



**Ti6Al4V ALAŞIMININ BORLANMASININ
YORULMA DAVRANIŞI VE MEKANİK
KARAKTERİZASYONA ETKİSİ**

**2025
DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Bahadır Furkan KINACI

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Cevat ÖZARPA**

**Ti6Al4V ALAŞIMININ BORLANMASININ YORULMA DAVRANIŞI VE
MEKANİK KARAKTERİZASYONA ETKİSİ**

Bahadır Furkan KINACI

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Cevat ÖZARPA**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Temmuz 2025**

Bahadır Furkan KINACI tarafından hazırlanan “Ti6Al4V ALAŞIMININ BORLANMASININ YORULMA DAVRANIŞI VE MEKANİK KARAKTERİZASYONA ETKİSİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Cevat ÖZARPA

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 21/07/2025

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Mustafa YILMAZ (MÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Cevat ÖZARPA (AMÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Harun ÇUĞ (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Bünyamin ÇİÇEK (HİTÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Bahadır Furkan KINACI

ÖZET

Doktora Tezi

Ti6Al4V ALAŞIMININ BORLANMASININ YORULMA DAVRANIŞI VE MEKANİK KARAKTERİZASYONA ETKİSİ

Bahadır Furkan KINACI

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Cevat ÖZARPA

Temmuz 2025, 111 sayfa

Titanyum alaşımlar, düşük yoğunluğu, yüksek özgül dayanımı ve önemli mekanik özellikleri sayesinde havacılık, uzay başta olmak üzere kritik mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılan bir mühendislik malzemesidir. Çalışmada, üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olan Ti6Al4V alaşımının farklı üretim yöntemleri ve borlama işlemi sonrası gösterdiği mekanik, tribolojik ve yorulma davranışları kapsamlı biçimde araştırılmıştır. Konvansiyonel vakum ergitme yöntemiyle üretilmiş endüstriyel çubuk formdaki numuneler temin edilmiştir. Farklı sinterleme sıcaklıklarında toz metalürjisi (TM) yöntemiyle numuneler üretilerek karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Her iki üretim yöntemiyle hazırlanan numuneler, 900 °C sıcaklıkta ve 15 saat süreyle Ekabor-II ticari tozu kullanılarak kutu borlama işlemi uygulanmıştır.

Borlama sonrası, mikroyapısal karakterizasyon için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), faz analizi için X-ışını kırınımı (XRD), Arşimet

prensibine göre yoğunluk ölçümü, mekanik özelliklerin belirlenmesi için ise sertlik, çekme, basma ve dört nokta dönel eğilme yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, ileri-geri hareketli kuru aşınma testleri ile tribolojik özellikler incelenmiş aşınma miktarı ve sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Çalışmada, borlama işlemi sonrası yüzeyde oluşan TiB ve TiB₂ borür fazlarının yüzey sertliğini ve aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen numunelerde görülen gözeneklilik, mekanik performans üzerinde olumsuz etkiler yaratırken, borlama ile bu etkilerin bir kısmının giderilebildiği tespit edilmiştir. Ayrıca endüstriyel numuneye uygulanan yorulma testleri sonucunda hem yüksek hem de düşük çevrimli koşullarda borlama işleminin yorulma ömrüne etkileri belirlenmiş, fraktografik incelemelerle kırılma mekanizmaları detaylandırılmıştır.

Elde edilen bulgular, üretim yönteminin ve uygulanan borlama işleminin Ti6Al4V alaşımının yapısal bütünlüğü, yüzey özellikleri ve mekanik performansı üzerindeki etkilerini çok yönlü olarak ortaya koymakta ve bu alaşımın ileri mühendislik uygulamalarında daha etkin kullanımına yönelik bilimsel katkılar sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler : Titanyum alaşımlar, Ti6Al4V, Borlama, Mekanik karakterizasyon, Yorulma davranışı

Bilim Kodu : 91421

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

EFFECT OF BORIDING OF Ti6Al4V ALLOY ON FATIGUE BEHAVIOR AND MECHANICAL CHARACTERIZATION

Bahadır Furkan KINACI

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Cevat ÖZARPA

July 2025, 111 pages

Titanium alloys are widely used in critical engineering fields, especially in aviation and aerospace, due to their low density, high specific strength and important mechanical properties. In the study, the mechanical, tribological and fatigue behaviours of Ti6Al4V alloy, which has superior mechanical and physical properties, were investigated comprehensively after different production methods and boriding process. Industrially produced samples were purchased. Additionally, production was carried out by powder metallurgy (P/M) method at different sintering temperatures, and the samples were examined comparatively. Samples prepared by both production methods were subjected to the box boriding process using Ekabor-II commercial powder at 900°C for 15 hours.

After boriding, optical microscope and scanning electron microscope (SEM) were used for microstructural characterisation. X-ray diffraction (XRD) was used for phase

analysis. In addition, density measurements were made. Hardness, tensile, compression and four-point bending fatigue tests were performed to determine mechanical properties. In addition, tribological properties were examined with reciprocating dry wear tests. In the study, it was observed that the TiB and TiB₂ boride phases formed on the surface after the boriding process significantly increased the surface hardness and wear resistance. While the porosity observed in the samples produced by the powder metallurgy method had negative effects on the mechanical performance, it was determined that some of these effects could be eliminated by boriding. In addition, as a result of the fatigue tests applied to the industrial sample, the effects of the boronizing process on the fatigue life were determined in both high and low cycle conditions, and crack initiation points and fracture mechanisms were detailed with fractographic examinations.

The findings reveal the multifaceted effects of the production method and the applied boriding process on the structural integrity, surface properties and mechanical performance of the Ti6Al4V alloy. They provide scientific contributions for the more effective use of this alloy in advanced engineering applications.

Key Word : Titanium alloys, Ti6Al4V, Boriding, Mechanical characterization, Fatigue behavior.

Science Code : 91421

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, aileme, arkadaşlarıma, hocalarıma ve en büyük ilham kaynaklarım oğlum Mehmet Tahir, kızlarım Ayşe Zümra ve Hatice Hafsa'ya tüm kalbimle teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	6
METALİK MALZEMELER	6
2.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARI	6
2.2. KOBALT-KROM ALAŞIMLARI.....	9
2.3. PASLANMAZ ÇELİKLER.....	10
2.4. DİĞER ALAŞIMLAR	11
BÖLÜM 3	13
TERMOKİMYASAL (DİFÜZYON) KAPLAMA.....	13
3.1. BORLAMA İŞLEMİ	14
3.1.1. Kutu (Katı Ortamda) Borlama	17
BÖLÜM 4	19
MATERYAL METOT.....	19
4.1. ENDÜSTRİYEL ÇUBUK MALZEME	22
4.2. TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ.....	22

	<u>Sayfa</u>
4.3. KUTU BORLAMA İŞLEMİ	24
4.4. MEKANİK TEST İŞLEMLERİ	25
4.4.1. Metalografik İncelemeler	25
4.4.2. Yoğunluk Ölçümleri.....	27
4.4.3. Sertlik Ölçümleri.....	28
4.4.4. Çekme Testi	29
4.4.5. Basma Testi.....	30
4.4.6. X-ışını Kırınımı (XRD) Analizi	31
4.4.7. Aşınma Testi	32
4.4.8. Yorulma Testi.....	33
BÖLÜM 5	38
DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
5.1. METALOGRAFİK İNCELEME SONUÇLARI	38
5.1.1. Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları	38
5.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İnceleme Sonuçları	41
5.2. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ SONUÇLARI.....	52
5.3. SERTLİK ÖLÇÜMÜ SONUÇLARI	54
5.4. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI	58
5.5. BASMA TESTİ SONUÇLARI.....	61
5.6. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) ANALİZİ SONUÇLARI.....	64
5.7. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI	66
5.8. YORULMA TESTİ SONUÇLARI.....	78
5.8.1. Yüksek Çevrimli Yorulma (S-N) Sonuçları.....	85
5.8.2. Düşük Çevrimli Yorulma (ϵ -N) Sonuçları	86
5.9. GENEL BULGULAR ve TARTIŞMA.....	89
BÖLÜM 6	96
SONUÇLAR	96
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Hekzagonal (α), Hacim merkezli kübik (β) Kristal yapı.	7
Şekil 2.2. İlave elementlerin titanyum denge diyagramına etkisi.	8
Şekil 2.3. Titanyum bor denge diyagramı.	9
Şekil 3.1. Termokimyasal yüzey kaplama işlemi mekanizması.	14
Şekil 3.2. Bor elementi özellikleri.	14
Şekil 3.3. Bor karbür faz diyagramı.	16
Şekil 3.4. Borlama işlemi.	16
Şekil 4.1. Yapılan tez çalışmasının detayları.	21
Şekil 4.2. Endüstriyel Olarak çubuk formda üretilmiş Ti6Al4V alaşımı.	22
Şekil 4.3. Toz metalürjisi üretim aşamaları.	23
Şekil 4.4. ASTM E8/E8M standardına göre üretilen çekme testi numunesi.	24
Şekil 4.5. Kutu borlama işlemi uygulama yapısı.	25
Şekil 4.6. Nikon ECLIPSEL 150 optik mikroskopu.	26
Şekil 4.7. Carl Zeiss Ultra Pluss SEM cihazı.	27
Şekil 4.8. RADWAG AS-60-220 C/2 yoğunluk ölçüm kiti.	28
Şekil 4.9. QNESS Q10 A+ mikrosertlik ölçüm cihazı.	28
Şekil 4.10. SHIMADZU çekme test cihazı.	29
Şekil 4.11. Zwick Z600 universal basma test cihazı.	30
Şekil 4.12. Rigaku Ultima IV XRD cihazı.	31
Şekil 4.13. 4D ECN marka ileri-geri aşınma test cihazı.	32
Şekil 4.14. 4-nokta dönel eğilmeli yorulma testi uygulama yapısı.	33
Şekil 4.15. Yorulma testi cihazı.	34
Şekil 5.1. Endüstriyel çubuk Ti6Al4V alaşımı optik mikroskop görüntüleri.	39
Şekil 5.2. Toz metalürjisi Ti6Al4V alaşımı optik mikroskop görüntüleri a) 800°C sinter b) 1000°C sinter c) 1200°C sinter sıcaklığı.	40
Şekil 5.3. Toz metalürjisi + 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımı optik mikroskop görüntüleri.	41
Şekil 5.4. Endüstriyel olarak üretilmiş Ti6Al4V alaşımının sem görüntüleri.	42
Şekil 5.5. Endüstriyel + 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımının ana matris, kaplama ve yüzey topografyası.	42

Şekil 5.6. Endüstriyel + 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımının ana matris, kaplama ve iç yapısı.	43
Şekil 5.7. EDX harita görüntüleri a) Borlanmış Ti6Al4V alaşımı b) Silisyum c) Bor d) Karbon e) Titanyum.	44
Şekil 5.8. Endüstriyel + 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımı çizgi ve nokta EDX.....	44
Şekil 5.9. Endüstriyel + 900 °C borlama Ti6Al4V nokta EDX.	45
Şekil 5.10. Endüstriyel + 900 °C borlama Ti6Al4V nokta EDX grafiksel oranlar....	46
Şekil 5.11. 800°C, 1000°C ve 1200°C sinter sıcaklıklarında üretilmiş Ti6Al4V alaşımının sem görüntüleri.	47
Şekil 5.12. 1200°C sinter + 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımının ana matris, kaplama ve yüzey topografyası.	48
Şekil 5.13. EDX harita görüntüleri a) Borlanmış Ti6Al4V alaşımı b) Silisyum c) Bor d) Karbon e) Titanyum.	48
Şekil 5.14. 1200°C sinter 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımı çizgi ve nokta EDX. ...	49
Şekil 5.15. 1200°C sinter 900 °C borlama Ti6Al4V nokta EDX grafiksel oranlar. ...	50
Şekil 5.16. 1200°C sinter 900 °C borlama Ti6Al4V nokta EDX.	51
Şekil 5.17. Endüstriyel çubuk formda 900°C’de borlanan numunenin kesit sertlik değerleri.....	56
Şekil 5.18. Toz metalürjisi ile 1200°C sinterlenerek 900°C’de borlanan numunenin kesit sertlik değerleri.	57
Şekil 5.19. Endüstriyel numunelerin mühendislik gerilim, gerinim diyagramı.....	59
Şekil 5.20. Endüstriyel numunelerin logaritmik gerilim, gerinim diyagramı.	60
Şekil 5.21. Toz metal numune mühendislik gerilim, gerinim diyagramı.....	60
Şekil 5.22. Toz metal numune logaritmik gerilim, gerinim diyagramı.....	61
Şekil 5.23. Endüstriyel numunede basma testi gerilim, gerinim diyagramı.	63
Şekil 5.24. Toz metal numune basma testi gerilim, gerinim diyagramı.	63
Şekil 5.25. Endüstriyel + 900°C’de borlanan numunelerin XRD kırınım desenleri..	64
Şekil 5.26. Toz metalürjisi ile 1200°C sinterlenen ve 900°C’de borlanan numunelerin XRD kırınım desenleri.	65
Şekil 5.27. Farklı yükler altında ortalama kayıp (50,150,250 m) miktarı.....	69
Şekil 5.28. Farklı mesafelerde ortalama kayıp (10,20,30 N) miktarı.....	70
Şekil 5.29. Farklı yüklerde ortalama sürtünme katsayısı (50,150,250 m).	71
Şekil 5.30. Farklı mesafelerde ortalama sürtünme katsayısı (10,20,30 N).	72
Şekil 5.31. Endüstriyel Ti6Al4V aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.	73
Şekil 5.32. Endüstriyel Ti6Al4V+borlama aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.....	74

Şekil 5.33. Toz metalürjisi ile 800°C sinter sıcaklığında üretilen Ti6Al4V aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.....	75
Şekil 5.34. Toz metalürjisi ile 1000°C sinter sıcaklığında üretilen Ti6Al4V aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.....	75
Şekil 5.35. Toz metalürjisi ile 1200°C sinter sıcaklığında üretilen Ti6Al4V aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.....	76
Şekil 5.36. Toz metalürjisi ile 1200°C sinter sıcaklığında üretilen Ti6Al4V+borlama aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.....	77
Şekil 5.37. Endüstriyel Ti6Al4V için oluşturulan Wöhler diyagramı.	79
Şekil 5.38. Endüstriyel Ti6Al4V + borlama için oluşturulan Wöhler diyagramı.	80
Şekil 5.39. 547.91 Mpa Gerilme sonucu kopan yorulma numuneleri görüntüleri ve 3D yüzey topografyaları a,b) Endüstriyel Ti6Al4V, c,d) Endüstriyel Ti6Al4V + borlama.	82
Şekil 5.40. 567.48 Mpa gerilme sonucu kopan yorulma numuneleri görüntüleri ve 3D yüzey topografyaları a,b) Endüstriyel Ti6Al4V, c,d) Endüstriyel Ti6Al4V + borlama.	82
Şekil 5.41. 743.6 Mpa gerilme sonucu kopan yorulma numuneleri görüntüleri ve 3D yüzey topografyaları a,b) Endüstriyel Ti6Al4V, c,d) Endüstriyel Ti6Al4V + borlama.	83
Şekil 5.42. 782.4 Mpa gerilme sonucu kopan yorulma numuneleri görüntüleri ve 3D Yüzey topografyaları a,b) Endüstriyel Ti6Al4V, c,d) Endüstriyel Ti6Al4V + borlama.	84
Şekil 5.43. Ti6Al4V ve Ti6Al4V + borlama numuneleri için gerçekleştirilen Gerber metodu uygulaması.	85
Şekil 5.44. Ti6Al4V ve Ti6Al4V + borlama numuneleri için ϵ -N eğrisi.	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. İlave Elementlere Göre Titanyum Alaşımları.....	8
Çizelge 2.2. Paslanmaz Çelik Grupları.	11
Çizelge 3.1. Bor Karbürün Mekanik Özellikleri.	15
Çizelge 3.2. Borlama Toz Karışım Yapısı.	17
Çizelge 3.3. Borlama Malzemesi Türleri.	18
Çizelge 4.1. Endüstriyel Ti6Al4V Alaşımı Kimyasal Kompozisyonu.	22
Çizelge 4.2. TM Ti6Al4V Alaşımı Kimyasal Kompozisyonu.....	23
Çizelge 4.3. Tozların Özellikleri.	23
Çizelge 5.1. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).	45
Çizelge 5.2. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).	45
Çizelge 5.3. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).	46
Çizelge 5.4. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).	49
Çizelge 5.5. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).	50
Çizelge 5.6. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).	51
Çizelge 5.7. Deneysel Yoğunluk, Bağlı Yoğunluk ve Gözeneklilik Değerleri.	53
Çizelge 5.8. Vickers Sertlik Değeri Sonuçları.	55
Çizelge 5.9. Çekme Testi Sonuçları.	59
Çizelge 5.10. Basma Testi Sonuçları.	62
Çizelge 5.11. Aşınma Testi Sonuçları.....	67
Çizelge 5.12. Aşınma Testi Ortalama Sonuçları.	68
Çizelge 5.13. Endüstriyel Ti6Al4V Yorulma Özellikleri.	78
Çizelge 5.14. Endüstriyel Ti6Al4V + Borlamanın Yorulma Özellikleri.	80
Çizelge 5.15. Ti6Al4V Düşük Çevrimli Yorulma Parametreler.	87
Çizelge 5.16. Ti6Al4V Düşük Çevrimli Yorulma İçin Hesaplanan Değerler.	87

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Ti	: titanyum
Al	: alüminyum
V	: vanadyum
Ar	: argon
Mo	: molibden
Nb	: niyobyum
Ta	: tantal
Cr	: krom
Mn	: mangan
Zr	: zirkonyum
C	: karbon
Co	: kobalt
O	: oksijen
N	: azot
Ni	: nikel
W	: tungsten
H	: hidrojen
Fe	: demir
Si	: silisyum
Sn	: kalay
B	: bor
B ₄ C	: bor karbür
TiC	: titanyum karbür
TiB	: titanyum monoborür
TiB ₂	: titanyum diborür
SiC	: silisyum karbür

HV : vickers sertlik

KBF₄: potasyum floro borat

KISALTMALAR

ASTM: Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu (American Society for Testing and Materials)

XRD : X-Ray Difraksiyon (X-Işını Kırınımı)

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

TM : Toz Metalürjisi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Titanyum ve alaşımları, üstün mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle günümüz mühendislik uygulamalarında stratejik bir konuma sahiptir. Yüksek mukavemet, korozyon direnci, yüksek sertlik, mükemmel ısı dayanımı ve düşük yoğunluk gibi özellikler, bu malzemelerin özellikle havacılık, uzay, savunma sanayii ve biyomedikal sektörlerinde yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır [1]. Çeliğe kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olan titanyum alaşımları, özellikle özgül dayanım bakımından dikkate değer avantajlar sunmaktadır [2]. Kullanım alanları incelendiğinde; havacılık, uzay, savunma teknolojileri başta olmak üzere, insan vücuduyla biyoyumlu yapısı sayesinde, implantlar ve protezler gibi biyomekanik uygulamalarda da titanyum malzemeler önemli bir yer tutmaktadır [3,4].

Titanyum alaşımları içinde en yaygın kullanılanlardan biri α/β fazlarında bulunan Ti6Al4V alaşımıdır. Bu alaşım, yüksek mukavemet ve mükemmel korozyon direnci özellikleri ile ön plana çıkmakta olup gerek endüstriyel gerekse tıbbi uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [2]. Savunma, uzay ve havacılık endüstrilerinde, düşük yoğunluğu ve korozyon direnci nedeniyle tercih edilen Ti6Al4V, biyomedikal alanda ise vücut içi uyumluluğu ve biyokimyasal stabilitesi ile dikkat çekmektedir [5].

Mühendislik malzemeleri, döküm, sıcak veya soğuk şekillendirme, toz metalürjisi, kaynaklı imalat, eklemeli imalat, talaşlı imalat gibi yöntemler başta olmak üzere farklı yöntemler ile üretilirler [6]. Konvansiyonel vakum ergitme yöntemi, metal ve alaşımlarının yüksek kalitede üretilmesi için yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. Bu üretim süreci, yüksek saflıkta alaşım elementlerinin temin edilmesi ve ilgili alaşım oranlarında tartılarak kimyasal bileşimin sağlanması ile başlar. Bu karışım, vakum ortamında veya inert bir gaz atmosfer ortamında ergitilir. Kullanılan bu vakum veya gaz atmosfer ortamı, ortamdaki oksijen, azot ve hidrojenin reaksiyona girmesini ve

alaşım içerisine difüzyonunu engeller. Bu engelleme ile oksitlenme ve nitrürlenme gibi istenmeyen etkilerin önüne geçilir. Ergitilen alaşım kalıplara dökülerek katılaştırılır. Genellikle 2–3 kez tekrar ergitme uygulanarak alaşımın mikroyapısal homojenlik ve kimyasal tutarlılık göstermesi sağlanır. Katılaştıran alaşımlar sıcak ve soğuk şekillendirme yöntemleri ile şekillendirilir. Alaşımda biriken iç gerilmeleri azaltmak, istenen fazların oluşumunu desteklemek için tavlama (ısıl işlem) uygulanır [7,8].

Toz metalürjisi (TM) üretim yöntemi yüksek hassasiyet, malzeme tasarrufu, düşük maliyet ve doğrudan kullanılabilir parça üretimi gibi avantajları nedeniyle, son yıllarda titanyum alaşımlarının üretiminde tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Toz metalürjisi yöntemi, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesinde üstün performans göstermektedir. Bazı işlem adımlarının atlanabilmesi, üretim süreçlerinin sadeleşmesine ve ekonomik hale gelmesine olanak tanımaktadır [9]. Tüm bu olumlu üstünlüklerin yanında, düşük yoğunluk miktarı ve bu nedenle yüksek gözeneklilik göstermesi en önemli sorundur. Yüksek gözeneklilik üretim sonrası mikroyapı kontrolünü zorlaştırmakta ve mekanik özellikleri direkt etkileyen sonuçlar ortaya koymaktadır [10]. Olumsuz durumların ortadan kaldırılabilmesi için sıcak presleme ve uygun termomekanik işlemler uygulanması gerekmektedir [11].

Mühendislik malzemeleri, kullanım alanlarına uygun özellikler kazanabilmek için üretim öncesinde, üretim sırasında veya sonrasında çeşitli işlemlere tabi tutulmaktadır. Bu işlemlerin temel amacı, malzemenin kullanım performansını artırmak ve çalışma koşullarına daha uygun hale getirmektir. İhtiyaçları karşılamak amaçlı gerçekleştirilen bu işlemlerde, malzemelere ilave malzeme takviyeleri veya kaplama işlemleri gerçekleştirilebilir. Kaplama işlemlerinde Bor (B) elementi ve türevleri sıklıkla kullanım alanı bulmaktadır [12,13]. Üretim sonrası malzemelerin özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla borlama işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem termokimyasal bir yüzey işlemi olup yüksek sıcaklıkta bor elementinin, metal yüzeyinde bir difüzyon ile kaplama oluşturma aşamalarını kapsar. İşlem sonucunda malzemenin yüzey sertliği, aşınma ve korozyon direnci önemli ölçüde artırılabilir. Literatürde yapılan çalışmalarda, borlama yapılırken kutu (katı ortamda), sıvı ortamda, gaz ortamda ve plazma borlama yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir [14-16]. Bu tekniklerin her

biri, işlem sıcaklığı, süre ve ortama bağlı olarak farklı sonuçlar doğurmakta ve malzeme yüzeyinde mikroyapısal değişimlere neden olmaktadır.

Borlama işlemi gerçekleştirilirken Bor Karbür (B_4C) benzeri bor türevleri kullanılır [17]. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde kutu borlama sırasında, borlama malzemesi olarak endüstriyel bir toz olan Ekabor-II kullanılabildiği ve içerik olarak Ekabor-II %5 B_4C (Bor Karbür), %90 SiC (Silisyum Karbür) ve %5 KBF_4 (Potasyum Floro Borat) olduğu görülmektedir [18]. EKABOR-II tozu içerisinde bulunan, SiC seyreltici olarak görev yapar ve reaksiyona girmeyerek karışıma homojenlik sağlar. KBF_4 ise aktivatördür ve borun metal yüzeyine difüzyonunu kolaylaştırmak için kullanılır.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, titanyum alaşım malzemelerin borlama işlemi ile kaplama yapıldığı farklı çalışmalar bulunmaktadır. $Ti6Al4V$ alaşımının borlanması, genellikle atmosfer kontrollü fırınlarda veya plazma destekli yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Son yıllarda, borik asit içeren alternatif karışımlar kullanılarak atmosferik koşullarda da başarılı borlama işlemleri yapılabildiği görülmektedir. Ayrıca, vakum veya koruyucu atmosfer gerektirmeyen, düşük maliyetli ve çevre dostu ortamlar da geliştirilmiştir. Bu yöntemlerle, alaşım yüzeyinde zarar görmeden borlama yapılabilmektedir [19]. $Ti6Al4V$ alaşımının borlama işlemine tabi tutulduğu ve işlem parametrelerinin alaşımın özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği çok sayıda çalışma mevcuttur. Türkmen ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, $Ti6Al4V$ plaka malzemeye Borik asit $900-1100\text{ }^{\circ}C$ ve 12-20 saat sürede yüzey kaplama işlemi uygulamışlardır. Çalışma, işlem sıcaklığı ve süresindeki artışın, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde iyileştirici etki yarattığını göstermiştir. Benzer şekilde farklı bir çalışmada, $Ti6Al4V$ alaşımında Ekabor-II ile yapılan borlamanın aşınma direnci üzerindeki etkilerini araştırmış ve bor takviyesinin sertlik değerini artırarak aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini ortaya koymuştur [20]. Bu çalışmalar, borlama işleminin yalnızca yüzey özelliklerini değil, aynı zamanda malzemenin genel performansını da artırabileceğine işaret etmektedir. Cheng Chen ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, $Ti6Al4V$ plaka malzemeye Al- B_4C karışımını $950^{\circ}C$ ve 4 saat sürede yüzeye kaplama olarak eklemiştir [21]. De-lai Ouyang ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, $Ti6Al2Zr1Mo1V$ plaka

malzemeye B₄C-SiC karışımını 920-1120⁰C ve 5-20 saat sürede 1x10⁻⁵ Pa vakum altında yüzeye kaplama olarak eklemiştir [22]. Yonghua Duan ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, Ti6Al4V plaka malzemeye B₄C'ü 950-1000 ⁰C ve 5-30 saat sürede yüzey kaplama işlemi olarak uygulanmıştır [23]. Literatürde yapılan diğer çalışmalarda incelendiğinde yaygın olarak 800-1100 ⁰C ve 4-25 saat süre aralıklarında kaplama işlemi uygulanmıştır [24-27].

Borlama işlemi sonucunda, Ti6Al4V alaşımı yüzeyinde genellikle iki fazlı bir borür tabakası (TiB₂ ve TiB) oluşur. Borlama sıcaklığı ve süresi arttıkça, borür tabakası kalınlığı ve sertliği de artabilmektedir [28]. Borlama işlemi, Ti6Al4V alaşımının yüzey sertliğini ve aşınma direncini önemli ölçüde artırır. Sertlik artışı, özellikle TiB₂ fazının oluşumu ile ilişkilidir. Ayrıca, borlanmış yüzeylerin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı, işlenmemiş alaşıma göre daha dayanımlı değerler yansıtır. Bu da borlanmış Ti6Al4V'nin endüstriyel uygulamalarda tribolojik performansını artırıcı etkiyi ortaya koyar [29]. Atar ve arkadaşları tarafından yapılan Ti6Al4V alaşımının borlanması sonrası aşınma direnci üzerindeki değişimler incelenmiştir [20]. Borlama işlemi, Ti6Al4V alaşımının korozyon direncini de iyileştirmektedir. Ayrıca biyouyumluluk testlerinde borlanmış yüzeylerin biyolojik aktivitesinin arttığı gösterilmiştir. Özellikle hidroksiapatit (HA) ile kombine edilen borlanmış Ti6Al4V kompozitleri, osteogenez ve kemik entegrasyonu açısından üstün performans sergilemektedir. Bu özellikler, borlanmış Ti6Al4V'nin biyomedikal implant uygulamalarında önemli katkılar sağladığını gösterir [30,31].

Ti6Al4V alaşımının yorulma davranışı üzerine yapılan çalışmalarda genellikle eklemeli imalat yardımıyla üretilmiş malzemelerin kullanıldığı ve malzeme üretimi esnasında bor karbür takviyesi yapıldığı gözlemlenmiştir. Wang ve arkadaşları, lazer ışın eklemeli imalatla üretilmiş olan Ti6Al4V malzemenin termomekanik yorulma özelliklerine etkisi incelenmiştir [32]. Li ve arkadaşları, eklemeli imalatla üretilmiş Ti6Al4V alaşımının yorulma davranışı incelenmiştir [33]. Yetim ve arkadaşları plazma nitrürleme işlemi uygulanmış Ti6Al4V alaşımının yorulma davranışı incelenmiştir [34]. Sayama ve Kuji bilyeli dövme uygulanmış Ti6Al4V malzemenin yorulma davranışına etkisi incelenmiştir [35].

Bu çalışmada, endüstriyel olarak ve toz metalürjisi (TM) yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V alaşımı, kutu borlama yöntemiyle borlanmış ve ardından detaylı karakterizasyon süreçlerine tabi tutulmuştur. Endüstriyel numuneler, alaşım elementlerinin ergitilmesi ve külçe formunda katılaştırılması sonrasında soğuk haddeleme ile şekillendirilmiş ve endüstriyel üretim olarak temin edilmiştir. Toz metalürjisi yöntemine sahip numuneler, önceden belirlenen oranlarda karıştırılan titanyum, alüminyum ve vanadyum tozlarının 700 MPa basınç altında tek eksenli preslenmesi ve %90 Azot – %10 Hidrojen gaz atmosferinde farklı sıcaklıklarda (800 °C, 1000 °C, 1200 °C) sinterlenmesiyle üretilmiştir.

Her iki üretim yöntemine ait numuneler 900 °C sıcaklık ve 15 saat süre parametreleri kullanılarak Ekabor-II ticari bor tozu ile kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. İşlem sonrasında borlanmış ve borlanmamış numuneler ile farklı üretim yöntemleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; mikroyapısal karakterizasyonlar için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), faz analizleri için X-ışını kırınımı (XRD), yoğunluk ölçümleri için Arşimet yöntemi, mekanik karakterizasyonlar için sertlik, çekme ve basma testleri uygulanmıştır. Özellikle borlanmış yüzeylerdeki sertlik değişimi mikrosertlik profili ile incelenmiş, toz metalürjisi yöntemiyle üretilen numunelerdeki gözeneklilik oranlarının mekanik performansa etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca, numunelerin tribolojik davranışları kuru ortamda ileri-geri hareketli aşınma testleri ile analiz edilmiş; aşınma miktarı ve sürtünme katsayıları hesaplanmış ve aşınma yüzeyleri SEM ile görüntülenerek üretim yöntemi ve borlama işleminin aşınma davranışına katkısı ortaya konulmuştur.

Endüstriyel yöntemle üretilmiş çubuk formdaki Ti6Al4V alaşım numuneler ve çubuk numunelerin borlanması sonucu elde edilen numunelere, 4 noktadan dönel eğilme yorulma testleri uygulanmış hem yüksek çevrimli hem de düşük çevrimli yorulma ömürleri hesaplanarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yorulma sonrası kırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilen fraktografik analizlerle ilerleme izleri ve kırılma mekanizmaları detaylı biçimde analiz edilmiştir. Yapılan tüm incelemeler ile, üretim yöntemi ve borlama işleminin mekanik, mikroyapısal, tribolojik ve yorulma davranışına olan etkileri bütüncül bir yaklaşımla ortaya konulmuştur.

BÖLÜM 2

METALİK MALZEMELER

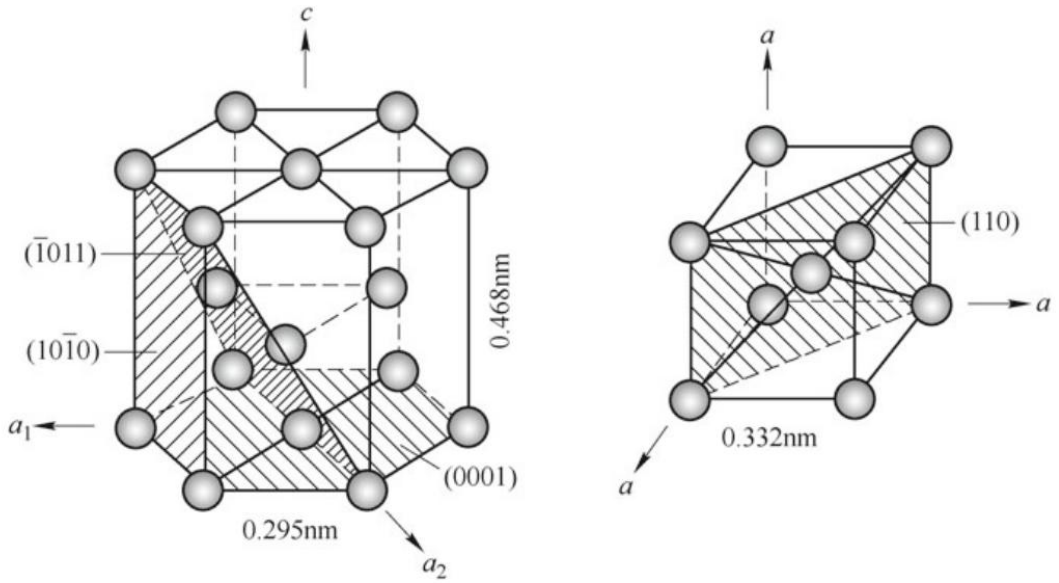
Metalik malzemeler, saf metaller veya içeriğinde en az bir metal içeren alaşımlardır. Mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Metalik malzemeler yüksek mekanik özellikler, yüksek şekillendirilebilirlik, ısı ve elektrik iletkenliği gibi üstünlükleri ile bilinirler. Metalik malzemeler kimyasal bileşimlerine göre incelenirken, saf metaller, demir esaslı alaşımlar ve demir dışı alaşımlar olarak başlıca sınıflara ayrılmaktadır [36]. Saf metaller, tek elementten meydana gelir ve çoğunlukla düşük mekanik özellikler gösterirler. Demir esaslı alaşımlar, ana element olarak demir (Fe) bulunan alaşımlardır [37]. Demir dışı alaşımlar ise ana element olarak demir dışında (Al, Ti gibi) metalleri içeren alaşımlardır.

Bu bölümde önemli mühendislik malzemeleri olarak kullanılan, titanyum ve alaşımları, kobalt krom alaşımları, paslanmaz çelikler ve diğer alaşımlar ayrı başlıklar altında aktarılacaktır.

2.1.TİTANYUM VE ALAŞIMLARI

Titanyum ve alaşımları; yüksek mekanik dayanım, üstün korozyon direnci, sertlik seviyesi ve ısıl stabilite gibi özelliklerinin yanı sıra düşük yoğunlukları sayesinde ileri mühendislik uygulamalarında tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır [1]. Özellikle çelikle kıyaslandığında, daha düşük yoğunluğa sahip olmalarına rağmen özgül mukavemet açısından oldukça üstün performans sergiledikleri görülmektedir [2]. Bu nitelikleri sayesinde titanyum ve alaşımları; başta havacılık, uzay ve savunma sanayi olmak üzere, biyouyumlu yapıları sayesinde tıbbi ve biyomekanik uygulamalarda da geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Titanyum ve alaşımları yüksek mekanik özellikler gösterdiği gibi hafif olması tercih edilme eğilimini artırmakta ve bu durum ilerleyen dönemlerde çalışmaların devam edeceğini ortaya koymaktadır.

Titanyum malzemeler; saf titanyum, titanyum alaşımlar, titanyum seramikler ve titanyum matrisli kompozitler olarak karşımıza çıkmaktadır. Titanyum alaşımları mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ve farklı fazlara sahip metal alaşımlarıdır. Temelde titanyum alaşımları mikroyapılarına göre 3 ayrı α , β ve $\alpha+\beta$ fazlarında bulunur ve sınıflandırılır. Düşük sıcaklıklarda (oda sıcaklığında) α fazda ve altıgen (hekzagonal) kristal yapıda bulunur. Yüksek sıcaklıklarda (882 °C) ise β fazda ve hacim merkezli kübik yapıya dönüşmektedir [38,39].



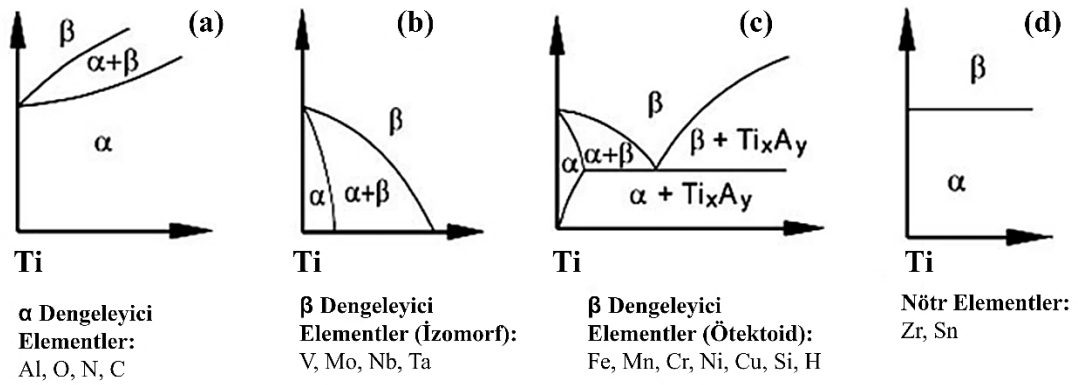
Şekil 2.1. Hekzagonal (α), Hacim merkezli kübik (β) Kristal yapı.

Titanyum alaşımları, α , β ve $\alpha+\beta$ olmak üzere üç farklı faz grubuna, içeriklerine ilave edilen dengeleyici elementlere bağlı olarak ulaşabilir. Alüminyum (Al), Kalay (Sn), Galyum (Ga), Zirkonyum (Zr), Karbon (C), Oksijen (O), Azot (N) elementleri α dengeleyicilerken, Vanadyum (V), Molibden (Mo), Niyobyum (Nb), Tantal (Ta), Krom (Cr) elementleri β dengeleyicileridir. Çizelge 2.1’de ilave elementlere göre titanyum alaşımları paylaşılmıştır [40].

Çizelge 2.1. İlave Elementlere Göre Titanyum Alaşımları.

Malzeme Özelliği / Türü	α	$\alpha+\beta$	β
α dengeleyici	Al, Sn, Ga, Zr, C, O, N		
β dengeleyici	V, Mo, Nb, Ta, Cr		
	Saf Titanyum	Ti-5Al-2.5Fe	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr
	Ti-5Al-2.5Sn	Ti-5Al-2Mo-2Fe	Ti-4.5Al-3V-2M-2Fe
	Ti-5Al-6Sn-2Zr	Ti-5Al-3Mo-4Zr	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Ti-5Al-2.5Fe	Ti-6Al-6Fe-3Al
	Ti-8Al-1Mo-1V	Ti-6Al-7Nb	Ti-10V-2Fe-3Al
		Ti-6Al-4V	Ti-13V-11Cr-3Al
		Ti-6Al-6V-2Sn	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn
		Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	Ti-35V-15Cr
			Ti-8Mo-8V-2Fe-3Sn
			Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn
			Ti-30Mo, Ti-40Mo
			Ti-13Nb-13Zr
			Ti-25Pd-5Cr
			Ti-20Cr-0.2Sn
			Ti-30Ta

İlave elementler farklı fazlarda dengeleyici olmasıyla birlikte, elementlerin eklenmesi titanyum alaşımlarının 882 °C ‘de faz değişim karakteristiğini değiştirici bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır [41,42]. Şekil 2.2’de farklı alaşım elementlerinin titanyum denge diyagramına etkisi paylaşılmıştır [41].



