

T.C.
MİLLİ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ATATÜRK STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE LİSANSÜSTÜ
EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
HAVACILIK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
HAVACILIK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

SEÇİCİ LAZER ERGİTME (SLE) İLE ÜRETİLMİŞ
Tİ-6AL-4V ALAŞIMINDA POST PROSESLERİN
AŞINMAYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EDA NUR AKSU

2212105

PROF. DR. SUAT YILMAZ

İSTANBUL

MAYIS 2025

T.C.
MİLLİ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ATATÜRK STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE LİSANSÜSTÜ
EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
HAVACILIK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
HAVACILIK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

SEÇİCİ LAZER ERGİTME (SLE) İLE ÜRETİLMİŞ
Tİ-6AL-4V ALAŞIMINDA POST PROSESLERİN
AŞINMAYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EDA NUR AKSU

2212105

PROF. DR. SUAT YILMAZ

İSTANBUL

MAYIS 2025

T.C.
MİLLİ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ATATÜRK STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE LİSANSÜSTÜ
EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
HAVACILIK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
HAVACILIK MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

SEÇİCİ LAZER ERGİTME (SLE) İLE ÜRETİLMİŞ
Tİ-6AL-4V ALAŞIMINDA POST PROSESLERİN
AŞINMAYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EDA NUR AKSU

2212105

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07.05.2025

Tezin Savunulduğu Tarih : 09.04.2025

Tez Oy birliği ile başarılı bulunmuştur.

Unvan Ad Soyadı

İmza

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Suat YILMAZ

Jüri Üyeleri: Dr. Öğr. Üyesi Tuncay Yunus ERKEÇ

Dr. Öğr. Üyesi Serhat YILMAZ

İSTANBUL

MAYIS 2025

ÖZGÜNLÜK RAPORU

Tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve ç) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 75 sayfalık kısmına ilişkin, 22.04.2025 tarihinde şahsım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %3'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

1-Kaynakça hariç

2-Alıntılar hariç /dâhil

3-5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Millî Savunma Üniversitesi Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Özgünlük Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Usul ve Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Eda Nur AKSU

07.05.2025

ETİK BEYANI

Millî Savunma Üniversitesi Enstitüleri Dönem Projesi ve Lisansüstü Tez Hazırlama Kılavuzu'nda yer alan kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir; aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim. Bu tezdeki düşünce, görüş, varsayım, sav veya tezler bana aittir; Millî Savunma Bakanlığı, Millî Savunma Üniversitesi ve Atatürk Stratejik Araştırmalar Lisansüstü Eğitim Enstitüsü sorumlu tutulamaz.

Eda Nur AKSU

07.05.2025



Sevgili aileme

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Son dönemlerde malzeme üretimi ve araştırmalar üzerine yapılan çalışmalar ile birlikte katmanlı imalat üretim yöntemi ülkemize farklı yöntemler ile birlikte kazanım olarak yansımaktadır. Özellikle havacılık sektörünün birçok bileşeninde yer alan katmanlı imalat ile üretilen malzemeler, ek işlemler ve geliştirilmeler ile malzeme biliminde de faydalı bir etki göstermektedir.

Yazılan bu tezde katmanlı imalatın bir yöntemi olan seçici lazer ergitme yöntemi kullanılarak üretilen Ti-6AL-4V alaşımına farklı kaplamalar post proses olarak uygulanarak aşınma davranışları incelenmiştir.

Tez çalışmalarımın gerçekleştirilmesinde, öncelikle her türlü konuda yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım sayın Prof. Dr. Suat YILMAZ'a, kaplama kapsamı süreci vb. konularda yardımları olan Doç. Dr. Havva Kazdal ZEYTİN'e, aşınma vb. mekanik testlerin gerçekleştirilmesinde yardımları bulunan sayın Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN'a ve nihayet bana her zaman sağladıkları destek, rehberlik ve teşvik ile çalışma sürecimdeki desteklerinden dolayı sevgili aileme ve arkadaşlarıma minnettar olduğumu ifade etmek istiyorum.

Hazırlanan bu tez çalışmasının, gelecekte malzeme bilimi alanında yapılacak araştırma ve uygulamalarına katkıda bulunmasını umuyor ve diliyorum.

İstanbul; Mayıs 2025

Eda Nur AKSU

İÇİNDEKİLER

ÖZGÜNLÜK RAPORU

ETİK BEYANI

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
TÜRKÇE ÖZ.....	xii
İNGİLİZCE ÖZ (ABSTRACT).....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TİTANYUM ALAŞIMLARI VE ÖZELLİKLERİ.....	2
2.1 Ti-6Al-4V Alaşımı ve Özellikleri.....	3
3. EKLEMELİ İMALAT.....	5
3.1 Metal Eklemeli İmalat Üretim Yöntemleri ve Özellikleri.....	5
3.1.1 Toz Püskürtme Yöntemi.....	5
3.1.2 Toz Yığma Yöntemi.....	6
3.1.3 Elektron Işını Ergitme Yöntemi.....	6
3.1.4 Ergitme Yöntemi.....	7
3.2 SLE Seçici Lazer Ergitme.....	7
4. AŞINMA.....	10
4.1 Abrasif Aşınma.....	10
4.2 Adhesif Aşınma.....	12
4.3 Eroziv Aşınma.....	13
4.4 Korozif Aşınma.....	13
4.5 Aşınma Testi ve Çeşitleri.....	14
4.5.1 Ball-on Disk Aşınma Test Yöntemi.....	14

4.5.2 Pin On Drum Aşınma Test Yöntemi.....	14
4.5.3 Pin on Disk Aşınma Testi	14
4.5.4 Pin/Ball on Flat Aşınma Testi.....	15
5. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM)	18
6. ENERJİ DAĞILIMLI SPEKTROSKOPİ (EDS).....	19
7. MATERYAL VE METOT	20
7.1 Ti-6Al-4V Grade 5 Alaşımlarına Uygulanan HIP Isıl İşlemi.....	20
7.1.1 PVD ile TiN ve TiAlN Kaplanması	20
7.1.2 TiN PVD Kaplama	21
7.1.3 TiAlN PVD Kaplama	22
7.1.4 Eloksal Kaplama (Anodizasyon) Uygulaması	23
8. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI.....	24
8.1 Aşınma Deneyleri	24
8.2 Aşınma Testleri Sonrası Analizler.....	26
9. BULGULAR VE TARTIŞMA	27
9.1 Aşınma Test Sonuçları.....	27
9.2 Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ve Spektroskopi (EDS) Sonuçları	37
10. SONUÇ.....	56
KAYNAKÇA	58
ÖZGEÇMİŞ.....	60

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1: Titanyum Alaşımlarının Seçilmiş Mekanik Özellikleri	2
Tablo 2.2: Ti-6Al-4V Alaşımının İki Ana Metalurjik Kondisyon Özellikleri	3
Tablo 2.3: Ti-6Al-4V Kimyasal Toz Kompozisyon Bilgileri (%Ağ.)	4
Tablo 7.1: TiN PVD Kaplama Proses Parametreleri.....	21
Tablo 7.2: TiAlN PVD Kaplama Proses Parametreleri.....	22
Tablo 7.3: Anodizasyon Kaplama İşlem Parametreleri.....	23
Tablo 4 : Sürtünme Katsayıları Tablosu.....	28
Tablo 5 : Aşınma Kaybı Değerleri Tablosu	30
Tablo 6 : İncelenen Numunelerin Aşınma Oranı Hesaplamaları	32

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1: Ti-6Al-4V Özelliklerine Sıcaklığın Etkisi (Veiga ve Diğ., 2021).....	4
Şekil 3.1: Toz Püskürtme Yöntemi (Çelik ve Özkan, 2017).	6
Şekil 3.2: Elektron Işını Ergitme Yöntemi (Aydın ve Karamolla, 2019).	7
Şekil 3.3: Seçici Lazer Ergitme Yöntemi (Özer, 2020).	8
Şekil 3.4: SLE ile Üretilmiş Ti-6Al-4V Alaşımı Mikro Yapısı (Appavuravther, 2020).	8
Şekil 4.1: Yük Altında Abrasif Aşındırıcı Mekanizma (Çelik, 2010).	11
Şekil 4.2: (a) Pulluklama (b) Yorulma (c) Takozlama (d) Çatlak (e) Kesi (Çelik, 2010).	11
Şekil 4.3: (a) Pürüzlü Yüzey (b) Sert Parçacıklı Sistem (Çelikyürek, 2006).	12
Şekil 4.4: Adhesif Aşınma Kaynak Oluşumu (Gelir, 2019).	12
Şekil 4.5: Erozif Aşınma Örnekleri (Şahin, 2016).	13
Şekil 4.6: Korozyona Uğrayan Bölge Aşınması (Şahin, 2016).	13
Şekil 4.7: Levha Üzerinde Bilye Aşınma Şeması (Şahin, 2016).	14
Şekil 4.8: Pin/Ball-on-Flat Aşınma Test Mekanizması (Marui, 2001).	15
Şekil 4.9: Aşınma Kaybı Model Örneği, P1, P2 ve P3 Profil Çizgileri (Boztepe, 2015).	16
Şekil 5.1: Taramalı Elektron Mikroskobu Sistemi (Akçayöz, 2010).	18
Şekil 7.1: TiN Kaplanmış Ti-6Al-4V Alaşımı.	21
Şekil 7.2: TiAlN Kaplanmış Ti-6Al-4V Alaşımı.	22
Şekil 7.3: Anodizasyon Uygulanmış Ti-6Al-4V Alaşımı.	23
Şekil 8.1: Tribotechnic Oscillating Tribo Tester Aşınma Test Cihazı.	25
Şekil 8.2: A: İşlemsiz, B: Anodizasyonlu, C: TiAlN Kaplama, D: TiN Kaplama.	25
Şekil 9.1: Sürtünme Katsayısı Grafiği.	27
Şekil 9.2: Aşınma Kayıpları Grafiği.	29
Şekil 9.3: a) TiN Kaplama, b) TiAlN Kaplama, c) Anodizasyonlu, d) İşlemsiz.	31
Şekil 9.4: a) İşlemsiz, b) TiN Kaplama, c) Anodizasyonlu, d) TiAlN Kaplama.	34
Şekil 9.5: Temizlenmiş a) İşlemsiz, b) TiN Kaplama, c) Anodize d) TiAlN Kaplama.	35
Şekil 9.6: Test Sonrası Bakalite Alınmış Numuneler.	38
Şekil 9.7: Anodizasyon Uygulanmış Ti-6Al-4V SEM Görüntüleri.	39
Şekil 9.8: TiN Kaplama Ti-6Al-4V SEM Görüntüleri.	40
Şekil 9.9: TiAlN Kaplama Ti-6Al-4V SEM Görüntüleri.	41
Şekil 9.10: İşlemsiz Ti-6Al-4V SEM Görüntüleri.	42

Şekil 9.11: Anodizasyon Uygulanmış Ti-6Al-4V EDS Görüntüsü.....	43
Şekil 9.12: Anodizasyonlu Numune EDS Spectrum 5 Noktası Verileri.	43
Şekil 9.13: Anodizasyonlu Numune EDS Spectrum 6 Noktası Verileri.	44
Şekil 9.14: Anodizasyonlu Numune EDS Spectrum 7 Noktası Verileri.	44
Şekil 9.15: Anodizasyonlu Ti-6Al-4V EDS Çizgi Analizi Görüntüsü.....	45
Şekil 9.16: Anodizasyonlu Ti-6Al-4V EDS Elementer Çizgi Analizi.	46
Şekil 9.17: TiN Kaplama SEM Görüntüsü.	47
Şekil 9.18: TiN Kaplama EDS Elementer Analizi.	47
Şekil 9.19: TiN Kaplama EDS Çizgi Analizi Görüntüsü.	48
Şekil 9.20: TiN Kaplama EDS Elementer Çizgi Analizi.....	48
Şekil 9.21: TiAlN Kaplama Numunesi SEM Görüntüsü.....	49
Şekil 9.22: TiAlN Kaplama EDS Spectrum 1 Noktası Verileri.	50
Şekil 9.23: TiAlN Kaplama EDS Spectrum 2 Noktası Verileri.	50
Şekil 9.24: TiAlN Kaplama EDS Çizgi Analizi Görüntüsü.	52
Şekil 9.25: TiAlN Kaplama EDS Elementer Çizgi Analizi.....	52
Şekil 9.26: İşlemsiz Ti-6Al-4V SEM Görüntüsü.....	53
Şekil 9.27: İşlemsiz Ti-6Al-4V Spectrum 1 Noktası EDS Verileri.....	53
Şekil 9.28: İşlemsiz Ti-6Al-4V Spectrum 2 Noktası EDS Verileri.....	53
Şekil 9.29: İşlemsiz Ti-6Al-4V EDS Çizgi Analizi Görüntüsü.....	55
Şekil 9.30: İşlemsiz Ti-6Al-4V EDS Elemental Çizgi Analizi.	55

KISALTMALAR

A	: Aşınma İzinin Kesit Alanı (mm ²)
ASTM	: Amerikan Test ve Materyalleri Birliği
Aw	: Aşınma Kaybı Alanı
D	: Aşınma İzi Çapı
E	: Elastik Modül
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
HV	: Vickers Sertlik Değeri
HIP	: Hot Isostatic Pressing (Sıcak İzostatik Presleme)
L	: Kayma Mesafesi (mm)
mm³/N·m	: Spesifik Aşınma Oranı
PVD	: Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
R	: Bilya Çapı
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SLM	: Selective Laser Melting
SLE	: Seçici Lazer Ergitme
TS	: Çekme Dayanımı
Ti	: Titanyum
T_β	: Beta Dönüşüm Sıcaklığı
TiN	: Titanyum Nitrür
TiAlN	: Titanyum Alüminyum Nitrür
Ti-6Al-4V	: Titanyum Alaşımı (Grade 5) – %6 Al, %4 V
Ti-5Al-2.5Sn	: %5 Al, %2.5 Kalay içeren titanyum alaşımı
Ti-6-2-4-2-S	: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si alaşımı
UTS	: Nihai Çekme Dayanımı (Ultimate Tensile Strength)
V_f	: Aşınma Hacmi
V_p	: Pin Aşınma Hacmi
YS	: Akma Dayanımı
μ_k	: Kinetik Sürtünme Katsayısı
ΔV	: Toplam Hacim Kaybı
σ_ç	: Çekme Gerilmesi

TÜRKÇE ÖZ

Seçici Lazer Ergitme (SLE) ile Üretilmiş Ti-6Al-4V Alaşımında Post Proseslerin Aşınmaya Etkisinin İncelenmesi

Eda Nur AKSU

Milli Savunma Üniversitesi, Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İstanbul, Mayıs 2025

Seçici Lazer Ergitme (selective laser melting, SLM) yöntemi, havacılık sektöründe uçakların gövdesi, yapısal ve motor parçaları, tıp alanında biyomedikal aksam ve cihaz ile çeşitli implant biyomalzemelerinin imalatı gibi alanlarda yaygın olarak kullanılan, hızlı prototipleme (rapid prothotyping) süreci ile birlikte düşük ağırlıkta, yüksek dayanım göstererek karmaşık geometrideki parça tasarımı ve yekpare malzeme üretimi avantajı sağlayan 3D-eklemeli imalat (additive 3D-printing) yöntemidir. Grade 5 olarak tanımlanan Ti-6Al-4V alaşımları, korozyon direncine karşı yüksek dayanım göstermesi, yüksek tokluk ve mekanik özelliklere sahip olması açısından birçok alanda tercih edilmektedir. Çalışmalarda kullanılmak üzere; SLM ile eklemeli imalatla üretilmiş, ~%100 doluluk oranında ve 60 µm katman kalınlığında Ti-6Al-4V Grade 5 alaşımı numuneler elde edilmiştir. Tez çalışmasının asıl amacı, Ti-6Al-4V malzemesinin mükemmel özelliklerinin yanında, aşınma özelliklerini daha da iyileştirmek amacıyla farklı yüzey kaplamaları uygulanarak Ti-6Al-4V alaşımının aşınma-mekanik özelliklerinin geliştirilmesini sağlamak ve farklı kaplamaların aşınma dayanımı üzerine etkilerinin incelenmesidir. Bu amaçla SLE eklemeli imalat yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunelerine; önce HIP (Sıcak İzostatik Presleme) işlemi, devamında Eloksal (Anodik oksidasyon veya anodizasyon) kaplama işlemi yapılmıştır. Bunun yanı sıra bir başka grup Ti-6Al-4V numuneye PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) ile yaklaşık 2-3 µm kalınlıkta TiN (titanyum nitrür) ve TiAlN (titanyum-alüminyum-nitrür) kaplamaları uygulanmıştır. Daha sonra tüm numunelerin aşınma davranışlarının incelenmesi hedeflenmiştir. Aşınma testleri için ball-on-flat (reciprocating) yöntemi tercih edilmiştir. Karşılaştırmalı olarak aşınma özelliklerinin incelenebilmesi için, TiN, TiAlN ve anodizasyon olarak kaplanmış ve işlemsiz Ti-6Al-4V olmak üzere 4 farklı aşınma test numunesi elde edilmiştir. Özellikle kaplanmış ürünlerin kaplama karakteristiğini değerlendirebilmek üzere SEM/EDS mikroyapı incelemeleri yapılması hedeflenmiştir. Yapılan değerlendirme ve irdelemeler sonucunda; en iyi aşınma dayanımı gösteren numune grubu, TiN kaplanmış Ti-6Al-4V olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Ti-6Al-4V Alaşımı, Anodizasyon Kaplama, Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), Reciprocating Aşınma, TiN ve TiAlN Kaplama.

Bilim Kodu : 91529

Sayfa Sayısı : xiii + 60

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Suat YILMAZ

İNGİLİZCE ÖZ (ABSTRACT)

Investigation of the Effect of Post Processes on Wear in Ti-6Al-4V Alloy Produced by Selective Laser Melting (SLM)

Eda Nur AKSU

Turkish National Defense University, Atatürk Strategic Studies and Graduate Institute

Istanbul, May 2025

Selective Laser Melting (SLM) is an additive 3D-printing method that is widely used in the aerospace industry for the production of aircraft bodies, structural and engine parts, as well as in the medical field for biomedical components, devices, and various implant biomaterials. This method, used along with rapid prototyping, allows for the design of complex geometries and the production of monolithic materials that are lightweight yet exhibit high strength. Ti-6Al-4V alloys, known as Grade 5, are preferred in many applications due to their high corrosion resistance, toughness, and mechanical properties. For research purposes, Ti-6Al-4V Grade 5 alloy samples produced by SLM additive manufacturing with ~100% density and a layer thickness of 60 μm have been obtained. The primary goal of the thesis is to enhance the wear properties of the Ti-6Al-4V alloy by applying different surface coatings, alongside its excellent inherent properties, and to investigate the effects of these coatings on wear resistance. With this aim, Ti-6Al-4V alloy samples produced by the SLM method underwent HIP (Hot Isostatic Pressing) and subsequent Anodizing (Anodic oxidation or anodization) coating processes. Additionally, another set of Ti-6Al-4V samples was coated with approximately 2-3 μm thick TiN (titanium nitride) and TiAlN (titanium-aluminum-nitride) using PVD (Physical Vapor Deposition). The goal was then to examine the wear behavior of all samples. The ball-on-flat (reciprocating) method was chosen for wear testing. To comparatively analyze wear properties, four different wear test samples were prepared: TiN coated, TiAlN coated, anodized, and uncoated Ti-6Al-4V. To evaluate the coating characteristics, especially of the coated products, SEM/EDS microstructure analyses were planned. The evaluations and analyses concluded that the sample group with the best wear resistance was the TiN coated Ti-6Al-4V.

Keywords: Ti-6Al-4V Alloy, Anodized Coating, Physical Vapor Deposition (PVD), Reciprocating Wear, TiN and TiAlN Coating.

Science Code : 91529

Pages : xiii + 60

Supervisor : Prof. Suat YILMAZ Ph.D.

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat üretim tekniği ile genel olarak polimer, metal, seramik ve alaşım bazlı malzemelerin üretimi sağlanabilmektedir. Yüksek mekanik özellikleri sayesinde metal eklemeli imalat teknolojisi, üretilecek malzemeye ek işlem gerektirmeden tasarım sonrası atık oluşturmada yekpare parça olarak elde edilmesi, hızlı üretim süreleri gibi özelliklerden kaynaklı son zamanlarda birçok alanda tercih edilen, farklı yöntemlere sahip olan üretim yöntemidir. Tüm eklemeli imalat yöntemlerinde ortak özellik katman katman yöntem ile üretimin gerçekleşmesi iken, farklı toz birleştirme tipleri ve kullanılan üretim materyal farkı bulunmaktadır. Özellikle havacılıkta yüksek sıcaklık bileşenlerinde Ti-6Al-4V alaşımı, yüksek korozyon direnci ve yüksek mukavemet/yoğunluk özelliklerinden kaynaklı eklemeli imalat kapsamında tercih edilmektedir. Literatürde bu alaşım üzerine birçok eklemeli imalat yöntemi ve parametreleri bulunmaktadır. Eklemeli imalat kapsamında yüksek sıcaklıkta, iyi derecede mekanik özellik isteri var ise Ti-6Al-4V alaşım seçimi ile uygun değişkenlerde üretim yapılmalıdır. Aşınma kapsamında ise tribolojik olarak farklı test çeşitleri mevcuttur. Malzeme boyutu, hız, frekans, süre gibi etmenler ile farklı çıktılar sağlanabilmektedir. Öncelikle seçilen bu alaşım kapsamında SLM ile üretilmiş numuneler tercih edilerek ısıtma işlemi uygulandıktan sonra aşınma davranışlarını incelemek üzere reciprocating (ball-on-flat) aşınma testi uygulanacaktır. Testler sonrası davranışları yorumlamak adına SEM görüntüleri ve mikroyapı analizleri incelenecektir.

2. TİTANYUM ALAŞIMLARI VE ÖZELLİKLERİ

Titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri α ve β fazlarının özelliklerinden, düzenlenmelerinden ve hacim fraksiyonundan etkilenmektedir. Farklı elementler içindeki α ve β fazlarının farklı miktarları alaşım içindeki malzeme yoğunluğunu değiştirmektedir. Ayrıca, ince mikroyapılar mukavemeti ve sünekliği artırır, çatlak çekirdeklenmesini geciktirir ve süper plastik deformasyon için ön koşuldur.

Kaba mikroyapılar ise sürünme ve yorulma çatlak büyümesine karşı dirençlidir. Eş eksenli mikroyapılar yüksek süneklik, yorulma dayanımı sağlar, plastik deformasyon için idealdir. Lamel yapılar yüksek kırılma tokluğuna sahiptir ve yorulma çatlakına karşı dirençlidir. Titanyum alaşımları ise mukavemetli yapısı, düşük ağırlıkta yüksek sıcaklık direnci sebebi ile havacılık, uçak motorları, statik parçalar, roketler, sağlık gibi alanlarda kullanılmaktadır. Tablo 2.1 En çok kullanılan titanyum alaşımlarından bazılarının seçilmiş mekanik özelliklerini ve Tablo 2.2 Ti-6Al-4V alaşımının iki ana metalurjik kondisyonunu sunar (Veiga ve Diğ.,2012).

Tablo 2.1: Titanyum Alaşımlarının Seçilmiş Mekanik Özellikleri.

Alaşım Tipi	Kimyasal Yapı [ağ. %]	Sertlik [HV]	E [GPa]	Çekme Ger. TS σ_c [Mpa]	T_β [°C]
Saf Ti (α)	99.98 Ti	100	100-145	235	882
Ti grade 6 (α)	Ti-5Al-2.5Sn	500	109	861	1040
CP-Ti grade 1 (α)	0.2Fe-0.18O	120	-	>240	890
CP-Ti grade 4 (α)	0.5Fe-0.40O	260	100-200	>550	950
Ti-6-2-4-2-S (Near- α)	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si	340	114	1010	995
Ti-6-4 ($\alpha + \beta$)	Ti-6Al-4V	300-400	110-140	900-1200	995
Ti-6-6-2 ($\alpha + \beta$)	Ti-6Al-6V-2Sn	300-400	110-117	1000-1100	945

2.1 Ti-6Al-4V Alaşımı ve Özellikleri

Titanyum alaşımlarında karakteristik özellikleri belirleyen ve malzemenin mekanik özelliklerine etkileyen durumlar, alaşım içerisindeki faz dönüşümleridir. Ti-6Al-4V alaşımı için aşağıdaki tabloda da gösterilen tavlama işlemi, çözeltiye alma, yaşlandırma gibi işlemler alaşımdaki mekanik özellikleri değiştirmektedir.

