, 1977 G. Alers & L. Graham, 1976
HARD ALFA VERİLERİ ve STANDARD TİTANYUM ALAŞIMLARINA ÖRNEKLER								
ÜRÜN ADI	V _L	V _R	V _T	YOĞUNLUK	Z _L	Z _R	Z _T	REFERANSLAR
Ti (Ti 6A1-4V)	6.17							Flood-Evans, 1985
α-Ti	6.05		3.1					R.B. Thompson, 1992
ÇATLAK OLUŞTURUCU ETKİSİ OLAN N ELEMENTİ İÇEREN TİTANYUM ALAŞIMLARI								
ÜRÜN ADI	V _L	V _R	V _T	YOĞUNLUK	Z _L	Z _R	Z _T	REFERANSLAR
N kontaminasyonlu α-Ti	6.25		3.28					R.B. Thompson, 1992
Ti + %1.61 N ₂	6.33/6.35							F. Margetan vd., 1994
Ti + %2.5 N ₂	6.39							G. Alers & L. Graham, 1976
Ti + % 2.61 N ₂	6.52/6.56							F. Margetan vd., 1994
Ti + %5.4 N ₂	6.15							G. Alers & L. Graham, 1976
100% Ti	6.04							L.J.H. Brasche vd., 1992
%50 Ti-% 50 Nitrülenmiş Ti (0.15% N)	6.13							L.J.H. Brasche vd., 1992
%100 Nitrülenmiş Ti (0.22% N)	6.24							L.J.H. Brasche vd., 1992
ÇATLAK OLUŞTURUCU ETKİSİ OLAN O ELEMENTİ İÇEREN TİTANYUM ALAŞIMLARI								
ÜRÜN ADI	V _L	V _R	V _T	YOĞUNLUK	Z _L	Z _R	Z _T	REFERANSLAR
α-Ti	6.02		3.11					R.B. Thompson, 1992
%0.3 oksijen	6.07		3.16					R.B. Thompson, 1992
%1.0 oksijen	6.2		3.27					R.B. Thompson, 1992

Şekil 10.30’da çeşitli büyüklüklerde küp şeklinde yapay hatalar içeren Titanyum bloğa ait teknik resim ve ultrasonik muayene sonuçları verilmektedir.



Şekil 10.30. Yapay hata içeren Titanyum bloğa ait teknik resim ve ultrasonik muayene C-scan görüntüsü.

Ultrasonik muayenede, akustik empedansı ana malzemenin akustik empedansına yakın değerlerde olan ‘beyaz’ sert-alfa fazı tespit edilememiştir. Buna karşın yapı içerisindeki boşlukların kolaylıkla tespit edilebildiği gözlenmiştir. Sert-alfa fazının tespitindeki bu güçlük endüstriyel uygulamada son derece önemli bir husustur.

11. SONUÇLAR ve İRDELEMELER

Titanyum alaşımlarının askeri ve ticari havacılık sektöründe oldukça geniş kullanımı söz konusudur. Bu sektörde güvenliğin son derece önemli olması nedeni ile mühendislik bileşeni olarak kullanılan titanyum alaşımı malzemelerin inklüzyon, çatlak, boşluk ve herhangi bir hasara sebebiyet verebilecek diğer yapısal kusurları içermemesi gerekmektedir. Bu nedenle üretim sonrası mutlaka muayene yapılması gerekmektedir. Titanyum alaşımlarındaki hasarların bir nedeni de metal içindeki oksijen ve/veya azot empüritelerinden meydana gelen sert-alfa fazıdır. Sert-alfa inklüzyonları onu çevreleyen ana metalden çok daha yüksek sertlikte olan oksijen ve/veya azot empüriteleri ile kontamine olmuş bölgelerdir. Bu kırılgan faz, malzeme içerisinde yüksek gerilme konsantrasyonlarına sebep olarak yapıda meydana gelecek çatlak başlangıcının kaynağı olabilir.

Tez çalışmasında sırası ile:

- Ti-6Al-4V alaşım sistemi içinde yapay hata olarak üretilen sert-alfa fazının oluşturulması için optimum ısıtım işlem koşulları belirlenmiş,
- Faz, boyut ve şekil olarak kontrollü üretilen yapay hatalar, yine özellikleri bilinen ve ultrasonik muayenede standart test blokları olarak kullanılacak aynı alaşımlı kitle malzeme bloklar içerisine yerleştirilmiş,
- Yapay hataların Ti-6Al-4V alaşımı kitle malzeme içerisine yerleştirilmesinde kullanılacak difüzyonla birleştirme prosesi için uygun Vakum Sıcak Pres (vacuum hot press – VHP) parametreleri (yük-sıcaklık-süre) belirlenmiş,
- VHP yöntemi kullanarak difüzyonla birleştirilmiş, ve yeri, şekli, boyutu ve mikroyapısal özellikleri bilinen yapay hatalar içeren referans bloklarının C-tarama ile ultrasonik muayenesi gerçekleştirilmiş ve hataların tespit edilemedikleri saptanmıştır.