Şekil 2.2. İlave elementlerin titanyum denge diyagramına etkisi.

yapılarla görülür. Bu alaşım atomik boyut, yoğunluk ve erime noktası gibi özellikleri nikel (Ni) ile benzerlik gösterirken, şekillendirilebilme kabiliyeti demir malzemelere benzemektedir [44].

Oda sıcaklığında kobalt altıgen (hekzagonal) kristal yapıda bulunur. Sıcaklık artışı ile 420 °C farklı bir kristal yapıya dönüşüm sağlar ve yüzey merkezli kübik yapıya dönüşür [45]. Alaşım kobalt üretimi için kullanılan başlıca elementler krom (Cr) ve karbon (C)'dur. Krom (Cr) yüzeyde sert bir Cr_2O_3 oksit tabakası oluşturur ve korozyon dayanımına destek olur. Karbon (C) ise şekillendirilebilirliğe katkı sağlar. Molibden (Mo) mekanik özelliklere katkı sağlar. Paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldığında kobalt-krom alaşımları daha iyi sertlik, yorulma direnci ve elastite modülü sağlamasına karşın, düşük süneklik, tokluk ve işlenebilirlik sağlar. Ayrıca paslanmaz çeliklerden daha maliyetli olması olumsuz yanlarından [46].

2.3.PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler, demir esaslı ve içeriğinde kayda değer miktar karbon (%0.2-2.1 arası) ve nikel içeren alaşımlardır. Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması içerdikleri karbon oranı ile ilgilidir [44]. Demir esaslı alaşımlarda en yaygın kullanılan alaşım elementlerinden olan ve çeliğin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen karbon, oranının artmasıyla birlikte çeliğin mukavemeti ve sertliği artış eğilimine girerken, süneklik özelliği azalır ve gevrekleşme ortaya çıkar [47].

İstenilen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için karbon ile beraber çelik içerisine farklı alaşım elementleri ilave edilir. İlave edilen alaşım elementleri içerisinde; molibden (Mo), silisyum (Si), nikel (Ni), krom (Cr), mangan (Mn), vanadyum (V), kobalt (Co), niyobyum (Nb) ve tungsten (W) bulunmaktadır. İlave edilen elementler, çeliğin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde farklı özellikler göstermektedir [48]. Ayrıca krom (yaklaşık %11) ve nikel gibi elementler, çeliğe paslanmazlık özelliği kazandırır. Krom elementi, yüzeyde oluşan bir krom oksit (Cr_2O_3) tabakasının meydana gelmesini sağlar ve bu tabaka, çeliğin atmosferik oksidasyon ve çeşitli kimyasal ortamlara karşı direnç göstermesine katkı sunar. Krom oksit tabakası hasar gördüğünde çevresel oksijen ile yeniden oluşarak kendini onarabilir ve bu nedenle

paslanmaz çeliklere yüksek bir korozyon direnci sağlar [49]. Paslanmaz çelikler, mikroyapısal özelliklerine ve alaşım bileşimlerine göre beş ana gruba ayrılmaktadır. Çizelge 2.2’de paslanmaz çeliklerin grupları ve yaygın paslanmaz çelik malzemelerin detayları paylaşılmıştır [44].

Çizelge 2.2. Paslanmaz Çelik Grupları.

Grup	Mikroyapı	Yaygın Malzemeler
Östenitik Paslanmaz Çelikler	Östenit	301, 304, 304L, 309S, 310S, 316, 316L, 317L, 321, 347
Feritik Paslanmaz Çelikler	Ferit	409, 430, 434, 441, 444
Martenzitik Paslanmaz Çelikler	Martensit	410, 420, 421, 431, 440A
Dubleks Paslanmaz Çelikler	Ferit, Östenit	2205, 2304, 2507
Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler	Östenit + Karbür / İntermetalikler	17-4PH, 15-5PH

2.4.DİĞER ALAŞIMLAR

Metalik malzemeler içerisinde değerlendirilen Titanyum ve alaşımları, kobalt-krom alaşımları ve paslanmaz çelikler detaylı olarak incelenmiştir. Bu metalik malzemelerin dışında kalan bazı alaşım grupları da özellikle farklı fiziksel ve mekanik özelliklerin ihtiyaç duyulduğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Kullanılan bu alaşımlar nikel esaslı süper alaşımlar, alüminyum alaşımlar, magnezyum alaşımlar ve bakır esaslı alaşımlar olarak görülmektedir.

- Nikel esaslı süper alaşımlar; 600 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda yüksek mekanik dayanım, oksidasyona karşı direnç sunmaları sayesinde havacılık ve enerji sektörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [50,51].
- Alüminyum alaşımları; mekanik özellikleri kullanılan alaşım elementine ve ısıtılma işlemine bağlı olarak büyük ölçüde değişebilen, düşük yoğunluk, işlenebilirlik ve yüksek özgül dayanım sunan önemli bir mühendislik malzemesidir [52].
- Magnezyum alaşımları; hafif metalle malzemelerden olan ve birçok mühendislik uygulamasında kullanılabilen malzemedir [53].

- Bakır esaslı alaşımlar; yüksek elektriksel ve termal iletkenlik özellikleri nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanım alanı bulan önemli bir metalik malzemedir [54].
- Nadir ve özel alaşımlar; zirkonyum, tantal, niyobyum gibi özel elementler içeren, yüksek erime noktası, üstün biyouyumluluk veya özel fiziksel özellikler sunan önemli mühendislik malzemeleridir [55].

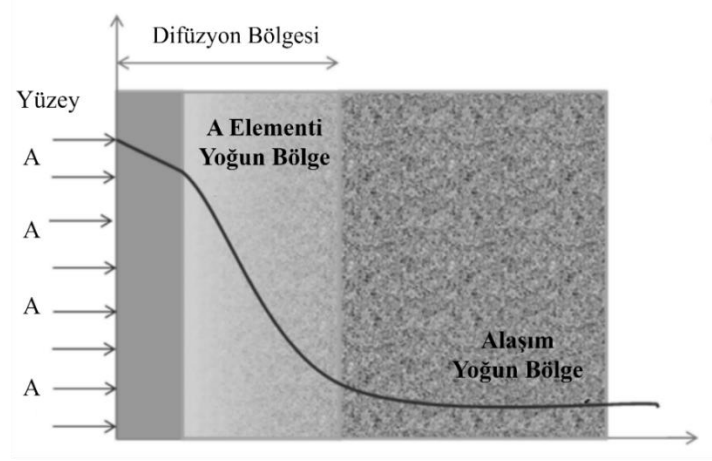


BÖLÜM 3

TERMOKİMYASAL (DİFÜZYON) KAPLAMA

Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemeler, hizmet koşullarında ihtiyaç duyulan fonksiyonel ve yapısal gereksinimleri karşılayabilmeleri için üretim süreçleri sırasında veya sonrasında çeşitli uygulamalara tabi tutulmaktadır. Bu uygulamalar kapsamında, malzeme özelliklerini iyileştirmek ve performansı artırmak üzere takviye edici elementler malzemelere ilave edilebilmektedir [56]. Özellikle temel üretim süreçleri tamamlanan metalik malzemelere uygulanan kaplama işlemleri, aşınma direnci artırmak, korozyon direncini artırmak, yüzey sertliği iyileştirmek, elektriksel veya termal özellikleri değiştirmek gibi ihtiyaçlar çözüm sunmaktadır [57].

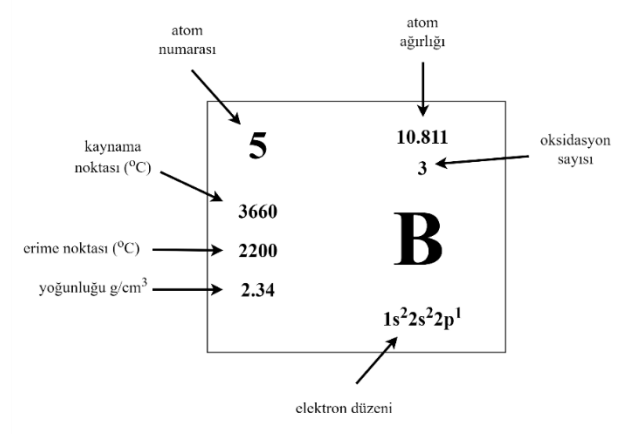
Kaplama işlemleri içerisinde termokimyasal (difüzyon) kaplama yöntemi kaplama malzemesinin termokimyasal bir reaksiyon yoluyla ana malzeme yüzeyine işlenmesi ile gerçekleştirilir. Gerçekleştiren bu reaksiyon ile yüzeyde yeni fazlar oluşturulur. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, nitrürleme, karbürleme (sementasyon), alüminyumlama, silisyumlama ve borlama yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir [58]. Yapılan termokimyasal yüzey işlemleri ile diğer kaplama yöntemlerinde elde edilen mekanik özellikler iyileştirmelerinin birçoğu gerçekleştirilir. İlave olarak mikroyapı ve kaplama miktarının kontrolünün sağlanabilmesi, karmaşık yüzeylere uygulanabilme ve farklı malzemelere uygulanabilir olması sıklıkla tercih edilmesini sağlamıştır. Şekil 3.1’de termokimyasal kaplama işlemi sonrası, kullanılan kimyasal element ve temel alaşımın kaplama işlemi mekanizması paylaşılmıştır [59].



Şekil 3.1. Termokimyasal yüzey kaplama işlemi mekanizması.

3.1.BORLAMA İŞLEMİ

Bor elementi periyodik tablonun 2. periyot IIIA grubunda bulunan 5. elementtir. Bor elementi, genel olarak ametal özellikler göstermesine rağmen, bazı metalik davranışlar sergilemesi nedeniyle metaloid (yarı metal) olarak sınıflandırılmaktadır. Bulunduğu grubun kimyasal özelliklerine beklenildiği kadar benzememekte ve silisyum ve karbon ile benzerlik göstermektedir. Şekil 3.2’de bor elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri paylaşılmıştır [60].



Şekil 3.2. Bor elementi özellikleri.

Bor Karbür (B_4C) ametal sert malzemeler grubunda önemli bir yere sahip bir malzemedir. Toz veya toz kullanılarak şekillendirilmiş parça olarak üretilmektedir. Toz formda üretim karbotermik indirgeme yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Bor karbürün en yaygın üretim yöntemi bor trioksitin karbotermik indirgenmesi ve

magnezyo karbotermik indirgemedir. Ayrıca daha az kullanılan toz bor karbür üretimi için; elementel bor ve karbon tepkimesi, bor triklorürün karbon eşliğinde hidrojenle indirgenmesi ve kimyasal buhar biriktirme yöntemleri de bulunmaktadır [60]. Bor karbürün sentez yöntemleri eşitlik 3.1-3.5'te paylaşılmıştır.

Bor Trioksitin Karbotermik İndirgenmesi;



Magnezyo Karbotermik İndirgenmesi;



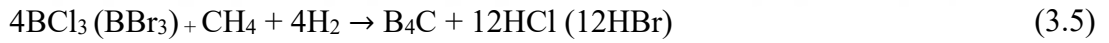
Elementel Bor ve Karbon Tepkimesi;



Bor Triklorürün Karbon Eşliğinde Hidrojenle İndirgenmesi;



Kimyasal Buhar Biriktirme

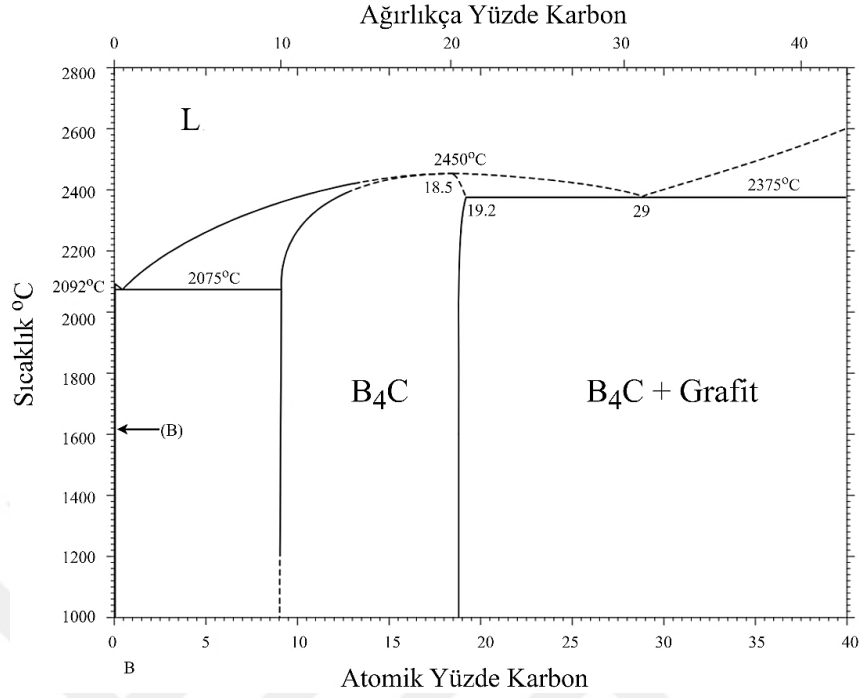


Bor karbür katı formda parlak ve siyah bir maddedir. Korozyona karşı dirençli ve yüksek sertlik değerlerine sahiptir. Çizelge 3.1'de bor karbürün mekanik özellikleri paylaşılmıştır [61].

Çizelge 3.1. Bor Karbürün Mekanik Özellikleri.

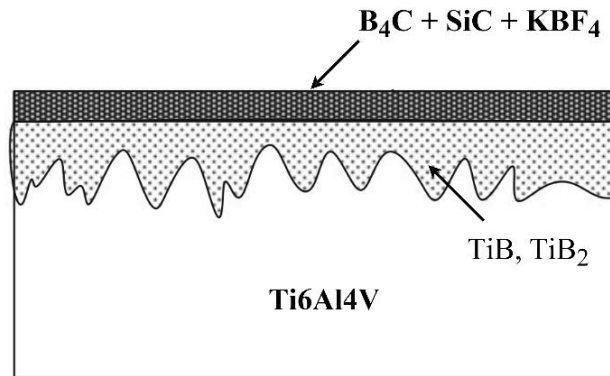
Özellik	Değer
Erime Noktası	2450 °C
Kaynama Noktası	> 3500 °C
Yoğunluk	2,52 g/cm ³
Sertlik	2900-3850 (Knoop)
Çekme Dayanımı	2,9-3,7 MPa.m ^{-1/2}
Poisson Oranı	0,18
Elastite Modülü	471 GPa

Şekil 3.3'te bor karbür faz diyagramı paylaşılmıştır [61].



Şekil 3.3. Bor karbür faz diyagramı.

Borlama işlemi, metalin yüzeyine difüzyon yolu ile gerçekleştirilen termokimyasal kaplama işlemidir. Borlama işleminde bor atomları yüksek sıcaklıkta metal yüzeyine difüze ederek, yüzeyde sert bir borlama tabakası oluşturulur. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, başlıca katı ortamda, sıvı ortamda, gaz ortamda ve plazma borlama yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir [14,15]. Borlama işlemi ile ana metal üzerine gerçekleşen difüzyon işlemi mekanizması şekil 3.4'te paylaşılmıştır [58].



Şekil 3.4. Borlama işlemi.

3.1.1. Kutu (Katı Ortamda) Borlama

Katı ortamda borlama işlemi veya diğer bir isimlendirme ile kutu borlama işlemi, bor tozlarının yerleştirildiği bir pota içerisinde farklı sıcaklık ve süreler de uygulanan bir termokimyasal ısıtma işlemidir. Yapılan işlem ile numune, bor toz karışımı içinde tamamen daldırılarak ısıtma işlemine maruz bırakılır. Isıtma işlemi genellikle 800–1100 °C sıcaklık aralığında ve 4 ile 25 saat arası sürelerde işlem gerçekleştirilmektedir [62]. Kutu borlama (katı ortamda borlama), diğer borlama yöntemlerine göre daha ekonomik ve endüstriyel olarak uygulanabilir bir yöntemdir. Büyük ve karmaşık şekilli parçaların yüzeylerinin işlenmesinde kolaylık sağlar [63].

İşlem gerçekleştirilirken yeterli difüzyonun gerçekleşebilmesi için bor toz karışımının numunenin tüm yüzeylerle tam temas edecek şekilde ve derinlikte yerleştirilmesi önemlidir. Ayrıca numunenin üzeri deoksidan içeren bir karışımla kapatılarak oksijenle teması kesilmekte ve böylece yüzeyde istenen borlama kalitesi sağlanmaktadır. Kutu borlama işlemi esnasında, borlama tozu karışımı içerisinde bor kaynakları, seyrelticiler ve aktivatörler bulunur. Bor kaynakları ilgili difüzyon işlemin gerçekleştirecek borlama tozunu ifade eder. Seyrelticiler ise bor kaynağını dengeleyerek, topaklanmayı önler ve kimyasal homojenlik sağlar. Aktivatörler ise difüzyonu artırarak, kimyasal aktiviteyi yükseltir. Çizelge 3.2’de borlama karışımı yapısı paylaşılmıştır [64].

Çizelge 3.2. Borlama Toz Karışım Yapısı.

Toz Bileşenleri	
Bor Kaynağı	B ₄ C, Ferrobor, Amorf Bor
Kullanılan Seyrelticiler	SiC, Al ₂ O ₃
Kullanılan Aktivatörler	NaBF ₄ , KBF ₄ , NH ₄ BF ₄ , NH ₄ Cl, Na ₂ CO ₃ , BaF ₂ , Na ₂ B ₄ O ₇

Bor kaynağı olarak kullanılan malzemeler incelendiğinde, ferrobor ve amorf bor, bor karbürden daha yüksek bor potansiyeline sahip olup daha kalın tabakalar oluşturmaktadır. Ancak bu bor kaynakları, maliyet açısından bor karbüre kıyasla daha pahalıdır [65]. Seyrelticiler, reaksiyona girmeyip karışımın homojenliğini sağlarken; aktivatörler, borun metal yüzeyine difüzyonunu kolaylaştırmak için kullanılır [66].

Çizelge 3.3'te borlama malzemesi olarak kullanılabilen ekabor tozların boyutu ve yoğunlukları paylaşılmıştır [67].

Çizelge 3.3. Borlama Malzemesi Türleri.

Borlama Malzemesi	Toz Boyutu / μm	Yoğunluk gr/cm^3
Ekabor-I	≤ 150	1,80
Ekabor-II	≤ 850	1,50
Ekabor-III	≤ 1400	0,95
Ekabor HM	≤ 150	0,95-1,50
Ekabor Paste	220-350	0,95

Ekabor-II tozu alaşım türlerinin çoğu için standart borlama sağladığı, ısıtıl işlem sonrası yüzeyden kolaylıkla uzaklaştırıldığı ve iyi difüzyon sağlayarak çok iyi yüzey kalitesi elde edilmesini sağladığı için sıklıkla tercih edilmektedir. Ekabor-II tozu %5 B₄C (Bor Karbür), %90 SiC (Silisyum Karbür) ve %5 KBF₄ (Potasyum Floro Borat) oluşmaktadır [68]. Yapılan çalışmada borlama malzemesi olarak Ekabor-II endüstriyel tozu kullanılmıştır.

BÖLÜM 4

MATERYAL METOT

Bu çalışmada, endüstriyel olarak temin edilen ve toz metalürjisi (TM) yöntemiyle laboratuvar ortamında üretilen Ti6Al4V alaşımı numunelerin borlama işlemi sonrası mekanik ve yapısal özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Endüstriyel numuneler, konvansiyonel vakum ergitme yöntemiyle hazırlanmıştır [8]. Toz metalürjisi yöntemiyle hazırlanan numuneler ise önceden belirlenmiş oranlarda karıştırılan metal tozlarının, ASTM E8/E8M standardına uygun kalıpta tek eksenli presleme yöntemiyle 700 MPa basınç altında şekillendirilmesi ve ardından %90 Azot – %10 Hidrojen gaz atmosferinde sırasıyla 800 °C, 1000 °C ve 1200 °C sıcaklıklarda 2 saat süreyle sinterlenmesiyle elde edilmiştir [69].

Üretimleri tamamlanan numuneler, borlama işlemine tabi tutulmak üzere uygun test boyutlarında hazırlanmıştır. Borlama parametrelerinin optimizasyonu amacıyla literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak çeşitli süre ve sıcaklıklar denenmiş, oluşan kaplama yüzeyleri kontrol edilerek en uygun koşullar olarak 900 °C sıcaklık ve 15 saat süre belirlenmiştir. Borlama işlemi, atmosfer kontrollü fırında kutu borlama yöntemi kullanılarak, Ekabor-II ticari bor tozu yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Borlanmış ve borlanmamış numunelere yönelik detaylı karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Metalografik incelemeler için numuneler bakalite alınarak yüzeyleri zımparalanmış, parlatılmış ve uygun dağlama solüsyonlarıyla mikroyapıları ortaya çıkarılmıştır. Mikroyapı analizleri, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numunelerin yoğunluk değerleri Arşimet prensibine göre belirlenmiş, bu yolla bağlı yoğunluk ve gözeneklilik oranları hesaplanmıştır.

Tüm numunelerin sertlik değerleri ölçülerek farklı üretim parametrelerinin ve borlama işleminin sertlik özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Özellikle borlanmış numunelerde, ana malzemeden yüzeydeki bor kaplama bölgesine doğru mikrosertlik profili çıkarılarak yüzey sertleşme mekanizması analiz edilmiştir.

Mekanik dayanım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla numunelere çekme ve basma testleri uygulanmıştır. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen numunelerde yüksek gözeneklilik oranının yüzeye yakın bölgelerde çentik etkisi oluşturarak çekme dayanımını olumsuz etkilediği gözlemlenmiş, bu nedenle numunelere basma testi uygulanmıştır. Elde edilen mekanik test verilerinden mühendislik gerilim-gerinim eğrileri ve logaritmik gerilim-gerinim eğrileri hesaplanmıştır.

Yapısal karakterizasyon kapsamında, numunelere X-ışını kırınımı (XRD) analizi uygulanarak kristal yapılar ve faz dağılımı incelenmiştir. XRD kırınım desenleri, üretim süreci sonrası ortaya çıkan iç yapılar ile borlama sonrası oluşan yeni fazları (örneğin TiB, TiB₂ gibi) ortaya koymuş ve üretim yönteminin malzeme iç yapısına etkisi doğrulanmıştır.

Ayrıca, numunelerin tribolojik davranışlarını değerlendirmek amacıyla aşınma testleri gerçekleştirilmiş; bu testler sonucunda hem üretim yönteminin hem de borlama uygulamasının aşınma direnci üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Aşınma yüzeyleri SEM ile incelenmiş ve aşınma karakteristiği gözlemlenmiştir.

İlerleyen aşamada, çubuk formda üretilmiş endüstriyel numunelere ve bu numunelerin borlanmış hallerine, 4 noktadan dönel eğilme yorulma testleri uygulanmıştır. Uygulama sonrası hem yüksek çevrimli hem de düşük çevrimli yorulma ömrü hesaplanmış ve borlama işleminin yorulma davranışına etkisi ortaya konulmuştur. Kırılan numuneler üzerinde gerçekleştirilen fraktografi analizleri kapsamında, kırılma mekanizmaları, çatlak ilerleme izleri ve diğer yorulma kaynaklı iç yapı değişimleri detaylı şekilde incelenmiştir. Şekil 4.1’de yapılan tez çalışmasının detayları özet olarak verilmiştir.

4.1.ENDÜSTRİYEL ÇUBUK MALZEME

Endüstriyel çubuk formda Ti6Al4V alaşımı konvansiyonel vakum ergitme yöntemi ile üretilmiştir. Üretim yüksek saflıkta titanyum, alüminyum ve vanadyum gibi alaşım elementlerinin hazırlanmasıyla başlar. Elementler tartılarak Ti-6Al-4V oranı sağlanacak şekilde karıştırılır. Karışım ergitilir, bu işlem, atmosferle teması önlemek amacıyla vakum altında veya koruyucu gaz atmosferinde (argon) yapılır [70]. Alaşım, silindirik kalıplara dökülerek külçe formunda katılaştırılır. Genellikle 2–3 kez tekrar ergitme uygulanarak alaşım homojenliği sağlanır. Katılaştıran külçe, sıcak dövme veya sıcak haddeme ile şekillendirilir. Daha hassas çaplara ulaşmak için malzeme soğuk ortamda haddelenir veya çekilir. Bu işlemle 7 mm çapa kadar inceltir. Soğuk çekme sırasında boyutsal hassasiyet, yüzey kalitesi ve mekanik özelliklerde artış sağlanır. İşlenebilirliği artırmak ve iç gerilmeleri azaltmak için β -faz altı sıcaklıklarda (yaklaşık 700–800 °C) tavlama işlemi yapılır. Bu işlem, malzemenin mikroyapısında $\alpha+\beta$ faz dengesini optimize eder [7,8]. Şekil 4.2’de endüstriyel olarak çubuk formda 7 mm çapta üretilmiş olan Ti6Al4V alaşımı ve Çizelge 4.1’de Endüstriyel Ti6Al4V alaşımının kimyasal kompozisyonu paylaşılmıştır.



Şekil 4.2. Endüstriyel olarak çubuk formda üretilmiş Ti6Al4V alaşımı.

Çizelge 4.1. Endüstriyel Ti6Al4V Alaşımı Kimyasal Kompozisyonu.

	Al	V	Fe	Ti
%	6	4	0.25	Geri Kalan

4.2.TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ

Ti6Al4V alaşımı toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Toz metalürjisi ile üretilen Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi 3 eksenli turbula cihazında 2 saat süreyle bilyasız olarak karıştırılmıştır [69]. Karıştırılmış tozlar daha sonra 100 ton kapasiteli bir hidrolik preste 10 saniye tek eksenli basınç altında, 700 MPa basınç

uygulanarak ASTM E8/E8M standardına göre hazırlanan kalıpta tek yönlü olarak preslenmiştir [71]. 800 °C, 1000 °C ve 1200 °C sıcaklıklarda %90 Azot- %10 Hidrojen karışım gaz atmosferinde 2 saat boyunca sinterleme yapılarak üretim tamamlanmıştır. Çizelge 4.2’de üretilen Ti6Al4V alaşımının kimyasal kompozisyonu ve Çizelge 4.3’te tozların özellikleri paylaşılmıştır.

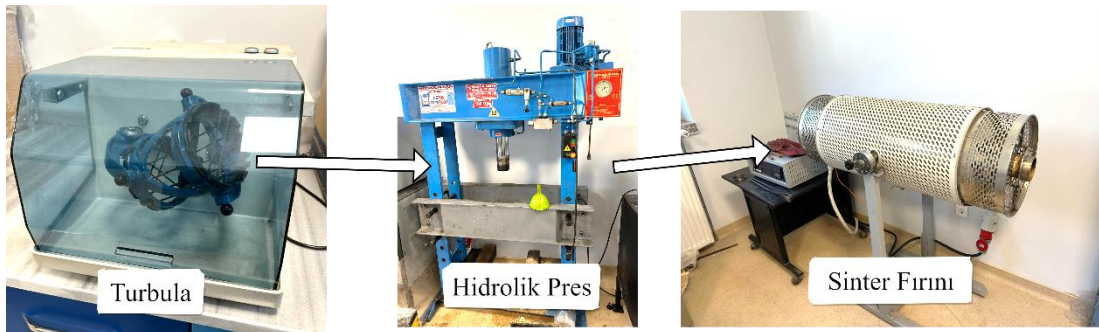
Çizelge 4.2. TM Ti6Al4V Alaşımı Kimyasal Kompozisyonu.

	Al	V	Fe	Ti
%	6	4	0.25	Geri Kalan

Çizelge 4.3. Tozların Özellikleri.

Toz Elementleri	Boyut / μm	Saflık / %
Alüminyum (Al)	<75	93
Vanadyum (V)	44	99,5
Demir (Fe)	<150	99.9
Titanyum (Ti)	149	99,7

Şekil 4.3’te toz metalürjisi üretim prosesi paylaşılmıştır. Turbula cihazı kullanılarak homojen karışım elde edilmesi sağlanmıştır. Hazırlanan karışım hidrolik pres kullanılarak uygun kalıp şekillendirilmesi, mekanik bütünlüğün sağlanması, yoğunluğun artırılması ve bu sayede tane içi boşlukların azaltılması sağlanmıştır. Presleme işlemi sonrası sinterleme yapılarak preslenmiş alaşımın yeterli dayanım ve yoğunluğa ulaşması sağlanmıştır.



Şekil 4.3. Toz metalürjisi üretim aşamaları.

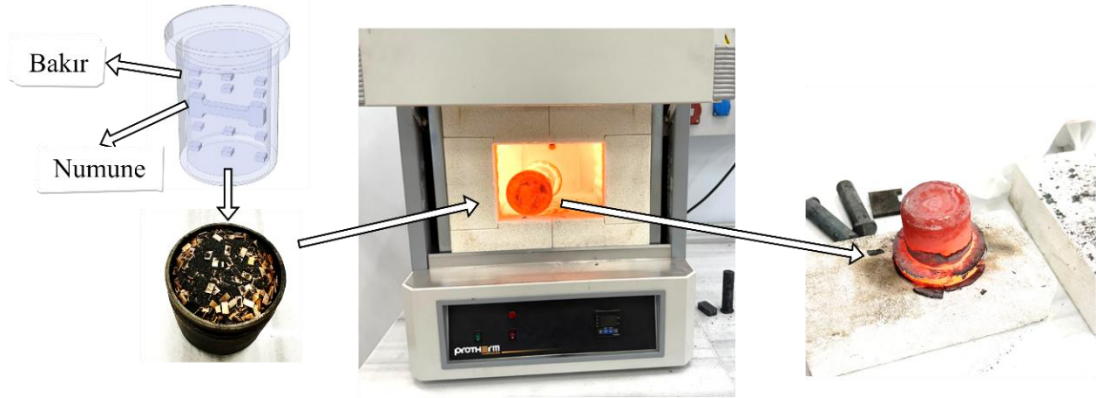
Şekil 4.4'te toz metalürjisi yöntemiyle ASTM E8/E8M standardına göre üretilmiş olan çekme numuneleri paylaşılmıştır.



Şekil 4.4. ASTM E8/E8M standardına göre üretilen çekme testi numunesi.

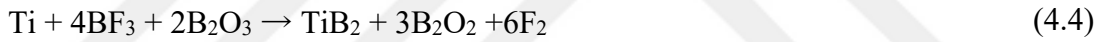
4.3. KUTU BORLAMA İŞLEMİ

Yapılacak deneyler öncesi Ti6Al4V alaşım malzemesinin borlama işlemine karşı optimum yüzey kaplama parametrelerini belirlenmesi için literatürde yapılan örnekler incelenerek farklı sıcaklık ve süreler belirlenmiştir [22,72]. Literatürde yapılan termokimyasal borlama işlemleri incelendiğinde borlama işleminin sıklıkla 800 ile 1100 °C arasında sıcaklıkların ve 4 ile 25 saat arasında sürelerin kullanıldığı görülmüştür. Titanyum alaşım malzemelerin yaklaşık 900 °C sıcaklıkta β fazına geçmesinden dolayı gerçekleştirilecek testlerde α ve β fazlarının etkilerinin devam etmesi için 900 °C sıcaklık ve 15 saat süre belirlenmiştir [62]. Borlama işlemleri gerçekleştirilirken Bor Karbür (B_4C) benzeri bor türevleri kullanılır [73]. Yapılan çalışmada borlama malzemesi olarak endüstriyel bir toz olan Ekabor-II kullanılmıştır. Ekabor-II içerik olarak %5 B_4C (Bor Karbür), %90 SiC (Silisyum Karbür) ve %5 KBF_4 (Potasyum Floro Borat) oluşmaktadır [20]. Termokimyasal işlem esnasında oksijen tutması ve bu sayede ana malzemede korozyonu engellemesi için deoksidan olarak bulunan SiC (Silisyum Karbür) ek olarak kutunun altına ve üstüne bakır talaşı eklenmiştir. Şekil 4.5'te 900 °C sıcaklık ve 15 saat sürede gerçekleştirilen termo kimyasal yüzey işleminin mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Kutu borlama işlemi uygulama yapısı.

Gerçekleştirilen termokimyasal borlama işlemi esnasında oluşan kimyasal reaksiyonlar eşitlik 4.1-4.5 arasında paylaşılmıştır [74].



4.4.MEKANİK TEST İŞLEMLERİ

Yapılan çalışmada üretilen numunelerin özelliklerinin incelenebilmesi için çeşitli test işlemleri uygulanmıştır. Bu bölümde metalografik incelemeler, yoğunluk ölçümleri, sertlik ölçümleri, çekme testi, basma testi, XRD kırınım analizi, aşınma testi ve yorulma testinin uygulama metodolojileri aktarılacaktır.

4.4.1. Metalografik İncelemeler

Numunelerin metalografik incelemeleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri, Nikon ECLIPSEL 150 cihazı ile ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Carl Zeiss Ultra Pluss cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Metalografik incelemeler yapılabilmesi için, numuneler ilgili ölçülerde hazırlanmış ve bakalit içerisine alınarak parlatma,

dağlama ve görüntülemeye hazır hale getirilmişlerdir. Uygun parlatmanın sağlanabilmesi için sırasıyla 120-400-800-1000-1200-2500 mesh numaralı SiC zımpara kağıtları ile polisaj cihazı kullanılıp yüzeylerdeki tüm pürüzler giderilmiştir. Yüzeyler dağlamaya hazır olması için alümina aşındırıcısıyla parlatılmıştır.

Metalografik incelemeler için parlatılan ve dağlamaya hazır hale getirilen numuneler, Keller reaktifi ile ortalama 18 sn sürede dağlanmıştır.

Keller reaktifi;

- 1 cm³ HF (Hidroflüorik asit),
- 1.5 cm³ HCl (Hidroklorik asit),
- 2.5 cm³ HNO₃ (Nitrik asit),
- 95 cm³ H₂O (Su) içermektedir [75].

Şekil 4.6'da paylaşılan Nikon ECLIPSEL 150 cihazı ile optik mikroskop incelemeleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6. Nikon ECLIPSEL 150 optik mikroskopu.

Şekil 4.7'de paylaşılan Carl Zeiss Ultra Pluss cihazı ile SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Carl Zeiss Ultra Pluss SEM cihazı.

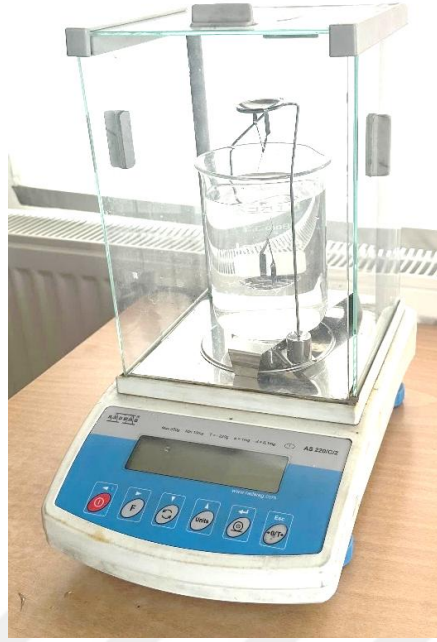
4.4.2. Yoğunluk Ölçümleri

Tüm numuneler için Arşimet prensibine göre yoğunluk ölçümleri sağlanmıştır. Ölçümler RADWAG AS-60-220 C/2 marka terazide RADWAG AS yoğunluk ölçüm kiti ile yapılmıştır. Katı ve sıvıların yoğunluklarını ölçmek için sıklıkla kullanılan Arşimet prensibi ile ölçüm yapılırken sıvıya tamamen batırılmış olan cisim, yer değiştirdiği sıvının ağırlığına eşit bir kaldırma kuvveti uygulanması ve kaldırma kuvvetinin hesaplanması ile cisimlerin yoğunlukları ölçülür [76]. Ölçülen deneysel yoğunluk değerleri kullanılarak, gözeneklilik miktarları eşitlik 4.6'ya göre hesaplanmıştır [77].

$$\text{Gözeneklilik (\%)} = \frac{\rho_{\text{teorik}} - \rho_{\text{deneysel}}}{\rho_{\text{teorik}}} \times 100 \quad (4.6)$$

- ρ_{teorik} : Teorik yoğunluk değerini (gr/cm^3)
- ρ_{deneysel} : Deneysel yoğunluk değerini (gr/cm^3) ifade eder.

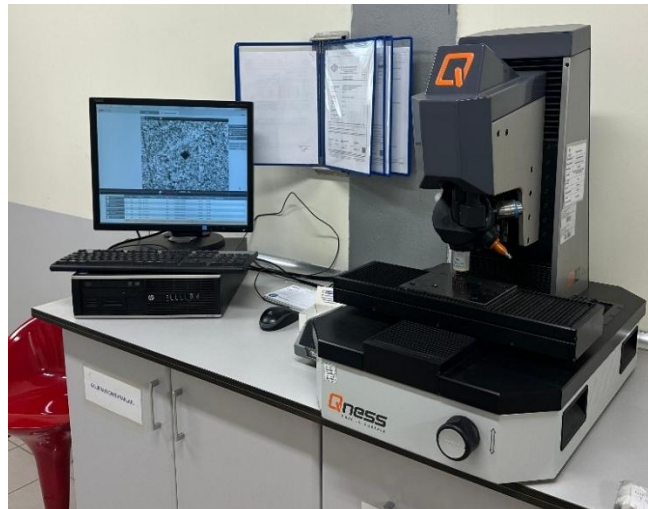
Şekil 4.8'de yoğunluk ölçüm kitinin görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 4.8. RADWAG AS-60-220 C/2 yoğunluk ölçüm kiti.

4.4.3. Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümü Vickers sertlik (H_V) metoduna göre QNESS Q10 A+ mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak 0.2 kilogram kuvvet (kgf-yaklaşık 1.96 N) yük kullanılarak 10 saniye sürede gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sertlik değerini belirlemek için 5 ölçüm alınarak ortalama değer belirlenmiştir. Şekil 4.9’da sertlik cihazının görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 4.9. QNESS Q10 A+ mikrosertlik ölçüm cihazı.

4.4.4. Çekme Testi

Numunelere, SHIMADZU çekme test cihazında (Shimadzu, Tokyo, Japonya / 50 kN kapasiteli) kullanılarak 1 mm/dak çekme hızında çekme testleri uygulanmıştır. Her numune için 5 test yapılmış, testlerin ortalamaları alınarak testlerden sonra gerilim-gerinim diyagramları elde edilmiştir. Şekil 4.10'da çekme testlerinin yapılmış olduğu test cihazının görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 4.10. SHIMADZU çekme test cihazı.

