

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜZEY İŞLEMİ UYGULANMIŞ Ti-6Al-4V ALAŞIMININ DARBELİ KAYMA
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE KURU KAYMA KOŞULLARI
ALTINDA AŞINMA HARİTALARININ OLUŞTURULMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYŞENUR EĞERCİOĞLU YAZICI

TEZ DANIŞMANI
PROF. DR. HARUN MİNDİVAN

BİLECİK, 2024

10689385

T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜZEY İŞLEMİ UYGULANMIŞ Ti-6Al-4V ALAŞIMININ DARBELİ KAYMA
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE KURU KAYMA KOŞULLARI
ALTINDA AŞINMA HARİTALARININ OLUŞTURULMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYŞENUR EĞERCİOĞLU YAZICI

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. HARUN MİNDİVAN

BİLECİK, 2024

10689385

BEYAN

Yüzey işlemi uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının darbeli kayma aşınma davranışının incelenmesi ve kuru kayma koşulları altında aşınma haritalarının oluşturulması adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR	X	DESTEK ALINMAMIŞTIR	
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum; BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)	X	TEZ-Y-2024-509	
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Ayşenur EĞERCİOĞLU YAZICI

Tarih

.....

İmza

.....

ÖN SÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve deneysel çalışmalarımın her aşamasında büyük özveriyle bana destek olan; bilgi ve deneyimleri ile laboratuvar çalışmalarında bana yol gösteren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Harun MİNDİVAN' a teşekkürü borç bilirim. Laboratuvar çalışmalarım boyunca ve tezimi yazarken her zaman desteğini hissettiğim Sayın Doç. Dr. Ferda MİNDİVAN' a teşekkürlerimi sunarım. Matlab çalışmalarımda yardımcı olan ve yol gösteren Sayın Öğr. Gör. Dr. Selman TEZCAN' a teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarım boyunca desteğiyle yanımda olan Züleyha TAŞKAN ve Elif ÖZTÜRK' e teşekkür ederim.

Bu çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimi tarafından desteklenmiştir (Proje no: TEZ-Y-2024-509). Desteklerinden dolayı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi BAP birimine teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca maddi manevi her türlü desteği veren bugünlere gelmemde emeği çok büyük olan babam Mehmet Necati EĞERCİOĞLU' na ve annem Nur EĞERCİOĞLU' na teşekkür ederim. Her zaman yanımda olan abim Muhammet Nizamettin EĞERCİOĞLU' na ve kız kardeşim Hiranur EĞERCİOĞLU' na teşekkür ederim. Her konuda en büyük destekçim eşim Özgür YAZICI' ya teşekkür ederim.

Ayşenur EĞERCİOĞLU YAZICI

2024

ÖZET

YÜZEY İŞLEMİ UYGULANMIŞ Ti-6Al-4V ALAŞIMININ DARBELİ KAYMA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ VE KURU KAYMA KOŞULLARI ALTINDA AŞINMA HARİTALARININ OLUŞTURULMASI

Ti-6Al-4V alaşımının yüzeyine üç farklı sıcaklıkta (600, 700 ve 800 °C) termal oksidasyon, kutu sementasyon ile alüminyumlama ve 750 °C’ de sıcak daldırma alüminyumlama yüzey işlemleri uygulanarak düşük maliyetli, seri üretime uygun, çevre dostu, yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip yüzeyler elde etmek için bu çalışma yapılmıştır. Üç farklı yüzey işlemi uygulanmış örneklerin yapısal karakterizasyonları ile farklı yük ve hızlarda kuru kayma koşullarında ileri geri aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Darbeli kayma aşınma testleri 600 ve 700 °C’ de termal oksidasyon yapılan Ti-6Al-4V alaşımına uygulanmıştır.

Kutu sementasyon ile alüminyumlama işlemi sonucunda, alüminyum açısından zengin ve artan işlem sıcaklığı ile kalınlaşan titanyum alüminid tabaka elde edilmiştir. $TiAl_2$ fazından oluşan alüminid tabakanın, en yüksek sertlik değeri 800 °C’ de alüminyumlama yapılmış örnekte 616 $HV_{0,025}$ olarak ölçülmüştür.

Termal oksidasyon işlemi sonrasında, Ti-6Al-4V alaşımı, oksit tabakası ve oksijen difüzyon bölgesinden oluşan bir yapıya sahip olup, en geniş oksit tabakası 6 μm kalınlığında, 700 °C’ de 30 saatlik termal oksidasyon işlemi sonrasında gözlemlenmiştir. En yüksek sertlik ise, yine aynı numunede 700 $HV_{0,025}$ olarak ölçülmüştür. XRD ile oksit tabakasının rutil fazdan oluştuğu tespit edilmiştir. 25, 350 ve 550 °C’ de yapılan darbeli kayma aşınma testleri sonucunda, 700 °C’ de 30 saat termal oksidasyon işlemi her üç deney sıcaklığında da en düşük aşınma hızı sergilediği, sırasıyla %54, %34 ve %37 oranında azalan toplam (darbe+kayma) aşınma hızı değerleri belirlenmiştir. Her üç sıcaklıkta yapılan kutu sementasyon ile alüminyumlama ve termal oksidasyon işleminin kuru kayma ileri-geri aşınma direncini de iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Sıcak daldırma alüminyumlama ve ardından difüzyon tavlama işlemi sonucunda, 461 $HV_{0,025}$ sertliğine sahip kompozit tabaka elde edilmiştir. Kuru kayma ileri-geri aşınma sonuçları incelendiğinde kayma hızı arttıkça aşınma direnci azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyumlama, Aşınma Haritaları, Darbeli Kayma Aşınma, Termal Oksidasyon, Ti-6Al-4V Alaşımı

ABSTRACT

INVESTIGATION OF IMPACT-SLIDING WEAR BEHAVIOR AND DEVELOPMENT OF WEAR MAPS UNDER DRY SLIDING CONDITIONS OF SURFACE TREATED Ti-6Al-4V ALLOY

This study was conducted to obtain low-cost, mass-production-compatible, environmentally friendly surfaces with high hardness and wear resistance by applying surface treatments such as thermal oxidation at three different temperatures (600, 700, and 800 °C), pack cementation aluminizing, and hot-dip aluminizing at 750 °C on the surface of the Ti-6Al-4V alloy. Structural characterizations of the samples subjected to three different surface treatments were performed, and reciprocating wear tests were conducted under dry sliding conditions at different loads and speeds. Impact sliding wear tests were applied to the Ti-6Al-4V alloy that underwent thermal oxidation at 600 and 700 °C.

As a result of the pack cementation aluminizing process, an aluminum-rich titanium aluminide layer was formed, thickening with increased process temperature. The highest hardness value of 616 HV_{0.025} was measured in the sample aluminized at 800 °C, where the layer consisted of the TiAl₂ phase.

After the thermal oxidation process, the Ti-6Al-4V alloy exhibited a structure consisting of an oxide layer and an oxygen diffusion region. The thickest oxide layer observed after 30 hours of thermal oxidation at 700 °C, is 6 µm thick. The highest hardness, 700 HV_{0.025}, was also measured in the same sample. XRD analysis confirmed that the oxide layer consisted of the rutile phase. Wear tests conducted at 25, 350 and 550 °C showed that the sample subjected to 30 hours of thermal oxidation at 700 °C exhibited the lowest wear rate at both test temperatures, with total wear rate (impact+sliding) reductions of 54%, %34 and 37%, respectively. It was determined that reciprocating dry sliding wear resistance was improved by aluminizing and thermal oxidation at all three temperatures.

After hot-dip aluminizing and subsequent diffusion annealing, a composite layer with a hardness of 461 HV_{0.025} was obtained. Upon reviewing the reciprocating dry sliding wear results, it was observed that as the sliding speed increased, the wear resistance also decreased for coating with hot-dip aluminizing and subsequent diffusion annealing treatment.

Keywords: Aluminization, Wear Maps, Impact-Sliding Wear, Thermal Oxidation, Ti-6Al-4V Alloy

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. TİTANYUM VE ALAŞIMLARI	3
2.1. Ti ve Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	4
2.1.1. α ve α' ya Yakın Ti Alaşımları.....	5
2.1.2. $\alpha+\beta$ Ti Alaşımları	5
2.1.3. Yarı Kararlı β ve β -Ti Alaşımları.....	6
3. TİTANYUM VE ALAŞIMLARINA UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ.....	8
3.1. Termal Oksidasyon (TO)	8
3.2. Kutu Sementasyon İle Alüminyumlama.....	10
3.3. Sıcak Daldırma Alüminyumlama.....	11
4. AŞINMA.....	13
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	17
5.1. TO İle İlgili Literatür Araştırması.....	17
5.2. Kutu Sementasyon Alüminyumlama İle İlgili Literatür Araştırması	20
5.3. Sıcak Daldırma Alüminyumlama İle İlgili Literatür Araştırması.....	23
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
6.1. Deney Düzenegi ve Numune Hazırlanması	26
6.2. Kaplama Tabakasının Karakterizasyonu	28

6.2.1. Optik Metal Mikroskop (OM) Çalışmaları	28
6.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) Çalışmaları.....	28
6.2.3. X-Işınları Difraktometresi (XRD) Çalışmaları	29
6.2.4. Mikrosertlik Ölçümleri	29
6.2.5. Aşınma Deneyleri	29
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	31
7.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları	31
7.2. XRD Sonuçları	39
7.3. Sertlik Sonuçları	41
7.4. Aşınma Sonuçları.....	43
7.5. Darbeli Kayma Aşınma Sonuçları	68
8. SONUÇLAR	74
KAYNAKÇA	76

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Ti' nin Temel Özellikleri.....	4
Tablo 2.2. Ti-6Al-4V Alaşımının Kimyasal Bileşimi	6
Tablo 2.3. Farklı Ti Alaşımlarının Mekanik Özellikleri	7
Tablo 6.1. Aşınma Deney Parametreleri	29
Tablo 7.1. İşlem Görmemiş ve Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının V Değerleri	46
Tablo 7.2. İşlem Görmemiş ve Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının k Değerleri	47
Tablo 7.3. İşlem Görmemiş ve Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının CoF Değerleri.....	48
Tablo 7.4. 600 °C 60 Saat, 700 °C 30 Saat ve 800 °C 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının V Değerleri.....	58
Tablo 7.5. 600 °C 60 Saat, 700 °C 30 Saat ve 800 °C 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının k Değerleri.....	59
Tablo 7.6. 600 °C 60 Saat, 700 °C 30 Saat ve 800 °C 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının CoF Değerleri.....	60
Tablo 7.7. Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının CoF Değerleri	67
Tablo 7.8. Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının V Değerleri	67
Tablo 7.9. Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının k Değerleri.....	67

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Alaşımısız Ti' nin T_{β} Sıcaklığına Bağlı Olarak İki Farklı Kristalografik Formu	5
Şekil 3.1. TO İşlemi Sonucu Yüzeyde Oluşan Oksit Tabakaları	9
Şekil 3.2. Ti-6Al-4V Alaşımında Al Birikiminin Şematik Gösterimi	11
Şekil 4.1. Aşınma Sisteminin Şematik Görüntüsü	13
Şekil 4.2. (a) İki Gövdeli Abratif Aşınma, (b) Üç Gövdeli Abratif Aşınma	14
Şekil 4.3. Adhezif Aşınma	15
Şekil 4.4. Yorulma Aşınması	15
Şekil 6.1. (a) Ti-6Al-4V Numuneleri, (b) TO Uygulanan Fırın	26
Şekil 6.2. (a) Homojen Karıştırılmış Toz, (b) Ti-6Al-4V Alaşımının Fırına Yerleştirilmesi..	27
Şekil 6.3. Sıcak Daldırma Alüminyumla Deney Düzenegi	27
Şekil 6.4. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan OM	28
Şekil 6.5. FE-SEM Cihazı	28
Şekil 6.6. İleri-Geri Aşınma Test Cihazı	30
Şekil 6.7. (a) Motor Subap Çalışma Prensibi Şematik Gösterim, (b) Darbeli Kayma Aşınma Cihazı	30
Şekil 7.1. 600, 700 ve 800 °C' de 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının FE-SEM ve OM Enine Kesit Görüntüleri	31
Şekil 7.2. 600, 700 ve 800 °C' de 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının FE-SEM-EDS Analiz Sonuçları	33
Şekil 7.3. Ti-Al Faz Diyagramı	34
Şekil 7.4. 600, 700 ve 800 °C' de 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının FE-SEM-EDS Haritalama Görüntüleri	35
Şekil 7.5. 600, 700 ve 800 °C' de 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının Ti, V, ve Al Elementlerinin Dağılımını Gösteren FE-SEM-EDS Çizgi Analizi	36
Şekil 7.6. 600 °C de 60 Saat, 700 °C de 30 Saat ve 800 °C' de 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının FE-SEM ve OM Kesit Görüntüleri	37
Şekil 7.7. 600 °C' de 60 Saat ve 700 °C' de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının O Elementi Dağılımını Gösteren FE-SEM-EDS Çizgi Analizi	38
Şekil 7.8. Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının Düşük ve Yüksek Büyütme OM Kesit Görüntüleri	39

Şekil 7.9. 600, 700 ve 800 °C’ de 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış ve İşlem Görmemiş Ti-6Al-4V Alaşımının XRD Paterni	39
Şekil 7.10. 600 °C de 60 Saat, 700 °C de 30 Saat ve 800 °C de 5 Saat TO Yapılmış ve İşlem Görmemiş Ti-6Al-4V Alaşımının XRD Paterni	40
Şekil 7.11. Alüminyumlama Yapılmış ve İşlem Görmemiş Ti-6Al-4V Alaşımının Enine Kesit Sertlik Değişimi	41
Şekil 7.12. TO Yapılmış ve İşlem Görmemiş Ti-6Al-4V Alaşımının Enine Kesit Sertlik Değişimi	42
Şekil 7.13. (a) İşlem Görmemiş ve (b) 600 °C, (c) 700 °C, (d) 800 °C’ de Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının Dört Farklı Yükte 10;20;30 mm/s Hızda CoF Değişimi	45
Şekil 7.14. (a) İşlem Görmemiş ve (b) 600, (c) 700 (d) 800 °C’ de Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının V, k ve CoF 2D Matlab Haritaları	49
Şekil 7.15. İşlem Görmemiş Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri	51
Şekil 7.16. 600 °C 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait -FESEM Görüntüleri.....	52
Şekil 7.17. 700 °C 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait -FESEM Görüntüleri.....	53
Şekil 7.18. 800 °C 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri.....	54
Şekil 7.19. (a) 600 °C 60 Saat, (b) 700 °C 30 Saat ve (c) 800 °C’ de 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının Dört Farklı Yükte 10;20;30 mm/sn Hızda CoF Değişimi	57
Şekil 7.20. (a) İşlem Görmemiş ve (b) 600 °C’ de 60 Saat, (c) 700 C’ de 30 Saat ve (d) 800 °C’ de 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının V, k ve CoF 2D Matlab Haritaları	61
Şekil 7.21. 600 °C 60 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri.....	63
Şekil 7.22. 700 °C 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri.....	64
Şekil 7.23. 800 °C 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri.....	65
Şekil 7.24. Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının Dört Farklı Yükte 10;20;30 mm/s Hızda CoF Değişimi	66
Şekil 7.25. (a) İşlem Görmemiş ve (b) Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının V, k ve CoF 2D Matlab Haritalar	68

Şekil 7.26. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 25 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası Aşınma Hızlarının Karşılaştırması.....	69
Şekil 7.27. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 350 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası Aşınma Hızlarının Karşılaştırması.....	70
Şekil 7.28. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 550 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası Aşınma Hızlarının Karşılaştırması.....	70
Şekil 7.29. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 25 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası 2D Profil Görüntüleri	71
Şekil 7.30. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 350 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası 2D Profil Görüntüleri ...	72
Şekil 7.31. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 550 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası 2D Profil Görüntüleri ...	72
Şekil 7.32. İşlem Görmemiş ve 600 °C 60 Saat, 700 °C 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının (a) 25 °C, (b) 550 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Deneyleri Sonrası Darbe ve Kayma Bölgelerinin FE-SEM Aşınma İz Görüntüleri	73

KISALTMALAR VE SİMGELER

SPH: Sıkı Paket Hegzagonal

HMK: Hacim Merkezli Kübik

m: Metre

mm: Milimetre

µm: Mikrometre

mg: Miligram

dk: Dakika

sn: Saniye

°C: Santigrat Derece

K: Kelvin

N: Newton

%: Yüzde

<: Küçük

>: Büyük

Ağ.: Ağırlıkça

Ti: Titanyum

Al: Alüminyum

V: Vanadyum

Ti-Al: Titanyum Alüminid

NH₄Cl: Amonyum Klorür

HF: Hidrojen Florür

HNO₃: Nitrik Asit

Al₂O₃: Alümina

GPa: Gigapaskal

MPa: Megapaskal

XRD: X-Işınları Difraktometresi

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

EDS: Enerji Dağılım Spektrometresi

MAP: Haritalama

OM: Optik Mikroskop

HV: Vickers Sertliği

T_β: Geçiş Sıcaklığı

TO: Termal Oksidasyon

CVD: Kimyasal Buhar Biriktirme

CoF: Sürtünme Katsayısı

V: Aşınma Hacmi

k: Aşınma Hız

1. GİRİŞ

Ti-6Al-4V alaşımı, titanyum alaşımlarının %45'ini oluşturan $\alpha + \beta$ alaşımı, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci, yüksek tokluk ve düşük yoğunluk gibi mükemmel özelliklerinden dolayı otomotiv, havacılık ve biyomedikal endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımının üretim ve üretim maliyeti gibi bir takım dezavantajları vardır (Yener vd., 2023). Titanyum ve alaşımları hava ile temas ettiğinde yüzeyde kendiliğinden oluşan birkaç nanometrelik kırılğan TiO_2 tabakası sayesinde aşındırıcı ortamda korozyona karşı koruma sağlamaktadır. Kaymalı aşınma koşullarında oluşan bu kırılğan tabaka kolayca kırılıp, zayıf korozyon direncine neden olmaktadır. Titanyum ve alaşımları düşük sertliğinden dolayı zayıf aşınma ve sürtünme direncine sahiptir. Bu dezavantajlı özelliklerini iyileştirmek için çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır. (Cao vd., 2018: 1). Bu yüzey işlemleri arasında; fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, nitrürleme, sol-jel yöntemi, termal oksidasyon (Cao vd., 2018: 1-2) ve alüminyumlama (Du vd., 2019) gibi yöntemler bulunmaktadır.

Termal oksidasyon yöntemi 1 μm ' den kalın ve düzgün pürüzlülüğe sahip oksit katmanlarının elde edilmesine olanak tanıyan, herhangi bir ön koşul gerektirmeyen ısıl işlem yöntemlerinden biridir. Termal oksidasyon yönteminde titanyumun oksijene olan yüksek afinitesinden ve yüksek sıcaklık difüzyonundan yararlanılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta oksijen içeren ortamda oksijen atomlarının altlık malzemeye difüzyonu ile oksit tabakası ve oksijen difüzyon bölgesinden oluşan iki tabakalı yapı elde edilmektedir. Sıcaklık ve zaman parametreleri kontrol edilerek; istenen morfolojide, kimyasal ve faz bileşiminde, uygun mekanik, tribolojik ve korozyon özelliklerine sahip bir difüzyon katmanı elde edilmektedir. Oksit tabakaları, titanyum ve alaşımlarının sertliği ve uygulama alanlarındaki davranışları üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. (Aniolek vd., 2016: 24)

Kutu sementasyon ile alüminyumlama yöntemi, halojenür tuzları tarafından etkinleştirilen kimyasal buhar biriktirme (CVD) işlemi kategorisine girmektedir. Kutu sementasyon ile alüminyumlama yapılacak altlık malzeme; saf veya alaşımlı kaplama bileşenleri (Al, Si, Cr, vb.), aktivatör görevi gören bir halojenür tuz (AlCl_3 , NH_4Cl vb.) ve inert bir dolgu maddesinden (Al_2O_3) oluşan iyi karıştırılmış bir toz paketine gömülür. Daha sonra hazırlanan toz paketi vakum altında, yüksek sıcaklıklarda (600–1200 $^{\circ}\text{C}$) inert gaz atmosferinde veya indirgeyici koşullar altında istenilen süre boyunca ısıtılır (Du vd., 2019). Yüzeyde aşınma, korozyon, sürtünme ve oksidasyon direncini artıran sert ve koruyucu alüminid tabakalar oluşur. Kutu sementasyon yöntemi CVD yaklaşımı gibi çeşitli form ve boyutlarda düşük maliyetli

süper alaşımların büyük hacimlerde üretilmesine olanak sağlamaktadır. Aynı zamanda bu yöntem geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir ve değişen geometrilere sahip malzemelerin düzgün bir şekilde kaplanmasını sağlayan, az maliyetli, basit ve çevreye zarar vermeyen etkili bir yöntem olarakta bilinmektedir (Yener vd., 2023: 1731-1732).

Sıcak daldırma alüminyumlama işlemi, numunelerin yüzey hazırlığının ardından belirli bir süre boyunca erimiş alüminyum veya alüminyum alaşımlı bir banyoya daldırılmasını içerir. Bu işlem esnasında sıvı alüminyum ile metal arasında karşılıklı difüzyon gerçekleşir. Alüminyum banyosunun sıcaklığı, daldırma süresi ve altlık malzemenin bileşimi; kaplama tabakasının kalınlığı ve oluşan fazların türlerini etkiler (Prayitno ve Abdunnaafi, 2021: 75). Sıcak daldırma alüminyumlama yöntemi; basitliği, düşük maliyeti, büyük parçalara uygulanabilirliği ve kalın kaplama sağlaması nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir (Kavukcu, 2021: 26; Jiang vd., 2018). Ancak, katılaşma sırasında alüminyumun büzülmesi ve yüksek sıcaklık riski, bu yöntemin dezavantajları arasındadır. Sıcak daldırma işleminin ardından, yüzey kalitesini iyileştirmek için difüzyon mekanizmasıyla değişiklik yapılması ve ısıtma işlemi uygulanması gereklidir (Kavukcu, 2021: 26).

Bu çalışma da; Ti-6Al-4V alaşımına termal oksidasyon, kutu sementasyon ile alüminyumlama ve sıcak daldırma alüminyumlama yüzey işlemleri uygulanmıştır. Yüzey işlemleri sonrasında elde edilen kaplamaların karakterizasyonu yapılarak, farklı hızlarda ve yüklerde sergilediği aşınma davranışları araştırılmıştır. Bu sayede mekanik ve aşınma nedeniyle oluşan malzeme hasarları engellenerek yüksek potansiyele sahip yüzeyler, kendi arasında kıyaslanarak her üç yöntemin üstün yönlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca motor supap uygulamalarında paslanmaz çeliğin yerini alabilecek yüksek sıcaklık aşınma direnci termal oksidasyon ile iyileştirilen, Ti-6Al-4V alaşımına 25, 350 ve 550 °C' de darbeli kayma aşınma deneyleri uygulanmıştır. Literatürde termal oksidasyon, kutu sementasyon ile alüminyumlama ve sıcak daldırma alüminyumlama yüzey işlemlerinin Ti-6Al-4V alaşımının aşınma direnci üzerinde olumlu bir etkisi olduğu bildirilmesine rağmen, farklı hız ve yük kombinasyonu birleşiminde aşınma davranışlarıyla ilgili çalışma sayısı sınırlıdır. Bu amaçla; yüksek mekanik dayanım, işlenebilirlik kolaylığı ve biyouyumluluk gibi üstün özelliklere sahip Ti-6Al-4V alaşımı farklı yüzey işlemleri ile uygulanarak, yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip yüzeyler oluşturulmuştur.

2. TİTANYUM VE ALAŞIMLARI

Titanyum (Ti) bir zamanlar nadir bulunan bir metal olarak kabul edilirken günümüzde magnezyum, demir ve alüminyumdan sonra yer kabuğunda en çok bulunan metallere biridir. İlk olarak 1791 yılında İngiliz mineralog ve rahip olan William Gregor siyah manyetitte bilinmeyen bir beyaz metalik oksit (TiO_2) keşfetmiştir. Ti elementinin yüksek miktarda oksijenle reaksiyona girme eğiliminden dolayı TiO_2 halinde bulunmaktadır (Pushp vd., 2022: 537; Zhang vd., 2020: 1). Kroll 1936 yılında rutil ve ilmenit gibi mineral cevheri formunda bulunan Ti elementini kendi ismini verdiği proses ile ayırmıştır (Prasad vd., 2015: 193). Ti metalinin cevherden nihai ürün haline gelmesi temel olarak dört aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamalar sırasıyla: Ti cevheri sünger olarak adlandırılan gözenekli Ti metaline indirgenir, sünger eritilerek külçe haline getirilir, elde edilen külçeler değirmen ürünlerine dönüştürülür ve değirmen ürünleri kullanım alanına göre nihai ürünler elde edilir. Kroll' un geliştirdiği bu yöntem ile Ti' un endüstride kullanımı yaygınlaşmıştır (Yadav ve Saxena, 2020: 2546-2547).

Ticari olarak saf Ti' nin temel özellikleri Tablo 2.1' de verilmiştir. Geçiş metali olan titanyum, demirin yaklaşık %60'ına karşılık gelen oldukça düşük yoğunluklu ve korozyona karşı dirençlidir. Ti manyetik değildir ve mükemmel ısı transferi özelliğine sahiptir. Ti ve alaşımlarının önemli bir özelliği ise alüminyumdan neredeyse 1000 °C, çelikten ise 200 °C fazla olan 1725 °C' lik yüksek ergime sıcaklığına sahip olmasıdır. Toksik değildir, biyolojik dokular ve minerallerle uyumludur. Mükemmel biyoyumluluk ile birlikte üstün tokluğa sahip olması ise bu metalin kimya ve biyomalzeme alanlarında kullanımını yaygın hale getirmiştir (Pimenov vd., 2021: 721). Yüksek dayanım, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci ve düşük elastisite modülü gibi sahip olduğu benzersiz özellikleri sayesinde zorlu mühendislik uygulamalarında da tercih edilen metallere biridir. Havacılık ve uzay endüstrilerinde ise Ti alaşımlarının özellikle yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğundan yararlanılır (Pitchi vd., 2020:3297).

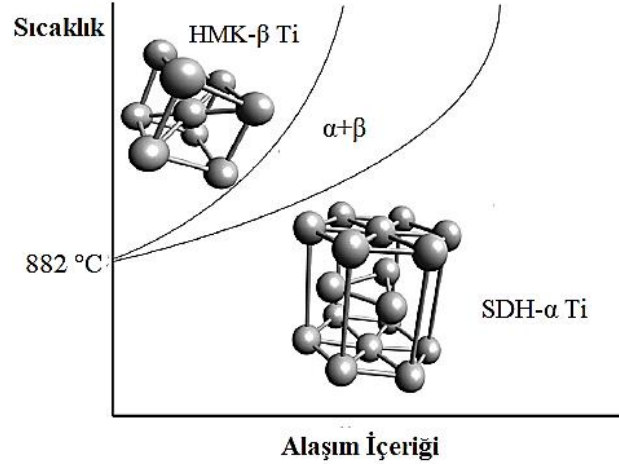
Tablo 2.1. Ti' nin Temel Özellikleri

Sembol	Ti
Atom Numarası	22
Atom Kütlesi	47,88
Yoğunluk (g/cm ³)	4,54
Elastisite Modülü (GPa)	115
Çekme Mukavemeti (MPa)	210-1380
Ergime Sıcaklığı (°C)	1725
Allotropik Dönüşüm Sıcaklığı (°C)	$\beta \rightarrow \alpha$ (882 °C)
Kristal Yapısı	HMK $\rightarrow$ SPH

Kaynak: (Pimenov vd., 2021: 721; Pitchi vd., 2020: 3297)

2.1. Ti ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Ti sıcaklığa bağlı olarak bir kristalografik formdan diğer bir kristalografik forma dönüşerek allotropik davranış gösterir. Oda sıcaklığında altıgen sıkı paket hegzagonal (SPH) kristal yapıya sahip α fazında bulunurken, 882 °C sıcaklığın üzerinde hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapıya sahip β fazına dönüşümü gerçekleşir. α veya $\alpha+\beta$ fazının ısıtılarak β fazına tamamen dönüştüğü sıcaklığa β geçiş sıcaklığı (T_β) denir. Isıl işlemler T_β sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta gerçekleştirildiği için bu sıcaklık oldukça önemlidir. Alaşımsız Ti' nin T_β sıcaklığına bağlı olarak iki farklı kristalografik formu Şekil 2.1' de gösterilmiştir. Saf halde bulunan Ti, mekanik özelliklerini geliştirmek için çeşitli alaşım elementleri ile alaşımlandırılabilir. Bu alaşım elementleri elde edilen mikroyapı üzerindeki etkilerine göre; α kararlaştırıcı elementleri, β kararlaştırıcı elementleri ve nötr alaşım elementleri olarak üç gruba ayrılır. α kararlaştırıcı elementler (O, Al, N, C vb.) α fazının stabil kaldığı sıcaklığı artırarak, β kararlaştırıcı elementler (V, Nb, Mo, Ta vb.) β fazının stabil kaldığı sıcaklığı azaltarak stabilizasyon sıcaklığını değiştirebilir. Nötr alaşım elementlerinin ise stabilizasyon sıcaklığına herhangi bir etkisi yoktur. Ti alaşımları yapısında bulunan fazların miktarına göre; α , α' ya yakın, $\alpha + \beta$, yarı kararlı β ve β Ti alaşımları olarak sınıflandırılır (Kaur ve Singh, 2019: 846).



Şekil 2.1. Alaşımsız Ti' nin T_{β} Sıcaklığına Bağlı Olarak İki Farklı Kristalografik Formu

Kaynak: (Prasad vd., 2015: 193)

2.1.1. α ve α' ya Yakın Ti Alaşımları

α -Ti alaşımları Ti' ye alüminyum (Al), oksijen (O), azot (N), karbon (C) ve bor (B) gibi faz dönüşüm sıcaklığını artırıcı etkiye sahip α kararlaştırıcı elementlerinin eklenmesiyle tamamen α fazından oluşur. Dönüşüm sıcaklığı üzerinde hiçbir etkisi olmayan nötr olarak adlandırılan kalay (Sn) veya zirkonyum (Zr) elementleri de α fazını güçlendirmek için eklenebilir. α' ya yakın Ti alaşımları; α alaşımlarına benzer özellik gösterir ve ağırlıkça %5' den az β kararlaştırıcı elementleri içerir. α -Ti alaşımları O ve Fe elementleri miktarında farklılık gösteren alaşımsız titanyum veya en az %99 titanyum içeren yüksek saflıkta CP-Ti olarak bilinen ticari saflıktaki titanyum şeklinde adlandırılır. Fe, O, N ve H gibi Ti alaşımının mekanik özelliklerini etkileyen ara yer elementlerinin düşük içeriğine sahip dört tip CP-Ti vardır. α -Ti alaşımları; üstün sürünme direncine, mükemmel korozyon direncine ve iyi kaynaklanabilirliğe sahiptir. Mekanik dayanımları oda sıcaklığında sınırlıdır ve çok kararlı SPH yapılarından dolayı α -Ti alaşımlarının bu sınırlamaları ısıtılma ile iyileştirilemez (Hazwani vd., 2022: 3). Fakat soğuk işlem sonrası artık gerilmeleri ortadan kaldırmak için yeniden kristalleşme tavlama veya sadece tavlama yapılabilir. Mikroyapı, tavlama sonrası soğutma hızına bağlı olarak farklılık gösterir. α alaşımları, $\alpha+\beta$ alaşımlarından veya β alaşımlarından daha düşük dövülebilirliğe ve dövme sıcaklığı toleranslarına sahiptir (Öztürk, 2024: 8).

2.1.2. $\alpha+\beta$ Ti Alaşımları

$\alpha+\beta$ Ti alaşımları, Ti alaşımları arasında yaygın olarak kullanılan, daha çok β kararlaştırıcı elementleri içeren hem α hemde β fazına sahip iki fazlı Ti alaşımı olarak adlandırılır. Bu tip Ti alaşımlarının mekanik özellikleri ısıtılma uygulanarak kontrol

edilebilir. Bu sayede iyi işlenebilirliğe, oda sıcaklığında yüksek dayanıma ve yüksek sıcaklıkta orta dayanıma sahiptir. α -Ti alaşımlarıyla karşılaştırıldığında daha yüksek akma ve çekme dayanımına sahipken şekillendirilebilirlikleri daha düşüktür. Tavlama yapılan $\alpha+\beta$ Ti alaşımları; iyi süneklik, yüksek mukavemet ve homojenliğe sahiptir (Hazwani vd., 2022: 3; Öztürk, 2024: 9). Aynı zamanda, $\alpha+\beta$ Ti alaşımları mükemmel korozyon direncine sahiptir ve insan kemik arayüzünde hızlı bir TiO_2/OH filmi oluşturarak insan vücuduyla hızlı osseointegrasyon sağlar (Hazwani vd., 2022: 4).

İki fazlı $\alpha+\beta$ Ti alaşımlarından en yaygın kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, korozyona karşı dayanıklılık, vücut ortamına karşı tam inertlik, gelişmiş biyouyumluluk ve nispeten düşük elastisite modülüne sahip olduğundan (Fuentes vd., 2019: 38) başta havacılık olmak üzere otomotiv ve biyomedikal uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Yener vd., 2023: 1). Kimyasal bileşimi Tablo 2.2’ de verilen Ti-6Al-4V alaşımının bileşiminde bulunan dayanım, kaynaklanabilirlik ve oksidasyon direnci özellikleri sağlayan Al α fazını stabilize ederken; yüksek korozyon dayanımı, düşük elastisite modülü ve şekillendirilebilirlik özellikleri sağlayan V ise β fazını stabilize etmektedir (Oldani ve Dominguez, 2012: 151). Ti-6Al-4V alaşımının özellikleri; deformasyon, ısıtma işlemi, yaşlandırma, yeniden kristalleştirme ve gerilim giderme tavlama gibi termomekanik yöntemlerle değiştirilebilir. Bu sayede Ti-6Al-4V alaşımında katmanlı, eş eksenli, çift modlu, martensit ve Widmanstätten gibi çeşitli mikro yapılar ortaya çıkabilmektedir. Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen bu mikro yapılar, β fazı bölgesinden gelen soğuma oranından kaynaklanan α ve β fazlarının düzeninden ve miktarından etkilenmektedir (Öztürk, 2024: 10).