Ti-6Al-4V alaşımı numune yüzeyinde sert-alfa tabakası oluşturmak için iki farklı ısıtım işlem koşulu belirlenmiştir. Azot gazı altında 1250°C sıcaklık ve çeşitli sürelerde gerçekleştirilen ısıtım işlemleri sonrası numune yüzeyinde oldukça düzgün sarı renkte bir sert-alfa tabakası gözlenmiştir. Azot verilmeksizin 950°C sıcaklık altında, yine çeşitli

sürelerde gerçekleştirilen ısıt işlemler sonrası ise numune yüzeyinden içeri doğru, keskin sınırları olmayan bir difüzyon tabakası gözlenmiştir.

Azot gazı altında 1250°C ve 8 saat süre ile ısıt işleme tabi tutulan numune yüzeyinde oluşan ‘sarı’ renkli sert-alfa fazı azotça zengin TiN fazıdır. Azot gazı verilmeksizin 950°C ve 4.5 saat süre ile ısıt işleme tabi tutulan numune yüzeyinde oluşan ‘beyaz’ renkli sert-alfa fazı oksijence zengin α -Ti fazıdır.

Yüzeyinde ‘sarı’ ve ‘beyaz’ sert-alfa fazlarını barındıran ve ticari olarak PVD tekniği ile TiN kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımı numuneler Confocal Raman spektrometresi kullanılarak kıyaslamalı olarak incelenmiştir. ‘Sarı’ sert-alfa fazı ve ticari olarak PVD tekniği ile TiN kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımına ait spektrometrede ana piklerinin aynı buna karşın ‘sarı’ sert-alfa spektrometresinde ilave küçük piklerin olduğu saptanmıştır. Bu küçük pikler iki TiN fazının farklı yöntemlerle oluşturulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. PVD tekniğinde Ti-6Al-4V alaşımı yüzeyi sadece TiN ile kaplanırken, ısıt işleme ile oluşturulan TiN fazı içerisinde bir miktar oksijen de barındıracaktır. Yapılan karakterizasyon çalışmalarında bu bulgu EPMA sonucu ile de desteklenmektedir. EPMA ile yapılan analizlerde de ‘sarı’ sert-alfa fazı içerisinde oksijen tespit edilmiştir. Confocal Raman spektrometre sonuçlarına göre ‘beyaz’ sert-alfa fazı iki farklı yöntemle oluşturulan TiN fazdan oldukça farklıdır.

Yine yüzeyinde ‘sarı’ ve ‘beyaz’ sert-alfa fazlarını barındıran ve ticari olarak PVD tekniği ile TiN kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımı numunelere Scratch test yöntemi uygulanmış, numune yüzeyindeki kaplamalar mekanik özellikleri açısından kıyaslanmıştır. Test sonrası, ‘sarı’ sert-alfa fazı ve ticari olarak PVD tekniği ile Ti-6Al-4V alaşımı numune yüzeyine kaplanan TiN kaplamanın benzer karakterde olduğu gözlenmiştir. İki TiN faz üzerinde de düzgün fakat devamlı olmayan çizik gözlenirken, ‘beyaz’ sert-alfa yüzeyinde oluşturulan çizik devamlılık arz ettiği saptanmıştır. Numuneler üzerinde oluşan çizik düzgünlüğü ve devamlılığı, numune üzerinde oluşan kaplama tipine göre değişmektedir. Daha sert olan kaplamadaki mikro talaşlar daha fazla olacak ve bu durum da çizik boyunca devamsızlığa neden olacaktır. Test sonrası, kaplama sertliklerinin yumuşaktan serte doğru olmak üzere ‘beyaz’ sert-alfa, ticari

olarak PVD tekniği ile TiN kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımı numune ve ‘sarı’ sert-alfa şeklinde olduğu ispatlanmıştır.