Eşitlik 4.7 ve 4.8'te çekme testi için mühendislik gerilme gerinim değerleri hesaplanmıştır.

$$\sigma_{müh} = \frac{P}{A_0} \frac{l}{l_0} \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_{müh} = \frac{dl}{l} \quad (4.8)$$

Hesaplanan mühendislik gerilme – gerinim değerleri kullanılarak eşitlik 4.9 ve 4.10'a göre doğru gerilme – gerinim değerleri ve eşitlik 4.11 ve 4.12'ye göre logaritmik gerilme-gerinim değerleri hesaplanmıştır [78].

$$\sigma_{doğru} = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} \frac{A_0}{A} = \sigma_{müh} \frac{l}{l_0} = \sigma_{müh} (1 + \frac{\varepsilon_{müh}}{100}) \quad (4.9)$$

$$\sigma_{doğru} = \sigma_{müh} (1 + \frac{\varepsilon_{müh}}{100})$$

$$\varepsilon_{doğru} = \ln(1 + \frac{\varepsilon_{müh}}{100}) \quad (4.10)$$

$$\sigma_{log} = \log(\sigma_{doğru}) \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_{log} = \log(\varepsilon_{doğru}) \quad (4.12)$$

4.4.5. Basma Testi

Numunelere, 600 kN kapasiteye sahip Zwick Z600 universal test cihazında basma testi uygulanmıştır. Basma değerini belirlemek için 5 ölçüm alınarak ortalama değer belirlenmiştir. Testlerin ortalamaları alınarak testlerden sonra gerilim-gerinim diyagramları elde edilmiştir. Şekil 4.11’de basma testlerinin yapılmış olduğu test cihazının görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 4.11. Zwick Z600 universal basma test cihazı.

Eşitlik 4.13 ve 4.14'te basma testi için mühendislik gerilme gerinim değerleri hesaplanmıştır.

$$\sigma_{müh} = \frac{F}{A_0} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon_{müh} = \frac{dl}{l_0} = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (4.14)$$

4.4.6. X-ışını Kırınımı (XRD) Analizi

Kristal fazların belirlenmesi amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi uygulanmıştır. Yapılan analizlerde, Cu-K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) ışını kullanan Rigaku Ultima IV model XRD cihazı kullanılmıştır [79]. Numuneler, 2 θ aralığı genellikle 10°–90° arasında taranacak şekilde analiz edilmiştir. Cihaz, yüksek çözünürlüklü detektörleri ve çok yönlü tarama modları sayesinde amorf, yarı kristal ve tam kristal yapıların ayırt edilmesini mümkün kılmıştır. Elde edilen kırınım desenleri, mevcut literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılarak numunelerdeki mevcut fazlar tanımlanmış, borlama gibi yüzey modifikasyon süreçlerinin neden olduğu faz dönüşümleri değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, malzeme içindeki yeni bileşikler ve çökeltilerin (ör. TiB₂, TiC, B₄C) oluşumunu doğrulamayı amaçlamış üretim uygulamalarının mikroyapısal etkilerini ortaya koymuştur. Şekil 4.12'de kullanılan XRD cihazı paylaşılmıştır.



Şekil 4.12. Rigaku Ultima IV XRD cihazı.

4.4.7. Aşınma Testi

Numunelerin tribolojik performansını değerlendirmek amacıyla ileri-geri hareketli kuru aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Testler, üretim uygulamalarının aşınma direncine etkisini belirlemek için 4D ECN marka kuru tip ileri-geri aşınma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm numuneler 800 mesh zımparaya kadar yüzeyi hazırlanmış, test öncesi ve sonrası hassas terazi (0,1 mg hassasiyetli) ile ağırlık değerleri ve değişimleri belirlenmiştir. Ayrıca cihaz üzerinde elde edilen değerler ile sürtünme katsayıları hesaplanmıştır.

Testler 25°C (± 2) sıcaklıkta ve karşı aşındırıcı olarak AISI 52100 malzeme çelik bilye kullanılarak; 10N, 20N ve 30N yük, 50m, 150m ve 250m mesafede gerçekleştirilmiştir. Cihazın hareket esnasındaki hareket değeri (stroke) 20 mm ve devir hızı olarak 100 rpm olarak belirlenmiştir. Testler boyunca, ortam koşulları sabit tutulmuş, herhangi bir yağlayıcı kullanılmadan kuru ortam şartları sağlanmıştır. Şekil 4.13'te ileri-geri aşınma test cihazı paylaşılmıştır.



Şekil 4.13. 4D ECN marka ileri-geri aşınma test cihazı.

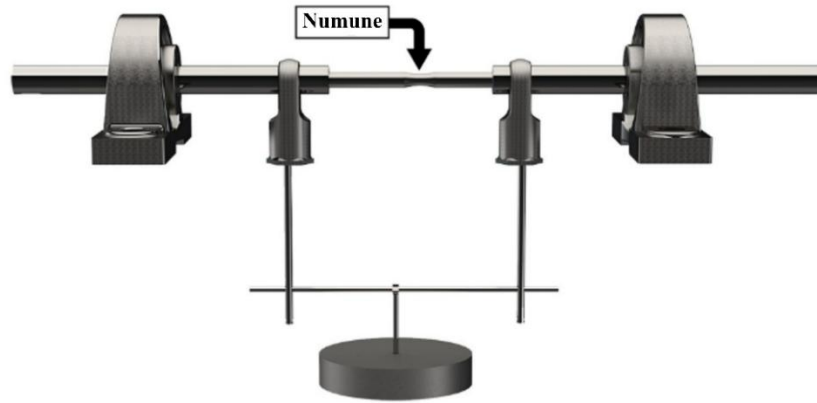
4.4.8. Yorulma Testi

Numunelerin yorulma davranışını belirlemek amacıyla ISO 1143 standardına göre 4-nokta dönel eğilmeli yorulma testi gerçekleştirilmiştir [80]. Yorulma testleri, numunenin merkezine uygulanan eğilme momentleriyle gerçekleştirilmiş ve yükleme tam tersinir ($R = -1$) yükleme esas alınmıştır. Deney düzeneği, 285 mm kol uzunluğuna ve 5,26 mm merkez çapındaki numunelere göre tasarlanmıştır. Uygulanan gerilme değeri, eşitlik 4.15'te bulunan eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F = \sigma \frac{\pi d^3}{32 L} \quad (4.15)$$
$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{32FL}{\pi d^3}$$

- F = Uygulanan Kuvvet (N)
- σ = Döngüsel Gerilme Değeri (MPa)
- L = Kuvvet Kolu Uzunluğu (285 mm)
- d = Yorulma Numunesi Merkez Çapı (5,26 mm)

Şekil 4.14'te 4-nokta dönel eğilmeli yorulma testi uygulama yapısı paylaşılmıştır [81].



Şekil 4.14. 4-nokta dönel eğilmeli yorulma testi uygulama yapısı.

Şekil 4.15'te 4-nokta dönel eğilmeli yorulma testi uygulanan cihazın görüntüsü paylaşılmıştır.



Şekil 4.15. Yorulma testi cihazı.

Yapıların hasara uğramasında en yaygın nedenlerden biri olan yorulma, malzeme mekaniği alanında üzerinde önemle durulması gereken bir konudur. Yorulma genellikle, yapının uygulanan gerilme genliğine karşılık hasara uğradığı çevrim sayısı ile tanımlanır. Bu ilişkiyi gösteren grafikler literatürde S-N eğrisi veya Wöhler diyagramı olarak adlandırılır. Elde edilen veriler ASTM E739-91 standardına göre işlenerek grafiksel hale getirilmiştir [82].

Yorulma davranışı yalnızca yüksek çevrim sayılarında (genelde 10^4 ten yüksek çevrim sayısı) değil, aynı zamanda düşük çevrim sayılarında da (genelde 10^4 ten düşük çevrim sayısı) ortaya çıkabilmektedir. Özellikle metalik malzemelerin yüksek çevrimli yorulma testleri yapılarak oluşturulan S-N eğrilerinde; malzemenin doğrudan kırıldığı kopma dayanımı noktası, elastik ve plastik bölgeler arasındaki geçişi ifade eden akma dayanımı noktası ve belirli bir gerilme genliğinin altında hasar oluşmadığı kabul edilen yorulma dayanım sınırı net bir biçimde gözlemlenebilmektedir. Gerilme genliğinin akma dayanımının üzerinde olduğu durumlarda malzeme kalıcı şekil değiştirme

kabiliyetinin doğru hesaplanabilmesi için S-N (gerilim-ömür) eğrisi yerine ϵ -N (gerinim-ömür) eğrisi kullanılması önerilmektedir.

4.4.8.1. Yüksek Çevrimli Yorulma (S-N)

Yüksek çevrimli yorulma (stress life fatigue), elastik bölgede gerçekleşen ve genellikle 10^4 üzerindeki çevrim sayılarını ifade eden hasar oluşumunu incelemek için kullanılır. Gerilme ömrü hesaplanırken S-N eğrileri kullanılır [83]. Yüksek çevrimli yorulma analizleri için Goodman, Soderberg ve Gerber metodları kullanılır. S-N eğrisinin sonsuz ömür bölgesinin belirlenmesi için akma dayanımı, kopma dayanımı ve yorulma dayanım limiti gibi bilgileri kullanarak ortalama gerilme düzeltme diyagramları çizilir. Bu çalışmada, literatürde metallerin yorulma analizleri için daha uygun olduğu belirtilen Gerber metodu kullanılmıştır [84]. Gerber metodu için kullanılan eşitlik 4.16'da paylaşılmıştır [85].

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{\zeta}} \right)^2 = 1 \quad (4.16)$$
$$\sigma_e = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{\zeta}} \right)^2}$$

- σ_a = Gerilme Genliği
- σ_e = Yorulma Dayanım Limiti (Sürekli Mukavemet)
- σ_m = Ortalama Gerilme
- σ_{ζ} = Çekme Dayanımı

4.4.8.2. Düşük Çevrimli Yorulma (ϵ -N)

Düşük çevrimli yorulma (strain life fatigue) yüksek gerilme ile elastik ve plastik deformasyon içeren, genellikle 10^4 altında çevrim sayılarını ifade eden hasar oluşumunu incelemek için kullanılır. Bu tür yorulma, genellikle malzemenin akma sınırının üzerinde uygulanan gerilmelerle ilgilidir. Uygulanan gerilmeler kalıcı şekil değiştirme sonucu ortaya çıkarmasından dolayı ϵ -N (gerinim-ömür) eğrisi

kullanılmaktadır. Literatürde bu ε -N eğrisini tanımlamak için kullanılan en yaygın yöntem Coffin- Monson – Morrow tarafından geliştirilmiştir.

Düşük çevrimli yorulma hesaplamalarında malzemeye uygulanan gerilme yerine gerinim verileri dikkate alınır. Toplam gerinim değeri eşitlik 4.17’de paylaşılan elastik ve plastik bölgede gerçekleşen gerinim değerlerinin toplamına göre hesaplanmaktadır.

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p \quad (4.17)$$

Düşük çevrimli yorulma için oluşturulan Coffin-Manson-Morrow ilişkisi plastik deformasyonu içeren yorulma tahmini yapmak için kullanılır. eşitlik 4.18’de Coffin-Manson – Morrow denklemi paylaşılmıştır [86].

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma_{f'}}{E} \langle 2N_f \rangle^b + \varepsilon_{f'} \langle 2N_f \rangle^c \quad (4.18)$$

- $\sigma_{f'}$ = Yorulma gerilim kat sayısı
- b = Yorulma gerilim üssü
- $\varepsilon_{f'}$ = Yorulma gerinim kat sayısı
- c = Yorulma gerinim üssü

Eşitlik 25’te kullanılmak için b ve c değerleri eşitlik 4.19 ve 4.20’ye göre hesaplanmıştır. Eşitlik 4.21’de maksimum çekme dayanımı (σ_c) verisi ile hesaplanan ($\sigma_{f'}$) denklemi ve eşitlik 4.22’de sertlik metodu kullanılarak hesaplanan yorulma gerinim katsayısı ($\varepsilon_{f'}$) denklemi paylaşılmıştır [87].

$$b = \frac{-n'}{1 + 5n'} \quad (4.19)$$

$$c = \frac{-1}{1 + 5n'} \quad (4.20)$$

$$\sigma_{f'} = 1.04 * \sigma_c + 345 \quad (4.21)$$

$$\varepsilon_f' = \frac{0.32 * H_B^2 - 487 * H_B + 191000}{E} \quad (4.22)$$

n' = Gerinim sertleşme katsayısı

Yorulma gerinim katsayısı (ε_f') hesaplanabilmesi için Brinell (H_B) sertlik değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan çalışmada kullanılan sertlik metodu Vickers (H_V) sertlik metodu olduğundan literatürde kullanılan Vickers-Brinell dönüşüm tabloları kullanılmıştır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1.METALOGRAFİK İNCELEME SONUÇLARI

Yapılan çalışmada, endüstriyel çubuk formda temin edilen ve toz metalürjisi yöntemiyle üretilen numuneler kullanılmıştır. Toz metalürjisi ile elde edilen numuneler, 800 °C, 1000 °C ve 1200 °C gibi farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelenerek numuneler borlama işlemine tabi tutulabilmesi için optimum sıcaklık ve süreler tespit edilmiştir. Borlama işlemi sonrası numuneler bakalite alınmış, parlatılmış ve dağlanmış. Hazırlanan numuneler üzerinde optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile metalografik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Özellikle iç yapıyı inceleyebilmek için; SEM, EDX analizleri ile ve XRD analizi yapılarak, farklı koşullar altında meydana gelen çökeltiler belirlenmiştir.

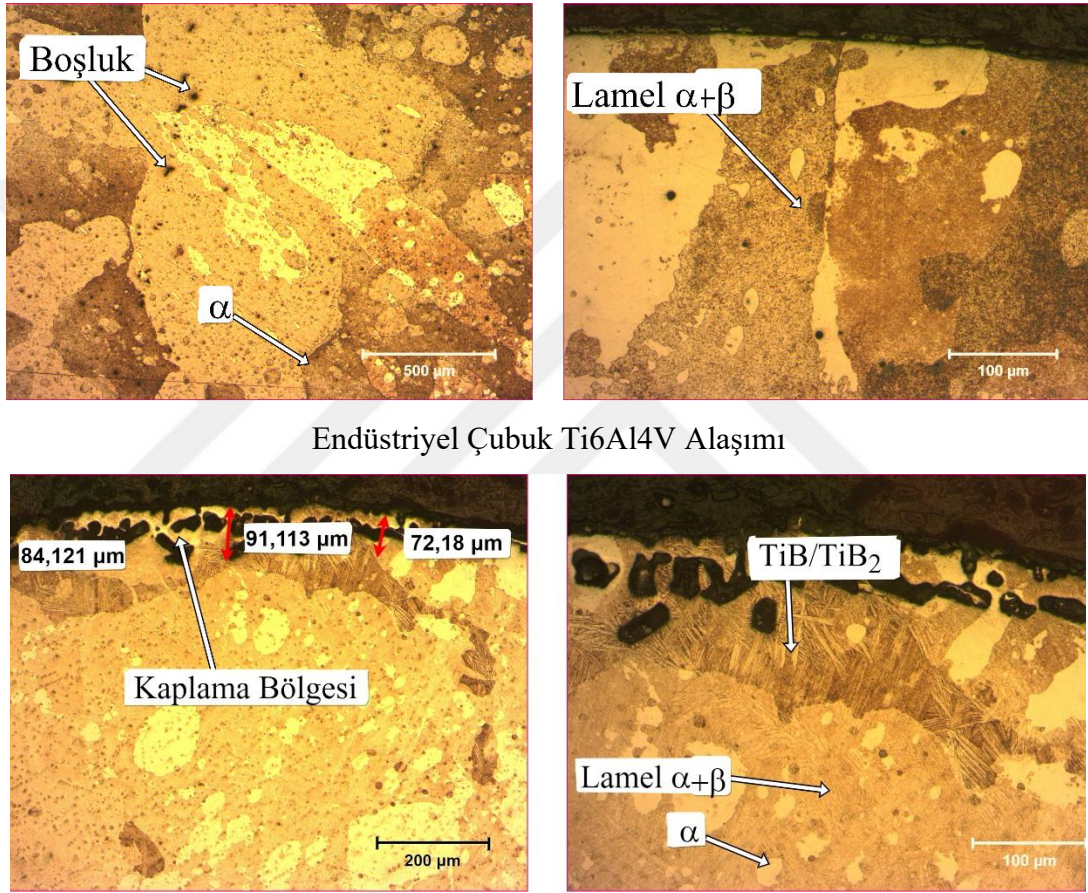
5.1.1. Optik Mikroskop İnceleme Sonuçları

Optik mikroskop incelemeleri Nikon ECLIPSEL 150 cihazında gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemelerde ortalama tane boyutu, gözeneklilik, α ve β faz oluşumları, oluşan çökeltiler, çatlak ve gözenekler ile borlama yapılan numuneler için bor tabakası incelenmiştir.

5.1.1.1.Endüstriyel Çubuk Ti6Al4V Alaşımı Görüntüleri

Endüstriyel çubuk formda temin edilen alaşımın orijinal durumda ve 900 °C borlama sonrası numunenin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. Tane yapısı incelendiğinde orijinal numunede ortalama tane boyutunun 9.5 μm olduğu, 900 °C borlanmış numunede 15.2 μm olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 900 °C borlanmış

numunenin kaplama kalınlığı ortalama 85 μm olduğu belirlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde bor takviyesi işlemi sonrası; TiB, TiB₂ elementleri başta olmak üzere TiC çökeltilerinin oluştđu ayrıca yapıda eş eksenli α , lamelli α ve β fazlarının belirgin şekilde arttığı görülmüştür [62,88]. Şekil 5.1’de endüstriyel çubuk Ti6Al4V malzeme için; kaplama bölgesi, esas alaşım bölümleri ve TiB, TiB₂, eş eksenli α , lamelli α ve β fazları paylaşılmıştır.



Endüstriyel Çubuk Ti6Al4V Alaşımı

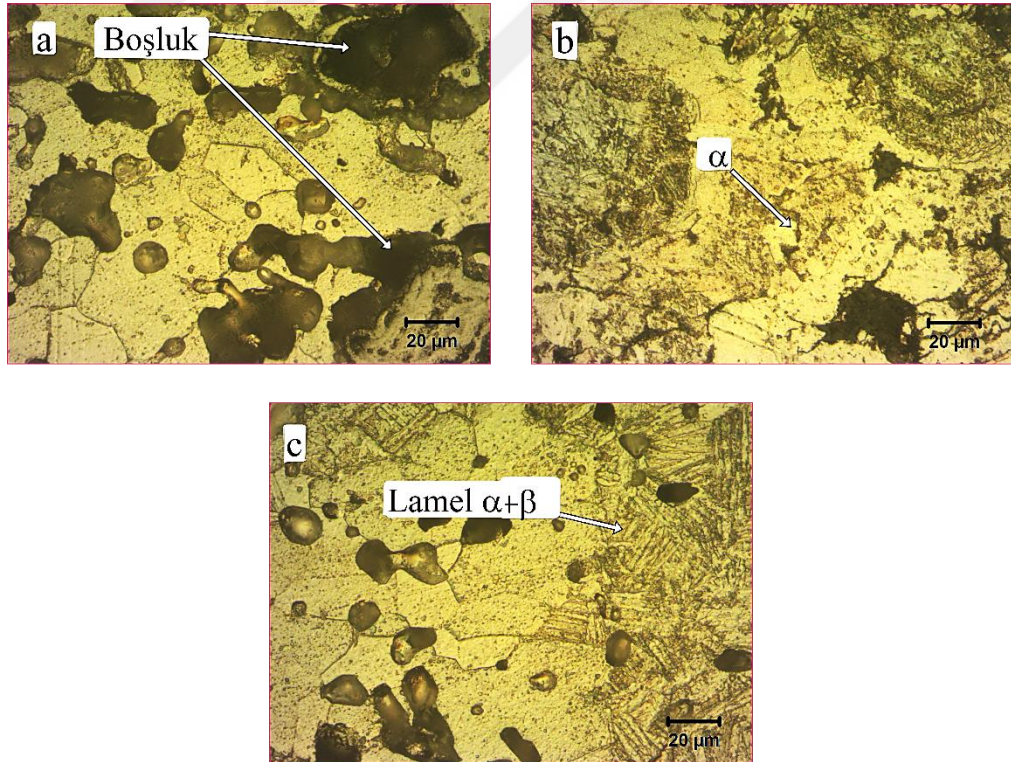
Endüstriyel Çubuk + 900 °C Borlama Alaşımı

Şekil 5.1. Endüstriyel çubuk Ti6Al4V alaşımı optik mikroskop görüntüleri.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde; endüstriyel çubuk formda haddeleme ve ısıl işlem uygulanarak üretilmiş malzemelerin ortalama 10.7 μm olduğu tespit edilmiştir [89]. Yapılan bir diğerk çalışmada ise farklı borlama sıcaklıklarında kaplama kalınlıkları ortalama 50-150 μm aralığında olduğu tespit edilmiştir [90]. Yapılan çalışmada literatürdeki örnekler değerlendirildiğinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum yapılan işlemlerin kontrolünü sağlamaktadır.

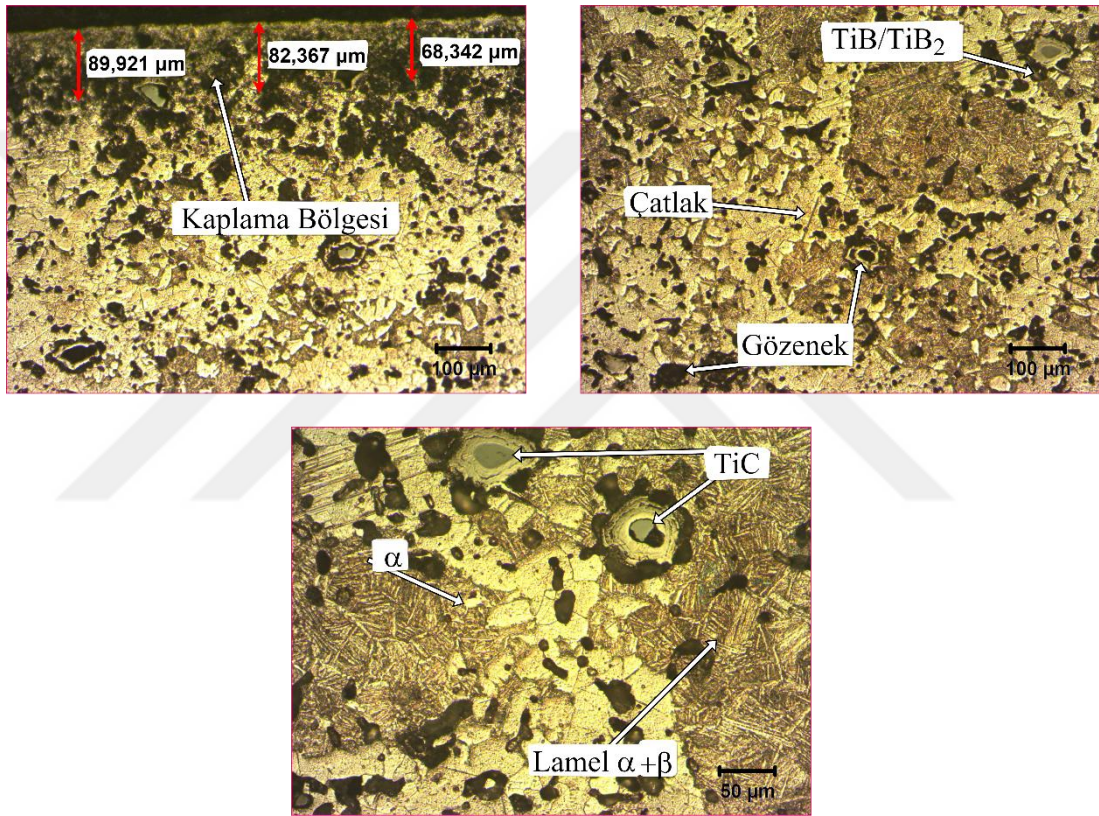
5.1.1.2. Toz Metalürjisi ile Üretilmiş Ti6Al4V Alaşımı Görüntüleri

Toz metalürjisi ile üretilmiş olan numunelerde, 800 °C sinter sıcaklığına sahip alaşımın ortalama tane boyutu, 16.88 μm , 1000 °C sinter sıcaklığında 15.38 μm ve 1200 °C sinter sıcaklığında 9.8 μm olarak hesaplanmıştır. Mikroyapı incelemelerinde sinter sıcaklığındaki artışla beraber ortalama tane boyutunda düşüşün olduğu, ayrıca gözeneklilik ve boşlukların azaldığı görülmektedir. Ayrıca en düşük ortalama tane boyutu değerine sahip olan 1200 °C sinter sıcaklığındaki numune 900 °C 15 saat borlamaya tabi tutulduktan sonra ortalama tane boyutu 18,90 μm olarak hesaplanmıştır. Bu durum gerçekleştirilen ısıtıl işlemin tane büyümesine sebep olduğunu göstermektedir. Tane büyümesi çekme ve basma dayanımının ve sertlik gibi mekanik özellik değerlerinin düşüşüne sebep vermiştir. Şekil 5.2’de Toz metalürjisi ile 800°C, 1000°C ve 1200°C sinter sıcaklığında üretilmiş olan Ti6Al4V alaşımının görüntüleri paylaşılmıştır.



Şekil 5.2. Toz metalürjisi Ti6Al4V alaşımı optik mikroskop görüntüleri a) 800°C sinter b) 1000°C sinter c) 1200°C sinter sıcaklığı.

Ayrıca 900 °C borlanmış numunenin kaplama kalınlığı ortalama 80 µm olduğu belirlenmiştir. Daha önce bahsedilen literatürde yapılan çalışmalara benzer olarak bor takviyesi işlemi sonrası; TiB, TiB₂ elementleri başta olmak üzere TiC çökeltilerinin oluştuğu ayrıca yapıda eş eksenli α, lamelli α ve β fazlarının belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Ayrıca iç yapıda oluşan çatlak ve gözeneklere rastlanmıştır. Şekil 5.3'te kaplama bölgesi, esas alaşım bölümleri ve TiB, TiB₂, eş eksenli α, lamelli α ve β fazları, çatlak ve gözenek bölümleri paylaşılmıştır.



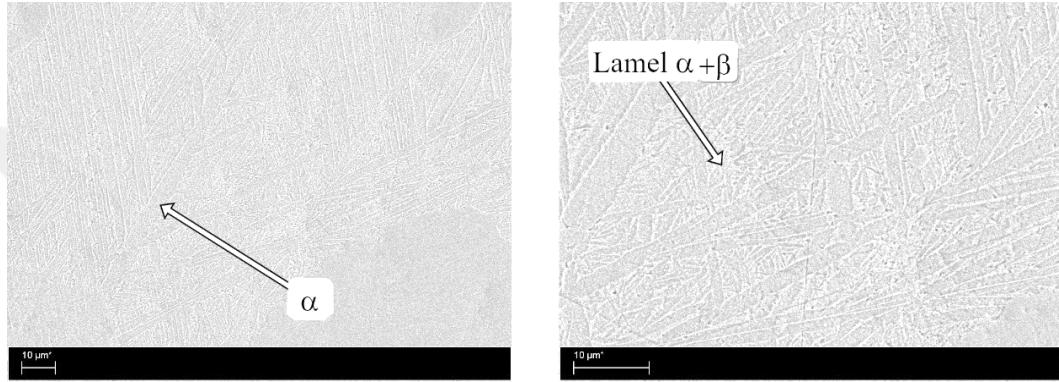
Şekil 5.3. Toz metalürjisi + 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımı optik mikroskop görüntüleri.

5.1.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İnceleme Sonuçları

SEM incelemeleri Carl Zeiss Ultra Pluss cihazında gerçekleştirilmiştir. İç yapı incelemeleri ile beraber nokta, çizgi ve harita EDX görüntüleri alınmış bu sayede iç yapıyı oluşturan elementler görüntülenmiştir. Yapılan incelemelerde ortalama tane boyutu, gözeneklilik, α ve β faz oluşumları, oluşan çökeltiler, çatlak ve gözenekler ile borlama yapılan numuneler için bor tabakası incelenmiştir.

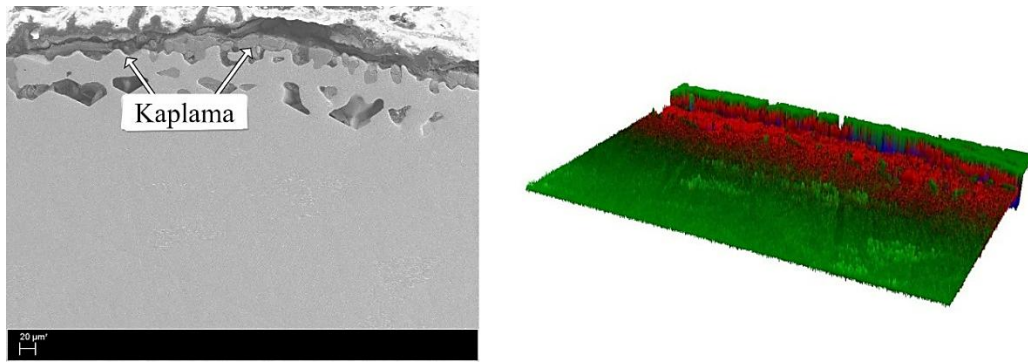
5.1.2.1.Endüstriyel Çubuk Ti6Al4V Alaşımı Görüntüleri

Yapılan SEM görüntülemeleri sonucunda iç yapıda α ve β fazlarının belirgin olduğu iç yapının endüstriyel üretim nedeni ile gözenek ve çatlak bulundurmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca belirgin şekilde lamelli α ve β fazının olduğu tespit edilmiştir. Bu durum iyi mekanik özelliklerin elde edilebilmesini olanaklı kılmıştır. Şekil 5.4'te endüstriyel olarak üretilmiş Ti6Al4V alaşımının SEM görüntüleri paylaşılmıştır.



Şekil 5.4. Endüstriyel olarak üretilmiş Ti6Al4V alaşımının SEM görüntüleri.

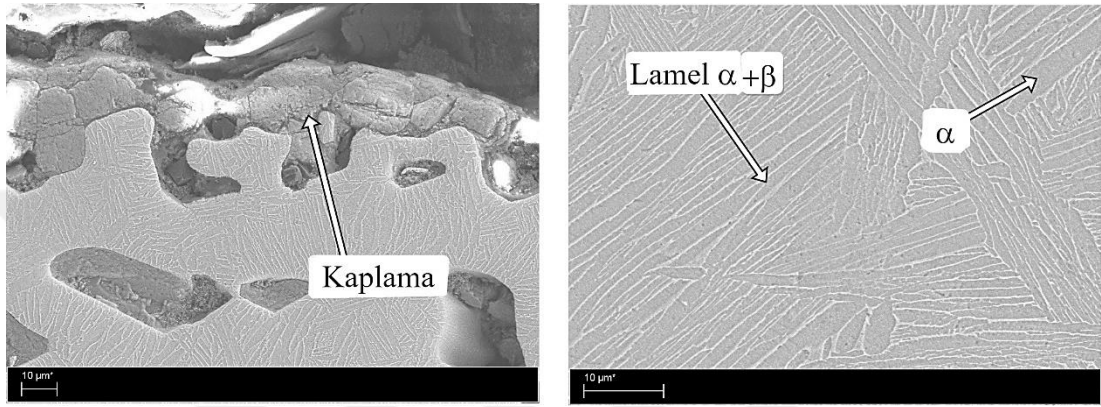
Şekil 5.5'te ana matris ve kaplama bölümleri gösterilerek, yüzey topografyası paylaşılmıştır.



Şekil 5.5. Endüstriyel + 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımının ana matris, kaplama ve yüzey topografyası.

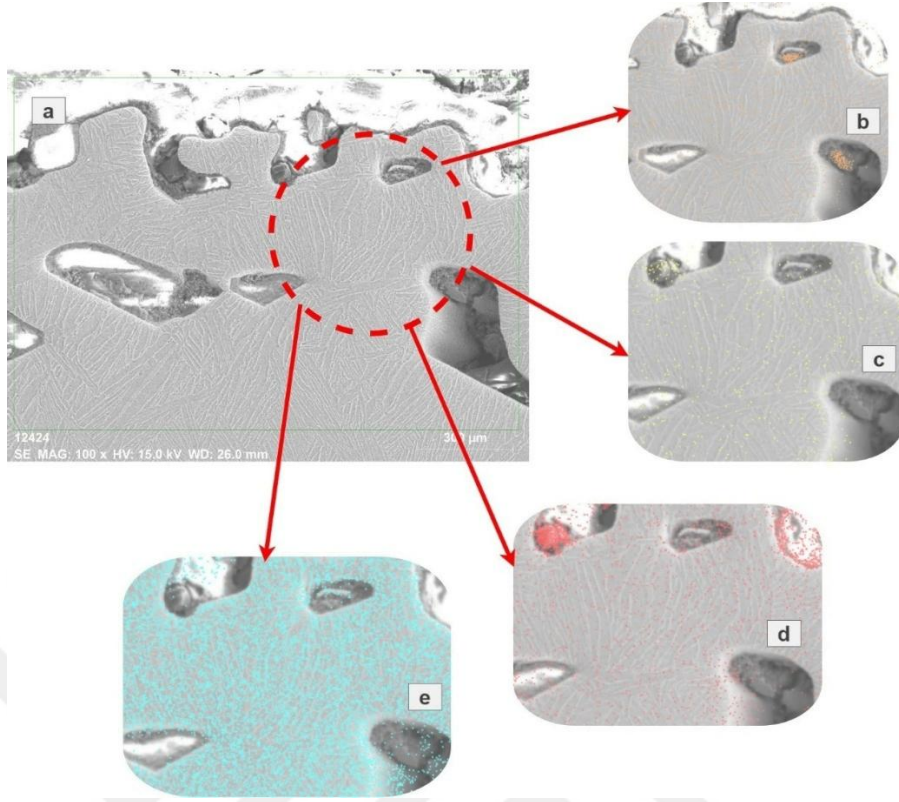
Borlama işlemi sonrası iç yapı incelemelerinde, belirgin α ve β fazlarının varlığının devam ettiği görülmektedir. Bor kaplama işlemi sonrası lamelli α ve β fazının

varlığının devam etmesinin, iyi mekanik özellikler sağlamaya devam ettiğinin göstermektedir. Ayrıca borlama işlemi sonrası kaplama bölgesi ve ana metal birleşiminde intermetaliklerin oluşumu, çatlak ve gözenek bulunmaması, özellikle yüzeye yakın bölgede aşınma özelliklerini iyileştirici bir durum olarak öngörülmektedir. Şekil 5.6’da borlama işlemi gerçekleştirilen endüstriyel numunenin kaplama bölgesi ve iç yapısı paylaşılmıştır.



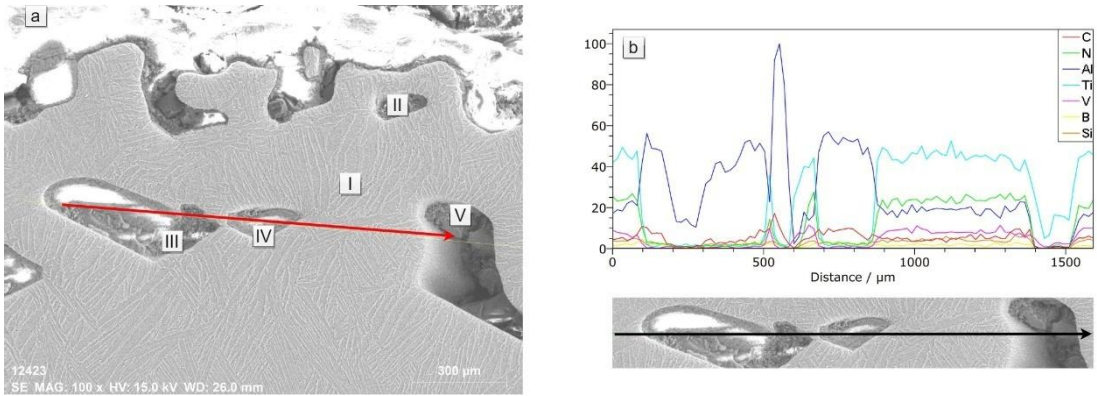
Şekil 5.6. Endüstriyel + 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımının ana matris, kaplama ve iç yapısı.

Yapılan borlama işlemi sonrası oluşan çökeltiler EDX analizleri ile incelenmiştir. Şekil 5.7’de EDX haritalama yapılarak borlama işlemi sonrası alaşım içerisinde bulunan silisyum, bor, karbon ve titanyum elementleri paylaşılmıştır.



Şekil 5.7. EDX harita görüntüleri a) Borlanmış Ti6Al4V alaşımı b) Silisyum c) Bor d) Karbon e) Titanyum.

Şekil 5.8’de çizgi EDX görüntüsü alınarak çökeltilerde yoğunlukla bor ve ana matriste titanyum elementlerinin yoğunlukları tespit edilerek paylaşılmıştır. Çizelge 5.1’de çizgi EDX sonucu elde edilen yüzdesel oranlar paylaşılmıştır.

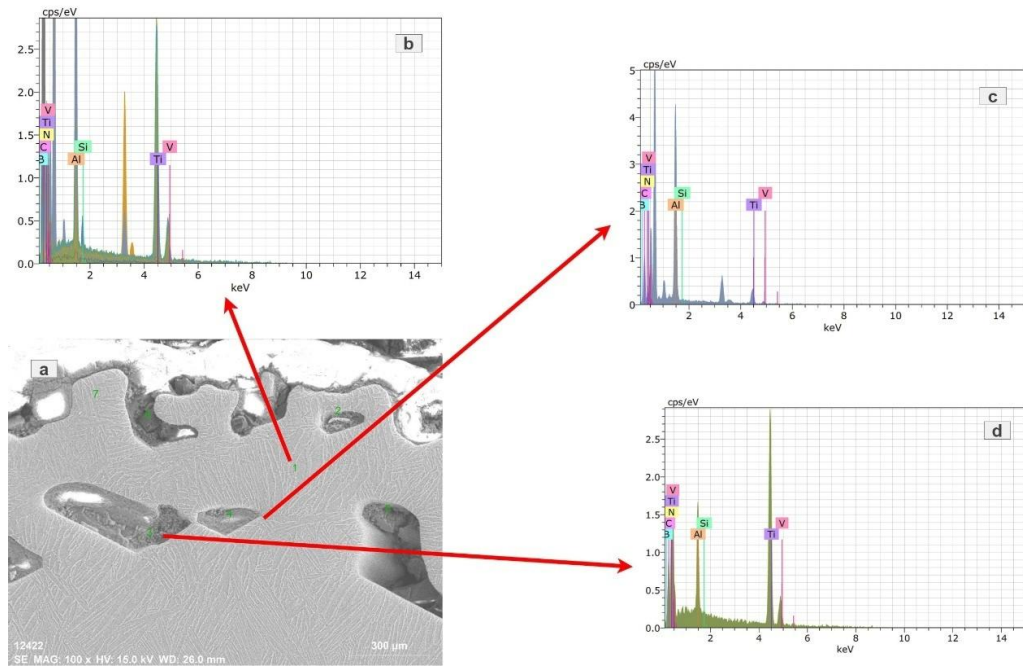


Şekil 5.8. Endüstriyel + 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımı çizgi ve nokta EDX.