Tablo 2.2. Ti-6Al-4V Alaşımının Kimyasal Bileşimi

	Ti	Al	V	H	Fe	O	C	N
Ti-6Al-4V	Kalan	6,38	4,02	0,0125	0,25	0,13	0,08	0,05

Kaynak: (Oldani ve Dominguez, 2012: 151)

2.1.3. Yarı Kararlı β ve β -Ti Alaşımları

β -Ti alaşımları Ti’ ye faz dönüşüm sıcaklığını azaltan β kararlaştırıcı elementler eklenmesiyle β fazından oluşur. Yarı kararlı β alaşımları ise β alaşımları gibi davranırlar fakat az miktarda α kararlaştırıcı elementleri de içerir ve bu sayede daha yüksek elastisite modülüne sahiptir. β kararlaştırıcı elementler; Molibden (Mo), vanadyum (V), tantal (Ta) ve niyobyum

(Nb) gibi β -izomorf elementler: demir (Fe), manganez (Mn), krom (Cr), kobalt (Co), nikel (Ni), bakır (Cu), silisyum (Si) ve hidrojen (H) gibi β -ötektoid elementleri olarak ikiye ayrılır. Ti bazlı alaşımlara β -izomorf elementlerin eklenmesiyle β -Ti tam çözünürlük meydana geldiğinden yalnızca bir faz oluşur. β -Ti' de sınırlı çözünürlük ve ötektoid ayrışma yoluyla intermetalik bileşiklerin oluşması nedeniyle, β -ötektoid elementlerin Ti bazlı alaşımlara eklenmesiyle birden fazla faz oluşur. α -Ti ve $\alpha+\beta$ Ti alaşımlarıyla karşılaştırıldığında; β -Ti alaşımları daha düşük elastisite modülüne, yüksek sertleşebilirliğe, kolaylıkla ısıtılabilir ve tutulabildiklerinden geliştirilebilir süneklik ve tokluğa sahiptir. β Ti alaşımlarının dikkat çekici özelliği, stres koruma etkisini azaltmak için kullanılan düşük elastisite modülüne sahip olmasıdır (Hazwani vd., 2022: 5). Farklı kategorideki Ti alaşımlarının mekanik özellikleri Tablo 2.3' te verilmiştir.

Tablo 2.3. Farklı Ti Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

Alaşım	Mikroyapı	Elastisite Modülü (GPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
CP-Ti (Grade 1)	α	115	170	240
CP-Ti (Grade 2)	α	105	275	344
CP-Ti (Grade 3)	α	115	380	450
CP-Ti (Grade 4)	α	105	480	550
Ti-6Al-4V	$\alpha+\beta$	110-114	825-869	895-930
Ti-6Al-7Nb	$\alpha+\beta$	105	921	1024
Ti-5Al-2,5Fe	$\alpha+\beta$	110	914	1033
Ti-3Al-2,5V	$\alpha+\beta$	100	585	690
Ti-16Nb-10Hf	β	81	730-740	850
Ti-13Nb-13Zr	β	79	900	1030
Ti-24Nb-0,5O	β	54	665	810
Ti-15Mo-5Zr-3Al	β	75	870-968	882-975
Ti-12Mo-6Zr-2Fe	β	74-85	1000-1060	1060-1100
Ti-15Mo (Tavlanmış)	β	78	544	874

Kaynak: (Hazwani vd., 2022: 4)

3. TİTANYUM VE ALAŞIMLARINA UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ

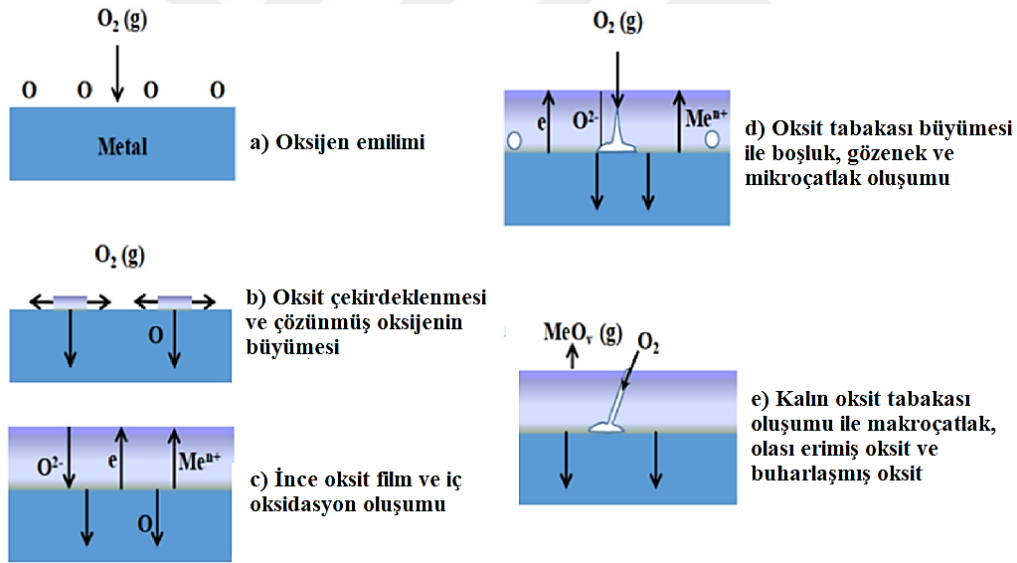
Ti ve alaşımlarının zayıf tribolojik özelliklere sahip olması sürtünme hareketinin baskın olduğu uygulamalarda kullanımını sınırlandırmaktadır. Sürtünme mekanizması alaşım parçacıklarının parçalamasına neden olur ve alaşımı kullanılamaz hale getirir. Örneğin; Ti-6Al-4V alaşımında aşınma hasarı oluşması durumunda alaşımda bulunan V serbest kalarak alaşımı kullanılmaz hale getirir. Aşınmaya dirençli kaplamalar yüzey işlemleri uygulanarak gerçekleştirilebilir. Ti ve alaşımları yüzey kaplama işlemleriyle, yüzey sertlikleri artırılıp sürtünme katsayısı azaltılarak tribolojik özellikleri iyileştirilebilir. Uygulanan yüzey işlemlerinden sonra Ti ve alaşımlarının aşınma direnci iyileştirildiğinden zor çalışma koşullu mekanik uygulamalarda dahi kullanılması mümkündür (Attabi vd., 2019: 1-2).

Ti ve alaşımlarına uygulanan yüzey işlemleri; kaplamalar, ısıt işlemler ve termokimyasal yüzey işlemler olarak üç ana gruba ayrılır. Fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve yüksek hızlı oksijen-yakıt püskürtme (HVOF), plazma püskürtmeli kaplamalar gibi Ti ve alaşımlarının yüzeylerine uygulanarak zayıf tribolojik özellikleri geliştiren çeşitli kaplamalar mevcuttur. Isıt işlemler; yüzeyin kimyasında bir değişiklik meydana getirmeyip mikro yapısında değişikliğe neden olan iyon implantasyonu, lazer destekli ve plazma destekli yüzey ısıt işlemleridir. Kütlesel ısıt işlemler; yeniden kristalleşme, yaşlandırma, çözeltiye alma ve tavlama gibi çeşitli ısıt işlemler, kaplama yapılan alaşımların istenen mekanik özelliklerin elde edilmesi için uygulanan iki ayrı işlemdir. Kütlesel ısıt işlemleri tribolojik özelliklerin geliştirilmesinde yüzeysel ısıt işlemleri kadar etkili değildir. Ti ve alaşımları çeşitli sıcaklıklarda elementlerle reaksiyona girerek farklı difüzyon bazlı işlemlerin uygulanmasına olanak sağlamaktadır. Bu sayede Ti ve alaşımlarına çeşitli termokimyasal yüzey işlemleri uygulayarak mekanik özellikleri geliştirilmektedir. Fakat Ti'nin kimyasal aktifliği nedeniyle kolayca reaksiyona girebildiğinden (özellikle oksijen ile) uygulanan işlemler inert gaz veya vakum ortamında gerçekleştirilmelidir. Termokimyasal işlemler ile sürtünme katsayısı azaltılır, aşınma direnci ve korozyon direnci artırılır (İpekçi, 2012: 15-16-17).

3.1. Termal Oksidasyon (TO)

Reaktif yapıya sahip olan oksijen periyodik tablonun sekizinci elementidir ve on altıncı grubunda yer alır. Oda sıcaklığında Ti oksijen ile reaksiyona girerek yüzeyde kendiliğinden birkaç nanometre kalınlığında oksit tabakası oluşturur ve oluşan bu oksit tabakası korozyona karşı koruma sağlar. Termal oksidasyon (TO) yöntemi oksijen içeren herhangi bir ortamda

yüksek sıcaklıkta oksijen atomlarının Ti ve alaşımlarına difüzyonuna dayanmaktadır (Gülyüz vd., 2015: 104). Ti' nin oksijene olan yüksek afinitesi ve kristal kafesinde büyük miktarda oksijeni çözebilme kabiliyeti sayesinde TO yöntemiyle yüzeyde bir oksit tabakası ve yüzeyin altında oksijen difüzyon bölgesi oluşur (Sun vd., 2023: 2). Ti' nin TiO , Ti_3O , Ti_2O , TiO_2 , Ti_3O_2 ve Ti_2O_3 gibi çeşitli oksit stokiometrilere sahiptir. Bunlar arasında en kararlı olan TiO_2 bileşiğidir (Gülyüz vd., 2015: 104). 400-1100 °C arasında değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilen TO sonrası yüzeyde rutil, anataz ve brokit yapıları üç farklı kristalografik forma sahip TiO_2 tabakası ile (Ossowska vd., 2021: 2) gelişmiş aşınma direnci, düşük ve kararlı sürtünme sağlanırken; katı çözelti sertleştirilmesi ile sertleştirilen oksijen difüzyon bölgesi ile iyi bir aşınma direnci ve yüksek yük taşıma kapasitesi elde edilir (Sun vd., 2023: 2). 650 °C' den daha düşük oksidasyon sıcaklığında oksit tabakası olarak TiO_2 ' nin anataz formu hakimken daha yüksek oksidasyon sıcaklıkları ve daha uzun oksidasyon sürelerinde rutil formu hakimdir ve yoğun bir şekilde gözenekli morfoloji meydana gelmektedir (Gülyüz vd., 2015: 104). Şekil 3.1' de TO yönteminin oluşumu şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1. TO İşlemi Sonucu Yüzeyde Oluşan Oksit Tabakaları

Kaynak: (Unune vd., 2022: 10)

TO yöntemi, Ti ve alaşımlarının yüzeyini sertleştirmek ve zayıf tribolojik özelliklerini iyileştirmek için uygulanan herhangi bir ön koşul gerektirmeyen, ekonomik, basit ve çevre dostu bir tekniktir (Sun vd., 2023: 2). Bu teknik oksit tabakalarını geliştirmek için farklı sıcaklıklarda ve sürelerde uygulanır. Sıcaklık ve oksidasyon süresi parametrelerindeki değişiklikler aşınma direnci, korozyon direnci ve biyouyumluluk gibi farklı özellikler üzerinde etkilidir. Ayrıca oksidasyon süresinin artmasıyla oksit tabakalarının yüzey pürüzlülüğü de

artmaktadır (Pitchi vd., 2022: 2). Ti ve alaşımlarının oksidasyon mekanizması sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olduğu için farklı oksidasyon kinetikleri mevcuttur. Oksit tabakasının özellikleri oksidasyon kinetiğine bağlıdır ve Denklem 3.1; 3.2 ve 3.3' de gösterilmiştir.

- I. Logaritmik oksidasyon: Oksidasyon başlangıçta hızlıdır daha sonra yavaşlar ve zamanla ihmal edilir.

$$X^2 = k \log(t + t_0) \quad (3.1)$$

- II. Parabolik oksidasyon: Oksidasyon hızı zamana bağlı olarak azalır.

$$X^2 = kt \quad (3.2)$$

- III. Lineer oksidasyon: Oksidasyon hızı zamana bağlı olarak sabittir.

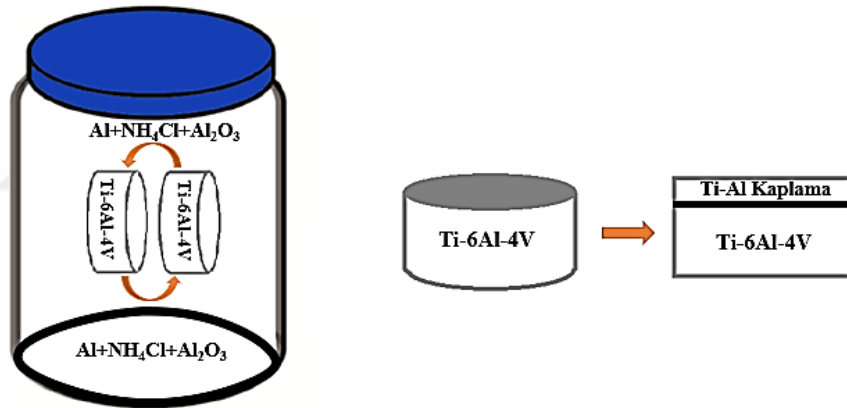
$$X = kt \quad (3.3)$$

Denklem 3.1; 3.2 ve 3.3' de X oksidasyon sırasında ölçülen kalınlık miktarını, k oksidasyon hız sabitini ve t oksidasyon süresini ifade etmektedir. Logaritmik oksidasyon 400 °C sıcaklığın altında ince bir oksit tabakası oluşumuyla sonuçlanır. 600 °C sıcaklığın üzerinde kalın bir oksit tabakası oluşumu parabolik oksidasyonla ifade edilir. 400-600 °C sıcaklıkları arasında logaritmik ve parabolik oksidasyon arasında bir geçiş vardır ve artan sıcaklıkla oksijenin çözünmesi daha belirgindir. 800 °C' nin üzerindeki sıcaklıklarda ise lineer oksidasyon mekanizması hakimdir (Bel vd., 2016: 363).

3.2. Kutu Sementasyon İle Alüminyumlama

Kutu sementasyon yöntemi halojenür tuzları (AlCl_3 , NH_4Cl , NH_4F vb.) ile etkinleştirilen kimyasal buhar biriktirme (CVD) yüzey işlemi kategorisine girer (Du vd., 2019: 2). Kutu sementasyon yöntemi; kromlama, alüminyumlama ve molibdenleştirme gibi kaplamalar elde etmenin kolay ve ucuz yöntemlerinden biridir (Yener, 2019: 114). Şekil 3.2' de şematik olarak verilen kutu sementasyon ile alüminyumlama yönteminde altlık malzeme; saf veya alaşımlı biriktirme elemanları (Al, Si, Cr vb.), aktivatör görevi gören bir halojenür tuz (AlCl_3 , NH_4Cl vb.) ve inert bir dolgu maddesinden (Al_2O_3 vb.) oluşan iyi karıştırılmış bir toz paketine gömülür. Daha sonra hazırlanan toz paketi yüksek sıcaklıklarda (600–1200 °C) inert gaz atmosferinde, vakumda veya indirgeyici koşullar altında istenilen süre boyunca ısıtılır. Aktivatör, biriktirme elemanlarını içeren bir dizi gaz halojenür oluşturmak için yüksek sıcaklıkta biriktirme elemanları ile reaksiyona girer. Bu halojenürler buhar fazına geçerek gözenekli toz karışımında bulunan biriktirme elemanı altlık malzeme yüzeyine taşınır. Al kaplama; bu halojenür buharlarının altlık malzeme yüzeyinde birikip ardından kaplama

tabakası ile altlık malzeme arasında katı hal interdifüzyonunun meydana gelmesiyle gerçekleşir. Altlık malzemelere alaşım elementlerinin eklenmesi hem oksidasyon davranışını hem de alüminid kaplamaların mikro yapısını ve oksidasyon direncini etkiler (Du vd., 2019: 2). Ti ve alaşımlarında yüksek sıcaklıklarda oluşan TiAl (γ), TiAl₂, TiAl₃ ve Ti₃Al (α_2) gibi Ti-Al intermetalik bileşikler yüksek sertlik, yüksek erime noktası ve yüksek sıcaklıkta iyi oksidasyon direnci gibi özelliklere sahiptir. Bu bileşikler arasında düşük sıcaklıkta bile Al içeren ortamda kolayca oluşabilen TiAl₃ bileşiği en düşük yoğunluğa, yüksek sertliğe ve 1000 °C’ de bile en iyi oksidasyon direncine sahiptir. Ancak; TiAl₃ düşük sünekliğe sahip olduğundan kullanım alanı sınırlıdır (Wang vd., 2011a: 153). Kutu sementasyon ile alüminyumlama yöntemiyle aşınma, korozyon, sürtünme, oksidasyon direncini ve yüzey kalitesini artırarak sert ve koruyucu alüminid katmanlar oluşturulur. Bu yöntem karmaşık geometrili parçalar üzerinde tekdüze kaplama oluşturarak kaplama katmanlarının alt katmanlara mükemmel yapışmasını sağlayan; basit, uygun maliyetli ve çevre dostu bir tekniktir (Yener vd., 2023: 1731-1732; Yang vd., 2021: 1).

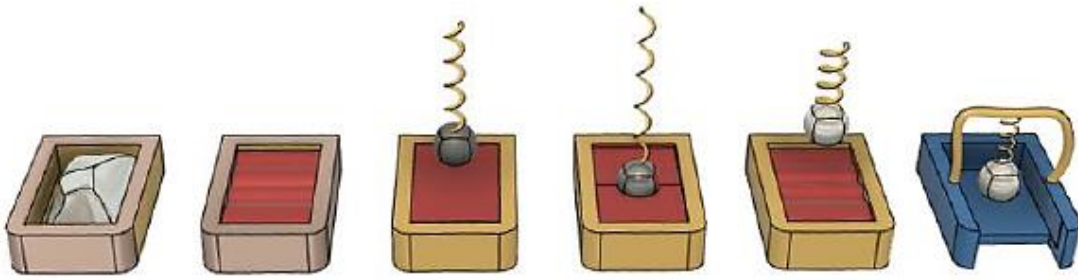


Şekil 3.2. Ti-6Al-4V Alaşımında Al Birikiminin Şematik Gösterimi

3.3. Sıcak Daldırma Alüminyumlama

Sıcak daldırma kaplama yöntemi temel olarak altlık malzemenin erimiş banyoya daldırılmasıyla gerçekleşir. Bu erimiş metal banyosu alüminyum, çinko gibi farklı metal türlerini içerir ve alüminyum kullanıldığında sıcak daldırma alüminyumlama olarak isimlendirilir (Kavukcu, 2021: 25). Sıcak daldırma alüminyumlama işlemi Şekil 3.3’ te gösterildiği gibi numunelerin yüzey ön işleminden sonra belirli bir süre erimiş alüminyum veya alüminyum alaşımlı bir banyoya daldırılmasıdır. Bu işlemde sıvı alüminyum ve matris metal arasında karşılıklı difüzyon meydana gelir. Alüminyum banyosunun sıcaklığına, daldırma süresine, altlık malzeme bileşimine bağlı olarak kaplama tabakası kalınlığı ve oluşan fazlar farklılık gösterir. Kaplamanın kalitesi, ara yüzeyde oluşan intermetalik tabakanın

özelliklerine bağlıdır (Prayitno ve Abdunnaafi, 2021: 75). Bu yöntem ilk olarak paslanmaz çelikte, karbon çeliğinde ve alaşımlı çelikte uygulanmıştır. Genellikle yüksek sıcaklıkta korozyon direncini, aşınma direncini ve oksidasyonu iyileştirmek için kullanılmaktadır (Wang vd., 2011b). Sıcak daldırma alüminyumlama basit, düşük maliyeti, büyük parçalara uygulanabilirliği ve kalın kaplama sağlaması nedeniyle rekabetçi bir yöntemdir (Kavukcu, 2021: 26; Jiang vd., 2018). Fakat katılaşma esnasında alüminyumun büzülmesi ve yüksek sıcaklık tehlikesi bu yöntemin dezavantajlarıdır. Sıcak daldırma işleminden sonra, yüzey kalitesini iyileştirmek için difüzyon mekanizmasıyla değişiklik yapılması gerekir ve ısıtılma işlem gereksinimi öne çıkmaktadır (Kavukcu, 2021: 26).

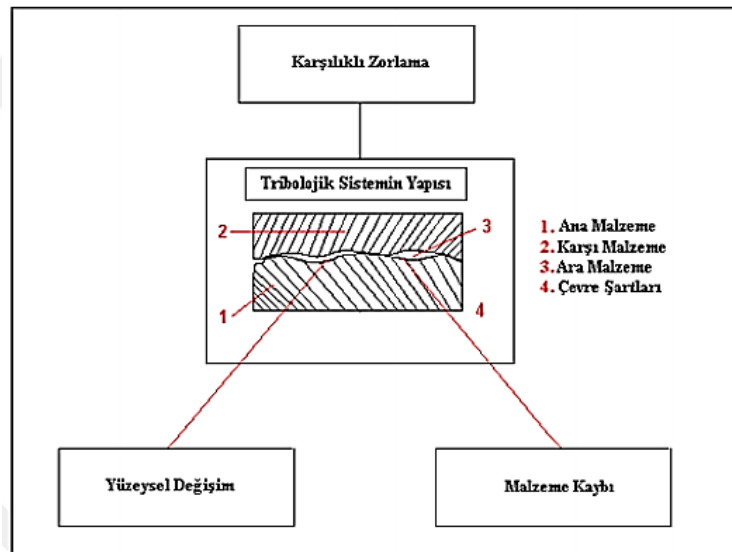


Şekil 3.3. Sıcak Daldırma Alüminyumlama İşleminin Şematik Gösterimi

Kaynak: (Kavukcu, 2021: 26)

4. AŞINMA

Aşınma, mekanik nedenlerden kaynaklı katı malzeme yüzeyinde artan malzeme kaybıdır. Katı, sıvı veya gaz halindeki bir karşı cismin teması ve bağıl hareketiyle gerçekleşebilir. Ana malzeme ile karşı malzeme temas ettiğinde yağlama mevcut olmadığında veya yağlama film kalınlığı çok küçük olduğunda aşınma meydana gelmektedir (Kovaříková vd., 2009: 4). Aşınma 1979' da DIN 50320' ye göre, "Kullanılan malzemelerin katı, sıvı, gaz gibi başka malzemelerle temas etmesi sonucu mekanik etkilerle yüzeyden küçük parçacıkların kopmasıyla ortaya çıkan yüzey bozulmasıdır." şeklinde ifade edilmiştir. Aşınmadan bahsedebilmek için; sürtünmenin gerçekleşmesi, mekanik etkinin bulunması, yavaş ama sürekli bir süreç olması ve malzeme yüzeyinde değişiklikler meydana gelmesi gerekmektedir (Tabur ve İzçiler, 2019: 56). Aşınma mekanizmaları; adhezif aşınma, abrazif aşınma, yorulma aşınması ve korozyon aşınma olarak dört ana sınıfa ayrılır. Aşınma mekanizmaları tek başına, ardışık olarak veya eş zamanlı olarak gerçekleşebilir (Kovaříková vd., 2009: 4). Aşınma sistemi, Şekil 4.1' de görüldüğü gibi ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, temas kuvveti (yük), izafi hareket ve çevre temel unsurlarından oluşmaktadır.

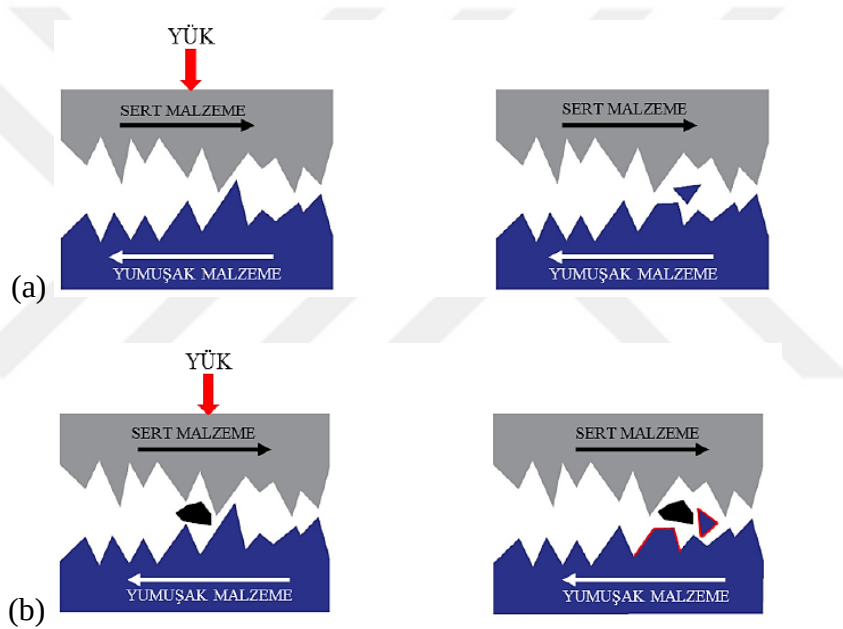


Şekil 4.1. Aşınma Sisteminin Şematik Görüntüsü

Kaynak: (Dere, 2021: 25)

Abrazif aşınma sert bir yüzeyin yumuşak bir yüzeye sürtünmesiyle yumuşak yüzeyde iz oluşmasıdır. Şekil 4.2' de gösterildiği gibi bu aşınma çeşidi iki gövdeli ve üç gövdeli aşınma olarak ikiye ayrılmaktadır. İki gövdeli aşınma sert yüzeyin yumuşak yüzeye karşı kayma hareketi yapması ile yumuşak yüzeyde ağırlık kaybının meydana gelmesidir. İki gövdeli

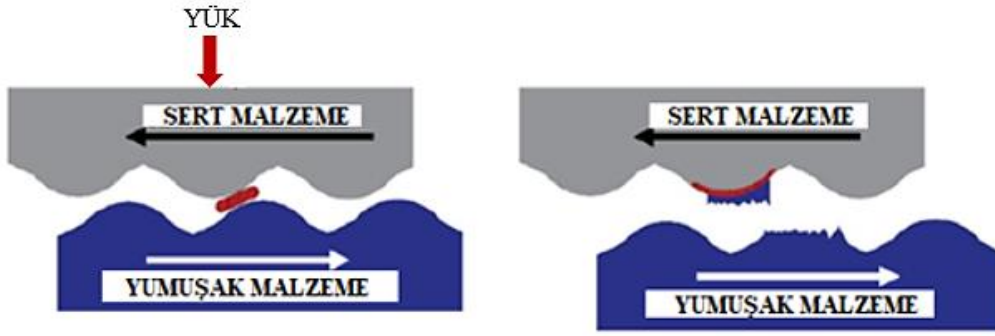
aşınmada ara malzeme yoktur. Üç gövdeli aşınma ise aşındırıcı malzeme ile aşınan malzeme arasına ara malzeme girmesiyle parçacıkların ayrılmasıdır (Solemani ve Moavenian, 2017: 231). Abrasif aşınmanın; kesme, pulluklanma, mikroyorulma, takozlama ve mikroçatlak olarak malzemenin özelliklerine bağlı olarak çeşitli mekanizmaları vardır. Sünük malzemelerde, kesme veya pulluklama mekanizması yayginken gevrek malzemelerde, mikroçatlak mekanizması yaygındır. Dolayısıyla, bu mekanizmalar sünük malzemelerde daha fazla plastik deformasyon ile gevrek malzemelerde çok az plastik deformasyon ile oluşur. Ancak bazı sünük malzemelerin yüzeylerinde kırılğan bölgeler bulunabileceğinden, bu durum her zaman geçerli olmayabilir. Abrasif aşınma mekanizmasında tane yapısı, sertlik, kayma hızı, pürüzlerin boyutu ve şekli, aşındırıcı taneler ve uygulanan normal yük gibi temel faktörler önemli rol oynamaktadır (Serrano Martin, 2020: 35-36).



Şekil 4.2. (a) İki Gövdeli Abrasif Aşınma, (b) Üç Gövdeli Abrasif Aşınma

Kaynak: (Er, 2023: 15-16)

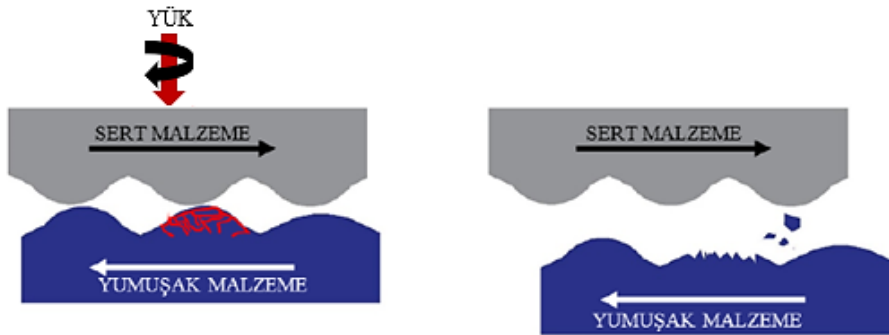
Adhezif aşınma Şekil 4.3'te gösterildiği gibi normal yük altında temas eden malzeme yüzeylerinde kayma işlemi ile bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferidir. Malzeme transferi yumuşak malzemeden daha sert malzemeye yeterli ısı meydana geldiğinde temas eden iki yüzeyde meydana gelir. Adhezif aşınmanın gerçekleşebilmesi için malzemelerden birinin alt yüzeyinde kırılmanın meydana gelmesi gerekir. Transfer filminin oluşumu, malzemenin aşınma parçacığı olarak bir yüzeyden diğerine aktarıldığı yapışma aşınmasının karakteristik bir özelliğidir (Bahari, 2017: 23).



Şekil 4.3. Adhezif Aşınma

Kaynak: (Er, 2023; 16)

Yorulma aşınması tekrarlı yükler sonucunda yüzeyde deformasyon sonrası çatlaklar oluşması ve kırılmaların meydana gelmesiyle oluşur. Şekil 4.4’ te yorulma aşınması temsili görüntüsü verilmektedir. Yorulma aşınması, malzemenin kayma dayanımını aşan alt yüzey kayma gerilmeleri nedeniyle yüzeyde meydana gelen boşluklar ve kaplama kayıpları ile mikroskobik olarak gözlemlenebilir bir aşınma türüdür. Yorulma aşınmasının bir alt türü olan delaminasyon aşınması, alt yüzey çatlakları sonucu oluşur. Suh tarafından önerilen delaminasyon teorisinde, tekrarlı yükleme nedeniyle alt yüzeyde kayma hataları oluşur. Bu kayma hataları birikir ve mühendislik malzemelerinde bulunan sert parçacıklar boşlukların oluşmasına neden olur. Boşluklar birleşerek yüzeye paralel çatlaklar oluşturur. Bu durum ince bir malzeme tabakasının tabaka şeklinde ayrılmasına yol açmaktadır (Bahari, 2017: 27-28).



Şekil 4.4. Yorulma Aşınması

Kaynak: (Er, 2023; 16)

Korozyon aşınması, kayma işleminin korozyonlu bir ortamda gerçekleşmesiyle meydana gelmektedir. Şekil 4.5’ te şematik gösterimi verilmiştir. Korozyon metal yüzeylerde; yağlayıcılar, tuzlar, su ve asitler gibi korozyonlu ortamlarda kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur. Korozyon aşınması sonucunda aşınmış yüzeyde delikler oluşur. Hava ortamındaki kimyasal aşınma genellikle oksidatif aşınma olarak adlandırılır, çünkü en baskın korozyon ortamı oksijendir. Kimyasal aşınma, uygun inhibitör katkı maddeleri kullanılarak kontrol edilebilir (Bahari, 2017: 29).



Şekil 4.5. Korozyon Aşınması

Kaynak: (Er, 2023; 17)

5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu çalışmada Ti-6Al-4V alaşımına; TO, kutu sementasyon ile alüminyumlama ve sıcak daldırma alüminyumlama işlemleri uygulanarak, elde edilen kaplamaların farklı hızlarda ve yüklerde sergilediği sürtünme-aşınma davranışları incelenmiştir. Aşağıda bu çalışmada uygulanan üç farklı kaplama yöntemiyle daha önce Ti ve alaşımları üzerine yapılan çalışmalar üç farklı bölümde özetlenmiştir.

5.1. TO İle İlgili Literatür Araştırması

İbrahim vd. (2022), toz metalurjisi yöntemiyle %18 gözeneklilik içeren Ti-23-Nb alaşımının mekanik özelliklerini değiştirmeden aşınma direncini arttırmak için 600 °C’ de 6 saat ve 60 saat TO yapılmıştır. 6 saat TO uygulanan numunede ~0,5 µm kalınlığında TiO₂ rutil oksit tabakası (OL) ve 620 HV_{0.025} yüzey sertliği elde edilmiştir. TO süresinin 60 saate çıkarılmasıyla ~3.0 µm kalınlığında OL oluşmuş ve yüzey sertliği 980 HV_{0.025}’ e yükselmiştir. Sinterlenmiş numunelerle karşılaştırıldığında TO uygulanmış numunelerin yüzey sertliği artmıştır. Aynı zaman da vücut sıvısını (SBF) simüle eden alümina bilyeye karşı yapılan deneylerde sürtünme katsayısında (CoF) azalma ile üstün aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir. 60 saat TO uygulanmış numune daha yüksek yüzey sertliğine sahip olmasına rağmen, 6 saat TO uygulanmış numuneden daha yüksek aşınma hacmi ve COF sergilemiştir. Sonuç olarak, 6 saat TO uygulanan numunenin mekanik özellikleri korunurken aşınma direnci arttığından biyomedikal uygulamalarda kullanılması uygun bir TO süresi olduğu rapor edilmiştir.

García-Rueda vd. (2022), TO yöntemiyle Ti-6Al-4V alaşımının yüzey özellikleri üzerindeki etkisini anlamak ve sertliği artırarak tribolojik özelliklerini iyileştirmek için bu çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. 450 °C, 550 °C, 650 °C, 750 °C ve 1000 °C de iki saat TO işlemi yapılmıştır. 650 °C’ de yapılan TO işleminden başlayarak Ti-6Al-4V alaşımının morfolojisinde rutil kristal fazın oluşumu gözlemlenmiştir. 750 °C’ de TO uygulanan alaşımda, TO uygulanmamış alaşıma göre iyileşme ile 13,98 GPa maksimum sertlik elde edilmiştir. 750 °C’ de aşınma oranı $2,26 \times 10^{-5}$ mm³/Nm’ ye düşmüş ve sürtünme direncinin 0,58 civarında olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda iki saatlik süre ile ısıtılmanın ardından yavaş soğutma yapılarak termal etkiler azaltılmış, morfolojik değişiklikler meydana gelmiş ve rutil faz oluşmuştur. 750 °C’ de TO uygulanan alaşımın sertliği, başlangıç değerine kıyasla dört kat artmıştır; bu da ısıtılma sırasında oluşan oksit tabakasının iyi yapışmadığını göstermiş ve sürtünme katsayısı değişmeden kalırken aşınma hızının azalmasını sağlamıştır.