Deneysel sonuçlarda belirtildiği gibi TiN’e dönüştürülmüş azotça zengin yüzey altı bölgede EPMA ile elementel haritalamada alüminyum elementinin aksine vanadyum tespit edilmemiştir. Bu gözlem yine EPMA ile yapılan çizgisel kalitatif analizde de grlmştir (şekil.10.22). Bu durum, azotun bu bölgedeki varlığının vanadyumun titanyum içerisindeki çözünürlüğünü azaltması ile açıklanabilir. Yüzeyinde ‘beyaz’ sert-alfa fazı oluşturulmuş numunede yapılan EPMA-haritalama sonuçlarına göre ise numune yüzeyinde tüm elementlerin (incelemenin yapıldığı alan boyunca) mevcudiyetlerini korudukları gözlenmiştir.

Oluşturulan fazların hedeflenen fazlar olduğu birbirleriyle uyumlu sonuçlar veren XRD ve TEM verileri ile ortaya koyulmuştur. Buna göre ‘beyaz’ sert-alfa bir α -titanyumdur ve kristal yapısı ısıtılma işlem görmemiş Ti6Al4V alaşımının kristal yapısı ile aynıdır (HSP). Azotça zengin ortamda oluşturulan ‘sarı’ sert-alfa fazı ise TiN’ dr ve kristal yapısı YMK’ dr.

Ultrasonik muayene yöntemi ile sert-alfa inklüzyonlarının tespitinde, sert-alfa fazı ve ana matristen alınan ultrasonik empedans değerleri birbirine ne kadar yakın ise söz konusu hatanın tespiti de o kadar güçleşir. Çalışmada, sadece yapay hata olarak oksijence zengin α -Ti fazı içeren blokların ultrasonik muayenesi yapılmış ve sonuçları verilmiştir. α -Ti ve Ti-6Al-4V alaşımdaki ultrasonik hızlar birbirine oldukça yakın değerlerdedir. Akustik empedans değeri ultrasonik hız ve yoğunluğa bağlı bir değer olduğundan bu değerlerin birbirine yakın olması C-tarama sonrası hataların tespitini oldukça zorlaştırmaktadır.

KAYNAKLAR

- A.A. Kaya, S. Ucuncuoglu ve K. Allahverdi, 'Evaluation of TiN Coatings Produced Via Different Techniques' Innovations Titanium Technology Symposium TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), (2007).
- A.A. Kaya, S. Ucuncuoglu, N. Kurkcu, A. Kandemir ve H. Arslan, 'Production of UT Reference Blocks Containing Artificially Introduced Defects', Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Volume 26, (2006).
- Amitava Ray, 'Electron-Probe Microanalysis: Some Revelations in the Investigation of Defects in Steel Products' Materials Science Forum Vols. 492-493 (2005), 627-633.
- ASNT-Nondestructive Testing Handbook- Vol:9 (1996).
- ASNT-Nondestructive Testing Handbook- Vol:10 (1996).
- A.Czyrska-Filemonowicz, P.A. Buffat, M. Lucki, T. Moskalewicz, W. Rakowski, J. Kekki, T. Wierzchon, 'Transmission electron microscopy and atomic force microscopy characterisation of titanium-base alloys nitrided under glow discharge' Acta Materialia Volume 53 No:16 (2005), 4367-4377.
- Bernd Rauschenbach, ' Mechanical Properties of Nitrogen Ion-implanted Ti-6Al-4V Alloy' Surface and Technology, Volume 66 (1994), 279-282.
- Benedict, G.F. 'Nontraditional Machining Processes' NewYork and Basel Marcel Dekker Inc. 207-229, (1987).
- C.P. Coustable, J.Yarwood, W-D. Munz / Surface & Coatings Technology 116–119 (1999), 155–159.
- C. Çoğun, Ş. Akaslan, 'The Effect of Machining Parameters on Tool Electrode Wear and Machining Performance in Electric Discharge Machining', KSME International Journal, 16, 1, (2002) 46-59.
- C. Çoğun, O. Poyrazoğlu, 'The Variation of Machining Performance With Machining Parameters in EDM', 2nd International Conference on Design and Production of Dies and Molds, Kuşadası, (2001).
- C. Hammond & J. Nutting, Metal Science, (1977), 474-490.
- C.Hammond ve P.M.Kelly, 'The Crystallography of Titanium Alloy Martensites' Acta Metallurgica, Volume 17, (July1969), 869-882.
- C.G.Rhodes, "Applied Metallography" by G.F. Vander Voort, Van-Nostrand Reinhold, 1986, ISBN: 0442288360
- D. Ensminger, 'Ultrasonics' Marcel Dekker, Inc., New York, (1973).
- E.E. Jamieson, 'Ultrasonic evaluation of Beryllium-Copper Diffusion Bonds' Federal Manufacturing & Technologies Final Report, (2000).
- E.M. Grala 'Characterization of alpha segregation defects in Ti-6Al-4V Alloy' AFML-TR-68-304, Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, OH, (1968).