Tablo 2.2: Ti-6Al-4V Alaşımının İki Ana Metalurjik Kondisyon Özellikleri

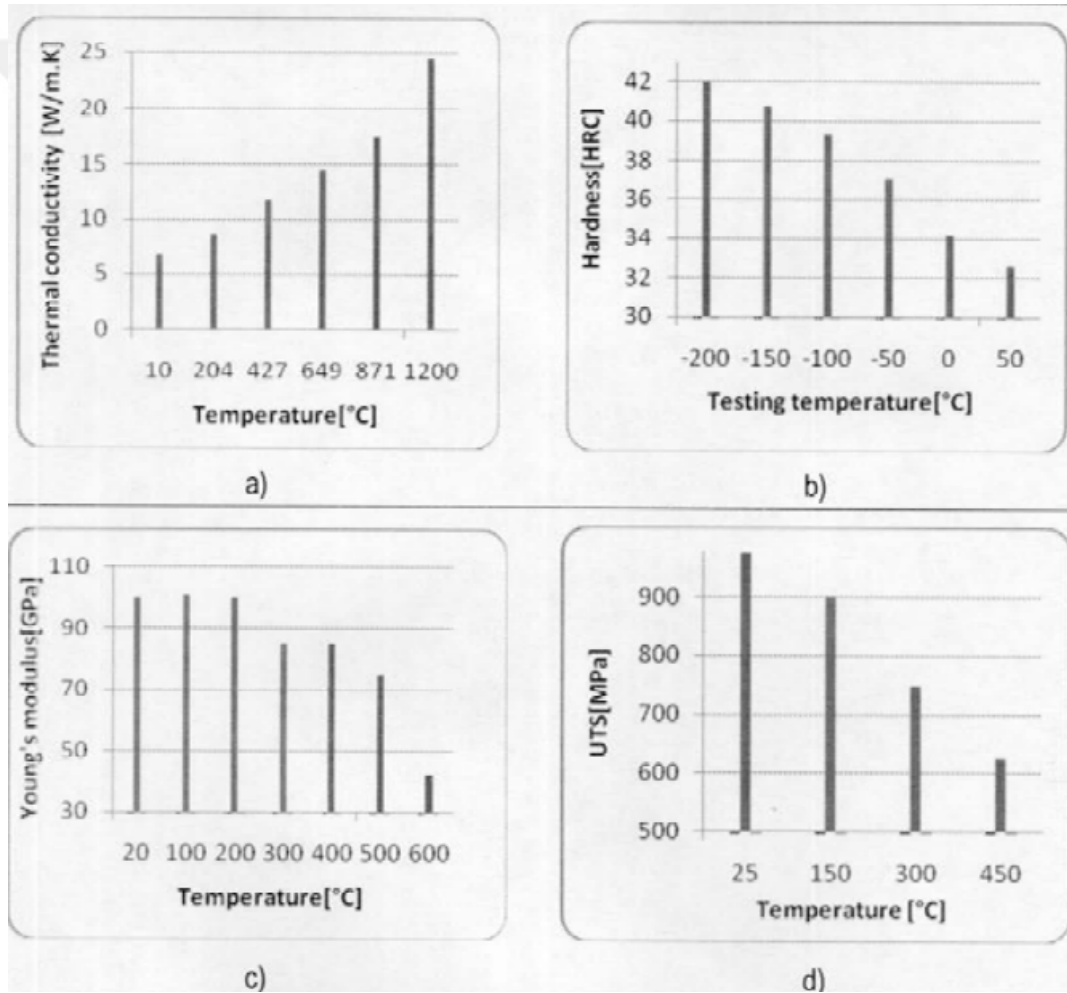
Malzeme	TS [Mpa]	YS[Mpa]	E [Gpa]	Sertlik [HV]	β -Dönüşüm [°C]
Ti-6Al-4V (Tavllanmış)	895	825	110	340	995
Ti-6Al-4V (Çözelti + Yaşlandırılmış)	1035	965	-	360	995

Ti-6Al-4V alaşımı genellikle tabloda gösterilen iki farklı koşulda, tavllanmış ve çözeltiye alınmış + yaşlanma işlemi uygulanmış şekilde kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de Ti-6Al-4V alaşımının bazı özellikleri üzerine sıcaklığın etkisi gösterilmiştir. Sıcaklık yaklaşık 10°C- 200°C arasında değiştiğinde ısı iletkenlik üç katına çıkmaktadır (Şekil 2.1a). Sertlik ise sıcaklık azaldıkça hızla artmaktadır. (Şekil 2.1b). 200°C üzerindeki sıcaklıklarda sıcaklık arttığından dolayı Young modülünde genel bir azalma görülmektedir. Fakat bu azalma 500°C üzeri sıcaklıklarda daha belirgindir (Şekil 2.1c). Nihai çekme dayanımı (UTS), 25°C’de 1000 Mpa iken sıcaklık arttıkça yaklaşık %45 kadar bir azalmaya sahiptir (Şekil 2.1d). Ti-6Al-4V alaşımında akma dayanımı, α fazının kalınlığı, hacim oranının artması ve aynı zamanda ferrit oranı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Mikroyapı ve mekanik özelliklerin araştırılmasında yapay sinir ağı tekniği kullanılmıştır ve ortalama mutlak yüzde hatası %1.22 olmuştur. Bu da Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri için verilen çıktılarının doğru olarak tahmin edebildiği anlamına gelmektedir. (Veiga ve Diğ.,2012). Ti-6Al-4V Grade 5 alaşımı kompozisyonu, Al 6%, V 4%, O<0.20%, N<0.05% şeklindedir. Çekme mukavemeti 895 MPa, kopma uzaması 10%’dur. Katmanlı imalat kapsamında en çok kullanılan alaşımlardandır (Yılmaz ve Koç, 2016).

Grade 5 alaşımı, ısıl işleme tabi tutulabilir ve yu'ksek mukavemeti sebebi ile havacılık uygulamalarında 400°C'ye kadar kullanım alanı sunmaktadır. İyi derecede tokluk o'zelliği ve kaynaklanabilirliği bulunmaktadır (Donachie, 2000).

Tablo 2.3: Ti-6Al-4V Kimyasal Toz Kompozisyon Bilgileri (%Ađ.)

Element	Ti	Al	V	O	N	C	H	Fe	Y
Max	-	6.75	4.5	0.2	0.05	0.08	0.015	0.3	0.005
Min	-	5.5	3.5	-	-	-	-	-	-



şekil 2.1: Ti-6Al-4V O'zelliklerine Sıcaklığın Etkisi (Veiga ve Diğ., 2021)

3. EKLEMELİ İMALAT

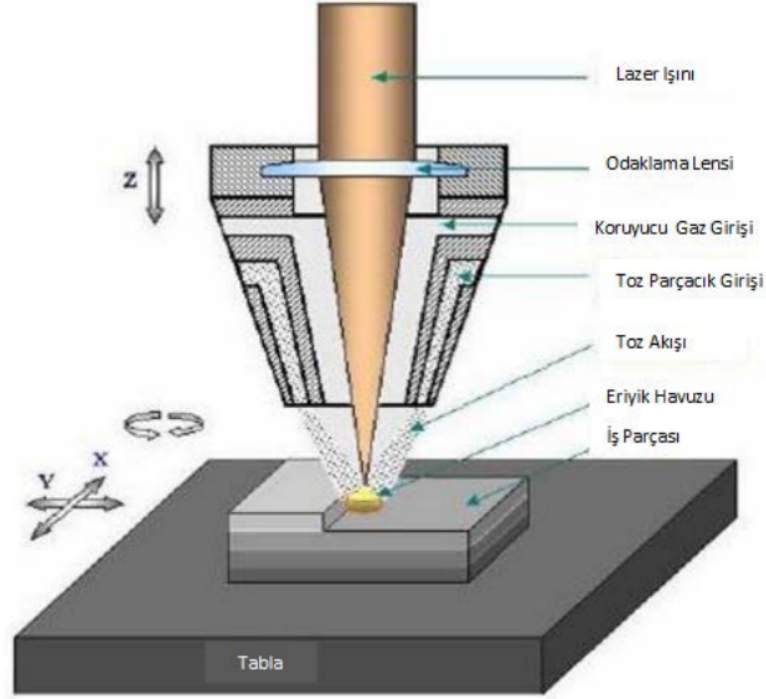
Eklemeli imalat (*additive manufacturing*) yöntemleri arasında metal toz kullanılarak yapılan üretim tekniği olan metal eklemeli imalat teknolojisinde, üretim materyali farklı boyut ve alaşımlarda bulunabilen metal tozlardır. Daha çok yüksek sıcaklık aralıklarında çalışması gereken, yüksek mukavemetli ve iyileştirilmiş mekanik özelliklere sahip malzeme ihtiyacında bu yöntem tercih edilmektedir. Havacılık-uzay bileşenlerinde, uçak motorları parçalarında, tıp alanında implant gibi çalışılan ortama uyum sağlayabilecek kapsamlarda kullanımı yaygındır. Üretimi genel katmanlı imalat yöntemlerinde avantaj olduğu gibi, metal eklemeli imalat yönteminde de kısa sürede atıksız malzeme üretimi ve karmaşık yapıdaki tasarım gerektiren parçalar imal edilebilmektedir (Aktimur ve Gökpinar, 2015).

3.1 Metal Eklemeli İmalat Üretim Yöntemleri ve Özellikleri

Eklemeli imalat yöntemlerinde metal kapsamında birçok teknik bulunmaktadır. Seçici Lazer Ergitme, Malzeme Biriktirme, Elektron Işını Ergitme ve Multijet Eritme gibi yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerde genel olarak lazer ya da elektron ışını gibi eritme kaynağı bulunmaktadır. Ek olarak üretim sisteminde fazla tozların çekilebilmesi için vakum sistemi gerekebilir. Oksitlenmeyi en aza indirmek amaçlı bazı üretimlerde sistemde Argon gazı kullanılmaktadır. Üretimde kullanılan metaller olarak Titanyum alaşımları, Alüminyum ve Nikel alaşımları, Süper alaşımlar gibi malzemeler kullanılabilmektedir (Özsolak, 2019).

3.1.1 Toz Püskürtme Yöntemi

Toz olarak bulunan malzeme 3 boyutlu kalıp model belirlenen bir tabla üzerinde katman boyunca püskürtülerek, aynı anda lazer yardımı ile tozları eriterek eriyik havuzu oluşturulur. İlk katman elde edildikten sonra aynı işlem diğer katman olarak üzerine eklenerek katman artırması devam edilmektedir. Bu yöntemde onarım çalışmaları için de kullanılan toz anlık olarak eriterek kullanılabilir.



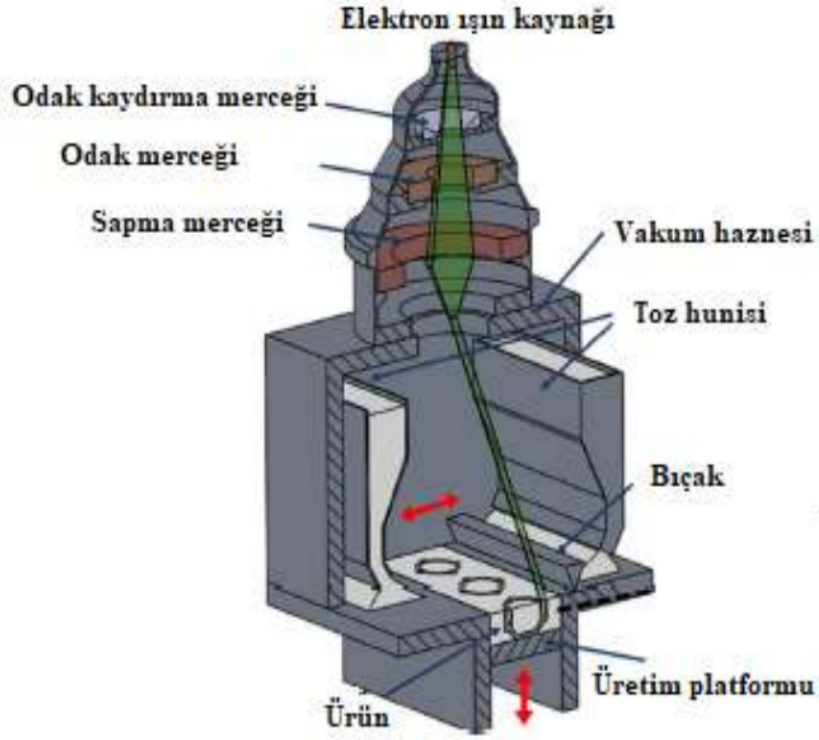
Şekil 3.1: Toz Püskürtme Yöntemi (Çelik ve Özkan, 2017).

3.1.2 Toz Yığıma Yöntemi

Üretim sürecinde belli bir haznede biriktirilmiş şekilde metal malzeme toz bulunmaktadır. Katmanlar sistem olarak oluşturulan bir tabla ve serim mekanizması ile toz serilerek, ergitme sağlayan bir kaynak yardımı ile eritilmektedir. Sisteme yüklenen tasarım dosyasını takip eden ergitme şekli sonucu mevcut ürün ortaya çıkmaktadır. Tekrarlayan bu süreç sonrası mevcut tasarımı yapılan üç boyutlu malzeme elde edilmektedir (Çelik ve Özkan, 2017).

3.1.3 Elektron Işını Ergitme Yöntemi

Toz halde sistem haznesinde bulunan metalleri elektron ışını kullanarak eriterek birleştirme yöntemidir. Serilen her bir metal katmandaki toz malzemeye göre uygun sıcaklıkta ısıtma yapılarak ergitildiğinden dolayı malzemede artık gerilmeler oluşmadığı için malzeme içerisinde martenzitik yapı yoktur. Ergitme bölgesel olarak yapılmaktadır ve toz boyutu ile serilen katman kalınlığı daha büyüktür. Bu sebep ile yüzey kalitesi pürüzlü yapıda olabilmektedir (Aydın ve Karamolla, 2019).



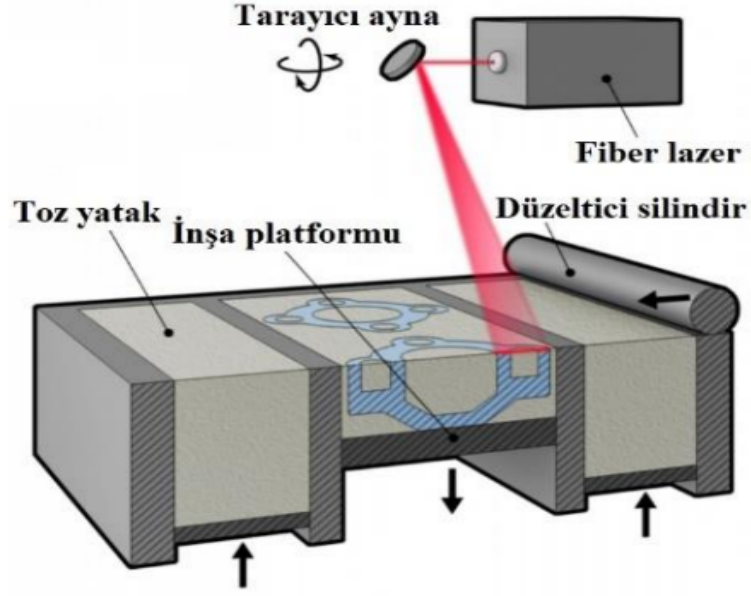
Şekil 3.2: Elektron Işını Ergitme Yöntemi (Aydın ve Karamolla, 2019).

3.1.4 Ergitme Yöntemi

Bahsedilen diğer katmanlı imalat çeşitlerine benzer şekilde toz haznesi kullanılarak üretim gerçekleştirilen yöntemlerden biri de Multijet Ergitme Yöntemidir. Üretim aynı doğrultuda, serilen bir toz katmanında seçilen kısımlara ergitici madde yönlendirilmesi ile yapılmaktadır. İstenilen spesifik kısımlara, keskin daha iyi özellik göstermesi açısından ergitme seviyesi değiştirilerek destek uygulaması da mevcuttur (Aydın ve Karamolla, 2019).

3.2 SLE Seçici Lazer Ergitme

Seçici Lazer Ergitme üretim sistemi karmaşık geometrili yapıların, hafif olarak üretilmesi amacı ile, belirlenen bir tasarım verisine göre lazer enerji kaynağı kullanılarak toz yatağına Elektron Işını Ergitme'den daha az kalınlıktaki mikronlarda serilen tozları belirli yönde ergiterek, yoğunluğu yüksek malzemeler elde edilmektedir. Hızlı soğuma özelliğine sahip olduğundan dolayı martenzitik yapısı bulunmaktadır. Bu sebep ile SLE yönteminden üretilen malzemelerin mekanik özellikleri daha iyi seviyededir (Siyambaş ve Turgut, 2022).



Şekil 3.3: Seçici Lazer Ergitme Yöntemi (Özer, 2020).

Tozlar önceden ısıtılmayan bir tabla üzerinde biriktirilir. Katılma her katman için hızlı katılacağı için Ti-6Al-4V alaşımı tamamen SLE ile üretildiğinde tüm yapının içeriğinde Şekil 3.4'te görüldüğü üzere martenzitik yapı bulundurmaktadır. Tarama sürecinde tane sınırları arasında birincil α taneleri görülmektedir. Proseste mikroyapıyı etkileyen faktörler tarama hızı, lazer ışını çapı gibi parametrelerdir. (Appavuravther, 2020).



Şekil 3.4: SLE ile Üretilmiş Ti-6Al-4V Alaşımı Mikro Yapısı (Appavuravther, 2020).

Ti-6Al-4V tozları kullanılarak SLM yöntemi ile üretilen malzemelere üretim sonrası HIP işlemi uygulandığında porozite oranının %2,24 arttığını gözlemlemişlerdir (Aydın, 2022).



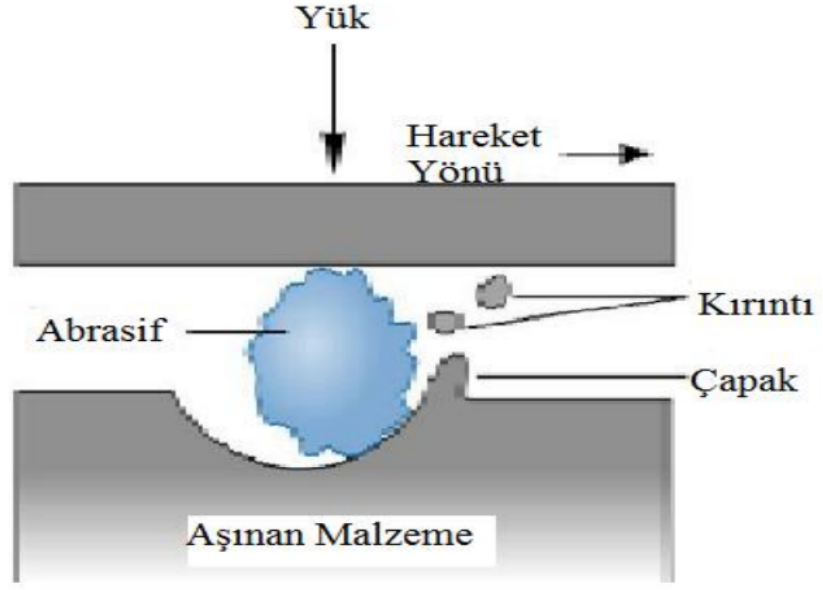
4. AŞINMA

Aşınma iki farklı bileşen yüzeyinin temas durumunda iken birbiri arasında mekanik hareketleri sonucu ortaya çıkan mikroskobik bir süreçtir. Numune özelliklerine bağlı olarak, uygulanan yük, ortam sıcaklığı, kayma hızı, kuru ya da sıvı ortam, uygulanan süre gibi parametre farklılıkları bulundurmaktadır. Aşınma oluşması durumu, sürtünme ile oluşan malzeme yüzeyinden kopan parçalardır ve enerji kaybına yol açmaktadır. Aşınmayı etkileyen bileşenler, malzeme tipi, boyutu, hareketi, yük-kuvvet skalası, ortam koşulları gibi etkenlerdir (Şahin, 2016). Farklı olarak aşınma tipleri bulunmaktadır.

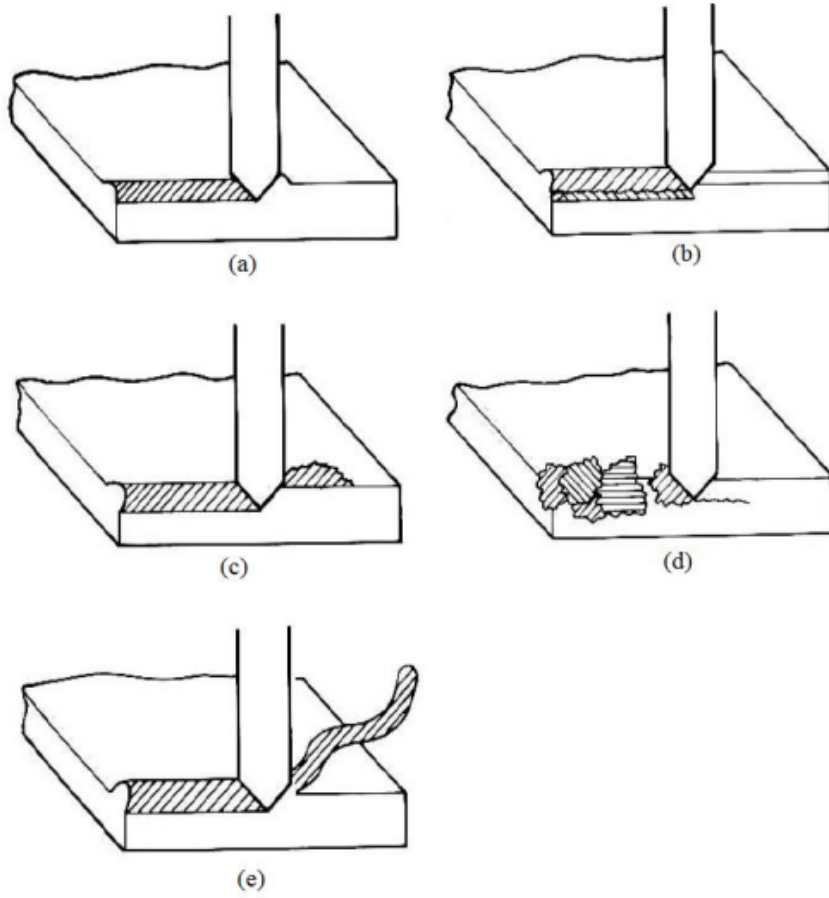
4.1 Abrasif Aşınma

Sert parçacıkların veya kabartı yüzeylerin daha yumuşak bir yüzeyde oluşturduğu sürtünme sebebi ile meydana gelmektedir. Temasta bulunan kısımların mekanik etkileşimi arttıkça, aşınan numune miktarı da doğru orantılı olarak ilerler. Yumuşak yüzeyde etkileyen aşınma durumu malzemede derin izler bırakmaktadır. Daha sert yapıdaki malzemeler için uygulandığı durumlarda ise yapıda kırılma ve çatlak meydana gelebilmektedir. Bu aşınmalar farklı tipte bulunmaktadır. Şekil 4.1'de mekanizma belirtilmiştir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te abrasif aşınma çeşitleri örnek olarak gösterilmiştir. Abrasif aşınmada çıktılarının farklı olmasını sağlayan etmenlerden bir tanesi malzeme üzerinde herhangi bir yüzey işlemi ile sertleştirilmiş yapılardır. (Çelik, 2010).

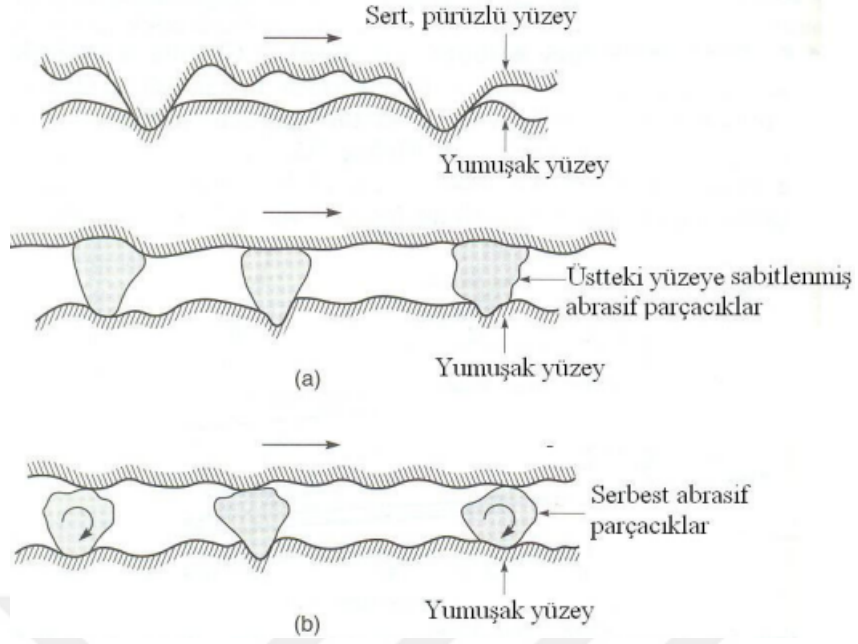
Abrasif aşınma iki farklı sisteme dayanmaktadır. İlk kısımda sürtünen kısım diğerinden daha serttir. Kesici, sert işlem gerektiren süreçlerde, aşınma durumlarının fazla olduğu kullanım alanlarında daha çok karşılaşılmaktadır. Diğer sistemde üç bileşen olarak aşınma durumu mevcuttur ve aşınmaya sebep olan yüzey iki cisim arasında kaldığında her iki taraftaki numuneyi aşındırabilir. Yumuşak olan malzemelerde kayma yönü ile aynı yönlenmede olan girintiler görülür. Bu aşınma türünde SEM görüntüsü alındığında plastik hasar daha derin görülmektedir (Çelikyürek, 2006).