Kumar vd. (2020), Titanyum Grade 2 alaşımına 600-800 °C sıcaklık aralığında, 72 saate kadar farklı sürelerde TO yüzey işlemi uygulamış ve tribolojik özelliklerini değerlendirmişlerdir. 800 °C’ de yapılan TO işleminde fazla kütle artışı meydana gelmiştir. 700 ve 800 °C ile 600 °C’ de yapılan TO sonuçları karşılaştırıldığında 600 °C’ de Grade 2 altlık malzeme üzerinde biriken oksit tabakasının nispeten daha büyük olduğu gözlenmiştir. Daha yüksek sıcaklıkta çok ince ve homojen oksit birikimi meydana gelmiştir. XRD analizi ile, 600 ve 700 °C sıcaklıklarda oksit tabakasının TiO_2 ve Ti_3O formundan oluştuğu, 800 °C sıcaklıkta ise sadece rutil formda kalın TiO_2 tabakası tespit edilmiştir. TO sonrasında oluşan oksit tabakası, numunenin 600 °C’ de oksitlenmesi durumunda abrazif aşınma %45 azalmış, 700 °C’ de oksitlenmiş numunede ise % 92’ ye kadar azalma sağladığı görölmüştür. TO sıcaklığı 700 °C’ nin üzerine çıktığında tribolojik uygulamalarda önemli bir kullanımı olmayan, oldukça kırılgan ve kalın oksit tabakası biriktiği gözlenmiştir. Dolayısıyla titanyumun mekanik özelliklerini iyileştirmek ve aşınmaya karşı direnci artırmak için TO işleminde uygun sıcaklık aralığı 600 ile 700 °C arasında olduğu sonucuna varılmıştır.

Alpas ve Lou (2019), Geleneksel paslanmaz çelik valflerin yerine motor supap uygulamalarında Ti alaşımlarının kullanılabilmesi için Ti-6Al-4V alaşımına 600 °C’ de 60 saat TO işlemi uygulanmıştır. İşlem görmemiş ve TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımına, emme ve egzoz motor valflerinin çalıştığı tipik sıcaklıklar olan 350 ve 550 °C’ de karşı malzeme olarak dökme demir kullanılarak aşınma testleri gerçekteştirilmiştir. Ayrıca, TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımında oluşan yüzey katmanlarının deformasyon ve kırılma mekanizmalarını incelemek için yüksek sıcaklık darbe testleri de yapılmıştır. Sonuçlar, işlem görmemiş Ti-6Al-4V ile karşılaştırıldığında TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının her iki test sıcaklığında da daha düşük kayma aşınma kayıpları sergilediğini göstermiştir. Hem TiO_2 tabakası hem de oksijen difüzyon bölgesi sayesinde en düşük aşınma kaybı 550 °C’ de gözlemlenmiştir ve çatlak büyüme eğilimi azalmıştır. Oksijen difüzyon bölgesi ise yüzey altı plastik deformasyonu azaltmış ve aşınma direncini artırmıştır. TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının yüksek sıcaklık aşınma direncini artırmış, dolayısıyla termal olarak oksitlenen Ti-6Al-4V alaşımının, paslanmaz çelikten yapılmış motor valfleri için hafif bir alternatif olabileceğini göstermiştir.

Lin vd. (2017), Petrol ve gaz çıkarma uygulamalarında petrol tüpü olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının yüzey performansını artırmak amacıyla, 700 °C’ de 30 saat boyunca TO uygulanmıştır. TO katmanları ve Ti-6Al-4V alaşımının elektrokimyasal korozyon, erozif aşınma ve korozif aşınma davranışlarının karşılaştırması için CO_2 ile doymuş simüle edilmiş petrol sahası tuzlu suyunda gerçekteştirilmiştir. Sonuçlar, elde edilen TO katmanının esas olarak TiO_2

rutil fazı ve az miktarda TiO_2 anataz fazından oluştuğunu göstermiştir. Harici bir oksit tabakası ve dahili bir oksijen difüzyon tabakasından oluşan TO katmanı yaklaşık olarak 20 μm kalınlığında ölçülmüştür. TO işlemi Ti-6Al-4V alaşımının yüzey sertliğini artırmış ve alt tabakaya iyi bir şekilde bağlanmıştır. TO katmanları; elektrokimyasal korozyon, erozif aşınma ve koroziv aşınma testlerinde üstün yüzey performansı ortaya çıkarmıştır. Mükemmel kimyasal kararlılık, mekanik izolasyon etkisi, yüksek sertlik ve bağlanma mukavemeti TO katmanının yüzey performansına katkıda bulunmuştur. TO işlemi uygulanan Ti-6Al-4V alaşımının petrol ve gaz çıkarma uygulamalarında petrol tüpü olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Aniolek vd. (2016), Titanyum Grade 2 alaşımına 600 ve 700 °C sıcaklıkta 72 saatte gerçekleştirilen TO işleminde oksidasyon sıcaklığının titanyum yüzeyinde oluşan oksit katmanlarının morfolojisi, sertliği ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. 600 °C oksidasyon sıcaklığında oksit tabakası yüzeyin tamamına eşit yayılmamışken, 700 °C oksidasyon sıcaklığında daha ince oksit tabakası ile topaklanmış oksit parçacıkları oluşmuştur. Elde edilen oksit katmanlarının sertlik değerleri işlem görmemiş titanyumun sertliğinden 4 kat daha yüksek bulunmuştur. Tribolojik testler; sürtünme mesafesi 1000 m, 10 N yükte ve karşı malzeme olarak Al_2O_3 top kullanılarak kuru sürtünme koşullarında aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Titanyum Grade 2 alaşımına uygulanan 600 ve 700 °C oksidasyondan sonra hacimsel aşınma sırasıyla % 47 ve % 61 oranında azalmış, oluşan oksit tabakasının kayma aşınma direncini önemli ölçüde artırmıştır.

Wang vd. (2015), Ti-6Al-4V alaşımına 700 °C sıcaklıkta 2-8 saat aralığında farklı sürelerde su oksitleyici ortamda TO işlemi gerçekleştirmiştir. Yüzey karakterizasyonları için; X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), Raman spektroskopisi, nanoindentasyon ve nano çizik testi yapılmıştır. İşlem görmemiş ve oksitlenmiş numunelerin sürtünme-aşınma davranışı incelenmiştir. TO işlemi sonrasında oluşan oksit kaplama esas olarak TiO_2 rutil fazından ve bir miktar Al_2O_3 ' ten oluşmuştur. Oksidasyon süresine bağlı olarak ağırlık artışı lineer oksidasyon kinetiği kanununa uygun seyretmiştir. Oksit taneciklerinin büyümesi; 2. saatten 4. saate kadar yetersiz büyüme durumunda, 4. saatten 6. saate kadar normal büyüme durumunda, 6. saatten 8. saate kadar veya 8 saatten daha fazla sürede oksit partikülü aglomerasyonu ve yüzey pürüzlenmesinin aşırı büyüme durumunu almıştır. Oksidasyon süresi 2 saatten 8 saate çıktıkça kaplama kalınlığı 5 μm ' den 12 μm ' ye çıkmış aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve oksitlenmiş numuneler için oksit tabakasının alt tabakaya yapışma mukavemeti artmıştır. 4 saat termal oksidasyon uygulanmış numune için nano sertlik $10,06 \pm 2,15$ GPa ve nano çizik testi sonrasında elde edilen kritik yük $554,3 \pm 6,44$ mN olarak

bulunmuştur. İşlem görmemiş numunelerde adhezif ve abrazif aşınma meydana gelmişken, oksitlenmiş numuneler de oksit parçacıklarının da ikinci bir aşındırıcı gibi davranmasından dolayı şiddetli plastik deformasyon meydana gelmiştir. Oksit kaplamanın yüksek aşınma direnci sağladığı sonucuna varılmıştır.

Lin vd. (2015), Ti-6Al-4V alaşımının aşınma ve korozyon direncini arttırmak için TO işlemi 873, 898, 923, 948, 973, 998 ve 1023 °K sıcaklıklarında 10 saat gerçekleştirmiştir. TO sıcaklığının, elde edilen TO katmanlarının mikroyapısal karakterizasyonları ve yüzey özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar farklı sıcaklıklarda Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde çeşitli kalınlık değerlerinde TO tabakalarının oluştuğunu ve TO sıcaklığının artmasıyla tabaka kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. 973 °K’ de elde edilen TO tabakası en yüksek yüzey sertliğini ve en iyi aşınma direncini ortaya koyarken, 948 °K’ de elde edilen TO tabakası üstün korozyon direnci sergilemiştir. TO yüzey işleminin, Ti-6Al-4V alaşımının aşınma ve korozyon direncini arttırmak için etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

5.2. Kutu Sementasyon Alüminyumlama İle İlgili Literatür Araştırması

Yener vd. (2023), Ti-6Al-4V alaşımının oksidasyon direncini arttırmak için 600, 700 ve 800 °C sıcaklıkta 4 ve 6 saat alüminyumlama yapmışlardır. Kutu sementasyon alüminyumlama yapılan Ti-6Al-4V alaşımına 800 °C’ de 4, 20 ve 40 saat oksidasyon işlemi yapılmıştır. Kutu sementasyon alüminyumlama yöntemiyle alüminyumun Ti-6Al-4V alaşımına difüzyonu ile pürüzsüz, yoğun, gözeneksiz ve sürekli bir kaplama tabakası oluşturulmuştur. Oksidasyon işleminden sonra XRD analizi ile Al_2O_3 ve $TiAl_3$ fazları tespit edilmiştir. Oksit katmanının kalınlığı işlem süresi ve sıcaklığa bağlı olarak 0,5 ile 20 μm arasında değişmiştir. SEM analizi ile alüminyumlama yapılmış numunelerin oksit tabakasının ağırlıklı olarak Al_2O_3 ’ ten oluştuğu, işlem görmemiş numunelerde ise TiO_2 ’ den oluştuğu tespit edilmiştir.

Hwang vd. (2023), Alüminid kaplamalı ve kaplamasız Ti-6Al-4V alaşımının yüksek sıcaklık alev ortamındaki oksidasyon kararlılığını incelemiştir. Kutu sementasyon yöntemi kullanılarak alüminid kaplama 500, 600 ve 700 °C’ de 6, 12 ve 25 saat yapılmıştır. Isıl işleminden sonra titanyum alüminid ($TiAl_3$) tabakası oluşmuştur. Aynı durumdaki alüminid kaplamalı ve kaplanmasız Ti-6Al-4V alaşımının aktivasyon enerjisi sırasıyla 51,4 ve 96,5 kJ/mol olarak tespit edilmiştir. Alüminid kaplamalı ve kaplamasız Ti-6Al-4V alaşımı 1300 °C’ nin üzerinde 15 dakikaya kadar yüksek sıcaklıktaki aleve maruz bırakılmıştır. Artan maruz kalma süresiyle birlikte kaplamasız Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde oluşan TiO_2 tabakası soyulmuştur. Ancak alüminid kaplamalı Ti-6Al-4V alaşımı aleve maruz kaldığında koruyucu bir Al_2O_3 tabakası

oluşmuş ve orijinal şeklini korumuştur. Sonuç olarak $TiAl_3$ kaplamalı Ti-6Al-4V alaşımı Al_2O_3 tabakası oluşmu sayesinde yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun olduğuna karar verilmiştir.

Yılmaz vd. (2022), Yüzeyde alüminyum bazlı koruyucu ve nispeten daha sert intermetalik bileşenlerden oluşan çok katmanlı kaplama oluşturarak Ti-6Al-4V alaşımının yüzey özelliklerini geliştirilmeyi amaçlamışlardır. Oluşturulan kaplamanın toz paketinde alüminyum kaynağı olarak Al, aktivatör olarak NH_4Cl ve dolgu malzemesi olarak Al_2O_3 tozu kullanılmıştır. Alüminyumlama açık atmosfer fırınında $700\text{ }^{\circ}C$ de 4, 6 ve 8 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Kaplamanın karakteristik özellikleri SEM, enerji dağılımlı spektrometri (EDS) ve XRD ile incelenmiştir. XRD analizi sonuçlarında kaplama tabakasının $TiAl$, $TiAl_2$, $TiAl_3$ ve Al_2O_3 fazlarından oluştuğu analiz edilmiştir. Süreye bağlı olarak kaplama tabakası kalınlığı 12-20 μm arasında değişmiştir. Oluşturulan titanyum alüminid tabakasının sertliği 578-650 $HV_{0,025}$ arasında değiştiği ölçülmüş ve en yüksek sertliğin 6 saat alüminyumlama yapılmış numunede olduğu görülmüştür. $700\text{ }^{\circ}C$ sıcaklıkta 6 saat gerçekleştirilen alüminyumlama sonucunda yüzeyde homojen ve sürekli kaplama tabakasına ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.

Lu vd. (2022), α tipi ticari saf titanyum üzerine iki aşamalı borlama ve alüminyumlama yöntemi ile tabakalı kaplama yapılmıştır. İlk olarak, borür tabakası oluşturmak için borlama işlemi gerçekleştirilmiş ve daha sonra borlanan numunelere; alüminid tabakası oluşturmak için kutu sementasyon alüminyumlama yapılmıştır. Yüksek sıcaklık oksidasyon işlemi 600, 700 ve $800\text{ }^{\circ}C$ de 100 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. $1050\text{ }^{\circ}C$ de borlama ve $1000\text{ }^{\circ}C$ de alüminyumlama yapılan numunelerde TiB_2 , $TiB+Al_3Ti$, Al_3Ti ve difüzyon katmanından oluşan kompozit kaplama elde edilmiştir. XRD ile yapılan faz analizi sonucunda iki aşamalı borlama ve alüminyumlama yönteminden sonra; TiB_2 , TiB ve Al_3Ti fazları tespit edilmiştir. Borlama ve alüminyumlama uygulanmış saf titanyum da oluşan sert Al_3Ti tabakası matrisi etkili bir şekilde koruyabildiğinden yüksek sıcaklıkta mükemmel oksidasyon direnci gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Awan vd. (2022), Ti-6Al-4V alaşımını yüksek sıcaklıkta oksidasyondan korumak için CVD yöntemi olan katı hal difüzyon reaksiyonuyla halojenürle aktive edilmiş kutu sementasyon tekniği kullanılarak alüminid kaplamalar oluşturmuştur. Alüminid kaplamanın yapıldığı toz paketi; %20 kaynak malzemesi (Al), %10 aktivatör (NH_4Cl) ve %70 dolgu maddesi (Al_2O_3)' den oluşturularak alüminyumlama $1000\text{ }^{\circ}C$ de 3 saat gerçekleştirilmiştir. Alüminid kaplama yapılmış ve yapılmamış Ti-6Al-4V alaşımı; XRD, optik mikroskop (OM) ve termal gravimetrik analiz (TGA) kullanılarak; yapısal, mikroyapısal, elementel analiz ve

termal kararlılığı karakterize edilmiştir. XRD analizi, Ti-6Al-4V altlık malzemede yüksek Ti fazı konsantrasyonunu ve alüminid kaplı alt tabakanın alüminyum açısından zengin Al_3Ti fazından oluştuğunu göstermiştir. OM yardımıyla altlık malzeme ile kaplama arasında iyi bir arayüzeye sahip olduğu ve 60 μm kalınlığında alüminid kaplamanın geliştirildiği görülmüştür. TGA sonuçları, Ti-6Al-4V altlık malzemenin termal kararlılığa sahip olmadığını ve havada 600 °C' nin üzerinde oksitlendiğini göstermiştir. Alüminid kaplamayla kaplanan Ti-6Al-4V alaşımının, 1000 °C' ye kadar iyi bir termal kararlılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Yang vd. (2021), Ti-6Al-4V alaşımının difüzyon kaplamalarıyla oksidasyon direncini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Ti-6Al-4V alaşımına alüminid kaplama; 400–800 °C sıcaklık aralığında 6, 12 ve 24 saat süreyle ağırlıkça %25 Al, %5 $AlCl_3$ ve %70 Al_2O_3 ' ten oluşan bir toz karışımında kutu sementasyon alüminyumlama prosesiyle uygulanmıştır. Ti-6Al-4V alaşımı 400 ve 500 °C' de ısıtılma tabi tutulmuş ve Ti-6Al-4V alaşımı ile Al kaplama tabakası arasındaki arayüzde Al ve/veya $TiAl_3$ katmanları oluşmuştur. $TiAl_3$ tabakası Ti-6Al-4V alaşımları üzerinde 600, 700 ve 800 °C' de üretilmiştir. Kaplanmış $TiAl_3$ tabakasının büyümesi, difüzyonel büyüyerek Ti-Al sisteminin ara fazları arasında en azıdır. $TiAl_3$ tabakasının büyümesi için aktivasyon enerjisi, deneysel sıcaklık aralıklarında ~82 kJ/mol olarak tahmin edilmiştir. İşlem görmemiş ve alüminid kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımına 1000 °C' de izotermal oksidasyon testleri gerçekleştirilmiştir ve $TiAl_3$ kaplama katmanının altlık malzeme üzerinde Al_2O_3 koruyucu katman oluşturduğunu ve kaplama katmanı ayrılmadan numuneyi koruyabildiği görülmüştür.

Du vd. (2019), Ticari olarak saf Ti ve Ti-6Al-4V alaşımı üzerine kutu sementasyon yöntemini kullanarak 10 saat 1000 °C' ye kadar difüzyon kaplaması yapmıştır. Kutu sementasyon yönteminde kullanılan toz ağırlıkça %4 Al (Alüminyum kaynağı), %4 NH_4Cl (aktivatör) ve Al_2O_3 (inert dolgu maddesi)' den oluşturulmuştur. Kaplamaların büyüme kinetiği yüksek hassasiyetli bir terazi ile gravimetrik olarak ölçülmüştür. <900 °C' de her iki malzeme (800-850 °C) üzerinde alüminid kaplama dışında rutil TiO_2 tabakası oluşmuştur. Sıcaklık 900 °C' nin üzerine çıktıkça rutil tabakası kararsız hale gelerek Ti oksitleri düşük oksidasyon durumuna indirgenmiştir. Sıcaklık 1000 °C' ye yükseldiğinde, TiO_2 tabakası neredeyse tamamen ayrılmış ve alüminid kaplama gelişmeye başlamıştır. Üç katmanlı bir kaplama oluşturulduktan sonra kaplama büyümesi, Ti numunelerinin altlık malzemeden dışarıya doğru çıkma eğilimi göstermiştir. Oluşturulan kaplama, Al_3Ti ' den oluşan bir dış katman, Al_2Ti ' den oluşan bir orta katman ve $AlTi$ ' den oluşan bir iç katmandan meydana gelmiştir. Al_3Ti ' nin dış tabakası alüminid kaplamanın kalınlığını belirlemiştir.

Wu vd. (2019), İki aşamalı bir yöntemle γ -TiAl alaşımına Si-Al kompozit kaplama yapmıştır. İlk olarak γ -TiAl alaşımına paket sementasyon yöntemiyle 1000 °C’ de 2 saat alüminyumlama yapılmıştır. Daha sonra bu alüminid kaplamanın üzerine katodik elektrodpozisyon yöntemiyle $-2,0 \text{ mA/cm}^{-2}$ akım yoğunluğunda 300 saniye SiO_2 kaplama yapılmıştır. Bu kompozit kaplama Ti-Al alaşımı için yüksek sıcaklık oksidasyon direncini 1000 °C’ nin altında sınırlı bir şekilde sağlarken; Si-Al kompozit kaplama, yüksek sıcaklıktaki oksidasyon direncini etkili bir şekilde artırmıştır.

5.3. Sıcak Daldırma Alüminyumlama İle İlgili Literatür Araştırması

Yang ve Li (2023), Ti65 alaşımına ilk olarak 760 °C’ de 5-20 dakika boyunca sıcak daldırma alüminyumlama ardından 1050 °C’ de 2-8 saat karbürüzyon yaparak Ti-Al alaşım faz katmanı ve Ti-Al karbürlemeden oluşan kompozit kaplama yapılmıştır. 800 °C’ de; kaplanmamış, sıcak daldırma alüminyumlama yapılmış (760 °C’ de 10 dk) ve hem sıcak daldırma alüminyumlama (760 °C’ de 10 dk) hemde karbürüzyon yapılmış (1050 °C’ de 4 saat) Ti65 alaşımının 2-16 gün boyunca oksidasyon davranışı analiz edilmiştir. Kompozit kaplama ile kaplanan Ti65 alaşımının ağırlık artışı 800 °C’ de uzun süreli (≥ 16 gün) kararlılığa sahip olduğu görülmüştür. Kompozit kaplamanın faz yapısı, mikro yapısı ve bileşimi; XRD, SEM ve EDS ile karakterize edilmiştir. Ti-Al alaşım fazı katmanındaki dört faz ($\text{Ti}_3\text{Al}/\text{TiAl}/\text{TiAl}_2/\text{TiAl}_3$) kaplama ile alt tabaka arayüzeyinin bağlanmasını önemli ölçüde geliştirerek mikro çatlakların kaplama boyunca yayılmasını yavaşlatmıştır. Karbürleme katmanındaki Al_2O_3 , TiC ve C kaplamanın yüzey sertliğini artırmış, TiAl_2 ve Al_2O_3 yüksek sıcaklıkta mükemmel oksidasyon direncine sahip olduğu görülmüştür.

Zhao vd. (2022), Ti-6Al-4V alaşımı 700-900 °C sıcaklıklarında 15, 30 ve 60 dk sıcak daldırma alüminyumlama ile yüzeyi Al ile kaplanmıştır. Al ile kaplanmış Ti-6Al-4V alaşımına kaplama ile altlık malzeme arasındaki ara yüzey difüzyonu ve reaksiyonunu hızlandırmak için; 650, 750 ve 850 °C sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat süreyle ısıtıl işlem yapılmıştır. Her iki yöntemin ara yüz mikroyapısı ve Ti/Al ara yüzünün oluşum mekanizması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sıcak daldırma alüminyumlamanın ardından Al kaplama ile Ti-6Al-4V altlık malzeme arasındaki ara yüzde metalurjik bir bağ kurulmuş ve Ti-Al intermetalik bileşiklerinin oluştuğu gözlenmiştir. Isıl işlem sonrasında, Al kaplamanın oksitlenerek Al_2O_3 dönüştüğü ve kaplama yüzeyinde gözeneklerin oluştuğu gözlenmiştir. Al kaplı Ti-6Al-4V numunesinin mikrosertliği ve tribolojik özellikleri incelenmiştir. Isıl işlem sıcaklığı 750 °C olduğunda yaklaşık 500 $\text{HV}_{0,025}$ ’ lik maksimum mikrosertliğe ulaşılmıştır. Sürtünme katsayısının genel eğilimi önce azalma göstermiş, sonra artarak sabit bir değerde dalgalanma gözlenmiştir. 750

°C’ de 6 saat ısıtım işlem uygulanmış numunenin sürtünme katsayısının düşük olduğu belirlenmiştir. Optimize edilmiş işlem parametreleri; 700 °C’ de 15 dakika sıcak daldırma alüminyumlama ve ardından 750 °C’ de 6 saat ısıtım işlem olarak özetlenmiştir. Bu işlem, $TiAl_3$ fazı ve oksitlerin oluşumuyla Ti-6Al-4V alaşımının aşınma direncini artırabileceğini göstermiştir.

Yürektürk (2022), tarafından Ti-6Al-4V alaşımına ilk olarak sıcak daldırma alüminyumlama, daha sonra difüzyon tavlama yapılmıştır. Sıcak daldırma alüminyumlama işlemi 750 °C’ de 3 dk yapılmış, yüzeyde Al’ dan oluşan üst tabaka ve Al_3Ti ’ den oluşan difüzyon tabakasından oluşan kaplama oluşturmuştur. Difüzyon tavlama 1000 °C’ de 1 saat yapılmıştır. Difüzyon tavlama işleminden sonra yeni bir Al_3Ti formu ile Al_2TiO_5 ve Al_2O_3 oksit fazlarından oluşan kompozit tabaka meydana gelmiştir. Difüzyon tavlama sonrasında oluşturulan kompozit tabaka yapısının düzgün ve yoğun bir görünüme sahip olduğu, herhangi bir çatlak ve boşluk içermediği tespit edilmiştir. Numunelerin yapısal, mekanik ve aşınma özelliklerinin karakterizasyonu; SEM-EDS, XRD, sertlik ve kuru kayma aşınma ile yapılmıştır. Sıcak daldırma alüminyumlama ve difüzyon tavlama yapılan Ti-6Al-4V alaşımının sertliği, yalnızca sıcak daldırma alüminyumlama yapılmış numuneyle karşılaştırıldığında ~11 kat daha fazla olduğu görülmüştür. En iyi aşınma direncinin daha sert bir kaplama oluşan sıcak daldırma alüminyumlama ve sonrasında difüzyon tavlama uygulanan numunede olduğu görülmüştür.

He vd. (2021), Ti-6Al-4V alaşımına 700, 800, 900 ve 1000 °C’ de 2 ila 30 s aralığında farklı sürelerde sıcak daldırma alüminyumlama işlemi gerçekleştirmiştir. Ara yüzey mikroyapıları ve fazlarını araştırmak için SEM, Elektron Prob Mikro Analizi (EPMA) ve XRD kullanılmıştır. Ti-6Al-4V alaşımı ile erimiş Al arasındaki ara yüzeyde baskın intermetalik fazın $TiAl_3$ olduğu, sıcaklığı ve sürenin artmasıyla $TiAl_3$ kalınlığının arttığı görülmüştür. $TiAl_3$ tabakası parabolik olarak büyümüş ve büyümesi 700–1000 °C’ de 2–30 saniye arasındaki bir difüzyon mekanizması tarafından kontrol edilmiştir. $TiAl_3$ ’ ün tane irileşmesi ve intermetalik bileşiklerde V’ nin varlığı, normal parabolik yasaların dışında gerçekleşmiştir.

Patel vd. (2020), Sıcak daldırma alüminyumlama ve ardından iki aşamalı difüzyon ısıtım işlemiyle Ti-6Al-4V alaşımı üzerinde plazma destekli alüminid kaplama oluşturmuştur. 750 °C’ de 30 s sıcak daldırma alüminyumlama yapılmıştır. Ti-6Al-4V alaşımına plazma işleme yöntemi ile çözelti tavlama (900 °C/1 saat) ve yaşlandırma ısıtım işlemi (500 °C/6 saat) yapılarak karşılaştırılmıştır. Kaplanmış ve ısıtım işlemi tabi tutulmuş Ti-6Al-4V alaşımının; yüzey morfolojisi ve mikro yapı analizi için SEM, element analizi için EDS ve faz analizi için XRD kullanılarak karakterizasyon yapılmıştır. Karakterizasyonda difüzyon ısıtım işleminden sonra,

alüminize kaplamanın mikro yapısında Al_2O_3 dış tabakasından ve ardından $TiAl_3$, $TiAl_2$, $Ti-Al$ ve Ti_3Al fazlarından oluştuğu gözlemlenmiştir. Difüzyon bölgesinde, ısıtım işlem ve plazma yöntemi uygulanmış numunelerde sırasıyla 366-490 $HV_{0,05}$ ve 342-525 $HV_{0,05}$ sertlik değerleri belirlenmiştir. Plazma yönteminin kristal boyutunu değiştirmesinden dolayı difüzyon bölgesinde plazma işlemi uygulanmış numunenin mikrosertliği termal işlem uygulanmış numuneden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

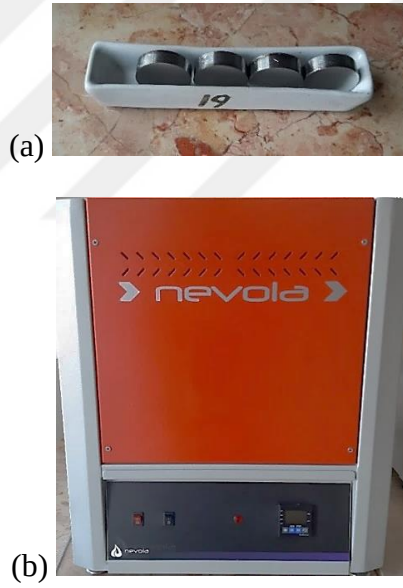
Jiang vd. (2018), $Ti-6Al-4V$ alaşımına $760\text{ }^{\circ}C$ ' de 15 dk sıcak daldırma alüminyumlama ve ardından $650\text{ }^{\circ}C$ ' de 30 dk difüzyon tavlama uygulamıştır. Alüminyum kaplama yapılan ve kaplama yapılmayan $Ti-6Al-4V$ alaşımına 10, 30 ve 50 N yüklerinde 0,5-4 m/s kayma hızlarında kuru kayma aşınma testleri yapılmıştır. Ti alaşımının aşınma direnci, çeşitli koşullar altında, özellikle 4 m/s kayma hızında $Ti-Al$ kaplama ve triboksit tabakası ile geliştirilmiştir. Oksitlerin miktarı ve türüne göre çeşitli koşullar altında oluşan aşınmış yüzey katmanlarının aşınma davranışı ve mekanizması üzerindeki etkisi incelenmiştir. 4 m/s' de; daha fazla TiO , TiO_2 ve eser miktarda Fe_2O_3 oksit içeren tribo-katmanlar yüksek sertlik ve kararlılık göstererek aşınma hacmini belirgin bir şekilde azaltmıştır. 2,68 m/s' de oksit içermeyen tribo-katmanlar düşük sertlik ve kararsızlık göstererek aşınmaya karşı koruma göstermemiştir.

Zhang vd. (2012), $720\text{ }^{\circ}C$ ' de 15 s sıcak daldırma alüminyumlama ve $600\text{ }^{\circ}C$ ' de 30 saat interdifüzyon işlemi; $Ti-6Al-4V$ alaşımı üzerinde $TiAl_3$ tabakası açısından zengin bir kaplama geliştirmek için yapılmıştır. Kaplamaya $600-900\text{ }^{\circ}C$ arasındaki sıcaklıklarda 300 saate kadar kesintili oksidasyon ve $700-800\text{ }^{\circ}C$ sıcaklıklarda izotermal oksidasyon gerçekleştirilmiştir. $TiAl_3$ kaplama, kesintili oksidasyon sırasında $800\text{ }^{\circ}C$ ' nin altındaki sıcaklıklarda oksidasyon hızında belirgin şekilde azaltmıştır. Oksidasyon kinetiği, izotermal oksidasyon sırasında $700-800\text{ }^{\circ}C$ sıcaklıklarında parabolik olarak artmıştır. $700\text{ }^{\circ}C$ ' de oksidasyondan sonra dıştan içe doğru $Al_2O_3/ TiAl_3/ TiAl_2$ ve $TiAl$ dıştan içe doğru katmanlı yapı oluşmuştur. $800\text{ }^{\circ}C$ ' de oksidasyon sonrasında $Al_2O_3/ (TiAl_3+TiAl_2)/ TiAl/ Ti_3Al$ alaşımından oluşan katmanlı bir yapı oluşmuştur. Ara difüzyon işlemi; sıcak daldırma alüminyumlama kaplamanın $700\text{ }^{\circ}C$ ' de ki oksidasyon davranışları üzerinde çok az etki gösterirken $800\text{ }^{\circ}C$ ' de ki oksidasyon direnci üzerinde belirgin olumsuz etki göstermiştir.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. Deney Düzeneği ve Numune Hazırlanması

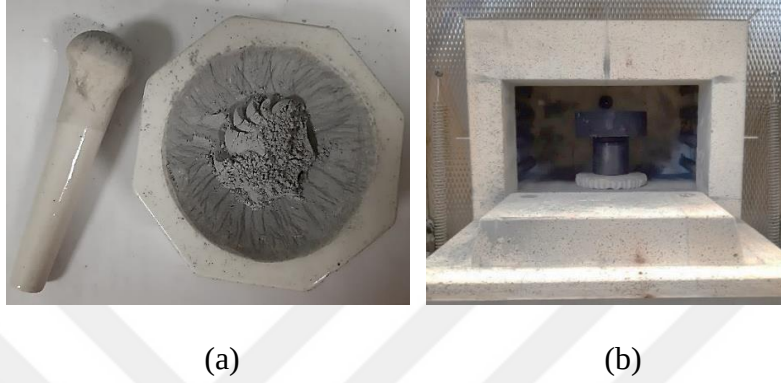
Bu çalışmada altlık malzeme olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı Şekil 6.1 (a)' da gösterildiği gibi 20 mm çapında 5 mm kalınlığında diskler halinde kesilmiştir. Kesilen numunelerin yüzeyi 1500 grite kadar zımparalanıp, 1 μm Al_2O_3 ile nihai parlatılması yapıldıktan sonra saf su ve alkolle yıkanmıştır. Ti-6Al-4V alaşımının yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla; TO, kutu sementasyon ile alüminyumlama ve sıcak daldırma alüminyumlama yöntemi uygulanmıştır. TO yüzey işlemi uygulanmadan önce numuneler asetonle ultrasonik banyoda temizlenerek yüzeyleri oksit, yağ ve kirden arındırılmıştır. Daha sonra numuneler Şekil 6.1 (b)' de gösterilen NEVOLA marka (12/50/250) fırında 600 °C' de 60 saat, 700 °C' de 30 saat ve 800 °C' de 5 saat TO işlemine tabi tutularak fırında soğumaya bırakılmıştır. Oksidasyondan önce ve sonra numunelerinin ağırlıkları 0,0001 mg hassasiyetli AXIS AGN220C marka hassas terazi ile tartılmıştır.



Şekil 6.1. (a) Ti-6Al-4V Numuneleri, (b) TO Uygulanan Fırın

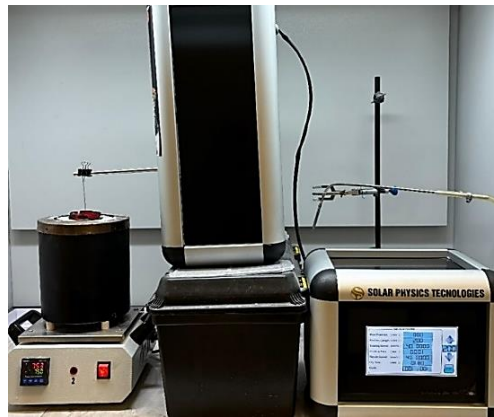
Kutu sementasyon ile alüminyumlama işleminde; %10 amonyum klorür (NH_4Cl) aktivatör olarak, %35 saf alüminyum (Al) kaplama kaynağı olarak ve %55 saf alümina (Al_2O_3) dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Oluşturulacak olan toz karışımının her bir bileşeni, istenilen oranda 0,0001 mg hassasiyetli AXIS AGN220C marka hassas terazi ile tartılmış ve Şekil 6.2 (a)' da gösterildiği gibi homojen karıştırılmıştır. Numuneler çelik potaya yerleştirilmeden önce %5 hidrojen florür (HF) ve %10 nitrik asit (HNO_3) içeren asidik bir çözelti içerisinde 10-15 saniye ön dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Ön dağlama işleminden

sonra numuneler saf su ve ultrasonik banyoda asetonla temizlenip kurutulmuştur. Kurutulan numuneler çelik bir potada en altta yatak malzemesi olarak yayılan alümina tozu ve en üste yayılan grafit tozu arasına eklenen homojen toz karışımının ortasına yerleştirilmiştir. Çelik potaya yerleştirilen numunelere alüminyumlama işlemi Şekil 6.2 (b)' de gösterilen açık atmosfer elektrik direnç fırınında 10 °C/dk ısıtma hızında 600, 700 ve 800 °C' de 6 saatte gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.2. (a) Homojen Karıştırılmış Toz, (b) Ti-6Al-4V Alaşımının Fırına Yerleştirilmesi

Sıcak daldırma ile alüminyumlama işlemi için disk halinde kesilen numuneler alüminyuma daldırılmadan önce kenarlarından delinerek paslanmaz çelik tel geçirilmiştir. Sıcak daldırma işleminden önce numuneler asidik çözelti (%5 HF ve %10 HNO₃) içerisinde ön dağlama işlemine tabi tutulmuş, ardından saf su ile yıkanarak ultrasonik banyoda asetonla temizlenip kurutulmuştur. Sıcak daldırma işlemi Şekil 6.3' de gösterildiği gibi grafit pota içerisinde % 99.9 saflıkta eritilmiş Al içerisinde 750 °C' de 3 dk uygulanmıştır. Sıcak daldırma ile alüminyumlama işlemi tamamlanan numuneler oda sıcaklığında soğuduktan sonra Şekil 6.1 (b)' de gösterilen fırında 950 °C' de 1 saat difüzyon tavlaması uygulanmıştır.