- E.O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, 'An overview of the machinability of aeroengine alloys', *Journal of Materials Processing and Technology*, Volume 134 (2003) 233-253.
- E.O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, 'An overview of the machinability of aeroengine alloys', *Journal of Materials Processing and Technology*, Volume 134 (2003) 233-253.
- Flood-Evans, özel toplantı (1985).
- F.J. Margetan, M. Gigliotti, L. Brashe ve W. Leach, 'Fundamental Studies: Inspection Properties for Engine Titanium Alloys' December 2002, Final Report.
- F. Margetan vd., "Density and Ultrasonic Velocity Measurements for Synthetic Hard-Alpha Titanium Specimens", Technical Report ISU/ETC-1 (1994)
- F.W. Wood, Elimination of Low Density inclusions in titanium alloy ingots, AFML-TR-67-47, Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Dayton, OH, (1969).
- G. Alers & L. Graham, Proc. ARPA/AFML Rev, of Quant. NDE, Tech. Report AFML-TR-75-212 (1976).
- G. A. Alers, Proc. ARPA/AFML Rev. Prog. Quant. NDE, Tech. Report AFML-TR--77-44 (1977).
- George F. Vander Voort, (2004), ASM Handbook Volume 9, ASM International, Materials Park-Ohio.
- G. Binnig, C.F. Quate, ve C.H. Gerber, 'Atomic force microscope', *Phys. Rev. Lett.* 56(9), (1986), 930-933.
- H.Bhadesia, 'Titanium & its alloys', *Materials Science & Metallurgy*, Part II Course C9, Alloys.
- Ho-Sung Lee, Jong-Hoon Yoon, *Journal of Materials Processing Technology* 187-188 (2007) 526-529.
- Iryna Pohrelyuk, Oleh Yaskiv ve Viktor Fedirko, 'Forming Carbonitride Coatings on Titanium by Thermomechanical Treatment with C-N-O-Containing Media' *JOM*, Volume 59 No: 6 (2007), 32-37.
- Ingrid De Wolf, Chen Jian, W. Merlijn van Spengen / *Optics and lasers in Engineering* 36 (2001), 213-223.
- J.D. Cotton, L.P. Clark and H.R. Phelps 'Titanium Investment Casting Defects: A Metallographic Overview', *JOM*, (2006), 13-16.
- J.C. Williams, *Materials Science and Engineering A* 1999, 263,107.
- J. Krautkramer ve H. Krautkramer, 'Ultrasonik testing of Materials' Springer-Verlag, Berlin, (1969)
- J.C. Smack, 'Immersed Inspection with Automatic Scanning and Recording of warning Signals' *Nondestructive Testing Vol:12,No:3* (1954), 29.
- John W.Parks, *Metals Handbook Volume 11, Nondestructive Inspection and Quality Control*, (1976) 366-372.
- J.R. Crookall, (1979), A Theory of Planar Electrode Face Wear in EDM, *Annals of the CIRP*, 28, 1, 125-129.

- J.I. Goldstein, D.E. Newbury, P. Echlin, D.C. Joy, C. Fiori, E. Lifshin, 'Scanning Microscopy and X-Ray Microanalysis' 2nd Ed., Plenum, New York, (1992).
- J.J. Shyne & R.G. Shaver, "Advanced Fibrous Reinforced Composites" (Society of Aerospace Materials and Process Engineers, 1966).
- J. Couchman, Proc. ARPA/AFML Rev, of Quant. NDE, Tech. Report AFML-TR-75-212 (1976).
- J.F. Wildey, 'Focus on Mechanical Failures: Mechanism and Detection' Vibration Institute, Willowbrook, IL, (1991), 3-12.
- J.C. Williams, 'Titanium Science and Technology volume 3' edited by R.I. Jaffee and H.M. Burte, The Metallurgical Society of AIME, Plenum Press, New York-London, 1973.
- Joanne L. Murray, (1987). Phase Diagrams of Binary Titanium Alloys, ASM International, Materials Park-Ohio.
- J. Couchman, Proc. ARPA/AFML Rev, of Quant. NDE, Tech. Report AFML-TR-75-212 (1976).
- Juhani Valli ve Ulla Makela, 'Applications of the scratch Test Method for Coating Adhesion Assesment', Wear, Volume 115 (1987), 215-221.
- K.S. Chan, L. Perocchi, G.R. Leverant, Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 31, (2000), 3029-3040.
- Kaynak Teknolojisi İkinci Sempozyumu, (1999), 21-226.
- L.J.H. Brasche vd., in "Review of Progress in Quantitative NDE" Vol.11B, (Plenum, 1992).
- L Lin, Y.W. Shi, J. Chen, X.M. Li ve G.P. Guo, 'Ultrasonik testing of the diffusion bonding of titanium alloys' NDT in Chine, Insight Vol 48 No 7 July (2006), 415-417.
- L.B. Greszczuk, "Advanced Fibrous Reinforced Composites" (Society of Aerospace Materials and Process Engineers, 1966).
- M. Kutz, (1998) 'Mechanical Engineering Handbook', New York, NY.
- Mc Geough, J.A. 'Advanced Methods of Machining' Charpman and Hall Ltd., England 128-147, (1988).
- M. Gigliotti, L. Perocchi ve R. Gilmore 'Microstructure and Sound Velocity of Ti-N-O Synthetic Inclusions in Ti-6Al-4V', Metallurgical and Materials Transactions A, Volume 25A, No:11, (November 1994), 2321-2329.
- Md. Alahi Uddin Khan, 'Non-destructive Testing Applications in Commercial Aircraft Maintenance' NDT.net, (1999), Volume 4 No:6.
- M.F. Islam and N. Ridley, 'Isostatic Diffusion Bonding of A Microduplex stainless Steel' Scripta. Materialia, Volume 38, (1998) 1187-1193.
- M.T. Salehi, 'Isostatic Diffusion Bonding of Some Superplastic Alloys'. Ph.D. Thesis, (1990), UMIST. Manchester,
- Mühendis Makine Dergisi, (1994), Kaynak Özel Sayısı.