Şekil 4.1: Yük Altında Abrasif Aşındırıcı Mekanizma (Çelik, 2010).



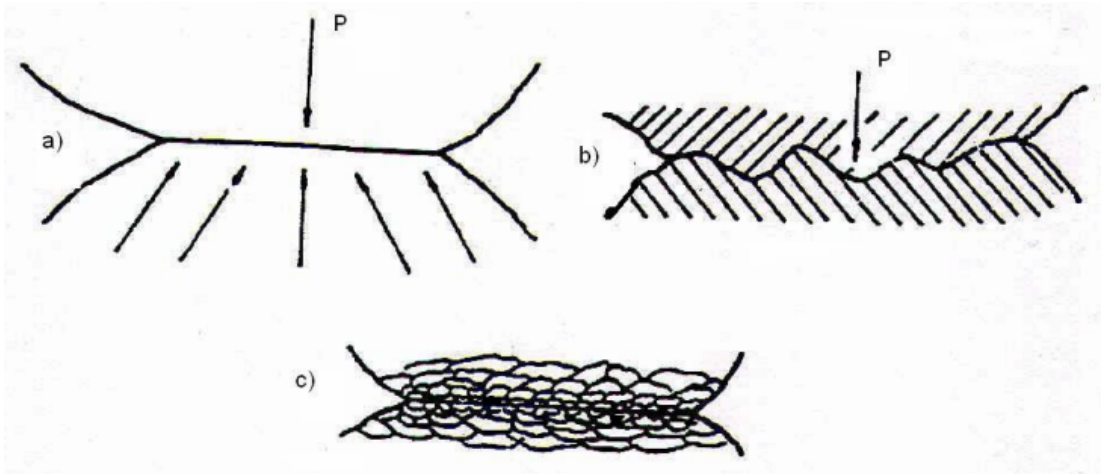
Şekil 4.2: (a) Pulluklama (b) Yorulma (c) Takozlama (d) Çatlak Kesi (e) Kesi (Çelik, 2010).



Şekil 4.3: (a) Pürüzlü Yüzey (b) Sert Parçacıklı Sistem (Çelikyürek, 2006).

4.2 Adhesif Aşınma

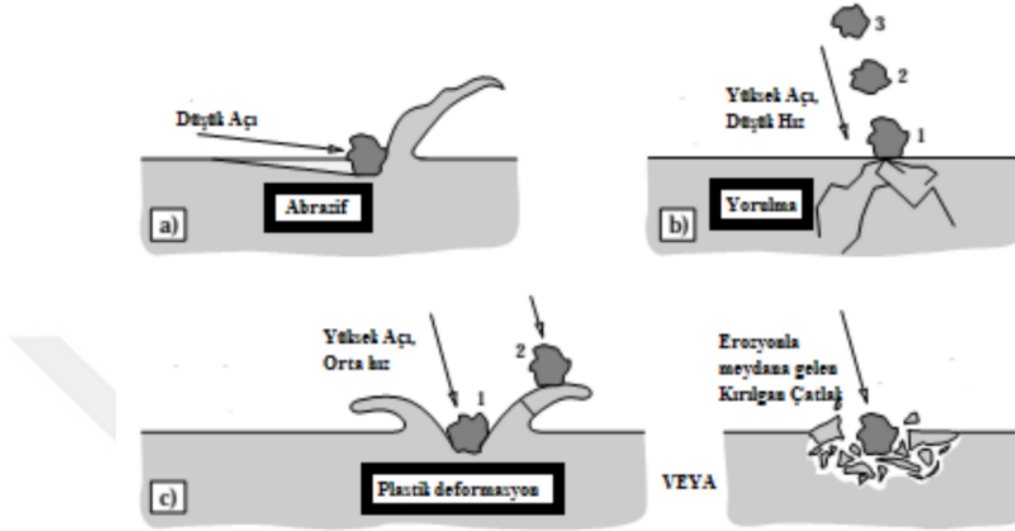
Aşınmalar arasında diğerlerine göre daha çok görülen aşınma türüdür. İki farklı metal yüzey mekanik etkileşim yaparak basınç ile yükselen sıcaklık sayesinde mikro düzeyde birleşme oluşturur. Çalışma esnasında bu birleşen kısımlar ayrılır ve ufak çapta parçalar kopar, bu şekilde olan aşınmalara adhesif aşınma denmektedir. Aynı tipteki kristal yapıya sahip malzemelerde görülmektedir. Birbirine değen kısımlar daha dar alanda olur ise, aşınma kaynaklı ayrılan parça küçük olur ve daha yavaş aşınma gerçekleşir (Gelir,2019).



Şekil 4.4: Adhesif Aşınma Kaynak Oluşumu (Gelir, 2019).

4.3 Eroziyon Aşınma

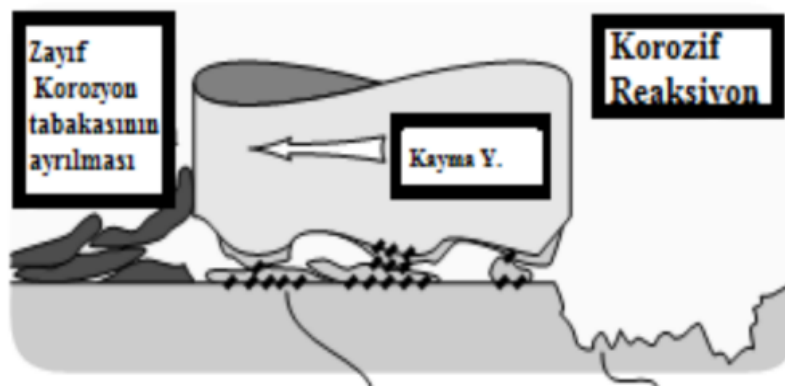
Ufak ve yüksek sertlikteki parçacıkların malzeme üzerine yineleyen çarpma durumunda oluşan malzeme eksilmesi meydana getiren aşınma tipidir. Su jeti ile kesim ve kumlama alanlarında malzemede olması tercih edilebilmektedir.



Şekil 4.5: Eroziyon Aşınma Örnekleri (Şahin, 2016).

4.4 Korozif Aşınma

Korozyonun bulunduğu ortamlarda meydana gelebilen, aşınma olmasa bile korozyona sebep olabilecek bileşenler numune üzerinde tabaka oluşturur. Bu tabaka, malzemedeki korozyonun hızlı ilerlemesini engeller fakat aşınma durumu bu tabakayı aşındırdığı için korozif davranış ilerler (Kökden, 1998).

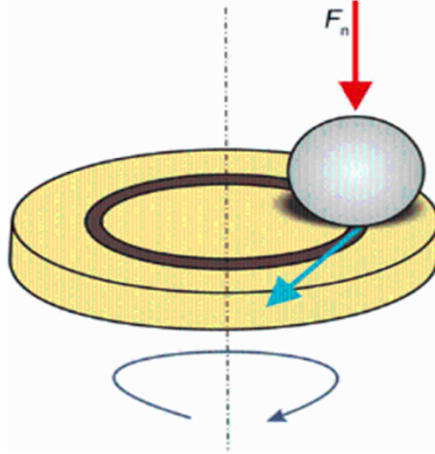


Şekil 4.6: Korozyona Uğrayan Bölge Aşınması (Şahin, 2016).

4.5 Aşınma Testi ve Çeşitleri

Malzemelerin aşınmalarını incelemek amacı ile birçok farklı test tipi kullanılmaktadır. Döngü şekli, malzeme üzerine bırakılan iz boyutu ve şekli, yük miktarı gibi farklı parametreler testlerde farklılık göstermektedir. Testler Pin on Flat, Pin on Disk, Pin on Drum ve Ball on Disk olarak çeşitlenmektedir.

4.5.1 Ball-on Disk Aşınma Test Yöntemi



Şekil 4.7: Levha Üzerinde Bilye Aşınma Şeması (Şahin, 2016).

Dönen bir numuneye sabit ucun belirlenen yük ile birlikte kuvvet uygulaması ile test yapılmaktadır. Dönüş hızı ve mesafe boyunca bu iz uygulanarak aşınma ölçülür. (Şahin,2016).

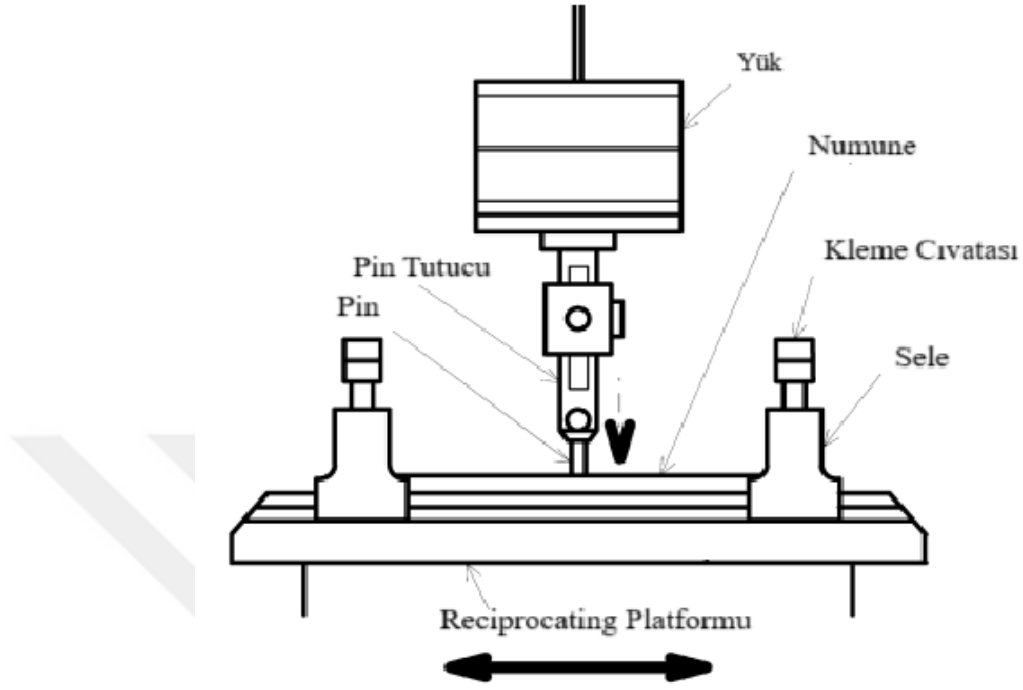
4.5.2 Pin On Drum Aşınma Test Yöntemi

Pin-on-Drum test mekanizması, yüksek stresli iki numune arasında gerçekleşen durumunu kapsar. Silindirik pin uç, aşındırma yaparken aynı anda zımpara kağıdındaki parçaları ezerek ilerler (Tylczak, 1999).

4.5.3 Pin on Disk Aşınma Testi

Bu tip aşınma testinde, etki ettiği malzemeden saha sert olan dairesel bir uç bilye pini ve dönen bir disk ile kayma hareketi aşındırıcı hareket olarak ilerler. Test kapsamında, kuvvet farklılıkları, kayma mesafesi ve yüzey sertliği gibi seçilen parametreler test sonucunu etkilemektedir. (Yang,1999).

4.5.4 Pin/Ball on Flat Aşınma Testi



Şekil 4.8: Pin/Ball-on-Flat Aşınma Test Mekanizması (Marui, 2001).

Pin/Ball-on-Flat reciprocating aşınma testinde, düz ve pin ya da küresel malzemeler karşılıklı git gel yapan sisteme yerleştirilir. Test sisteminde frekans ve zaman gibi parametreler belirlenerek numune üzerinde ileri geri pin hareketi ile parçada belirli bir derinlikte yük ile aşınmanın gerçekleşmesi sağlanır. (Marui, 2001). Kaymanın sebep olduğu sürtünme malzemelerin ömrünü azaltmaktadır. Bu ömür tahmini, aşınma izinin genişlik ve derinliği ölçülerek elde edilebilmektedir. Karşılıklı kayma hareketinden kaynaklı enerji üretilir ve temas alanı azaldıkça enerji aşınma hızı düşer (Nurdin,2015). Test boyunca, bilyeden yatay numuneye doğru dikey yük uygulanır. Test gidişatını etkileyecek bileşenler, hareket mesafesi, osilasyon türü, test sıcaklığı, yağlayıcı (mevcut ise) ve ortam koşulları olarak seçilebilmektedir. Aşınma yolunun kesiti, numuneden uzaklaştırılan malzemenin, kayma eylemine dik olarak alınmış bir düzlemde görünen bölgedir. İz boyunca alınan profilin yüzeyinde, aşınmayan kısımları bir araya getiren çizgi çizilir ve bunun altındaki alan aşınma hesabında kullanılır. Aşınan malzemenin aşınma hacmi V_f mm³ biriminde aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$V_f = A \times L \quad (1)$$

A = Aşınma izinin kesit alanı, mm²

L = Kayma- Hareket mesafesi, mm.

Test boyunca tespit edilen sürtünme davranışı için sürtünme katsayısı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$\mu_k = \frac{F}{P} \quad (2)$$

μ_k = Kinetik sürtünme katsayısı,

F = Kayma boyunca uygulanan ve ölçülen nominal kuvvet N (sürtünme kuvveti),

P = Normal kuvvet – Uygulanan yük.

Aşınma oranı, malzeme kaybının uygulanan yüke ve kayma mesafesine bağlıdır. Bunun hesabı için gerekli olan pinin aşınma hacmi (V_p):

$$V_p = \left(\frac{\pi h}{6}\right) \left[\frac{3D^2}{4} + h^2\right] \quad (3)$$

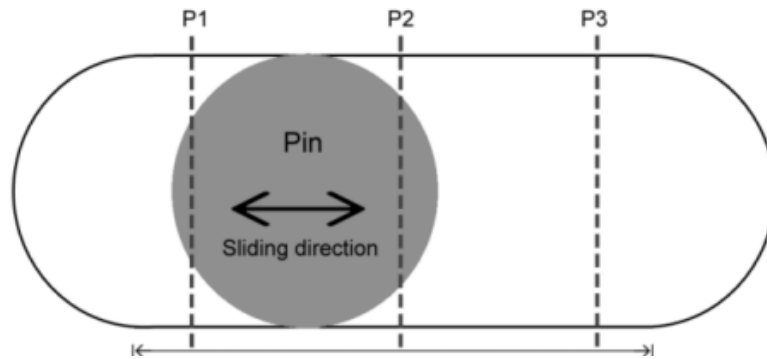
h = Kaldırılan malzemenin yüksekliği, mm,

D = İz Çapı,

$$h = R - \sqrt{\left[R^2 - \frac{D^2}{4}\right]} \quad (4)$$

R = Orijinal bilye çapı, mm.

Aşınma testlerinin ardından, hacim kaybı, aşınan iz boyunun ölçülmesi sonrası nasıl şekil oluştuğu belirlenir. Aşağıda yapılan bir reciprocating testi sonrası oluşan aşınma izinin örneği verilmiştir.



Şekil 4.9: Aşınma Kaybı Model Örneği, P1, P2 ve P3 Profil Çizgileri (Boztepe, 2015).

Aşınma kaybı bulunabilmesi için iki boyuttaki alan için hesap aşağıdaki formül ile yapılabilir:

$$A_w = \sum_{i=0}^n 0.5(Y_i + Y_{i-1})(X_i - X_{i-1}) \quad (5)$$

A_w = Aşınma kaybı alanı,

X = Profil genişliği,

Y = Derinlik,

n = Sayı miktarı belirtir ve ortalama derinlik aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\bar{D} = \frac{\bar{A}_w}{\bar{W}} \quad (6)$$

\bar{D} = Ortalama derinlik (mm),

\bar{A}_w = Profil aşınma kaybı,

Aşınma kaybı alanı ve derinlik hesabından sonra aşınma hacmi verilen formül ile bulunur:

$$\Delta V = \left[\pi \left(\frac{\bar{W}}{2} \right)^2 \bar{D} \right] + (\bar{A}_w l) \quad (7)$$

ΔV = Toplam hacim kaybı (mm³),

l = Strok uzunluğudur ve hacim kaybı da aşağıdaki formül ile belirlenir:

$$k = \frac{\Delta V}{N \times S} \quad (8)$$

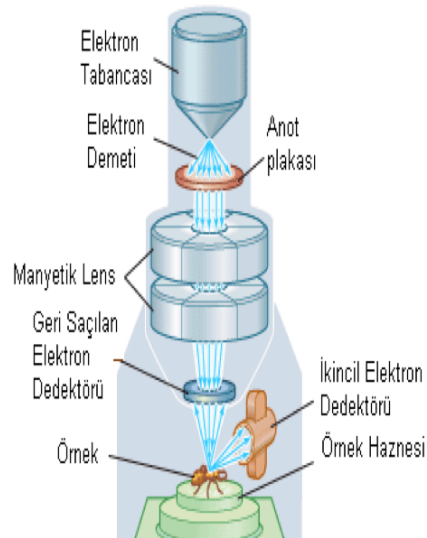
k = Aşınma oranı (mm³ / Nm)

N = Normal yük (N),

S = Toplam kayma mesafesi (m) belirtir.

5. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), arkeolojide kullanılmaya başlayan ve farklı malzeme inceleme araştırmaları kapsamında uzun sürelerdir kullanılan yöntemlerden biridir. Ana mantık olarak elektronlar iletken olması gereken numune yüzeyinden yansıtılarak görsel oluşturulmaktadır. İletken olmayan numunelere kaplama uygulamaları yapılabilmektedir. Özellik olarak ayrıntılı ve detaylı görüntülemenin yanında bileşenlerin analizini de yapabilmektedir. Büyütme oranı 5X'ten 200.000X'e kadar çıkabilen görünürlüğe sahiptir. Çalışma prensibi olarak üst kısımda bulunan elektron tabancasından çıkan elektronlar incelenen bileşene yönlendirilir ve tarama yaparak görüntü oluşturur. Işının belli bir noktada korunması için vakum altındaki bir ortamda gerçekleştirilir. Yayılan ikincil elektronlar diğerlerinden az enerjide olduklarından yüzey şekline duyarlı olarak daha çok yüzey detayı gösterebilmektedir. Kimyasal olarak görüntü ise geri saçılan elektronlar sayesinde alınmaktadır. (Frahm, 2014). Elektron demeti numune ile etkileşime girdiğinde, elastik ve inelastik saçılma yoluyla farklı sonuçlar doğar. Elastik saçılmada elektronların yönü değişerek enerjisi korunur; inelastik saçılmada ise yön değişir ve enerji kaybederler. Enerjinin çoğu ısıya dönüşürken, ikincil elektronlar, geri saçılmış elektronlar ve X-ışınları gibi tespit edilebilir sinyaller oluşur ve yüzey topografyası anlamlandırılır. (Girão,2017).



Şekil 5.1: Taramalı Elektron Mikroskobu Sistemi (Akçayöz, 2010).

6. ENERJİ DAĞILIMLI SPEKTROSKOPİ (EDS)

Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDS), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) sistemlerine entegre edilen ve malzemelerin elementel bileşimini hem kalitatif hem de kantitatif olarak analiz etmeye olanak tanıyan gelişmiş bir mikro analiz yöntemidir. Bu teknik, yüksek enerjili elektron demetinin numune yüzeyiyle etkileşimi sonucu oluşan karakteristik X-ışını fotonlarının tespiti esasına dayanır. Her elementin kendine özgü atomik yapısı nedeniyle yaydığı X-ışını enerjileri farklıdır; bu da spektral analiz aracılığıyla elementlerin spesifik olarak tanımlanmasını mümkün kılar.

EDS sistemlerinde kullanılan elektron demetinin ivme voltajı, analiz derinliğini belirleyen kritik bir parametredir. Yüksek enerjili elektronlar, örnek hacmi içerisinde daha derin tabakalara nüfuz ederek, daha alt bölgelerden X-ışını sinyali oluşturabilir. Bu özellik, özellikle çok katmanlı yapıların ve ince filmlerin karakterizasyonunda avantaj sağlar. Farklı elektron enerjileri ile elde edilen spektrumlarda gözlemlenen elementel yoğunluk değişimleri, numunenin derinlik profili hakkında bilgi verir. Bu bağlamda, belirli kalınlığa sahip bir ince film, kendine özgü bir enerji-yoğunluk dağılımı (spektroskopik profil) üretir ve bu dağılım, film kalınlığının belirlenmesinde karakteristik bir gösterge (parmak izi) işlevi görür. (Canlı, 2010).

7. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında SLM ile %100 doluluk oranında, 60 µm katman kalınlığında Ti-6Al-4V Grade 5 alaşım tozundan üretilip HIP ısıtma işlemi yapılmış numunelere anodizasyon, TiN ve TiAlN kaplamaları uygulandıktan sonra aşınma davranışları ball-on-flat (reciprocating) testi ile lineer aşınma uygulanacaktır. Aşınma testleri için her kaplama cinsi ve hiç işlem görmemiş Ti-6Al-4V numunesi olmak üzere toplamda 4 numune hazırlanmıştır. Farklı kaplamaların aşınma üzerindeki etkisini görmek amacıyla testlerin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. SEM uygulamaları için bu numuneler kullanılacaktır.

7.1 Ti-6Al-4V Grade 5 Alaşımlarına Uygulanan HIP Isıtma İşlemi

SLM ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımına 540°C'de 2 saat gerilim giderme tavlama yapıldıktan sonra, 860°C sıcaklıkta 1.5 saat 100 MPa Argon atmosferinde HIP işlemi uygulanıp fırında soğutulmuştur. Ardından, 538°C'de 4 saat yaşlandırılarak fırında soğutma işlemleri yapıldıktan sonra numunelerin yüzeyinden talaş kaldırma işlemi uygulanmıştır.

7.1.1 PVD ile TiN ve TiAlN Kaplanması

Kaplama yapılan malzemenin yüzeyinde vakum ve genellikle Argon ortamında gerçekleştirilen, belirli bir kaynaktan buharlaştırılarak atomik olarak biriktirme işlemidir. Tipik olarak kaplamaların kalınlıkları genellikle 1-10 nanometre seviyesinde olmaktadır (Akyazı, 2011). PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) yöntemi ile yapılan kaplamalar aşınma ortamında kullanılan malzemelerin dayanımlarını ve kullanım süresini arttırmak amacıyla tercih edilmektedir. Yüksek olmayan uygulama sıcaklığında kaplanma avantajı sayesinde malzemenin özelliklerini etkileme açısından olumsuz bir etki yaratmamaktadır (Martini, 2011).

7.1.2 TiN PVD Kaplama

TiN kaplamalar PVD sert kaplama teknolojisinin ilk çeşitlerindedir ve genellikle aşınma ortamında yüksek direnç gösterebilmesi amacı ile malzemelere uygulanmaktadır. Dişliler, kesme aletleri gibi malzemelerin dış yüzeyinde koruyucu tabaka olarak yüksek yapışma mukavemeti, pürüzsüz kaplama cinsi, ince taneli ve çatlak bulundurmeyen mikroyapıda basınçlı iç kalıntı gerilimine sahip mekanik davranışlar göstermektedirler. Aşınmaya karşı direnç gösterdikleri için frezeleme-tornalama gibi uygulamalarda güçlü performansa sahip olması ile birlikte, yorulma mukavemetini de arttırmaktadır (Jin, 2015). Aşınma testi için bu kaplama yapısının incelenmesi amacı ile 6 adet numuneye kaplama yapılmıştır. Firmada uygulanan kaplama sürecinde Tablo 7.1’de verilen parametreler kullanılmıştır. Altın sarısı rengindeki kaplamanın oksidasyon sıcaklığı 600°C, sertlik değeri 2600 HV ve sürtünme katsayısı 0,40’tır. Kaplama kalınlığı 2-3 µm civarında uygulanmıştır. Kaplama öncesi ısıtma işlemi ve metal iyon bombardımanı işlemleri bulunmaktadır.



Şekil 7.1: TiN Kaplanmış Ti-6Al-4V Alaşımı.

Tablo 7.1: TiN PVD Kaplama Proses Parametreleri.