Şekil 6.3. Sıcak Daldırma Alüminyumla Deney Düzeneği

6.2. Kaplama Tabakasının Karakterizasyonu

6.2.1. Optik Metal Mikroskop (OM) Çalışmaları

Üç farklı kaplama yapılan Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapı incelemeleri için numuneler kalıba alınarak metalografik yöntem ile hazırlanıp kroll çözeltisinde dağlama yapılmıştır. Hem mikroyapı hemde aşınma deneyleri sonrasında aşınma mekanizmalarının incelenmesi için Şekil 6.4' te verilen Nikon marka Eclipse LV150 model optik metal mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 6.4. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan OM

6.2.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) Çalışmaları

TO ve kutu sementasyon ile alüminyumlama yapılan numunelerin kesit incelemeleri Şekil 6.5'de verilen Supra Zeiss taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Alüminyumlama sonrası elementlerin kimyasal kompozisyonu belirlemek için EDS, haritalama ve çizgi analizi yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca aşınma deneyi sonrası oluşan aşınma mekanizmaları incelemeleri için de FE-SEM kullanılmıştır.



Şekil 6.5. FE-SEM Cihazı

6.2.3. X-Işınları Difraktometresi (XRD) Çalışmaları

TO ve kutu sementasyon ile alüminyumlama yapılmış numunelerin faz analizi için $\lambda=1,54 \text{ \AA}$ dalga boyunda $\text{CuK}\alpha$ radyasyonlu Panalytical/Empyrean marka XRD cihazında $10\text{-}90^\circ$ tarama aralığında analizler gerçekleştirilmiştir.

6.2.4. Mikrosertlik Ölçümleri

Kaplama yapılan titanyum alaşımları sertlik ölçümü için dik yönde kesilip soğuk kalıba alınıp zımparalanıp önce $6 \text{ }\mu\text{m}$ daha sonra $1 \text{ }\mu\text{m}$ elmas ile parlatılmıştır. Shimadzu marka HVM mikrosertlik cihazında Vickers batıcı uç kullanılarak 25 gr yükte 15 s süreyle mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçülen sertlik değerlerinin standart sapması alınmış ve istatistiksel ortalaması hesaplanmıştır.

6.2.5. Aşınma Deneyleri

Üç farklı yöntemle kaplama yapılan numunelerin aşınma deneyleri dört farklı yükte üç farklı kayma hızında Şekil 6.6' da verilen ileri-geri aşınma test (reciprocating ball-on-flat) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında kuru ortam şartlarında gerçekleştirilen aşınma deneyine ait parametreler Tablo 6.1' de verilmiştir. Aşınma deneyleri esnasında sürtünme kuvveti aşınma cihazında bulunan yük hücresi (loadcell) ile bilgisayar tarafından kaydedilmiştir. Aşınma izlerinin 2 boyutlu profilleri Mitutoyo Surtest SJ-400 profilometre cihazı kullanılarak iki tekrarlı ölçülmüş, ortalama alınarak aşınma hacimleri hesaplanmıştır. Aşınma hacmi uygulanan yük ve kayma mesafesine bölünerek aşınma hızı hesaplanmıştır.

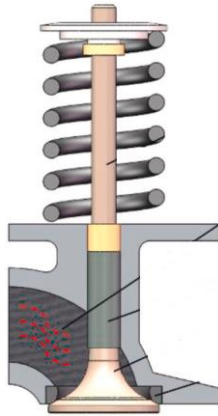
Tablo 6.1. Aşınma Deney Parametreleri

Yük (N)	1,8;3,75;7,5;15
Kayma Hızı (mm/s)	10;20;30
Aşınma izi uzunluğu (mm)	11,5
Kayma Mesafesi (m)	60
Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	25 ± 5
Nem (%)	35 ± 5
Karşı Malzeme	10 mm çapında alümina bilye (Al_2O_3)

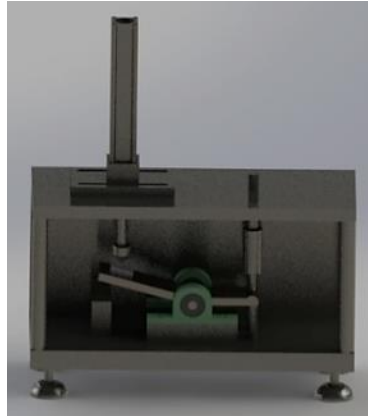


Şekil 6.6. İleri-Geri Aşınma Test Cihazı

İşlem görmemiş, 600 °C’ de 60 saat ve 700 °C’ de 30 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımına darbeli kayma aşınma deneyleri Şekil 6.7 (a)’ da gösterilen motor supap çalışma prensibini simüle etmek amacıyla Şekil 6.7 (b)’ de verilen darbeli kayma aşınma cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Deney boyunca 1,25 GPa ve 2,28 GPa Hertz temas basınçlarına karşılık gelen 40 N yay yükü ve 240 N pnömatik yük uygulanmıştır. Karşı malzeme olarak 10 mm çapında rulman çelik bilye (AISI 52100) kullanılarak deneyler 25, 350 ve 550 °C sıcaklıklarda 60 m’ lik kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Darbeli kayma deneyleri sonrası darbe ve kayma bölgelerinin aşınma kaybı hesabı, Mitutoyo Surtest SJ-400 profilometre cihazı kullanılarak yapılmıştır. Aşınma hızı, hacimsel aşınma kaybının çevrim sayısına (4297) bölünerek mm³/çevrim cinsinden hesaplanmıştır.



(a)



(b)

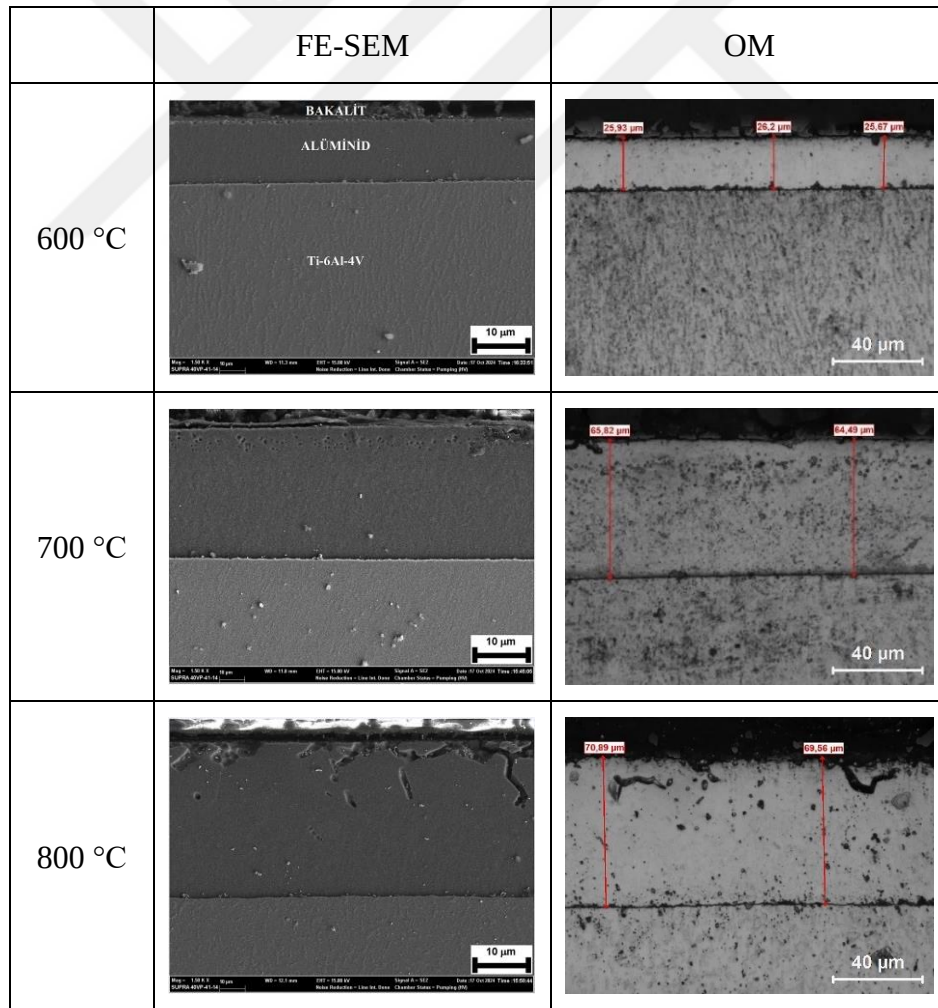
Şekil 6.7. (a) Motor Subap Çalışma Prensibi Şematik Gösterim, (b) Darbeli Kayma Aşınma Cihazı

Kaynak: (Lai vd., 2024; 17)

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

7.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları

Şekil 7.1’ de 600, 700 ve 800 °C’ de 6 saat alüminyumlama yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının FE-SEM ve OM enine kesit görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde bakalit, alüminid kaplama tabakası ve Ti-6Al-4V alaşımı yer almaktadır. 600 °C’ de alüminyumlama yapılan titanyum alaşımında ince bir kaplama tabakasının olduğu Şekil 7.1’ de görülmektedir. 600 °C’ de 25,9 µm, 700 °C’ de 65,1 µm ve 800 °C’ de 70,2 µm ortalama alüminid tabakasının olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık arttıkça kaplama tabakası kalınlığında belirgin bir artış olduğu belirlenmiştir. Her üç işlem sıcaklığında da altlık malzemeye iyi yapışan, düzgün ve homojen yapıya sahip tek katmanlı alüminid tabaka olduğu da Şekil 7.1’ den açıkça görülmektedir. Bu çalışmaya benzer şekilde Yener vd. (2023), Ti-6Al-4V alaşımına farklı sıcaklık ve sürelerde kutu sementasyon alüminyumlama yapmış ve artan sıcaklıkla oluşan kaplama tabaka kalınlığının arttığı rapor edilmiştir.



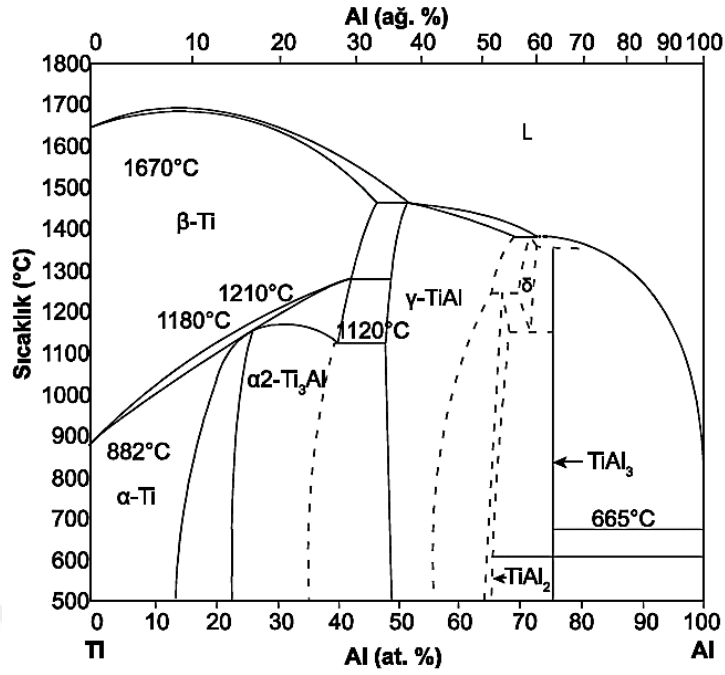
Şekil 7.1. 600, 700 ve 800 °C’ de 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının FE-SEM ve OM Enine Kesit Görüntüleri

Şekil 7.2’ de alüminyumlama yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının EDS analiz sonuçları FE-SEM görüntülerinin üzerinde gösterilen yeşil numaralandırılmış, kare içerisine alınmış bölgelerden elde edilen elementel analiz sonuçları tablo olarak görüntülerin yanında verilmiştir. Her üç işlem sıcaklığında da alüminid kaplama tabakasının en üst bölgesinden taban malzemeye yaklaştıkça alüminyum oranının taban malzemedeki Al oranından fazla olduğu, Ti oranının ise az olduğu Şekil 7.2 içerisinde yer alan tablolardan görülmektedir. Bu sonuç, her üç sıcaklıkta da kutu sementasyon ile alüminyumlama işleminin başarılı olduğunu göstermektedir. Şekil 7.3’ te Ti-Al bazlı intermetalik fazların oluşumunu gösteren faz diyagramı verilmiştir. Bu çalışmanın EDS analiz sonuçlarından elde edilen ağırlıkça %Al miktarına ve sıcaklığa göre Şekil 7.3’ te verilen faz diyagramına bakıldığında oluşan yapının $TiAl_2$ olduğu anlaşılmıştır.



600 °C		<table><tr><th rowspan="2">No</th><th colspan="3">Element (Ağ. %)</th></tr><tr><th>Al</th><th>Ti</th><th>V</th></tr><tr><td>6234</td><td>57,13</td><td>42,87</td><td>-</td></tr><tr><td>6235</td><td>63,18</td><td>35,07</td><td>1,76</td></tr><tr><td>6236</td><td>61,33</td><td>36,97</td><td>1,70</td></tr><tr><td>6237</td><td>21,49</td><td>75,98</td><td>2,52</td></tr></table>	No	Element (Ağ. %)			Al	Ti	V	6234	57,13	42,87	-	6235	63,18	35,07	1,76	6236	61,33	36,97	1,70	6237	21,49	75,98	2,52
No	Element (Ağ. %)																								
	Al	Ti	V																						
6234	57,13	42,87	-																						
6235	63,18	35,07	1,76																						
6236	61,33	36,97	1,70																						
6237	21,49	75,98	2,52																						
700 °C		<table><tr><th rowspan="2">No</th><th colspan="3">Element (Ağ. %)</th></tr><tr><th>Al</th><th>Ti</th><th>V</th></tr><tr><td>6238</td><td>57,95</td><td>40,86</td><td>1,19</td></tr><tr><td>6239</td><td>59,22</td><td>38,90</td><td>1,88</td></tr><tr><td>6240</td><td>58,92</td><td>39,43</td><td>1,64</td></tr><tr><td>6241</td><td>5,50</td><td>91,18</td><td>3,33</td></tr></table>	No	Element (Ağ. %)			Al	Ti	V	6238	57,95	40,86	1,19	6239	59,22	38,90	1,88	6240	58,92	39,43	1,64	6241	5,50	91,18	3,33
No	Element (Ağ. %)																								
	Al	Ti	V																						
6238	57,95	40,86	1,19																						
6239	59,22	38,90	1,88																						
6240	58,92	39,43	1,64																						
6241	5,50	91,18	3,33																						
800 °C		<table><tr><th rowspan="2">No</th><th colspan="3">Element (Ağ. %)</th></tr><tr><th>Al</th><th>Ti</th><th>V</th></tr><tr><td>6242</td><td>58,88</td><td>37,25</td><td>3,87</td></tr><tr><td>6243</td><td>62,52</td><td>36,98</td><td>0,5</td></tr><tr><td>6244</td><td>62,27</td><td>36,08</td><td>1,65</td></tr><tr><td>6245</td><td>2,78</td><td>90,97</td><td>6,25</td></tr></table>	No	Element (Ağ. %)			Al	Ti	V	6242	58,88	37,25	3,87	6243	62,52	36,98	0,5	6244	62,27	36,08	1,65	6245	2,78	90,97	6,25
No	Element (Ağ. %)																								
	Al	Ti	V																						
6242	58,88	37,25	3,87																						
6243	62,52	36,98	0,5																						
6244	62,27	36,08	1,65																						
6245	2,78	90,97	6,25																						

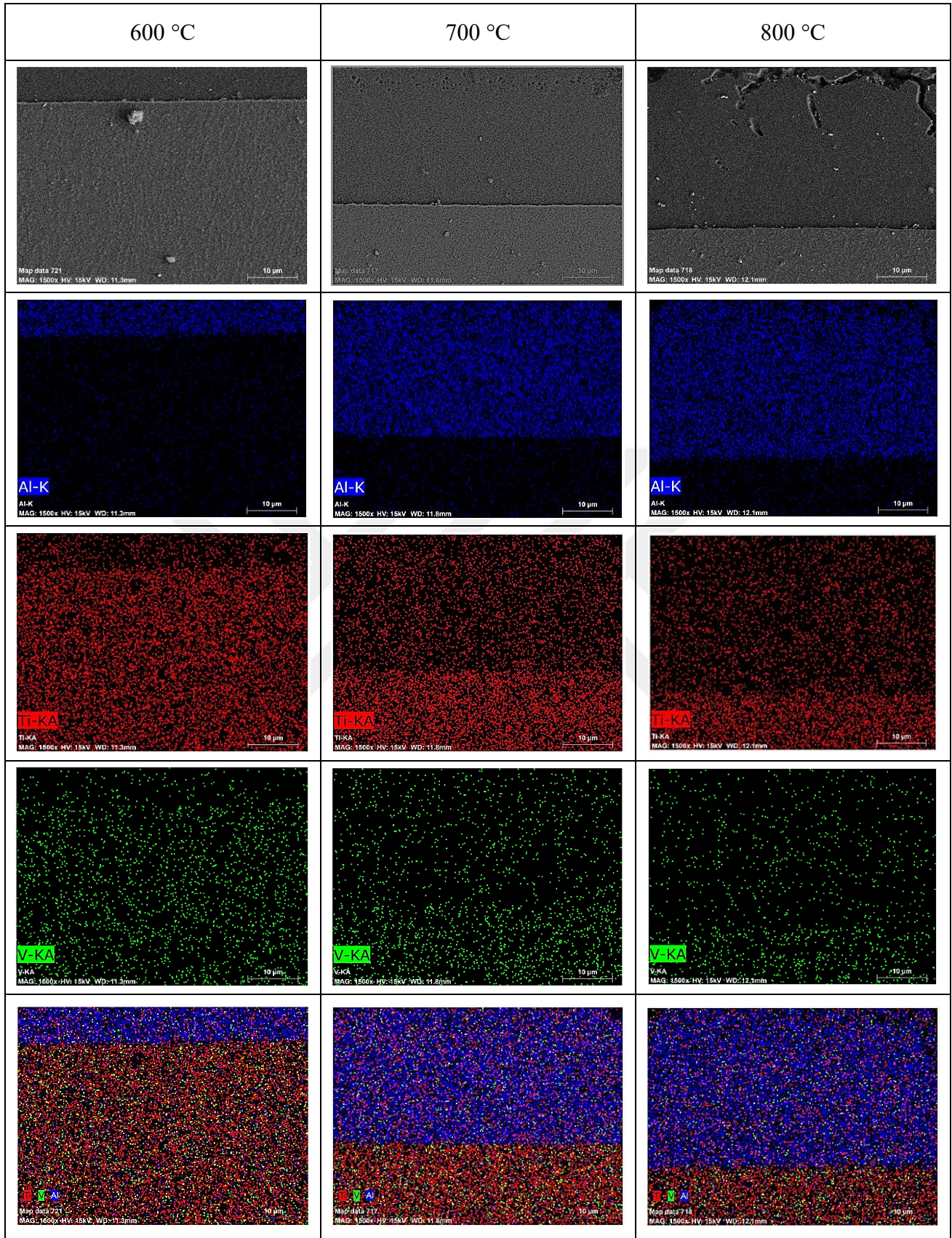
Şekil 7.2. 600, 700 ve 800 °C’ de 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının FE-SEM-EDS Analiz Sonuçları



Şekil 7.3. Ti-Al Faz Diyagramı

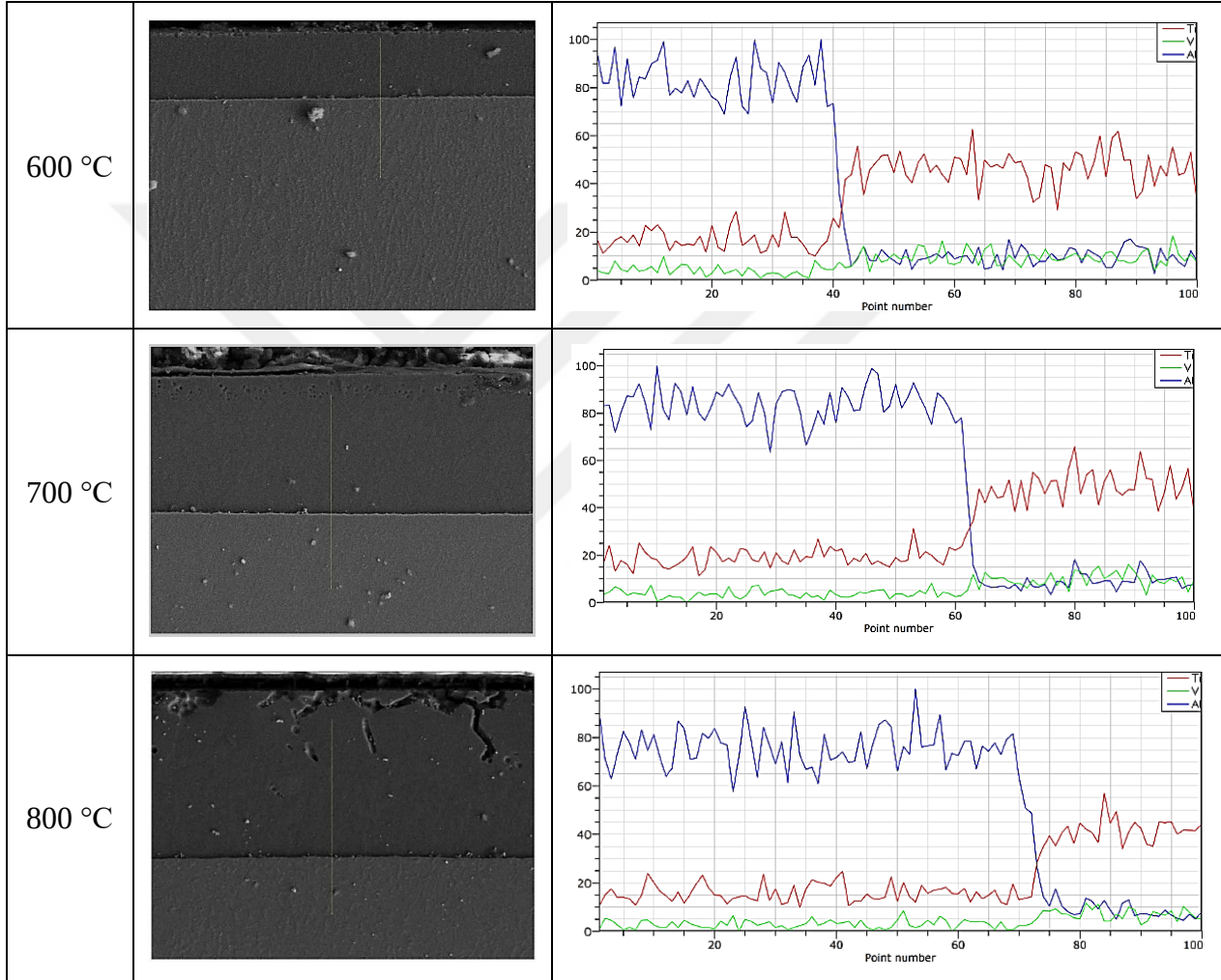
Kaynak: (Yılmaz vd., 2022; 56)

Şekil 7.4'te Ti-6Al-4V alaşımına üç farklı sıcaklıkta 6 saat süreyle uygulanan alüminyumlama işlemi sonrası elde edilen FE-SEM-EDS haritalama görüntüleri verilmiştir. Al, Ti ve V elementlerinin dağılımı sırasıyla mavi, kırmızı ve yeşil renkle tek tek ve birlikte gösterilmiştir. Şekil 7.4' te görüldüğü gibi artan işlem sıcaklığıyla alüminid tabaka kalınlığının arttığı ve Al' ın yoğun bir şekilde biriktiği gözlemlenmektedir. Buna karşılık; Ti ve V oranının taban malzemede daha yoğun bulunduğu, alüminid tabakada bu elementlerin yoğunluğunun daha az olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçları EDS analizi sonuçları ile uyumludur (Şekil 7.2).



Şekil 7.4. 600, 700 ve 800 °C’ de 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının
FE-SEM-EDS Haritalama Görüntüleri

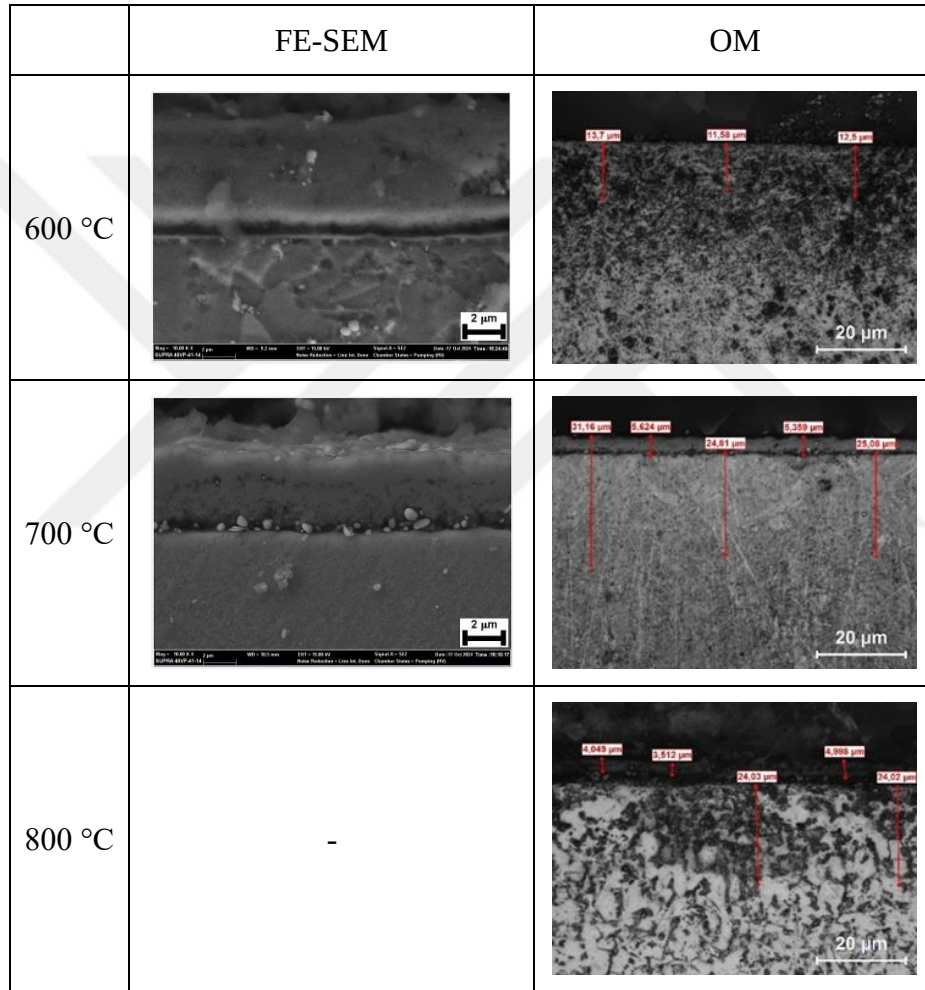
Şekil 7.5’ te FE-SEM-EDS görüntüsü üzerinde sarı çizgi boyunca Ti (kırmızı), Al (mavi) ve V (yeşil) elementlerinin dağılımları görülmektedir. Şekil 7.5’ te görüldüğü gibi üç işlem sıcaklığında da haritalama (Şekil 7.4) ve elementel (Şekil 7.2) analiz sonuçlarıyla benzer şekilde alüminid tabakadan taban malzemeye yaklaştıkça Al dağılımının azaldığı, Ti ve V dağılımının arttığı görülmektedir. Ayrıca 700 ve 800 °C’ den alınan sonuçlarda alüminid tabaka daha kalın olduğu için alüminyumun dağılımının daha geniş bir aralıkta olduğu da görülmektedir.



Şekil 7.5. 600, 700 ve 800 °C’ de 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının Ti, V, ve Al Elementlerinin Dağılımını Gösteren FE-SEM-EDS Çizgi Analizi

Şekil 7.6’ da 600 °C’ de 60 saat, 700 °C’ de 30 saat ve 800 °C’ de 5 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının FE-SEM ve OM enine kesit görüntüleri verilmiştir. TO işlemi sonrasında oksit tabakası ve hemen altında oksijen difüzyon bölgesinin oluştuğu bilinmektedir. 600 °C’ de 60 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımında oksit tabakası OM’ da görülememiş ve Şekil 7.6’ da görüldüğü gibi FE-SEM de görüntüsü alınmış, ince bir oksit tabakası görülmüştür. 700 °C’

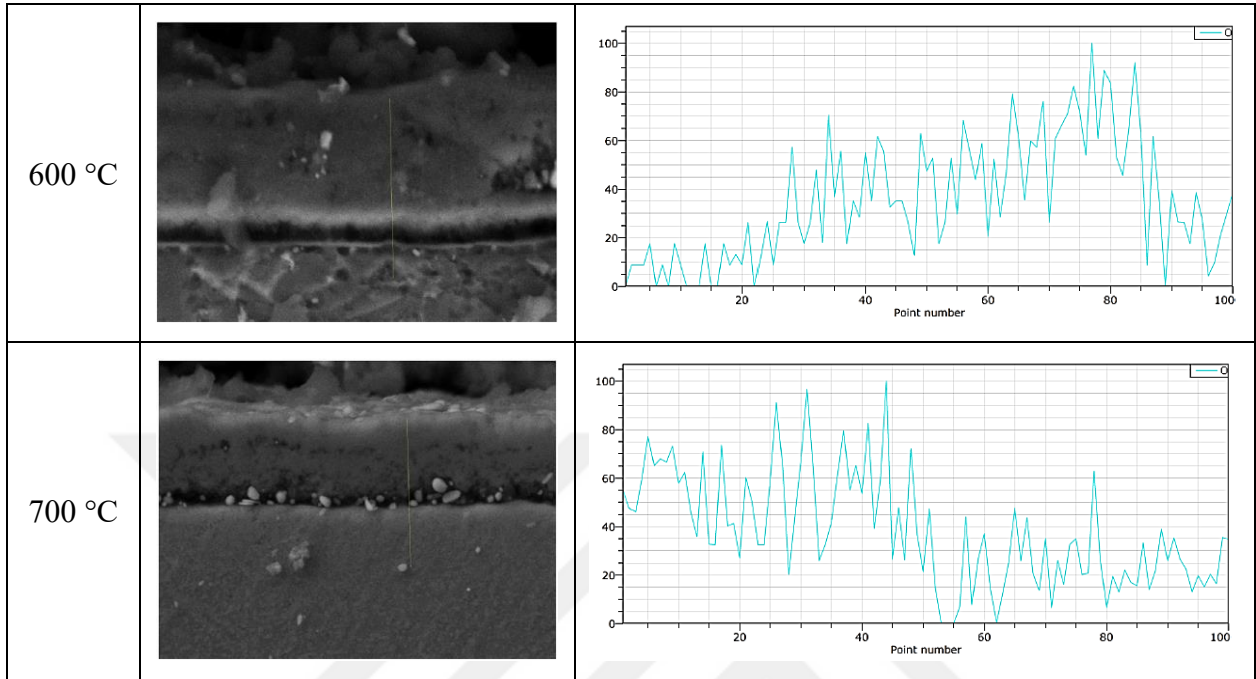
de 30 saat TO yapılmış alaşımda OM görüntülerinden yaklaşık 6 μm kalınlığında oksit tabakası olduğu görülmektedir. 800 $^{\circ}\text{C}$ ' de 5 saat TO işlemi sonucunda elde edilen örneğin yaklaşık 4 μm kalınlığında süreksiz ve homojen olmayan oksit tabakasına sahip olduğu OM görüntüsünden açıkça görüldüğü için FE-SEM görüntüsü alınmamıştır. Hem oksit tabakalarının hem de difüzyon tabakalarının farklı görüntüleri oluşan oksit tabakalarının farklı olduğunu düşündürmektedir. Özellikle 800 $^{\circ}\text{C}$ ' de oluşan oksit tabakası ve oksijen difüzyon bölgesinin 600 ve 700 $^{\circ}\text{C}$ ' de oluşan yapıya göre daha süreksiz olduğu Şekil 7.6' daki görüntülerden anlaşılmaktadır.