Çizelge 5.1. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).

Bölge	B	C	N	Al	Si	Ti	V
I	18.48	25.65	9.36	5.61	0.24	40.66	0.00
II	14.86	25.19	18.62	5.40	0.36	35.58	0.00
III	23.45	52.40	0.00	18.38	0.25	5.53	0.00
IV	22.89	46.16	5.85	23.77	0.26	0.93	0.14
V	3.12	26.77	0.00	1.38	43.96	24.77	0.00

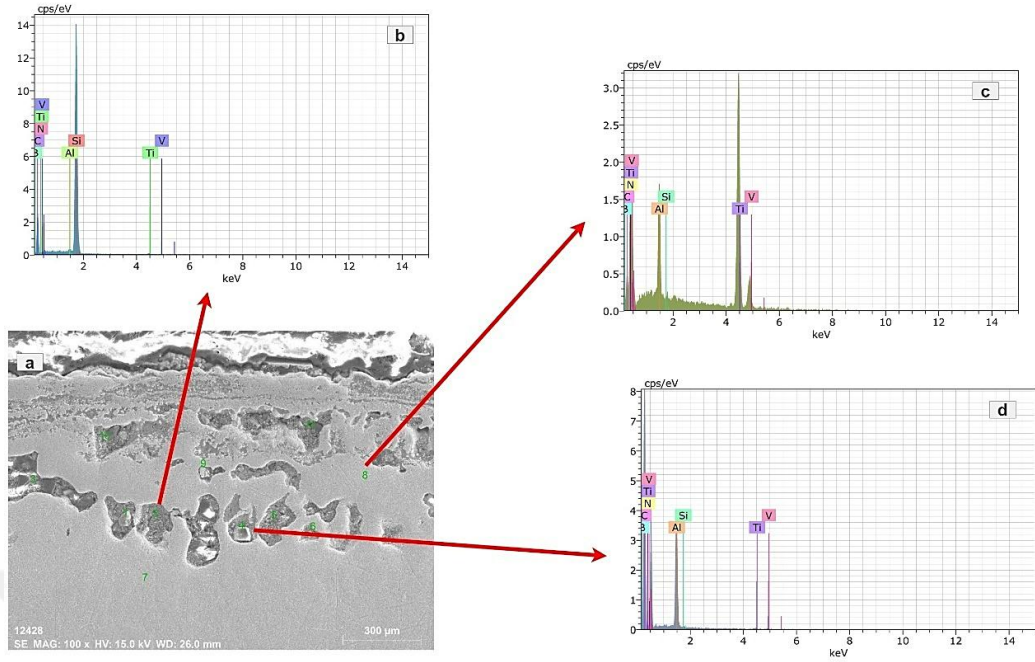
Endüstriyel olarak üretilen malzemeler, borlama işlemine tabi tutulduktan sonra malzeme içerisinde farklı çökeltiler ve intermetalikler oluşmuştur. Şekil 5.9 ve 5.10’da farklı bölgelerden alınan Nokta EDX görüntüleri ve Çizelge 5.2 ve 5.3’te bu EDX görüntülerinin yüzdesel oranları paylaşılmıştır.



Şekil 5.9. Endüstriyel + 900 °C borlama Ti6Al4V nokta EDX.

Çizelge 5.2. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).

Bölge	B	C	N	Al	Si	Ti	V
b	18.48	25.65	9.36	5.61	0.24	40.66	0.00
c	22.89	46.16	5.85	23.77	0.26	0.93	0.14
d	23.45	52.40	0.00	18.38	0.25	5.53	0.00



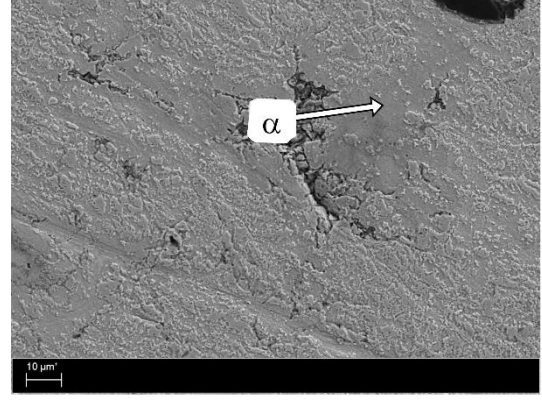
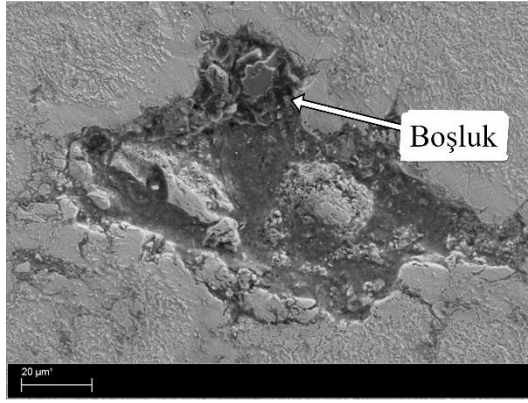
Şekil 5.10. Endüstriyel + 900 °C borlama Ti6Al4V Nokta EDX grafiksel oranlar.

Çizelge 5.3. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).

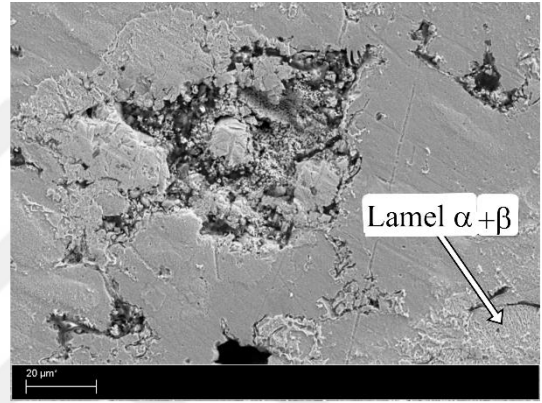
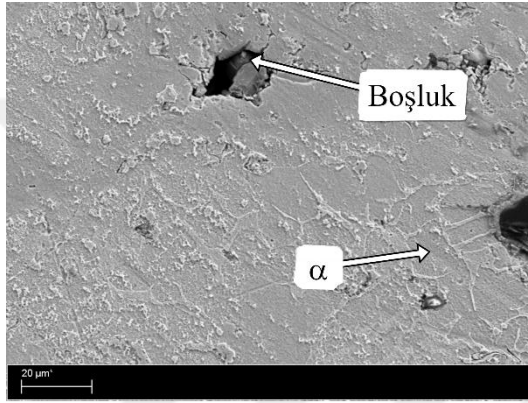
Bölge	B	C	N	Al	Si	Ti	V
b	23.65	42.83	0.00	32.16	0.46	0.90	0.00
c	18.71	27.02	0.00	5.49	0.39	46.94	1.46
d	9.36	85.91	4.61	0.04	0.00	0.08	0.01

5.1.2.2. Toz Metalürjisi ile Üretilmiş Ti6Al4V Alaşımı Görüntüleri

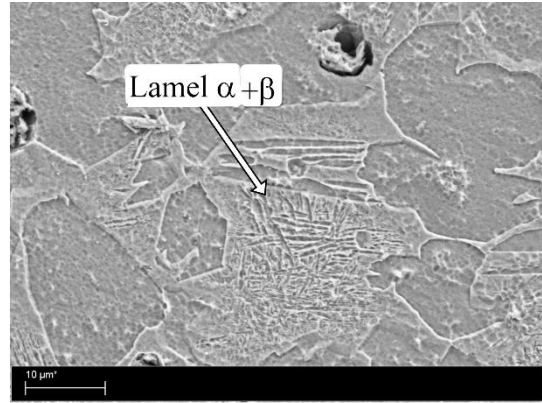
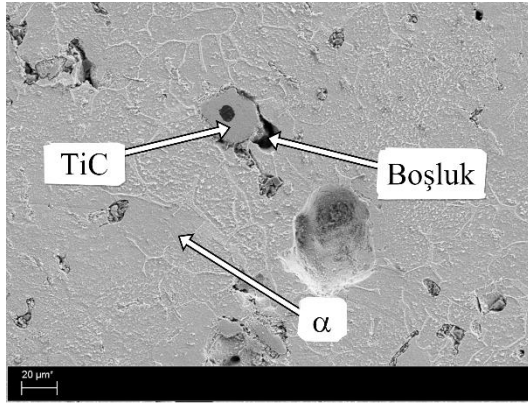
Yapılan SEM görüntülemeleri sonucunda sinter sıcaklığı arttıkça, iç yapıda α ve β fazlarının görülmesinin arttığı ve daha düzgün iç yapının oluştuğu tespit edilmiştir. 1200 °C sinter sıcaklığında en iyi faz oluşumlarının sağlandığı ve belirgin bir şekilde lamelli α ve β fazının oluştuğu tespit edilmiştir. Sinter sıcaklığı arttıkça boşluklar azalmış ve farklı intermetalikler oluşmaya başlamıştır. Bu durum daha iyi mekanik özelliklerin elde edilebilmesini olanaklı kılmıştır. Şekil 5.11’de 800 °C, 1000 °C ve 1200 °C sinter sıcaklıklarında üretilmiş Ti6Al4V alaşımının SEM görüntüleri paylaşılmıştır.



800 °C Sinter Sıcaklığı Uygulanan



1000 °C Sinter Sıcaklığı Uygulanan

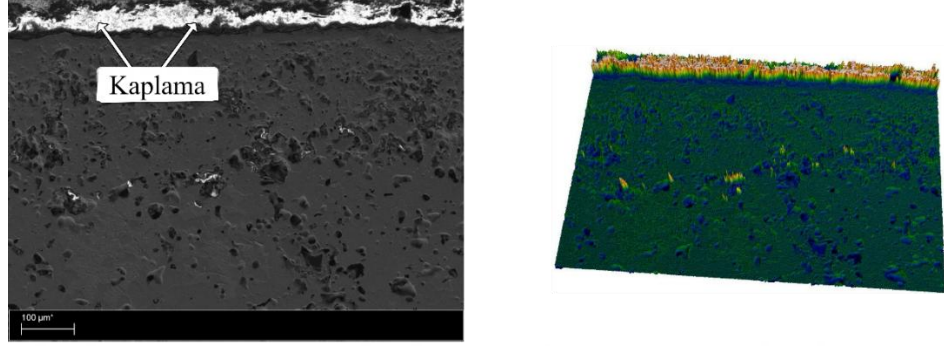


1200 °C Sinter Sıcaklığı Uygulanan

Şekil 5.11. 800°C, 1000°C ve 1200°C sinter sıcaklıklarında üretilmiş Ti6Al4V alaşımının SEM görüntüleri.

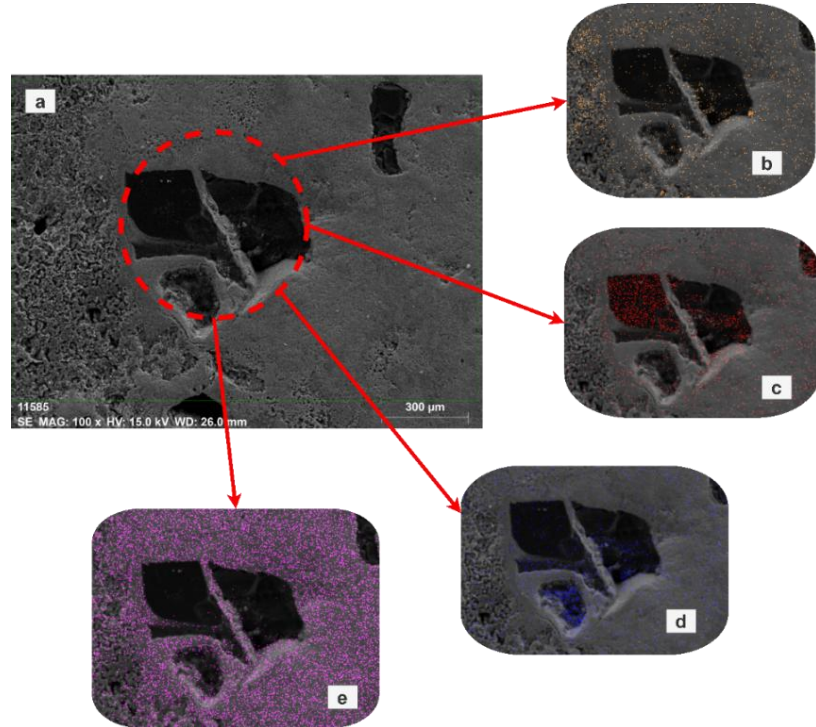
Yapılan mikroyapı incelemeleri ile 1200°C sinter sıcaklığına sahip malzemelerin daha iyi mekanik özellikler içerdiği tespit edilmiştir. Toz metalürjisi ile üretimi yapılan en iyi mekanik özelliklere sahip 1200°C sinter sıcaklığına sahip malzeme 900°C sıcaklıkta 15 saat borlama işlemine tabi tutulmuştur. 1200°C sinter sıcaklığında

üretilmiş ve 900°C sıcaklıkta 15 saat borlanmış olan Ti6Al4V alaşımının ana matris bölümü ve kaplama bölümleri incelenmiştir. Şekil 5.12’de ana matris ve kaplama bölümleri gösterilerek, yüzey topografyası paylaşılmıştır.



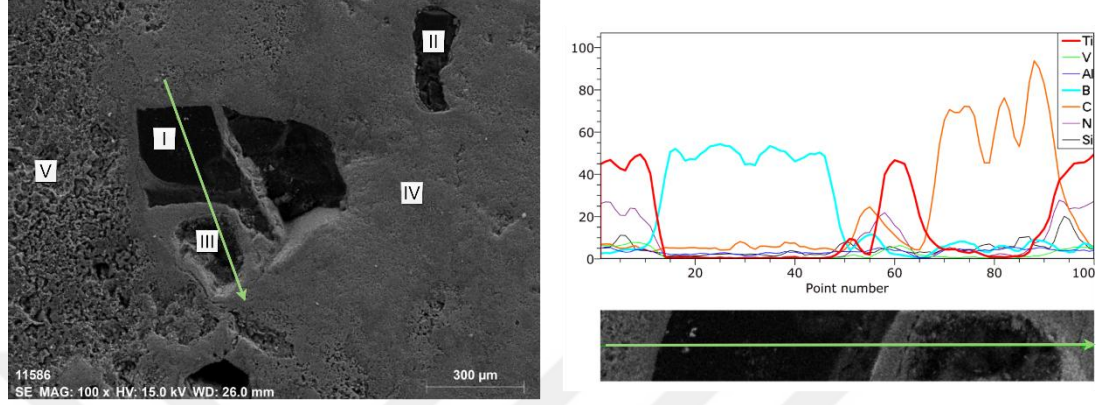
Şekil 5.12. 1200°C sinter + 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımının ana matris, kaplama ve yüzey topografyası.

Yapılan borlama işlemi sonrası oluşan çökeltiler EDX analizleri ile incelenmiştir. Şekil 5.13’te EDX haritalama yapılarak borlama işlemi sonrası alaşım içerisinde bulunan silisyum, bor, karbon ve titanyum elementleri paylaşılmıştır.



Şekil 5.13. EDX harita görüntüleri a) Borlanmış Ti6Al4V alaşımı b) Silisyum c) Bor d) Karbon e) Titanyum.

Şekil 5.14'te çizgi EDX görüntüsü alınarak çökeltilerde yoğunlukla bor ve ana matriste titanyum elementlerinin yoğunlukları tespit edilerek paylaşılmıştır. Çizelge 5.4'te çizgi EDX sonucu elde edilen yüzdesel oranlar paylaşılmıştır.

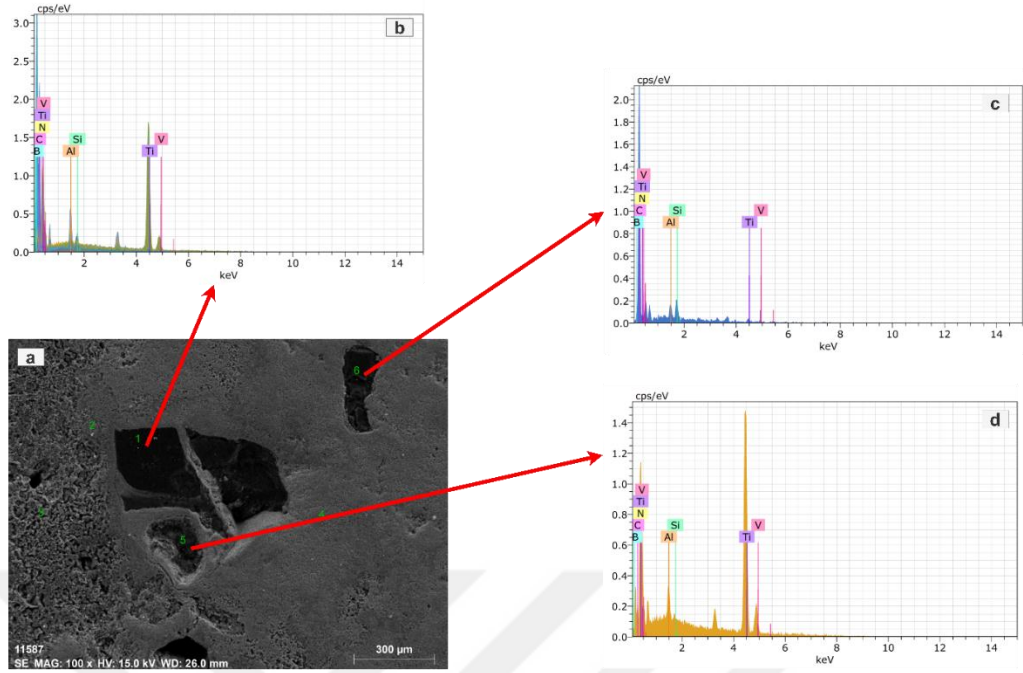


Şekil 5.14. 1200°C sinter 900 °C borlama Ti6Al4V alaşımı çizgi ve nokta EDX.

Çizelge 5.4. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).

Bölge	B	C	N	Al	Si	Ti	V
I	79.82	19.48	0.45	0.16	0.08	0.00	0.00
II	81.30	10.12	0.77	0.34	5.96	1.78	0.00
III	14.13	74.04	8.54	0.97	1.31	0.83	0.17
IV	34.97	10.40	28.42	1.13	0.20	24.88	0.00
V	5.75	4.69	26.03	6.21	0.52	56.79	0.0

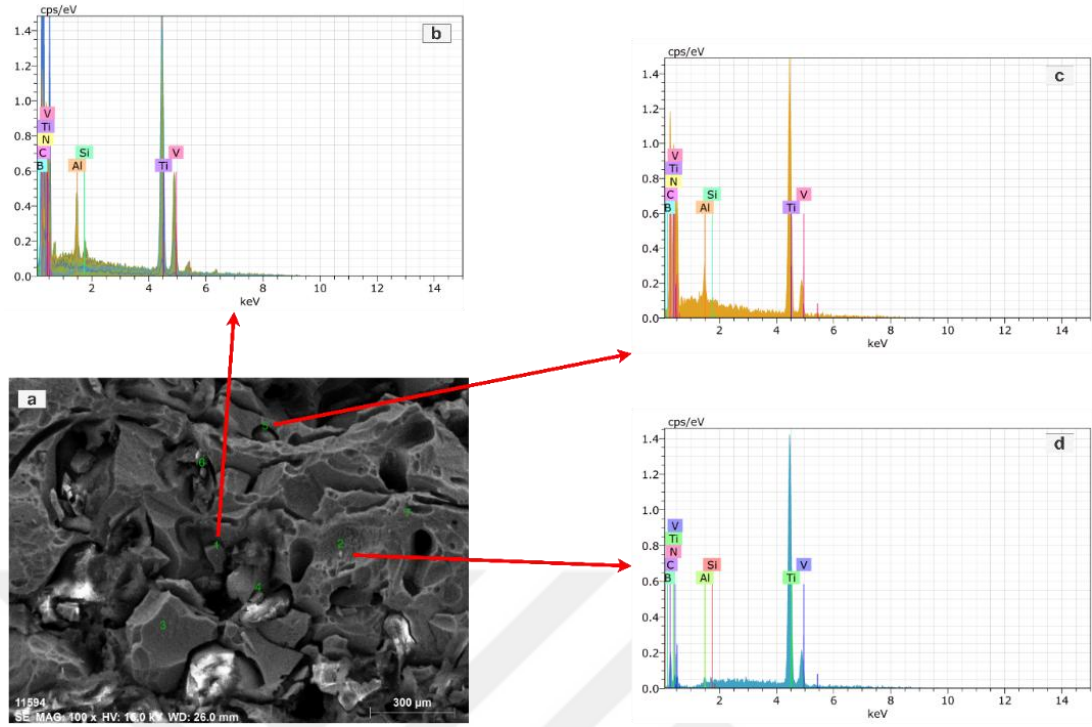
Toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen malzemeler, borlama işlemine tabi tutulduktan sonra malzeme içerisinde farklı çökelti ve intermetalikler oluşmuştur. Şekil 5.15 ve 5.16'da farklı bölgelerden alınan Nokta EDX görüntüleri ve Çizelge 5.5 ve 5.6'da bu EDX görüntülerinin yüzdesel oranları paylaşılmıştır.



Şekil 5.15. 1200°C sinter 900 °C borlama Ti6Al4V nokta EDX grafiksel oranlar.

Çizelge 5.5. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).

Bölge	B	C	N	Al	Si	Ti	V
b	79.82	19.48	0.45	0.16	0.08	0.00	0.00
c	81.30	10.12	0.77	0.34	5.96	1.78	0.00
d	14.13	74.04	8.54	0.97	1.31	0.83	0.17



Şekil 5.16. 1200°C sinter 900 °C borlama Ti6Al4V nokta EDX.

Çizelge 5.6. Nokta EDX Sonucu Yüzdesel Oranlar (%).

Bölge	B	C	N	Al	Si	Ti	V
b	79.82	19.48	0.45	0.16	0.08	0.00	0.00
c	81.30	10.12	0.77	0.34	5.96	1.78	0.00
d	14.13	74.04	8.54	0.97	1.31	0.83	0.17

Literatürde yapılan farklı çalışmalarda, alaşımdaki çeşitli alaşım elementlerinin varlığının farklı karbür ve nitrür gibi çökelti kombinasyonlarıyla sonuçlanabileceği gösterilmiştir [91,92]. Bu çökelti mekanik özelliklerde değişim meydana getirdiği görülmektedir. Çökelme ile katı çözeltilerde serbest karbon ve nitrojen miktarı azaldığı için katı eriyik sertleşmesinin mukavemet üzerindeki etkisi azalır [93,94]. Dolayısıyla Ti6Al4V toz metal alaşımının sinterleme sıcaklığının artması ile mukavemetinin artmasının bu metalde oluşan TiAl, TiB, AlN, TiC, VC, BC, TiBCN, TiC(N), BAlCN, BSiC, AlSiCN ve TiVC(N) gibi çökeltilerinin varlığı ile açıklanabileceği söylenebilir. Yapılan EDX harita görüntüleri mikroyapı görüntülemeleri farklı malzemelerin yoğunluklarını ortaya koymaktadır. EDX analiz sonuçları titanyum, alüminyum, vanadyum, silisyum ve bor elementlerinin matriste çökelti halinde bulunduğunu

tespit edilmiştir. Zajac ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada titanyum ve vanadyum içeren düşük karbonlu mikroyaşımlı çeliğin çökeltme davranışı araştırılmıştır [95]. Hem TiN hem de VN'nin östenit içinde çökeldiğini ve çeliğe titanyum eklendiğinde Ti,V(N) çökeltileri oluşturduğunu göstermişlerdir. Kimyasal analizle, çökeltilerin iç kısmının titanyum açısından zengin olduğunu, dış kısmının ise vanadyum açısından zengin olduğunu belirlemişlerdir. Bu, vanadyumun TiN içine çökeldiği ve sonuçta TiV(N) oluşturduğu anlamına gelmektedir. Çökeltiden alınan EDX nokta ve çizgi analizi hem vanadyum, bor, alüminyum hem de silisyum içermektedir. Ayrıca EDX nokta analizi ile karşılaştırıldığında karbon ve nitrür miktarı matristen alınan değerlerden açıkça daha yüksektir. Bu durum nedeniyle BC, TiBCN, TiC(N), BAlCN, BSiC, AlSiCN gibi çökeltilerin oluştuğu düşünülmektedir. Bu çalışmadaki EDX nokta analizi sonuçları önceki literatürle karşılaştırıldığında literatürde yapılan çalışmalarda görüldüğü gibi çökeltilerin var olduğu açıktır.

EDX çizgi analizi ayrıca, borlanmış Ti6Al4V metalinin element türü ve sayısının matris ve çökeltilerle kesişen çizgi boyunca değiştiğini ortaya koymuştur. Matris fazı titanyum açısından zengin olmasına rağmen, küresel çökelti bor, karbon ve silisyum açısından zengindir. Borlanmış numunenin SEM ve EDX analizleri kullanılarak gözlemlenen çökeltilerin yeniden kristalleşme tane büyümesi üzerinde önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir [96].

5.2. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ SONUÇLARI

Yapılan çalışmada endüstriyel çubuk formda temin edilen ve toz metalürjisi ile üretilen Ti6Al4V alaşımlarının içeriği yüzdesel olarak aynı oranları içermektedir. İçerikte bulunan kimyasal elementlerin oranları ve ilgili elementlerin özgül ağırlıklarına göre teorik yoğunluk (ρ_{teorik}) değeri 4.4365 g/cm^3 olarak hesaplanmıştır. Deneysel yoğunluk ($\rho_{deneysel}$) değerleri Arşimet prensibine göre hesaplanmıştır. Çizelge 5.7'de hesaplanan deneysel yoğunluk, bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri paylaşılmıştır.

Çizelge 5.7. Deneysel Yoğunluk, Bağlı Yoğunluk ve Gözeneklilik Değerleri.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Bağlı Yoğunluk %	Gözeneklilik %
Endüstriyel Numune	4.4015	99.22	0.78
Endüstriyel + 900 °C Borlama	4.4058	99.31	0.69
800 °C Sinter	3.5475	80	20
1000 °C Sinter	3.7588	84.7	15.3
1200 °C Sinter	3.8881	87.6	12.4
1200 °C Sinter + 900 °C Borlama	3.9175	88.3	11.7

Endüstriyel çubuk formda temin edilmiş olan Ti6Al4V alaşım malzemesinin borlanmamış ve 900 °C 15 saat süre ile borlanmış numunenin yoğunlukları hesaplanmıştır. Endüstriyel üretim esnasında yüksek mekanik özelliklerin elde edilebilmesi nedeniyle, bağlı yoğunluk değerleri borlanmış ve borlanmamış numunelerde %99'un üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum malzemede düşük gözeneklilik, yüksek şekillendirilebilirlik ve tokluk değerleri elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca borlama işlemi yapılması durumunda daha homojen α ve β fazları görülme ile paralel olarak düşük miktarda bağlı yoğunlukta yükseliş olduğu tespit edilmiştir.

Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V alaşımı numuneler, 800 °C, 1000 °C ve 1200 °C sıcaklıklarda, karışım gaz atmosferi altında iki saat süreyle sinterlenmiş bu ve elde edilen numuneler yoğunlukları Arşimet prensibine göre hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar, sinterleme sıcaklığındaki artışın yoğunluk değerlerini artırdığını göstermiştir. Bu artış, sinterleme sıcaklığı yükseldikçe iç yapıda daha fazla faz oluşumu ve gözenekliliğin azalması ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca toz metalürjisi ile üretilen ve 1200 °C sinterleme sıcaklığına sahip olan numune 900 °C'de 15 saat süre ile borlanmış, borlama işlemi deneysel yoğunluk değerlerini yükselttiği tespit edilmiştir. Toz metalürjisi ile elde edilen numunelerin bağlı yoğunluk değerleri %80 ila %88,3 aralığında hesaplanmış olup, bu değerlerin nispeten düşük olması, kullanılan tek eksenli presleme yöntemin ile ilişkilidir. Daha iyi yoğunluk değerleri için çift yönlü presleme, sıcak izostatik presleme veya metal enjeksiyon kalıplama gibi alternatif üretim yöntemlerinin tercih edilebileceği değerlendirilmektedir. Toz

metalürjisinde yoğunluk, yalnızca fiziksel doluluk oranını değil, aynı zamanda malzemenin mekanik özelliklerini de doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Sinterleme sonrasında malzeme bünyesinde kalan kalıntı gözenekler, mukavemeti düşürmekte; ısı transferini ve soğuma hızını yavaşlatmakta, ayrıca çatlakların oluşumu ve ilerlemesi açısından zayıf bölgeler oluşturmaktadır. Şekillendirilebilirlik ve tokluk gibi özellikler büyük oranda yoğunluğa bağlıdır; dolayısıyla yoğunluğun artması genellikle tokluğun da artmasına katkı sağlamaktadır [97,98]. Yoğunluk ölçümleri yapılarak malzemenin mekanik özellikleri incelenmiş ve düşük sinter sıcaklıklarının yeterli mekanik özellikleri sağlamayacağı tespit edildiğinden borlama işlemi sadece 1200°C sinterleme sıcaklığına sahip olan numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Yapılan yoğunluk ölçümlerinde, iç yapıda ve yapılan diğer mekanik özelliklerin incelendiği testler ile paralel olarak, endüstriyel çubuk formdaki numunelerde en yüksek yoğunluk değerleri tespit edilmiştir. Borlama işleminin yoğunluk değerleri üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca toz metalürjisi ile üretilen numunelerde sinterleme sıcaklığının artışının bağlı yoğunluğu artırdığı görülmektedir.

5.3. SERTLİK ÖLÇÜMÜ SONUÇLARI

Yapılan çalışmada sertlik ölçümleri, Vickers sertlik testi (H_V) ile 0.2 kilogram kuvvet (kgf-yaklaşık 1.96 N) yük kullanılarak 10 saniye sürede gerçekleştirilmiştir. Borlanmış ve borlanmamış tüm numunelerden 5 değer ölçülmüş ve ortalama değer sertlik değeri olarak hesaplanmıştır. Ayrıca borlama yapılan numunelerde, numuneler kesitten incelenmiş ve borlama tabakasından başlayarak matrise doğru ölçümler alınarak borlama tabakasının ve geçişinin sertlik değişimlerinin incelenmesi sağlanmıştır.

Endüstriyel çubuk numune için yapılan sertlik ölçümünde ortalama 289 H_V sertlik değeri hesaplanmıştır. Literatürde endüstriyel çubuk numune için yapılan çalışmalarda ortalama benzer değerlerin elde edildiğini ortaya koymaktadır [89]. Endüstriyel çubuk numunenin 900 °C 15 saat süre ile borlanması sonucu elde edilen numune için yapılan sertlik ölçümünde 317 H_V sertlik değeri hesaplanmıştır. Bu durum borlama sonrası yaklaşık %9 sertlik değerinde artışı ortaya koymaktadır. Toz metalürjisi ile üretilen

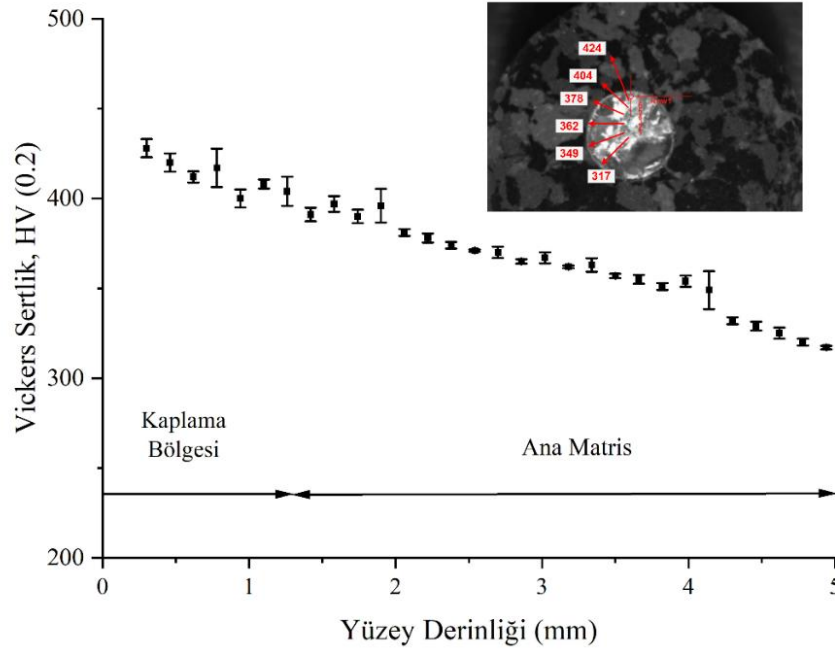
numunelerde, sinter sıcaklığındaki artış ve borlama işleminin sertlik değerlerini artırdığı tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri 399 H_V ile 1200 °C Sinter sıcaklığında ve en düşük 215 H_V ile 800 °C Sinter sıcaklığında hesaplanmıştır. En iyi mekanik özellikleri sağladığı tespit edilen 1200 °C sinter sıcaklığındaki numunenin borlama sonrası sertlik değeri 447 H_V olarak hesaplanmıştır. Bu durum borlama sonrası yaklaşık %12 sertlik değerinde artışı ortaya koymaktadır. Literatürde yapılan farklı çalışmalarda benzer üretim sıcaklıklarında yakın sertlik değerleri elde edildiği görülmüştür [88,99]. Tüm bu benzerlikler toz metal üretim sürecinin ve borlama işleminin verimli gerçekleştirildiğini ortaya koymaktadır. Sinterleme ve sinterleme sıcaklığından yavaş soğutma sırasında, TiC(N), AlN, VC(N) veya TiAlVC(N) gibi çökeltileri oluşur. Bu durum, 1200°C’de sinterlenen numuneler, 800°C ve 1000°C’de sinterlenen numunelere kıyasla sertlik değerlerinde bir artışa yol açtığını göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde TiC-VC çökeltileri ile düşük karbonlu çeliğin aşınma direncinde ve sertliğinde bir artış gözlemlenmiştir [100]. Diğer bazı çalışmalar metallerde oluşan karbür ve nitrürlerin ve yoğunluk artışının sertlik ve mukavemeti artırdığını göstermiştir [101-104]. Üretilen numunelerde oluşan çökeltiler tane büyümesini engelleyerek küçük tanelerinin oluşumuna yol açmaktadır [105]. Çizelge 5.8’de vickers sertlik değeri sonuçları paylaşılmıştır.

Çizelge 5.8. Vickers Sertlik Değeri Sonuçları.

Ti6Al4V	Sertlik Değeri [$H_V0.2/10s$]	
Endüstriyel Numune	289	Çubuk
Borlanmış Endüstriyel Numune	317	
800 °C Sinter	215	Toz Metal
1000 °C Sinter	307	
1200 °C Sinter	399	
Borlanmış 1200 °C Sinter	447	

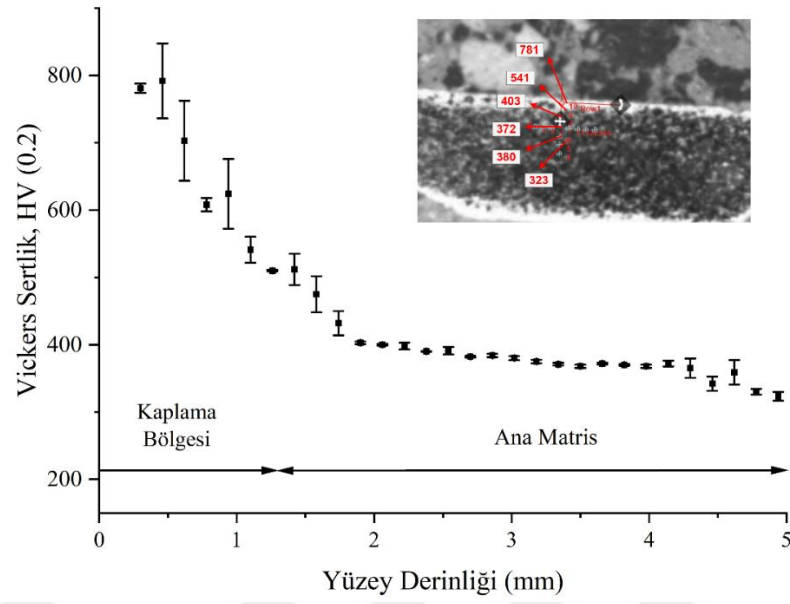
Yapılan vickers sertlik testinde borlama bölümünden başlayarak malzeme iç bölgesine doğru sertlik değerlerinin ölçümü alınmıştır. Borlama sonrası kesitten alınan sertlik sonuçları incelendiğinde matrise doğru inildikçe sertliğin azaldığı görülmüştür. Endüstriyel çubuk formda temin edilen ve sonrasında 900°C’de borlama işlemi yapılan

numunede, dış yüzeyde sertlik $424 H_V$ iken matriste $317 H_V$ sertliği görülmüştür. Bu durum literatürdeki çalışmalarla benzerlik sağlamaktadır. Şekil 5.17’de endüstriyel çubuk formda temin edilen ve 900°C ’de borlanan numunenin kesit sertlik değerleri paylaşılmıştır.



Şekil 5.17. Endüstriyel çubuk formda 900°C ’de borlanan numunenin kesit sertlik değerleri.

Toz metalürjisi ile 1200°C ’de sinterlenerek üretilen ve sonrasında 900°C ’de borlama işlemi yapılan numunede, dış yüzeyde sertlik $780 H_V$ iken matriste $380 H_V$ sertliği görülmüştür. Bu durum literatürdeki çalışmalarla benzerlik sağlamaktadır. Şekil 5.18’de toz metalürjisi ile 1200°C sinterlenerek üretilen ve 900°C ’de borlanan numunenin kesit sertlik değerleri paylaşılmıştır.



Şekil 5.18. Toz metalürjisi ile 1200°C sinterlenerek 900°C’de borlanan numunenin kesit sertlik değerleri.

Literatürdeki farklı çalışmalarda gerçekleştirilen borlama işleminin sertlik değerlerinde artışa sebep verdiği tespit edilmiştir [99]. Ti6Al4V alaşıma SiC takviyesinin sertlik değerlerine artış gösterdiği tespit edilmiştir [106]. Farklı sinter sıcaklığındaki Ti6Al4V alaşımının sertlik değerlerinin yükseldiği tespit edilmiştir [107]. Literatürde yapılan çalışmalardaki sertlik değerleri hesaplanan değerler ile benzerlik göstermektedir bu durum üretim süreçlerinin doğru yürütüldüğünü ortaya koymaktadır.

Yapılan çalışmada özellikle borlama işlemi sonrası ana matristen kaplama bölgesine doğru değişim incelendiğinde toz metalürjisi ile üretilmiş olan numunelerin (%12), endüstriyel numunelere göre (%10) daha fazla değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Endüstriyel numunelerde değişimin az olması ve değişimin daha homojen olarak gerçekleşmiş olması, endüstriyel üretimin üstünlükleri nedeni ile daha homojen ve iyi mekanik özelliklere sahip malzemelerin üretildiğini ortaya koymaktadır.