- M.Peters, J. Kumpfert, C.H. Ward ve C.Leyens, 'Titanium Alloys for Aerospace Applications' Advanced Engineering Materials, Volume 5 No:6 (2003), 419-427.
- M.Peters, G.Lütjering ve G.Ziegler, Z.Metallkde., 74, 1983, 274-282.
- M.Peters, J. Hemptenmacher, J. Kumpfert, C.Leyens, (2003), Titanium and Titanium Alloys, Köln, Germany.
- "Military Handbook: Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures" (MIL-HDBK-5E, US Department of Defense, 1987).
- Matthew J. Donachie, JR. (2000), Understanding the Metallurgy of Titanium. In A Technical Guide Second Edition, Materials Park, Ohio.
- O.S. Heavens, J. Phys. Radium, 11 (1950), 355.
- P.J. Burnett ve D.S. Rickerby, 'The Relationship between hardness and scratch Adhesion' Thin Solid Films Volume 154 (1987), 403-416.
- P. Benjamin ve J.Weaver, 'Measurement Adhesion of Thin Films' Proc. R. Soc. London Ser. A, Volume 254 (1960), 163-176.
- Paul McIntire, 'Nondestructive Testing Handbook', Second edition, Volume 7, (1991).
- P.J. Laz, K.S. Chan, R.C. Mclung ve G.R. Leverant, 'Effects of CTE-induced residual stresses around hard alpha particles on fatigue crack growth in Ti-6Al-4V', Fatigue & Fracture of Engineering Material and Structure Volume 26, (2003), 1145-1157.
- P.J. Andersen, N.E. Alber, E.L. Thellmann, 'P/M Titanium reduces aerospace components costs', Precision Metals., Volume 104, (1980), 34-41.
- R.R. Boyer 'Aerospace applications of beta titanium alloys', Journal of Metals. Volume 46 No:7, (1994), 20-23.
- R.Kara, H. Virdil, 'Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilen Fe-Cu Çiftinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi', Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Volum 4, (2006) 45-52.
- R.B. Thompson vd., in "Review of Progress in Quantitative NDE" Vol. 11B, (Plenum, 1992).
- Roger W. Philips 'Atomic Force Microscopy for thin film analysis' Surface and Coating Technology, 68/69 (1994), 770-775.
- R.R. Boyer, 'An overview on the use of titanium in aerospace industry', Journal of Materials Science Engineering, Part A Volume 213 (1996) 103-114.
- R.G. Reddy: Proc. EMBR- State of the art, R. Bakish, ed, Reno, NV, (1988), 119-127.
- R.W. Evans, R.J. Hull ve B. Wilshire, 'The effects of alpha-case formation on the creep fracture properties of the high-temperature titanium alloy IMI834' Journal of Materials Processing Technology Volume 56, No: 1 (1996), 492-501.
- Shamblen et al. 'Titanium Base Alloys Clean Melt Process Development', Proc. 1989 Vacuum Metallurgy Conf., American Vacuum Society, Pittsburg, PA, May 8-10, 1989, 3-11.
- Sabri Tuncel, TÜBİTAK MAM Ultrasonik TEST Seviye-1 Kurs notları, Malzeme Enstitüsü Tahratsız Muayene Grubu.