Şekil 7.6. 600 $^{\circ}\text{C}$ de 60 Saat, 700 $^{\circ}\text{C}$ de 30 Saat ve 800 $^{\circ}\text{C}$ ' de 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının FE-SEM ve OM Kesit Görüntüleri

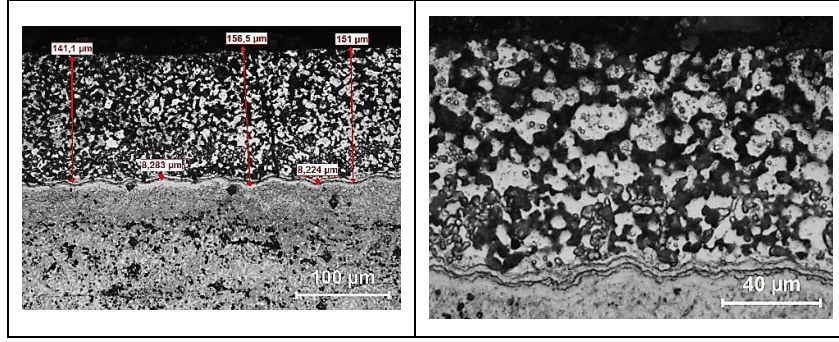
Şekil 7.7' de 600 $^{\circ}\text{C}$ ' de 60 saat ve 700 $^{\circ}\text{C}$ ' de 30 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının O elementinin dağılımını gösteren FE-SEM-EDS çizgi analizi verilmiştir. 600 $^{\circ}\text{C}$ ' de 60 saat TO yapılmış titanyum alaşımında en üstteki oksit tabakasında oksijen oranının çok az olduğu, oksijen difüzyon bölgesine yaklaştıkça oksijen oranının arttığı görülmektedir. 700 $^{\circ}\text{C}$ ' de 30 saat TO yapılmış titanyum alaşımında ise oksit tabakasında oksijen oranının fazla olduğu

oksijen difüzyon bölgesine yaklaştıkça oksijen oranının azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak 700 °C’ de 30 saat TO yapılmış titanyum alaşımında oluşan tabaka oksijen açısından daha zengin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.7. 600 °C’ de 60 Saat ve 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının O Elementi Dağılımını Gösteren FE-SEM-EDS Çizgi Analizi

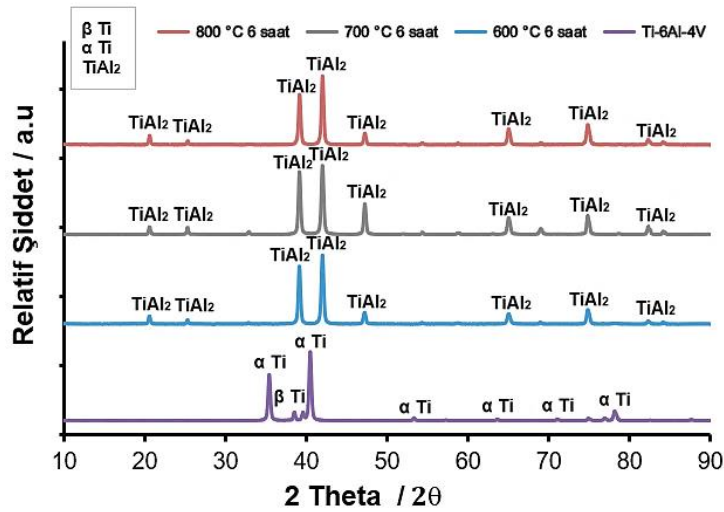
Ti-6Al-4V alaşımına sıcak daldırma alüminyumlama ve ardından difüzyon tavlaması sonucu oluşan kompozit kaplama yapısının OM ile düşük ve yüksek büyütme görüntüleri Şekil 7.8’ de verilmiştir. Oluşan kaplama kalınlığı yaklaşık 150 µm, geçiş bölgesinin kalınlığı ise yaklaşık 8 µm olup toplam kompozit tabaka kalınlığı yaklaşık 158 µm civarındadır. Oluşan kaplama yapısının homojen olduğu Şekil 7.8’ den görülmektedir. Kaplama tabakası ile geçiş tabakası arasında herhangi bir süreksizlik görülmemiştir. Bu çalışmada elde edilen kaplama yapısının, Yürektürk (2022) tarafından Ti-6Al-4V alaşımına uygulanan sıcak daldırma alüminyumlama ve difüzyon tavlaması ile elde edilen kompozit kaplama yapısına benzer olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.8. Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının Düşük ve Yüksek Büyütme OM Kesit Görüntüleri

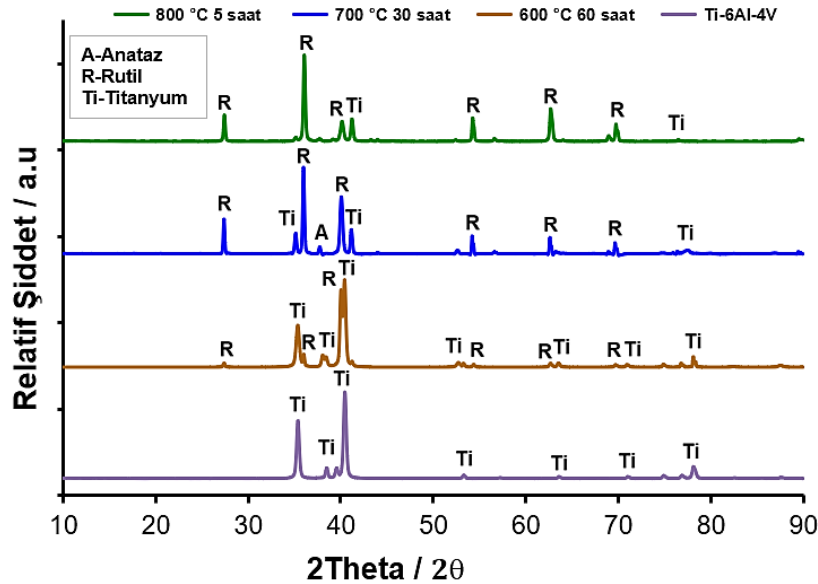
7.2. XRD Sonuçları

Şekil 7.9’ da 600, 700 ve 800 °C’ de 6 saat alüminyumlama yapılmış ve işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımının XRD paterni verilmiştir. Şekil 7.9’ dan anlaşıldığı gibi alüminyumlama işlemi sonucunda oluşan alüminid tabakanın $TiAl_2$ fazından meydana geldiği görülmektedir. Aynı örneklerin Şekil 7.2’ de verilen EDS ve Şekil 7.3’te gösterilen faz diyagramından rapor edilen $TiAl_2$ fazının oluşumu XRD analiz sonucunu desteklemektedir. Şekil 7.3’ te verilen Ti-Al faz diyagramında Ti_3Al , $TiAl$, $TiAl_2$ ve $TiAl_3$ gibi dört kararlı Ti-Al ara fazı bulunmasına rağmen, Şekil 7.2 ve Şekil 7.9’ da verilen sonuçlara göre ağırlıklı olarak $TiAl_2$ fazının oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 7.9’ da görüldüğü gibi 600 °C’ de yapılan alüminyumlama işleminde $TiAl_2$ pik şiddeti nispeten zayıf, 700 ve 800 °C’ de yapılan alüminyumlama işlemlerinde ise aynı faza ait pik şiddetinin arttığı görülmektedir. Ayrıca Ti-6Al-4V alaşımında α -Ti ve β -Ti pikleri görülmektedir. Bu sonuçlar alüminyumlama işleminin tüm sıcaklıklarda başarıyla gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 7.9. 600, 700 ve 800 °C’ de 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış ve İşlem Görmemiş Ti-6Al-4V Alaşımının XRD Paterni

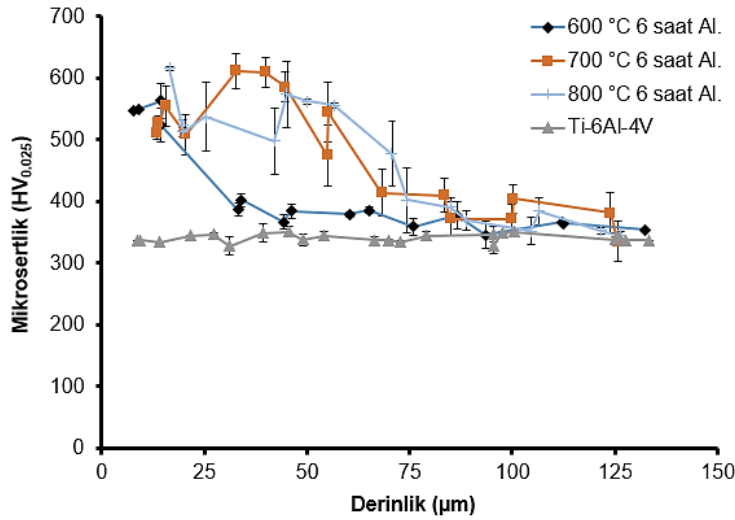
Taban malzeme olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı ve üç farklı şekilde uygulanmış TO tabakasına ait XRD paterni Şekil 7.10' da verilmiştir. Şekil 7.10' da görüldüğü gibi Ti-6Al-4V alaşımı ile TO yapılmış örneklerin XRD paterni arasında belirgin farklılıklar vardır. Ti-6Al-4V alaşımı oksit film oluşturmaya yatkın olmasına rağmen, kendi kendine oluşan oksit film XRD ile tespit edilemeyecek kadar ince olup, sadece Ti pikleri karakterize edilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımına ait bu pikler, literatürle benzer olup Boucheham vd. (2017) ile Lin vd. (2017) tarafından yapılan TO çalışmalarıyla uyumludur. TO sonrası oluşan oksit tabakasının (TiO_2) rutil fazı 'R' ile anataz fazı 'A' ile ifade edilmiştir. Her üç termal oksidasyon sıcaklığında da rutil fazın baskın faz olduğu elde edilen piklerle açıkça anlaşılmaktadır. Ancak rutil faza ait piklerin şiddetinin en yüksek olduğu örneğin 700 °C' de 30 saat TO yapılan örnek olduğu Şekil 7.10' da görülmektedir. Bu sonuç, aynı örneğin oksit tabakası sürekliliğini gösteren FE-SEM ve OM görüntülerini (Şekil 7.6) desteklemektedir. Ayrıca 600 °C oksidasyon sıcaklığında yapılan TO işleminde, rutil faza ait piklerin zayıf olduğu ve Ti piklerinin varlığı gözlemlenmiştir. Oksidasyon sıcaklığı 700 ve 800 °C' ye çıkarıldığında rutil fazın baskın hale geldiği ve hegzagonal Ti fazına ait piklerin şiddetinin oldukça azaldığı tespit edilmiştir. Rutil TiO_2 yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip kararlı bir faz olduğu için Ti-6Al-4V alaşımının 700 °C' deki oksidasyon işlemleri sonrası sertlik ve aşınma direncinin önemli ölçüde iyileşmesi beklenmektedir (Wang vd., 2014; 473).



Şekil 7.10. 600 °C de 60 Saat, 700 °C de 30 Saat ve 800 °C de 5 Saat TO Yapılmış ve İşlem Görmemiş Ti-6Al-4V Alaşımının XRD Paterni

7.3. Sertlik Sonuçları

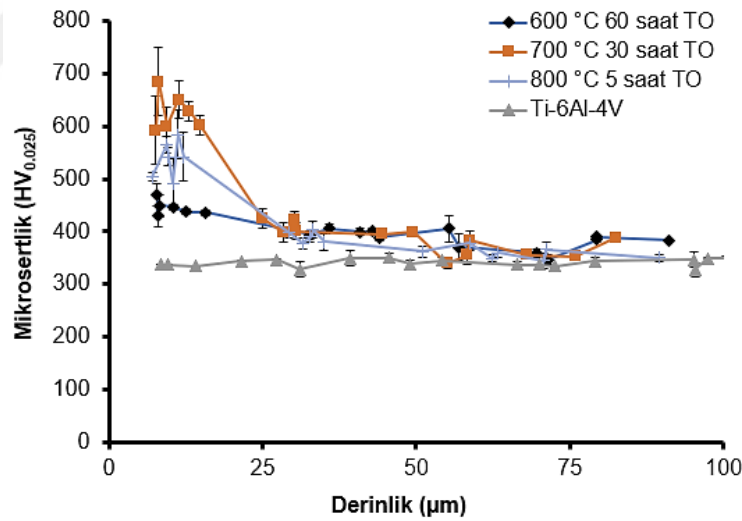
Şekil 7.11’ de, Ti-6Al-4V alaşımına ait 600, 700 ve 800 °C’ de 6 saat süresince uygulanan kutu sementasyon alüminyumlama işlemi sonucunda elde edilen enine kesit sertlik değişimi gösterilmektedir. Üç farklı sıcaklık sonucunda oluşan alüminid tabakadan ölçülen sertlik değerleri, taban malzemenin sertliği olan 335 ± 20 HV_{0,025}’ den daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Al açısından zengin alüminid tabakanın sertliği 600 °C’ de 563 HV_{0,025}, 700 °C’ de 612 HV_{0,025} ve 800 °C’ de 616 HV_{0,025} ölçülmüş olup taban malzemede sertlik değerlerinin azaldığı görülmektedir. Aynı örneklerin FE-SEM ve OM görüntülerinde (Şekil 7.1) sıcaklık arttıkça tabaka kalınlığının artmasıyla sertlik sonuçlarının uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, yüksek sıcaklıkta uygulanan alüminyumlama işleminin yüzey sertliğini belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Yılmaz vd. (2022) Ti alaşımına 700 °C’ de farklı sürelerde uygulanan kutu sementasyon alüminyumlama işlemi sonucunda elde edilen Ti-Al bazlı intermetalik kaplamalının sertlik değerlerini incelemiş ve bu çalışmaya benzer şekilde alüminyumlama işleminin sertliği artırdığı rapor edilmiştir. Zhang vd. (2020) Ti-6Al-4V alaşımına uyguladığı kaplama yöntemiyle Ti-Al kompozit kaplamanın sertliği 680 HV_{0,5} olarak ölçülmüştür. Literatür ile benzer şekilde gözlenen bu çalışmanın sonuçları alüminid kaplamanın yüzey sertliğini önemli ölçüde artırdığını doğrulamaktadır.



Şekil 7.11. Alüminyumlama Yapılmış ve İşlem Görmemiş Ti-6Al-4V Alaşımının Enine Kesit Sertlik Değişimi

Şekil 7.12’ de, Ti-6Al-4V alaşımına farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan TO işlemi sonucunda elde edilen enine kesit sertlik değişim grafiği verilmiştir. 600 °C’ de 60 saat, 700 °C’ de 30 saat ve 800 °C’ de 5 saat TO işlemlerinin ardından gözlemlenen sertlik artışı, yüzeyde oluşan oksit tabakası ve altındaki oksijen difüzyon bölgesi ile ilişkilidir. 600 °C’ de 60 saatlik

TO sonrası, 15 μm derinliğe kadar sertlik $450 \pm 20 \text{ HV}_{0,025}$ olarak ölçülmüştür. 700 °C’ de 30 saat TO sonrasında sertlik 8 μm derinliğe kadar yaklaşık 700 $\text{HV}_{0,025}$ iken bu değer 30 μm derinliğe kadar kademeli olarak azalarak 400 $\text{HV}_{0,025}$ ’ e düşmüştür. Benzer şekilde 800 °C’ de 5 saat TO uygulanan titanyum alaşımında sertlik 9 μm derinlikte yaklaşık 565 $\text{HV}_{0,025}$ ’ den 30 μm derinlikte 370 $\text{HV}_{0,025}$ ’ e azalmıştır. Bu bulgular, yüzeyde oluşan oksit tabakasından başlayarak oksijen difüzyon bölgesine ve ardından taban malzemeye doğru gidildikçe sertlikte kademeli bir azalma olduğunu göstermiştir. Enine kesit sertlik değişimi 700 °C’ de 30 saat TO işleminde oksijen difüzyon bölgesi daha kalın olduğu için geniş bir aralıkta değiştiğini göstermektedir. Bu sonuçların mikroyapı analizini desteklemektedir. Lin vd. (2017) petrol ve gaz sektöründe kullanılan borular için Ti-6Al-4V alaşımına 700 °C’ de 30 saat uyguladığı TO işlemi sonrasında bu çalışmaya benzer şekilde oksit tabakasında elde edilen maksimum sertlik değerinin taban malzemenin sertliğinin yaklaşık iki katı olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmaya benzer şekilde sertlik dağılımının oksit tabakasından oksijen difüzyon bölgesine ve taban malzemeye doğru kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, TO işleminin titanyum alaşımlarının yüzey sertliğini artırdığı ve sertlik dağılımının yüzeyden taban malzemeye doğru kademeli bir geçiş göstererek azaldığını doğrulamaktadır.



Şekil 7.12. TO Yapılmış ve İşlem Görmemiş Ti-6Al-4V Alaşımının Enine Kesit Sertlik Değişimi

Sıcak daldırma alüminyumlama ve difüzyon tavlama işlemleri sonucu oluşan kompozit kaplama yapısının mikrosertlik değeri 461 $\text{HV}_{0,025}$ olarak ölçülmüştür. Literatürde belirtildiği gibi elde edilen bu mikrosertlik sonucu ile uygulanan işlemin Ti-6Al-4V alaşımının sertliğini arttırdığı görülmektedir (Yürektürk, 2022).

7.4. Aşınma Sonuçları

İşlem görmemiş ve 600, 700, 800 °C sıcaklıklarda alüminyumlama yapılan Ti-6Al-4V alaşımının dört farklı yükte (1,8;3,75;7,5;15 N), üç farklı kayma hızında (10;20;30 mm/s) kayma mesafesine bağlı olarak CoF değişimi Şekil 7.13' de verilmiştir. Verilen grafiklerde mavi renk 1,8 N, yeşil renk 3,75 N, turuncu renk 7,5 N ve sarı renk 15 N yükü temsil etmektedir. Tablo 7.1, Tablo 7.2 ve Tablo 7.3 alüminyumlama yapılmış örneklerin sırasıyla aşınma hacmi (V), aşınma hızı (k) ve sürtünme katsayısı (CoF) değerlerini göstermektedir. Şekil 7.13 (a)' da görüldüğü gibi işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımı üç farklı kayma hızında, 700 ve 800 °C' de alüminyumlanmış örneklerle göre (Şekil 7.13 (c-d)) belirgin yüksek salınım göstermektedir. Literatürde belirtildiği gibi salınım, bir veya birden fazla aşınma mekanizmasının meydana geldiğinin, artan mekanik temas ile oluşan aşınma ürünlerinin sürtünmeyi artırdığının göstergesidir (García-León vd., 2024). Bu çalışmada 700 ve 800 °C' de alüminyumlanmış örneklerde düşük V (Tablo 7.1), k (Tablo 7.2) ve CoF (Tablo 7.3) değerleri aynı örneklerin sürtünme katsayısı kayma mesafesi grafiğindeki düşük CoF salınımıyla uyumludur. 600 °C' de elde edilen örnekte ise Şekil 7.13 (b)' de görüldüğü gibi diğer sıcaklıklarda alüminyumlanmış numunelerde ve işlem görmemiş alaşıma göre salınımın ve CoF değerlerinin (Tablo 7.3) fazla olduğu, ancak k değerleri (Tablo 7.1) incelendiğinde işlem görmemiş alaşıma göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 600 °C' de görülen bu farklılık aşınma yüzey görüntülerinin incelendiği bölümde açıklanmıştır.

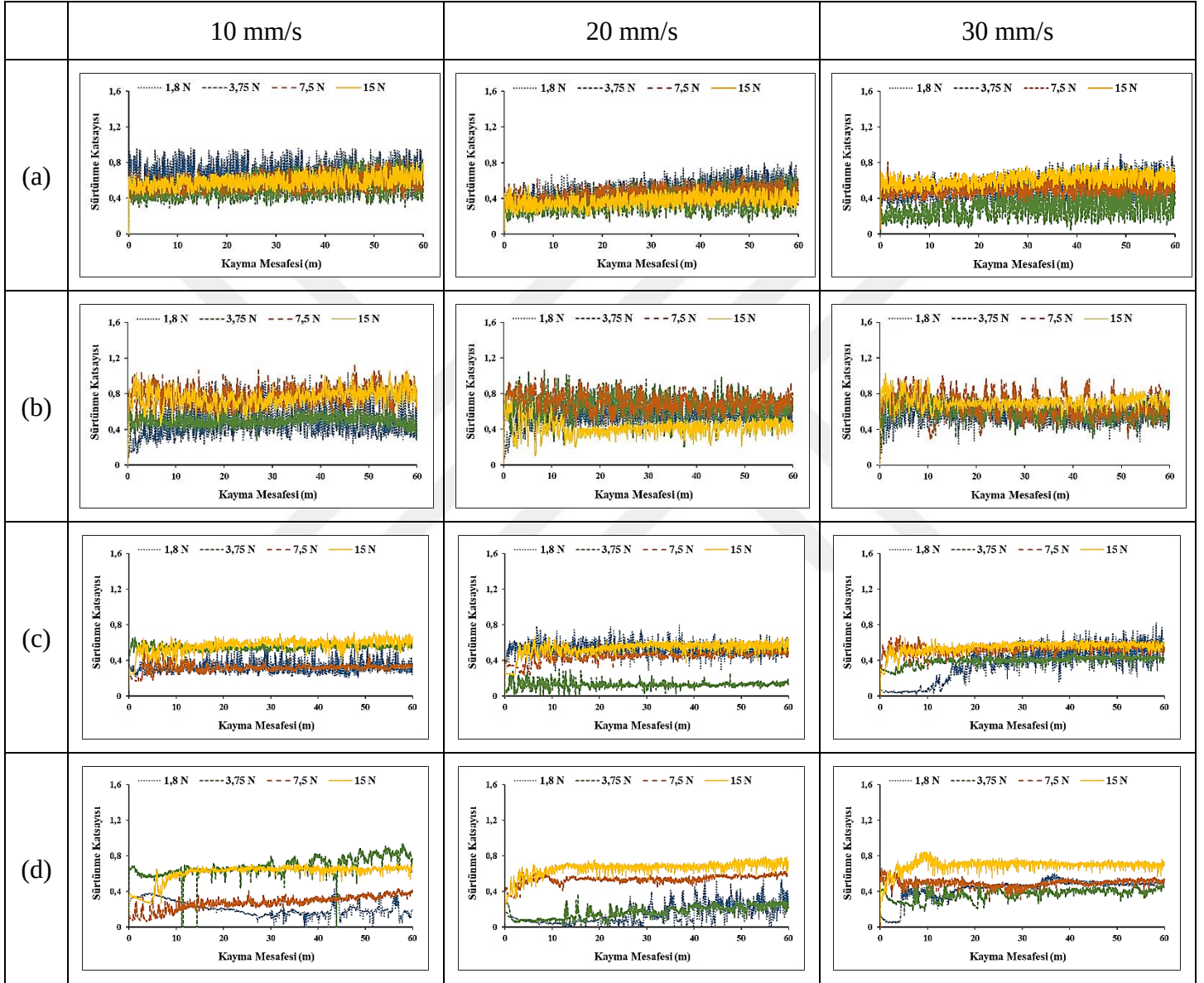
Şekil 7.14' te işlem görmemiş ve alüminyumlama yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının V, k ve CoF gösteren 2D matlab haritaları verilmektedir. Bu haritalar işlem görmemiş ve alüminyumlama yapılmış numuneler de en yüksek V, k ve CoF değerleri referans alınarak, kayma hızı ve yük değişkenlerinin genel davranışını açıklamak amacıyla matlab ile oluşturulmuştur. Deneyler de kullanılan değişen kayma hızı (10;20;30 mm/s) ve yükler (1,8;3,75;7,5;15 N) haritalarda noktalar ile gösterilmiştir. Kırmızı renk yüksek, sarı-yeşil-mavi renk orta ve lacivert renk düşük değerleri ifade etmektedir. Şekil 7.14' te verilen işlem görmemiş ve alüminyumlama yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının V sonuçlarına bakıldığında genel bir eğilim olarak aşınma hacminin artan yük ile arttığı görülmektedir. Ayrıca, alüminyumlama yapılmış Ti-6Al-4V alaşımında, her üç işlem sıcaklığında da; 7,5 N' a kadar artan yük ile kayma hızının etkisinin minimum olduğu ve V değerlerinin düşük olduğu lacivert renkli bölgelerden görülmektedir. Şekil 7.14 (a)' da görüldüğü gibi işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımında, yüksek yük ile düşük kayma hızının birleşiminde V değerinin kritik değere ulaştığı, Şekil 7.14 (b)-(c)' de görüldüğü gibi 600 ve 700 °C' de alüminyumlama yapılmış Ti-6Al-4V alaşımında ise artan

yük ile orta düzey de olduğu görülmektedir. Şekil 7.14 (d)' de görüldüğü gibi 800 °C' de alüminyumlama yapılmış Ti-6Al-4V alaşımında ise yüksek yük ile yüksek kayma hızının birleşiminde aşınma hacminin kritik değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Tablo 7.1' de verilen V sonuçları incelendiğinde işlem görmemiş alaşım hariç tüm alüminyumlama sıcaklıklarında düşük hız ve düşük yükte en düşük V değerleri koyu renkle işaretlenerek Tablo 7.1' de gösterilmiştir. İşlem görmemiş alaşımın düşük hız (10 mm/s) ve düşük yükte (1,8 N) elde edilen V sonucuyla tüm sıcaklıklarda alüminyumlama yapılmış örneklerin V değerleri karşılaştırıldığında 600, 700 ve 800 °C' de sırasıyla %78, %68 ve %90 aşınma hacminde azalma tespit edilmiştir.

Şekil 7.14' te verilen k haritaları incelendiğinde işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımının düşük yükler de kayma hızından bağımsız olarak k değerinin kritik değere ulaştığı, artan yük ile kayma hızının birleşiminde düştüğü görülmektedir. Alüminyumlama yapılmış Ti-6Al-4V alaşımında sırasıyla; 600 °C' de orta kayma hızı ile orta yükün birleşiminde, 700 °C' de düşük kayma hızı ile düşük yükün birleşiminde veya yüksek yük ile düşük kayma hızının birleşiminde ve 800 °C' de yüksek yükte kayma hızından bağımsız olarak k değerinin orta seviyede olduğu görülmektedir. Her üç alüminyumlama sıcaklığında da k değerinin işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımından daha düşük olduğu belirlenmiştir (lacivert renkli bölgeler). Tablo 7.2' de verilen k sonuçları incelendiğinde işlem görmemiş alaşım, 600 ve 700 °C' de elde edilen örneklerin yüksek hız (30 mm/s) ve yüksek yükte (15 N) en düşük k değerlerine sahip oldukları, 800 °C' de elde edilen örnekte ise en düşük hız ve yükte en düşük k değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Tablo 7.2' de koyu renkle işaretlenmiş k değerleri 600 ve 700 °C için yüksek hız ve yüksek yükte, 800 °C için düşük hız ve düşük yükte işlem görmemiş alaşımın k değeri ile karşılaştırıldığında sırasıyla %64, %40 ve %91 aşınmaya karşı direncin arttığı belirlenmiştir.

Şekil 7.14' te verilen CoF sonuçları incelendiğinde, işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımında orta ve yüksek kayma hızı ile birleşen düşük yüklerde (<7,5 N) veya orta kayma hızı ile yüksek yükün birleşiminde CoF değerinin düşük olduğu, düşük kayma hızında veya yüksek kayma hızı ile yüksek yükün birleşiminde arttığı gözlemlenmektedir. 600 °C' de alüminyumlama yapılmış Ti-6Al-4V alaşımında ise CoF; orta kayma hızı ile yüksek yükün birleşiminde düşük, ancak düşük kayma hızı (<20 mm/s) ile artan yükün (>7,5 N) birleşiminde kritik değere ulaştığı gözlemlenmiştir. 700 °C' de alüminyumlama yapılmış Ti-6Al-4V alaşımında, orta kayma hızı ile düşük yük aralığının birleşiminde, 800 °C' de ise orta kayma hızına kadar (<20 mm/s) düşük yük birleşiminde CoF değerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca; 700 ve 800 °C' de artan yük ile CoF değerinin de arttığı görülmektedir. En düşük CoF

değerlerinin Tablo 7.3’ de koyu renkle işaretlenerek gösterilmiş, işlem görmemiş alaşımda 0,33423, 600 °C’ de 0,422754, 700 °C’ de 0, 128601 ve 800 °C’ de 0,185255 olarak elde edildiği tespit edilmiştir. Aşınma testi sonucunda elde edilen değerlere bakıldığında yüksek aşınma direnci gösteren numunenin 800 °C’ de alüminyumlama yapılmış örneğe ait olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.13. (a) İşlem Görmemiş ve (b) 600 °C, (c) 700 °C, (d) 800 °C’ de Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının Dört Farklı Yükte 10;20;30 mm/s Hızda CoF Değişimi

Tablo 7.1. İşlem Görmemiş ve Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının V Değerleri

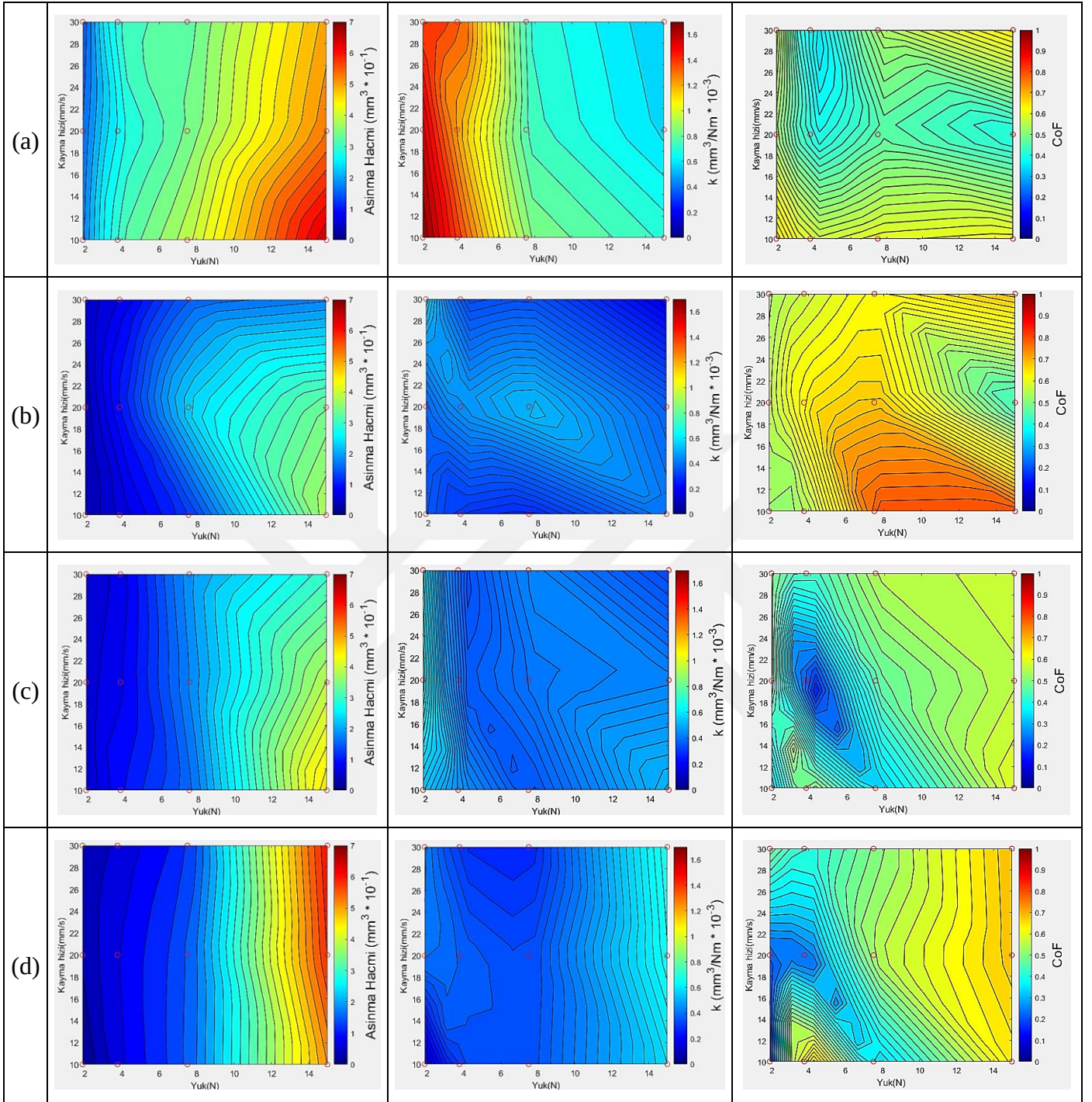
	1,8 N	3,75 N	7,5 N	15 N
Ti-6Al-4V 10 mm/s	1,82564	3,20261	3,92136	6,55755
Ti-6Al-4V 20 mm/s	1,71059	2,77142	3,43490	5,35035
Ti-6Al-4V 30 mm/s	1,49257	3,18124	3,32877	5,08944
600 °C 10 mm/s	0,38920	0,68579	1,27738	3,8290
600 °C 20 mm/s	0,41683	1,06866	2,41434	3,46682
600 °C 30 mm/s	0,58424	0,75392	1,61913	1,81598
700 °C 10 mm/s	0,57511	1,03122	1,59375	4,71419
700 °C 20 mm/s	0,68180	0,82290	1,84400	3,93464
700 °C 30 mm/s	0,64590	0,75709	1,98047	3,07411
800 °C 10 mm/s	0,16922	0,78365	1,53998	5,2447
800 °C 20 mm/s	0,44903	0,84723	1,50907	5,95358
800 °C 30 mm/s	0,45993	0,67372	1,23495	6,16477

Tablo 7.2. İşlem Görmemiş ve Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının k Değerleri

	1,8 N	3,75 N	7,5 N	15 N
Ti-6Al-4V 10 mm/s	1,69040	1,42338	0,87141	0,728
Ti-6Al-4V 20 mm/s	1,58388	1,23174	0,76331	0,59448
Ti-6Al-4V 30 mm/s	1,38201	1,41388	0,73972	0,56549
600 °C 10 mm/s	0,36037	0,30479	0,28386	0,42544
600 °C 20 mm/s	0,38596	0,47496	0,53652	0,38520
600 °C 30 mm/s	0,54096	0,33507	0,35980	0,20177
700 °C 10 mm/s	0,53251	0,45832	0,35416	0,52379
700 °C 20 mm/s	0,63130	0,36573	0,40977	0,43718
700 °C 30 mm/s	0,59805	0,33648	0,44010	0,34156
800 °C 10 mm/s	0,15668	0,3482	0,34221	0,58275
800 °C 20 mm/s	0,41576	0,37654	0,33535	0,66150
800 °C 30 mm/s	0,42586	0,29943	0,27443	0,68497

Tablo 7.3. İşlem Görmemiş ve Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının CoF Değerleri

	1,8 N	3,75 N	7,5 N	15 N
Ti-6Al-4V 10 mm/s	0,66204	0,56675	0,59911	0,61195
Ti-6Al-4V 20 mm/s	0,52072	0,39025	0,46224	0,40064
Ti-6Al-4V 30 mm/s	0,56907	0,33423	0,53518	0,64336
600 °C 10 mm/s	0,52929	0,52306	0,80219	0,80550
600 °C 20 mm/s	0,55261	0,6506	0,69135	0,42275
600 °C 30 mm/s	0,54104	0,57633	0,63456	0,70457
700 °C 10 mm/s	0,32610	0,55869	0,32331	0,60219
700 °C 20 mm/s	0,51144	0,12860	0,47421	0,56525
700 °C 30 mm/s	0,50447	0,42392	0,55572	0,57751
800 °C 10 mm/s	0,18525	0,74808	0,32765	0,65103
800 °C 20 mm/s	0,21995	0,22303	0,55602	0,69542
800 °C 30 mm/s	0,50049	0,40311	0,50755	0,70209