5.4. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI

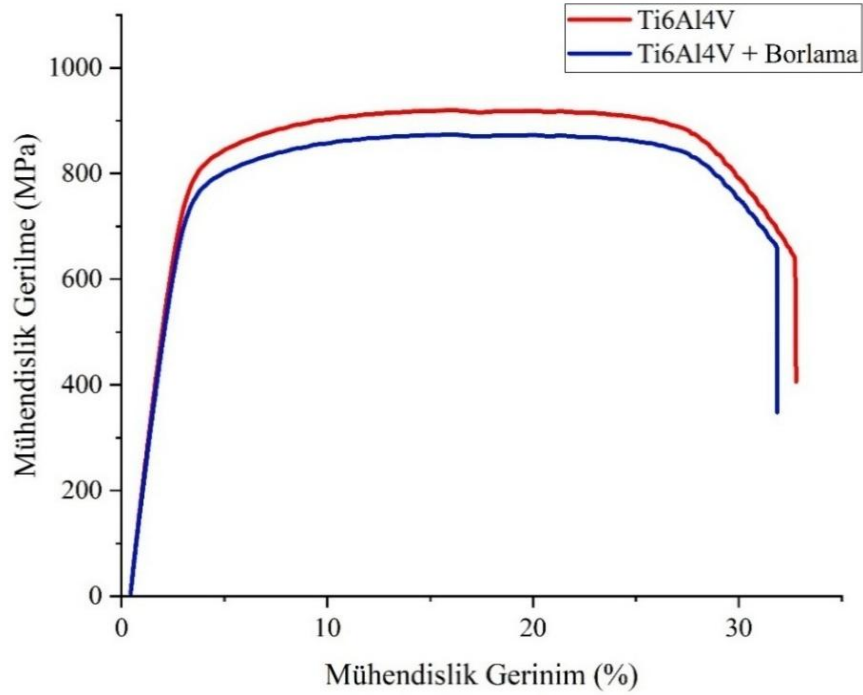
Yapılan çalışmadaki numunelere çekme testi uygulanarak mekanik özellikler karşılaştırılmıştır. Endüstriyel çubuk formda temin edilen numune, toz metalürjisi ile farklı sinter sıcaklıklarda üretilen numunelere göre çok daha iyi dayanım göstermiştir. Endüstriyel numune 790 MPa akma ve 924 MPa çekme dayanımı ve %23.8 uzama değerine sahipken toz metal numunelerde en iyi mekanik özellik gösteren 1200 °C sinter sıcaklığındaki malzeme akma dayanımı 57 MPa ve çekme dayanımı 181 MPa ve %4.11 uzama değerine sahip olarak ölçülmüştür. Toz metalürjisi ile üretilen diğer numunelerde ise; 800 °C sinter sıcaklığında 33 MPa akma ve 99 MPa çekme dayanımı ve %2.07 uzama değeri, 1000 °C sinter sıcaklığında 44 MPa akma ve 137 MPa çekme dayanımı ve %2.99 uzama değeri ölçülmüştür. Bu durum endüstriyel üretimin toz metalürjisine göre çok daha iyi dayanım özellikleri gösterdiğini ortaya koymaktadır. Toz metalürjisi ile üretim sonucu yapılan mikroyapı incelemeleri ve Arşimet prensibine göre yoğunluk ölçümlerinde tespit edilen yüksek gözenek miktarı dayanımı düşüren en önemli faktör olarak belirlenmiştir.

Endüstriyel numune ile toz metal numuneler arasında en iyi mekanik özellik gösteren 1200 °C sinter sıcaklığına sahip toz metal numune borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi sonrası yapılan çekme testi sonuçları incelendiğinde endüstriyel üretim borlama numunesi 759 MPa akma ve 890 MPa çekme dayanımı ve %21.9 uzama değerine sahipken toz metal 1200 °C sinter sıcaklığındaki numune akma dayanımı 24 MPa ve çekme dayanımı 128 MPa ve %2.48 uzama değerine sahip olarak ölçülmüştür. Bu durum borlama işlemi sonrası yüzeye yakın bölgelerden oluşan TiB ve TiB₂ fazları, kırılğan bir borür tabakası oluşumu ve yüzeydeki sertlik artışının akma, çekme dayanımı ve uzama üzerine olumsuz etkileri olduğunu ortaya koymaktadır. Xue ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada bor katkısını özellikle uzama oranını düşürdüğü akma ve çekme dayanımı üzerinde olumsuz etkileri olduğu tespit edilmiştir [108]. Ayrıca endüstriyel numunenin borlanması sonucu uzama (%) üzerinde yaklaşık %8’lik bir düşüş varken, toz metal numune üzerinde yaklaşık %40’lık bir düşüş meydana gelmiştir. Bu durumun ortaya çıkması, toz metal numunenin yüksek gözenekliliğe sahip olması ve iç yapının daha az homojenlik göstererek düzensizlikler oluşturmasından kaynaklıdır. Çizelge 5.9’da çekme testi sonuçları paylaşılmıştır.

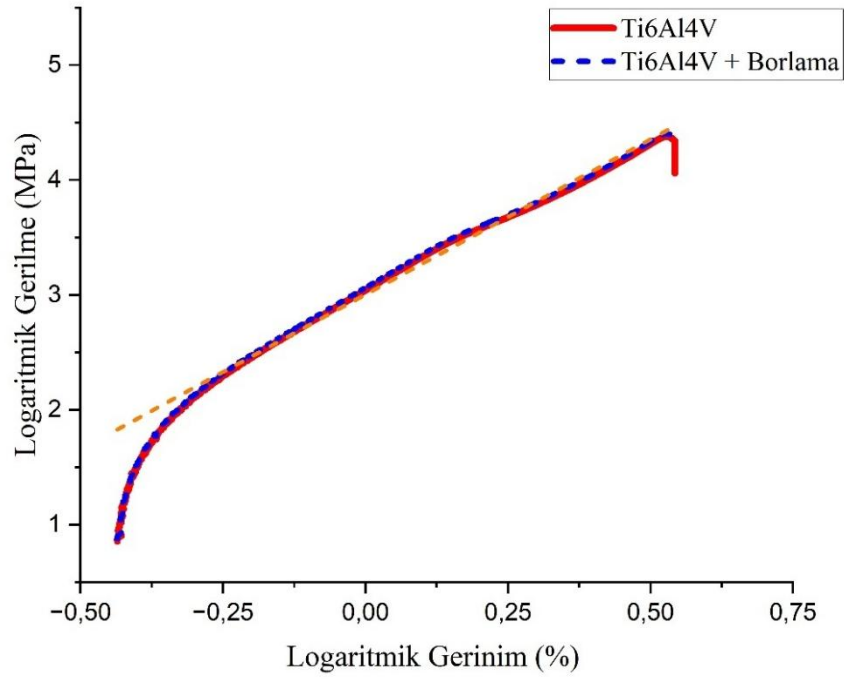
Çizelge 5.9. Çekme Testi Sonuçları.

Ti6Al4V	Akma Dayanımı, (MPa)	Çekme Dayanımı, (MPa)	Uzama (%)	
Endüstriyel Numune	790	924	23,8	Çubuk
Borlanmış Endüstriyel Numune	759	890	21,9	
800 °C Sinter	33	99	2,07	Toz Metal
1000 °C Sinter	44	137	2,99	
1200 °C Sinter	57	181	4,11	
Borlanmış 1200 °C Sinter	24	128	2,48	

Şekil 5.19 ve 5.20’de endüstriyel olarak üretilmiş ve borlanmış numunelerin mühendislik gerilim, gerinim ve logaritmik gerilim, gerinim diyagramları paylaşılmıştır.

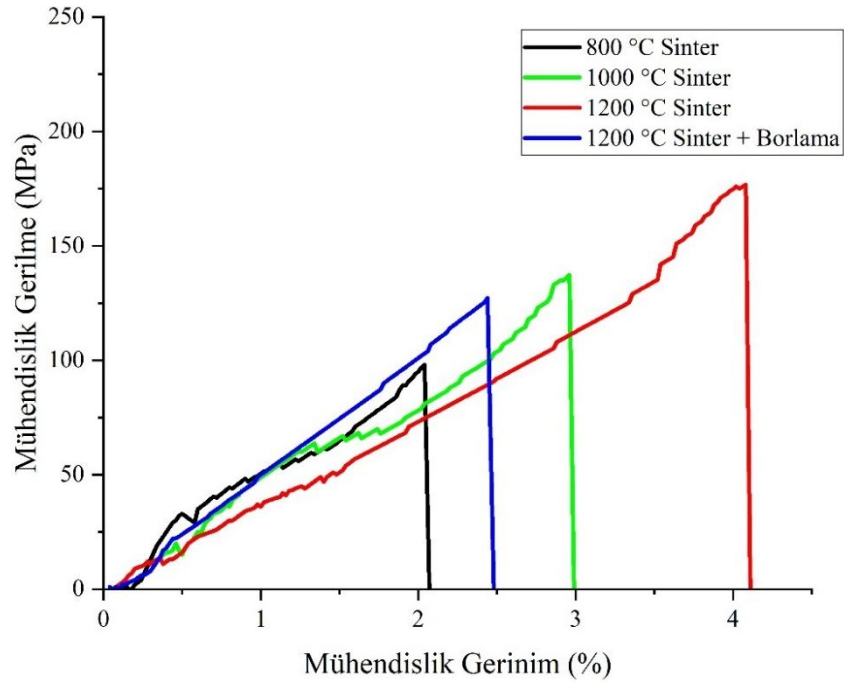


Şekil 5.19. Endüstriyel numunelerin mühendislik gerilim, gerinim diyagramı.

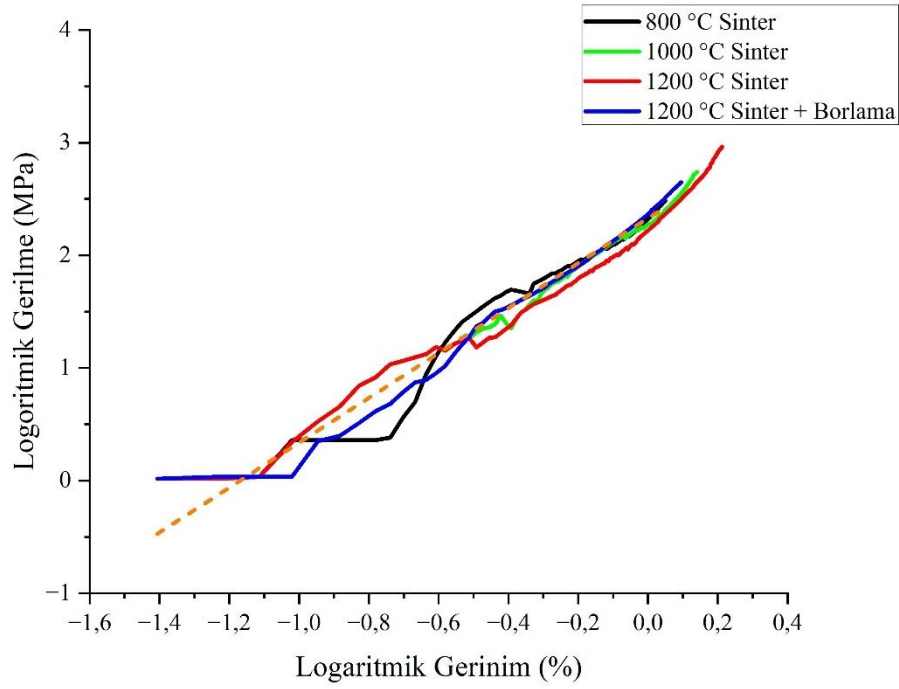


Şekil 5.20. Endüstriyel numunelerin logaritmik gerilim, gerinim diyagramı.

Şekil 5.21 ve 5.22’de toz metalürjisi ile farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilmiş ve borlanmış numunelerin mühendislik gerilim, gerinim ve logaritmik gerilim, gerinim diyagramları paylaşılmıştır.



Şekil 5.21. Toz metal numune mühendislik gerilim, gerinim diyagramı.



Şekil 5.22. Toz metal numune logaritmik gerilim, gerinim diyagramı.

5.5. BASMA TESTİ SONUÇLARI

Mekanik özelliklerin incelenmesi için önemli bir test olan basma testi uygulanmıştır. Yapılan çalışma özelinde yüksek gözenek miktarı barındıran toz metalürjisi ile üretilen numunelerin var olması çekme testi uygulamalarında yüzeye yakın gözeneklerin çentik etkisi oluşturmaya ve yeterli dayanım incelemesinin yapılamamasına sebep olmuştur. Basma testi uygulaması ile, çekme testine göre malzemenin sönmüleyebileceği enerjiyi daha belirgin gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Endüstriyel numune 1769 MPa basma dayanımı değerine sahipken toz metal numunelerde en iyi mekanik özellik gösteren 1200 °C sinter sıcaklığındaki malzeme 1083 MPa basma dayanımı değerine sahip olarak ölçülmüştür. Toz metalürjisi ile üretilen diğer numunelerde ise; 800 °C sinter sıcaklığında 464 MPa basma dayanımı, 1000 °C sinter sıcaklığında 991 MPa basma dayanımı değeri ölçülmüştür. Bu durum endüstriyel üretimin toz metalürjisine göre çok daha iyi dayanım özellikleri gösterdiğini çekme testine paralel olarak ortaya koymaktadır.

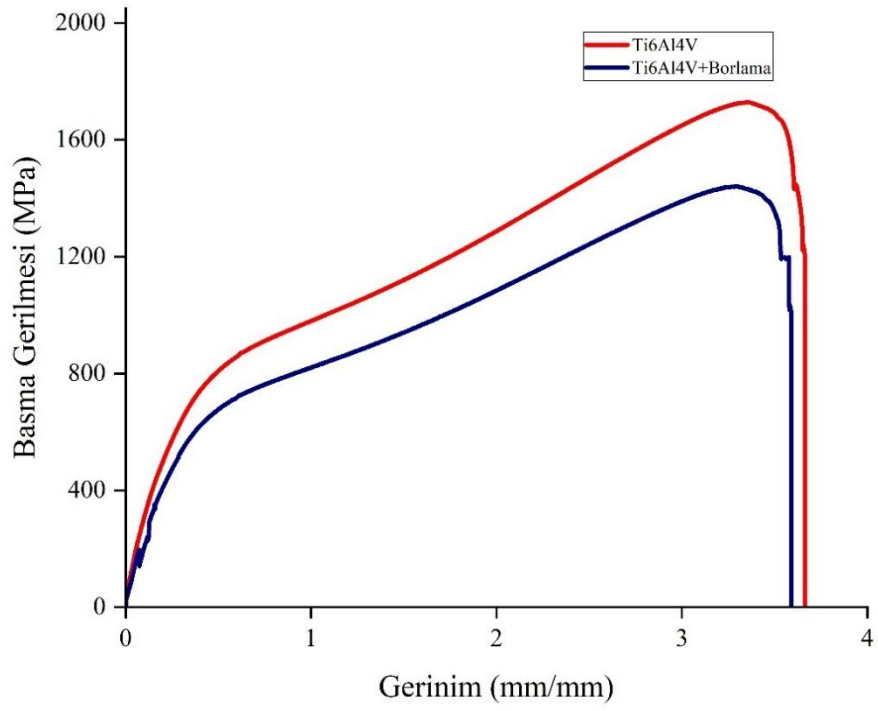
Endüstriyel numune ile toz metal numuneler arasında en iyi mekanik özellik gösteren 1200 °C sinter sıcaklığına sahip numune borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama

işlemi sonrası yapılan çekme testi sonuçları incelendiğinde Endüstriyel üretim borlama numunesi 1420 MPa basma dayanımı değerine sahipken toz metal 1200 °C sinter sıcaklığındaki numune 892 MPa basma dayanımı değerine sahip olarak ölçülmüştür. Bu durum borlama işlemi sonrası yüzeye yakın bölgelerden oluşan TiB ve TiB₂ fazları, kırılğan bir borür tabakası oluşumu ve yüzeydeki sertlik artışının basma dayanımı üzerine olumsuz etkileri olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca 1200 °C sinter sıcaklığında üretilen numunenin borlama sonrası 1000 °C sinter sıcaklığındaki numuneye göre daha düşük dayanım göstermesi borlamanın önemli bir etkisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde endüstriyel olarak üretilen Ti6Al4V alaşım malzemesi için Alaghmandfard ve arkadaşları yaptığı çalışmada basma gerilmesi değeri 1800 ile 2000 MPa arasında ölçülmüştür [109]. Bu değer çalışmada test edilen endüstriyel numune için benzer bir sonuç vermektedir. Çizelge 5.10'da basma testi sonuçları paylaşılmıştır.

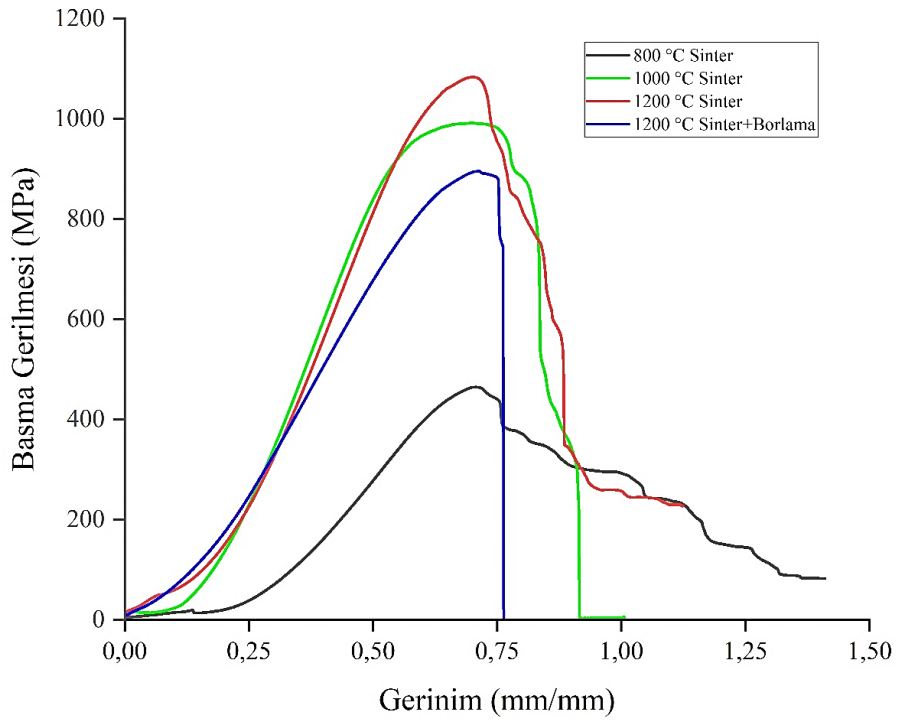
Çizelge 5.10. Basma Testi Sonuçları.

Ti6Al4V	Basma Gerilmesi, (MPa)	
Endüstriyel Numune	1769	Çubuk
Borlanmış Endüstriyel Numune	1420	
800 °C Sinter	464	Toz Metal
1000 °C Sinter	991	
1200 °C Sinter	1083	
Borlanmış 1200 °C Sinter	892	

Şekil 5.23 ve 5.24'te endüstriyel olarak ve toz metalürjisi ile farklı sinterleme sıcaklıklarında üretilmiş ve borlanmış numunelerin basma testi gerilim, gerinim diyagramları paylaşılmıştır.



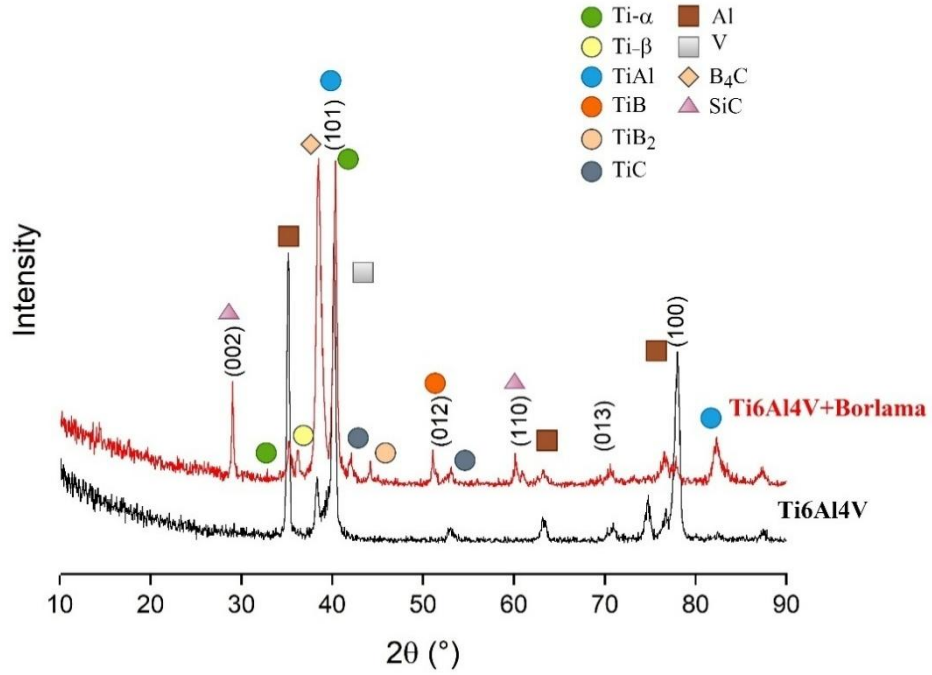
Şekil 5.23. Endüstriyel numunede basma testi gerilim, gerinim diyagramı.



Şekil 5.24. Toz metal numune basma testi gerilim, gerinim diyagramı.

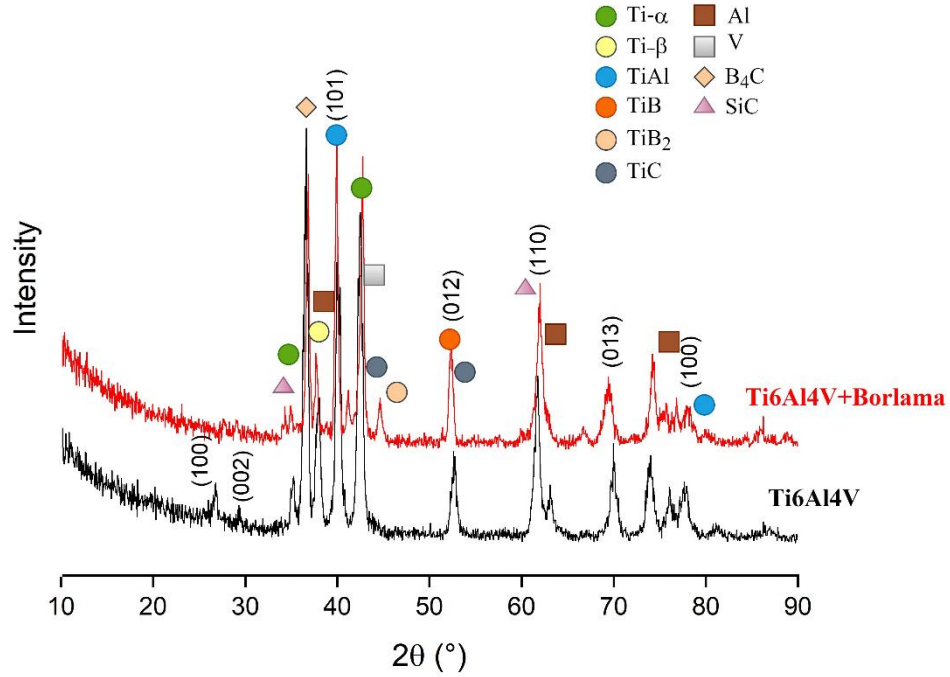
5.6. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) ANALİZİ SONUÇLARI

Ti6Al4V alaşımının endüstriyel olarak ve 1200°C sinter sıcaklığında üretilmiş numuneler ile bu numunelerin borlanması sonucu elde edilen numuneler XRD analizleri yapılarak kristal yapılar ve faz dağılımları incelenmiştir. Borlama işlemi öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilen XRD kırınım desenleri analizleri sonucunda Ti (Ti- α , Ti- β), Al ve V elementlerine ait temel fazların yanı sıra borlama sonrası örneklerde TiB, TiB₂, TiC, SiC ve B₄C gibi yeni fazların oluştuğu tespit edilmiştir. Bu fazlar, bor difüzyonu ve yüksek sıcaklık etkisiyle yüzeyde meydana gelen reaksiyonların bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca borlama işlemi ile beraber kırınım desenlerinde artış/azalış davranışları ortaya koyan fazların oluştuğu görülmüştür. Şekil 5.25'te endüstriyel olarak üretilmiş Ti6Al4V alaşımı ve bu numunenin borlanması sonucu elde edilen kırınım desenleri verilmiştir.



Şekil 5.25. Endüstriyel + 900°C'de borlanan numunelerin XRD kırınım desenleri.

Şekil 5.26'da toz metalürjisi ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımı ve bu numunenin borlanması sonucu elde edilen kırınım desenleri verilmiştir.



Şekil 5.26. Toz metalürjisi ile 1200°C sinterlenen ve 900°C’de borlanan numunelerin XRD kırınım desenleri.

Literatürde yapılan çalışmalarda da benzer şekilde, bor içeren takviyeler ile işlem görmüş Ti6Al4V alaşımlarında TiB ve TiB₂ gibi borür fazlarının yanı sıra karbon kaynaklı fazlar (örneğin B₄C, TiC, SiC) bulunduğu tespit edilmiştir. Guo ve arkadaşları, seçici lazer ergitme yöntemiyle B₄C takviyeli Ti6Al4V malzemelerinde benzer fazların XRD ile gözlemlendiğini görülmüştür [99]. Ogunlana ve Muchie'nin çalışmasında ise Ti6Al4V alaşımının lazer metal biriktirme yöntemiyle uygulanan B₄C katkılı kaplamalarda TiB ve TiC oluşumu olduğu görülmüş, bu fazların sertlik artışına doğrudan katkı sunduğu vurgulanmıştır [110]. Ayrıca Yuan ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada da Ti6Al4V alaşımına uygulanan çevrimsel termo-hidrojen işlemleri sonrası XRD analizlerinde α ve β fazlarının dönüşüm davranışları ile birlikte ikincil sert fazların kristallenme özellikleri detaylı olarak ortaya konmuş, kırınım açılarının benzer olduğu görülmüştür [111]. Toz metalürjisi ile ilgili yapılan bir çalışmada, kimyasal veya elektrokimyasal prosedürler kullanarak Nb-Al mikro alaşımlı toz metal çeliğinin filtre kalıntısının XRD çökelti piklerini göstermiştir. Literatürdeki çalışmalar, borlanmış numunelerde gözlemlenen yeni faz oluşumlarının hem yapısal dönüşüm hem de mekanik performans üzerindeki etkisini desteklemektedir.

5.7. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI

Yapılan çalışmada farklı mekanik özellikler gösteren numuneler, ileri-geri hareketli kuru aşınma testi uygulanarak tribolojik özellikleri incelenmiştir. Kuru ortamda gerçekleştirilen aşınma testleri ile aynı ortamda farklı yük ve mesafe uygulanarak, AISI 52100 çelik bilyenin farklı numunelerde oluşturduğu kayıp miktarları ve sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan incelemeler sonrası aşınma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri alınmış ve aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Yapılan incelemelerde endüstriyel olarak üretilen numunelerin farklı yük ve mesafelerde toz metalürjisi ile üretilen numunelerden daha düşük aşınma miktarı gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca toz metalürjisi ile üretilen numuneler incelendiğinde sinterleme sıcaklığının artışı ile daha düşük aşınma miktarı yönelimi gösterdiği tespit edilmiştir.

Borlama yapılan numuneler incelendiğinde, borlama işleminin aşınma miktarını bariz azaltan bir durum içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca endüstriyel numunede hesaplanan ortalama 0,0044 g kayıp miktarı borlama sonrası 0,0036 g'a düşmesi yaklaşık %18'lik bir düşüş olduğunu göstermektedir. 1200 °C sinter sıcaklığında üretilen toz metal numunenin 0,0047 g kayıp miktarı borlama sonrası 0,0037 g'a düşmesi yaklaşık %22'lik bir düşüş olduğunu göstermektedir. Bu durum endüstriyel numunenin incelenen diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi daha kararlı bir yapı sunması ve homojen değişimler içerdiğini kanıtlar niteliktedir.

Sürtünme katsayısı hesaplamaları ile ilgili olarak, uygulanan yük miktarı arttırıldığında belirgin bir artış olduğu, mesafe artışlarında bir miktar yükselme eğilimi gösterdikten sonra genel trendin sabit kaldığı görülmüştür. Tüm aşınma miktarları ve sürtünme katsayıları birlikte incelendiğinde, aşınma miktarlarının artışıyla sürtünme katsayısında bir gerileme olduğu ve borlama sonrası sürtünme katsayısında bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Literatürde Ti6Al4V alaşımı ile ilgili yapılan aşınma davranışı çalışmasında, Lei ve arkadaşları aşınma testinde kayıp miktarı arttıkça sürtünme katsayısında bir gerileme meydana geldiğini tespit etmişlerdir [112]. Çizelge 5.11'de aşınma testi uygulamasında elde edilen kayıp miktarı ve sürtünme katsayısı değerleri paylaşılmıştır.

Çizelge 5.11. Aşınma Testi Sonuçları.

Yük (N)	Mesafe (m)	Numune	Kayıp (g)	Sürtünme Katsayısı
10 N	50 m	800 Sinter	0,0021	0,0690
		1000 Sinter	0,0016	0,2853
		1200 Sinter	0,0012	0,1693
		1200 Sinter+Borlama	0,0008	0,1560
		Endüstriyel	0,0012	0,1708
		Endüstriyel+Borlama	0,0004	0,0931
	150 m	800 Sinter	0,0046	0,3370
		1000 Sinter	0,0040	0,3409
		1200 Sinter	0,0033	0,3800
		1200 Sinter+Borlama	0,0025	0,2900
		Endüstriyel	0,0028	0,2034
		Endüstriyel+Borlama	0,0023	0,1910
	250 m	800 Sinter	0,0064	0,1593
		1000 Sinter	0,0052	0,3001
		1200 Sinter	0,0048	0,3009
		1200 Sinter+Borlama	0,0042	0,3200
		Endüstriyel	0,0043	0,2800
		Endüstriyel+Borlama	0,0037	0,2070
20 N	50 m	800 Sinter	0,0042	0,2373
		1000 Sinter	0,0023	0,4246
		1200 Sinter	0,0018	0,3661
		1200 Sinter+Borlama	0,0011	0,3661
		Endüstriyel	0,0020	0,3378
		Endüstriyel+Borlama	0,0012	0,3130
	150 m	800 Sinter	0,0067	0,6979
		1000 Sinter	0,0047	0,5646
		1200 Sinter	0,0032	0,5062
		1200 Sinter+Borlama	0,0026	0,5062
		Endüstriyel	0,0039	0,3908
		Endüstriyel+Borlama	0,0035	0,3560

	250 m	800 Sinter	0,0084	0,6405
		1000 Sinter	0,0069	0,6047
		1200 Sinter	0,0059	0,5462
		1200 Sinter+Borlama	0,0052	0,5462
		Endüstriyel	0,0055	0,4430
		Endüstriyel+Borlama	0,0051	0,3448
	50 m	800 Sinter	0,0046	0,5651
		1000 Sinter	0,0034	0,9058
		1200 Sinter	0,0026	0,9025
		1200 Sinter+Borlama	0,0021	0,3820
		Endüstriyel	0,0035	0,4829
		Endüstriyel+Borlama	0,0029	0,0408
30 N	150 m	800 Sinter	0,0128	0,9737
		1000 Sinter	0,0094	0,8345
		1200 Sinter	0,0054	0,9355
		1200 Sinter+Borlama	0,0049	0,6324
		Endüstriyel	0,0075	0,5852
		Endüstriyel+Borlama	0,0049	0,6945
	250 m	800 Sinter	0,0155	0,8966
		1000 Sinter	0,0142	0,7011
		1200 Sinter	0,0137	0,7994
		1200 Sinter+Borlama	0,0097	0,7636
		Endüstriyel	0,0088	0,5160
		Endüstriyel+Borlama	0,0082	0,5770

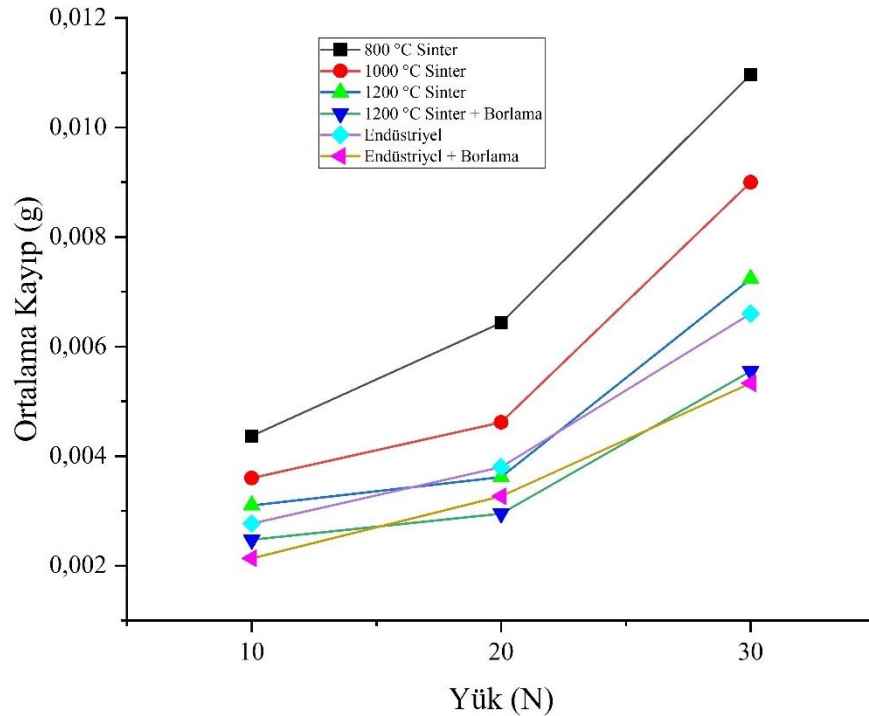
Çizelge 5.12’de farklı numunelerin ortalama kayıp (g) miktarları ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri paylaşılmıştır.

Çizelge 5.12. Aşınma Testi Ortalama Sonuçları.

Numune	Kayıp (g)	Sürtünme Katsayısı
800 Sinter	0,0073	0,5085
1000 Sinter	0,0057	0,5513

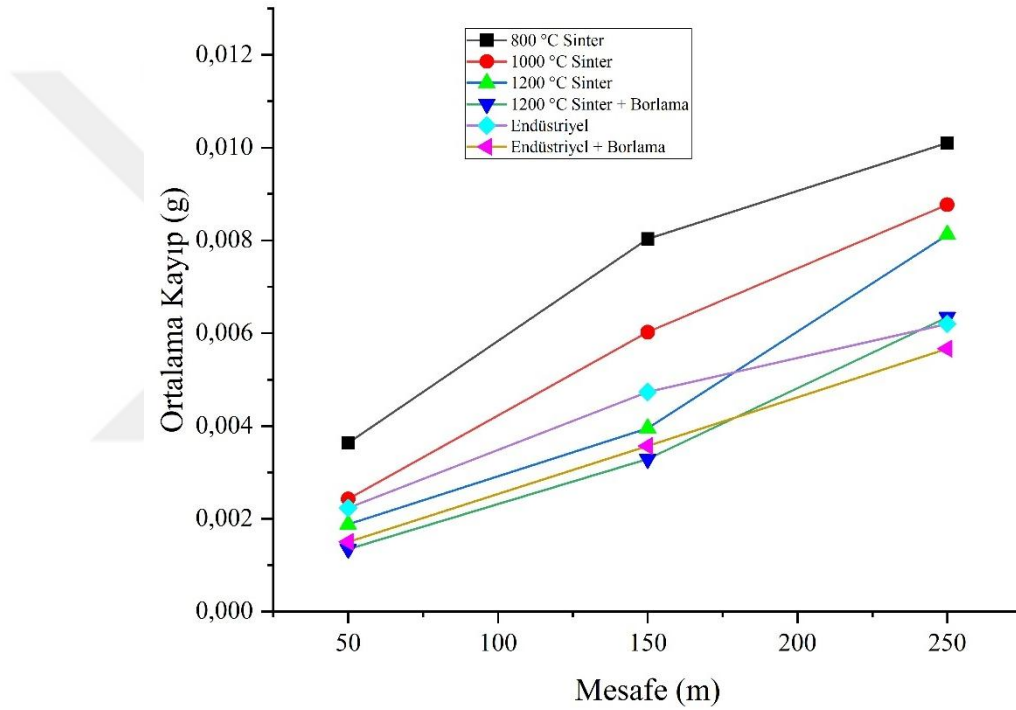
1200 Sinter	0,0047	0,5451
1200 Sinter+Borlama	0,0037	0,4403
Endüstriyel	0,0044	0,3789
Endüstriyel+Borlama	0,0036	0,3130

Farklı yükler altında yapılan aşınma testlerinde belirgin olarak yük (N) miktarı artışı, aşınma miktarının artmasına sebep olmuştur. Ayrıca borlanmış numuneler en iyi aşınma davranışı gösterirken 800 °C sinter sıcaklığında üretilmiş numune tüm yükler altında en fazla miktarda aşınma göstermiştir. Literatürde Molinari ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Ti6Al4V alaşımına uygulanan yük arttıkça aşınma miktarının arttığı görülmektedir [113]. Ayrıca Atar tarafından yapılan çalışmada da benzer eğilim görülmüştür [114]. Şekil 5.27’de farklı yükler altında gerçekleşen ortalama kayıp miktarları paylaşılmıştır. Uygulama gerçekleştirilirken 3 farklı mesafe kullanıldığından (50,150,250 m) kayıp miktarları her numunenin ortalaması olarak hesaplanmıştır.



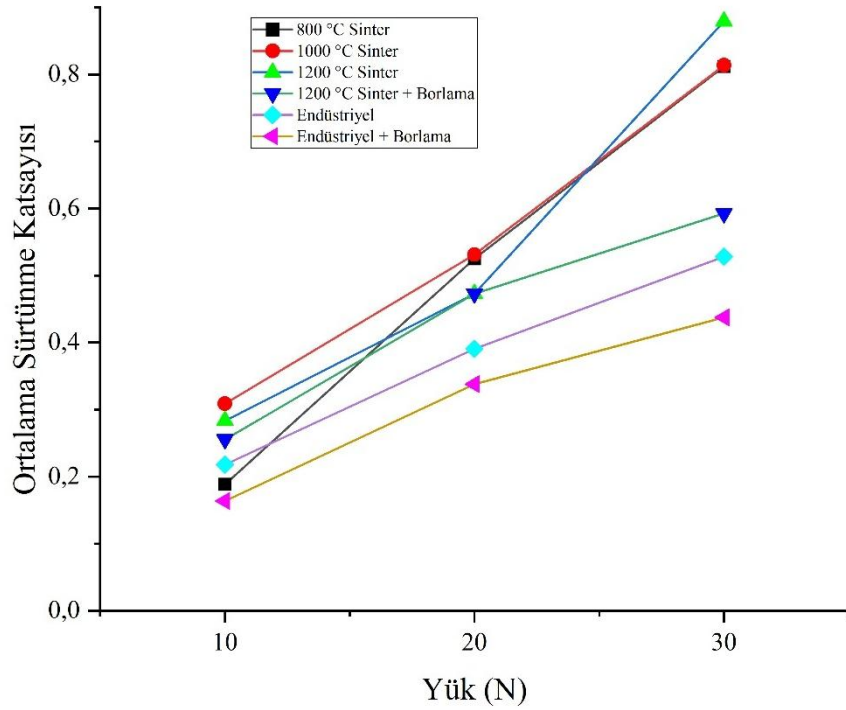
Şekil 5.27. Farklı yükler altında ortalama kayıp (50,150,250 m) miktarı.