Kaplama	Adımlar	Sıcaklık (°C)	Katot Akımı	Bias (volt)	Basınç Değeri (mbar)	Kullanılan Gazlar
	Isıtma	450-480	-	-	-	-
TiN	Metal İyon Bombardımanı	450-480	80-120	300-800	$(2-4) \cdot 10^{-3}$	Argon
	Kaplama	450-480	100-150	40-120	$5 \cdot 10^{-3}$ $3 \cdot 10^{-2}$	Azot

7.1.3 TiAlN PVD Kaplama

TiAlN kaplamaları TiN kaplamalara göre daha üstün mekanik performans sergilemektedir. Bu fark, TiAlN kaplamalarda katı çözelti sertleşme olayının daha yoğun görülmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sebep ile TiN kaplamasına göre daha sert bir yapı sunmaktadır. İçerisinde fazlaca bulunan Alüminyum atomları Al_2O_3 tabakası oluşturarak yüksek stabilite kazandırmaktadır (Jin,2015). Firma kapsamında uygulanan kaplama sürecinde siyah-mor renk arasında numuneler elde edilmiştir. Kaplamanın başlıca özellikleri olarak, oksidasyon sıcaklığı $900^{\circ}C$, sertliği 3600 HV ve sürtünme katsayısı 0,55'tir. Kaplama kalınlığı 2-3 μm civarında uygulanmıştır. Kaplama öncesi TiN kaplamada olduğu gibi ısıtma ve metal iyon bombardımanı gibi işlemler uygulanmıştır. İşlem parametreleri Tablo 7.2'de belirtilmiştir.



Şekil 7.2: TiAlN Kaplanmış Ti-6Al-4V Alaşımı.

Tablo 7.2: TiAlN PVD Kaplama Proses Parametreleri.

Kaplama	Adımlar	Sıcaklık ($^{\circ}C$)	Katot Akımı	Bias (volt)	Basınç Değeri (mbar)	Kullanılan Gazlar
	Isıtma	450-480	-	-	-	-
TiAlN	Metal İyon Bombardımanı	450-480	80-120	300-800	$(2-4)*10^{-3}$	Argon
	Kaplama	450-480	120-180	40-120	$(1-4)*10^{-2}$	Azot

7.1.4 Eloksal Kaplama (Anodizasyon) Uygulaması

Anodizasyon işlemi titanyum malzemelere hızlı ve ekonomik şekilde uygulanabilen, bu nedenle de sıkça tercih edilen bir kaplama yöntemidir. Bu işlem, malzemenin tribolojik özelliklerini belirgin olarak iyileştirir. Titanyuma uygulandığında malzemenin sertliğini ve aşınma davranışını iyileştirdiği, sürtünme davranışını ise azalttığı görülmektedir. Eloksal kaplama işleminde malzemenin üzerinde elektrokimyasal anodize ile oksit tabakası oluşturulmaktadır (Yetim ve Diğ.,2021). Firmada yapılan bu kaplamada 20-30 Volt, 15-18 °C’de 180-190 g/L Sülfürik asitte 5-10 dakika süre ile uygulanmıştır.

Tablo 7.3: Anodizasyon Kaplama İşlem Parametreleri.

Kaplama	Volt	Sıcaklık (°C)	Asit (g/L)	Süre (dk)
Anodizasyon	20-30	15-18	Sülfürik Asit 180-190	5-10



Şekil 7.3: Anodizasyon Uygulanmış Ti-6Al-4V Alaşımı.

8. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

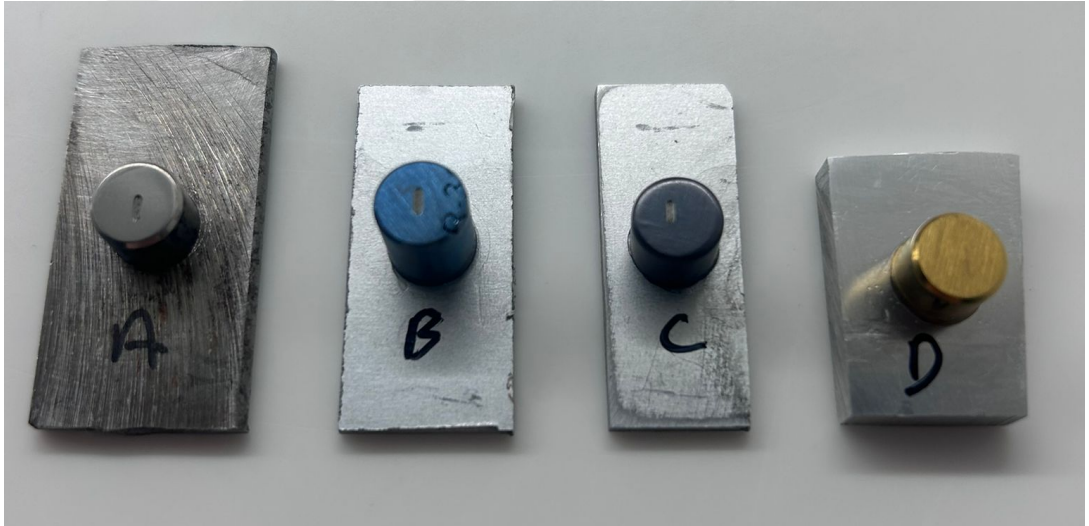
Bu kısımda Ti-6Al-4V alaşımlı kaplama işlemleri yapılan numunelerin aşınma davranışlarını ve yüzey özelliklerini incelemek amacıyla çeşitli karakterizasyon tekniklerinden bahsedilecektir. Aşınma testleri, karşıt hareketli (Reciprocating) aşınma cihazı kullanılarak belirlenen test parametreleri altında gerçekleştirilmiş ve farklı yüzey modifikasyonlarının aşınma direnci üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Testler sonucunda oluşan aşınma izlerinin morfolojisi, aşınma mekanizmalarının belirlenmesi ve yüzeyde meydana gelen mikroyapısal değişimlerin incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, aşınma sonrası yüzeylerde meydana gelen kimyasal bileşim değişimlerini belirlemek için enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) incelemeleri uygulanmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, farklı yüzey işlemlerinin aşınma mekanizmaları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

8.1 Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri kapsamında yüzey modifikasyonlarının aşınma performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla TiN, TiAlN PVD kaplamalı, anodizasyon uygulanmış ve işlemsiz Ti-6Al-4V alaşımı numuneleri test edilmiştir. Testler, Tribotechnic Oscillating Tribo Tester (Reciprocating) aşınma cihazı kullanılarak sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Aşınma test parametreleri 3N yük, 5 mm/s kayma hızı, 25 mm kayma mesafesi, 2 mm iz mesafesi olarak belirlenmiştir ve kuru ortamda karşıt yüzey olarak 6 mm çapında Al₂O₃ (alümina) seramik bilya kullanılarak uygulanmıştır. Deneylerde, her bir numune için belirlenen parametrelerde karşıt yüzeyle temas ettirilerek aşınma oluşturulmuştur. Karşıt hareketli (reciprocating) aşınma mekanizması, eksantrik hareket ile belirli bir strok mesafesi boyunca aşınmayı simüle etmektedir.



Şekil 8.1: Tribotechnic Oscillating Tribo Tester Aşınma Test Cihazı.



Şekil 8.2: A: İşlemsiz, B: Anodizasyonlu, C: TiAlN Kaplama, D: TiN Kaplama.

Aşınma deneylerinde kullanılan aşınma test numuneleri Şekil 8.2’de belirtilmiştir. Test cihazına yerleştirebilmek amacı ile numuneler altlıklara yerleştirilmiştir. A: işlemsiz Ti-6Al-4V, B: Anodizasyon işlemi yapılmış Ti-6Al-4V, C: TiAlN Kaplamalı Ti-6Al-4V, D: TiN Kaplamalı Ti-6Al-4V’yi belirtmektedir.

8.2 Aşınma Testleri Sonrası Analizler

Testler sonrasında, her bir numune için aşınma iz genişliği ölçümleri yapılmış, sürtünme katsayısı ve hacim kaybı hesaplanmıştır. Aşınma mekanizmalarını detaylı bir şekilde incelemek amacıyla optik mikroskop yüzey incelemesi, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) analiz yöntemleri kullanılmıştır.

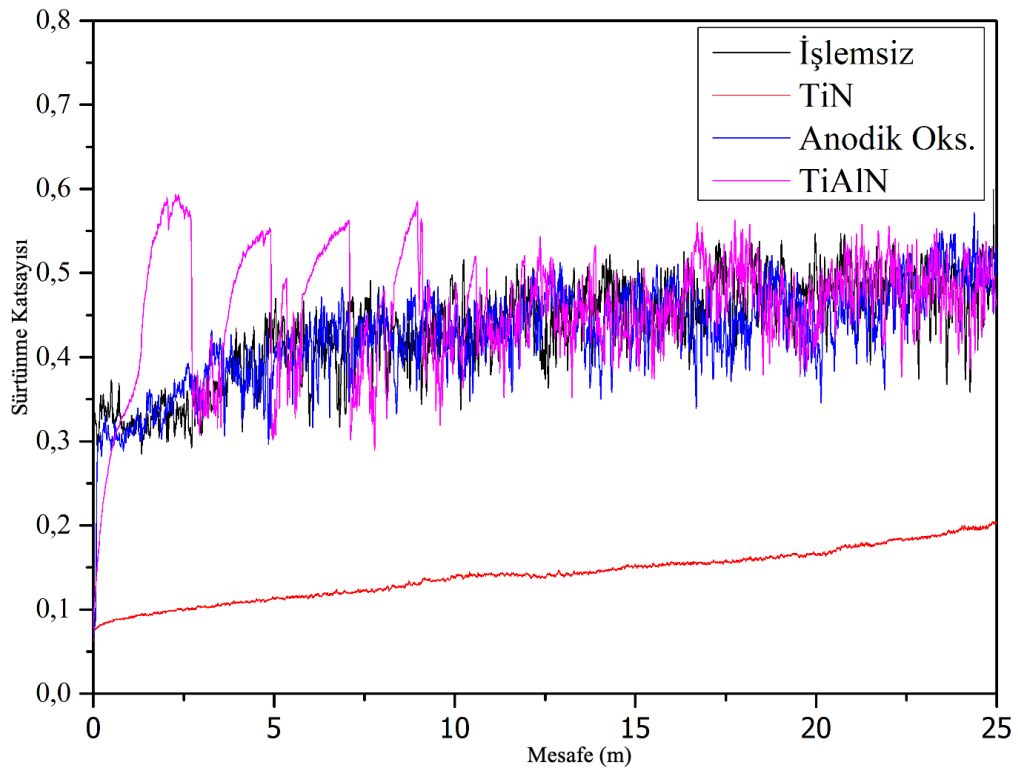
Elde edilen veriler doğrultusunda, yüzey modifikasyonlarının aşınma direnci üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Aşınma testlerinde kullanılan 6 mm boyutundaki Al_2O_3 bilyanın test sonrası görüntüleri ve temizlenmiş görüntüleri alınarak adhesif ve abrasif aşınma mekanizmalarının yorumları yapılmıştır.

TiN, TiAlN kaplanmış, anodizasyon uygulanmış ve işlemsiz Ti-6Al-4V numunelerinin; Hitachi marka SU500 Model (Schottky Field Emission Scanning Electron Microscope) cihazı yardımıyla mikroyapı görüntüleri alınmış ve AZTech Tru-Q markalı Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) cihazı yardımıyla ise bu mikroyapıdaki kimyasal analizler belirlenerek, etraflıca mikroyapısal incelemeler gerçekleştirilmiştir.

9. BULGULAR VE TARTIŞMA

Reciprocating (ileri-geri) aşınma testi verileri sonrası TiN, TiAlN, anodizasyonlu ve işlemsiz Ti-6Al-4V alaşımının aşınma deneyleri sonucunda sürtünme katsayılarına belirlenmiştir. Testler sırasında sürtünme kuvveti her bir numune için ölçülmüş ve sürtünme katsayısı zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Sürtünme Katsayısı Grafiği, aşınma testleri sonucunda farklı yüzey işlemlerine sahip numunelerin sürtünme katsayısı-mesafe ilişkisini göstermektedir. Ardından verilen tabloda verilerin ortalama ve maksimum sürtünme katsayısı değerleri belirtilmiştir.

9.1 Aşınma Test Sonuçları

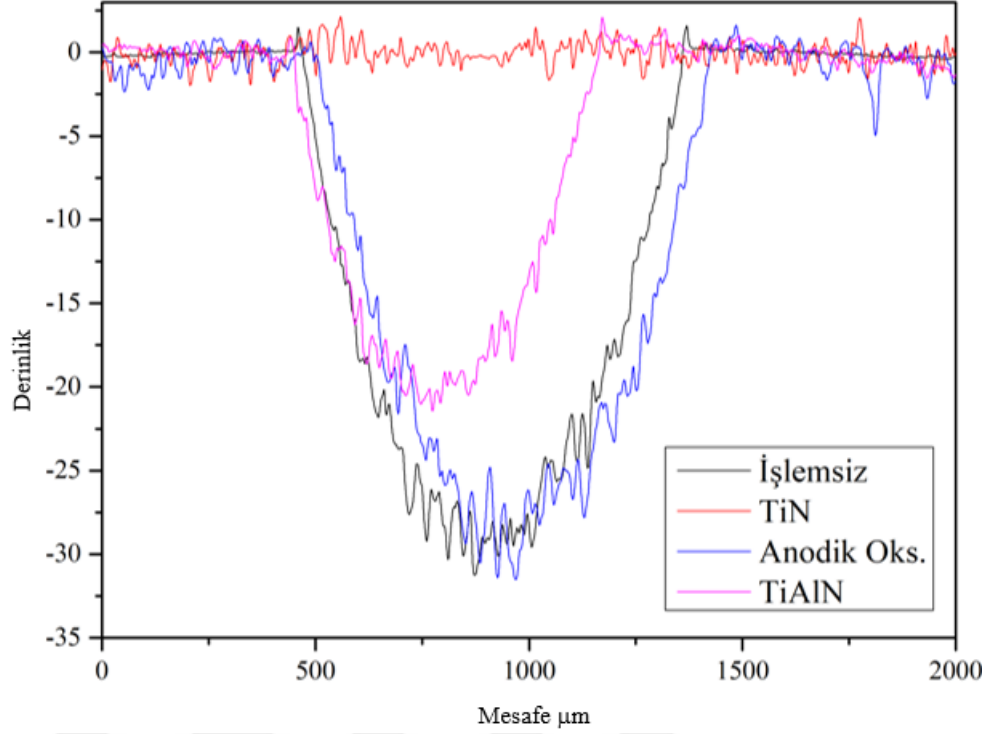


Şekil 9.1: Sürtünme Katsayısı Grafiği.

Tablo 4: Sürtünme Katsayıları Tablosu

Numune	Sürtünme Katsayısı	
	Ortalama	Maksimum
İşlemsiz	0,436	0,599
TiN-PVD	0,143	0,211
Anodik Oksidasyon	0,429	0,572
TiAlN-PVD	0,461	0,593

Aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı ve hacim kaybı verileri detaylı şekilde analiz edildiğinde, çeşitli yüzey işlemlerinin aşınma direnci üzerindeki etkilerine dair önemli bulgular ortaya çıkmıştır. TiN kaplama, en düşük sürtünme katsayısına ve en az aşınma kaybına sahip olan yüzey modifikasyonu olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, TiN kaplamanın yüzeyle mekanik etkileşimlerini minimize ettiğini ve dolayısıyla yüzeyin aşınmaya karşı korunmasını artırdığını göstermektedir. Bunun aksine, işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımı ve anodize edilmiş yüzeyler benzer sürtünme davranışları sergilemiştir. Her iki durumda da yüksek sürtünme katsayıları ve belirgin hacim kayıpları gözlenmiştir. Ancak anodizasyon işlemi, yüzeyde koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak bir miktar ekstra direnç sağlamış ve yüzeyin kısmen daha dayanıklı olmasına katkıda bulunmuştur. Öte yandan, TiAlN kaplama testlerde istenilen performansı gösterememiştir. Başlangıçta düşük sürtünme katsayısı ile umut verici bir potansiyel sunmasına rağmen, testlerin ilerleyen aşamalarında sürtünme katsayısında ani ve beklenmedik yükselmeler meydana gelmiştir. Bu durum, kaplamanın yüzey alt tabakasından ayrıldığı ya da yapısal olarak bozunduğu anlamına gelebilir. Bu bulgu, TiAlN kaplamanın, bu test koşulları altında tribolojik stabilitesini yeterince koruyamadığını işaret etmektedir. Genel olarak, sonuçlar TiN kaplamanın etkili aşınma direncini sağladığını gösterirken, işlemsiz ve anodize edilmiş yüzeyler daha mütevazı düzeyde bir koruma sunmuştur. TiAlN kaplamanın ise test denenmişliği altında, ilk başta sunulan potansiyeli sürdüremediği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, yüzey mühendisliğinde hangi kaplama türünün hangi şartlarda daha uygun olduğunu değerlendirmede önemli bilgiler sunmaktadır.



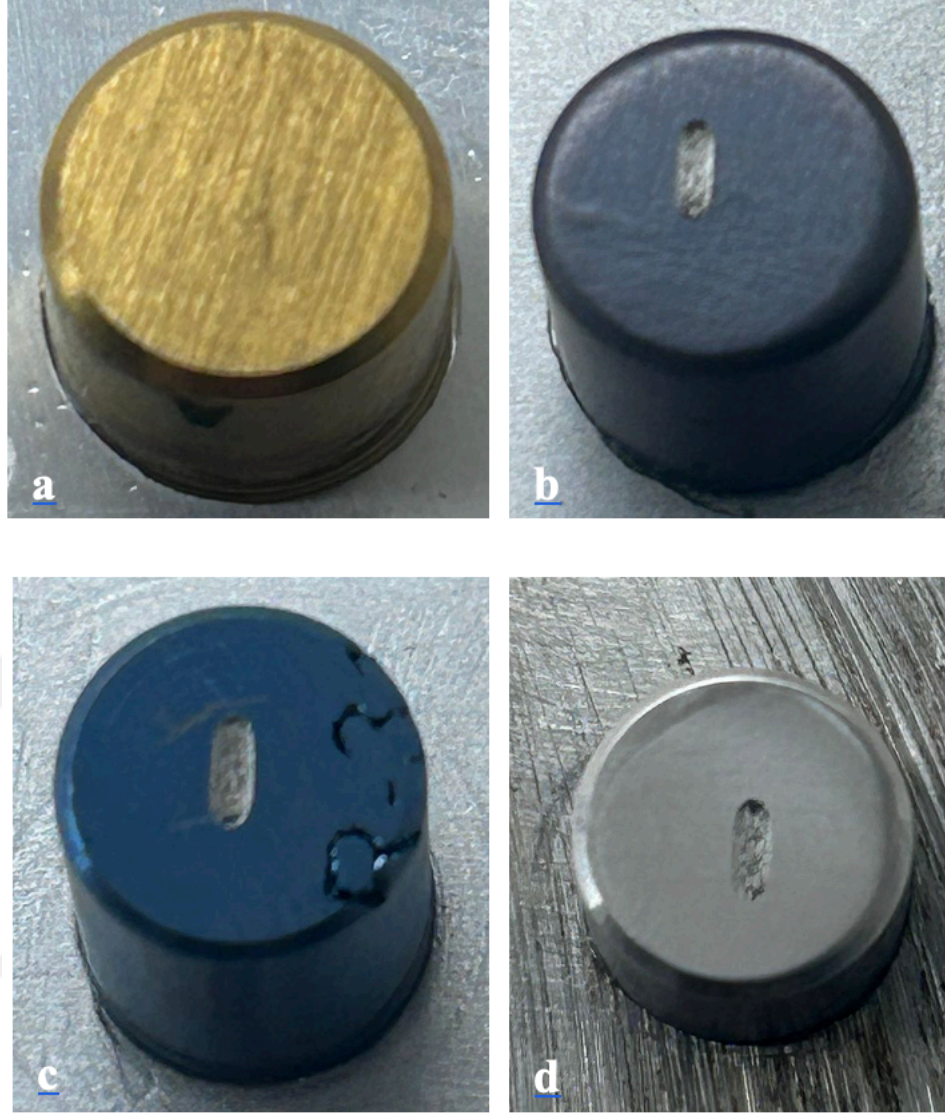
Şekil 9.2: Aşınma Kayıpları Grafiği.

Grafik ve aşağıda belirtilen aşınma kayıpları tablosu birlikte değerlendirildiğinde, farklı yüzey işlemlerinin aşınma direnci üzerindeki etkisi açıkça ortaya çıkmaktadır. İşlemsiz Ti-6Al-4V numunesi ($16849 \pm 1151 \mu\text{m}^2$) ve anodik oksidasyon uygulanmış numune ($17024 \pm 827 \mu\text{m}^2$) benzer aşınma kayıplarına sahip olup, grafikte en derin aşınma profillerini ($-30 \mu\text{m}$) göstermektedir. Bu durum, anodik oksidasyonun aşınma direncini artırmada etkisiz kaldığını ortaya koymaktadır. TiAlN kaplamalı numune ($10145 \pm 143 \mu\text{m}^2$) ise belirgin bir iyileşme sağlayarak aşınma kaybını azaltmış ve grafikte daha sığ bir aşınma çukuru ($-20 \mu\text{m}$) oluşturmuştur. TiN kaplama ($36 \pm 6 \mu\text{m}^2$) ise en düşük aşınma kaybı ile en yüksek aşınma direncini sergilemiş ve grafikte neredeyse aşınma göstermeyen bir yüzey profili sunmuştur. Sonuç olarak, TiN kaplama üstün aşınma direnci sağlarken, TiAlN belirli bir iyileşme sunmuş, anodik oksidasyon ise yüzey koruma açısından yetersiz kalmıştır.

Tablo 5: Aşınma Kaybı Değerleri Tablosu

Numune	Aşınma Kaybı (μm^2)
İşlemsiz	16849 ± 1151
TiN-PVD	36 ± 6
Anodik Oksidasyon	17024 ± 827
TiAlN-PVD	10145 ± 143

Uygulanan aşınma testleri, çeşitli kaplama ve yüzey işlemlerinin Ti-6Al-4V alaşımının tribolojik performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir biçimde analiz etmiştir. İşlemsiz Ti-6Al-4V numunesinin yüksek aşınma kaybı ($16849 \pm 1151 \mu\text{m}^2$), alaşımın temel yapı özelliklerinden ileri gelen yetersiz yüzey sertliğini ve sınırlı aşınma direncini gözler önüne sermiştir. TiN kaplaması uygulandığında, aşınma kaybı dramatik bir azalma göstererek $36 \pm 6 \mu\text{m}^2$ seviyesine düşmüştür. Bu etkin koruma, TiN kaplamanın yüksek Vickers sertliği ve düşük sürtünme katsayısı gibi karakteristik yapısal avantajlarıyla açıklanabilir. Kaplamanın etkisi, titanyum alaşımının yüzey sertliğini önemli ölçüde artırarak aşınmaya karşı oldukça etkili bir bariyer oluşturmuştur. Anodizasyon işlemi sonrasında gözlemlenen aşınma kaybı ($17024 \pm 827 \mu\text{m}^2$), oksit tabakasının gözenekli morfolojisi ve sınırlı sertliği nedeniyle aşınma direncinde beklenen iyileştirmenin gerçekleşmediğini ortaya koymuştur. TiAlN kaplama, aşınma kaybını $10145 \pm 143 \mu\text{m}^2$ seviyesine indirerek belirgin bir iyileşme sağlamış olsa da TiN kaplamanın üstün performansına ulaşamamıştır. TiAlN'in daha iyi oksidasyon dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı sunmasına rağmen, sertlik parametresindeki dezavantajı sonucu performans farkı doğmuştur. Elde edilen veriler, Ti-6Al-4V alaşımına uygulanan farklı kaplama teknolojilerinin ve yüzey modifikasyonlarının malzemenin mekanik özelliklerine ve aşınma dayanımına yönelik kritik etkilerini ortaya koyarken, özellikle TiN kaplamanın bu bağlamda en etkin çözüm olduğunu teyit etmektedir.



Şekil 9.3: a) TiN Kaplama, b) TiAlN Kaplama, c) Anodizasyonlu, d) İşlemsiz.

Şekil 9.3'te aşınma testi uygulanmış numuneler belirtilmiştir. Reciprocating (gerileri) aşınma testine tabi tutulan Ti-6Al-4V numunelerine ait görsel değerlendirme sonucunda, yüzey kaplamalarının aşınma dayanımı üzerinde belirgin etkileri gözlemlenmiştir. TiN kaplamalı numunede (a), kaplama yüzeyinde belirgin bir aşınma izi oluşmamış olup, kaplamanın bütünlüğünü koruduğu ve yüksek yüzey sertliği sayesinde aşınmaya karşı üstün direnç gösterdiği görülmektedir. Bu durum, TiN kaplamanın en iyi tribolojik performansa sahip olduğunu ortaya koymaktadır. İşlemsiz Ti-6Al-4V numunesinde (b) ise, belirgin ve derin bir aşınma izi mevcuttur; bu da düşük yüzey sertliği nedeniyle adhesif ve abrasif aşınma mekanizmalarının yoğun şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

Anodizasyon uygulanmış numunede (c), aşınma bölgesinde kaplama çatlakları ve yer yer delaminasyonlar gözlenmekte olup, bu durum oksit tabakanın kırılğan doğası nedeniyle mekanik yükler altında soyulmaya eğilimli olduğunu ortaya koymaktadır. TiAlN kaplamalı numunede (d) ise, aşınma izi TiN kaplamalı numuneye göre daha belirgin olup, kaplama kalınlığı veya yüzeye yapışma kalitesi açısından yetersizlikler nedeniyle yüzey bütünlüğünün kısmen bozulduğu anlaşılmaktadır. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, TiN kaplamalı numune en yüksek aşınma direncini gösterirken, kaplamasız ve özellikle anodize yüzeyler daha düşük performans sergilemiştir.