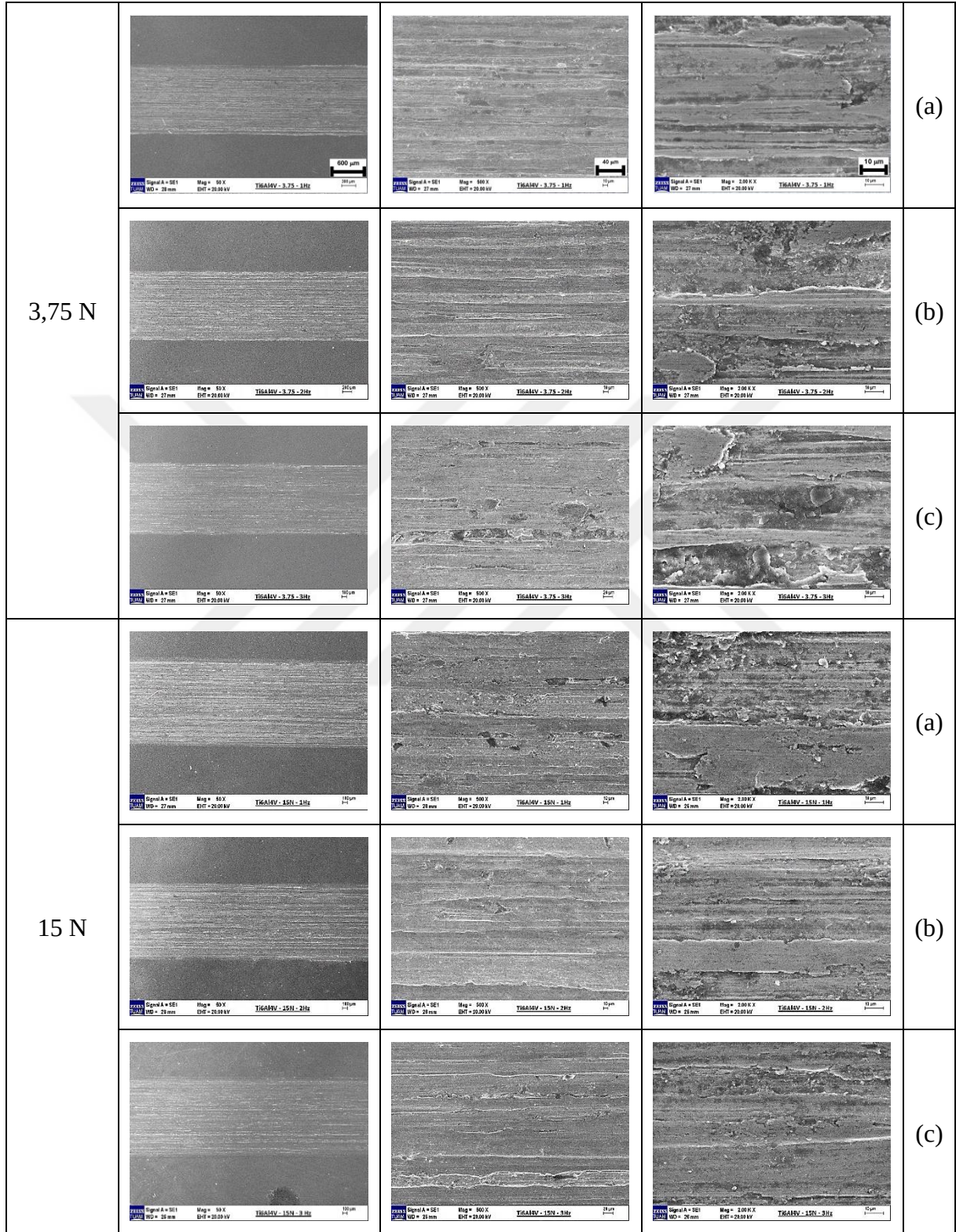
Şekil 7.14. (a) İşlem Görmemiş ve (b) 600, (c) 700 (d) 800 °C’ de Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının V, k ve CoF 2D Matlab Haritaları

İşlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımının 3,75 ve 15 N yüklerde üç farklı kayma hızında oluşan aşınma izlerine ait düşük, orta ve yüksek büyütme FE-SEM görüntüleri Şekil 7.15’ de sunulmuştur. Şekil 7. 15 incelendiğinde kayma yönüne paralel yivler oluştuğu ve artan yük ile aşınma izlerinin genişlediği gözlemlenmektedir. Aşınmış yüzey pürüzlü olup, derin oluk görüntüleriyle abrazif aşınmanın meydana geldiği, abrazif aşınmaya ek delaminasyonların

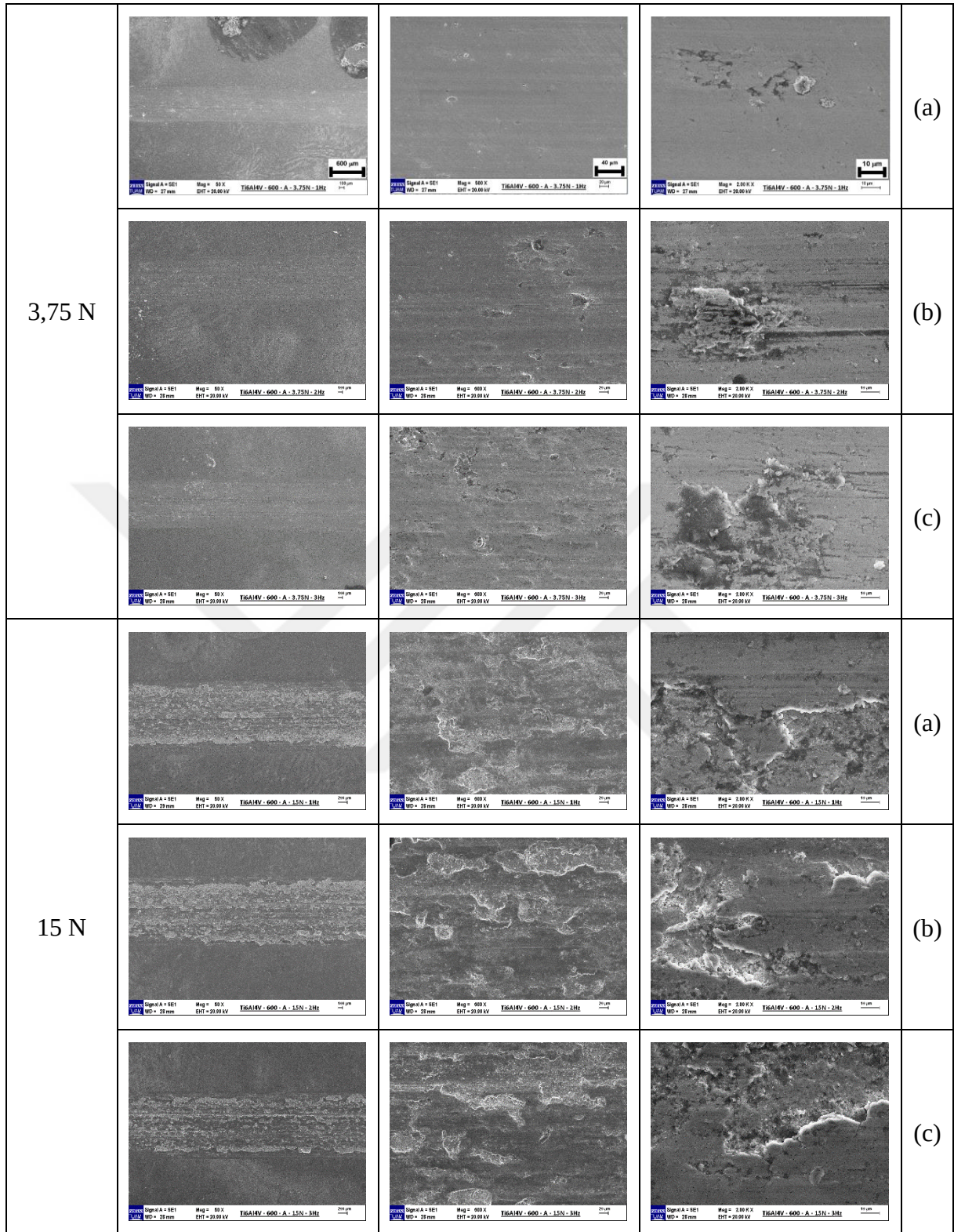
gözlendiği ve delaminasyon sonucu bazı bölgelerde karşı malzemeye yapışmaların olduğu görülmektedir (Ek Tablo 28-29-30). Ayrıca artan yük ve kayma hızının etkisiyle delaminasyonların arttığı dikkat çekmektedir. İşlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımının OM görüntüleri (Ek Tablo 1-9), FE-SEM görüntüleri (Şekil 7. 15) ile benzer şekilde, kayma yönüne paralel olukların oluştuğunu ve bu oluklar artan yüklerle derinleşip genişlediği gözlenmiştir. OM ve FE-SEM görüntülerinden elde edilen gözlemler sonucunda aşınma mekanizmasının ağırlıklı olarak abrazif ve delaminasyon aşınmaları olduğu sonucuna varılmıştır. Üç farklı kayma hızında yapılan aşınma deneyine ait karşı malzeme yüzey görüntüleri (Ek tablo 28-29-30) incelendiğinde artan yüklerle birlikte iz büyüklüğünün arttığı, bu durumun daha fazla temas alanı ile ilişkili olup, dolayısıyla daha yüksek aşınmaya sebep olduğu anlaşılmıştır. Bu gözlemler aynı alaşımın Tablo 7.1 ve Tablo 7.2’ de verilen V ve k değerlerinde artan hız ve yüklerle gözlenen değişimi doğrulamaktadır. Literatürde işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımının düşük yüzey sertliğinden dolayı aşınma esnasında plastik deformasyon, kayma yönüne paralel abrazif çizikler görülüp aşınma mekanizmasının abrazif aşınma olduğu birçok kez rapor edilmiştir (Yürektürk 2023; Lin vd., 2017; Lin vd., 2015; Cassar vd., 2010)

600 °C (Şekil 7. 16), 700 °C (Şekil 7. 17) ve 800 °C’ de (Şekil 7. 18) 6 saat alüminyumlama işlemi uygulanan Ti-6Al-4V alaşımına ait 3,75 N ve 15 N yüklerde, üç farklı kayma hızında oluşan aşınma izlerine ilişkin FE-SEM görüntüleri incelendiğinde, artan yük ve kayma hızı ile yüzeyde oluşan oluklardan kaynaklı abrazif aşınma izleri ve delaminasyon aşınmasının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, daha sert olan Al_2O_3 karşı malzemenin artan yük ve kayma hızı ile yüzeye derinlemesine nüfuz etmesidir. 600 °C’ de alüminyumlama yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının Tablo 7.2 ve Tablo 7.3’ te verilen en düşük k ve CoF değerlerinin 15 N yükte yapılan deneyde elde edildiği rapor edilmiştir. Ancak aşınma yüzeyleri incelendiğinde yüksek yükte daha fazla delaminasyon gözlemlenmiştir (Şekil 7.16 ve Ek Tablo 1-9). Bu sonuç delaminasyonla birlikte yüzeyden ayrılan parçaların birleşerek bir tribofilm oluşturduğu ve bu tribofilmin CoF değerlerini azalttığı düşünülmektedir. 700 °C (Şekil 7. 17) ve 800 °C’ de (Şekil 7. 18)’ de elde edilen örneklerin FE-SEM görüntülerinde görüldüğü gibi abrazif aşınma izlerinin azaldığı ancak delaminasyon aşınmasının varlığını sürdürdüğü anlaşılmıştır. Tablo 7.2 ve Tablo 7.3’ te verilen k ve CoF değerlerinin düşük yükte daha düşük değerlerde seyretmesi aşınma yüzey görüntüleriyle uyumludur. Aşınma yüzey görüntülerinde yük arttıkça delaminasyonun şiddetinin arttığı gözlenmiştir (Ek Tablo 1-9). Literatürde farklı çelik malzemeler üzerine yapılan alüminyumlama, nitrürleme, borlama gibi yüzey işlemleri sonucunda yapılan aşınma testleri sonrasında aşınan yüzey görüntülerinde bu çalışmanın aşınmış yüzey görüntülerine benzeyen plastik deformasyonlar, delaminasyonlar ve

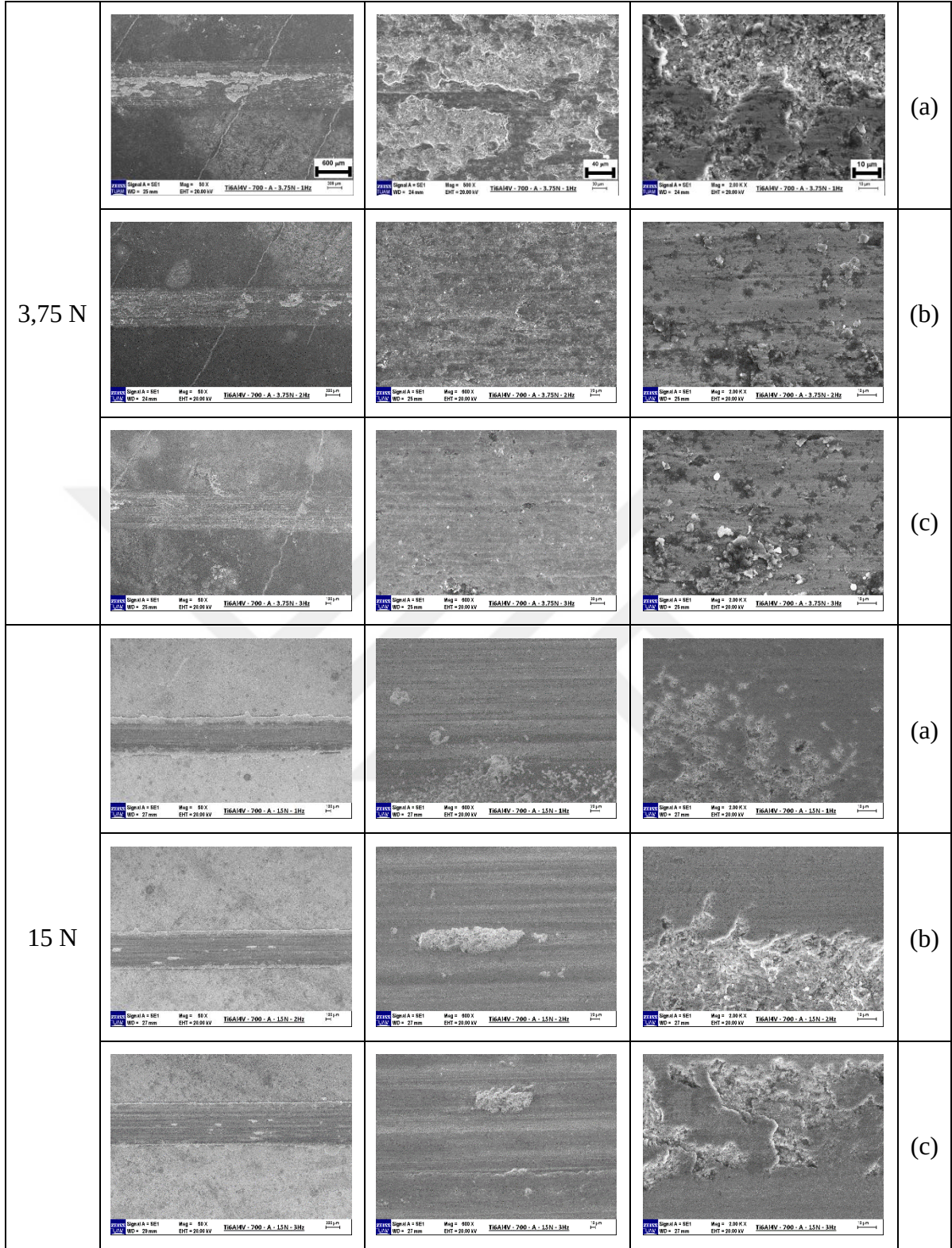
şiddetli deformasyonlar rapor edilmiştir (Yu vd., 2024; Carrera Espinoza vd., 2024; Lin vd., 2019).



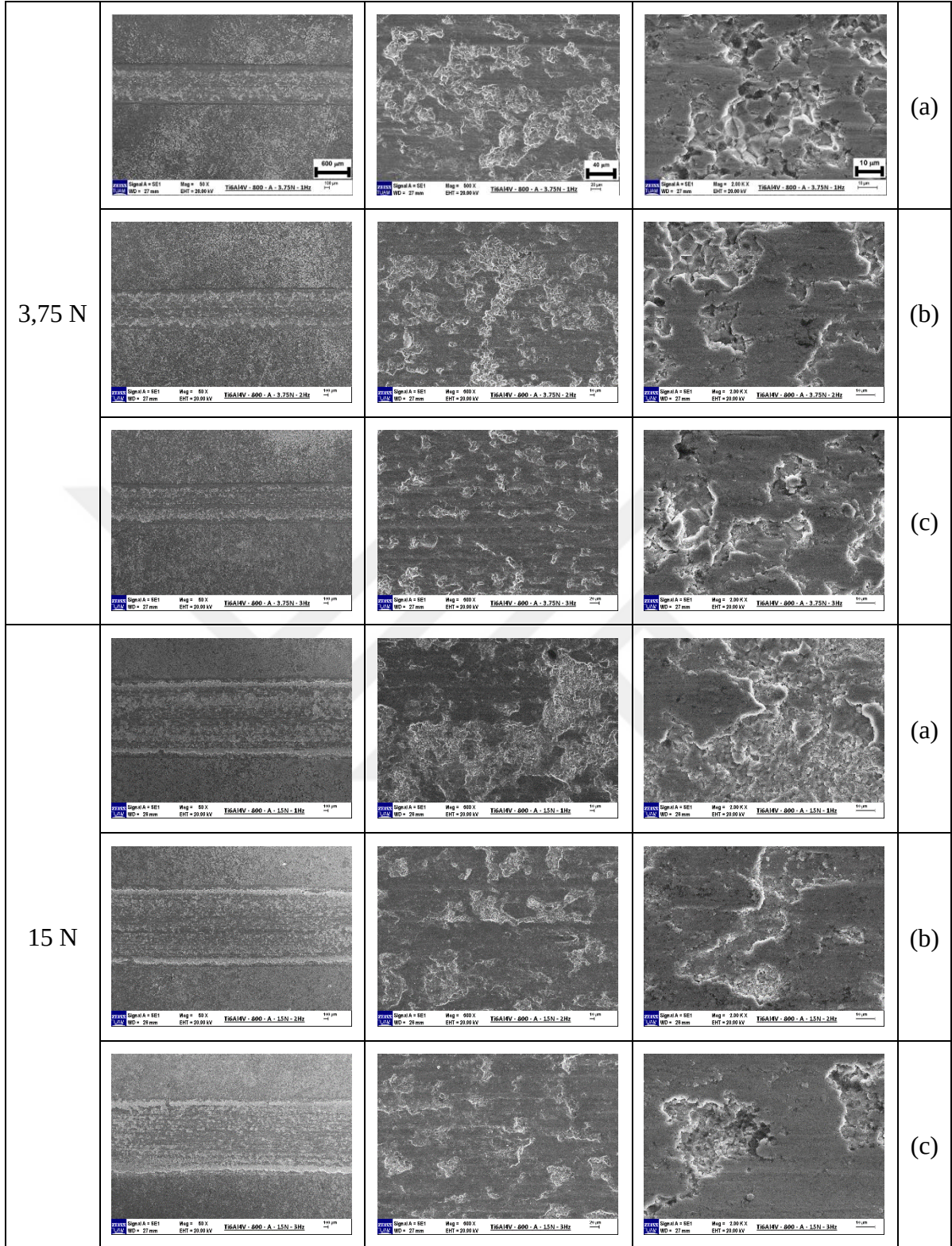
Şekil 7.15. İşlem Görmemiş Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri



Şekil 7.16. 600 °C 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri



Şekil 7.17. 700 °C 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte
(a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri

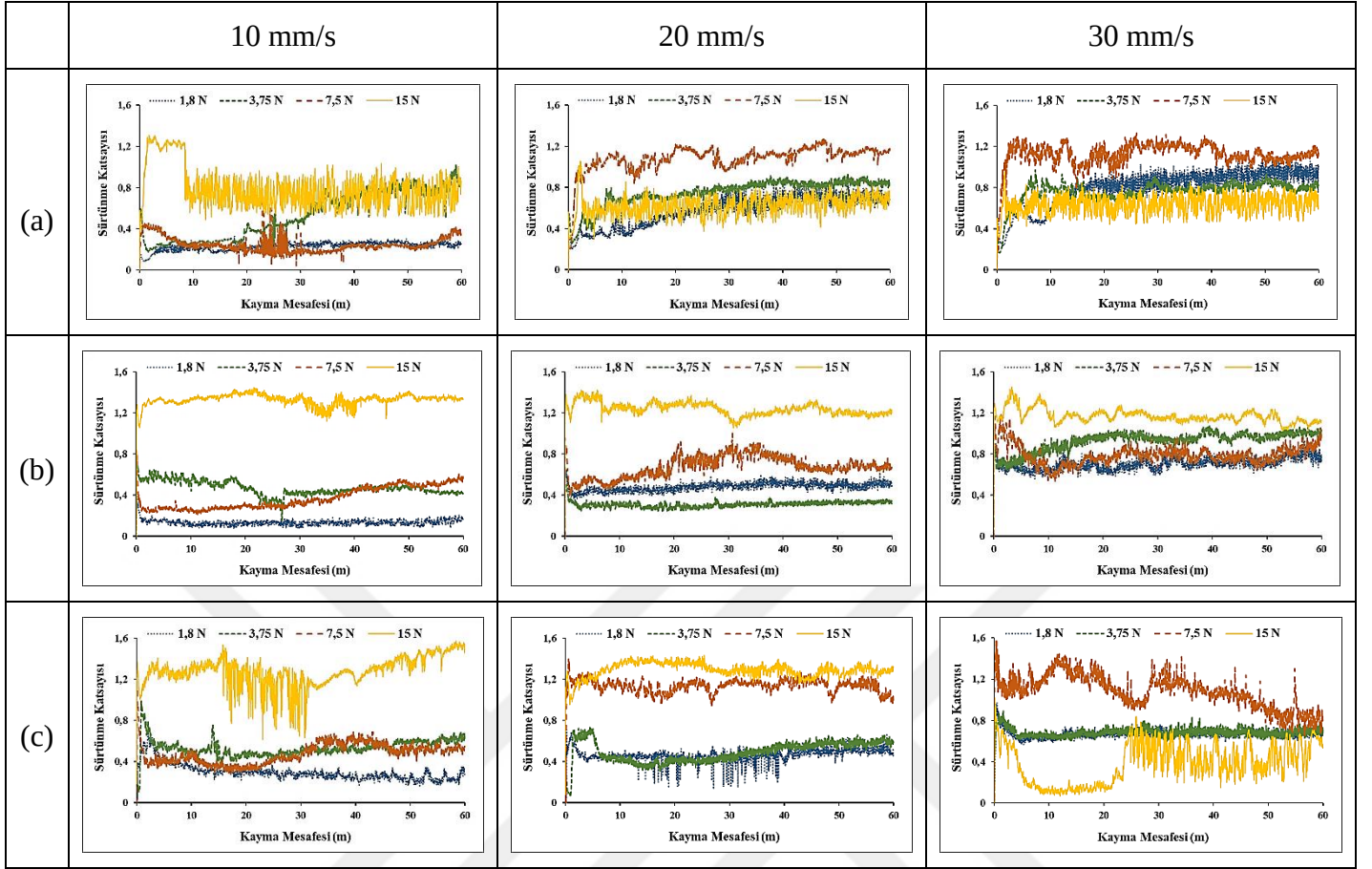


Şekil 7.18. 800 °C 6 Saat Alüminyumlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte
(a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri

600 °C’ de 60 saat, 700 °C’ de 30 saat ve 800 °C’ de 5 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının dört farklı yükte, üç farklı kayma hızında kayma mesafesine bağlı olarak CoF değişimi Şekil 7. 19’ da verilmiştir. Tablo 7.3, Tablo 7.4 ve Tablo 7.5 TO yapılmış örneklerin sırasıyla V, k ve CoF değerlerini göstermektedir. Şekil 7.20’ de işlem görmemiş ve TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının V, k ve CoF değişimlerini gösteren 2D matlab haritaları verilmiştir. 600 °C’ de 60 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımında tüm yükler için kayma hızının artmasıyla salınımlar arttığı gözlemlenmektedir. 700 °C’ de 30 saat TO yapılmış alaşımda ise salınımlar en düşük seviyede, 800 °C’ de 5 saat TO yapılmış alaşımda en yüksek yük değerinde salınımların meydana geldiği Şekil 7.19’ dan açıkça görülmektedir. Bu salınımlar aynı örneklerin Tablo 7.4’ te verilen V sonuçlarıyla açıklanabilir. Tablo 7.4’ te koyu renkle işaretlenmiş en düşük yük ve kayma hızında en düşük V sonuçları belirlenmiştir. Salınımların yüksek olduğu 600 ve 800 °C’ de yüksek yükte V değerlerinin yüksek olduğu, 700 °C’ de ise tüm yük ve kayma hızlarında en düşük değerlerin ortaya çıktığı tespit edilmiştir. V sonuçları Şekil 7.19’ da görülen salınımları desteklemiştir. İşlem görmemiş alaşımın düşük hız (10 mm/s) ve düşük yükte (1,8 N) elde edilen V sonucuyla tüm sıcaklıklarda TO yapılmış örneklerin aynı şartlarda aşınma testi sonucunda elde edilen en küçük V değerleri ile karşılaştırıldığında 600 °C, 700 °C ve 800 °C’ de sırasıyla %96, %87 ve %78 aşınma hacimlerinde azalmalar tespit edilmiştir. Şekil 7.20’ de verilen matlab haritalarında V sonuçları incelendiğinde 600 °C’ de 60 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımında, Şekil 7.14 (a)’ da açıklandığı gibi işlem görmemiş numuneye benzer şekilde yük arttıkça V değerinin arttığı hatta yüksek yükte kritik değere ulaştığı kırmızı renkli bölgelerde görülmektedir. Ayrıca düşük yüklerde (<7,5 N) kayma hızının etkisinin olmadığı ve düşük V değerlerinin elde edildiği lacivert renkli bölgelerden görülmektedir. 700 °C’ de 30 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımı incelendiğinde V değerinin referans aldığımız en yüksek değere göre tüm yükler ve kayma hızında düşük olduğu lacivert renkli bölgelerde görülmektedir. 800 °C’ de 5 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımında ise V değerinin yalnızca yüksek yük ile yüksek kayma hızının birleşiminde arttığı mavi renkli bölgelerde görülmektedir. Tablo 7.5’ de gözlenen k değerleri incelendiğinde Tablo 7.4’ te verilen V değerleriyle uyumlu sonuçların ortaya çıktığı görülmektedir. Bu sonuç aşınma testlerinin hassas şekilde yapıldığının göstergesidir. Ayrıca işlem görmemiş alaşım ile TO yapılmış örnekler karşılaştırıldığında da tüm yüklerde ve tüm hızlarda daha düşük k değerlerine sahip oldukları, özellikle yüksek yüklerde en düşük k değerleri sergiledikleri tespit edilmiştir. Tablo 7.5’ de koyu renkle işaretlenmiş en düşük k değerleri 600 °C için düşük kayma hızı ve orta yükte, 700 ve 800 °C için orta kayma hızı ve yüksek yükte elde edilmiş olup işlem görmemiş alaşım ile karşılaştırıldığında sırasıyla %96, %87 ve %76 aşınmaya karşı direncin

arttığı belirlenmiştir. V ve k değerleri sonuçlarında gözlenen bu uyum tüm sıcaklıklarda TO'nun ve aşınma testlerinin başarılı bir şekilde yapıldığının göstergesidir. Şekil 7.20' de matlab haritalarında görüldüğü gibi, 600 °C' de 60 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının k değerinin yüksek yükte de arttığı görülürken, düşük yüklerde (<7,5 N) kayma hızından bağımsız olarak lacivert renkle gösterilen bölgelerde azaldığı görülmektedir. TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının referans alınan k değerine göre tüm yüklerde ve kayma hızlarında Şekil 7.20' de tamamen lacivert renk ile görülen matlab haritalarında 700 ve 800 °C' de daha düşük k değerine sahip olduklarını göstermiştir. Tablo 7.6' da koyu renkle işaretlenen TO uygulanmış örneklerde en düşük CoF değerlerinin en düşük yük ve en düşük kayma hızı değerlerinde elde edildiği ve işlem görmemiş alaşıma göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 700 °C' de TO uygulanmış numunenin en düşük CoF değeri ve en düşük salınımı ile aşınmaya karşı en dirençli örnek olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 7.20 (b)' de görüldüğü gibi 600 °C' de 60 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımında düşük yük ile düşük kayma hızı ve orta yük (7,5 N) ile düşük kayma hızının birleşiminde CoF değerinin düşük olduğu lacivert renkli bölgelerden, orta yük ile orta kayma hızının birleşiminde (>20 mm/s) CoF değerinin arttığı sarı-turuncu renkli bölgelerden görülmektedir. 700 °C' de 30 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımında, düşük kayma hızı ile düşük yükün birleşiminde CoF değerinin düşük olduğu, yüksek yük ile düşük kayma hızının birleşiminde ise CoF değerinin kritik seviyeye ulaştığı kırmızı renkli bölgelerden görülmektedir (Şekil 7.20 (c)). 800 °C' de 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımında, düşük yük ile düşük kayma hızının birleşiminde CoF değerinin düşük olduğu, ancak yüksek yük ile düşük ve orta kayma hızlarının birleşiminde CoF değerinin kritik seviyeye yükseldiği kırmızı renkli bölgede gözlemlenmiştir (Şekil 7. 20 (d)). Her üç TO işleminde de, düşük yük ile düşük kayma hızının birleşiminde CoF değerinin düşük olduğu lacivert renkli bölgelerden görülmektedir.



Şekil 7.19. (a) 600 °C 60 Saat, (b) 700 °C 30 Saat ve (c) 800 °C’ de 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının Dört Farklı Yükte 10;20;30 mm/s Hızda CoF Değişimi

Tablo 7.4. 600 °C 60 Saat, 700 °C 30 Saat ve 800 °C 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V
Alaşımlarının V Değerleri

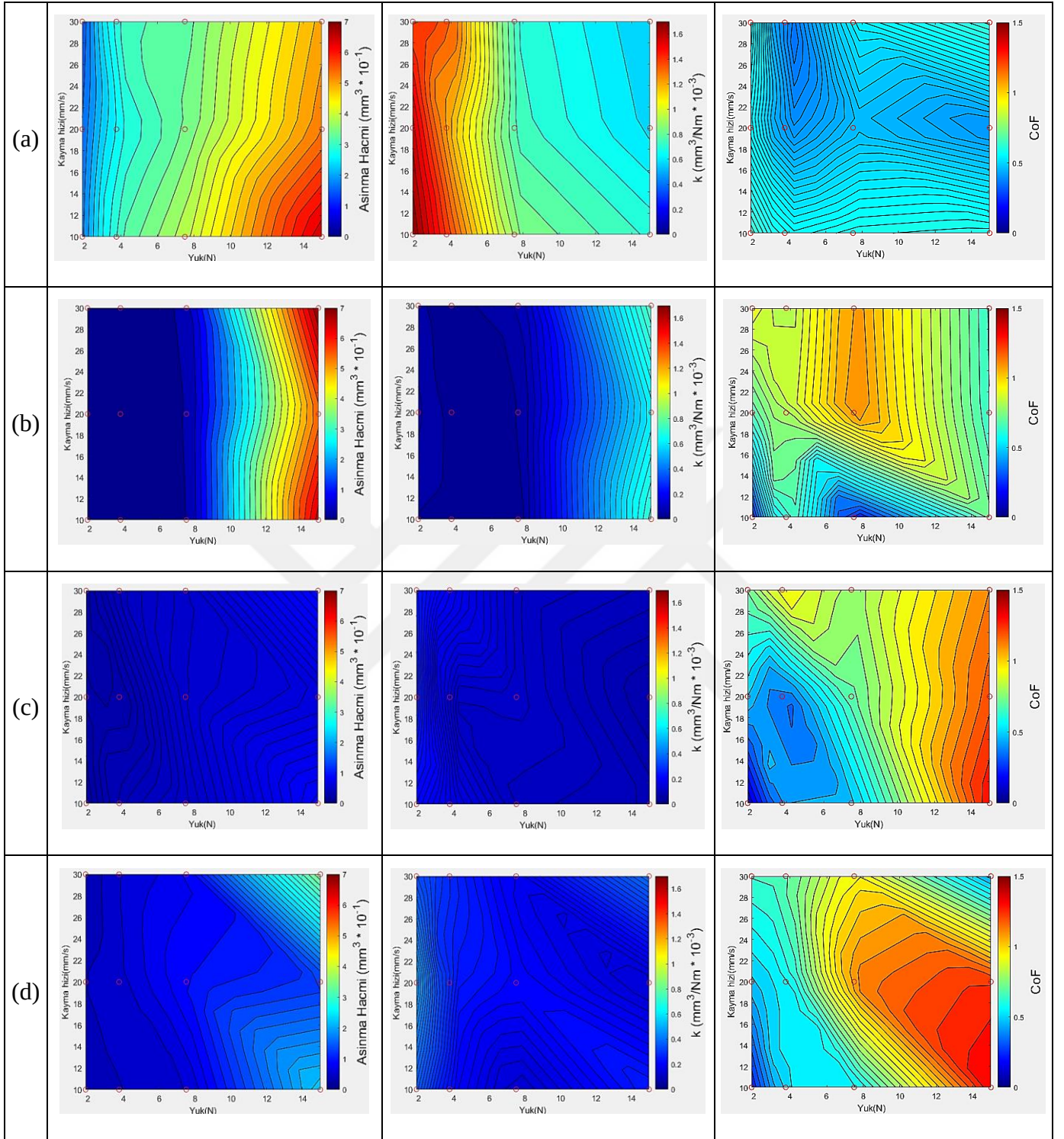
	1,8 N	3,75 N	7,5 N	15 N
Ti-6Al-4V 10 mm/s	1,82564	3,20261	3,92136	6,55755
Ti-6Al-4V 20 mm/s	1,71059	2,77142	3,43490	5,35035
Ti-6Al-4V 30 mm/s	1,49257	3,18124	3,32877	5,08944
600 °C 60 saat 10 mm/s	0,06349	0,10115	0,12989	6,61741
600 °C 60 saat 20 mm/s	0,10596	0,10519	0,19164	5,52315
600 °C 60 saat 30 mm/s	0,06915	0,11864	0,34286	7,00002
700 °C 30 saat 10 mm/s	0,23087	0,38090	0,48042	0,85295
700 °C 30 saat 20 mm/s	0,28932	0,26273	0,54922	0,64465
700 °C 30 saat 30 mm/s	0,26568	0,43115	0,53514	0,91109
800 °C 5 saat 10 mm/s	0,39346	0,49634	0,57760	2,33111
800 °C 5 saat 20 mm/s	0,50166	0,57760	0,98415	1,24696
800 °C 5 saat 30 mm/s	0,37360	0,63038	0,82168	3,56064

Tablo 7.5. 600 °C 60 Saat, 700 °C 30 Saat ve 800 °C 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V
Alaşımının k Değerleri