Farklı mesafelerde yapılan aşınma testlerinde belirgin olarak mesafe (m) artışı, aşınma miktarının artmasına sebep olmuştur. Ayrıca borlanmış numuneler en iyi aşınma davranışı gösterirken 800 °C sinter sıcaklığında üretilmiş numune tüm yükler altında en olumsuz aşınma davranışı gösterdiği tekrar tespit edilmiştir. Yük ile benzer olarak literatürdeki çalışmalarda benzer şekilde mesafe artışının aşınma miktarını arttırdığı görülmektedir[113,114]. Şekil 5.28’de farklı mesafelerde gerçekleşen ortalama kayıp miktarları paylaşılmıştır. Uygulama gerçekleştirilirken 3 farklı yük kullanıldığından (10,20,30 N) kayıp miktarları her numunenin ortalaması olarak hesaplanmıştır.



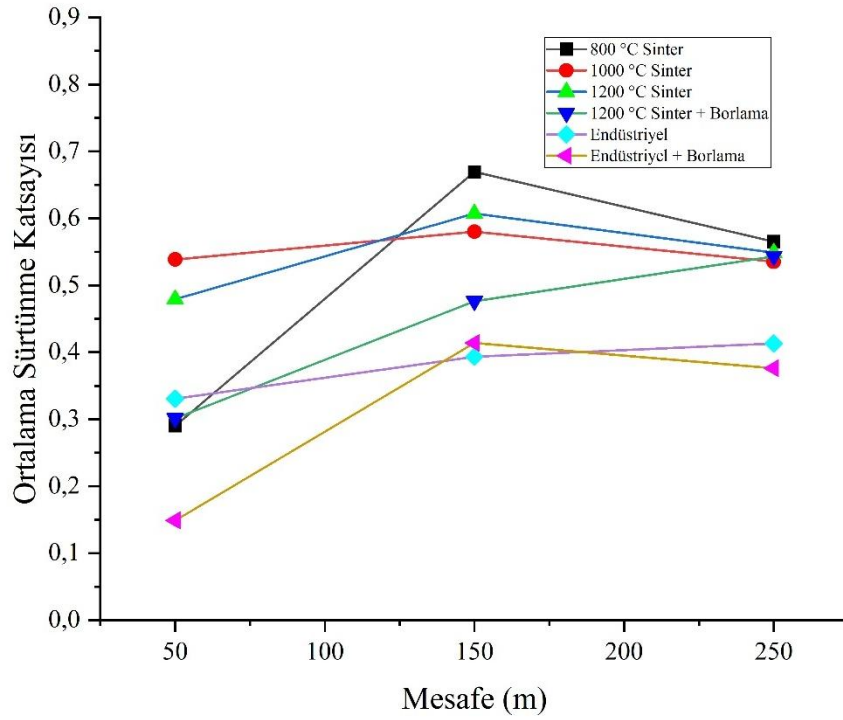
Şekil 5.28. Farklı mesafelerde ortalama kayıp (10,20,30 N) miktarı.

Farklı yükler altında yapılan aşınma testlerinde yük (N) artışı, belirgin bir sürtünme katsayısını artışına sebep olmuştur. Ayrıca endüstriyel üretilen numunelerde sürtünme katsayısının daha düşük eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde uygulanan yük miktarı arttıkça sürtünme kat sayısının arttığı görülmektedir. Guo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada uygulanan kuvvet 10N’dan 20’a çıkarıldığında sürtünme katsayısı yaklaşık 2 katına çıkmıştır [115]. Şekil 5.29’da farklı mesafelerde gerçekleşen ortalama kayıp miktarları paylaşılmıştır. Uygulama gerçekleştirilirken 3 farklı yük kullanıldığından (10,20,30 N) kayıp miktarları her numunenin ortalaması olarak hesaplanmıştır.



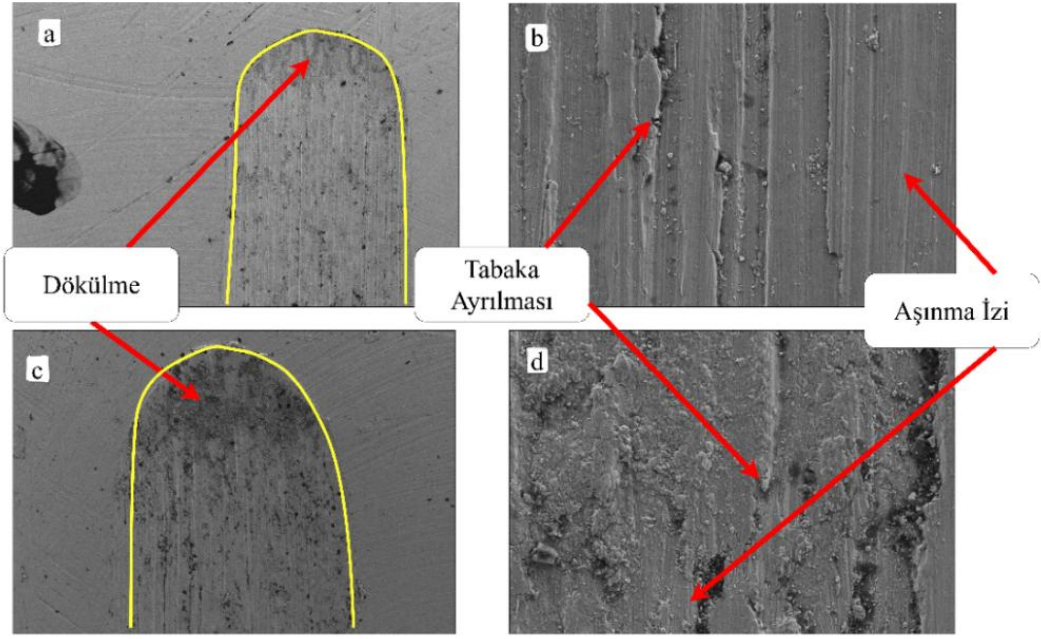
Şekil 5.29. Farklı yüklerde ortalama sürtünme katsayısı (50,150,250 m).

Farklı mesafelerde yapılan aşınma testlerinde mesafe (m) artışı, başlangıçta sürtünme kat sayısının bir miktar artmasına sonrası sabit kalmasına sebep olmuştur. Ayrıca endüstriyel üretilen numunelerde sürtünme katsayısının daha düşük eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Yapılan hesaplamalarda en düşük sürtünme katsayısı 0,3130 değeri ile borlanmış endüstriyel numunede tespit edilmişken en yüksek değer 0,5513 ile 1000°C sinter sıcaklığında üretilen toz metal numunede tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde Huang ve arkadaşları tarafından Ti6Al4V alaşımı için yapılan çalışmada, sürtünme katsayısı 0,3 ile 0,6 arası değerlerde olduğu ve hesaplanan değerler ile benzerlik göstermektedir [116]. Şekil 5.30'da farklı mesafelerde gerçekleşen ortalama kayıp miktarları paylaşılmıştır. Uygulama gerçekleştirilirken 3 farklı yük kullanıldığından (10, 20, 30 N) kayıp miktarları her numunenin ortalaması olarak hesaplanmıştır.



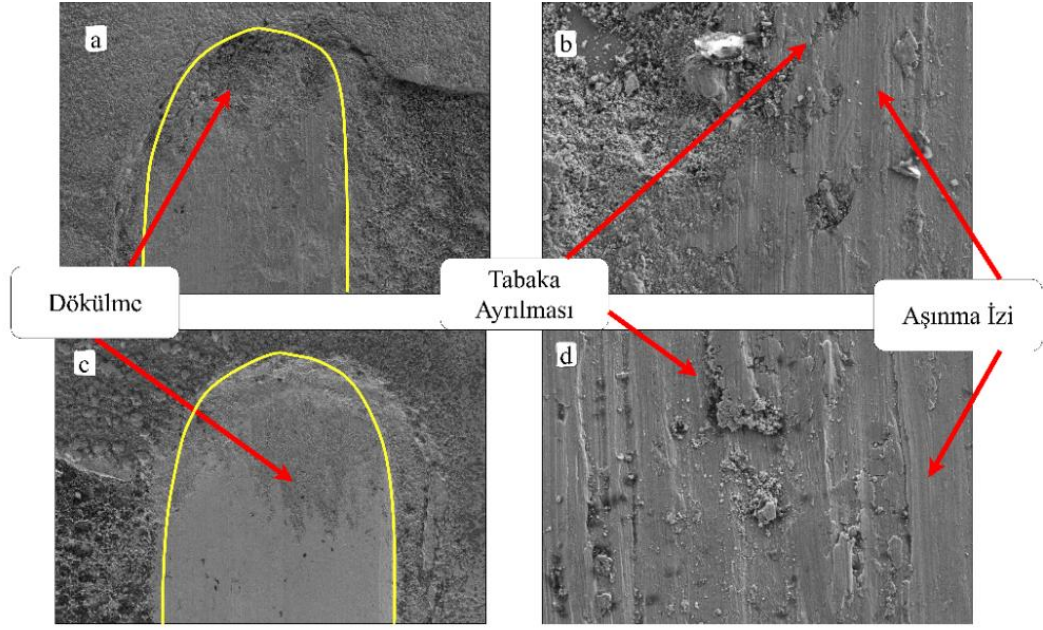
Şekil 5.30. Farklı mesafelerde ortalama sürtünme katsayısı (10,20,30 N).

Gerçekleştirilen aşınma testleri ile numunelerin tribolojik açıdan değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeleri anlamlı hale getirebilmek için aşınma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelemesi yapılmıştır. Aşınma mekanizmalarının doğru anlaşılabilmesi için her numunenin 10N ve 30N yük altında 250m mesafe ile aşındırılması sonucu elde edilen numuneler görüntülenmiştir. Yapılan görüntüleme işlemi ile tabaka ayrılmaları, dökülme ve aşınma izleri literatürdeki örneklerle benzer olarak belirlenmiştir [117,118]. Ti6Al4V alaşımı ile ilgili literatürdeki çalışmalarda belirgin bir şekilde tabaka ayrılması ve dökülmelerin olduğu tespit edilmiştir [119,120]. Şekil 5.31’de endüstriyel üretim olan Ti6Al4V alaşımının 10N ve 30N yük altında 250 m mesafede aşındırılması sonucu elde edilen aşınma mekanizmaları paylaşılmıştır. Yük artışı ile aşınma bölgesinde hasarlar büyümekte, yüksek aşınma izleri ve daha büyük tabaka ayrılması olduğu belirlenmiştir.



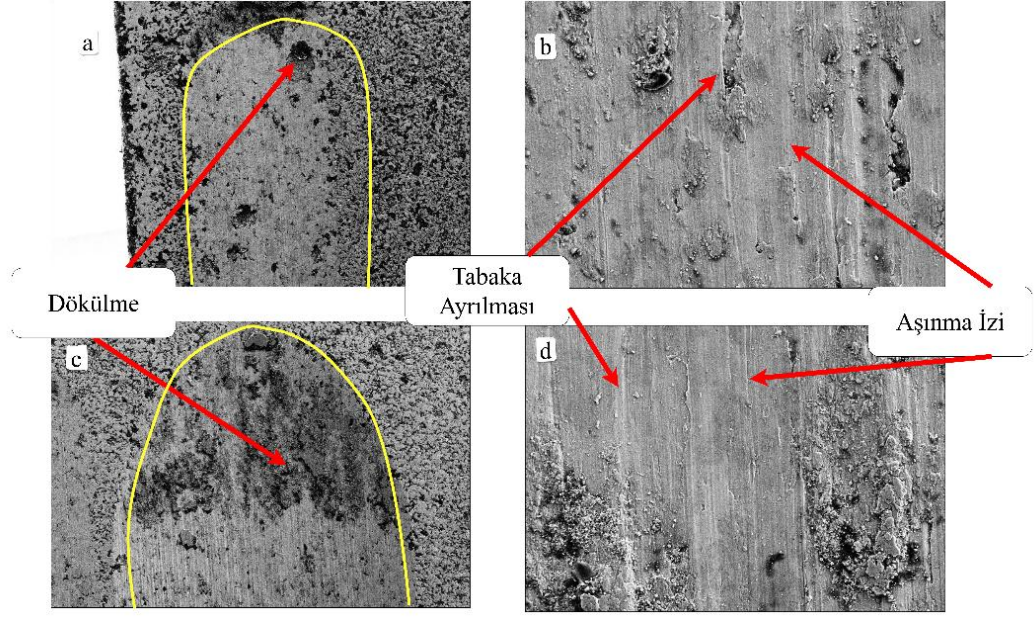
Şekil 5.31. Endüstriyel Ti6Al4V aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.

Şekil 5.32’de endüstriyel üretim olan ve borlanmış Ti6Al4V alaşımın 10N ve 30N yük altında 250 m mesafede aşındırılması sonucu elde edilen aşınma mekanizmaları paylaşılmıştır. Bor tabakasının aşınmayı engelleyici bir durum sergilediğini açıkça göstermektedir. Özellikle 10N yük altında bir miktar borlanmış tabakanın geçilemediği bölge olduğu, borlama tabakasının geçildiği bölgelerde ise borlanmamış numuneye göre daha az hasar olduğu görülmektedir. Uygulanan yükteki artış ile aşınma bölgesinde hasarlar büyümekte, yüksek aşınma izleri ve daha büyük tabaka ayrılımları olduğu görülmektedir.

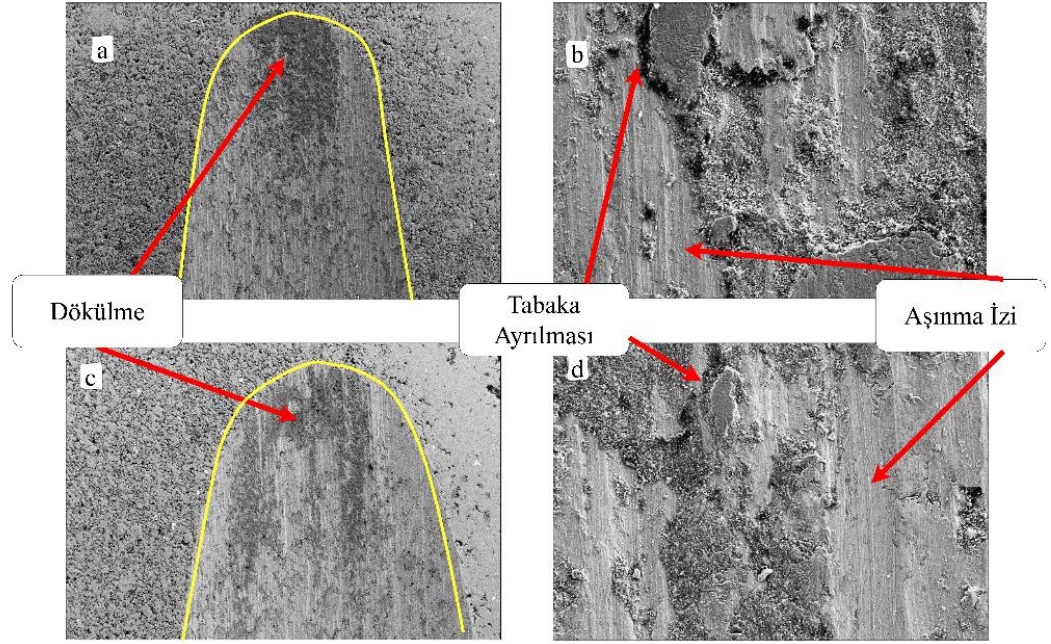


Şekil 5.32. Endüstriyel Ti6Al4V+borlame aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.

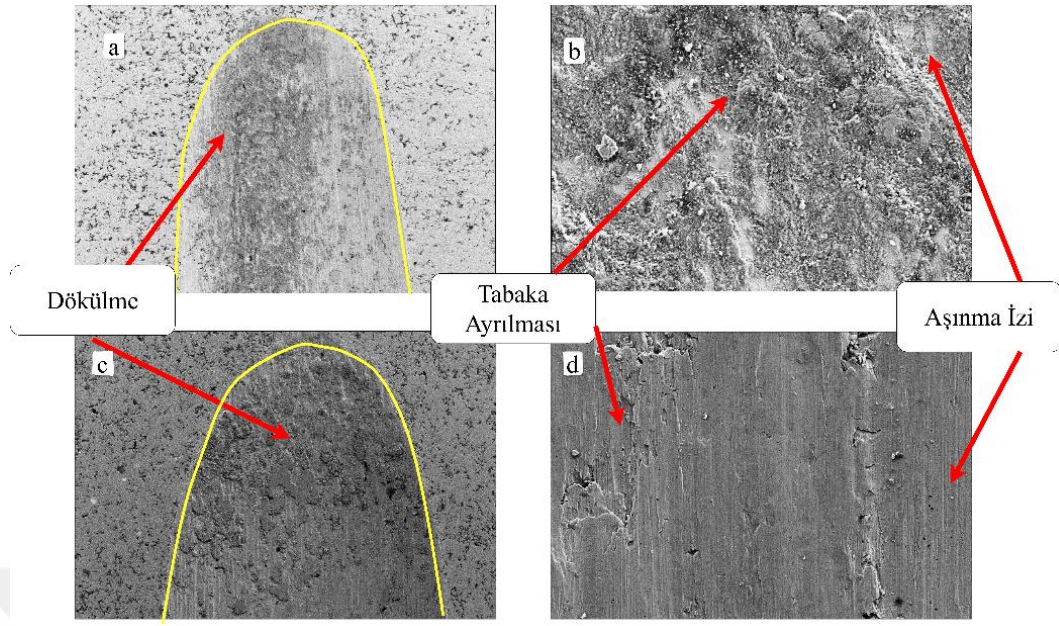
Şekil 5.33, 5.34 ve 5.35'te 800°C, 1000°C, 1200°C sinter sıcaklığında üretilmiş Ti6Al4V alaşımlarının 10N ve 30N yük altında 250 m mesafede aşındırılması sonucu elde edilen aşınma mekanizmaları paylaşılmıştır. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen numuneler incelendiğinde, numunelerin yüksek gözenek içermeleri aşınma yüzeylerinde beklenenden farklı yapıların meydana gelmesine neden olmuştur. 1200°C sinter sıcaklığına sahip toz metal numune en düşük aşınma miktarı sağlamış olmasına rağmen gözenekliliğin yüzeye yakın olmasından dolayı, aşınma başlangıç bölümünde yüksek oranda dökülme ve tabaka ayrılması durumu göstermiştir. Endüstriyel numuneye benzer olarak uygulanan yükteki artış ile aşınma bölgesinde hasarlar büyümekte, yüksek aşınma izleri ve daha büyük tabaka ayrılmaları olduğu görülmektedir.



Şekil 5.33. Toz metalürjisi ile 800°C sinter sıcaklığında üretilen Ti6Al4V aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.

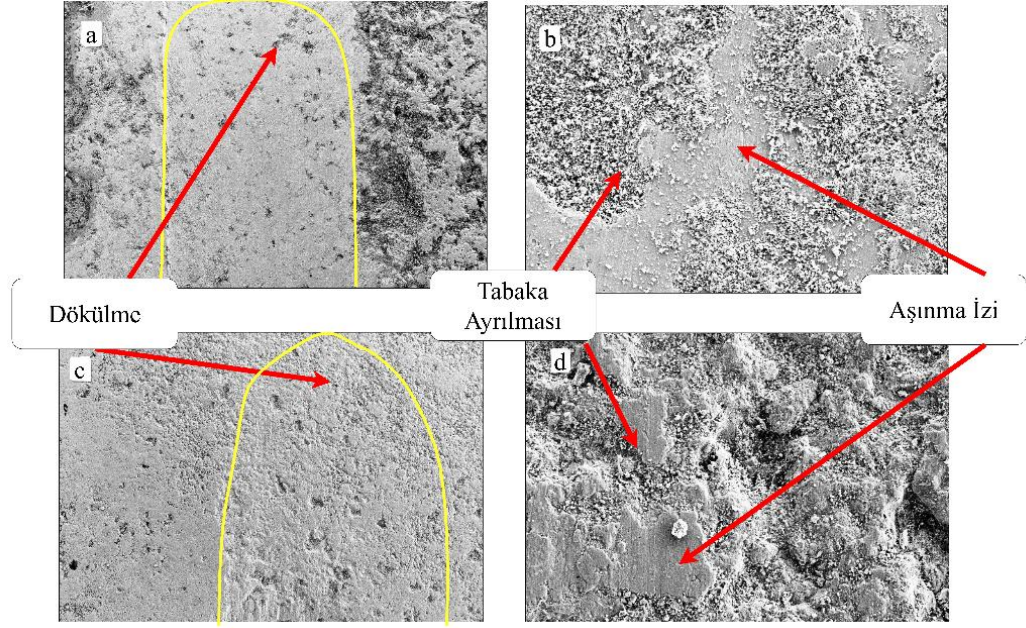


Şekil 5.34. Toz metalürjisi ile 1000°C sinter sıcaklığında üretilen Ti6Al4V aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.



Şekil 5.35. Toz metalürjisi ile 1200°C sinter sıcaklığında üretilen Ti6Al4V aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.

Şekil 5.36'da toz metalürjisi ile 1200°C sinter sıcaklığında üretilen ve borlanmış Ti6Al4V alaşımının 10N ve 30N yük altında 250 m mesafede aşındırılması sonucu elde edilen aşınma mekanizmaları paylaşılmıştır. Bor tabakasının toz metal numunede, endüstriyel numunenin borlanmasına benzer olarak aşınmayı engelleyici bir durum sergilediğini açıkça görülmektedir. Özellikle 10N yük altında bir miktar borlanmış tabakanın geçilemediği bölge olduğu, borlama tabakasının geçildiği bölgelerde ise borlanmamış numuneye göre daha az hasar olduğu görülmektedir. Yapılan diğer testlerde endüstriyel numunenin, toz metal numuneye göre daha homojen borlama özelliği göstermesi, tribolojik olarak incelemelerde de benzer durumu ortaya koymuş ve endüstriyel numuneye göre daha büyük tabaka ayrılımları ve düzensizlikler içeren aşınma davranışı sergilemiştir. Ayrıca diğer numunelerde de tespit edilen yük artışı ile aşınma bölgesinde hasarlar büyümekte, yüksek aşınma izleri ve daha büyük tabaka ayrılımları olduğu görülmektedir.



Şekil 5.36. Toz metalürjisi ile 1200°C sinter sıcaklığında üretilen Ti6Al4V+borlama aşınma testi SEM görüntüleri a,b) 10N, c,d) 30N.

Yapılan tüm incelemeler ve değerlendirmeler dikkate alındığında hem endüstriyel hem de toz metalürjisiyle üretilen numunelere uygulanan borlama işlemi, aşınma miktarını %18–22 oranında azaltarak belirgin bir iyileşme sağlamıştır. Toz metal numunelerde sinterleme sıcaklığı arttıkça aşınma miktarında azalma gözlenmiştir. En iyi performans 1200 °C sinter sıcaklığında elde edilmiştir. Yük (10N, 20N, 30N) ve mesafe (50m, 150m, 250m) arttıkça aşınma miktarı artmıştır. Özellikle 800 °C sinterli numunelerde bu artış en belirgin şekilde gözlenmiştir. Yük artışı sürtünme katsayısını artırırken, mesafe artışı başlangıçta bir yükselme sonrası sabit bir eğilime yol açmıştır. Ayrıca borlama işlemi sürtünme katsayısını genel olarak düşürmüştür.

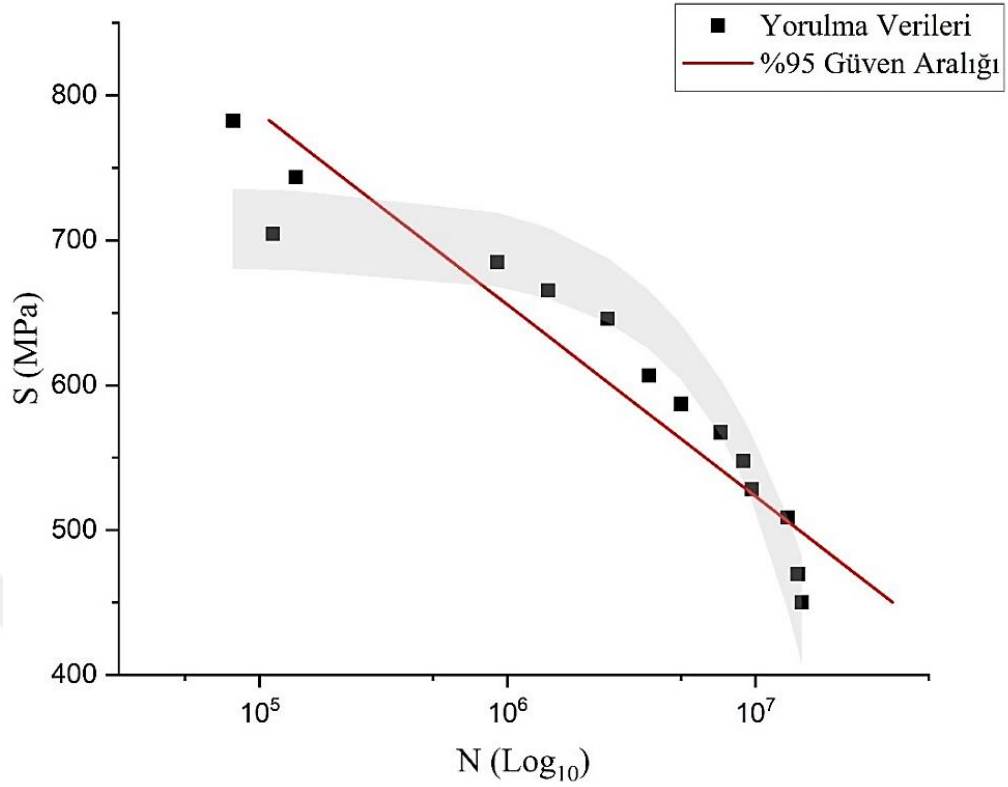
SEM görüntülerinde yük artışıyla birlikte yüzeyde daha yoğun tabaka ayrılması, dökülme ve derin aşınma izleri gözlenmiştir. Borlama, yüzey hasarını büyük ölçüde azaltmıştır. Toz metalürjisiyle üretilen numunelerde, gözeneklilik nedeniyle özellikle aşınma başlangıcında yoğun dökülme ve tabaka ayrılması oluşmuştur. Yapılan çalışma ile endüstriyel üretim yöntemi, borlama uygulaması ve yüksek sinterleme sıcaklığı gibi parametreler Ti6Al4V alaşımının tribolojik performansını anlamlı şekilde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

5.8. YORULMA TESTİ SONUÇLARI

Endüstriyel üretim Ti6Al4V alaşımının yorulma davranışını değerlendirmek amacıyla ISO 1143 standardına göre 4-nokta dönel eğilmeli yorulma testi gerçekleştirilmiş ve borlama işleminin bu davranış üzerindeki etkileri incelenerek hem yüksek çevrimli hem de düşük çevrimli yorulma çalışmaları kapsamlı şekilde ortaya koyulmuştur. Tüm deneyler sabit 20 Hz frekansta ve ISO 1143 standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.13'te Ti6Al4V alaşımının 4-nokta dönel eğilmeli yorulma testlerine ait kuvvet (F), karşılık gelen gerilme değerleri ve kırılmaya kadar geçen döngü sayısını (N) verileri paylaşılmıştır. Bu veriler, ASTM E739-91 doğrultusunda istatistiksel olarak analiz edilerek standartta geçen %95 güven aralığı eğrisi çizilerek hesaplanmıştır. Şekil 5.37'de logaritmik eksenlerde çizilen bir S-N (Wöhler) eğrisi ile görseli paylaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, alaşımın yüksek gerilme seviyelerinde kısa ömürlü ancak 508 MPa altındaki gerilmelerde 10^7 çevrime kadar ulaşan bir dayanım sergilediğini ve alaşım için yorulma dayanım sınırı olduğunu göstermektedir. Bu davranış, Ti6Al4V alaşımının yorulma açısından öngörülebilir ve güvenilir bir performansa sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.13. Endüstriyel Ti6Al4V Yorulma Özellikleri.

Sıra	Frekans (Hz)	F (N)	Gerilme (MPa)	N	Kopma
1	20	39,24	782,74	$7,8 \times 10^4$	Koptu
2	20	37,28	743,6	$1,4 \times 10^5$	Koptu
3	20	35,32	704,46	$1,13 \times 10^5$	Koptu
4	20	34,33	684,89	$9,07 \times 10^5$	Koptu
5	20	33,35	665,32	$1,46 \times 10^6$	Koptu
6	20	32,37	645,75	$2,54 \times 10^6$	Koptu
7	20	30,41	606,62	$3,72 \times 10^6$	Koptu
8	20	29,43	587,03	$5,01 \times 10^6$	Koptu
9	20	28,45	567,48	$7,24 \times 10^6$	Koptu
10	20	27,47	547,91	$8,93 \times 10^6$	Koptu
11	20	26,49	528,34	$9,64 \times 10^6$	Koptu
12	20	25,51	508,78	$1,35 \times 10^7$	Kopmadı
13	20	23,54	469,64	$1,48 \times 10^7$	Kopmadı
14	20	22,56	450,07	$1,54 \times 10^7$	Kopmadı

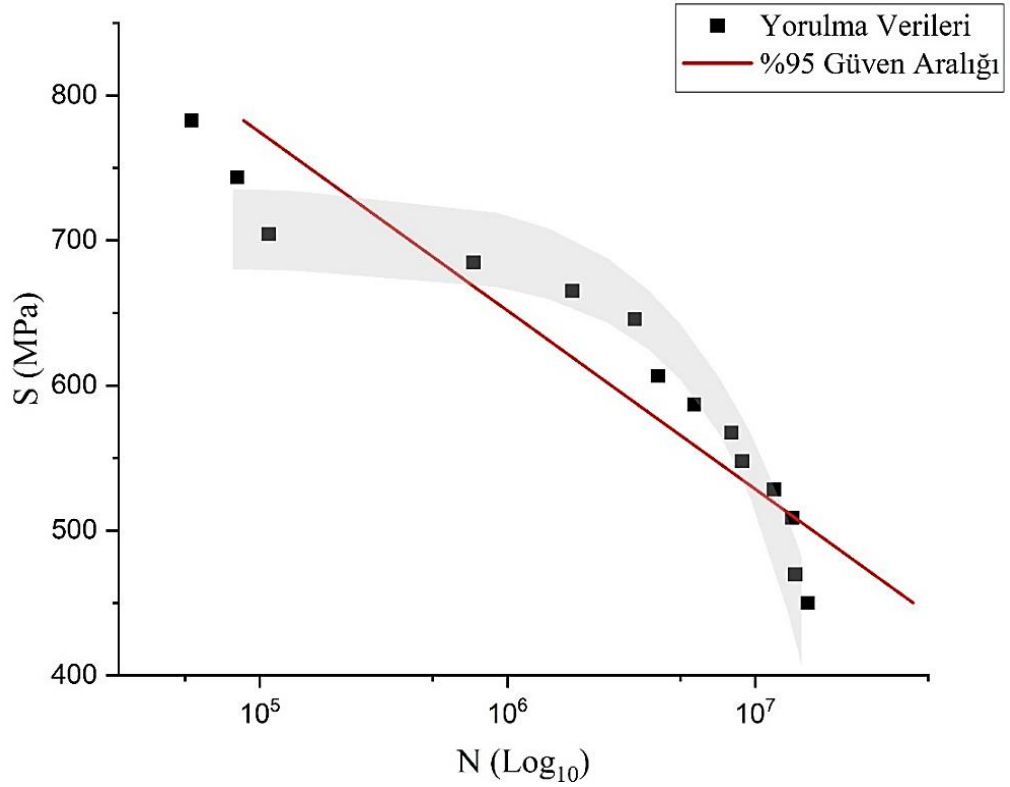


Şekil 5.37. Endüstriyel Ti6Al4V için oluşturulan Wöhler diyagramı.

Çizelge 5.14’te borlanmış Ti6Al4V alaşımının 4-nokta dönel eğilmeli yorulma testlerine ait kuvvet (F), karşılık gelen gerilme değerleri ve kırılmaya kadar geçen döngü sayısını (N) verileri paylaşılmıştır. Bu veriler, ASTM E739-91 doğrultusunda istatistiksel olarak analiz edilerek standartta geçen %95 güven aralığının eğrisi çizilerek hesaplanmıştır. Şekil 5.38’de logaritmik eksenlerde çizilen bir S-N (Wöhler) eğrisi ile görseli paylaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, alaşımın yüksek gerilme seviyelerinde kısa ömürlü ancak 528 MPa altındaki gerilmelerde 10^7 çevrime kadar ulaşan bir dayanım sergilediğini ve alaşım için yorulma dayanım sınırı olduğunu göstermektedir. Bu davranış, borlanmış Ti6Al4V alaşımının yorulma açısından öngörülebilir ve güvenilir bir performansa sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.14. Endüstriyel Ti6Al4V + Borlamanın Yorulma Özellikleri.

Sıra	Frekans (Hz)	F (N)	Gerilme (MPa)	N	Kopma
1	20	39,24	782,74	$5,3 \times 10^4$	Koptu
2	20	37,28	743,6	$8,12 \times 10^4$	Koptu
3	20	35,32	704,46	$1,09 \times 10^5$	Koptu
4	20	34,33	684,89	$7,29 \times 10^5$	Koptu
5	20	33,35	665,32	$1,83 \times 10^6$	Koptu
6	20	32,37	645,75	$3,27 \times 10^6$	Koptu
7	20	30,41	606,62	$4,06 \times 10^6$	Koptu
8	20	29,43	587,03	$5,67 \times 10^6$	Koptu
9	20	28,45	567,48	$8,01 \times 10^6$	Koptu
10	20	27,47	547,91	$8,87 \times 10^6$	Koptu
11	20	26,49	528,34	$1,19 \times 10^7$	Kopmadı
12	20	25,51	508,78	$1,41 \times 10^7$	Kopmadı
13	20	23,54	469,64	$1,45 \times 10^7$	Kopmadı
14	20	22,56	450,07	$1,63 \times 10^7$	Kopmadı

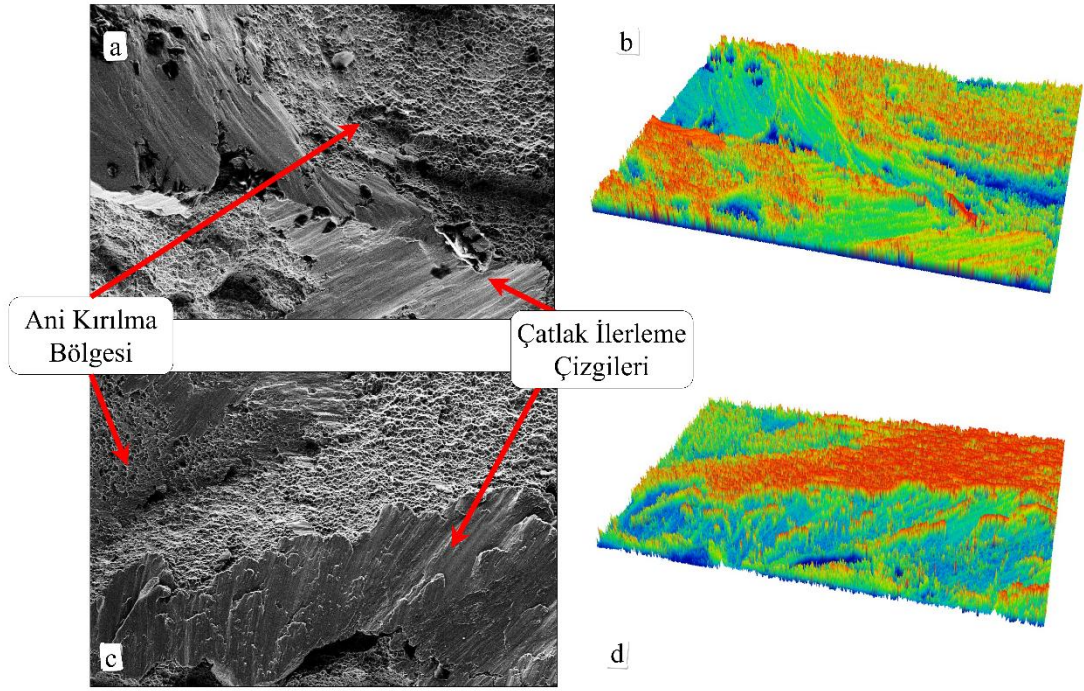


Şekil 5.38. Endüstriyel Ti6Al4V + borlama için oluşturulan Wöhler diyagramı.

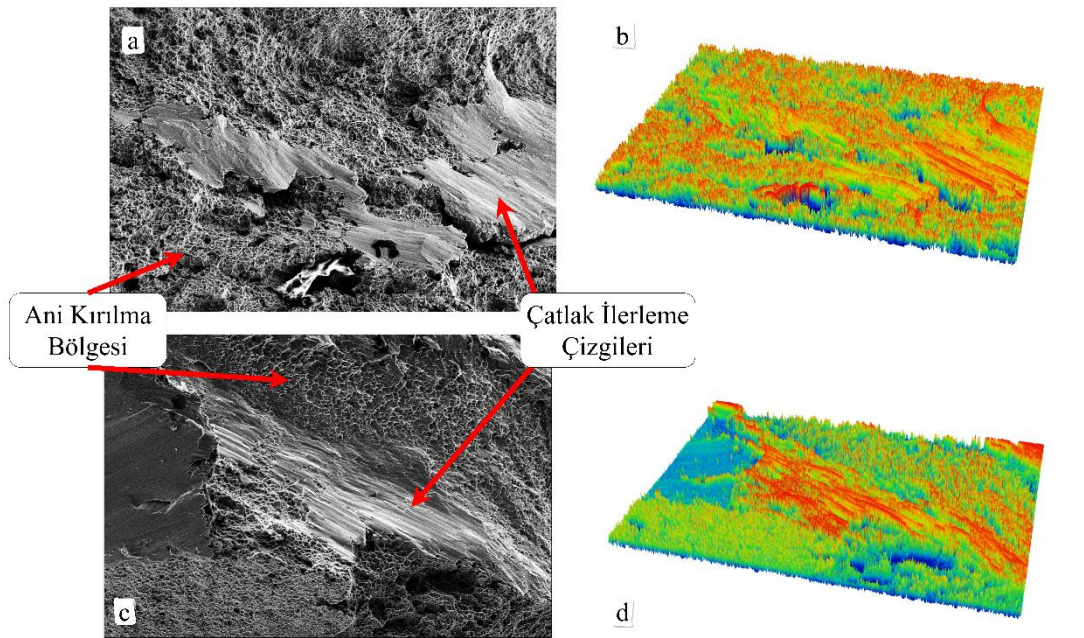
Borlama işlemi, Ti6Al4V alaşımı üzerinde çekme dayanımının yaklaşık %6 oranında azalması ve sertlik değerinin yaklaşık %9 arttırmasını sağlamıştır. Özellikle borlanmış numunenin ana metal bölgesinden borlama tabakasına doğru alınan mikrosertlik değerlerindeki artışlar sonucu yorulma davranışında önemli bir parametre olan yüzey mekanik özelliklerinde değişime sebep vermiştir. Bu değişim borlama öncesi ve sonrası yorulma davranışında değişimlere neden olmuştur.