- Springborn, R.K. 'Non-Traditional Machining Processes', American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 105-133, USA, (1967).
- S.L. Chen, B.H. Yan, F.Y. Huang, 'Influence of Kerosene and Distilled Water as Dielectrics on the Electric discharge Machining Characteristics of Ti-6Al-4V', Journal of Materials Processing Technology, 87, (1999),107-111.
- S. Üçüncüoğlu, C. Berk, O. İpek, D. S. Temur ve A. A. Kaya, 'Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarında Oluşturulan Sert- α Tabakalarının Kıyaslanması', 17. Elektron Mikroskobu Kongresi, (2005).
- S. Üçüncüoğlu, A. A. Kaya, N. Kürkçü, A. Kandemir, H. Arslan, C. Berk ve F. Ç. Şahin 'Sert-alfa Titanyum Fazının Ve Bu Fazı İçeren Ultrasonik Muayene Bloklarının Üretimi', 13. Metalurji ve Malzeme Kongresi, (2006).
- S.Üçüncüoğlu, Ö.Duygulu, A.A.Kaya, 'Farklı Koşullarda Oluşturulmuş Titanyum Sert-alfa Fazının Karakterizasyonu' 18. Ulusal Elektron Mikroskopi Kongresi, (2008).
- T. Chernobelskaya, S. Kovnovich ve E. Harnik, 'The testing of adhesive-bonded joints by a very high-resolution ultrasonic probe' J.Phys. D: Appl. Phys. Volume12, (1979) 815-817.
- T.Toya, R. Jotaki ve A. Kato 'Specimen Preparation in EPMA and SEM' JEOL Training Centre, Tokyo (1986).
- "Titanium Alloys Handbook" (Metals and Ceramics Information Center, Battelle/Columbus, 1978).
- Tricarico, C., Delpretti, R., Dauw, D.F., (1988), Geometrical Simulation of the EDM Die-Sinking Process, Annals of the CIRP, 37, 1, 191-196.
- T.R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne, ve D. Rugar, 'Frequency modulation detection using high-Q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity'. J. Appl. Phys. 69(2), (1991), 668-673.
- V.Henriques, P.Campos, C. Cairo, J. Bressiani, 'Production of Titanium Alloys for Advanced Aerospace Systems by Powder Metallurgy' Materials Research, Volume 8, No: 4, (2005), 443-446.
- W. König, L. Jörres, 'Aqueous Solutions Organic Compounds as Dielectrics for EDM Sinking', Annals of the CIRP, 36, 1, (1987),105-109.
- W.P. Conrardy, "Titanium-6Al-4V Low Density Inclusion Problem" TM-Maa-66-20, Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, OH, 1966.
- Y. Chen, S.M. Mahdavian, 'Parametric Study Into Erosion Wear in a Computer Numerical Controlled Electro-discharge Machining Process', Wear, 236, (1999), 350-354.
- Y. Honnarat, 'Issues and Breakthrough in the Manufacture of Turboengine Titanium Parts', Materials Science Engineering, Part A 213 (1996) 115-123.
- Z.Ergün ve C. Çoğun 'Elektro erozyon ile işleme iş parçası yüzey karakteristiklerinin deneysel incelenmesi', Gazi Üniv., Müh. Mim. Fak.Der. Cilt 21, No:3 (2006),427-441.

İTERNETTEN ALINAN KAYNAKLAR

- [1] <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2004/titanium/titanium.html>
- [2] <http://www.efunda.com/Materials/alloys/titanium>
- [3] http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=classification_of_titanium_alloys
- [4] <http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?IA=WO2001071337&DISPLAY=DESC>
- [5] <http://www.titanium.com/titanium/aerospac.cfm>.
- [6] www.twi.co.uk/j32k/getFile/kssbd003.html
- [7] www.swinburne.edu.au/iris/pdf/profiles/SoullisTavrou.pdf
- [8] Nontraditional Manufacturing Research Center, University of Nebraska-Lincoln, <http://www.unl.edu/nmrc>
- [9] http://www.mmo.org.tr/muhendismakina/arsiv/2003/haziran/makale_elektroerozyon.htm
- [10] http://yunus.hacettepe.edu.tr/~emreacan/stm/afm_ve_tar.htm

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi: 05.05.1978

Doğum yeri: İstanbul

EĞİTİM:

Yıldız Teknik Üniversitesi	2006– Devam ediyor Üretim Metalurjisi Ana Bilim Dalı
Kocaeli Üniversitesi	1997–2001 Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Üsküdar Çamlıca Kız Lisesi	1992–1995 Matematik-Fen Bölümü-Lise Diploması