	1,8 N	3,75 N	7,5 N	15 N
Ti-6Al-4V 10 mm/s	1,69040	1,42338	0,87141	0,72861
Ti-6Al-4V 20 mm/s	1,58388	1,23174	0,76331	0,59448
Ti-6Al-4V 30 mm/s	1,38201	1,41388	0,73972	0,56549
600 °C 60 saat 10 mm/s	0,05878	0,04495	0,02886	0,73526
600 °C 60 saat 20 mm/s	0,09811	0,04675	0,04258	0,61368
600 °C 60 saat 30 mm/s	0,06403	0,05273	0,07619	0,77778
700 °C 30 saat 10 mm/s	0,21377	0,16929	0,10676	0,09477
700 °C 30 saat 20 mm/s	0,26789	0,11677	0,12205	0,07162
700 °C 30 saat 30 mm/s	0,24600	0,19162	0,11892	0,1012
800 °C 5 saat 10 mm/s	0,36432	0,22059	0,12835	0,25901
800 °C 5 saat 20 mm/s	0,46450	0,25671	0,21870	0,13855
800 °C 5 saat 30 mm/s	0,34592	0,28017	0,18259	0,39562

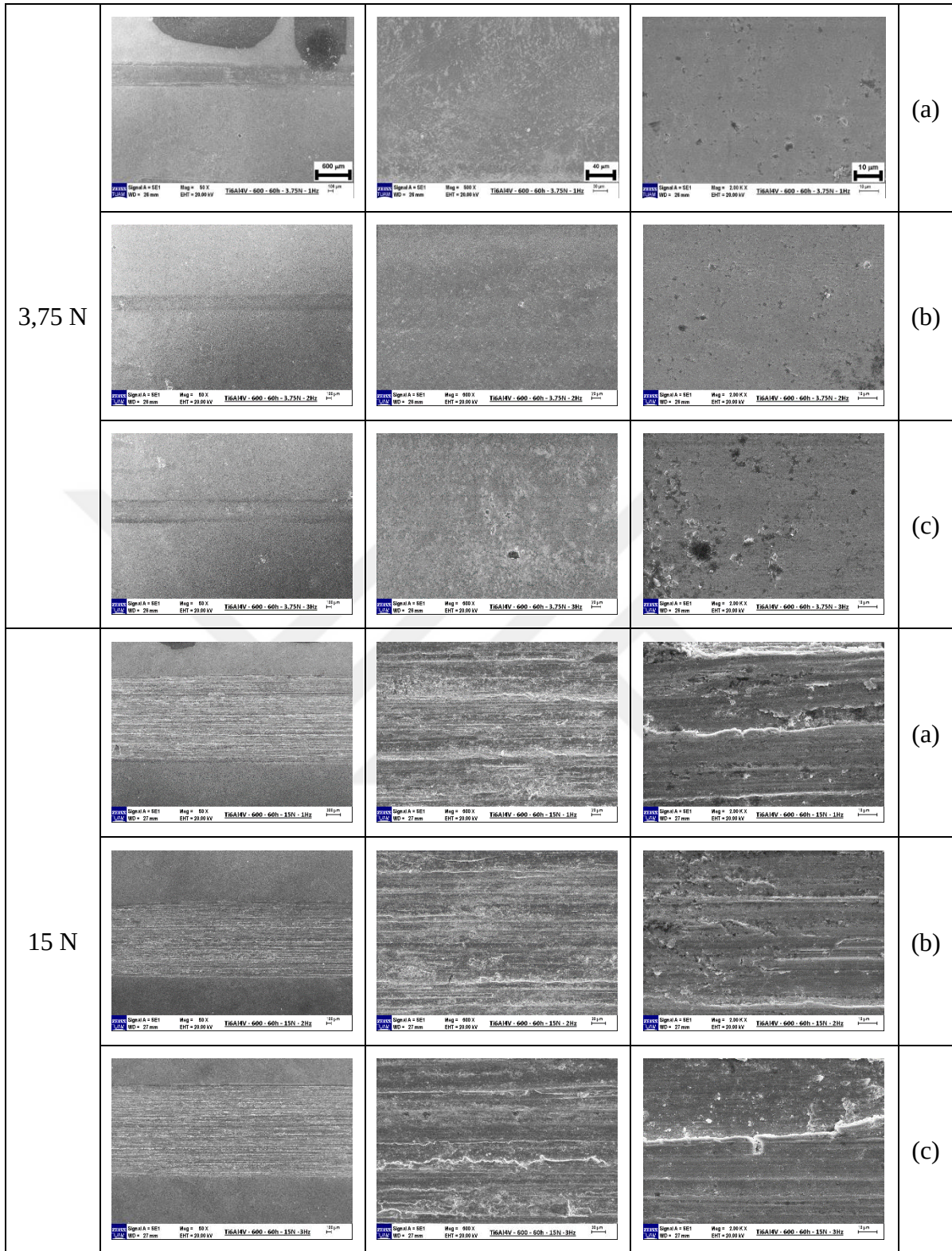
Tablo 7.6. 600 °C 60 Saat, 700 °C 30 Saat ve 800 °C 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V
Alaşımlarının CoF Değerleri

	1,8 N	3,75 N	7,5 N	15 N
Ti-6Al-4V 10 mm/s	0,6620	0,56675	0,59911	0,61195
Ti-6Al-4V 20 mm/s	0,52072	0,39025	0,46224	0,40064
Ti-6Al-4V 30 mm/s	0,5690	0,33423	0,53518	0,64336
600 °C 60 saat 10 mm/s	0,25526	0,74756	0,23207	0,73252
600 °C 60 saat 20 mm/s	0,69701	0,84315	1,14607	0,65646
600 °C 60 saat 30 mm/s	0,92200	0,80718	1,12433	0,65057
700 °C 30 saat 10 mm/s	0,13511	0,45400	0,46965	1,32527
700 °C 30 saat 20 mm/s	0,50585	0,32390	0,70966	1,21550
700 °C 30 saat 30 mm/s	0,73528	0,98050	0,78452	1,14256
800 °C 5 saat 10 mm/s	0,24683	0,55888	0,55513	1,33904
800 °C 5 saat 20 mm/s	0,49049	0,55881	1,15100	1,27451
800 °C 5 saat 30 mm/s	0,67046	0,68358	0,98266	0,43651

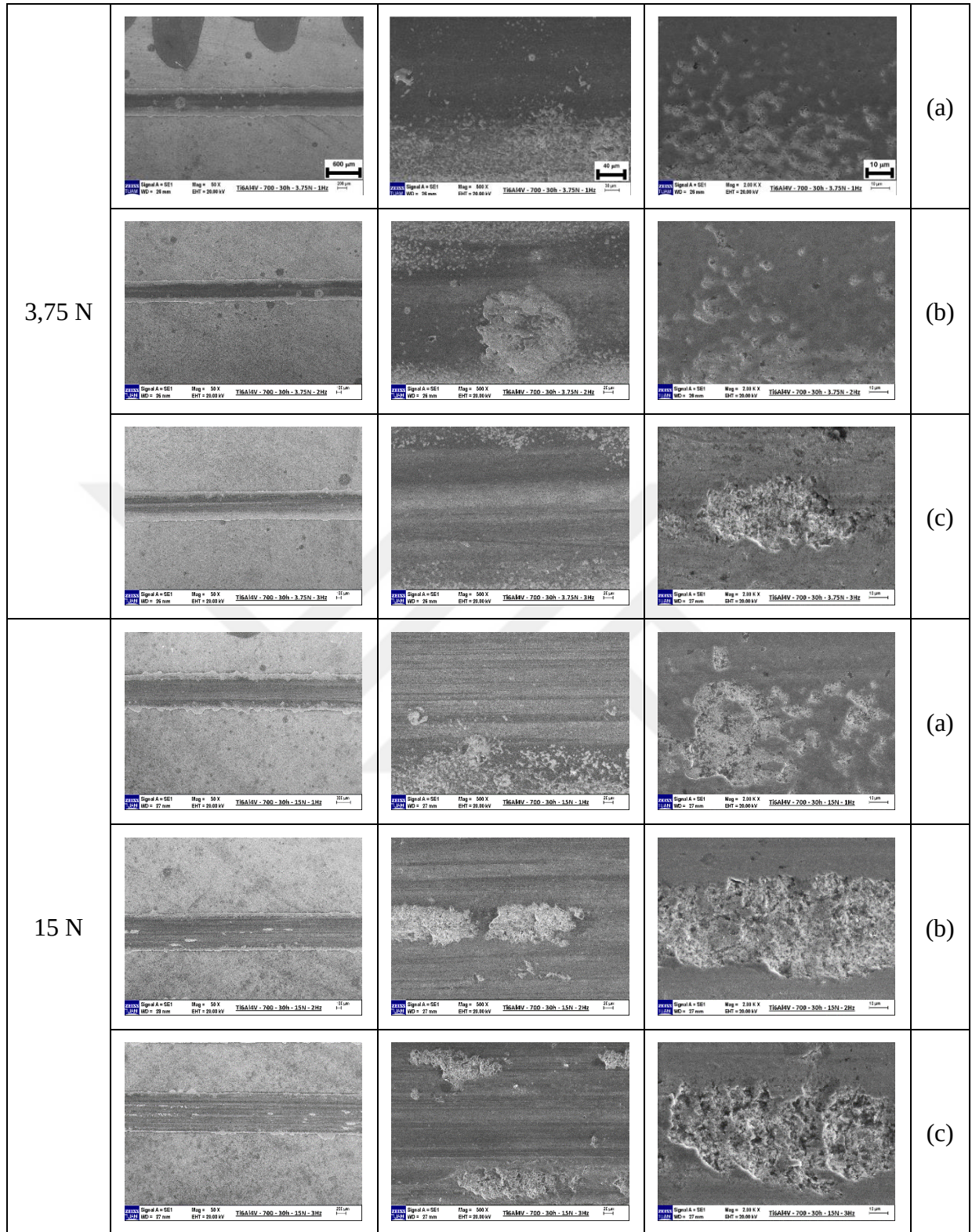


Şekil 7.20. (a) İşlem Görmemiş ve (b) 600 °C’ de 60 Saat, (c) 700 C’ de 30 Saat ve (d) 800 °C’ de 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının V, k ve CoF 2D Matlab Haritaları

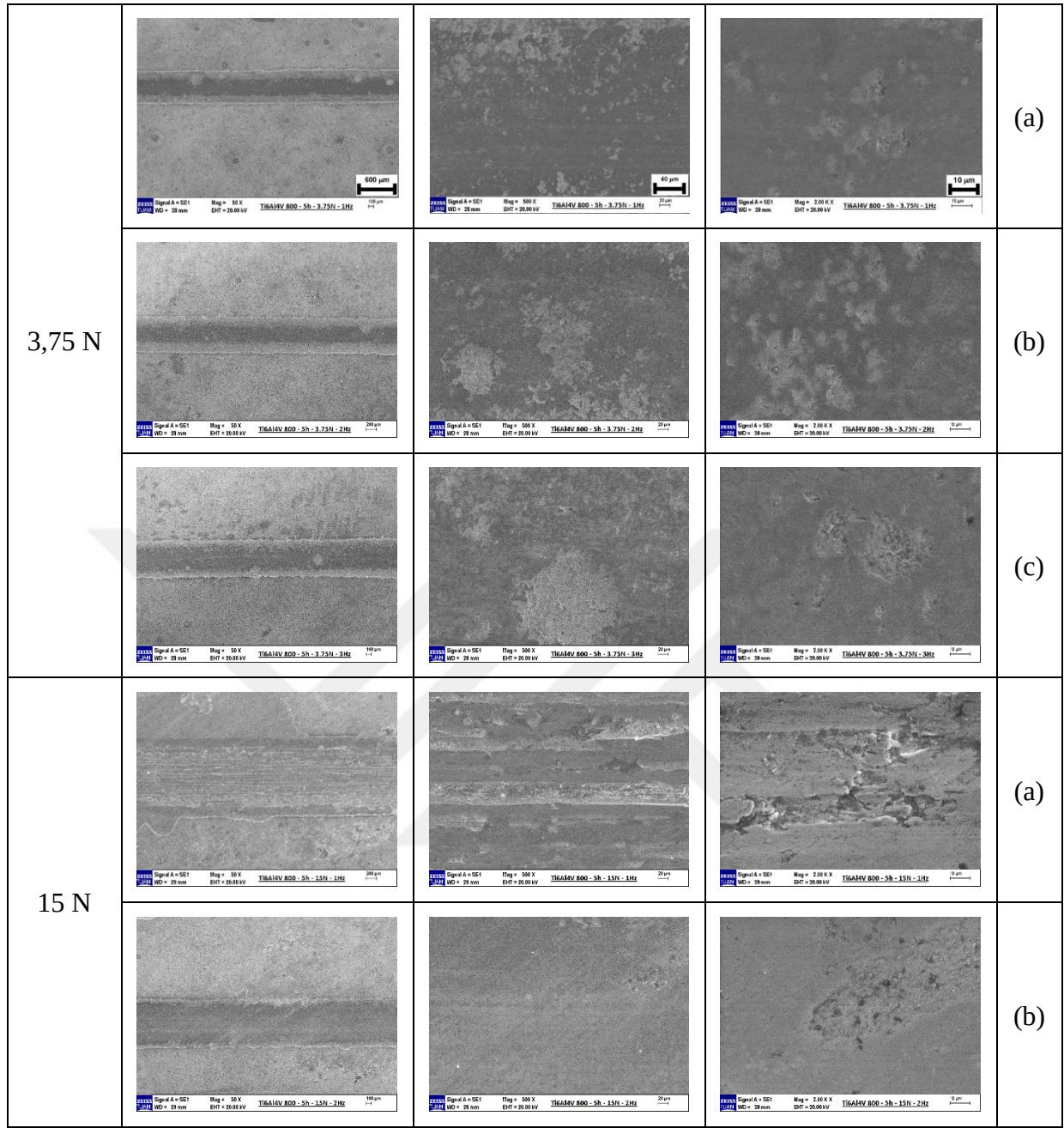
600 °C 60 saat (Şekil 7. 21) , 700 °C 30 saat (Şekil 7. 22) ve 800 °C 5 saat (Şekil 7. 23) TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının FE-SEM görüntüleri incelendiğinde 3.75 N yükte görülen aşınma yüzeylerinde çukurlaşmaların görüldüğü ve bu çukurlaşmaların sıcaklık arttıkça belirli bölgelerde yığıldığı tespit edilmiştir. 15 N yükte ise, 700 °C’ de abrazif aşınma izleri ve belirli bölgelerde toplanan çukurlaşma görüntüleri, 600 ve 800 °C’ de ise daha çok delaminasyon aşınması meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, düşük hız ve düşük yükte elde edilen en düşük CoF sonuçlarıyla uyumludur (Şekil 7.19 ve Tablo 7.6). Literatürde CoF eğrilerindeki yüksek ve düzensiz dalgalanmalar, oksit tabakasının aşındıktan sonra temasın oksijen difüzyon bölgesi ile gerçekleştiğine atfedilmektedir. Oluşan oksit parçacıklarının temas arayüzünde sıkışması, sürtünme katsayısında da ani artışlara yol açtığı rapor edilmiştir (Sun vd., 2023). Bu çalışmada aşınmış yüzeylerin FE-SEM görüntülerinden aşınmanın oksijen difüzyon bölgesinde gerçekleştiğini gösteren bir kanıt yoktur. Ancak aynı aşınmış yüzeylerin en yüksek hızda ve en yüksek büyütme de alınan OM görüntülerinde tüm yüklerde 600 ve 800 °C’ de üretilen örneklerin aşınmış yüzeylerinin altında görünen farklı renkli bölgelerden aşınmanın difüzyon bölgesine ulaştığı düşünülebilir. Koyu mavi renkte görülen bu bölgelerin kayma yönüne paralel çizgilerden oluşan izler mevcuttur. 700 °C’ de ise bu renkli bölgeler 7,5 ve 15 N da noktasal şekilde görünmektedir (Ek Tablo 18). Bu görüntüler 700 °C’ de CoF eğrisinde gözlenmeyen dalgalanmaları ve düşük CoF değerlerini desteklemektedir (Tablo 7.6). Ayrıca, tüm hızlarda OM karşı malzeme görüntüleri 700 °C’ de tüm yüklerde diğer sıcaklıklarla karşılaştırıldığında oldukça küçük izlere sahip olduğunu göstermiştir (Ek Tablo 31-32-33). Bu görüntüler 700 °C’ de elde edilen örneğin aşınmaya karşı en dirençli TO sıcaklığı olduğunu tekrar doğrulamıştır. 700 °C’ de elde edilen örneğin en kalın oksit tabakası ve oksijen difüzyon bölgesine sahip olması bu sonucu desteklemektedir (Şekil 7.6).



Şekil 7.21. 600 °C 60 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri

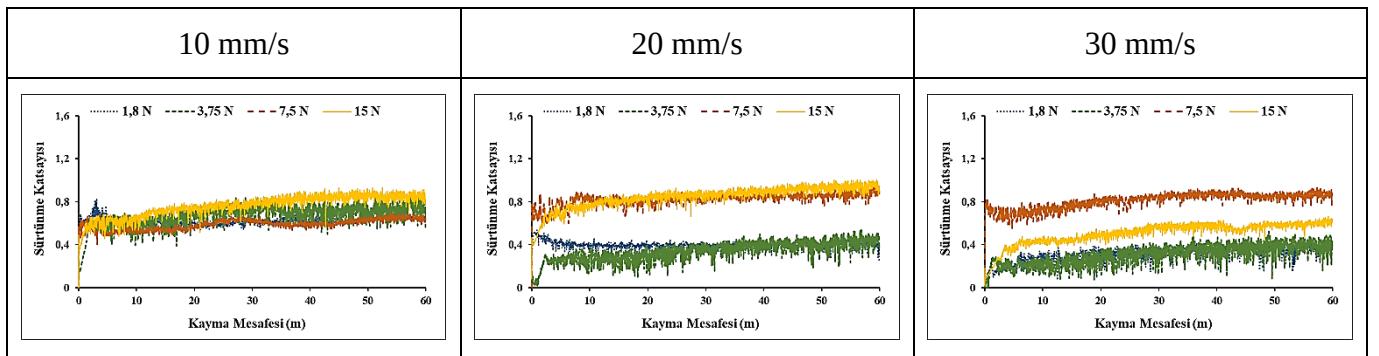


Şekil 7.22. 700 °C 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri



Şekil 7.23. 800 °C 5 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 3,75-15 N Yükte (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mm/s Kayma Hızında Aşınma İzlerine Ait FE-SEM Görüntüleri

Şekil 7.24 ve Tablo 7.7' de sıcak daldırma alüminyumlama ve ardından difüzyon tavlaması yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının dört farklı yükte, 10;20;30 mm/s kayma hızlarında CoF değişimi ve CoF değerleri verilmiştir. Şekil 7.24 incelendiğinde CoF düşük hızda birbirine yakın, hız arttıkça yüksek yük ve düşük yükte yapılan deney sonuçları birbirine yaklaşan değişimler sergilediği görülmektedir. Tablo 7.7' de 3,75 N yükünde işlem görmemiş ve işlem görmüş tüm örnekler tüm hızlarda düşük CoF değerleri sergilemiştir. Tablo 7.8 ve Tablo 7.9' da örneklerin aşınma testi sonucunda elde edilen V ve k değerleri verilmiştir. Tablo 7.8 ve Tablo 7.9' da görüldüğü gibi tüm yüklerde kayma hızı arttıkça V ve k değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Şekil 7. 25' de sıcak daldırma alüminyumlama ve difüzyon tavlaması yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının V, k ve CoF 2D matlab haritaları verilmiştir. Şekil 7. 25' te verilen sıcak daldırma alüminyumlama ve difüzyon tavlaması yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının V haritası incelendiğinde düşük yükler de kayma hızından bağımsız olarak V değerinin düşük olduğu, ancak yüksek yükler ile yüksek kayma hızının birleşiminde ve yüksek yükler ile düşük kayma hızının birleşiminde kritik olduğu görülmektedir. k değerinin orta yük ile düşük kayma hızının birleşiminde düşük olduğu, işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımına kıyasla orta seviyede k değerine sahip olduğu görülmektedir. CoF haritası incelendiğinde düşük yükler ile orta kayma hızının birleşiminde CoF değerinin düşük olduğu, yüksek yükler de (>7,5 N) CoF değerinin kritik olduğu tespit edilmiştir. Sıcak daldırma alüminyumlama ve difüzyon tavlaması uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının OM görüntüleri incelendiğinde, artan yük ve kayma hızı ile aşınma iz genişliğinin (Ek Tablo 19-27) ve karşı malzeme iz büyüklüğünün de (Ek Tablo 34-35-36) artması k ve V sonuçlarını desteklemektedir.



Şekil 7.24. Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlaması Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının Dört Farklı Yükte 10;20;30 mm/s Hızda CoF Değişimi

Tablo 7.7. Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının CoF Değerleri

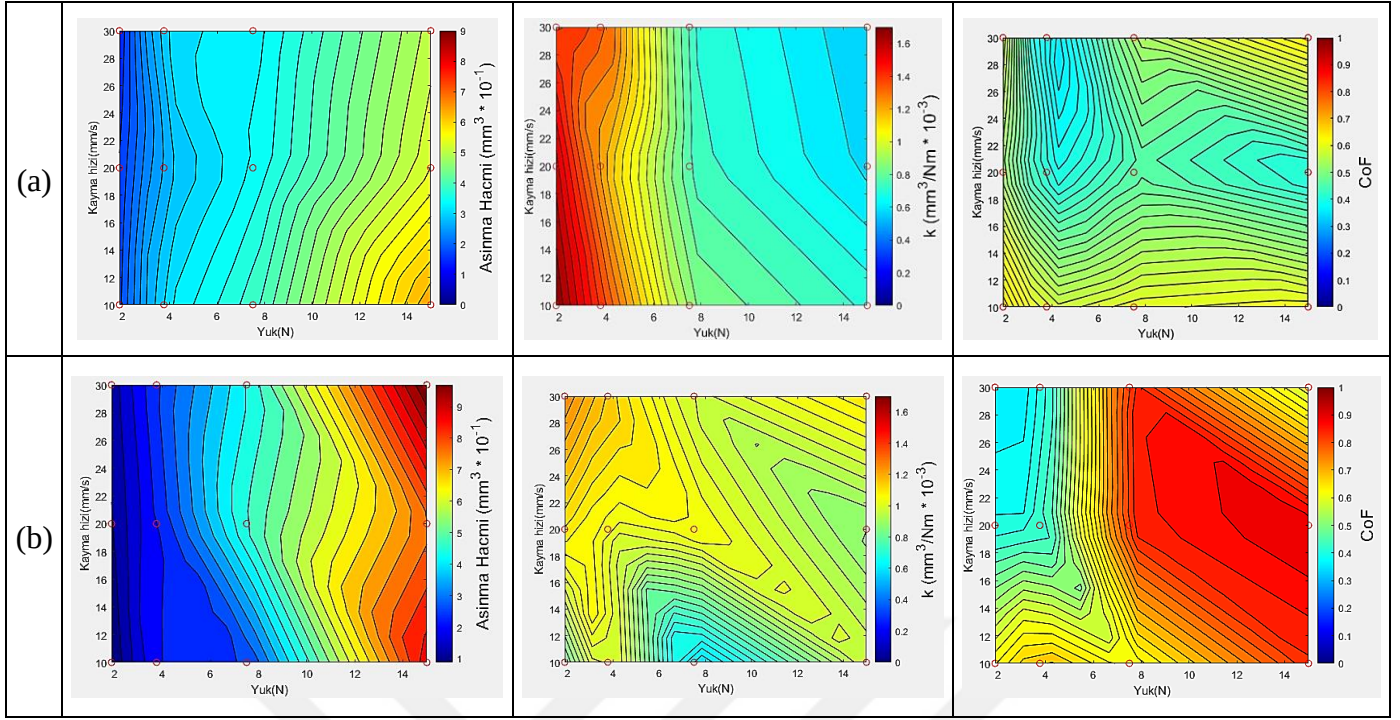
	1,8 N	3,75 N	7,5 N	15 N
Ti-6Al-4V 10 mm/s	0,66204	0,56675	0,59911	0,61195
Ti-6Al-4V 20 mm/s	0,52072	0,39025	0,46224	0,40064
Ti-6Al-4V 30 mm/s	0,56907	0,33423	0,53518	0,64336
Sıc. Dal.+Tav. 10 mm/s	0,63193	0,71445	0,61471	0,84135
Sıc. Dal.+Tav. 20 mm/s	0,40473	0,40646	0,85667	0,91575
Sıc. Dal.+Tav. 30 mm/s	0,36036	0,37307	0,86388	0,57492

Tablo 7.8. Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının V Değerleri

	1,8 N	3,75 N	7,5 N	15 N
Ti-6Al-4V 10 mm/s	1,82564	3,20261	3,92136	6,55755
Ti-6Al-4V 20 mm/s	1,71059	2,77142	3,43490	5,35035
Ti-6Al-4V 30 mm/s	1,49257	3,18124	3,32877	5,08944
Sıc. Dal.+Tav. 10 mm/s	0,88332	2,39899	2,56119	8,88691
Sıc. Dal.+Tav. 20 mm/s	1,20971	2,32299	4,82507	7,76268
Sıc. Dal.+Tav. 30 mm/s	1,37762	2,61592	4,35951	10,0466

Tablo 7.9. Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlama Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının k Değerleri

	1,8 N	3,75 N	7,5 N	15 N
Ti-6Al-4V 10 mm/s	1,69040	1,42338	0,87141	0,72861
Ti-6Al-4V 20 mm/s	1,58388	1,23174	0,76331	0,59448
Ti-6Al-4V 30 mm/s	1,38201	1,41388	0,73972	0,56549
Sıc. Dal.+Tav. 10 mm/s	0,81789	1,06622	0,56915	0,98743
Sıc. Dal.+Tav. 20 mm/s	1,12010	1,03244	1,07223	0,86252
Sıc. Dal.+Tav. 30 mm/s	1,27558	1,16263	0,96878	1,11628

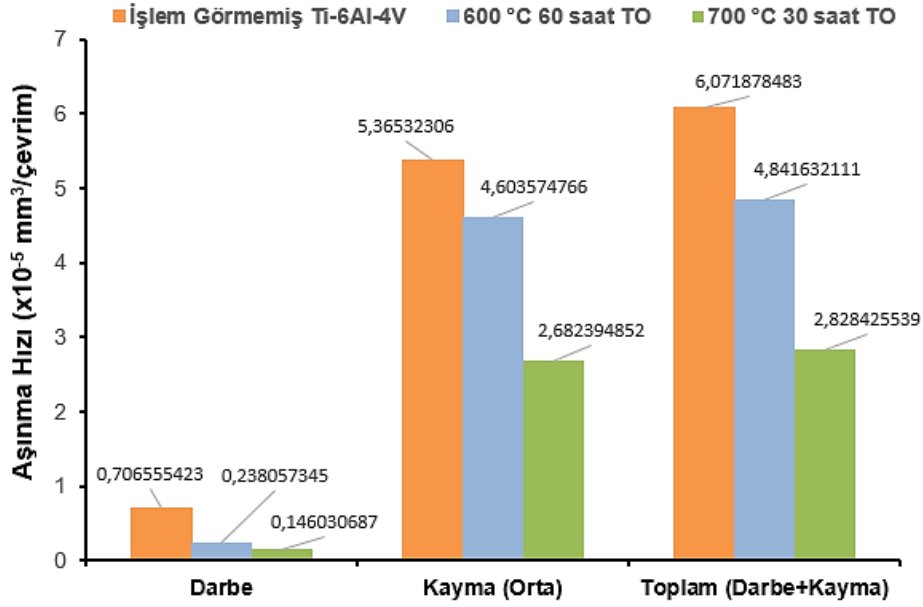


Şekil 7.25. (a) İşlem Görmemiş ve (b) Sıcak Daldırma Alüminyumlama ve Difüzyon Tavlamaşı Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının V, k ve CoF 2D Matlab Haritalar

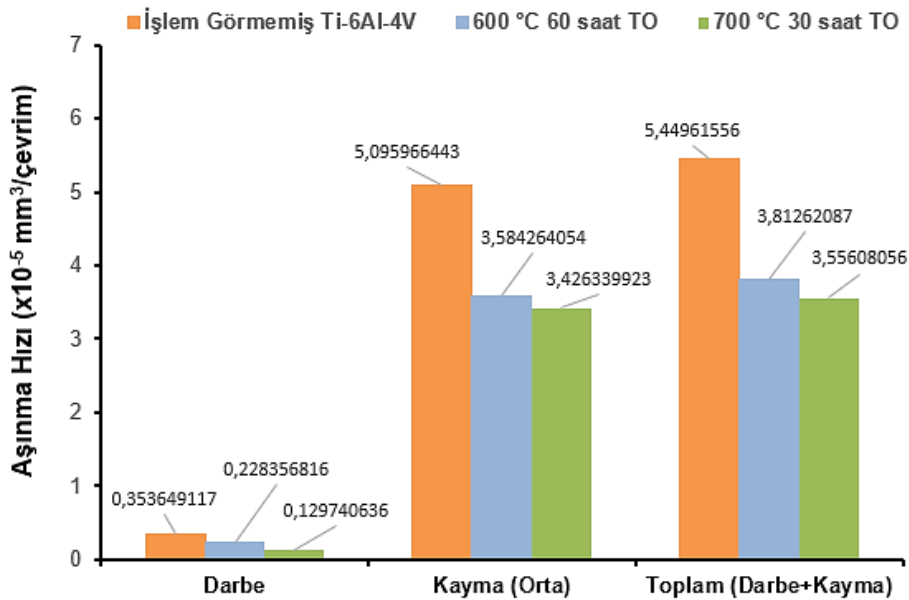
7.5.Darbeli Kayma Aşınma Sonuçları

İşlem görmemiş, 600 °C’de 60 saat ve 700 °C’de 30 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının, 25 °C, 350 °C’ de ve 550 °C sıcaklıklarında gerçekleştirilen darbeli kayma deneyi sonrası aşınma hızları sırasıyla Şekil 7.26, Şekil 7.27 ve Şekil 7.28’ de verilmiştir. Şekil 7.26’ da verilen 25 °C’ de yapılan darbeli kayma aşınma deneyi sonucunda, 600 °C’ de 60 saat TO işlemi darbe bölgesinde aşınma hızının %66, kayma bölgesindeki aşınma hızının %14, toplamda (darbe+kayma) %20 oranında; 700 °C’ de 30 saat TO işleminde ise darbe bölgesindeki aşınma hızının %79, kayma bölgesindeki aşınma hızının %50, toplamda (darbe+kayma) %54 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Şekil 7.27’ de verilen 350 °C’ de yapılan darbeli kayma aşınma deneyi sonucunda, 600 °C’ de 60 saat TO işlemi darbe bölgesindeki aşınma hızını %35, kayma bölgesindeki aşınma hızını %29, toplamda (darbe+kayma) %30 oranında; 700 °C’ de 30 saat TO işleminde ise darbe bölgesindeki aşınma hızını %63, kayma bölgesindeki aşınma hızını %32, toplamda (darbe+kayma) %34 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Şekil 7.28’ de verilen 550 °C’ de yapılan darbeli kayma aşınma deneyi sonucunda, 600 °C’ de uygulanan TO işlemi darbe bölgesindeki aşınma hızını %48 oranında azaltmış, kayma bölgesinde herhangi bir azalma gözlemlenmemiş ve toplamda (darbe+kayma) aşınma hızının %4 oranında azaldığı; 700 °C’ de 30 saat TO işlemi ise darbe bölgesindeki

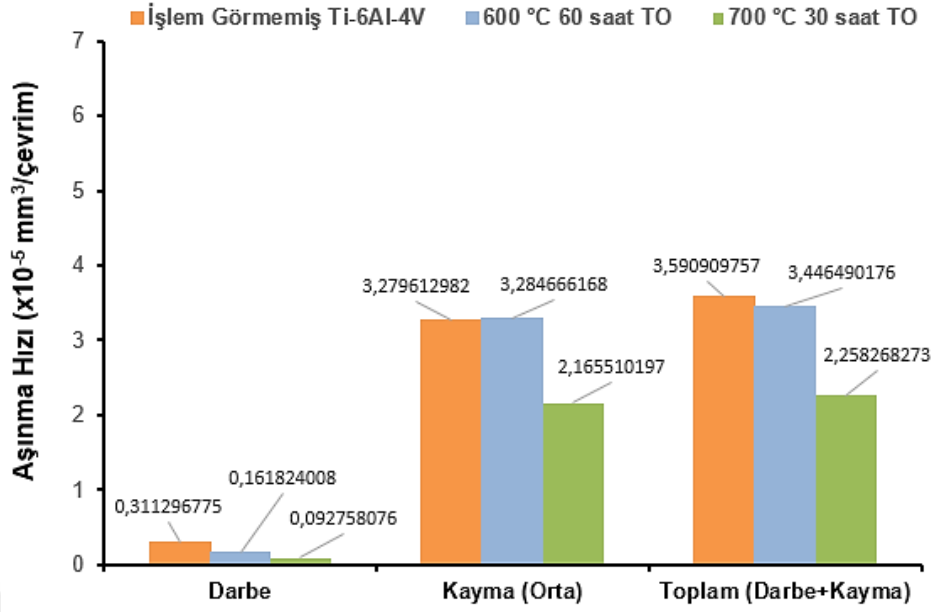
aşınma hızını %70, kayma bölgesindeki aşınma hızını %34, toplamda (darbe+kayma) aşınma hızını %37 oranında azalttığı tespit edilmiştir. 25, 350 ve 550 °C’ de yapılan darbeli kayma aşınma deneyi sonucunda 700 °C’ de 30 saat TO işleminin en iyi aşınma direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.26. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 25 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası Aşınma Hızlarının Karşılaştırması

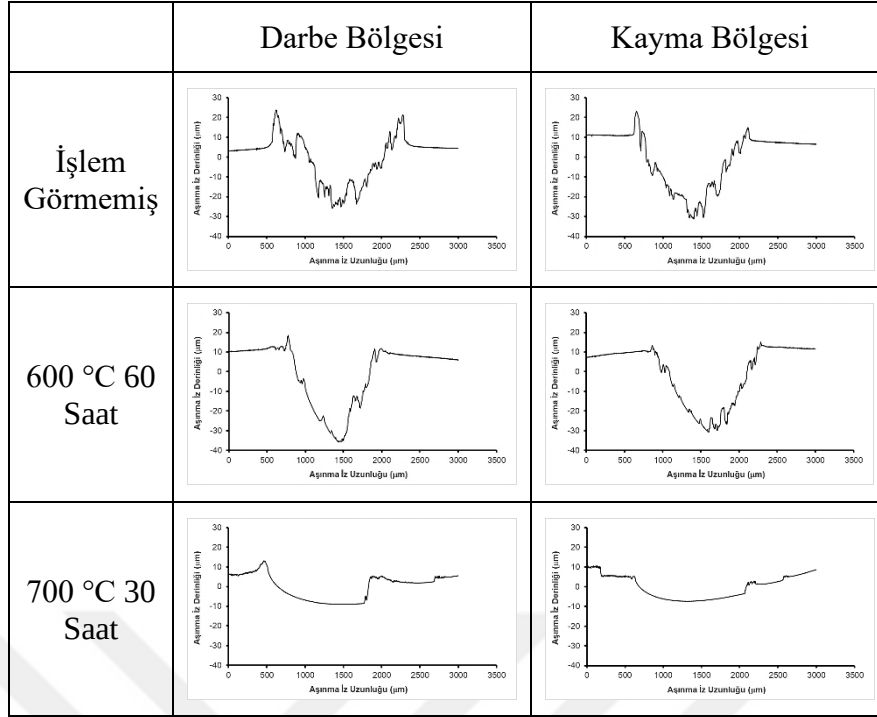


Şekil 7.27. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 350 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası Aşınma Hızlarının Karşılaştırması