Borlama işlemi ile birlikte yüzeyde TiB ve TiB₂ gibi sert ve kırılgan fazların oluşmasına sebep olmuştur [121]. Bu durum literatürdeki örneklerde olduğu gibi yüzey sertliğinin artmasına ve yüzey çatlaklarının ilerlemesinin bir miktar engellenmesine sebep olmuştur [122]. Fakat bu sertlik artışı daha gevrek bir yüzey elde edilmesini sağlamış mikro çatlak oluşum ihtimalinin artmasına sebep vermiştir [123]. Gerçekleşen iç yapıdaki bu durumlar yapılan yorulma testinden elde edilen; yüksek çevrimli yorulmada yorulma ömrünün artması ve düşük çevrimli yorulmada yorulma ömrünün azalması sonuçlarını ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Gerçekleştirilen yorulma davranışı testleri sonucu elde edilen numunelerden yorumlama yapılması adına kritik olan numuneler taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile görüntülenerek fraktografi çalışması yapılmıştır. Yapılan fraktografi çalışması ile oluşan kırılma mekanizmaları, kırık yüzey morfolojisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca alınan görüntülerden 3D yüzey topografyası çıkarılmış ve analiz edilmiştir. Ayrıca fraktografi ile çatlak ilerleme çizgileri (beach marks), ani kırılma (kaba kırılma) bölgeleri, mikroyapıdan kaynaklı ikincil çatlak/boşluklar literatürdeki örneklere benzer olarak incelenmiştir [124,125]. Şekil 5.39 ve 5.40'ta düşük gerilme ve nispeten yüksek çevrim sayılarında kopan numunelerin görüntüleri ve 3D yüzey topografyaları paylaşılmıştır.

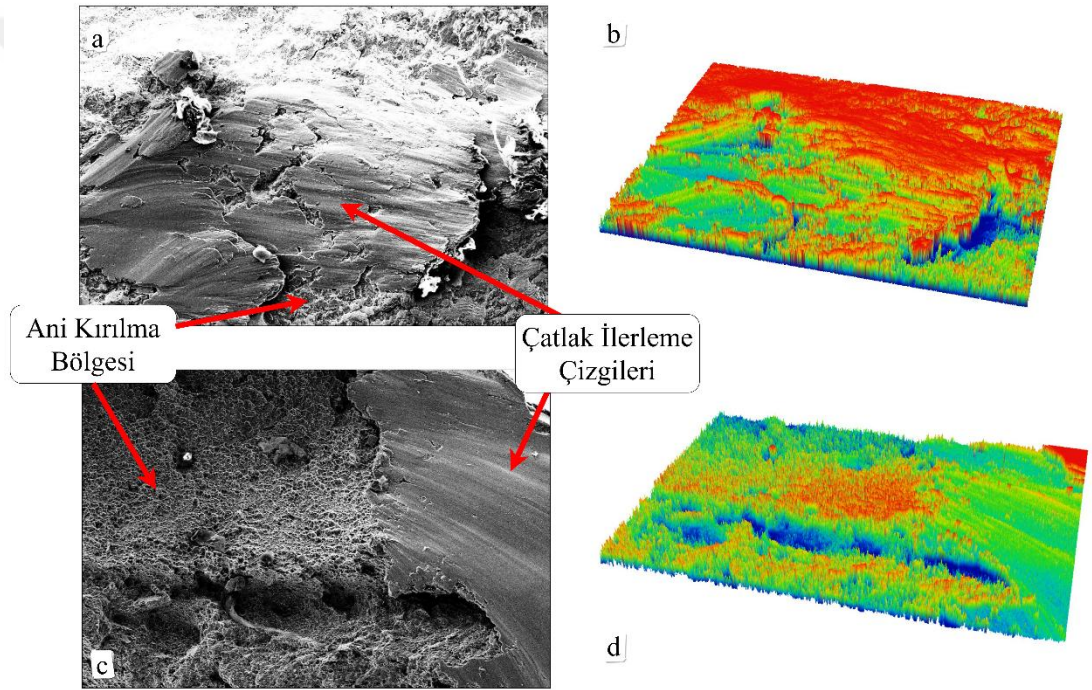


Şekil 5.39. 547.91 Mpa gerilme sonucu kopan yorulma numuneleri görüntüleri ve 3D yüzey topografyaları a,b) Endüstriyel Ti6Al4V, c,d) Endüstriyel Ti6Al4V + borlama.

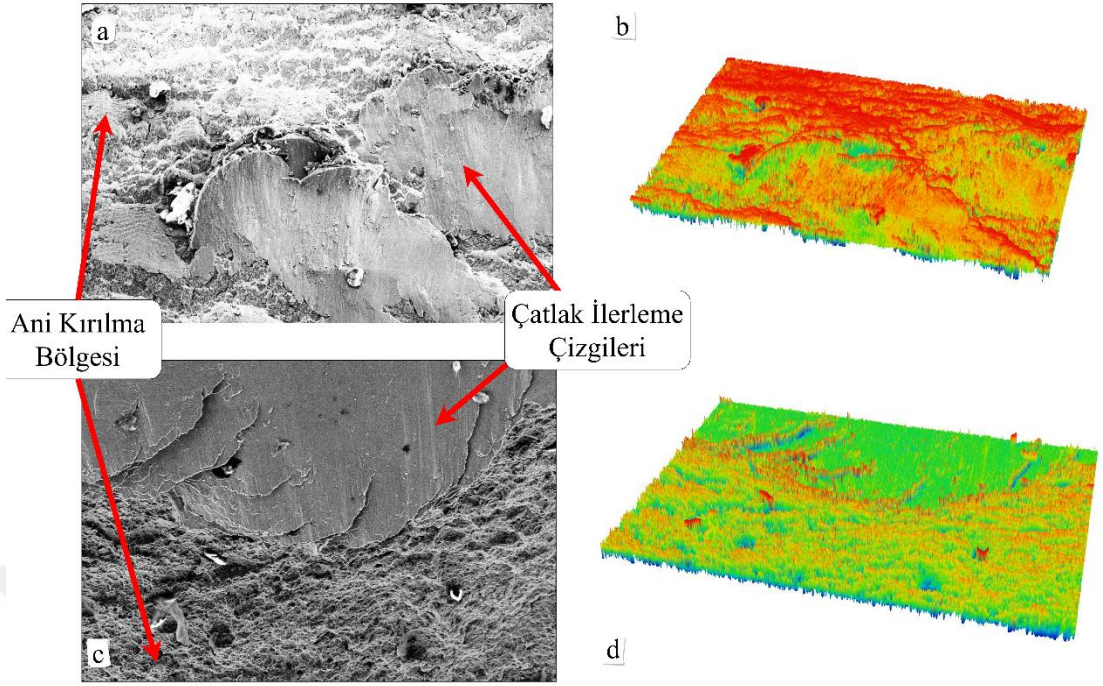


Şekil 5.40. 567.48 Mpa gerilme sonucu kopan yorulma numuneleri görüntüleri ve 3D yüzey topografyaları a,b) Endüstriyel Ti6Al4V, c,d) Endüstriyel Ti6Al4V + borlama.

Paylaşılan görseller, düşük gerilme altında test edilen numunelere aittir ve bu numuneler arasında karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda, endüstriyel Ti6Al4V alaşımında çatlak ilerleme çizgilerinin daha derin ve değişken olduğu gözlemlenmiştir. Borlanmış numuneye ait görüntülerde ise daha homojen bir ilerleme yapısı dikkat çekmektedir. Bu gözlemler, endüstriyel Ti6Al4V numunesinin düşük gerilmede daha gevrek kırılma davranışı gösterdiğine, borlanmış numunenin ise daha sünek kırılma karakteristiği taşıdığına işaret etmektedir. Şekil 5.41 ve 5.42’de yüksek gerilme ve nispeten düşük çevrim sayılarında kopan numunelerin görüntüleri ve 3D yüzey topografyaları paylaşılmıştır.



Şekil 5.41. 743.6 Mpa gerilme sonucu kopan yorulma numuneleri görüntüleri ve 3D yüzey topografyaları a,b) Endüstriyel Ti6Al4V, c,d) Endüstriyel Ti6Al4V + borlama.



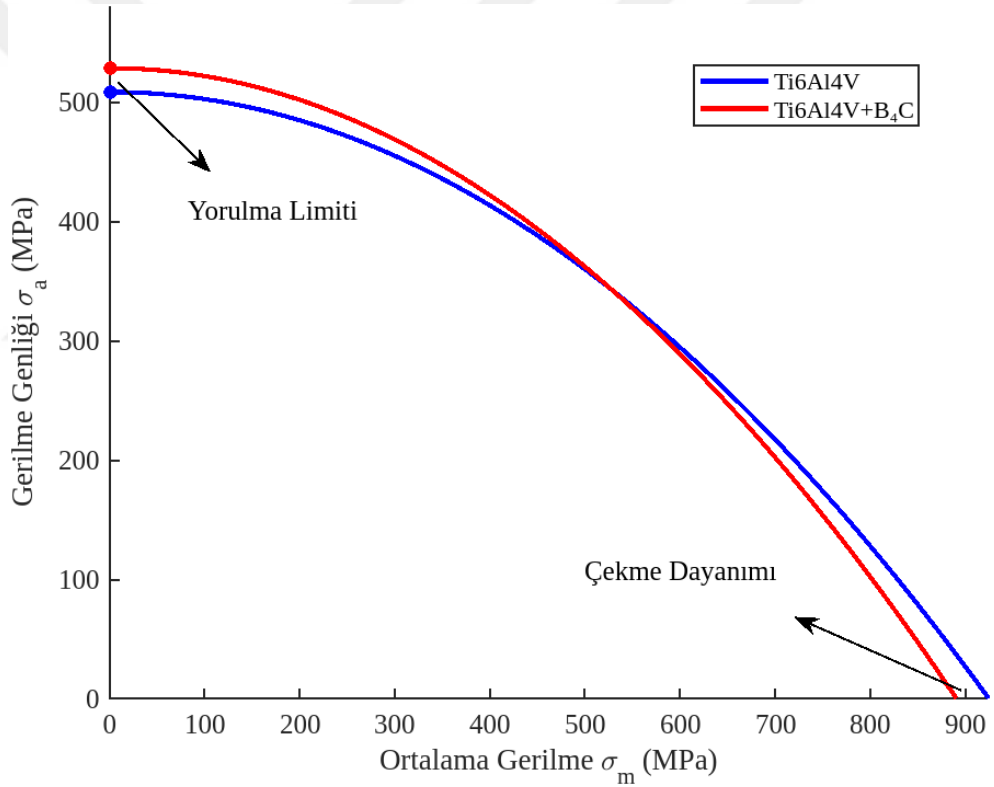
Şekil 5.42. 782.4 Mpa gerilme sonucu kopan yorulma numuneleri görüntüleri ve 3D yüzey topografyaları a,b) Endüstriyel Ti6Al4V, c,d) Endüstriyel Ti6Al4V + borlama.

Paylaşılan görsellerde yüksek gerilme altında test edilen numuneler ele alınmıştır. Karşılaştırmalı analiz sonucunda, borlanmış numunede daha derin ve düzensiz çatlak ilerleme çizgilerinin bulunduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, endüstriyel Ti6Al4V alaşımına ait görüntülerde çatlak ilerlemesinin daha homojen ve düzenli olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, borlanmış numunenin yüksek gerilme koşulları altında daha gevrek bir kırılma davranışı sergilediğini, endüstriyel numunenin ise sünek bir kırılma karakteristiği gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Fraktografik incelemeler sonucunda elde edilen genel değerlendirmeye göre; borlanmış numunenin yüzeyinde meydana gelen sertleşme ve bu yüzeyde oluşan TiB ve TiB₂ gibi fazların, malzemenin gevrekliğini artırdığı anlaşılmaktadır. Bu artış, mikro çatlak oluşum ihtimalinin yükselmesine neden olmakla birlikte, yüzeyde oluşan çatlakların ilerlemesinin belirli ölçüde engellendiği de tespit edilmiştir. Bu bulgular, borlama işleminin yüksek çevrimli yorulma koşullarında yorulma ömrünü artırabileceğini, buna karşın düşük çevrimli yorulma koşullarında ise yorulma ömrünü azaltabileceğini ortaya koymaktadır.

5.8.1. Yüksek Çevrimli Yorulma (S-N) Sonuçları

Yüksek çevrimli yorulma (stress life fatigue) çalışması, gerçekleştirilen yorulma davranışı testleri ve çekme testleri sonrası elde edilen yorulma limiti ve çekme dayanımı verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma da Gerber metodu kullanılarak, gerilme genliği ve ortalama gerilme değerleri hesaplanmıştır. Şekil 5.43'te Gerber metodu kullanılarak çizilen gerilme genliği- ortalama gerilme diyagramı paylaşılmıştır. Gerilme genliğinin eksenini kesen noktalar malzemelerin yorulma limitini ve ortalama gerilme eksenini kesen noktalar malzemelerin çekme dayanımı verilerini ifade etmektedir.



Şekil 5.43. Ti6Al4V ve Ti6Al4V + borlama numuneleri için gerçekleştirilen Gerber metodu uygulaması.

Şekilde paylaşılan Gerber eğrisi yüksek çevrimli yorulma davranışın incelenmesi için bizlere anlamlı veriler paylaşmaktadır. Eğrinin altında kalan bölüm yorulma davranışı açısından güvenli bölgeyi ifade ederken, eğrinin üstünde kalan bölge güvenli olmayan bölgeyi ifade etmektedir. Eğri üzerindeki noktalar ise teorik olarak sınır bölgeleri

açıklar. Literatürde yapılan farklı çalışmalar incelendiğinde Gerber metodu kullanılarak yorulma davranışı incelemeleri yapılmıştır. Wu tarafından yapılan çalışmada bir krank mili tasarımı Gerber metodu ile tahmin edilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır [126]. Ayrıca Goodman ve Soderberg metodlarında aynı makalede kullanılmış ve en az hata oranı Gerber metodunda tespit edilmiştir. Yapılan bir diğer çalışmada otomotiv yapısal çeliğinin yüksek çevrim yorulma davranışı, Gerber ve Goodman yöntemleri ile analiz edilmiştir. Gerber yöntemi ile elde edilen yorulma limiti ve S-N eğrisi eğimi daha doğru bulunmuştur [127]. Diğer bir çalışmada cam elyaf takviyeli alüminyum (GLARE 2) kompozitinde yüksek çevrim yorulma ömrü tahmini için Gerber ve Goodman modelleriyle inceleme yapılmış ve Gerber modeli, yüksek çevrim yorulma bölgesinde iyi sonuçlar vermiştir [128]. Bu durumlar Gerber metodunun seçimini doğrular niteliktedir.

5.8.2. Düşük Çevrimli Yorulma (ϵ -N) Sonuçları

Düşük çevrimli yorulma (strain life fatigue) yüksek gerilme ile elastik ve plastik deformasyon içeren ve malzemenin akma sınırının üzerinde uygulanan gerilmelerle ilgili sonuçlar elde edebilmek için kullanılır. Uygulanan gerilmeler kalıcı şekil değiştirme sonucu ortaya çıkarmasından dolayı ϵ -N (gerinim-ömür) eğrisi çizilir. ϵ -N eğrisini tanımlamak için kullanılan en yaygın yöntem Coffin- Monson – Morrow yöntemi kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Yorulma gerinim kat sayısı (ϵ_f') ve yorulma gerilim kat sayısı (σ_f') değerinin hesaplanabilmesi için kullanılan Coffin-Monson– Morrow denklemi için yorulma gerilim üssü (b) ve yorulma gerinim üssü (c) değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu değerlerin hesaplanması için ihtiyaç duyulan gerinim sertleşme katsayısı (n') literatürde yapılan Ti6Al4V alaşımı çalışmalarında bulunan 0.017 değeri olarak alınmıştır [129,130]. Ayrıca elastikiyet modülü (E) yapılan çekme testi sonuçları elde edilen gerilim, gerinim diyagramından faydalanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.15'te düşük çevrimli yorulma için belirlenen yorulma parametreleri paylaşılmıştır.

Çizelge 5.15. Ti6Al4V Düşük Çevrimli Yorulma Parametreler.

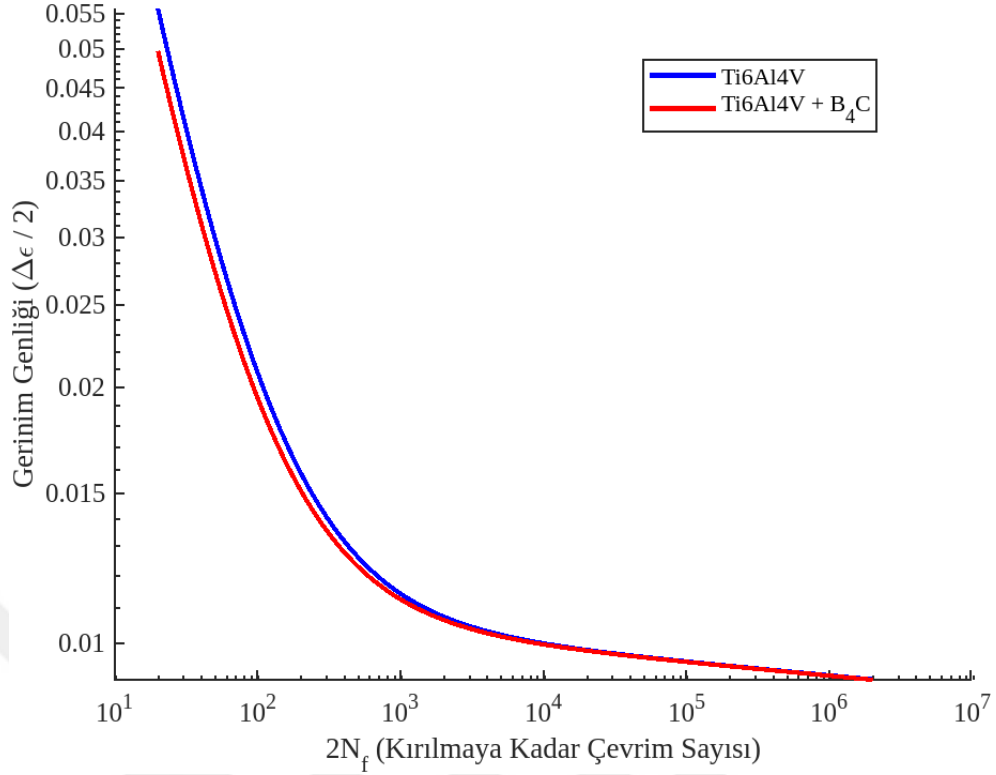
	Ti6Al4V	Ti6Al4V+B ₄ C
Çekme dayanımı (σ_c)	924 MPa	890 MPa
Elastikiyet Modülü (E)	115 GPa	112 GPa
Vickers Sertlik Değeri (H_V)	289	317
Brinell Sertlik Değeri (H_B)	274	301
Gerinim Sertleşme Katsayısı (n')	0.017	0.017

İlgili parametreler, Coffin- Monson– Morrow denklemlerinde kullanılarak Çizelge 5.16’da paylaşılan düşük çevrimli yorulma değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 5.16. Ti6Al4V Düşük Çevrimli Yorulma İçin Hesaplanan Değerler.

	Ti6Al4V	Ti6Al4V+B ₄ C
Gerilim Kat Sayısı ($\sigma_{f'}$)	1305.96 MPa	1270.6 MPa
Gerilim Üssü (b)	-0.01567	-0.01567
Gerinim Kat Sayısı ($\epsilon_{f'}$)	0.0007094	0.0006383
Gerinim Üssü (c)	-0.92166	-0.92166

Yapılan hesaplamalar sonucu, ilgili denklemler kullanılarak ϵ -N (gerinim-ömür) eğrisi çizilmiştir. Şekil 5.44’te ϵ -N eğrisi paylaşılmıştır.



Şekil 5.44. Ti6Al4V ve Ti6Al4V + borlama numuneleri için ϵ -N eğrisi.

Gerilim kat sayısı ($\sigma_{f'}$) Ti6Al4V alaşımının düşük çevrimli yorulma analizinde hesaplanan değeri 1305.96 MPa iken, borlama sonrası elde edilen numunede bu değer 1270.6 MPa düşmüştür. Bu parametre, malzemenin yüksek gerilim düzeylerinde plastik deformasyon oluşturmada taşıyabileceği maksimum gerilme kapasitesini ifade eder. Bu kapasite teorik bir değer olmakla beraber malzemeye uygulanan tersinir yüklerin toplamını ifade eder. Çevrimi tamamlarken malzemenin farklı yönlerde maruz kaldığı yüklerin toplamıdır. Gerilim kat sayısının borlanmış numunede azalmış olması, yüzeyde sertleşmeye rağmen yapının iç bölgelerinde gerilme birikimine karşı daha düşük bir dayanım barındırdığını işaret etmektedir. Bu azalma, borlama işlemi ile malzeme yüzeyinde oluşan sert ve gevrek fazların (örneğin TiB, TiB₂) çatlak başlatma eğilimini artırarak, düşük çevrimli yorulma ömrünü olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Ayrıca ϵ -N eğrisinde de kırmızı eğri (borlanmış numune) mavi eğriye göre daha düşük gerilim genliği seviyelerinde daha erken kırılma eğilimi göstermektedir. Bu durum, gerilim kat sayısı ($\sigma_{f'}$) değerindeki düşüşle uyumlu bir şekilde yorulma ömrünün kısaldığını ortaya koymaktadır. Literatürde yapılan çalışmada da Pt-Al kaplama yapılmış süper alaşım malzemede, benzer olarak

gerilim kat sayısı (σ_f') düşüşünün malzemenin düşük çevrim yorulmada dayanımının düştüğünü ortaya koymaktadır [131]

Gerinim kat sayısı (ϵ_f') değerinin borlama yapılmış numunede daha düşük olması, yapılan deneyler sonucu düşük çevrimli yorulmada yorulma ömrünün azalması sonucu ile tutarlı bir sonuç ortaya koymaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde düşük gerinim kat sayısı (ϵ_f') değerine sahip malzemelerin düşük çevrimli yorulmaya karşı dayanıklılığının düşük olduğunu ortaya koymuştur [132,133].

Sonuç olarak Ti6Al4V alaşımı ve borlanmış versiyonu düşük çevrimli yorulma davranışları Coffin–Manson–Morrow bağıntısı çerçevesinde değerlendirilmiş ve elde edilen parametreler ışığında yorulma eğrileri oluşturulmuştur. Gerilim kat sayısı (σ_f') ve gerinim kat sayısı (ϵ_f') gibi yorulma ömrünü doğrudan etkileyen parametrelerde borlama sonrası düşüş meydana gelmiştir. Bu durum, yüzeydeki kırılğan fazların çatlak başlatma eğilimini artırarak yorulma dayanımını olumsuz etkilediğini kanıtlar niteliktedir. Grafikte de görüldüğü üzere, borlanmış numune daha düşük gerinim seviyelerinde daha erken kırılmaya yönelmiş, bu da düşük çevrimli yorulmada ömrün kısaldığını doğrulamaktadır. Dolayısıyla, yüzey sertliğini artırsa da borlama işlemi, düşük çevrimli yorulma koşullarında Ti6Al4V alaşımının yorulma ömrünü olumsuz etkilemiştir.

5.9.GENEL BULGULAR ve TARTIŞMA

Yapılan çalışmada, endüstriyel olarak üretilen ve toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı termokimyasal kaplama işlemi olan kutu borlama ile kaplanmış ve hem üretim yöntemleri hem de borlama işlemleri detaylı olarak incelenmiştir.

Metalografik incelemelerde, endüstriyel şekilde üretilmiş Ti6Al4V alaşımı ile toz metalürjisi yöntemiyle üretilen numunelerin mikroyapısal özellikleri karşılaştırılmıştır. Her iki grup numune de borlama işlemi öncesi ve sonrası olmak üzere değerlendirilmiştir. Ayrıca toz metalürjisi ile üretilen numuneler, farklı sinterleme sıcaklıklarının etkileri açısından da kendi içerisinde değerlendirilmiştir.

Endüstriyel üretimli Ti6Al4V alaşımlarının borlama öncesinde ortalama tane boyutu 9.5 μm olarak belirlenirken, toz metalürjisi ile 800 °C, 1000 °C ve 1200 °C sinter sıcaklıklarında üretilen numunelerin ortalama tane boyutları sırasıyla 16.88 μm , 15.38 μm ve 9.8 μm olarak hesaplanmıştır. Bu durum, sinter sıcaklığı arttıkça tane boyutunun azaldığını ve daha kompakt bir mikroyapı elde edildiğini göstermektedir. Ancak 900 °C'de 15 saatlik borlama işlemi sonrası, toz metal numunelerde belirgin bir tane büyümesi meydana gelmiş, 1200 °C sinterlenmiş numunenin tane boyutu 18.9 μm 'e kadar yükselmiştir. Aynı işlemin endüstriyel numunede 15.2 μm 'lik bir tane boyutuna neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, borlama sırasındaki ısının tane yapısı üzerindeki etkisini ve endüstriyel numunenin ısıya daha stabil tepkiler verdiğini ortaya koymaktadır. SEM görüntülemelerinde, endüstriyel numunelerde yapının homojen olduğu, belirgin α ve β fazlarının lamelli yapıda bulunduğu ve çatlak, gözenek gibi kusurların mevcut olmadığı görülmüştür. Buna karşılık, toz metal numunelerde sinter sıcaklığı arttıkça faz ayrışmasının ve mikroyapı düzeninin arttığı, 1200 °C'de bu yapının endüstriyel numuneye yaklaştığı belirlenmiştir. Bununla birlikte borlama işlemi sonrası her iki tür numunede de TiB, TiB₂ ve TiC gibi sert çökeltilerin oluştuğu, ayrıca intermetalik fazların ve difüzyon bölgelerinin geliştiği tespit edilmiştir. Toz metal numuneler içerisinde karşılaştırma yapıldığında, 800 °C'de üretilen numunelerde yapının gözenekli ve tane boyutunun iri olduğu, buna karşılık 1200 °C sinterlemeyle birlikte hem düzenli yapının hem de homojen faz dağılımının sağlandığı anlaşılmıştır. Metalografik incelemeler sonucu, sinterleme sıcaklığının artırılması ile toz metal numuneler endüstriyel numunelere yaklaşan mikroyapılara ulaşmaktadır. Bununla birlikte borlama işlemi her iki yapıda da sert çökeltilerin oluşmasına katkı sağlarken, ısının etkisiyle tane büyümesi gibi mikroyapıyı olumsuz etkileyen durumlara da yol açabilmektedir.

Yoğunluk ölçümleri ile aynı kimyasal bileşime sahip endüstriyel ve toz metalürjisiyle üretilmiş Ti6Al4V alaşımlarının yoğunluk, bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri incelenmiştir. Teorik yoğunluk 4.4365 g/cm³ olarak belirlenmiş; deneysel yoğunluklar ise Arşimet prensibiyle hesaplanmıştır. Endüstriyel numuneler, %99'un üzerinde bağıl yoğunluk ile minimum gözenekliliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Borlama işlemi, bu numunelerde yoğunluğu hafif artırarak yapısal homojenliği desteklemiştir. Toz

metalürjisiyle üretilen numunelerde sinterleme sıcaklığının artışı ile birlikte yoğunluk ve bağıl yoğunluk değerlerinde belirgin artış gözlemlenmiştir. Ancak bağıl yoğunluk oranları %80–88,3 aralığında kalarak endüstriyel numunelere göre düşük kalmıştır. Bu durum, toz metalürjisi ile üretimin sorunları olarak karşımıza çıkmaktadır. Borlama işlemi toz metal numunede, yalnızca 1200 °C’de sinterlenmiş numuneye uygulanmış ve bu numunede yoğunluk artışı sağlamıştır. Yoğunluk ölçümleri ile hem üretim yönteminin değişimi hem de borlama işleminin, Ti6Al4V alaşımlarının yoğunluk ve dolayısıyla mekanik özellikleri üzerinde belirleyici olduğu anlaşılmaktadır.

Sertlik ölçümleri ile, endüstriyel ve toz metalürjisiyle üretilmiş Ti6Al4V alaşımlarında borlama işleminin Vickers sertliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ölçümler, 0.2 kgf yük ve 10 saniye süre ile gerçekleştirilmiş; her numunede ortalama beş ölçüm değeri alınarak ortalaması alınmıştır. Endüstriyel çubuk formdaki numunenin sertliği 289 HV iken, 900 °C’de 15 saat borlama sonrası bu değer %9 artışla 317 HV’ye yükselmiştir. Toz metalürjisiyle üretilen numunelerde sinterleme sıcaklığı arttıkça sertlik değerlerinin de arttığı gözlemlenmiş, en yüksek değer 399 HV ile 1200 °C sinter sıcaklığında tespit edilmiş ve borlama sonrası 447 HV olarak hesaplanmıştır. Bu, borlama işlemi ile %12’ye varan sertlik artışı sağladığını göstermektedir. Ayrıca borlanmış numunelerden alınan kesit boyunca sertlik analizlerinde, bor kaplama bölgesinden matrise doğru inildikçe sertliğin azaldığı görülmektedir. Endüstriyel borlanmış numunede yüzeyde 424 HV, matris bölgesinde 317 HV değerleri ölçülmüştür. Toz metalürjisiyle 1200 °C’de sinterlenen ve borlanan numunede ise yüzeyde 780 HV, matriste 380 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Bu durum, borlama tabakasının yüzeyde yüksek sertlik sağladığını göstermektedir. Sonuçlar, toz metalürjisiyle üretilmiş numunelerde sertlik değişiminin endüstriyel numunelere göre daha yüksek oranda olması (%12’ye karşılık %10), toz metalürjisi numunelerin daha gözenekli yapıda olması ve daha düşük homojenlik göstermesi ile ilgilidir. Endüstriyel numunelerdeki daha homojen geçiş ise, endüstriyel üretimin mikroyapısal tutarlılığını ve üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

Çekme testi ile, Ti6Al4V alaşımının endüstriyel üretim ve toz metalürjisi yöntemleriyle elde edilen numunelerin mekanik özellikler karşılaştırılmıştır. Endüstriyel çubuk formundaki numune, 790 MPa akma dayanımı, 924 MPa çekme

dayanımı ve %23,8 uzama değerleriyle en yüksek mekanik performansı sergilemiştir. Toz metalürjisiyle 1200 °C’de sinterlenen en iyi performanslı numune ise yalnızca 57 MPa akma dayanımı, 181 MPa çekme dayanımı ve %4,11 uzama göstermiştir. Diğer sinter sıcaklıklarında ise daha düşük değerler ölçülmüştür. Bu fark, toz metalürjisi ile üretilen numunelerde yoğun gözeneklilik ve mikroyapısal homojensizlik ile ilişkilidir. Borlama işlemi sonrası, endüstriyel numunede mekanik özelliklerde sınırlı azalma gözlemlenmiş ancak 1200 °C sinterlenmiş toz metal numunede borlama sonrası daha yüksek gerileme gözlemlenmiştir. Bu durum, borlama ile oluşan TiB ve TiB₂ gibi kırılğan fazların, özellikle toz metal numunelerde daha belirgin şekilde mekanik özellikleri olumsuz etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, uzama değerinde endüstriyel numunede yaklaşık %8, toz metal numunede ise %40’a varan düşüş gözlemlenmiştir. Çalışmada elde edilen veriler, endüstriyel üretimin üstünlüğünü ve toz metalürjisiyle üretilen malzemelerde sinterleme sıcaklığı ve gözeneklilik kontrolünün mekanik performans açısından kritik rol oynadığını ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, yüksek gözeneklilik içeren toz metalürjisiyle üretilmiş Ti6Al4V alaşım numunelerin çekme testinde yaşanan çentik etkisi nedeniyle sınırlı dayanım değerlendirmesi yapılabildiğinden, malzemelerin deformasyon altındaki enerji sönümleme kapasitesini daha sağlıklı analiz edebilmek amacıyla basma testi uygulanmıştır.

Basma testi uygulaması sonucu, endüstriyel üretimle elde edilen numune 1769 MPa basma dayanım göstererek en yüksek mukavemeti sergilemiştir. Toz metal numunelerden ise en iyi performansı gösteren 1200 °C’de sinterlenen numune 1083 MPa, 1000 °C’de sinterlenen numune 991 MPa, 800 °C’de sinterlenen numune ise 464 MPa basma dayanımına sahip olmuştur. Bu sonuçlar, çekme testinde olduğu gibi endüstriyel üretimin mekanik dayanım açısından açık bir üstünlüğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Borlama işlemi sonrası değerlendirilen örneklerde, endüstriyel numunenin basma dayanımı 1420 MPa olarak ölçülürken, 1200 °C’de sinterlenmiş toz metal numunenin dayanımı 892 MPa olarak ölçülmüştür. Bu azalma, yüzeyde oluşan kırılğan TiB ve TiB₂ fazların ve sert borür tabakasının basma dayanımı üzerinde de olumsuz etkiler yarattığını göstermektedir. Ayrıca borlama sonrası toz

metal numunenin, 1000 °C sinterli numuneden daha düşük basma dayanımı göstermesi, borlamanın mikroyapısal bütünlüğü bozabileceğini ve homojenlik eksikliğinin etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak hem üretim yöntemi hem de borlama gibi yüzey işlemlerinin, Ti6Al4V alaşımının basma dayanımı üzerinde doğrudan belirleyici olduğu tespit edilmiştir.

XRD analizi, endüstriyel olarak üretilmiş ve 1200 °C’de sinterlenmiş Ti6Al4V alaşımı numuneleri ile bu numunelerin 900 °C’de 15 saat borlanmış olanları üzerinde uygulanarak kristal yapılar ve faz dağılımları incelenmiştir. Analizler sonucunda, borlama öncesinde numunelerde temel Ti (Ti- α , Ti- β), Al ve V fazları tespit edilmiş; borlama sonrasında ise TiB, TiB₂, TiC, SiC ve B₄C gibi yeni fazların oluştuğu gözlemlenmiştir. Kırınım desenlerinde borlama sonrası bazı fazların yoğunluklarında artış ya da azalma gözlemlenmiş; bu durum yapısal dönüşümün göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Benzer çalışmalarda, B₄C takviyesiyle üretilen Ti6Al4V alaşımlarında TiB ve TiC gibi fazların oluştuğunu ve bu fazların özellikle sertlik artışına katkı sağladığını ortaya koymuştur. Elde edilen XRD bulguları, borlama işleminin kristal yapı üzerinde önemli etkiler yarattığını ve özellikle yüzey sertliğini artıran yeni fazların oluşumunu sağladığını göstermektedir. Bu yapısal değişimler, mekanik özelliklerdeki gelişim veya bozulmaları açıklamak açısından önemli bir temel teşkil etmektedir.

Aşınma testi ile, farklı üretim yöntemleriyle elde edilmiş Ti6Al4V alaşım numunelerinin ileri-geri hareketli kuru aşınma testi ile tribolojik özellikleri incelenmiştir. Tüm numunelere farklı yük (10N, 20N, 30 N) ve mesafe (50m, 150m, 250 m) parametrelerinde test uygulanmıştır. Yapılan incelemede borlama işleminin, aşınma miktarını önemli ölçüde azalttığı, endüstriyel numunelerde yaklaşık %18, toz metal numunelerde ise %22 oranında iyileşme sağladığı görülmektedir. En düşük aşınma miktarları, endüstriyel numunede ve endüstriyel numunenin borlanması sonucunda el edilen numunelerde tespit edilmiştir. Buna karşılık, 800 °C sinter sıcaklığıyla üretilen numuneler tüm koşullarda en fazla aşınma sergileyerek en zayıf tribolojik performansı göstermiştir. Testlerde uygulanan yük arttıkça sürtünme katsayısında genel bir artış gözlenmiş; mesafe artışında ise başlangıçta yükselme eğilimi gösteren katsayı, zamanla sabit bir trende ulaşmıştır. Borlama işlemi, sürtünme

katsayısını düşürerek tribolojik performansı iyileştirmiştir. Aşınma sonrası SEM analizlerinde, yük artışıyla birlikte tabaka ayrılması, dökülme ve derin aşınma izleri gözlemlenmiştir. Bor tabakası, yüzey hasarını azalttığı tespit edilmiştir. Toz metalürjisi ile üretilen numunelerde gözlenen gözeneklilik, aşınmanın başlangıcında şiddetli dökülmelere ve düzensiz hasar profillerine yol açtığını göstermektedir. Borlama işlemi hem endüstriyel hem de toz metalürjisiyle üretilmiş Ti6Al4V numunelerin tribolojik özelliklerini belirgin şekilde iyileştirmiştir. Yüksek sinterleme sıcaklığı, toz metal numunelerde aşınma direncini artırmıştır. Endüstriyel üretim, daha homojen mikroyapısı ve düşük gözenekliliği sayesinde en istikrarlı ve üstün tribolojik performansı sunmuştur. Çalışma genelinde, üretim yöntemi, borlama işlemi ve test parametrelerinin tribolojik davranış üzerindeki belirleyici etkisi net biçimde ortaya konmuştur.

Yorulma testleri ile, endüstriyel olarak üretilmiş Ti6Al4V alaşımı ve 900 °C’de borlanmış numunenin yorulma davranışı, ISO 1143 standardına uygun 4-nokta dönel eğilmeli yorulma testine göre değerlendirilmiştir. Testler sabit 20 Hz frekansta gerçekleştirilmiş ayrıca, yüksek çevrimli (S–N analizi) ve düşük çevrimli (ϵ –N analizi) yorulma davranışları analiz edilmiştir. Yapılan 4-nokta dönel eğilmeli testler ile yorulma dayanım sınırı endüstriyel numune için yaklaşık 508 MPa, borlanmış numune için ise 528 MPa olarak tespit edilmiştir. Elde edilen kopma verileri Wöhler diyagramları çizilerek aktarılmıştır.

Yüksek çevrimli yorulma analizlerinde Gerber eğrisi, yüksek çevrimli yorulma sınırlarını belirlemede kullanılmış ve güvenli çalışma aralığının belirlenmesi sağlanmıştır. Düşük çevrimli yorulma analizlerinde Coffin–Manson–Morrow denklemiyle parametreler hesaplanmıştır. Yorulma gerilim kat sayısı (σ_f') endüstriyel numunede 1305.96 MPa iken borlanmış numunede 1270.6 MPa olarak hesaplanmıştır. Yorulma gerinim kat sayısı (ϵ_f') endüstriyel numunede 0.0007094 iken borlanmış numunede 0.0006383 olarak hesaplanmıştır. Her iki parametredeki düşüş, borlama sonrası düşük çevrimli yorulma ömrünün azaldığını açıkça ortaya koymaktadır.