Her bir numuneye ait aşınma hesaplamaları, Tablo 6'da sunulan yüzeysel aşınma alanı (mm^2) verileri temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, reciprocating aşınma testleri sonucunda optik yöntemlerle belirlenen alan kayıpları, milimetrekare (mm^2) cinsine çevrilmiştir. Ardından, her bir numuneye ait yüzeysel aşınma alanı, test cihazında tanımlı olan hareket genliği (aşınma strok mesafesi) ile çarpılarak, aşınma hacmi (mm^3) hesaplanmıştır. Elde edilen hacimsel aşınma değerleri, test sırasında uygulanan sabit normal yük (3N) ve numunenin maruz kaldığı toplam kayma mesafesi (25m) ile normalize edilerek, birim yük ve mesafe başına aşınma miktarını temsil eden spesifik aşınma değeri ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) hesaplanmıştır. Bu hesaplama yöntemi, farklı kaplama türlerine sahip numunelerin tribolojik performanslarının karşılaştırılmasına olanak sağlayarak, aşınma mekanizmalarının kantitatif olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır. Aşağıdaki tabloda bu hesaplamalar özetlenerek belirtilmiştir.

Tablo 6: İncelenen Numunelerin Aşınma Oranı Hesaplamaları

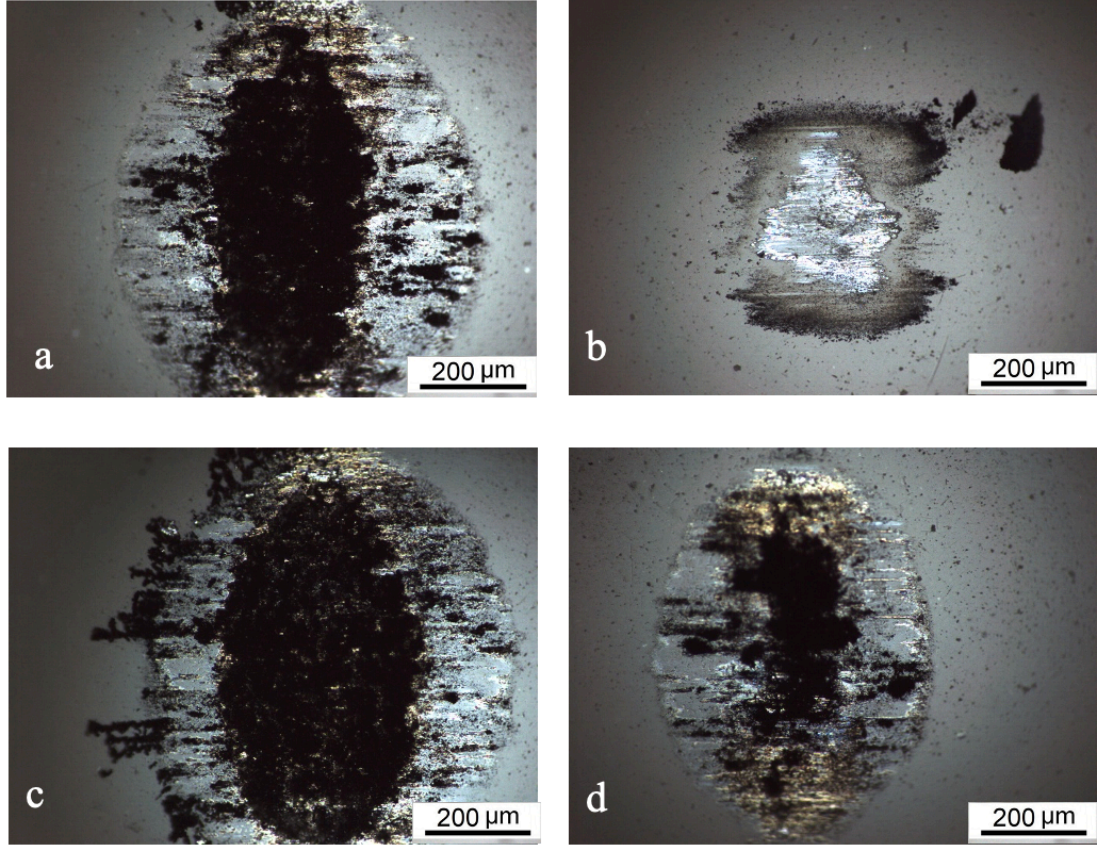
Numune	Yüzeysel Aşınma Kaybı (μm^2)	Hacimsel Aşınma Kaybı (mm^3)	Spesifik Aşınma Oranı ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$)
İşlemsiz Ti-6Al-4V	16849 ± 1151	0.033698	4.49×10^{-4}
TiN Kaplamalı Ti-6Al-4V	36 ± 6	0.000072	9.60×10^{-7}
TiAlN Kaplamalı Ti-6Al-4V	10145 ± 143	0.020290	2.71×10^{-4}
Anodizasyonlu Ti-6Al-4V	17024 ± 827	0.034048	4.54×10^{-4}

Reciprocating (geri-ileri) aşınma testi sonuçlarına göre elde edilen verilere dayanarak, dört farklı yüzey durumuna sahip, TiN ve TiAlN kaplamalı, anodizasyonlu ve işlemsiz Ti-6Al-4V numunelerinin aşınma performansları karşılaştırılmıştır.

Spesifik aşınma oranları, her bir numunenin optik olarak belirlenen mikrometrekare cinsinden aşınma alanlarının milimetrekareye çevrilmesi, bu değerlerin 2 mm'lik sabit bir derinlikle çarpılarak hacimsel aşınma miktarlarının hesaplanması ve elde edilen hacimlerin 3 N sabit yük x 25 m kayma mesafesi şeklinde hesaplanan yapılan iş (harcanan enerji) miktarına bölünmesiyle elde edilmiştir. TiN kaplamalı numune, yalnızca $36 \pm 6 \mu\text{m}^2$ 'lik aşınma alanı ve 0.000072 mm^3 'lük hacimsel kayıpla birlikte $9.60 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ spesifik aşınma oranı göstererek, açık ara en yüksek aşınma direncine sahip olmuştur. Buna karşın, işlemsiz Ti-6Al-4V numunesi $16849 \pm 1151 \mu\text{m}^2$ aşınma alanı, 0.033698 mm^3 hacim kaybı ve $4.49 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ile en düşük performansı sergilemiştir. TiAlN kaplamalı ve anodize yüzeyli numuneler ise sırasıyla $2.71 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ve $4.54 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ spesifik aşınma oranlarıyla orta seviyede sonuçlar ortaya koymuştur. Bu değerlendirme, yüzey kaplamalarının Ti-6Al-4V alaşımının tribolojik özelliklerini anlamlı şekilde etkilediğini ve özellikle TiN kaplamasının aşınma dayanımını belirgin düzeyde artırdığını ortaya koymaktadır.

Özellikle anodize yüzeyde görülen aşınma izleri ve muhtemel delaminasyonlar, kaplamaların yük altındaki gevrek yapısından kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmiştir. Tüm bu değerlendirmeler, kaplama türünün sadece aşınma miktarını değil, aynı zamanda malzeme yüzeyinde oluşan deformasyon tipini de etkilediğini göstermektedir. Sonuç olarak, TiN kaplama, Ti-6Al-4V alaşımı için en etkili yüzey modifikasyonu olarak öne çıkmakta; hem hacimsel kayıpların minimize edilmesini sağlamakta hem de malzemenin servis ömrünü önemli ölçüde artırabilecek bir çözüm sunmaktadır.

Çalışmadaki aşınma testinde kullanılan 6 mm aşındırıcı Al_2O_3 karşıt bilya, test sonrası görüntüleri ve temizlenmiş durumdaki görüntüleri alınmıştır. Özellikle ileri mühendislik uygulamalarında yaygın kullanıma sahip olan bu alaşım, genellikle zorlu tribolojik şartlar altında çalışmaktadır. Çalışmanın odak noktası, kaplamaların ve yüzey modifikasyon tekniklerinin aşınma performansları üzerinde oynadığı kritik rolü aydınlatmaktır. Aşınma testleri sırasında, Al_2O_3 bilyası kullanılarak aşınma ortamı sağlanmış ve aşınma mekanizmaları abrasif ve adhesif aşınma bağlamında değerlendirilmiştir.

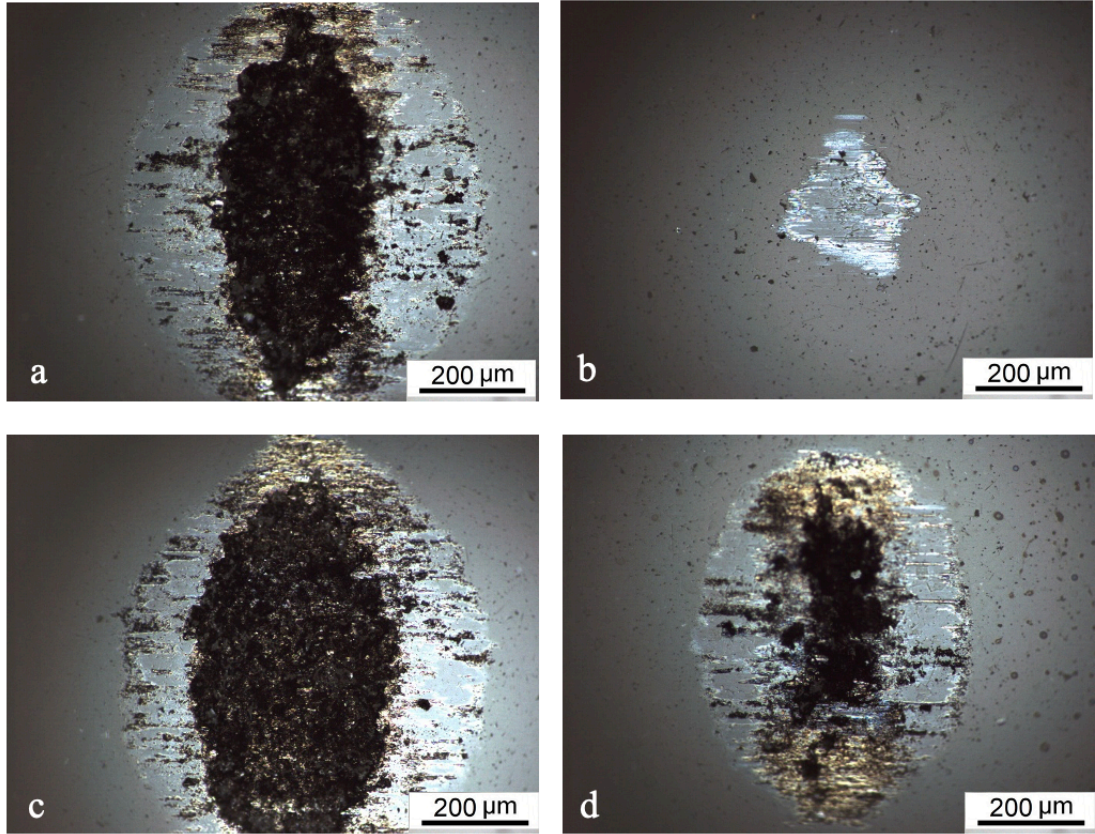


Şekil 9.4: a) İşlemsiz, b) TiN Kaplama, c) Anodizasyonlu, d) TiAlN Kaplama.

Şekil 9.4'te Al_2O_3 bilya ile gerçekleştirilen reciprocating (geri-ileri) aşınma testleri sonrası Ti-6Al-4V alaşımına ait dört farklı yüzey durumundaki numunelerin optik mikroskop görüntüleri sunulmaktadır.

Görseller sırasıyla; a) işlemsiz, b) TiN kaplamalı, c) anodizasyon uygulanmış ve d) TiAlN kaplamalı numunelere aittir. Aşınma izlerinin şekli, genişliği ve yüzeydeki deformasyon düzeyi, her bir kaplamanın tribolojik performansını niteliksel olarak ortaya koymaktadır. İşlemsiz Ti-6Al-4V numunesinde, geniş ve derin aşınma izleri dikkat çekmektedir. Aşınma yüzeyi boyunca belirgin plastik deformasyon, adhesif aşınma ve yer yer mikro yırtılmalar gözlemlenmiştir. Bu durum, alaşımın yüzey sertliğinin düşük olması nedeniyle karşı yüzeye karşı yeterli direnç gösteremediğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, TiN kaplamalı yüzeyde, aşınma izinin oldukça dar ve yüzey hasarının minimal olduğu görülmektedir. Bu durum, TiN kaplamanın yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve kaplama bütünlüğü sayesinde aşınma etkilerini büyük oranda engellediğini göstermektedir.

Anodize edilmiş yüzey, geniş bir aşınma bölgesi ve düzensiz bir yüzey hasarı ile dikkat çekmektedir. Özellikle kaplamanın yer yer soyulduğu, aşınma izinin çevresinde dağınık partikül yapıları olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, eloksal kaplamanın gevrek doğası ve mekanik yük altında çatlama eğilimli karakteri ile ilişkilendirilebilir. TiAlN kaplamalı numunede ise aşınma izinin simetrik fakat nispeten daha belirgin olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmasına rağmen, kaplamanın bazı bölgelerinde renk değişimleri ve mikro yüzey tahribatları mevcuttur. Bu durum, kaplama kalınlığının ince olması ya da kaplama-ara yüzey bağının zayıf olmasından kaynaklıdır. Tüm bu veriler ışığında, optik mikroskop analizleri, kaplama türünün aşınma karakteri üzerindeki belirleyici etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle TiN kaplama, yüzey koruması açısından en etkili çözüm olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 9.5: Temizlenmiş a) İşlemsiz, b) TiN Kaplama, c) Anodize d) TiAlN Kaplama.

Şekil 9.5'te, Ti-6Al-4V alaşımına ait dört farklı yüzey modifikasyonu uygulanmış numunelerin Al₂O₃ bilya ile gerçekleştirilen reciprocating aşınma testleri sonrası temizlenmiş yüzeylerinin de optik mikroskop görüntüleri sunulmaktadır. Görseller sırasıyla a) işlemsiz, b) TiN kaplamalı, c) anodizasyon uygulanmış ve d) TiAlN kaplamalı numunelere karşılık gelen bilya temas alanlarını göstermektedir. Aşınma bölgelerinin genişliği, yoğunluğu ve yapısal bütünlüğü, her bir kaplamanın sürtünme sonucu oluşan yüzey tahribatına karşı gösterdiği direnci doğrudan yansıtmaktadır.

İşlemsiz Ti-6Al-4V numunesine ait görüntüde, geniş ve yoğun kararma alanı, malzeme transferi ve yüksek seviyede aşınma ürünlerinin birikimi ile karakterizedir. Bu durum, kaplamasız yüzeyin mekanik sürtünmeye karşı zayıf kaldığını ve Al₂O₃ bilya ile temas bölgesinde ciddi bir yüzey bozulması yaşandığını ortaya koymaktadır. Buna karşın TiN kaplamalı numunenin bilya temas izinde, aşınma bölgesi oldukça dar ve yüzey parlaklığı korunmuş durumdadır. Aşırı bir kararma ya da birikim gözlenmemekte olup, bu da TiN kaplamanın yüzeyle temas eden karşı malzeme üzerinde minimum mekanik etkileşime neden olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, TiN kaplamanın yüksek sertliği ve düşük sürtünme katsayısı sayesinde aşınmaya karşı üstün direnç sunduğunun görsel bir kanıtıdır.

Anodize edilmiş numuneye ait görselde, aşınma izinin belirgin ve merkezi yoğunlukta olduğu, çevresel bölgelerde kaplama artıklarının tutunduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, eloksal yüzeyin gevrek yapısının temas sırasında aşınma ürünlerine neden olduğunu ve yüzeye mekanik olarak tutunmuş partikül kalıntıları bıraktığını göstermektedir. TiAlN kaplamalı yüzeyin aşınma izi ise nispeten dağınık ve merkezi kararma ile çevrili olup, kaplamanın kısmen aşınmaya karşı direnç gösterdiği ancak temas bölgesinde deformasyonun izlenebilir olduğu görülmektedir.

Bu görüntüler, önceki testlerde elde edilen hacimsel aşınma verileri ve spesifik aşınma oranlarıyla uyumlu olarak, TiN kaplamanın karşı yüzeyde minimum iz bırakarak tribolojik performansta açık üstünlük sağladığını göstermektedir. Özellikle TiN kaplamalı numuneye ait bilya izinin son derece sınırlı ve yüzey parlaklığını koruyan yapıda olması, temas sırasında enerjinin daha az aşındırıcı şekilde dağıldığını ve yüzey bozulmasının minimumda gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.

Aşınma testleri, Ti-6Al-4V alaşımının farklı yüzey modifikasyonlarının tribolojik performansa etkisini değerlendirmek amacıyla, 3N test yükü altında reciprocating (geri-ileri) hareketli bir sistemde gerçekleştirilmiştir. Karşı yüzey olarak kullanılan Al_2O_3 bilya ile yapılan testler sonucunda, aşınma izleri incelenmiş ve kaplamaların aşınma dirençleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen hacimsel aşınma kayıpları, sırasıyla TiN kaplamalı yüzey için $36 \mu m^2$, TiAlN kaplamalı yüzey için $10,145 \mu m^2$, anodize yüzey için $17,024 \mu m^2$ ve işlemsiz Ti-6Al-4V yüzey için $16,849 \mu m^2$ olarak belirlenmiştir. Aşınma mekanizmalarının incelenmesi amacıyla aşınmış yüzeylerin hem test sonrası hem de temizlenme sonrası mikroskopik görüntüleri analiz edilmiştir.

Yapılan değerlendirmelerde, TiN kaplamanın en yüksek aşınma direncini sağladığı ve baskın aşınma mekanizmasının abrasif aşınma olduğu gözlemlenmiştir. TiAlN kaplama, sert yapısına rağmen daha yüksek aşınma kaybı göstermiş olup, kaplama yüzeyinin aşınması sonrası alt tabakanın açığa çıkmasıyla ikincil adhesif aşınma etkileri gözlemlenmiştir. Anodizasyon uygulanmış yüzeyde ise oksit tabakanın kırılabilir olması nedeniyle kaplama soyulması ve kombinasyon halinde adhesif-abrasif aşınma mekanizmalarının etkili olduğu belirlenmiştir. İşlemsiz Ti-6Al-4V alaşımı, en yüksek aşınma kaybı değerlerinden birini göstermiş olup, baskın olarak adhesif aşınma mekanizmasına maruz kalmıştır.

Sonuç olarak, TiN kaplama en düşük aşınma hacmiyle en iyi performansı sergileyerek, tribolojik dayanımı artırmada en etkili yüzey modifikasyonu olarak belirlenmiştir. Buna karşın, anodizasyon işlemi aşınma direncini artırmada yetersiz kalmış, TiAlN kaplamanın ise aşınma sonrası kaplama kaybı nedeniyle performansının düştüğü tespit edilmiştir.

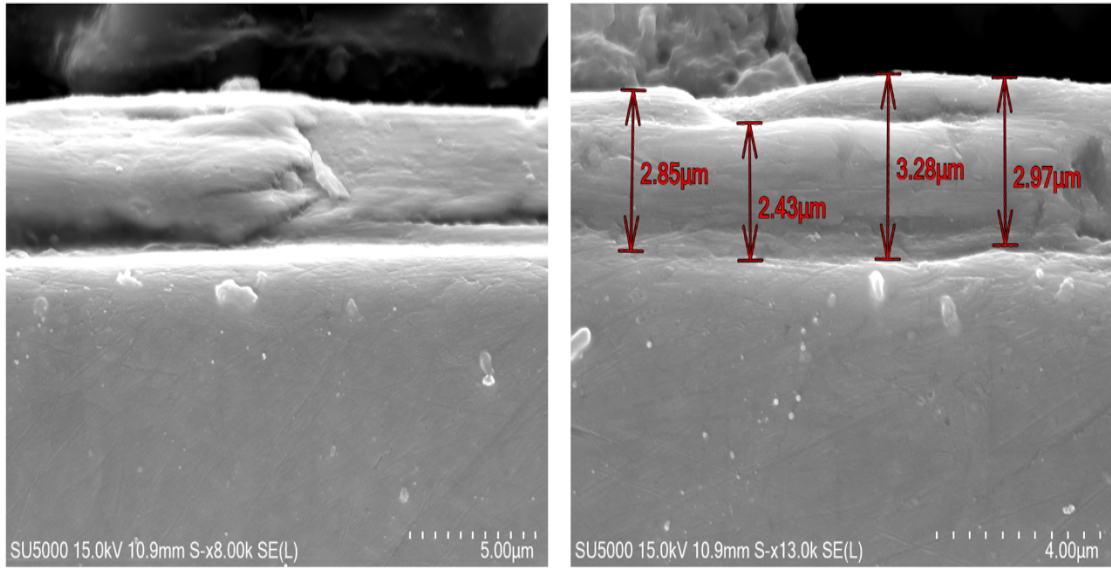
9.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Spektroskopi (EDS) Sonuçları

Aşınma testleri sonrasında numunelerde meydana gelen yüzey hasarlarının mikroyapısal ve kimyasal düzeyde detaylı olarak analiz edilebilmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) tekniklerinden faydalanılmıştır. 15 kV hızlandırma gerilimi altında gerçekleştirilen SEM analizleri, yüksek çözünürlükte görüntüleme imkânı sunarak, aşınma izlerinin geometrik özellikleri, yüzey morfolojisindeki değişimler ve oluşan plastik deformasyon türleri hakkında nitel ve nicel veriler sağlamıştır.

Buna ek olarak, EDS analizleri ile kaplanmış numunelerin kimyasal bileşimleri belirlenmiş ve elementel dağılımları haritalanarak, yüzey modifikasyonlarının kimyasal etkileri ortaya konulmuştur. Bu karakterizasyon süreci, farklı yüzey işlemlerinin aşınma sonrası davranışlarını değerlendirmek ve aşınma mekanizmalarını daha kapsamlı açıklamak açısından önemlidir. SEM ve EDS analizlerinden önce, Ti-6Al-4V alaşımına ait numuneler metalografik olarak hazırlanarak bakalit içerisine alınmış ve yüzeyleri uygun biçimde parlatılmıştır. Bu işlem, hem analiz sırasında numunenin mekanik stabilitesini sağlamakta hem de görüntüleme kalitesini artırmaktadır. Şekil 9.6’da, farklı yüzey modifikasyonlarına sahip dört numunenin bakalitlenmiş halleri sunulmaktadır. Hazırlanan kesitler sayesinde, kaplama-malzeme ara yüzeyleri detaylı biçimde incelenmiş ve EDS analizlerinde hedeflenen bölgelerde hassas ölçümler yapılabilmektedir. Bu bulgular, kaplama türlerinin aşınma performansına etkisini bilimsel temelde değerlendirmeye olanak sağlamıştır.

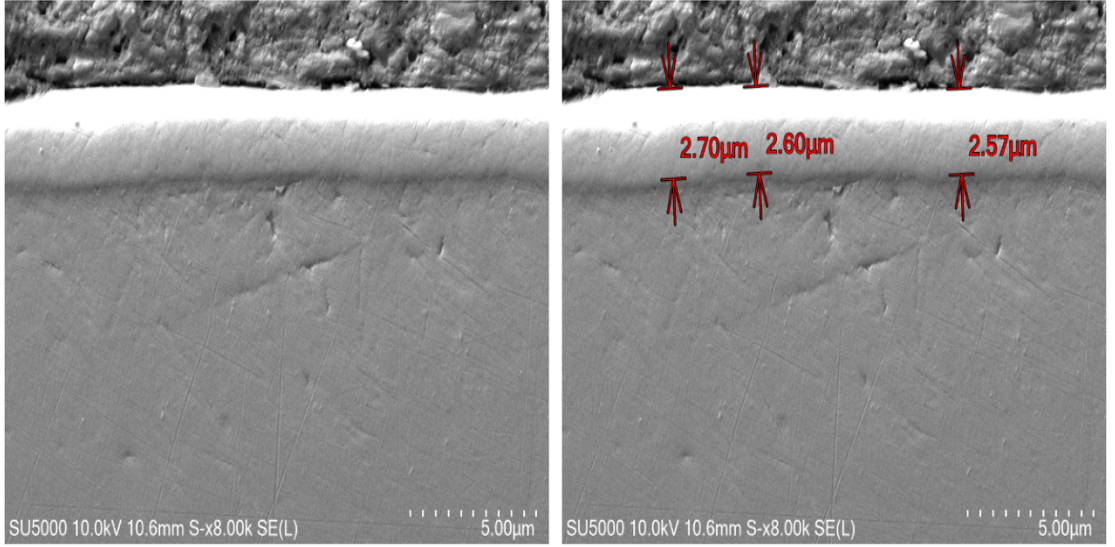


Şekil 9.6: Test Sonrası Bakalite Alınmış Numuneler.