DENEYİM:

TÜBİTAK-MAM	2005-Devam ediyor ME – Metal Teknolojileri Araştırmacı
TÜBİTAK-MAM	2000-2004 MKTAE – Alüminyum Süreçleri Araştırmacı

PROJELER:

1. Generation of Synthetic Defects and Their Incorporation Into Super Alloy and Titanium Bodies
GENERAL ELECTRIC 2005
2. Alüminyum Proses Geliştirme
TEKNİK ALÜMİNYUM A.Ş. 2003
3. Continous Casting Technologies for The Production of Aluminum
EUREKA 2002
4. AA6082, AA6060 ve AA6063 Ekstrüzyon Alaşımlarında Yüzey Kalitesinin Geliştirilmesi
SARAY ALÜMİNYUM A.Ş. 2002
5. Elektrik saclarının Yaşlandırma Tav Pratikleri
ARÇELİK 2001
6. Alüminyum Alaşımlarında İnce Levha Döküm Teknolojisi -II
ASSAN ALÜMİNYUM A.Ş. 2001
7. Alüminyum Alaşımlarında İnce Levha Döküm Teknolojisi -I
ASSAN ALÜMİNYUM A.Ş. 2000

YAYINLAR ve SUNUŞLAR:

1. Three Corosion Case Studies: Why should a drive chain gene come from? Is your cookie wet?
A. Arslan KAYA, D. Sultan Timur ve S. UCUNCUOGLU

The 3rd Israel International Conference, 2007

2. Magnezyum, Titanyum ve Zirkonyum Alaşımları ile Magnezyumun Difüzyonla Birleştirilmesi
A.A.KAYA, O.DUYGULU, Selda UCUNCUOGLU, G. OKTAY ve O. YUCEL
The Second International Conference and Exhibition 'Magnesium-Broad Horizons', 2007
3. Magnezyum Alaşımlarının İmplant Uygulamaları için Difüzyonla Birleştirilmesi
Ö.DUYGULU, S. UCUNCUOGLU, G.OKTAY ve AA KAYA,
18. Ulusal Elektron Mikroskopi Kongresi, Eskişehir, 2007
4. İmkansız Bir Kıyaslama: Devekuşu Yumurtası Kabuğu ve Gaz Türbini Oksiti
S. UCUNCUOGLU ve A.A.KAYA
18. Ulusal Elektron Mikroskopi Kongresi, Eskişehir, 2007
5. Farklı Koşullarda Oluşturulmuş Titanyum Sert-alfa Fazının Karakterizasyonu
S. UCUNCUOGLU ve A.A.KAYA
18. Ulusal Elektron Mikroskopi Kongresi, Eskişehir, 2007
6. Farklı Tekniklerle Üretilen TiN Kaplamaların Confocal Raman and AFM yöntemleri ile kıyaslanması
A. Arslan KAYA, S. UCUNCUOGLU ve K. ALLAHVERDİ
TMS Annual Meeting&Exhibition, Orlando, Florida/USA, 2007
7. Sert-Alfa Titanyum fazının ve bu fazı içeren Ultrasonik Muayene Bloklarının Üretimi
S. UCUNCUOGLU, AA KAYA, N. KURKCU, A. KANDEMİR, H. ARSLAN, C. BERK ve F.C.SAHİN
13. Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 2006
8. Yapay Hata İçeren UT Referans Bloklarının Üretimi
AA KAYA, N. KURKCU, S. UCUNCUOGLU, A. KANDEMİR, H. ARSLAN.
33rd Annual Review of Progress in QNDE, Portland, Oregon/USA, 2006
9. Fe-Ni-Co Süper Alaşımlarında Isıl İşlemin Martenzit Dönüşüm Sıcaklığına Etkisi
D.S. TEMUR, C. BERK, O. IPEK, S. UCUNCUOGLU ve AA KAYA
17. Elektron Microskobi Konferansı, Kocaeli, 2005
10. Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarında Oluşturulan Sert-Alfa Tabakalarının Kıyaslanması
S. UCUNCUOGLU, C. BERK, O. IPEK, D.S. TEMUR ve AA KAYA
17. Elektron Microskobi Konferansı, Kocaeli, 2005
11. Homojenleştirme Tavından Soğutma Pratiğinin Al-Mg-Si Alaşımlı Biyet Yapısına Etkileri
Y. BIROL, S. UCUNCUOGLU, T.A. BASER, F. ALAGEYİK ve O. ÇAKIR
Ege Üniversitesi Malzeme Bilimi Kongresi, İzmir, 2003
12. AA6063 Alaşımlı Profillerin Yaşlandırma Tavlama Davranışları
Y. BIROL, T.A. BASER, S. UCUNCUOGLU, F. ALAGEYİK ve O. ÇAKIR
16. Elektron Microskobi Konferansı, İzmir, 2003