Yapılan fraktografik analizlerde, yüksek çevrim yorulmada, borlanmamış numunelerde daha derin çatlak ilerleme çizgileri gözlenmiş; borlanmış numunelerde

daha homojen, sünek krlma yüzeyleri tespit edilmiştir. Ancak düşük çevrim yorulmada, borlanmış numunelerde daha keskin ve düzensiz çatlak ilerlemeleri, krlgan krlma davranışını göstermiştir. Endüstriyel numunelerde ise çatlak ilerleme daha düzenli ve sünek karakterdedir. Borlama işlemi, Ti6Al4V alaşımının yüzey sertliğini artırmakta ve yüksek çevrimli yorulma ömrünü bir miktar iyileştirmektedir. Bu artış yüzeyde oluşan sert TiB ve TiB₂ fazlarının çatlak ilerlemesini sınırlamasından kaynaklanmaktadır. Ancak, oluşan sert ve gevrek bor fazları, özellikle düşük çevrimli yükleme koşullarında mikro çatlak başlatma eğilimini artırarak düşük çevrimli yorulma ömrünü olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, ihtiyaçlara göre kaplama yönteminin dikkatle seçilmesi gerektiğini göstermektedir



BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımı hem endüstriyel üretim hem de toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş; ayrıca 900 °C’de 15 saatlik kutu borlama işlemi uygulanarak üretim ve kaplama yöntemlerinin etkileri karşılaştırılmıştır.

1. Endüstriyel olarak üretilmiş numuneler, toz metal numunelere göre daha homojen ve kompakt mikroyapıya, belirgin $\alpha+\beta$ faz dağılımına ve düşük gözenekliliğe sahiptir.
2. Toz metalürjisi ile 1200 °C’de sinterlenmiş numuneler, diğer sinterleme sıcaklıklarına göre mikroyapı ve mekanik özellikler açısından daha homojen ve endüstriyel numuneye daha yakın bir yapıya ulaşmıştır.
3. Mikroyapı incelemelerinde, borlama sonrası numunelerde TiB, TiB₂, TiC gibi sert fazların oluştuğu; bu fazların mekanik performansa doğrudan etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca borlama işlemi hem endüstriyel hem de toz metal numunelerde tane büyümesine neden olmuş, ancak endüstriyel numuneler bu etkiye karşı daha düşük değişim eğilimi sergilemiştir. Bu durum endüstriyel numunenin daha az gözenekli yapıya ve daha kararlı olması ile ilişkilidir.
4. Endüstriyel numuneler teorik yoğunluğa (%99,22–99,31) çok yakın değerler gösterirken, toz metalürjisiyle üretilen numunelerde bu oran %80–88,3 aralığında kalmıştır. Toz metal numunelerde sinterleme sıcaklığı arttıkça bağıl yoğunluk artmış, gözeneklilik azalmıştır. Bu durum mekanik performansta belirgin iyileşmelere yol açmıştır. Borlama işlemi hem endüstriyel hem de toz metal numunelerde yoğunluğu az da olsa artırmış ve mikroyapı homojenliğine katkı sağlamıştır.

5. Sertlik ölçümleri, borlama işleminin yüzey sertliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir (endüstriyel numunede %9; toz metal numunede %12 artış). En yüksek yüzey sertliği değeri 780 HV ile borlanmış ve 1200 °C sinterlenmiş toz metal numunede elde edilmiştir.
6. Sertlik profilleri, kaplama bölgesinden matrise doğru gidildikçe sertlikte kademeli bir azalma olduğunu ve sert bor tabakasının yüzey sertliğine sebep verdiğini doğrulamaktadır.
7. Çekme testinde en yüksek mekanik performans 924 MPa çekme dayanımı ve %23,8 uzama ile endüstriyel numunede görülmüştür. 1200 °C sinterlenmiş toz metal numune, 181 MPa çekme dayanımı ve %4,11 uzama ile en iyi toz metal performansını göstermiştir. Borlama sonrası endüstriyel numunede %8 uzama kaybı gözlemlenmiş, bu düşüş toz metal numunede daha belirgin %40 uzama kaybı olarak karşımıza çıkmıştır. Bu durum endüstriyel numunenin daha az gözenekli yapıya ve daha kararlı sahip olmasını tekrar doğrulamaktadır.
8. Basma testlerinde de endüstriyel numune 1769 MPa ile en yüksek dayanımı göstermiştir. Endüstriyel numune borlama sonrası 1420 MPa gerilemiştir. 1200 °C Sinter sıcaklığında üretilmiş toz metal numunede 1083 MPa dayanım hesaplanmışken, borlama sonrası bu değer 892 MPa düşmüştür.
9. Borlama işlemi, toz metal numunelerde hem çekme hem de basma dayanımlarında düşüslere yol açmıştır.
10. XRD analizleri, borlama sonrası TiB, TiB₂, TiC, SiC, B₄C gibi yeni fazların oluştuğunu göstermiştir. Faz yoğunluklarındaki değişimler, yapısal dönüşümün başladığını ve bor difüzyonunun etkili olduğunu kanıtlamıştır.
11. Aşınma testlerinde borlama işlemi, endüstriyel numunelerde %18, toz metal numunelerde %22 oranında aşınma direncini artırmıştır. En düşük aşınma miktarı, borlanmış endüstriyel numunede; en yüksek aşınma ise 800 °C sinter sıcaklığına sahip toz metal numunede gözlemlenmiştir. Ayrıca sürtünme

katsayısı borlama ile düşmüş, uygulanan kuvvet artışı ile artış göstermiştir. Aşınma sonuçları alınan SEM görüntülerinde, borlama işlemi yüzeyde oluşan çatlakları ve yüzey hasarını azalttığı tespit edilmiştir.

12. Yorulma testlerinde, endüstriyel numunede yorulma sınırı yaklaşık 508 MPa iken borlanmış numunede yaklaşık 528 MPa olarak belirlenmiştir.
13. Yüksek çevrimli yorulma analizlerinde borlama işlemi çatlak ilerlemesini sınırlayarak yorulma ömrünü bir miktar artırmıştır. Düşük çevrimli yorulmada ise, borlama işlemi kırılmalığa neden olarak yorulma ömrünü düşürmüştür.
14. Gerber metodu ile yapılan analizlerde, borlanmış numunelerin güvenli çalışma sınırları belirlenmiş ve Coffin–Manson–Morrow analizlerinde, borlama sonrası gerilim ve gerinim kat sayılarının düştüğü ve malzemenin düşük çevrim dayanımının zayıfladığı görülmüştür.
15. Yorulma numunelerinde gerçekleştirilen Fraktografi incelemeleri, borlama sonrası numunelerde yüksek çevrim koşullarında daha az kırılmal, düşük çevrimde ise daha yüksek kırılmal kırılma davranışı gözlemlendiğini göstermiştir. Genel olarak borlama işlemi yüzey sertliğini artırmakta, yüksek çevrimli yorulmada pozitif; düşük çevrimli yorulmada ise negatif etki göstermektedir.

Çalışma genelinde hem üretim yöntemi hem de borlama işlemi Ti6Al4V alaşımının mikroyapısı, mekanik özellikleri ve yüzey davranışları üzerinde belirleyici rol oynadığı görülmüştür. Numunelerden yüksek sertlik, yüksek aşınma dayanımı ve yüksek çevrimli yorulma davranışı ihtiyaçları duyulması halinde borlamanın önemli bir katkı sağlayacağı görülmektedir. Ayrıca doğru sinterleme ile endüstriyel olarak üretilen alaşıma mekanik özellikler anlamında yaklaşan toz metal uygulamalar geliştirilebileceği ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

1. G. Çetin, “Ti-6Al-4V Sacların Mikroyapı Değişimi ve Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi Güner Çetin Değişimi ve Geri Yaylanma Davranışının İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2019.
2. B. Yalçın and R. Varol, “Ti-6Al-4V ve Ti-5Al-2.5Fe Alaşımlarının Toz Metalürji Yöntemiyle İmalatı ve Bazı Mekanik Özelliklerinin Araştırılması,” Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic Cilt, vol. 11, no. 3, pp. 235–241, 2008, doi: 10.2339/2008.11.3.235-241.
3. Jr. Matthew J. Donachie, “Titanium a Technical Guide,” USA, 2000.
4. C. (Christoph) Leyens and M. (Manfred) Peters, Titanium and titanium alloys : fundamentals and applications. Wiley-VCH, 2003.
5. W. A. Gooch, “The Design and Application of Titanium Alloys to U.S. Army Platforms-2010,” 2010.
6. S. A. Shamsudheen, “Fundamentals of Manufacturing Processes and Material Selection,” Interantional Journal of Scientific Research in Engineering and Management, vol. 09, no. 01, pp. 1–9, Jan. 2025, doi: 10.55041/IJSREM41092.
7. S. Fashu et al., “A review on crucibles for induction melting of titanium alloys,” Mater Des, vol. 186, p. 108295, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108295>.
8. ASTM International, ASTM B348-13 Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billets, Grade 5—UNS R56400. Titanium alloy (6 % aluminum, 4 % vanadium). 2019.
9. X. Gan, S. Li, S. Xiao, and Y. Yang, “Integrated high-performance and accurate shaping technology of low-cost powder metallurgy titanium alloys: A comprehensive review,” International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, vol. 31, no. 3, pp. 413–426, 2024, doi: 10.1007/s12613-023-2774-7.
10. A. Amherd Hidalgo, R. Frykholm, T. Ebel, and F. Pyczak, “Powder Metallurgy Strategies to Improve Properties and Processing of Titanium Alloys: A Review,” Adv Eng Mater, vol. 19, no. 6, Jun. 2017, doi: 10.1002/adem.201600743.
11. S. Gao et al., “Elucidation of the microstructure evolution mechanism and new performance control strategy of powder metallurgy titanium alloy during hot deformation,” J Mater Process Technol, vol. 337, p. 118711, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2025.118711>.

12. O. Y. Özger, “Biyomalzeme Olarak Kullanılan Ti6Al4V Alaşımının Borlanması ve Karakterizasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, 2023.
13. A. Günen, C. Çarboğa, B. Kurt, and N. Orhan, “Borlama İşleminde Kullanılan Bor Tozu Tane Boyutunun Kaplama Tabakası Üzerine Etkisi,” Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 2, no. 1, 2013.
14. Y. Chen et al., “Investigation on the robust boronizing strategy for the surface strengthening of CoCrNi medium-entropy alloy,” *Surf Coat Technol*, vol. 447, p. 128844, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128844>.
15. R. H. Biddulph, “Boronizing for erosion resistance,” *Thin Solid Films*, vol. 45, no. 2, pp. 341–347, 1977, doi: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(77\)90267-X](https://doi.org/10.1016/0040-6090(77)90267-X).
16. M. Sarı, “Sementasyon Çeliğinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması,” Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, 2019.
17. F. Ünal, “Cam Kalıplarında Kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (KGDD) Borlanması,” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2013.
18. A. Günen and E. Kanca, “Characterization of borided Inconel 625 alloy with different boron chemicals,” *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, vol. 23, no. 4, pp. 411–416, 2017, doi: [10.5505/pajes.2017.56689](https://doi.org/10.5505/pajes.2017.56689).
19. Y. Kaplan, A. C. Can, and A. Ulukoy, “A new medium for boriding of Ti6Al4V alloy for biomedical applications,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L*, vol. 233, no. 2, pp. 109–119, 2019, doi: [10.1177/1464420716662801](https://doi.org/10.1177/1464420716662801).
20. E. Atar, E. S. Kayali, and H. Cimenoglu, “Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy,” *Surf Coat Technol*, vol. 202, no. 19, pp. 4583–4590, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.03.011>.
21. C. Chen, X. Feng, and Y. Shen, “Synthesis of Al–B₄C composite coating on Ti–6Al–4V alloy substrate by mechanical alloying method,” *Surf Coat Technol*, vol. 321, pp. 8–18, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.04.042>.
22. D. Ouyang, S. Hu, C. Tao, X. Cu, Z. Zhu, and S. Lu, “Experiment and modeling of TiB₂/TiB boride layer of Ti–6Al–2Zr–1Mo–1V alloy,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 31, no. 12, pp. 3752–3761, 2021, doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65761-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65761-8).
23. Y. Duan, P. Li, Z. Chen, J. Shi, and L. Ma, “Surface evolution and growth kinetics of Ti6Al4V alloy in pack boriding,” *J Alloys Compd*, vol. 742, pp. 690–701, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.383>.

24. G. Kara and G. Purcek, "Mechanical properties and cell proliferation response of borided biomedical titanium alloys with different crystalline structures," *Surf Coat Technol*, vol. 397, p. 126051, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126051>.
25. M.-J. Peng, Y.-H. Duan, L.-S. Ma, and B.-P. Shu, "Characteristics of surface layers on Ti6Al4V alloy borided with CeO₂ near the transition temperature," *J Alloys Compd*, vol. 769, pp. 1–9, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.365>.
26. L. N. Wang, F. H. Li, M. G. Dong, and Y. N. Li, "Effects of Additives on the Surface Layers of Boronized TC4 Titanium Alloys," in *Advances in Materials and Materials Processing IV*, in *Advanced Materials Research*, vol. 887. Trans Tech Publications Ltd, Feb. 2014, pp. 384–387. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.887-888.384](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.887-888.384).
27. R. J. 'Lewis, *Hazardous Chemicals Desk Reference*, 6th ed. John Wiley & Sons, 2008.
28. M. Keddami and S. Taktak, "Characterization and diffusion model for the titanium boride layers formed on the Ti6Al4V alloy by plasma paste boriding," *Appl Surf Sci*, vol. 399, pp. 229–236, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.227>.
29. N. T. Taazim, I. Jauhari, Y. Miyashita, and M. F. M. Sabri, "Development and Kinetics of TiB₂ Layers on the Surface of Titanium Alloy by Superplastic Boronizing," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 47, no. 5, pp. 2217–2222, 2016, doi: [10.1007/s11661-016-3359-0](https://doi.org/10.1007/s11661-016-3359-0).
30. Z. Ding, Q. Peng, J. Zuo, Y. Wang, H. Zhou, and Z. Tang, "Osteogenesis Performance of Boronized Ti6Al4V/HA Composites Prepared by Microwave Sintering: In Vitro and In Vivo Studies," *Materials*, vol. 15, no. 14, 2022, doi: [10.3390/ma15144985](https://doi.org/10.3390/ma15144985).
31. F. Hüsem, "The Effects Of Boriding at 800°C at Different Times on Ti6Al4V," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 15, no. 2, pp. 881–890, 2023, doi: [10.29137/umagd.1306808](https://doi.org/10.29137/umagd.1306808).
32. Z. Wang, W. Zhou, K. Luo, H. Lu, and J. Lu, "Strengthening mechanism in thermomechanical fatigue properties of Ti6Al4V titanium alloy by laser shock peening," *Int J Fatigue*, vol. 172, p. 107631, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107631>.
33. Z. Li, M. Chuzenji, and M. Mizutani, "Compression and fatigue performance of Ti6Al4V materials with different uniform and gradient porous structures," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 873, p. 145030, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145030>.

34. A. F. Yetim, H. Kovacı, Y. Uzun, H. Tekdir, and A. Çelik, “A comprehensive study on the fatigue properties of duplex surface treated Ti6Al4V by plasma nitriding and DLC coating,” *Surf Coat Technol*, vol. 458, p. 129367, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129367>.
35. H. Soyama and C. Kuji, “Improving effects of cavitation peening, using a pulsed laser or a cavitating jet, and shot peening on the fatigue properties of additively manufactured titanium alloy Ti6Al4V,” *Surf Coat Technol*, vol. 451, p. 129047, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129047>.
36. W. Lam Raymond H. W. and Chen, “Metals and Alloys,” in *Biomedical Devices: Materials, Design, and Manufacturing*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 61–87. doi: 10.1007/978-3-030-24237-4_3.
37. C. Y. Liu, Y. X. Zhang, G. Yuan, C. Y. Zhang, R. D. K. Misra, and J. Kang, “Composition design and properties characterization for FeSiBCuC metallic glasses with large plasticity,” *J Alloys Compd*, vol. 899, p. 163180, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163180>.
38. E. Çakır, “Farklı Titanyum Alaşımlarının Tel Ark Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,” Doktora, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2024.
39. Q. and H. X. Mao Xinping and Yong, “Introduction,” in *Titanium Microalloyed Steel: Fundamentals, Technology, and Products*, X. Mao, Ed., Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 1–34. doi: 10.1007/978-981-13-3332-3_1.
40. Y. Oshida, *Bioscience and Bioengineering of Titanium Materials*, 2nd ed. Elsevier, 2012.
41. N. ; W. R. J. H. Eswara Prasad, *Aerospace Materials and Material Technologies*. Singapore: Springer Singapore, 2017. doi: 10.1007/978-981-10-2134-3.
42. P. Yadav and K. K. Saxena, “Effect of heat-treatment on microstructure and mechanical properties of Ti alloys: An overview,” *Mater Today Proc*, vol. 26, pp. 2546–2557, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.541>.
43. T. Chen, W. Li, D. Liu, Y. Xiong, and X. Zhu, “Effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of TiC/TiB composite bioinert ceramic coatings in-situ synthesized by laser cladding on Ti6Al4V,” *Ceram Int*, vol. 47, no. 1, pp. 755–768, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.186>.
44. F. G. Uzun, “Toz Metalürjisi ile Üretilen 316l Paslanmaz Çeliğe Ti ve Nb İlavesinin Sinerjik Etkisi,” Yüksek Lisans, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 2022.
45. W. F. Smith, *Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri- Demir Dışı Alaşımlar Cilt:2*. Nobel Yayın Evi, 2001.

46. İ. Şimşek, "Toz Metalurjisi ile Üretilen Titanyum Alaşımı Biyomalzemelerin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi," Doktora Tezi, Karabük, 2017.
47. R. Zhai, H. Zhang, S. Liu, M. Sun, S. Sheng, and B. Xu, "Influence of carbon content on the microstructure and cryogenic tensile properties of N50 austenitic stainless steel after aging treatment," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 571, p. 154023, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.154023>.
48. W. Zhang, Z. Liu, T. Li, X. Liu, and W. Xiong, "Effects of alloy elements on mechanical properties of low alloy wear resistant steel," *E3S Web of Conferences*, vol. 236, p. 02021, Feb. 2021, doi: [10.1051/e3sconf/202123602021](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123602021).
49. H. H. Pariser, N. R. Backeberg, O. C. M. Masson, and J. C. M. Bedder, "Changing nickel and chromium stainless steel markets - a review," *J South Afr Inst Min Metall*, vol. 118, no. 6, 2018, doi: [10.17159/2411-9717/2018/v118n6a1](https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n6a1).
50. G. Gudivada and A. K. Pandey, "Recent developments in nickel-based superalloys for gas turbine applications: Review," *J Alloys Compd*, vol. 963, p. 171128, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171128>.
51. R. Darolia, "Development of strong, oxidation and corrosion resistant nickel-based superalloys: critical review of challenges, progress and prospects," *International Materials Reviews*, vol. 64, no. 6, pp. 355–380, 2019, doi: [10.1080/09506608.2018.1516713](https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1516713).
52. A. E. W. Jarfors, A. Du, G. Yu, J. Zheng, and K. Wang, "On the Sustainable Choice of Alloying Elements for Strength of Aluminum-Based Alloys," *Sustainability*, vol. 12, no. 3, 2020, doi: [10.3390/su12031059](https://doi.org/10.3390/su12031059).
53. T. Xu, Y. Yang, X. Peng, J. Song, and F. Pan, "Overview of advancement and development trend on magnesium alloy," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 7, no. 3, pp. 536–544, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.08.001>.
54. Q. Mao, Y. Liu, and Y. Zhao, "A review on copper alloys with high strength and high electrical conductivity," *J Alloys Compd*, vol. 990, p. 174456, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174456>.
55. V. N. Pod'yachev and M. I. Gavriluk, "Properties of tungsten alloys with carbon niobium, tantalum, and zirconium," *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 17, no. 4, pp. 299–302, 1975, doi: [10.1007/BF00663388](https://doi.org/10.1007/BF00663388).
56. X. Peng et al., "Strengthening and control of second-phase particle precipitation in ferritic/austenitic/martensitic heat-resistant alloys: a review," *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 31, no. 1, pp. 3–23, 2024, doi: [10.1007/s42243-023-01140-y](https://doi.org/10.1007/s42243-023-01140-y).
57. H. Yan, L. Li, H. Hu, and W. Huang, "Influence of Al₂O₃ and h-BN on Wear and Corrosion Performance of IN625 Nickel-Based Coating," *Coatings*, vol. 14, no. 11, 2024, doi: [10.3390/coatings14111359](https://doi.org/10.3390/coatings14111359).

58. D. K. Dwivedi, "Surface Engineering by Changing the Composition," in *Surface Engineering: Enhancing Life of Tribological Components*, D. K. Dwivedi, Ed., New Delhi: Springer India, 2018, pp. 91–116. doi: 10.1007/978-81-322-3779-2_5.
59. F. Czerwinski, "Thermochemical Treatment of Metals," in *Heat Treatment*, F. Czerwinski, Ed., Rijeka: IntechOpen, 2012, ch. 5. doi: 10.5772/51566.
60. K. Yünlü, *BOR Bileşikleri, Sentez Yöntemleri, Özellikleri, Uygulamaları*, 2nd ed. Ankara: Boren, 2019.
61. W. P. Huhn and M. Widom, "A Free Energy Model of Boron Carbide," *J Stat Phys*, vol. 150, no. 3, pp. 432–441, 2013, doi: 10.1007/s10955-012-0642-3.
62. K. Euh, J. Lee, and S. Lee, "Microstructural Modification and property improvement of boride/Ti-6Al-4V surface-alloyed materials fabricated by high-energy electron-beam irradiation," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 32, no. 10, pp. 2499–2508, 2001, doi: 10.1007/s11661-001-0039-4.
63. M. Kulka, "Trends in Thermochemical Techniques of Boriding," in *Current Trends in Boriding: Techniques*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 17–98. doi: 10.1007/978-3-030-06782-3_4.
64. P. A. Dearnley, T. Farrell, and T. Bell, "Developments in plasma boronizing," *Journal of Materials for Energy Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 128–131, 1986, doi: 10.1007/BF02833337.
65. G. Subhash, A. P. Awasthi, C. Kunka, P. Jannotti, and M. DeVries, "In search of amorphization-resistant boron carbide," *Scr Mater*, vol. 123, pp. 158–162, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.06.012>.
66. İ. Türkmen and E. Yalamaç, "Effect of Alternative Boronizing Mixtures on Boride Layer and Tribological Behaviour of Boronized SAE 1020 Steel," *Metals and Materials International*, vol. 28, no. 5, pp. 1114–1128, 2022, doi: 10.1007/s12540-021-00987-8.
67. Begüm Akca, "Saf Molibdenin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2015.
68. A. Çalık, "Effect of Powder Particle Size on the Mechanical Properties of Boronized EN H320 LA Steel Sheets," *ISIJ International*, vol. 53, no. 1, pp. 160–164, 2013, doi: 10.2355/isijinternational.53.160.
69. ASTM International, *ASTM B988-18 Standard Specification for Powder Metallurgy (PM) Titanium and Titanium Alloy Structural Components, Grade 5 PM—Titanium alloy (6 % aluminum, 4 % vanadium)*. 2022.
70. Z. Li et al., "A novel potential ceramic material for melting Ti6Al4V alloy: A solid solution of BaZrO₃ and CaZrO₃," *J Eur Ceram Soc*, vol. 43, no. 14, pp. 6571–6580, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.06.062>.

71. ASTM International, ASTM D2990-17 Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastic. USA, 2017.
72. P.-J. Arrazola, A. Garay, L.-M. Iriarte, M. Armendia, S. Marya, and F. Le Maître, “Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3),” *J Mater Process Technol*, vol. 209, no. 5, pp. 2223–2230, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.020>.
73. İ. Türkmen, K. Kanbur, and F. Sargin, “Characteristics of boronized Ti6Al4V alloy using boric acid based boronizing mixture,” *Mater Charact*, vol. 192, p. 112180, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112180>.
74. İ. Türkmen, K. Kanbur, and F. Sargin, “Characteristics of boronized Ti6Al4V alloy using boric acid based boronizing mixture,” *Mater Charact*, vol. 192, p. 112180, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112180>.
75. Z. Zheng et al., “Microstructure and anisotropic mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V alloy under different scanning strategies,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 831, p. 142236, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142236>.
76. S. W. Hughes, “Measuring liquid density using Archimedes’ principle,” *Phys Educ*, vol. 41, no. 5, p. 445, Sep. 2006, doi: 10.1088/0031-9120/41/5/011.
77. Y. Zou and J. Malzbender, “Development and optimization of porosity measurement techniques,” *Ceram Int*, vol. 42, no. 2, Part A, pp. 2861–2870, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.11.015>.
78. Z. Marciniak, J. L. Duncan, and S. J. Hu, *Mechanics of Sheet Metal Forming*. 2002.
79. E. N. S. de Araújo-Júnior et al., “Ultra-translucent zirconia processing and aging effect on microstructural, optical, and mechanical properties,” *Dental Materials*, vol. 38, no. 4, pp. 587–600, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.02.016>.
80. ISO International Standard, ISO 1143 Metallic materials — Rotating bar bending fatigue testing. 2010.
81. B. F. Kınacı, H. Botsalı, C. Özarpa, İ. Esen, and H. Ahlatçı, “Investigation of fatigue life of draw hook equipment used in freight wagon: Miscellaneous result,” *Eng Fail Anal*, vol. 155, p. 107757, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107757>.
82. ASTM, ASTM E 739-91 Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (e-N) Fatigue Data. 2004.
83. S. Yang, W. Hu, Q. Meng, and B. Zhao, “A new continuum damage mechanics–based two-scale model for high-cycle fatigue life prediction considering the two–

- segment characteristic in S-N curves,” *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, vol. 43, no. 2, pp. 387–402, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.1111/ffe.13161>.
84. J. Ren, Y. Qie, H. Xie, F. Yin, and X. Cui, “Fatigue analysis of 75 kg/m-12 heavy-haul railway frog based on finite element simulation,” *Eng Fail Anal*, vol. 117, p. 104799, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104799>.
 85. L. Pallarés-Santasmartas, J. Albizuri, A. Avilés, and R. Avilés, “Mean Stress Effect on the Axial Fatigue Strength of DIN 34CrNiMo6 Quenched and Tempered Steel,” *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 4, 2018, doi: [10.3390/met8040213](https://doi.org/10.3390/met8040213).
 86. M. L. Roessle and A. Fatemi, “Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations,” *Int J Fatigue*, vol. 22, no. 6, pp. 495–511, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(00\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00026-8).
 87. J. H. Ong, “An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data,” *Int J Fatigue*, vol. 15, no. 3, pp. 213–219, 1993, doi: [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(93\)90179-T](https://doi.org/10.1016/0142-1123(93)90179-T).
 88. M. O. Ogunlana and M. Muchie, “Microstructure and mechanical analyses of Ti6Al4V/B4C composites on Ti6Al4V substrate: Effect of laser power on multiple track laser metal deposition,” *Procedia CIRP*, vol. 120, pp. 1398–1403, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.183>.
 89. M. Amirnejad, M. Rajabi, and R. Jamaati, “Comparative investigation of microstructure and crystallographic texture effect on Ti6Al4V alloy mechanical properties,” *Mater Chem Phys*, vol. 256, p. 123725, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123725>.
 90. N. T. Taazim, I. Jauhari, Y. Miyashita, and M. F. M. Sabri, “Development and Kinetics of TiB₂ Layers on the Surface of Titanium Alloy by Superplastic Boronizing,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 47, no. 5, pp. 2217–2222, 2016, doi: [10.1007/s11661-016-3359-0](https://doi.org/10.1007/s11661-016-3359-0).
 91. P. C. M. Rodrigues, E. V Pereloma, and D. B. Santos, “Mechanical properties of an HSLA bainitic steel subjected to controlled rolling with accelerated cooling,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 283, no. 1, pp. 136–143, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00795-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00795-9).
 92. Z. Jia, R. D. K. Misra, R. O’Malley, and S. J. Jansto, “Fine-scale precipitation and mechanical properties of thin slab processed titanium–niobium bearing high strength steels,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 22, pp. 7077–7083, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.05.073>.
 93. H. Najafi, J. Rassizadehghani, and A. Halvaei, “Mechanical properties of as cast microalloyed steels containing V, Nb and Ti,” *Materials Science and Technology*, vol. 23, no. 6, pp. 699–705, 2007, doi: [10.1179/174328407X179755](https://doi.org/10.1179/174328407X179755).

94. G. Xu, X. Gan, G. Ma, F. Luo, and H. Zou, "The development of Ti-alloyed high strength microalloy steel," *Mater Des*, vol. 31, no. 6, pp. 2891–2896, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.12.032>.
95. S. Zajac, T. Siwecki, B. Hutchinson, and M. Attlegard, "Recrystallization controlled rolling and accelerated cooling for high strength and toughness in V-Ti-N steels," In *Proceedings of the International Symposium on Microalloyed Vanadium Steels 1990*, 1990.
96. S. Gündüz, M. A. Erden, H. Karabulut, and M. Türkmen, "Effect of the addition of niobium and aluminium on the microstructures and mechanical properties of micro-alloyed PM steels," *Materiali in tehnologije*, vol. 50, no. 5, pp. 641–648, Oct. 2016, doi: [10.17222/mit.2015.248](https://doi.org/10.17222/mit.2015.248).
97. A. G. Kostyryzhev et al., "Effect of niobium clustering and precipitation on strength of an NbTi-microalloyed ferritic steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 607, pp. 226–235, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.140>.
98. T. Siwecki, J. Eliasson, R. Lagneborg, and B. Hutchinson, "Vanadium Microalloyed Bainitic Hot Strip Steels," *ISIJ International*, vol. 50, no. 5, pp. 760–767, 2010, doi: [10.2355/isijinternational.50.760](https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.760).
99. S. Guo et al., "Microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V/ B4C titanium matrix composite fabricated by selective laser melting (SLM)," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. 1934–1946, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.126>.
100. B. DU, Z. ZOU, X. WANG, and Q. LI, "In Situ Synthesis of TiC–TiB₂ Reinforced FeCrSiB Composite Coating by Laser Cladding," *Surface Review and Letters*, vol. 14, no. 02, pp. 315–319, 2007, doi: [10.1142/S0218625X07009414](https://doi.org/10.1142/S0218625X07009414).
101. M. A. Erden, S. Gündüz, M. Türkmen, and H. Karabulut, "Microstructural characterization and mechanical properties of microalloyed powder metallurgysteels," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 616, pp. 201–206, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.08.026>.
102. H. Karabulut, M. Türkmen, M. A. Erden, and S. Gündüz, "Effect of Different Current Values on Microstructure and Mechanical Properties of Microalloyed Steels Joined by the Submerged Arc Welding Method," *Metals (Basel)*, vol. 6, no. 11, 2016, doi: [10.3390/met6110281](https://doi.org/10.3390/met6110281).
103. M. A. Erden, S. Gündüz, H. Karabulut, and M. Türkmen, "Effect of vanadium addition on the microstructure and mechanical properties of low carbon micro-alloyed powder metallurgy steels," *Metals*, vol. 58, no. 5, pp. 433–437, 2016, doi: [10.3139/120.110875](https://doi.org/10.3139/120.110875).
104. B. Chokkalingam, S. S. M. Nazirudeen, and S. S. Ramakrishnan, "Investigation into The Mechanical Properties Of Micro-Alloyed As-Cast

Steel,” 2011. [Online].
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56350619>

Available:

105. T. N. Baker, “Processes, microstructure and properties of vanadium microalloyed steels,” *Materials Science and Technology*, vol. 25, no. 9, pp. 1083–1107, Sep. 2009, doi: 10.1179/174328409X453253.
106. A. L. Rominiyi, P. M. Mashinini, and O. L. Rominiyi, “Microstructure, phase evolution and mechanical properties of nickel-silicon carbide reinforced Ti6Al4V alloy processed by pulsed electric current sintering,” *Ceram Int*, vol. 50, no. 18, Part B, pp. 33926–33936, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.06.212>.
107. J. L. Cabezas-Villa, J. Lemus-Ruiz, D. Bouvard, O. Jiménez, H. J. Vergara-Hernández, and L. Olmos, “Sintering study of Ti6Al4V powders with different particle sizes and their mechanical properties,” *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 25, no. 12, pp. 1389–1401, 2018, doi: 10.1007/s12613-018-1693-5.
108. A. Xue, X. Lin, L. Wang, J. Wang, and W. Huang, “Influence of trace boron addition on microstructure, tensile properties and their anisotropy of Ti6Al4V fabricated by laser directed energy deposition,” *Mater Des*, vol. 181, p. 107943, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107943>.
109. R. Alaghamdard, D. Chalasani, A. Hadadzadeh, B. S. Amirkhiz, A. Odeshi, and M. Mohammadi, “Dynamic compressive response of electron beam melted Ti–6Al–4V under elevated strain rates: Microstructure and constitutive models,” *Addit Manuf*, vol. 35, p. 101347, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101347>.
110. M. O. Ogunlana and M. Muchie, “Microstructure and mechanical analyses of Ti6Al4V/B4C composites on Ti6Al4V substrate: Effect of laser power on multiple track laser metal deposition,” *Procedia CIRP*, vol. 120, pp. 1398–1403, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.183>.
111. B. Yuan et al., “Effects of cyclic thermo-hydrogen processing on microstructural and mechanical properties of Ti6Al4V alloy at room temperature,” *Vacuum*, vol. 171, p. 109015, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109015>.
112. X. Lei et al., “Combining laser surface texturing and double glow plasma surface chromizing to improve tribological performance of Ti6Al4V alloy,” *Surf Coat Technol*, vol. 478, p. 130418, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130418>.
113. A. Molinari, G. Straffelini, B. Tesi, and T. Bacci, “Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy,” *Wear*, vol. 208, no. 1, pp. 105–112, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07454-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07454-6).

114. E. Atar, "Sliding wear performances of 316 L, Ti6Al4V, and CoCrMo alloys," *Metallic Materials*, vol. 51, no. 03, pp. 183–188, 2021, doi: 10.4149/km_2013_3_183.
115. S. Guo et al., "Simulation and experimental research on the cavitation phenomenon of wedge-shaped triangular texture on the surface of 3D-printed titanium alloy materials," *Tribol Int*, vol. 198, p. 109869, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109869>.
116. J. Huang, W. Zhang, W. Fang, and Y. Yi, "Tribology properties of additively manufactured Ti6Al4V alloy after heat treatment," *Tribol Int*, vol. 185, p. 108485, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108485>.
117. B.-G. Yuan, H.-P. Yu, C.-F. Li, and D.-L. Sun, "Wear properties of nonhydrogenated, hydrogenated, and dehydrogenated Ti6Al4V alloy," *Rare Metals*, vol. 37, no. 7, pp. 574–578, 2018, doi: 10.1007/s12598-014-0253-z.
118. R. Malkiya Rasalin Prince, N. Selvakumar, D. Arulkirubakaran, S. Christopher Ezhil Singh, T. Ramkumar, and R. M. Kumar, "Surface structural features and wear analysis of a multilayer Ti6Al4V-B 4 C thin film coated AISI 1040 steel," *Mater Res Express*, vol. 7, no. 1, p. 016436, Jan. 2020, doi: 10.1088/2053-1591/ab6c18.
119. Z. Weng, K. Gu, C. Cui, H. Cai, X. Liu, and J. Wang, "Microstructure evolution and wear behavior of titanium alloy under cryogenic dry sliding wear condition," *Mater Charact*, vol. 165, p. 110385, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110385>.
120. A. Molinari, G. Straffelini, B. Tesi, and T. Bacci, "Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy," *Wear*, vol. 208, no. 1, pp. 105–112, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07454-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07454-6).
121. W. Chen, C. J. Boehlert, E. A. Payzant, and J. Y. Howe, "The effect of processing on the 455°C tensile and fatigue behavior of boron-modified Ti–6Al–4V," *Int J Fatigue*, vol. 32, no. 3, pp. 627–638, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.04.013>.
122. K. Zhang et al., "Fatigue behaviour of L-DED processed Ti-6Al-4V with microstructures refined by trace boron addition," *Int J Fatigue*, vol. 168, p. 107454, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107454>.
123. W. Chen and C. J. Boehlert, "The elevated-temperature fatigue behavior of boron-modified Ti–6Al–4V(wt.%) castings," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 494, no. 1, pp. 132–138, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.04.004>.
124. D. A. Ariza et al., "Comparison of fatigue life behavior between 4-point and uniaxial loading for L-PBF Ti–6Al–4V after HIP treatments," *Results in Materials*, vol. 22, p. 100579, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100579>.

125. S.-S. Balasubramanian, C. Philpott, J. Hyder, M. Corliss, B. Tai, and W. Hung, "Novel Fatigue Tester for Additively Manufactured Metals," *Procedia Manuf*, vol. 53, pp. 525–534, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.054>.
126. C. Wu and S. Sun, "Crankshaft High Cycle Bending Fatigue Research Based on a 2D Simplified Model and Different Mean Stress Models," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 21, no. 4, pp. 1396–1402, 2021, doi: [10.1007/s11668-021-01192-w](https://doi.org/10.1007/s11668-021-01192-w).
127. T. Zhu, H. Zheng, and R. Zhao, "Experimental Investigation of High-cycle Fatigue Behavior for Automobile Structural Steel Based on Stress-Number-of-cycles Curves," *Sensors and Materials*, vol. 31, no. 2, p. 479, Feb. 2019, doi: [10.18494/SAM.2019.2135](https://doi.org/10.18494/SAM.2019.2135).
128. M. Böhm and K. Głowacka, "Fatigue Life Estimation with Mean Stress Effect Compensation for Lightweight Structures—The Case of GLARE 2 Composite," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 2, 2020, doi: [10.3390/polym12020251](https://doi.org/10.3390/polym12020251).
129. P. E. Carrion, N. Shamsaei, S. R. Daniewicz, and R. D. Moser, "Fatigue behavior of Ti-6Al-4V ELI including mean stress effects," *Int J Fatigue*, vol. 99, pp. 87–100, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.02.013>.
130. L. P. Borrego, J. A. M. Ferreira, J. D. M. Costa, C. Capela, and J. de Jesus, "A study of fatigue notch sensibility on titanium alloy TiAl6V4 parts manufactured by selective laser melting," *Procedia Structural Integrity*, vol. 13, pp. 1000–1005, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.186>.
131. D. Wang et al., "Effect of Pt-Al coating on low-cycle fatigue behavior in a Ni-based single crystal superalloy at 760 °C," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 916, p. 147311, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147311>.
132. A. M. Eleiche, M. M. Megahed, and N. M. Abd-Allah, "Low-cycle fatigue in rotating cantilever under bending II: experimental investigations on smooth specimens," *Int J Fatigue*, vol. 18, no. 8, pp. 577–592, 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(96\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(96)00020-5).
133. L. Li, Z. H. Li, Y. Tang, and G. Y. Li, "Low-Cycle Fatigue Behavior of Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.5CeO2 Composite Solder Alloy," *J Electron Mater*, vol. 51, no. 12, pp. 7313–7325, 2022, doi: [10.1007/s11664-022-09958-0](https://doi.org/10.1007/s11664-022-09958-0).

ÖZGEÇMİŞ

Bahadır Furkan KINACI, lisans eğitimini Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans derecesini almıştır. 2021 yılı itibarıyla Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında doktora çalışmalarına devam etmektedir. Ulusal ve uluslararası düzeyde çeşitli projelerde görev almış ve çok sayıda akademik çalışması bulunmaktadır.