Şekil 9.7: Anodizasyon Uygulanmış Ti-6Al-4V SEM Görüntüleri.

Şekil 9.7’de anodizasyon yöntemiyle yüzey modifikasyonu uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımına ait kesit alanının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü sunulmaktadır. Soldaki görüntü 8.000x büyütme, sağdaki görüntü ise 13.000x büyütme oranına sahiptir. Görüntülerde, yüzeye uygulanan anodizasyon kaplaması ile alaşım matriksi arasındaki ara yüzey net bir şekilde izlenebilmekte olup, kaplama tabakasının bütünlüğü ve sürekliliği dikkat çekmektedir. Ölçüm yapılan farklı bölgelerde kaplama kalınlıklarının yaklaşık olarak 2.43 µm ile 3.28 µm arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, anodizasyon işlemi sonucunda elde edilen oksit tabakasının genel olarak homojen bir yapıya sahip olduğunu ve yüzey boyunca kararlı bir şekilde oluştuğunu göstermektedir. Kaplama kalınlığındaki bu hafif değişimlerin, yüzey topografyasındaki mikro ölçekteki düzensizliklerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Elde edilen bu görüntü ve kalınlık verileri, anodize edilmiş yüzeyin mekanik dayanımı ve aşınma direnci açısından işlevsel bir koruyucu tabaka sunduğunu göstermektedir. Şekil 9.8’de TiN (titanyum nitrür) kaplamaya sahip Ti-6Al-4V numuneye ait çapraz kesit taramalı elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir. Görüntüler 8.000x büyütme oranında elde edilmiş olup, kaplama tabakasının yüzey üzerinde oluşturduğu yapı net bir şekilde gözlemlenmektedir.

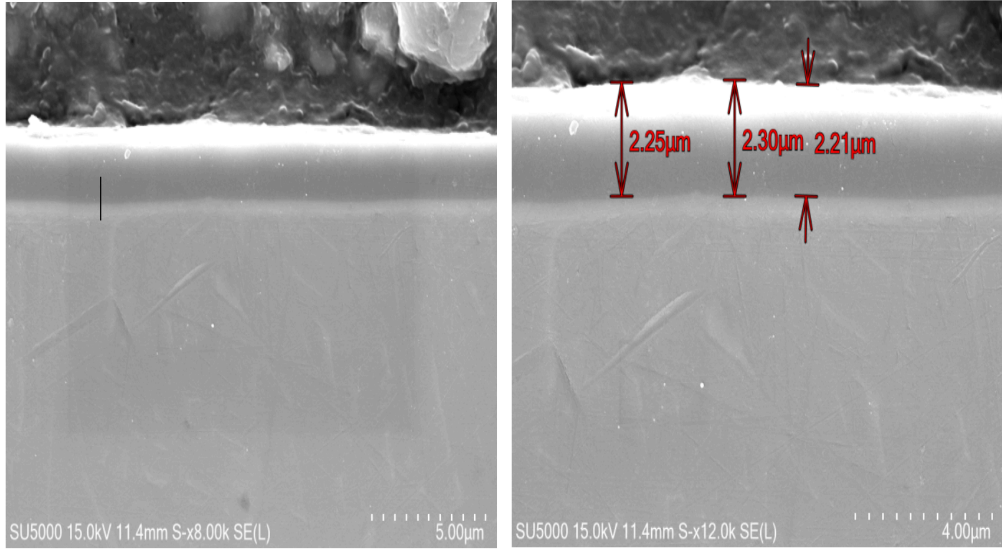


Şekil 9.8: TiN Kaplama Ti-6Al-4V SEM Görüntüleri.

Ölçüm yapılan çeşitli bölgelerde elde edilen TiN (Titanyum Nitrür) kaplama kalınlık değerleri sırasıyla 2.70 μm , 2.60 μm ve 2.57 μm olarak tespit edilmiştir. Bu veriler, kaplamanın yüzey boyunca homojen bir dağılım sergilediğini ve uygulanan kaplama işleminin tutarlı ve istikrarlı sonuçlar verdiğini açıkça göstermektedir. İstikrarlı kalınlık değerleri, proses kontrolünün etkin bir şekilde uygulandığının ve kaplama parametrelerinin optimal düzeyde ayarlandığının bir göstergesidir.

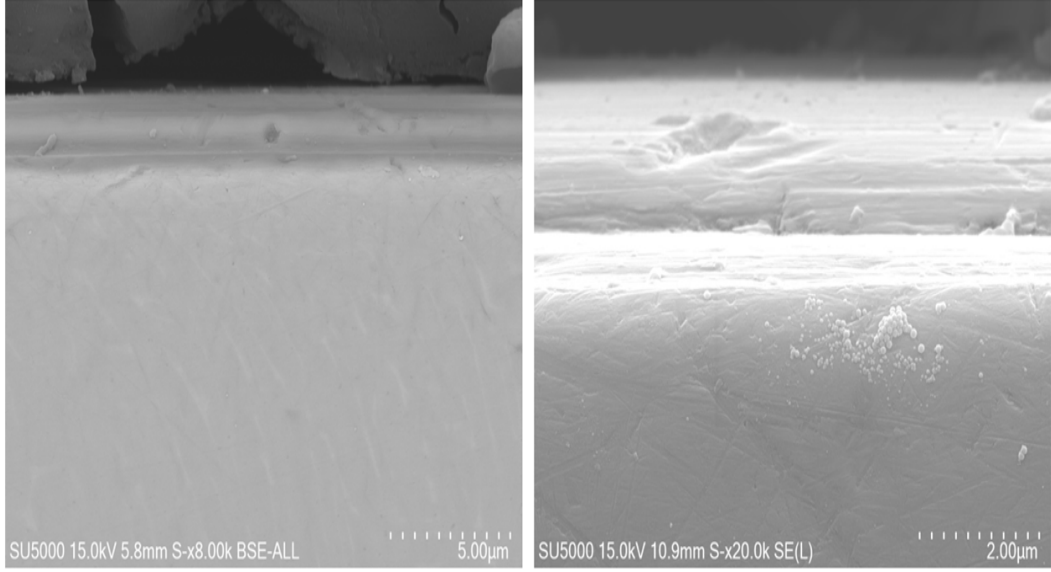
Ayrıca, kaplama ile alaşım matrisi arasındaki ara yüzeyin düzgün bir şekilde tesviye edilmesi ve süreksizlik içermemesi, kaplamanın yüzeyle mükemmel bir şekilde entegre olduğunu ve kimyasal ya da mekanik olarak iyi bir yapışma sağladığını ortaya koymaktadır. Kaplamanın yüzeye sağlam bir biçimde tutunması, kaplamanın işlevselliğini artırarak, uzun ömürlü performans ve dayanıklılık sunmaktadır. Bu durum, özellikle zorlu aşınma koşulları altında kaplamanın koruyucu görevini eksiksiz ve etkin bir biçimde yerine getirebilmesi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Elde edilen ölçüm sonuçları, koruyucu kaplamaların aşınma, oksidasyon ve kimyasal etkenlere karşı direnç göstermesi beklenmektedir. Böylece, kaplanan yüzeyler, işleme süresi boyunca veya servis koşullarında maruz kaldıkları çevresel etkenlere karşı daha uzun süre koruma kazanarak, kullanım ömrünün uzamasını sağlamaktadır. Sonuç olarak, TiN kaplama işleminin başarılı şekilde uygulanması, endüstriyel ve mühendislik uygulamalarında önemli ölçüde fayda sağlamakta ve bu tür kaplamaların tercih edilme nedenlerini pekiştirmektedir.



Şekil 9.9: TiAlN Kaplama Ti-6Al-4V SEM Görüntüleri.

Şekil 9.9’da TiAlN (titanyum alüminyum nitrid) kaplaması uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımına ait çapraz kesit SEM görüntüleri sunulmaktadır. Soldaki görüntü 8.000x, sağdaki görüntü ise 12.000x büyütme oranında alınmıştır. Görüntülerde, kaplama tabakasının yüzeyde düzgün ve sürekli bir yapı sergilediği açıkça gözlemlenmektedir. Görüntülerde dış uç kısımda bulunan görüntü bakalit görüntüleridir. Farklı bölgelerden yapılan kalınlık ölçümleri, kaplamanın yaklaşık olarak 2.21 μm ile 2.30 μm arasında değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu değerler, TiAlN kaplamanın yüzey üzerinde oldukça homojen bir şekilde dağıldığını ve üretim sürecinin kontrollü bir biçimde gerçekleştiğini göstermektedir. Kaplama ile alaşım matriksi arasındaki geçiş bölgesi net olup, yüzeyde herhangi bir soyulma, boşluk ya da süreksizlik izlenmemektedir. Bu, kaplamanın yüzeye yüksek aderansla bağlandığını ve potansiyel olarak yüksek aşınma direnci sunabileceğini göstermektedir. TiAlN kaplamaların bilinen yüksek sertlik ve oksidasyon direnci dikkate alındığında, bu yapısal bütünlük tribolojik uygulamalarda önemli avantajlar sağlayacaktır.



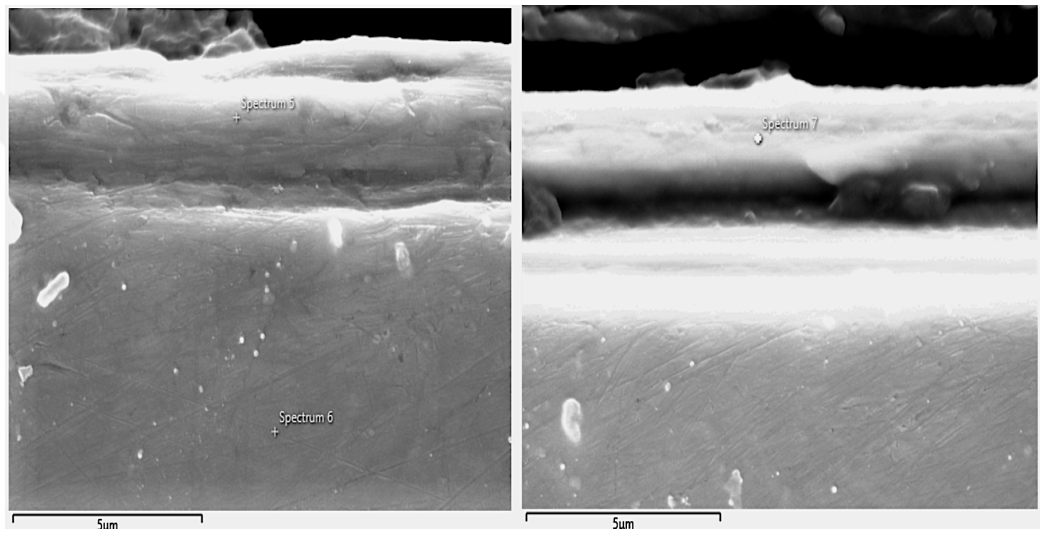
Şekil 9.10: İşlemsiz Ti-6Al-4V SEM Görüntüleri.

Şekil 9.10’da herhangi bir yüzey modifikasyonu uygulanmamış, kaplamasız Ti-6Al-4V alaşımına ait çapraz kesit SEM görüntüsü sunulmaktadır. Sol taraftaki görüntü 8.000x büyütme oranında elde edilmiş olup, yüzeyin alt yapısı ile matris yapısı arasındaki kontrastı ortaya koymaktadır. Sağ taraftaki görüntü ise 20.000x büyütme oranında alınmış olup, yüzey mikro morfolojisinin daha detaylı incelenmesini mümkün kılmaktadır.

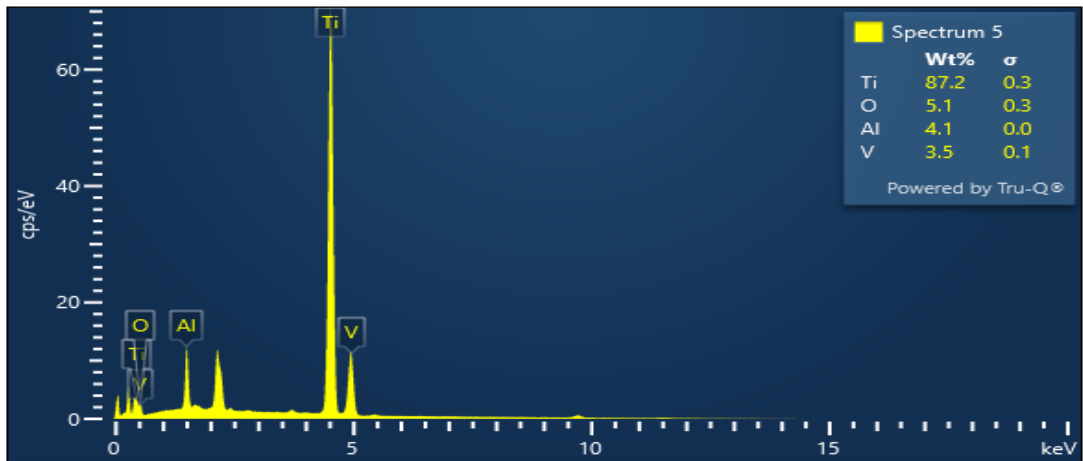
Her iki görüntüde de herhangi bir kaplama tabakası izlenmemekte, dolayısıyla yüzey ile alaşım matrisi arasında doğrudan bir geçiş görülmektedir. Yüksek büyütmede, yüzeyde yer alan küçük düzensizlikler, çizikler ve potansiyel aşınma izleri açıkça gözlemlenebilmektedir.

Kaplama bulunmadığı için, bu bölge çevresel etkiler ve mekanik zorlanmalara karşı doğrudan maruz kalmakta olup, bu durum özellikle aşınma testleri sonrasında daha belirgin mikroyapısal değişimlere neden olabilmektedir. Bu analizler, kaplama uygulanmamış yüzeyin referans durumunu temsil etmesi açısından önemli olup, yüzey modifikasyonlarının sağladığı avantajların değerlendirilmesinde karşılaştırmalı veri sağlamaktadır. SEM görüntülemeleri ile yüzey morfolojisi ve kaplama tabakalarının mikroyapısal özellikleri detaylı bir şekilde incelendikten sonra, bu yapısal gözlemleri kimyasal bileşim verileriyle desteklemek amacıyla enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir.

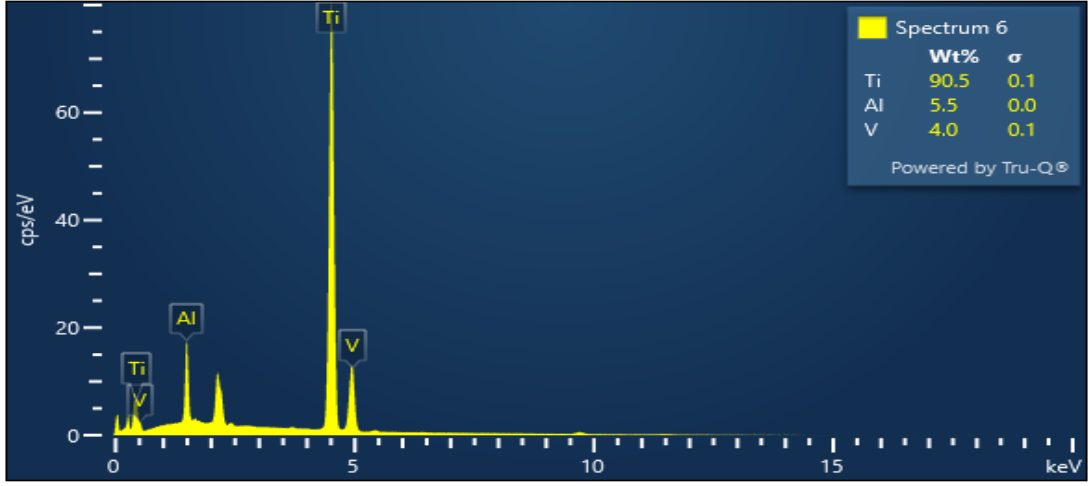
EDS analizleri sayesinde hem kaplama tabakasının hem de alt tabaka malzemenin elementel dağılımı belirlenmiş ve yüzey modifikasyonlarının kimyasal bütünlüğü hakkında bilgi edinilmiştir. Bu kapsamda, analiz yapılan bölgelerde noktasal analizler ile belirli alanlardaki element yoğunlukları tespit edilmiş; ayrıca çizgi tarama analizleri yardımıyla kaplama ile alt tabaka arasındaki geçiş bölgelerindeki elementel dağılım profili ortaya konulmuştur. Elde edilen bu veriler, kaplamaların kimyasal sürekliliği, olası difüzyon davranışları ve ara yüzey etkileşimleri hakkında önemli ipuçları sunmakta ve SEM bulgularını tamamlayıcı nitelik taşımaktadır.



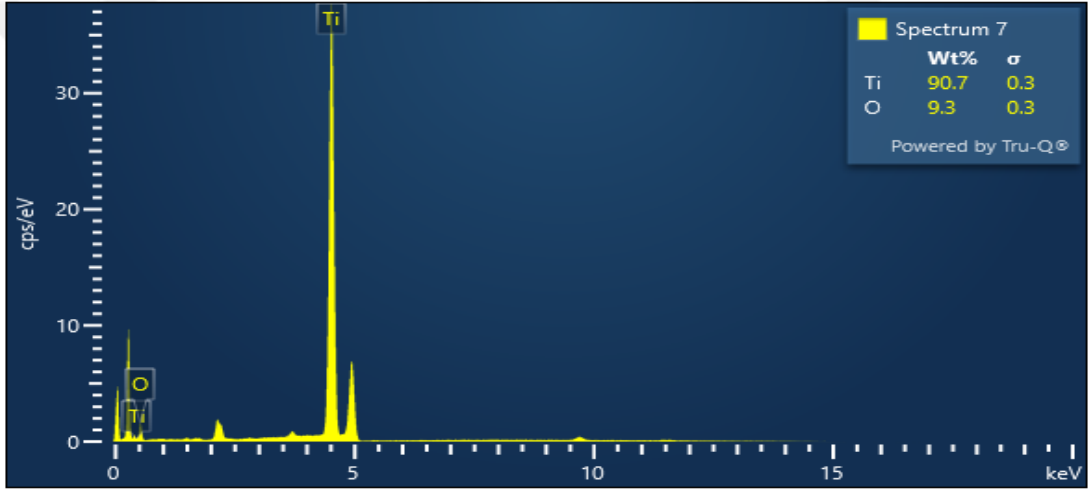
Şekil 9.11: Anodizasyon Uygulanmış Ti-6Al-4V EDS Görüntüsü.



Şekil 9.12: Anodizasyonlu Numune EDS Spectrum 5 Noktası Verileri.



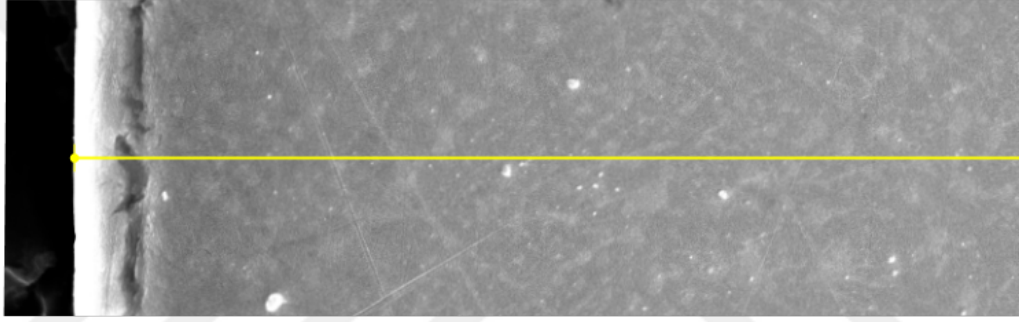
Şekil 9.13: Anodizasyonlu Numune EDS Spectrum 6 Noktası Verileri.



Şekil 9.14: Anodizasyonlu Numune EDS Spectrum 7 Noktası Verileri.

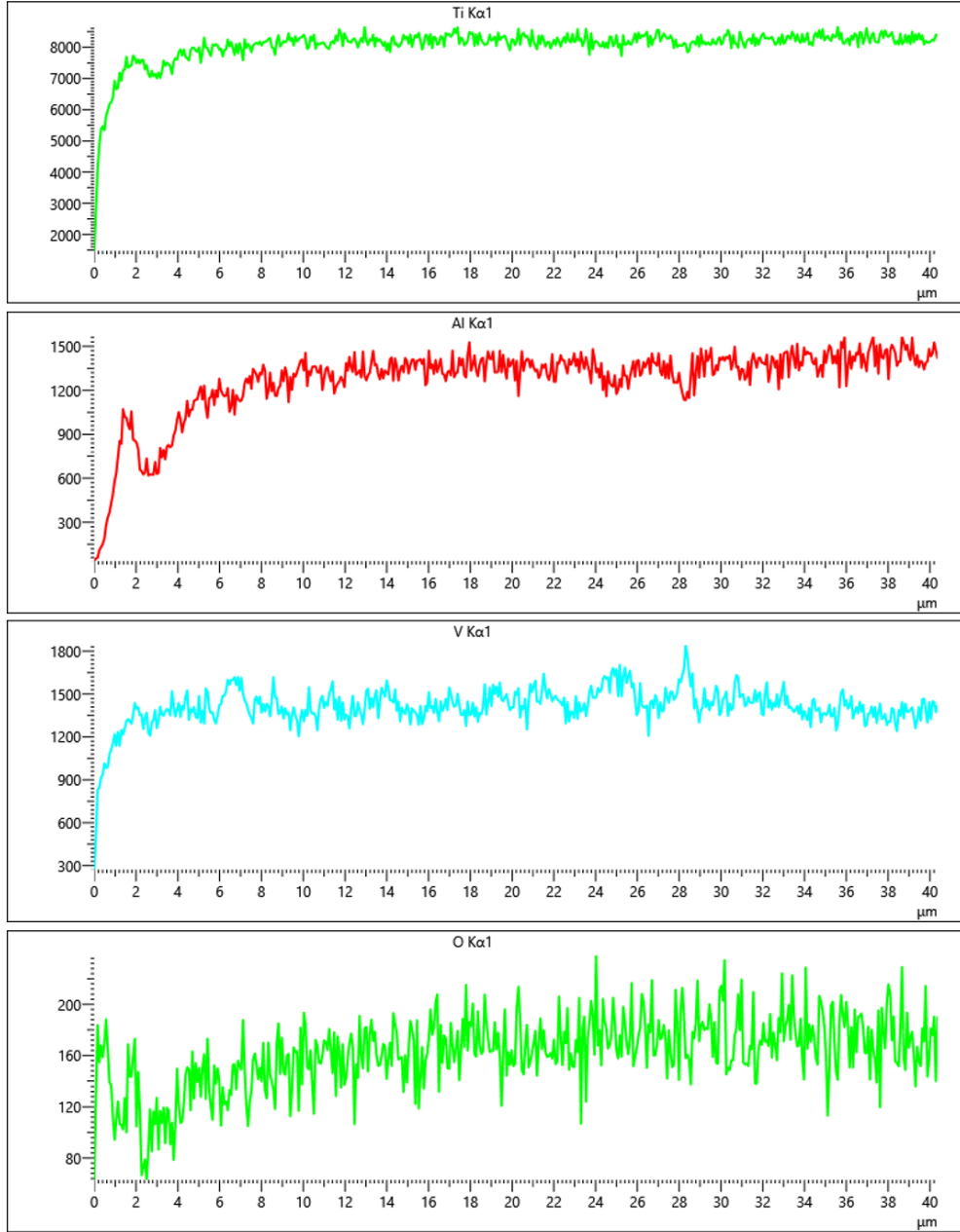
Yukarıdaki şekillerde anodizasyon işlemi uygulanmış Ti-6Al-4V numunesine ait SEM görüntüleri üzerinde gerçekleştirilen noktasal EDS analizleri yer almaktadır. Kaplama tabakasının farklı noktalarından ve alt tabaka bölgesinden alınan spektrumlar, yüzey kimyası hakkında detaylı bilgi sunmaktadır. Spectrum 5, anodize kaplama bölgesinden alınmış olup, analiz sonucunda %87.2 Ti, %5.1 O, %4.1 Al ve %3.5 V elementleri tespit edilmiştir. Oksijenin belirgin şekilde varlığı, anodizasyon sonucu oluşan TiO_2 esaslı oksit tabakasını doğrulamaktadır. Aynı zamanda kaplama içerisinde düşük oranlarda Al ve V elementlerinin bulunması, bu elementlerin anotlama işlemi sırasında yüzeye difüze olmuş olabileceğini göstermektedir.