13. İnce Levha Döküm Teknolojisi ile Üretilen Al-Mg ve Al-Mg-Si Alaşımlı Levhaların Otomotiv Sektöründe Kullanımları
Y. BIROL, S. UCUNCUOĞLU, M. SLAMOVA ve C. INEL
3rd Balkan Conference on Metallurgy, Makedonia, 2003
14. Homojenleştirme Tavından Soğutma Pratiğinin AA6063 Alaşımı Mikroyapısına Etkileri
Y. BIROL, G. KARA, S. UCUNCUOĞLU ve M. USTA
TMS Annual Meeting&Exhibition, San Diego, California/ USA, 2003
15. TiB₂ ve TiC Tane Küçültücülerin İnce Levha Dökümündeki Performansları
Y. BIROL, S. UCUNCUOĞLU, M. DUNDAR, O. ÇAKIR ve A. S. AKKURT
Light Metals, 2002
16. Elektrik Saclarında Tav Pratiğinin Çekirdek Kayıplarına Etkisi
F. S. BIROL, Y. BIROL, O. ÇAKIR, S. UCUNCUOĞLU, H. ERKALFA, T. GONUL ve T. CETİNTURK
Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 2002
17. Al-Fe-Si Alaşımlı folyolarda Bakırın Korozyon Davranışına Etkisi
F. S. BIROL, Y. BIROL, S. UCUNCUOĞLU ve C. INEL
Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 2002
18. İnce Levha Döküm Teknolojisi İle Üretilen Al-Fe-Si Alaşımlı Levhaların Segregasyon Davranışı
Y. BIROL, S. UCUNCUOĞLU, O. M. ACARSEKI ve H. G. ZEYBEKOĞLU
Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 2002
19. Alüminyum Alaşımlarının İnce Levha Dökümünde Tane Küçültme Uygulamaları İçin Al-Ti-B ve Al-Ti-C Alaşımlarının Kıyaslanması
Y. BIROL, S. UCUNCUOĞLU, O. ÇAKIR ve M. DUNDAR
Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 2002

TEKNİK CİHAZLAR:

JEOL 840JXA Taramalı Elektron Mikroskobu (EDS-mikro analiz tekniği ile birlikte)
 JEOL 6335 FEG- Taramalı Elektron Mikroskobu (EDS-mikro analiz tekniği ile birlikte)
 JEOL 100C Geçirim elektron Mikroskobu
 JEOL HRTEM (Yüksek Ayırım Güçlü TEM) (EDS-mikro analiz tekniği ile birlikte)
 EDWARDS S150B Kaplama Cihazı
 Teunopol-5 TEM numune hazırlama için elektro parlatma cihazı
 Struers LaboPress-1 Sıcak kalıplama cihazı
 Struers Secotom-10 Numune kesme cihazı
 Futuretech FM-700e Mikro sertlik test cihazı
 Struers LectroPol-5 SEM ve ışık mikroskobu için elektro parlatma cihazı
 Struers RotoPol-11 Numune parlatma ünitesi
 AMBIO Universal SPM Atomik Kuvvet Mikroskobu
 OLYMPUS BX51M Işık Mikroskobu
 NIKON L150 Işık Mikroskobu

ÖDÜLLER:

General Electric Generation of Synthetic Defects and their Incorporation Into Super Alloy and Titanium Bodies

TÜBİTAK MARMARA ARAŞTIRMA MERKEZİ 2006

Alüminyum Alaşımlarında İnce Levha Döküm Teknolojisi –II

TÜBİTAK MARMARA ARAŞTIRMA MERKEZİ 2001

Alüminyum Alaşımlarında İnce Levha Döküm Teknolojisi -I

TÜBİTAK MARMARA ARAŞTIRMA MERKEZİ 2000

SERTİFİKALAR:

Computational Solutions for Metallurgical and Chemical Industries and Their Environmental Concerns

İTÜ, 2007

Nano Technology Research Forum

ODTÜ, 2006

Demir-Çelik malzemelerinin Metalografisi

TÜBİTAK MAM, 2006

Tahribatsız Muayene

TÜBİTAK MAM, 2006

Taramalı Elektron Mikroskobu

TÜBİTAK MAM, 2006

Center Coating Laboratory

TÜBİTAK MAM, 2006