Spectrum 6, alt tabaka olarak adlandırılan ve kaplama etkisinden uzak bölgeden alınmıştır; burada %90.5 Ti, %5.5 Al ve %4.0 V oranları ile alaşımın özgün bileşimi elde edilmiştir. Oksijenin bu bölgede gözlenmemesi, kaplamanın sadece yüzeyde sınırlı kaldığını göstermektedir. Diğer bir nokta olan Spectrum 7 de yüzey kaplama bölgesinden alınmış olup, burada %90.7 Ti ve %9.3 O oranı ile daha yüksek bir oksit içeriği tespit edilmiştir. Bu durum, anodizasyon sonrası yüzeyin oksijen açısından zenginleştiğini ve TiO₂ tabakasının sürekliliğini doğrulamaktadır. EDS sonuçları genel olarak, anodizasyon işlemi sonucunda yüzeyde başarılı bir şekilde titanyum oksit tabakası oluştuğunu, kaplama ile alt tabaka arasında ise net bir kimyasal farklılık bulunduğunu ortaya koymaktadır.



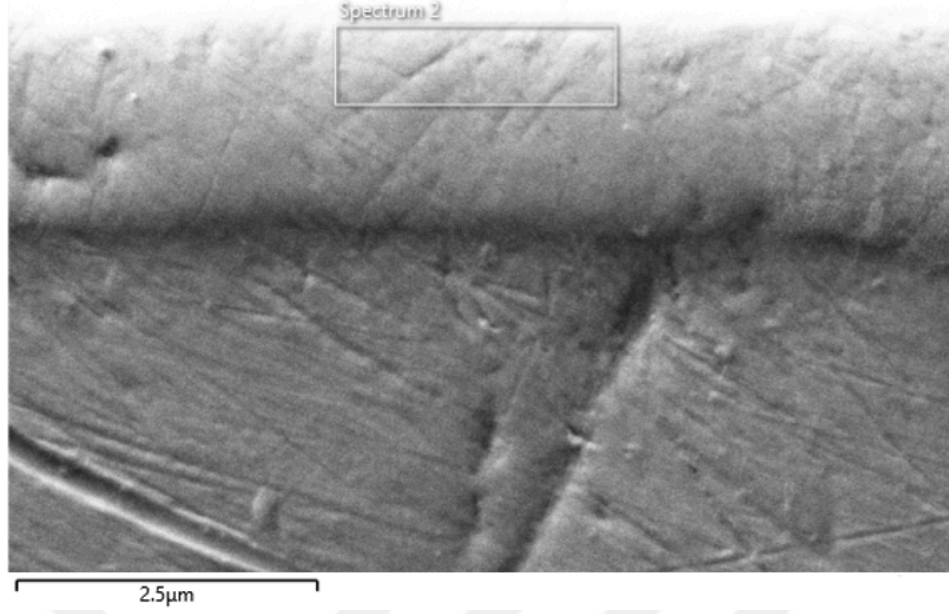
Şekil 9.15: Anodizasyonlu Ti-6Al-4V EDS Çizgi Analizi Görüntüsü.

Şekillerde anodizasyon uygulanmış Ti-6Al-4V numunesi üzerinde gerçekleştirilen çizgi (line scan) EDS analizine ait görüntü ve elde edilen spektrumlar yer almaktadır. Görseldeki çizgi yüzeydeki kaplama tabakasından başlayarak alt tabaka bölgesine kadar uzanmakta olup, kaplama–matriks geçiş bölgesindeki kimyasal değişimleri gözlemlemeye olanak sağlamaktadır. Ti (titanyum) dağılımı grafiğinde, yüzeyin en dış bölgesinde (0–2 µm arası) düşük şiddette bir Ti sinyali gözlenmekte, bu değer kısa mesafe içinde hızla artarak sabitlenmektedir. Bu durum, yüzeyde TiO₂ yapısının bulunduğunu ve bu tabakanın altında Ti içeriğinin baskın hale geldiğini göstermektedir. O (oksijen) elementi ise ilk birkaç mikrometrelik yüzey bölgesinde belirgin bir şekilde mevcut olup, yaklaşık 2–3 µm sonrasında seviyesini kaybederek arka planda dağınık bir şekilde devam etmektedir. Bu bulgu, anodizasyon sonucunda oluşan titanyum oksit tabakasının kalınlığının birkaç mikrometre ile sınırlı olduğunu ve alt tabakada oksijenin minimum düzeyde bulunduğunu göstermektedir.

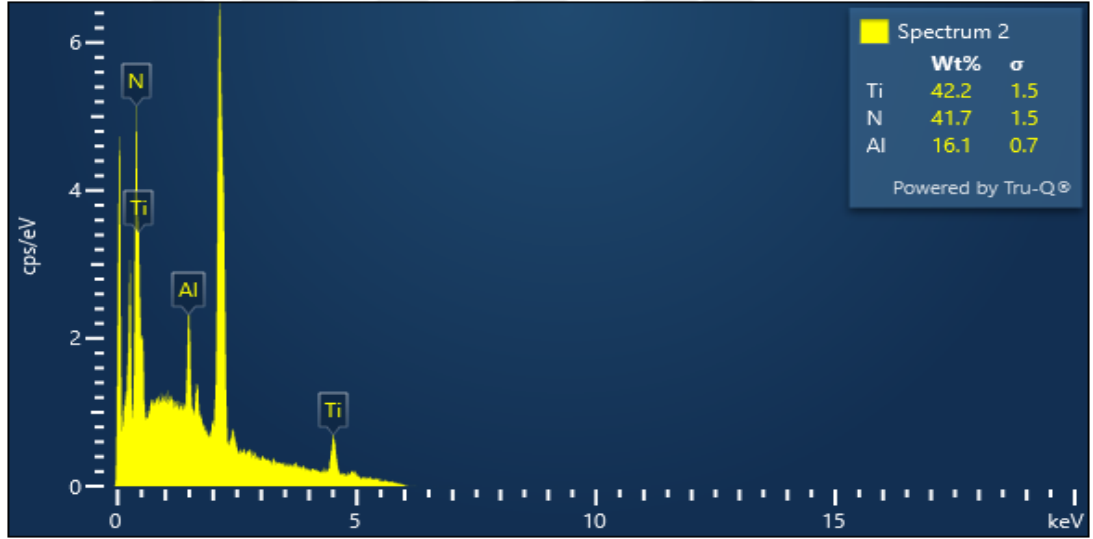


Şekil 9.16: Anodizasyonlu Ti-6Al-4V EDS Elementer Çizgi Analizi.

Alüminyum (Al) ve vanadyum (V) elementlerinin dağılımı ise Ti-6Al-4V alaşımının karakteristiğiyle uyumlu, yüzeyden itibaren artarak sabit bir seviyeye ulaşmakta ve bu seviyeyi tüm çizgi boyunca korumaktadır. Bu durum, Al ve V elementlerinin anodizasyon işlemiyle yüzeyde yüksek oranda yoğunlaşmadığını, alaşımın genel bileşimini yansıttığını göstermektedir. Sonuç olarak, EDS analizi, anodize yüzeyde ince ve sürekli bir TiO₂ tabakası oluştuğunu ortaya koymaktadır.

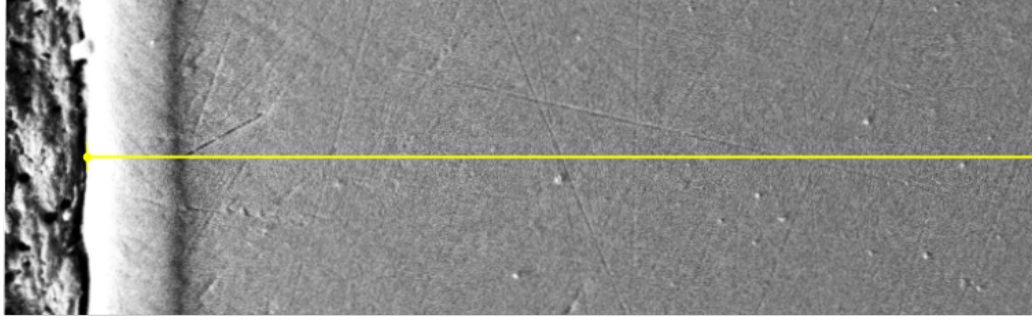


Şekil 9.17: TiN Kaplama SEM Görüntüsü.

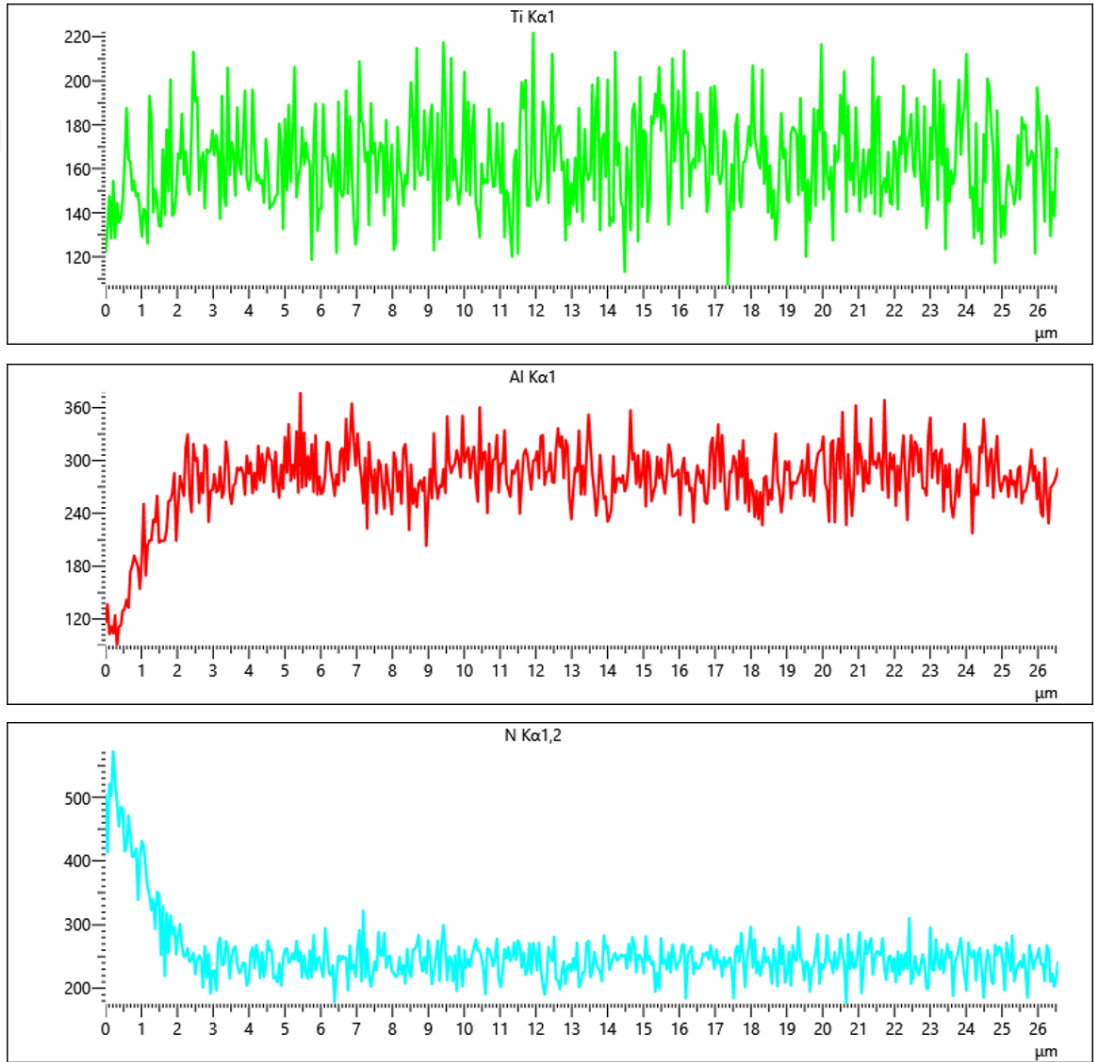


Şekil 9.18: TiN Kaplama EDS Elementer Analizi.

Şekil 9.17’de TiN kaplama uygulanmış Ti-6Al-4V numunesine ait ilgili bölgeden alınan EDS’de Spectrum 2 bölgesi, kaplama bölgesidir ve bileşimi hakkında bilgi vermektedir. İncelenen bölgede %42.2 oranında Ti (titanyum), %41.7 oranında N (azot) ve %16.1 oranında Al (alüminyum) elementi tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, TiN kaplamanın başarıyla oluşturulduğunu ve kaplama bölgesinde Ti ile N elementlerinin neredeyse eşit oranda bulunduğunu göstermektedir.



Şekil 9.19: TiN Kaplama EDS Çizgi Analizi Görüntüsü.

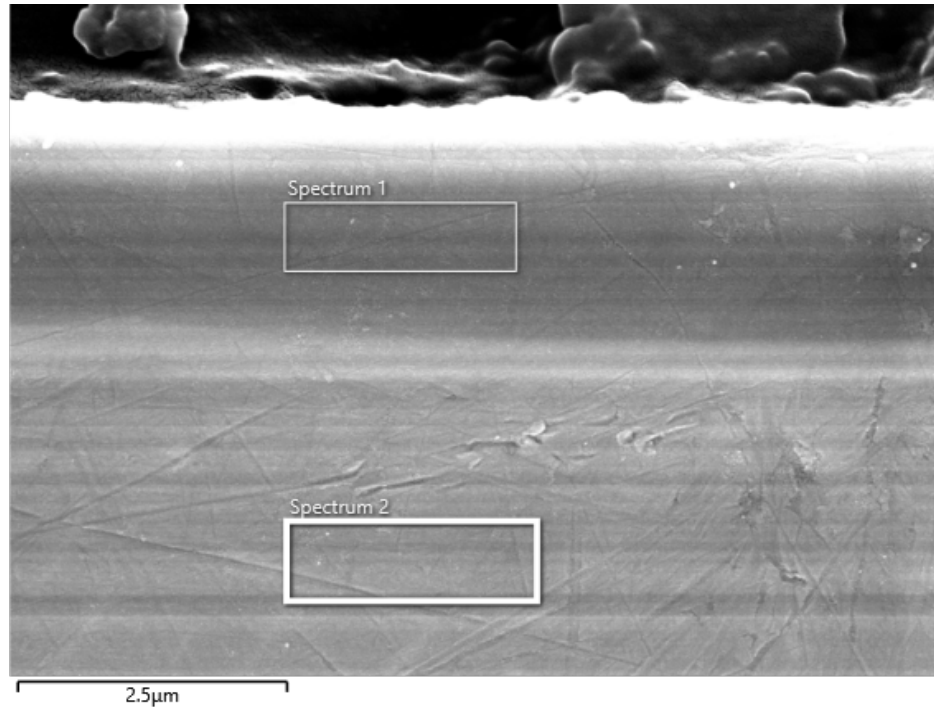


Şekil 9.20: TiN Kaplama EDS Elementer Çizgi Analizi.

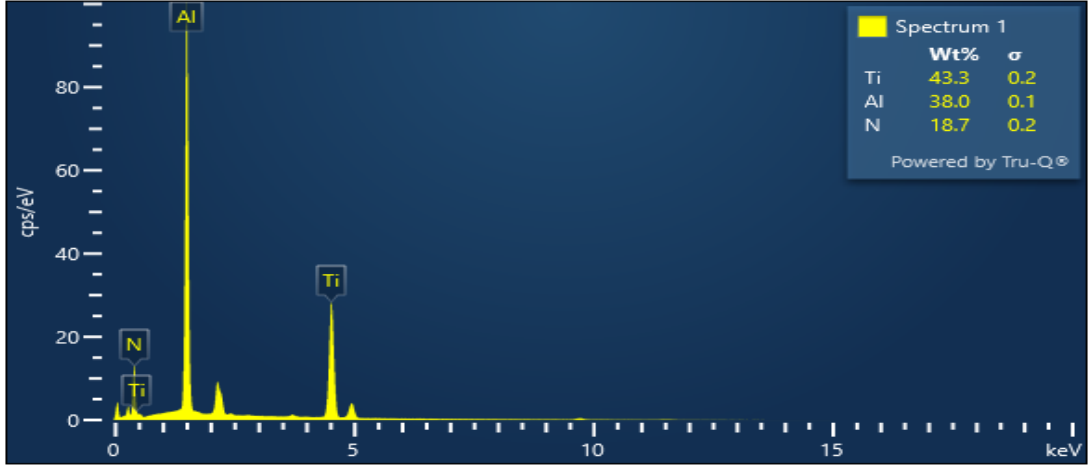
TiN kaplaması uygulanmış Ti-6Al-4V numunesine ait çizgi (line scan) EDS analizi sunulmaktadır. Sarı çizgi, yüzeyden başlayarak yaklaşık 26 μm uzunluğunda bir bölgeyi kapsamaktadır ve kaplama tabakası ile alt tabaka arasındaki elementel geçişin incelenmesine olanak tanımaktadır. Analiz kapsamında Ti, Al ve N elementlerine ait yoğunluk dağılımları değerlendirilmiştir. N (azot) elementi, yüzeyin ilk birkaç mikrometrelük bölgesinde yüksek sinyal yoğunluğuna sahiptir ve bu durum, yüzeydeki TiN kaplamanın varlığını doğrulamaktadır. Azot yoğunluğu, yaklaşık 3–4 μm derinlikten itibaren keskin bir şekilde azalarak sabit, düşük bir seviyeye ulaşmakta ve bu da kaplama kalınlığı ile uyumlu bir geçişi göstermektedir.

Al (alüminyum) dağılımı, yüzeyde düşük seviyede başlamakta, ardından artış göstererek yaklaşık 5 μm sonrasında sabitlenmektedir. Bu durum, Al elementinin esas olarak alt tabaka olan Ti-6Al-4V alaşımında bulunduğunu, ancak kaplama sürecinde yüzeye sınırlı şekilde difüze olmuş olabileceğini göstermektedir.

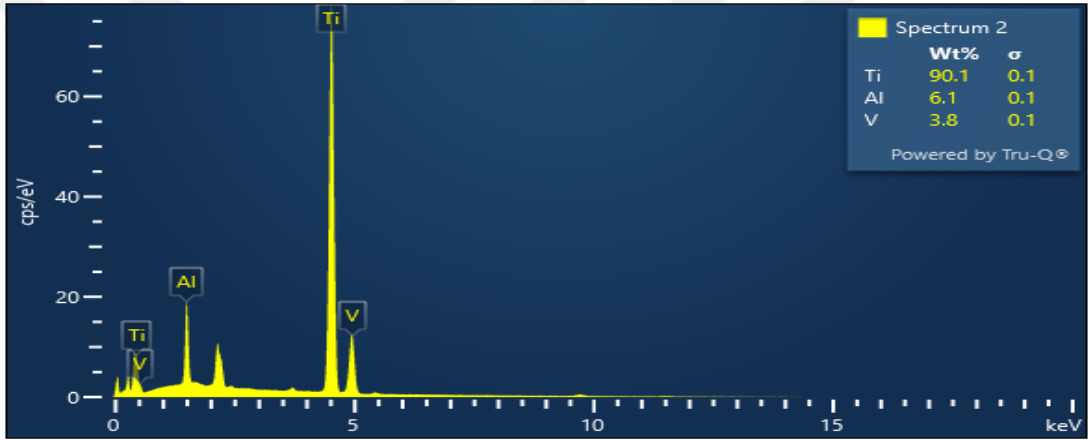
Ti (titanium) elementi ise tüm çizgi boyunca yüksek seviyelerde sabit kalmakta, bu da hem kaplama hem de alt tabaka içerisinde yoğun şekilde bulunduğunu göstermektedir. TiN kaplamada ana bileşen olarak Ti bulunması ve alt tabaka olan Ti-6Al-4V'nin de Ti esaslı olması bu sonucu desteklemektedir.



Şekil 9.21: TiAlN Kaplama Numunesi SEM Görüntüsü.



Şekil 9.22: TiAlN Kaplama EDS Spectrum 1 Noktası Verileri.



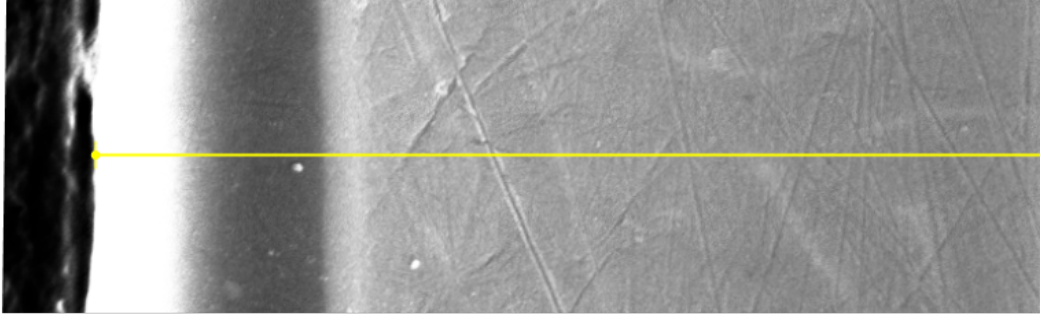
Şekil 9.23: TiAlN Kaplama EDS Spectrum 2 Noktası Verileri.

Şekillerde, TiAlN (titanyum alüminyum nitrür) kaplaması uygulanmış Ti-6Al-4V numunesine ait çapraz kesit SEM görüntüsü ve ilgili bölgelerden alınan EDS analiz sonuçları yer almaktadır. Spectrum 1, kaplama tabakasından; Spectrum 2 ise alt tabaka yani alaşımın kendisinden alınmıştır. Spectrum 1 bölgesinde, %43.3 Ti, %38.0 Al ve %18.7 N element oranları tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, TiAlN kaplamanın yüzeyde başarıyla oluşturulduğunu ve kaplamanın beklenen bileşimde olduğunu göstermektedir. Alüminyum (Al) elementinin yüksekliği, bu kaplamanın Al açısından zenginleştirildiğini ve bu sayede oksidasyon direncinin artırılmasının hedeflendiğini göstermektedir. N oranı ise Ti ve Al ile birleşerek nitrür oluşumunu teyit etmektedir. Özellikle yüksek Al içeriği, TiAlN kaplamanın klasik TiN'e kıyasla daha gelişmiş termal ve kimyasal stabiliteye sahip olduğunu işaret eder.

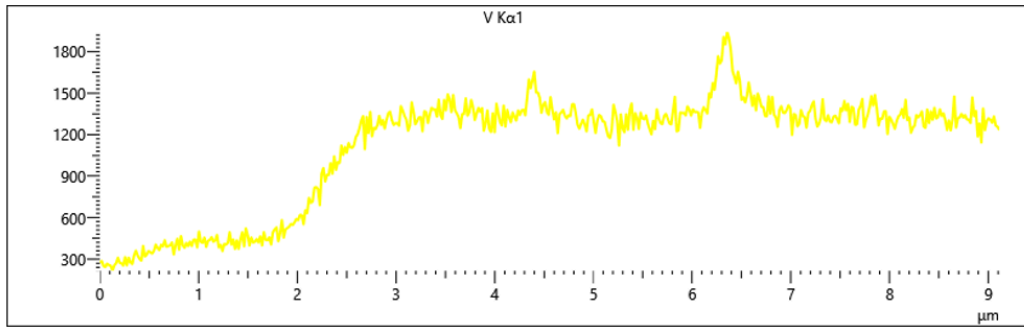
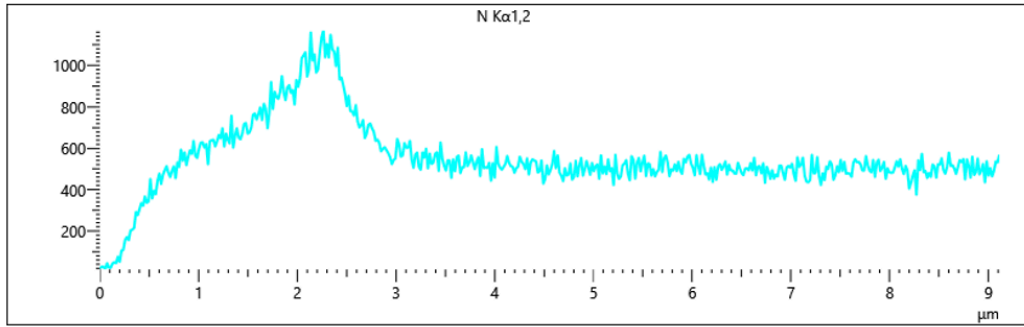
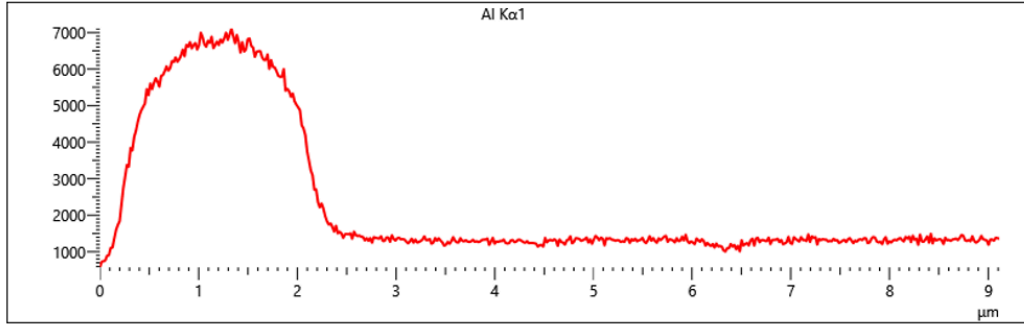
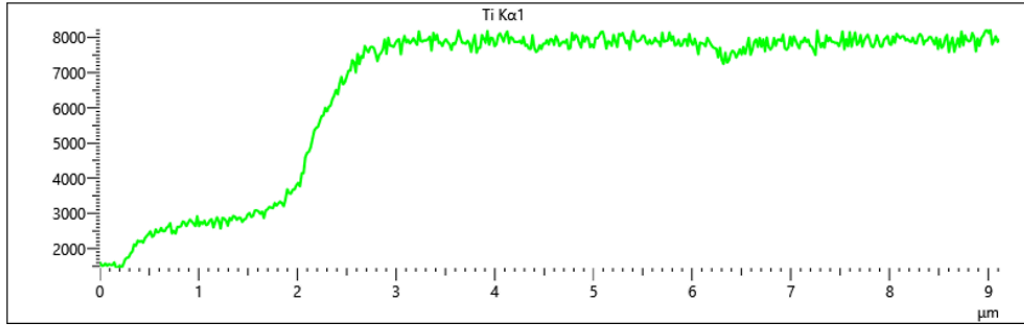
Alt tabakadan alınan Spectrum 2 analizinde ise %90.1 Ti, %6.1 Al ve %3.8 V oranları ölçülmüştür. Bu dağılım, kaplamasız Ti-6Al-4V alaşımının karakteristik bileşimine karşılık gelmektedir ve analiz noktasının kaplama etkisinden uzak, orijinal matriks bölgesine ait olduğunu doğrulamaktadır.

TiAlN kaplaması uygulanmış Ti-6Al-4V numunesi üzerinde gerçekleştirilen çizgi EDS analizine ait görüntü ve elementel yoğunluk grafikleri sunulmaktadır. Analiz çizgisi, yüzeydeki kaplama tabakasından başlayarak alt tabaka bölgesine kadar ilerlemekte ve kaplama–matriks geçiş bölgesindeki elementel değişimleri ayrıntılı şekilde ortaya koymaktadır. Alüminyum (Al) sinyali, yüzeyden itibaren yüksek yoğunlukla başlamakta ve yaklaşık 2.5 µm derinliğe kadar baskın bir şekilde izlenmektedir. Bu, Al elementinin kaplamada yoğun olarak bulunduğunu ve kaplamanın Al katkılı bir yapı (TiAlN) olduğunu doğrulamaktadır. Azot (N) sinyali de benzer şekilde yüzeyde yüksek olup yaklaşık 2–3 µm içinde azalarak sabitlenmektedir. Bu da kaplama tabakasının azot içeriğini ve kaplamanın nitrür karakterini desteklemektedir. Titanyum (Ti) sinyali ise yüzeyde daha düşük başlamakta, derinlik ilerledikçe hızla artmakta ve sabitlenmektedir. Bu, Ti'nin hem kaplama içinde hem de alt tabakada bulunduğunu, ancak özellikle alt tabakada baskın hale geldiğini göstermektedir.

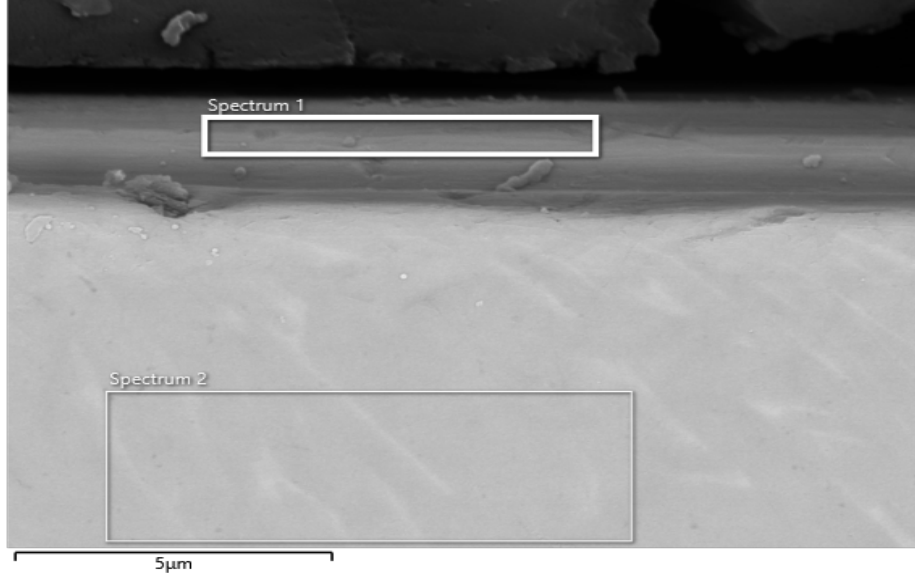
Vanadyum (V) elementi ise kaplama bölgesinde sınırlı düzeyde tespit edilmekte, derinlik boyunca artış göstererek Ti-6Al-4V alaşımının karakteristik bileşimini temsil eden düzeye ulaşmaktadır.



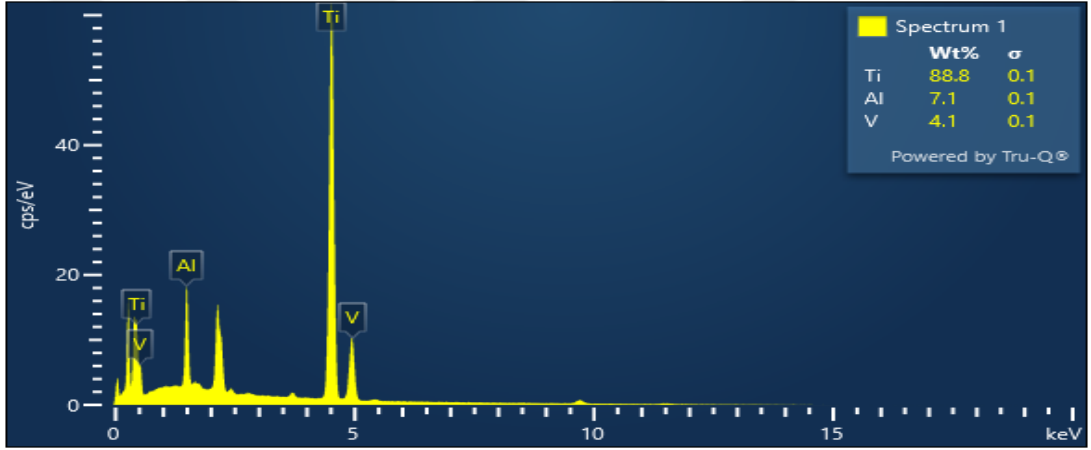
Şekil 9.24: TiAlN Kaplama EDS Çizgi Analizi Görüntüsü.



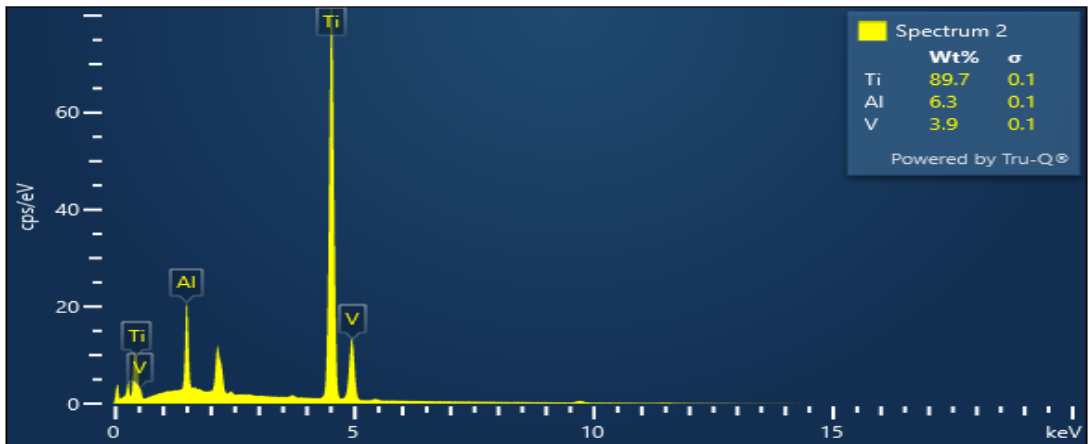
Şekil 9.25: TiAlN Kaplama EDS Elementer Çizgi Analizi.



Şekil 9.26: İşlemsiz Ti-6Al-4V SEM Görüntüsü.



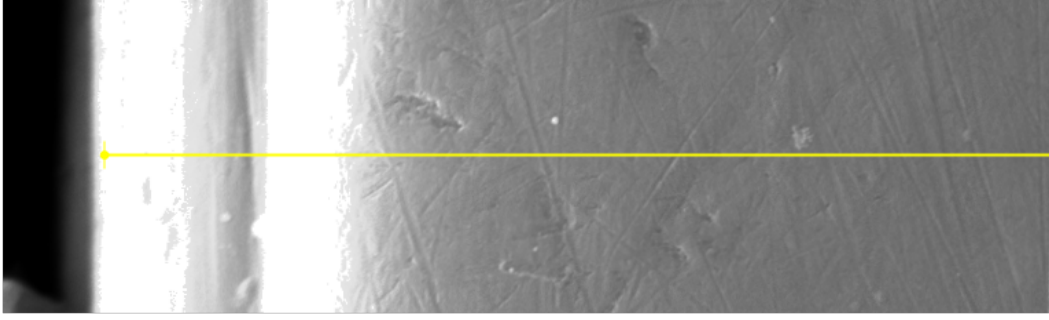
Şekil 9.27: İşlemsiz Ti-6Al-4V Spectrum 1 Noktası EDS Verileri.



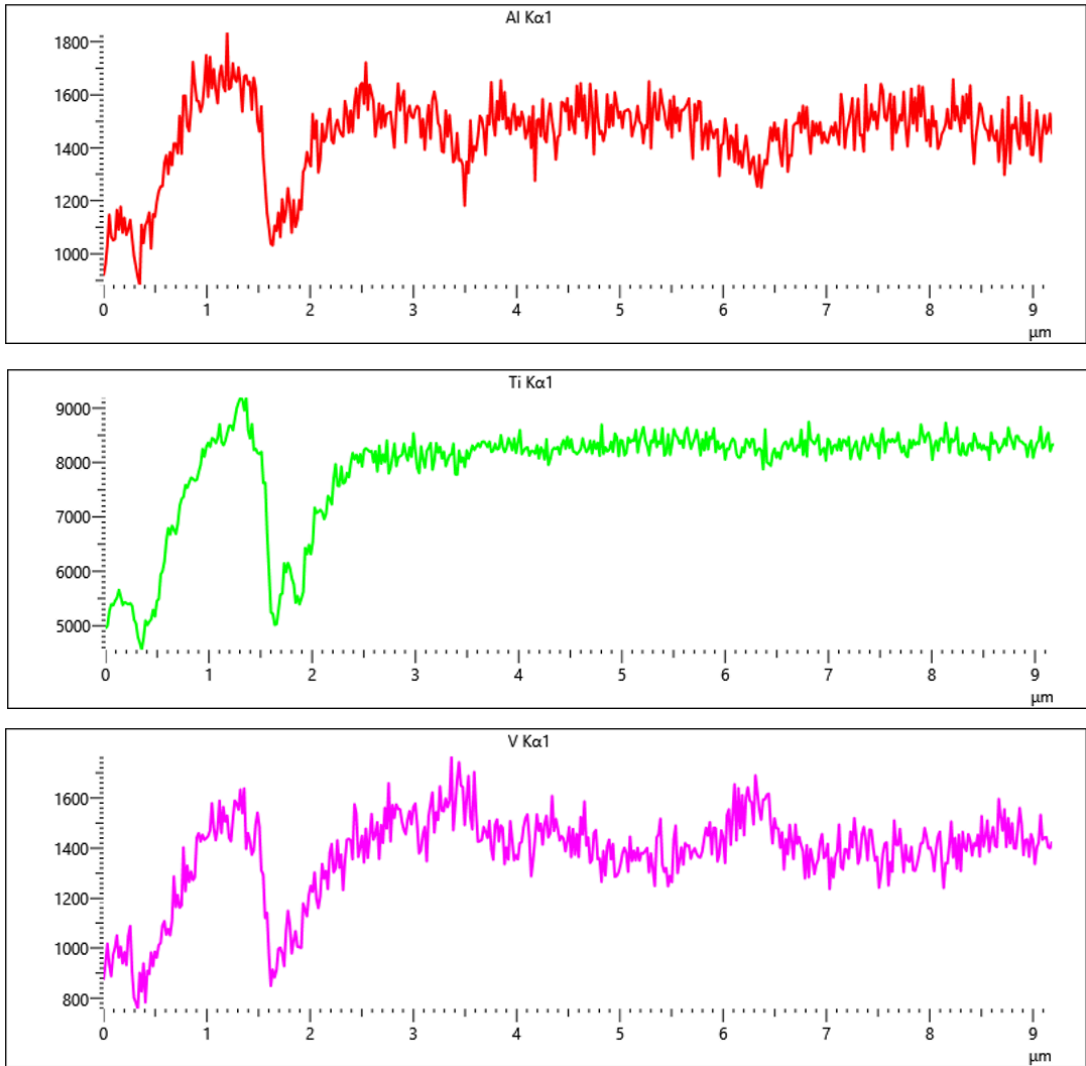
Şekil 9.28: İşlemsiz Ti-6Al-4V Spectrum 2 Noktası EDS Verileri.

İşlemsiz (kaplamasız) Ti-6Al-4V numunesine ait EDS analizleri, hem yüzey (Spectrum 1) hem de alt tabaka (Spectrum 2) bölgelerinde benzer elementel dağılımlar göstermiştir. Spectrum 1’de %88.8 Ti, %7.1 Al ve %4.1 V; Spectrum 2’de ise %89.7 Ti, %6.3 Al ve %3.9 V tespit edilmiştir. Bu değerler, alaşımın literatürdeki standart bileşimiyle uyumludur ve yüzeyde herhangi bir kaplama, oksitlenme ya da kimyasal değişim olmadığını doğrulamaktadır. Elde edilen veriler, numunenin tamamen işlem görmemiş olduğunu ve kaplamalı yüzeylerle yapılacak karşılaştırmalar için sağlam bir referans oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Şekil 9.29 ve 9.30’da yüzey modifikasyonu uygulanmamış Ti-6Al-4V numunesine ait EDS çizgi analizi sunulmaktadır. Çizgi boyunca yapılan elementel taramada, titanyum (Ti), alüminyum (Al) ve vanadyum (V) elementlerinin dağılımları gözlemlenmiştir. Üç element de yüzeyden başlayarak kısa bir geçiş bölgesinin ardından sabit seviyeye ulaşmakta ve numunenin homojen bir alaşım yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Ti yoğunluğu çizgi boyunca yüksek düzeyde seyretmekte olup, alaşımın ana bileşeni olduğunu doğrulamaktadır. Al ve V elementleri ise yüzeyden itibaren hafif artış göstererek sabitlenmiş ve yüzeyde herhangi bir dış tabaka veya kaplama etkisinin olmadığını ortaya koymuştur. Elde edilen bu profil, kimyasal bileşimde belirgin bir değişim olmadığını ve numunenin işlem görmemiş, bütünlüğü korunmuş bir yapı sergilediğini göstermektedir. Bu analiz, kaplamalı numunelerle yapılacak karşılaştırmalarda referans verisi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 9.29: İşlemsiz Ti-6Al-4V EDS Çizgi Analizi Görüntüsü.



Şekil 9.30: İşlemsiz Ti-6Al-4V EDS Elemental Çizgi Analizi.

10. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, havacılık ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V (Grade 5) alaşımının, Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi ile üretiminin ardından uygulanan farklı post-proses yüzey modifikasyonlarının aşınma direnci üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiştir. SLE yöntemi; yüksek doğruluk, minimum malzeme kaybı ve karmaşık geometrilerin üretilebilmesi açısından, çağdaş imalat teknolojileri arasında ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, yaklaşık %100 doluluk oranı ve 60 µm katman kalınlığına sahip Ti-6Al-4V numuneler, ilk olarak ısıl işleme tabi tutulmuş; ardından farklı yüzey kaplama yöntemleri uygulanarak tribolojik performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Numunelere uygulanan yüzey işlemleri üç ana gruba ayrılmıştır: PVD yöntemi ile yaklaşık 2–3 µm kalınlığında uygulanan TiN (titanyum nitrür) ve TiAlN (titanyum-alüminyum-nitrür) kaplamaları ile, elektrokimyasal anotlama (anodizasyon) yöntemiyle elde edilen oksit kaplaması.

Bu yüzey modifikasyonlarının tribolojik performanslarını değerlendirmek amacıyla ball-on-flat (reciprocating) tipi aşınma testi gerçekleştirilmiş; $F = 3$ N yük, $v = 5$ mm/s kayma hızı, $s = 25$ m kayma mesafesi ve 2 mm strok mesafesi (aşınma testinin uygulandığı git-gel mesafesi) ile testler kuru ortam koşullarında uygulanmıştır. Batıcı/aşındırıcı top (ball) olarak $D = 6$ mm çapında Al_2O_3 (alümina) bilya kullanılmıştır.

DeneySEL sonuçlar, yüzey modifikasyonlarının aşınma performansı üzerinde belirgin etkileri olduğunu göstermiştir. TiN kaplama, $k = \sim 0.143$ sürtünme katsayısı ve yalnızca 36 µm² aşınma alanı ile en iyi performansı göstermiştir. Düzgün kaplama morfolojisi ve düşük sürtünme yüzeyi ile TiN kaplama, Ti-6Al-4V alaşımının aşınmaya karşı direncini en üst seviyeye çıkarmıştır. TiAlN kaplama, ortalama 0.461 sürtünme katsayısı ve 10145 µm² aşınma alanı ile ikinci sırada yer almıştır. Bu kaplama Al_2O_3 benzeri oksit fazlarının oluşumu nedeniyle yüzey kırılabilirliğinin artması aşınma direncini azaltmıştır.

Her iki kaplamada da kalınlık yaklaşık 2–3 µm aralığında uygulanmış ve kaplama öncesi yüzey hazırlıkları (ısıtma ve metal iyon bombardımanı gibi) benzer şekilde gerçekleştirilmiştir.

Anodizasyon kaplaması ise ortalama 0.429 sürtünme katsayısı ve 17024 µm² aşınma alanı ile daha zayıf bir performans sergilemiştir. Bu durum, elektrokimyasal olarak elde edilen gözenekli TiO₂ tabakasının mekanik yük altında kolayca çatlayıp soyulabilir olmasıyla açıklanmaktadır. İşlemsiz Ti-6Al-4V numuneler ise 16849 µm² aşınma alanı ve 0.436 sürtünme katsayısı ile en düşük aşınma dayanımına sahip grubu oluşturmuştur.

Kaplamaların mikroyapısal özellikleri, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve EDS (Enerji Dağılımlı Spektroskopi) analizleriyle detaylı olarak incelenmiştir. TiN kaplamalı numunelerde homojen, pürüzsüz ve ince taneli bir yapı gözlemlenirken, aşınma izlerinde minimum deformasyon izine rastlanmıştır. TiAlN kaplamalarda ise, yüksek Al içeriğine bağlı olarak Al zenginleşmiş bölgeler ve yer yer oksit oluşumu gözlemlenmiş; anodize yüzeylerde ise poroz yapı, düzensiz morfoloji ve oksit kabuklarının yer yer kırıldığı alanlar tespit edilmiştir. İşlemsiz yüzeylerde yoğun plastik deformasyon, yırtılma ve yapışma-boşalma (adhesif aşınma) izleri SEM görüntüleri ile doğrulanmıştır.

Sonuç olarak, SLM ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımının aşınma performansının yüzey mühendisliği yöntemleriyle oldukça yüksek bir değerle iyileştirilebileceğini göstermiştir. Özellikle PVD yöntemiyle 2–3 µm kalınlığında uygulanan TiN kaplaması, düşük sürtünme, yüksek yüzey kararlılığı ve mikroyapısal bütünlük sayesinde en başarılı çözüm olarak öne çıkmıştır. Bu bulgular, SLM ile üretilen yüksek performanslı titanyum alaşımlarının, özellikle havacılık ve savunma sanayii gibi aşınmaya duyarlı uygulamalarda uzun ömürlü ve güvenilir hale getirilmesinde yüzey modifikasyonlarının kritik rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır.

KAYNAKÇA

- Veiga, C., Davim, J. P., & Loureiro, A. J. R. (2012). Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 32(2), 133-148.
- Biyomedikal Parçaların Eklemeli İmlatla (3d Baskı) Üretimi Fevzi YILMAZ*, Ebubekir KOÇ** sf4,
- Titanium: A Technical Guide (Second Edition) By Matthew J. Donachie, Jr. Eklemeli İmalat Yöntemleri Ve Kullanılan Malzemeler Onur Özsolak
- Çelik, K., & Özkan, A. (2017). Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 107-121.
- Siyambaş, Y., & Turgut, Y. (2022). Defects, mechanical properties and surface roughness of AlSi10Mg alloy parts produced by selective laser melting (SLM) method-a review. *J Sci Part C Des Technol*, 10(2), 368-390.
- Frahm, E. (2014). Scanning electron microscopy (SEM): Applications in archaeology. *Encyclopedia of global archaeology*, 6487-6495.
- Turalıoğlu, K., Taftalı, M., Tekdir, H., Çomaklı, O., Yazıcı, M., Yetim, T., & Yetim, A. F. (2021). The tribological and corrosion properties of anodized Ti6Al4V/316L bimetallic structures manufactured by additive manufacturing. *Surface and Coatings Technology*, 405, 126635.
- Jin, L. (2015). Adhesion mechanisms of Ti-6Al-4V to PVD coatings.
- Martini, C., & Ceschini, L. (2011). A comparative study of the tribological behaviour of PVD coatings on the Ti-6Al-4V alloy. *Tribology International*, 44(3), 297-308.
- Nurdin, N. A., Harun, D. A., Mohd Tobi, A. L., & Nasir, R. M. (2015). Effect of Pin Size on Reciprocating Sliding Wear Test of Ti-6Al-4V. *Applied Mechanics and Materials*, 773, 237-241.
- Marui, E., & Endo, H. (2001). Effect of reciprocating and unidirectional sliding motion on the friction and wear of copper on steel. *Wear*, 249(7), 582-591.
- Yang, L. J. (1999). Pin-on-disc wear testing of tungsten carbide with a new moving pin technique. *Wear*, 225, 557-562.
- Tylczak, J. H., Hawk, J. A., & Wilson, R. D. (1999). A comparison of laboratory abrasion and field wear results. *Wear*, 225, 1059-1069.
- Şahin, F. (2016). Akımsız nikel-fosfor kaplanan Ti-6Al-4V alaşımının aşınma davranışının incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Kökden, M. U. (1998). Ggg 50 Ve Ggg 80 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Abrasiv Aşınma Davranışına Ostemperleme İşleminin Etkisi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Gelir, E. (2019). Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen Fe esaslı Mo+ NiAl+ WC takviyeli kompozit malzemelerin adhesif aşınma davranışlarının incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Çelik, K., & Özkan, A. (2017). Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(1), 107-121.
- Appavuravther, E. Z. (2020). SLE (seçici lazer ergitme) yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımının ısı işleminin ve karakterizasyonu (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Alaşımının Havacılıktaki Uygulamaları Üzerine Bir Derleme * Dilara Selma aydın.
- Aktimur, B., & Gökpınar, E. (2015). Katmanlı Üretim Havacılıktaki Uygulamaları. Gazi University Journal Of Science Part C: Design And Technology, 3(2), 463-469.
- Aydın, D. S. (2022). Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Alaşımının Havacılıktaki Uygulamaları Üzerine Bir Derleme. Journal of Aerospace Science and Management, 1(1), 64-77.
- Çelik, H. S. (2010). ZA-27 alaşımının abrasif aşınma performansının incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Gökhan, Ö. Z. E. R. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1), 606-621.
- Çelikyürek, İ. (2006). Demir aluminatların borlanması ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi.
- Boztepe, E. Comparison of different nitriding methods on surface properties of DIN 1.2738 steel (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Akyazı, T. Biyomedikal Uygulamalarda Kullanılan Plasma Nitritlenmiş Ve Pvd Kaplanmış Ti-6al-4v Alaşımının Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Girão, A. V., Caputo, G., & Ferro, M. C. (2017). Application of scanning electron microscopy–energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). In Comprehensive analytical chemistry (Vol. 75, pp. 153-168). Elsevier.
- Akçayöz, D., Köken, K., Kunt, G., Müldür, İ. B., & Saykal, S. G. (2010). Elektron mikroskopun tipta kullanım alanları. Elektron mikroskopun tipta kullanım alanları.
- Canlı, S. (2010). Thickness analysis of thin films by energy dispersive x-ray spectroscopy (Master's thesis, Middle East Technical University (Turkey)).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKSU, Eda Nur

Uyruğu : T.C.

Eğitim

Derece	Üniversite ve Bölüm	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	: Milli Savunma Üniversitesi Havacılık Mühendisliği	2022-2025
Lisans	: KTO Karatay Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği	2015-2020

Yabancı Dil

İngilizce