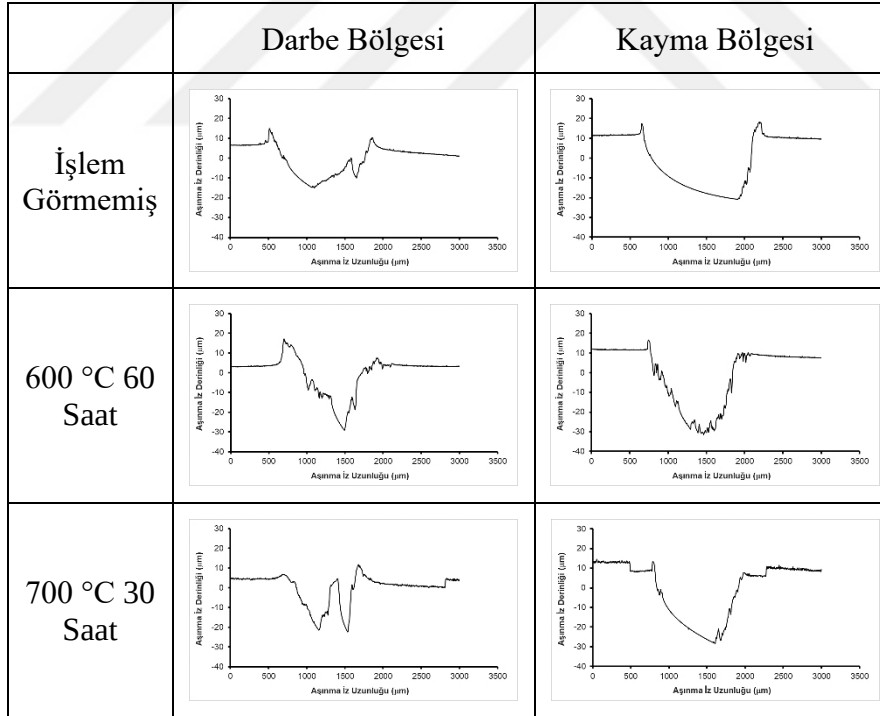


Şekil 7.28. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 550 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası Aşınma Hızlarının Karşılaştırması

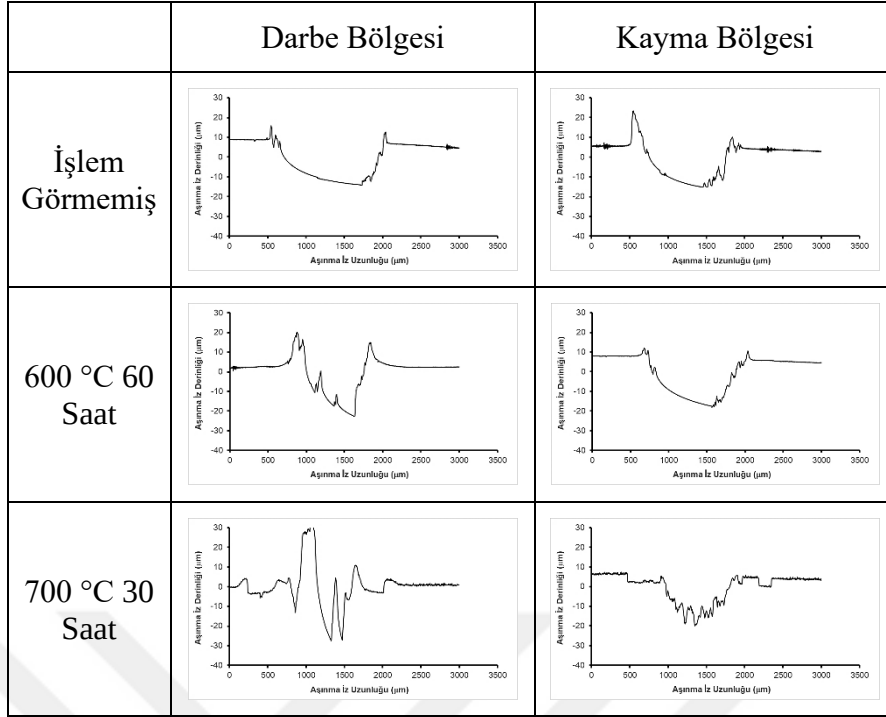
İşlem görmemiş, 600 °C’ de 60 saat ve 700 °C’ de 30 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının Şekil 7.29’ da 25 °C’ de, Şekil 7.30’ da 350 °C’ de ve Şekil 7.31’ de 550 °C’ de darbeli kayma aşınma izlerinin 2D profil görüntüleri verilmektedir. İşlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımının 25 °C, 350 °C’ de ve 550 °C’ de yapılan darbeli kayma deneyleri sonrası darbe ve kayma bölgelerinin iz genişlikleri ve iz derinlikleri incelendiğinde TO yapılmış örneklerden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımında her üç darbeli kayma deney sıcaklığında da kayma dudaklarının oluştuğu görülmektedir. Bu durum işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımında plastik deformasyonun olduğunu göstermektedir. Alpas ve Lou (2019) TO işlemi uyguladığı Ti-6Al-4V alaşımına oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta yaptığı darbe deney sonuçlarının çalışmamıza benzer şekilde TO işleminin tüm sıcaklıklarda aşınmada iyileşme sağlandığını rapor etmişlerdir.



Şekil 7.29. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 25 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası 2D Profil Görüntüleri

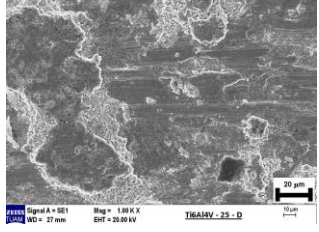
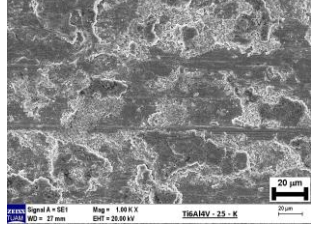
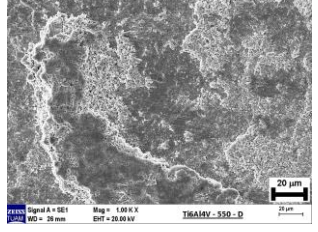
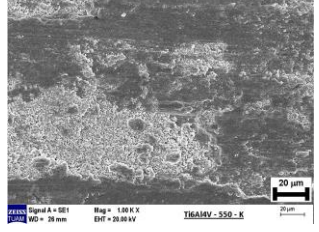
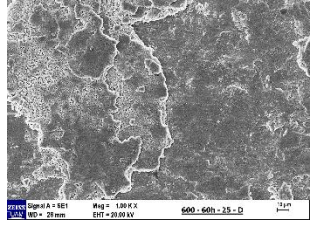
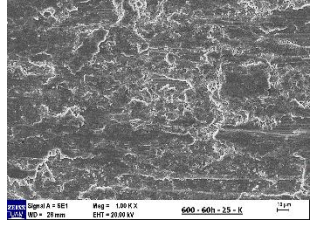
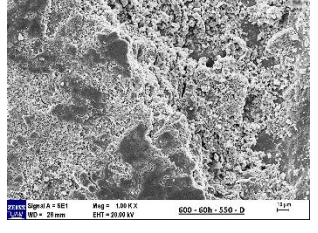
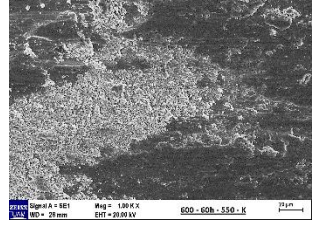
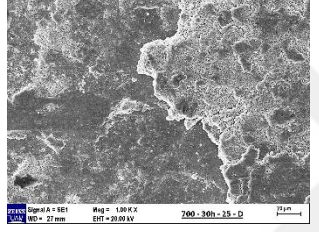
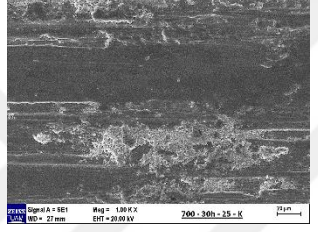
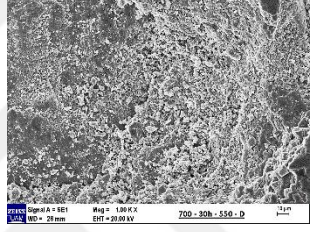
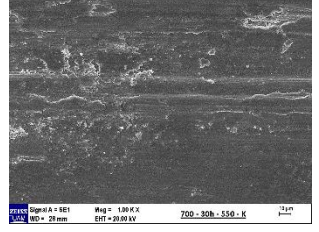


Şekil 7.30. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 350 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası 2D Profil Görüntüleri



Şekil 7.31. İşlem Görmemiş ve 600 °C’ de 60 Saat, 700 °C’ de 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının 550 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Sonrası 2D Profil Görüntüleri

Darbeli kayma aşınma deneyi sonrasında oluşan aşınma izlerine ait FE-SEM (Şekil 7.28) ve OM (Ek Tablo 37-38-39) görüntüleri verilmiştir. Her üç darbeli kayma deney sıcaklığında da işlem görmemiş Ti-6Al-4V alaşımının, darbe ve kayma bölgelerinin sınırlarında tümseklerin varlığı ile karakterize edilen plastik deformasyon Şekil 7. 29, Şekil 7. 30 ve Şekil 7.31’ de görülmektedir. Darbe yüküne maruz kalan yumuşak matris yüzeyinde sert yüzey tabakasının kırılıp ayrılması beklenir. Ancak, yüzeyde rutil yapıya sahip TiO₂ katmanının kopmadığı tespit edilmiştir. Kayma bölgesi incelendiğinde, 25 °C ve 550 °C’de yapılan deneylerde kayma yönüne paralel olukların oluştuğu görülmektedir (Şekil 7.32 ve Ek Tablo 37-38-39). 350 ve 550 °C’ de gerçekleştirilen deneylerden elde edilen OM karşı malzeme görüntüleri incelendiğinde hem işlem görmemiş hem de TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının karşı malzeme iz büyüklüklerinin 25 °C’ de elde edilen iz görüntüsüne göre azaldığı görülmektedir (Ek Tablo 40). Ayrıca OM aşınma iz görüntülerinin FE-SEM görüntüleri ile uyumlu olduğu tespiti yapılmıştır.

	Darbe Bölgesi	Kayma Bölgesi	Darbe Bölgesi	Kayma Bölgesi
İşlem Görmemiş				
600 °C 60 Saat TO				
700 °C 30 Saat TO				
	(a)		(b)	

Şekil 7.32. İşlem Görmemiş ve 600 °C 60 Saat, 700 °C 30 Saat TO Yapılmış Ti-6Al-4V Alaşımının (a) 25 °C, (b) 550 °C’ de Gerçekleştirilen Darbeli Kayma Deneyleri Sonrası Darbe ve Kayma Bölgelerinin FE-SEM Aşınma İz Görüntüleri

8. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında işlem görmemiş, kutu sementasyon ile alüminyumlama, TO ve sıcak daldırma alüminyumlama ile ardından difüzyon tavlaması yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının yapısal karakterizasyonu yapılarak kuru kayma aşınma davranışı farklı hız ve yüklerde incelenmiştir. Ayrıca TO yapılmış numunelere darbeli kayma aşınma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- 1) Farklı sıcaklıklarda kutu sementasyon ile alüminyumlama yapılan örneklerin alüminid tabaka kalınlıkları; 600 °C' de 25,9 µm, 700 °C' de 65,1 µm ve 800 °C' de 70,2 µm olarak tespit edilmiştir. EDS analizi ile yüzeyde oluşan alüminid tabakası Al açısından zengin olduğu belirlenmiştir. XRD analizi ile yapının TiAl₂ fazından meydana geldiği, Al açısından zengin alüminid tabakasının mikrosertliği 600 °C' de 563 HV_{0,025}, 700 °C' de 612 HV_{0,025} ve 800 °C' de 616 HV_{0,025} olarak ölçülmüştür. Kuru kayma koşullarında yapılan aşınma testi sonucunda; 600, 700 ve 800 °C' de sırasıyla %78, %68 ve %90 aşınma hacmi değerinde azalma, aşınma hızı değerinde ise benzer şekilde sırasıyla %64, %40 ve %91 değerlerinde azalmalar tespit edilmiştir. Bu sonuçlar alüminyumlama işleminin Ti-6Al-4V alaşımının aşınma direncini ciddi şekilde artırdığını göstermiştir.
- 2) Farklı sıcaklıklarda TO yapılan örneklerin kesit incelemelerinde 600 °C' de çok ince bir oksit tabakası, 700 °C' de yaklaşık 6 µm kalınlığında oksit tabakası ve 800 °C' de yaklaşık 4 µm kalınlığında oksit tabakasına sahip olduğu OM ve FE-SEM görüntülerinden belirlenmiştir. TO sonrası oluşan oksit tabakasında rutil fazın baskın olduğu tespit edilmiştir. 600 °C' de 60 saatlik TO sonrası, yüzey sertliği 450 HV_{0,025}, 700 °C' de 30 saat TO sonrasında sertlik 700 HV_{0,025} ve 800 °C' de 5 saat TO uygulanan titanyum alaşımında 565 HV_{0,025} ölçülüp, taban malzemeye doğru kademeli olarak azalmıştır. İleri-geri kuru kayma koşullarında yapılan aşınma deney sonuçlarında 600 °C, 700 °C ve 800 °C' de sırasıyla %96, %87 ve %78 oranlarında aşınma hacimlerinde azalma; aşınma hızı değerlerinde sırasıyla %96, %87 ve %76 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Bu sonuçlar TO işleminin aşınma direncini artıran bir yöntem olduğunu doğrulamıştır.
- 3) Darbeli kayma deneyleri sonucunda 600°C' de 60 Saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının 25 °C' de aşınma hızını toplamda %20, 350 °C' de %30 ve 550 °C' de %4 oranında azalttığı; 700 °C' de 30 Saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının 25 °C' de

aşınma hızını toplamda %54, 350 °C' de %34 ve 550 °C' de %37 oranında azalttığı belirlenmiştir.

- 4) Sıcak daldırma alüminyumlama ve ardından difüzyon tavlama sonucu oluşan kompozit tabaka kalınlığı yaklaşık 158 µm olarak belirlenmiştir. Oluşan kaplama yapısının homojen olduğu tespit edilmiştir. Mikrosertlik testi sonucunda örneğin mikrosertlik değeri 461 HV_{0,025} olarak ölçülmüştür. Aşınma deneylerinde hız arttıkça artan aşınma hacmi, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı değerlerinin aşınma iz görüntüleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



KAYNAKÇA

- Aniolek, K., Kupka, M., & Barylski, A.** (2016). Sliding wear resistance of oxide layers formed on a titanium surface during thermal oxidation. *Wear*, 356, 23-29.
- Attabi, S., Mokhtari, M., Taibi, Y., Abdel-Rahman, I., Hafez, B., & Elmsellem, H.** (2019). Electrochemical and tribological behavior of surface-treated titanium alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 5, 1-11.
- Awan, S.** (2022). Development of Oxidation Resistive Coating for High Temperature Applications. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- Bahari, A.** (2017). *Investigation into tribological performance of vegetable oils as biolubricants at severe contact conditions.* (Doktora tezi), University of Sheffield, Sheffield.
- Bel, T., Ulku, G., Kizilcan, N., Cimenoglu, H., Yahya, N., & Baydogan, N.** (2016, November). Production of microencapsulate glycidyl methacrylate with melamine formaldehyde resin shell materials. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1787, No. 1). AIP Publishing.
- Boucheham, A., Karaali, A., Rahal, B., & Belkacem, Y.** (2017). Characterization of thermally oxidized Ti6Al4V alloys for dental application.
- Cao, L., Wan, Y., Yang, S., & Pu, J.** (2018). The tribocorrosion and corrosion properties of thermally oxidized Ti6Al4V alloy in 0.9 wt.% NaCl physiological saline. *Coatings*, 8(8), 285.
- Carrera Espinoza, R., Alvarez Vera, M., Wettlaufer, M., Kerl, M., Barth, S., Moreno Garibaldi, P., ... & Ortega, J. A.** (2024). Study on the Tribological Properties of DIN 16MnCr5 Steel after Duplex Gas-Nitriding and Pack Boriding. *Materials*, 17(13), 3057.
- Cassar, G., Wilson, J. A. B., Banfield, S., Housden, J., Matthews, A., & Leyland, A.** (2010). A study of the reciprocating-sliding wear performance of plasma surface treated titanium alloy. *Wear*, 269(1-2), 60-70.
- Dere, H.** (2021). *Karbon türevi dolgulu ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (PE) kompozit ve hibrit kompozit kaplamaların sürtünme ve aşınma davranışları.* (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- Dong, J., Sun, Y., & He, F.** (2019). Formation mechanism of multilayer aluminide coating on 316L stainless steel by low-temperature pack cementation. *Surface and Coatings Technology*, 375, 833-838.

Du, H., Tan, N., Fan, L., Zhuang, J., Qiu, Z., & Lei, Y. (2019). Formation mechanism of aluminide diffusion coatings on Ti and Ti-6Al-4V alloy at the early stages of deposition by pack cementation. *Materials*, 12(19), 3097.

Er, Ş. (2023). *Metalik malzemelerin sürtünme ve aşınma özelliklerinin makine öğrenmesi yöntemleri ile tahmin edilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Fuentes, E., Alves, S., López-Ortega, A., Mendizabal, L., & de Viteri, V. S. (2019). Advanced surface treatments on titanium and titanium alloys focused on electrochemical and physical technologies for biomedical applications. *Biomaterial-supported tissue reconstruction or regeneration*.

García-León, R. A., Martínez-Trinidad, J., Zepeda-Bautista, R., García-Navarro, S., & Moreno-Pacheco, L. (2024). Statistical significance of the sliding wear test parameters under lubricated conditions on borided AISI 316 L-SS samples. *Tribology International*, 192, 109248.

García-Rueda, A. K., Guzmán-Castillo, D., García-González, L., Zamora-Peredo, L., & Hernández-Torres, J. (2022). Surface modification of a Ti6Al4V alloy by thermal oxidation to improve its tribological properties. *Materials Letters*, 317, 132082.

Gopal, L., & Sudarshan, T. (2024). High-temperature coatings for titanium alloys. *Surface Engineering*, 02670844241244551.

Güteryüz, H., Atar, E., Seahjani, F., & Çimenoglu, H. (2015). An overview on surface hardening of titanium alloys by diffusion of interstitial atoms. *Diffusion Foundations*, 4, 103-116.

Hazwani, M. R. S. N., Lim, L. X., Lockman, Z., & Zuhailawati, H. (2022). Fabrication of titanium-based alloys with bioactive surface oxide layer as biomedical implants: Opportunity and challenges. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(1), 1-44.

He, H., Zhao, K., Gou, W., Qiao, P., & Yuan, E. (2021). Growth characterisation of TiAl₃ during initial period of hot dip aluminising on Ti6Al4V. *Transactions of the IMF*, 99(3), 146-152.

Hwang, C., Park, J., Oh, J., Han, D., Lee, S., Shin, K., ... & Park, J. S. (2023). Thermal Stability and Degradation Properties of Aluminide Coated and Uncoated Ti-6Al-4V Alloys Exposed to High Temperature Flame. *Metals and Materials International*, 29(7), 1855-1862.

Ibrahim, M. K., Kaba, M., Muhaffel, F., Ağaoğulları, D., & Cimenoglu, H. (2022). Thermal oxidation of a porous Ti23Nb alloy for wear related biomedical applications: Effect of oxidation duration. *Surface and Coatings Technology*, 439, 128429.

İpekçi, M. (2012). *Production and characterization of titanium nitride on cp titanium.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Jiang, W., Zhang, B., Chen, W., Wang, S., & Cui, X. (2018). Dry Sliding Wear Behavior of Hot-Dip Aluminized Ti-6Al-4V Alloy as a Function of Sliding Velocity. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 5450-5459.

Kaur, M., & Singh, K. (2019). Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopaedic applications. *Materials Science and Engineering: C*, 102, 844-862.

Kavukcu, A. (2021). *Sıcak daldırma alüminyum kaplama ve difüzyon tavlama uygulanmış inconel 718 süperalaşımının oksidasyon ve yüksek sıcaklık aşınma davranışının incelenmesi.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

Kovaříková, I., Szewczykova, B., Blaškoviš, P., Hodulova, E., & Lechovič, E. (2009). Study and characteristic of abrasive wear mechanisms. *Materials Science and Technology*, 1, 1-8.

Kumar, A., Kushwaha, M. K., Israr, M., & Kumar, R. (2020). Evaluation of mechanical properties of titanium alloy after thermal oxidation process. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(5), 1373-1381.

Lai, F., Cao, C., Shi, C., Sun, G., Qu, R., Mo, D., ... & Xue, X. (2024). Improvement of wear resistance for engine valve: introducing cold upsetting treatment on valve seating face. *Wear*, 205693.

Lin, N., Liu, Q., Zou, J., Li, D., Yuan, S., Wang, Z., & Tang, B. (2017). Surface damage mitigation of Ti6Al4V alloy via thermal oxidation for oil and gas exploitation application: characterization of the microstructure and evaluation of the surface performance. *RSC advances*, 7(22), 13517-13535.

Lin, N., Zhao, L., Liu, Q., Zou, J., Xie, R., Yuan, S., ... & Tang, B. (2019). Preparation of titanizing coating on AISI 316 stainless steel by pack cementation to mitigate surface damage: Estimations of corrosion resistance and tribological behavior. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 129, 387-400.

- Lin, N., Zhou, P., Wang, Y., Zou, J., Ma, Y., Wang, Z., ... & Tang, B.** (2015). Thermal Oxidation Of Ti-6Al-4V Alloy With Enhanced Wear And Corrosion Resistance For Oil And Gas Application: Effect Of Temperature. *Surface Review and Letters*, 22(03), 1550033.
- Lin, N., Zhou, P., Wang, Y., Zou, J., Ma, Y., Wang, Z., ... & Tang, B.** (2015). Thermal oxidation of ti6al4v alloy with enhanced wear and corrosion resistance for oil and gas application: effect of temperature. *Surface Review and Letters*, 22(03), 1550033.
- Lou, M., & Alpas, A. T.** (2019). High temperature wear mechanisms in thermally oxidized titanium alloys for engine valve applications. *Wear*, 426, 443-453.
- Lu, Y., Qu, D., Duan, Y., & Peng, M.** (2022). Microstructure and high-temperature oxidation behaviors of surface layer on TA2 pure titanium by boriding and aluminizing two-steps method. *Ceramics International*, 48(4), 5646-5654.
- Oldani, C., & Dominguez, A.** (2012). Titanium as a Biomaterial for Implants. *Recent advances in arthroplasty*, 218, 149-162.
- Ossowska, A., Olive, J. M., Zieliński, A., & Wojtowicz, A.** (2021). Effect of double thermal and electrochemical oxidation on titanium alloys for medical applications. *Applied Surface Science*, 563, 150340.
- Öztürk, E. A.** (2024). *Nitrürleme ve termo-hidrojenleme işleminin işlenmiş ti-6al-4v alaşımlarının yorulma davranışı üzerindeki etkisi.* (Yüksek Lisans Tezi). Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Patel, P., Jamnapara, N. I., Zala, A., & Kahar, S. D.** (2020). Investigation of hot-dip aluminized Ti6Al4V alloy processed by different thermal treatments in an oxidizing atmosphere. *Surface and Coatings Technology*, 385, 125323.
- Pimenov, D. Y., Mia, M., Gupta, M. K., Machado, A. R., Tomaz, Í. V., Sarikaya, M., ... & Kaplonek, W.** (2021). Improvement of machinability of Ti and its alloys using cooling-lubrication techniques: A review and future prospect. *Journal of materials research and technology*, 11, 719-753.
- Pitchi, C. S., Priyadarshini, A., & Narala, S. K. R.** (2022). Influence of cooling kinetics on surface texture, hydrophilicity and scratch resistance of the oxide layers produced by thermal oxidation on Ti-6Al-4V. *Surface and Coatings Technology*, 450, 128956.

- Pitchi, C. S., Priyadarshini, A., Sana, G., & Narala, S. K. R.** (2020). A review on alloy composition and synthesis of β -Titanium alloys for biomedical applications. *Materials today: proceedings*, 26, 3297-3304.
- Prasad, S., Ehrensberger, M., Gibson, M. P., Kim, H., & Monaco Jr, E. A.** (2015). Biomaterial properties of titanium in dentistry. *Journal of oral biosciences*, 57(4), 192-199.
- Prayitno, D., & Abdunnaafi, A. A.** (2021). Effect of hot dipping aluminizing on the toughness of low carbon steel. *Sinergi*, 25(1), 75-80.
- Pushp, P., Dasharath, S. M., & Arati, C.** (2022). Classification and applications of titanium and its alloys. *Materials Today: Proceedings*, 54, 537-542.
- Serrano Martin, I.** (2020). Study of the wear behavior of SS316L+ WC composites: role of the counter material.
- Soleimani, H., & Moavenian, M.** (2017). Tribological aspects of wheel–rail contact: a review of wear mechanisms and effective factors on rolling contact fatigue. *Urban Rail Transit*, 3(4), 227-237.
- Sun, Y., Bailey, R., Zhang, J., Lian, Y., & Ji, X.** (2023). Effect of thermal oxidation on the dry sliding friction and wear behaviour of CP-Ti on CP-Ti tribopairs. *Surface Science and Technology*, 1(1), 15.
- Tabur, M., & İzçiler, M.** (2019). Hardox 500 ve Hardox 600 Çeliklerinin Abrasiv Aşınma Davranışlarının Karşılaştırılması. ISAS.
- Unune, D. R., Brown, G. R., & Reilly, G. C.** (2022). Thermal based surface modification techniques for enhancing the corrosion and wear resistance of metallic implants: A review. *Vacuum*, 203, 111298.
- Wang, P. Y., Li, H. J., Qi, L. H., Zeng, X. H., & Zuo, H. S.** (2011a). Synthesis of Al-TiAl₃ compound by reactive deposition of molten Al droplets and Ti powders. *Progress in Natural Science: Materials International*, 21(2), 153-158.
- Wang, Y., Xiong, J., Yan, J., Fan, H., & Wang, J.** (2011b). Oxidation resistance and corrosion behavior of hot-dip aluminized coatings on commercial-purity titanium. *Surface and coatings technology*, 206(6), 1277-1282.

- Wang, S., Liao, Z., Liu, Y., & Liu, W. (2014).** Influence of thermal oxidation temperature on the microstructural and tribological behavior of Ti6Al4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 240, 470-477.
- Wang, S., Liao, Z., Liu, Y., & Liu, W. (2015).** Influence of thermal oxidation duration on the microstructure and fretting wear behavior of Ti6Al4V alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 159, 139-151.
- Wu, L. K., Wu, J. J., Wu, W. Y., Hou, G. Y., Cao, H. Z., Tang, Y. P., ... & Zheng, G. Q. (2019).** High temperature oxidation resistance of γ -TiAl alloy with pack aluminizing and electrodeposited SiO₂ composite coating. *Corrosion science*, 146, 18-27.
- Yadav, P., & Saxena, K. K. (2020).** Effect of heat-treatment on microstructure and mechanical properties of Ti alloys: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2546-2557.
- Yang, W., & Li, F. (2023).** Study on the Effect of Carburizing on the Microstructure and High-Temperature Oxidation Properties of Hot-Dip Aluminum Coating on Titanium Alloy. *Coatings*, 13(8), 1336.
- Yang, W., Park, J., Choi, K., Chung, C. H., Lee, J., Zhu, J., ... & Park, J. S. (2021).** Evaluation of growth kinetics of aluminide coating layers on Ti-6Al-4V alloys by pack cementation and the oxidation behaviours of the coated Ti-6Al-4V alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 101, 105642.
- Yener, T. (2019).** Low temperature aluminising of Fe-Cr-Ni super alloy by pack cementation. *Vacuum*, 162, 114-120.
- Yener, T., Yılmaz, F., & Efe, G. C. (2023).** Low Temperature Pack Aluminising Process Effect on Ti6Al4V Alloy: Formation, Characterization and Oxidation Performances. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(7), 1731-1740.
- Yılmaz, F., Efe, G. Ç., & Yener, T. (2022).** Kutu Sementasyonu Yöntemi ile Ti6Al4V Alaşımı Üzerine Aluminid Esaslı Kaplama Üretimi. *Journal of Smart Systems Research*, 3(2), 49-60.
- Yu, L., Xiao, C., Jiang, W., Li, W., Ni, S., & Song, M. (2024).** Effects of aluminizing on the microstructure and wear resistance of AISI 321 steel. *Surface and Coatings Technology*, 483, 130753.
- Yürektürk, Y. (2022).** Sıcak daldırma alüminyumlama (SDA) ve difüzyon tavlama ile yüzeyi modifiye edilmiş Ti-6Al-4V alaşımının karakterizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1), 309-318.

Zhang, L. C., Chen, L. Y., & Wang, L. (2020). Surface modification of titanium and titanium alloys: technologies, developments, and future interests. *Advanced Engineering Materials*, 22(5), 1901258.

Zhang, W., Li, W., Zhai, H., Wu, Y., Wang, S., Liang, G., & Wood, R. J. (2020). Microstructure and tribological properties of laser in-situ synthesized Ti₃Al composite coating on Ti-6Al-4V. *Surface and Coatings Technology*, 395, 125944.

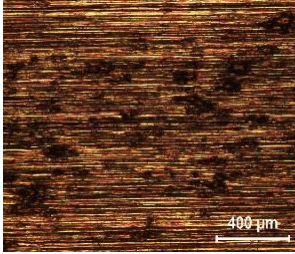
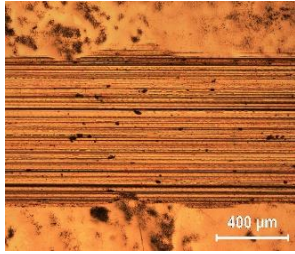
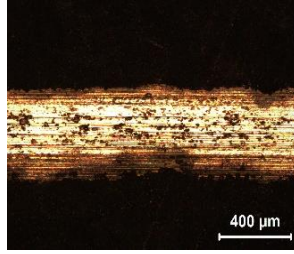
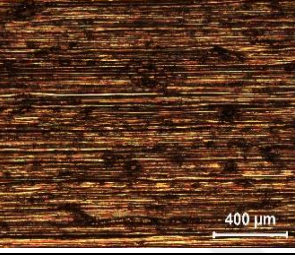
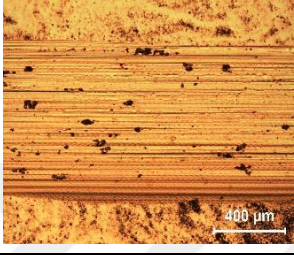
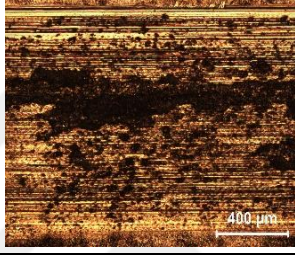
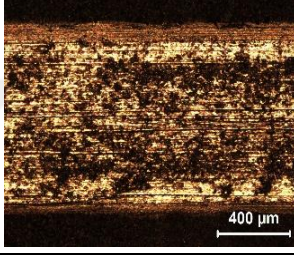
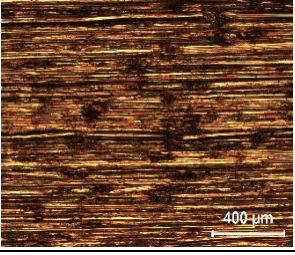
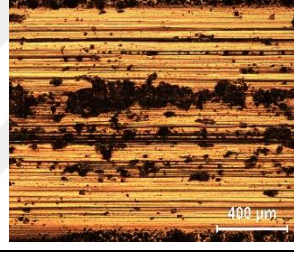
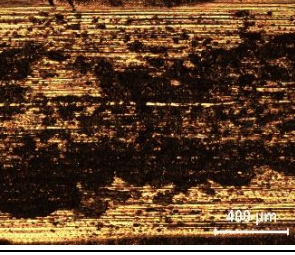
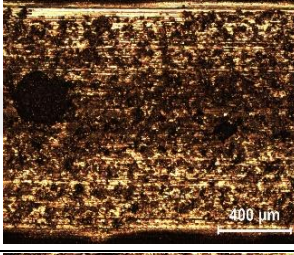
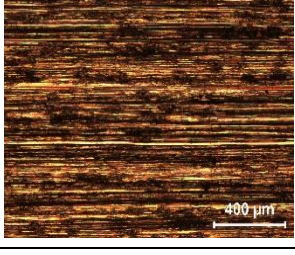
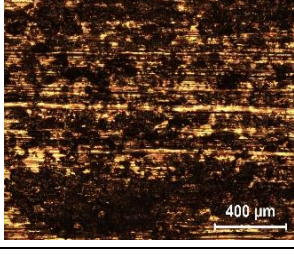
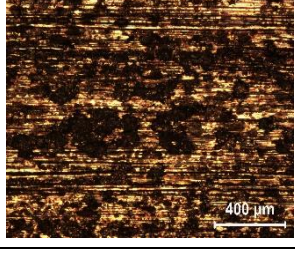
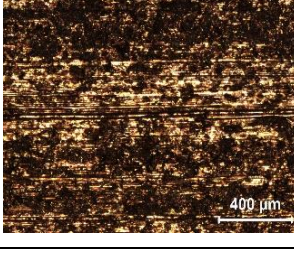
Zhang, Z. G., Peng, Y. P., Mao, Y. L., Pang, C. J., & Lu, L. Y. (2012). Effect of hot-dip aluminizing on the oxidation resistance of Ti-6Al-4V alloy at high temperatures. *Corrosion science*, 55, 187-193.

Zhao, J., Shangguan, J., Gao, L., Gu, C., Wang, Y., & Shi, Y. (2022). New insights into microstructure characteristics and tribological property of Ti alloy processed by hot-dip aluminizing and heat treatment. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 53(3), 1035-1050.

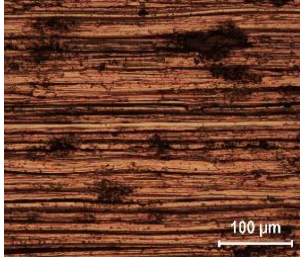
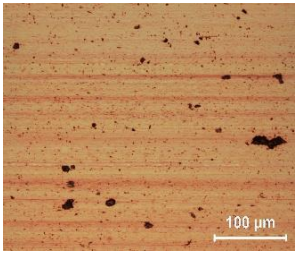
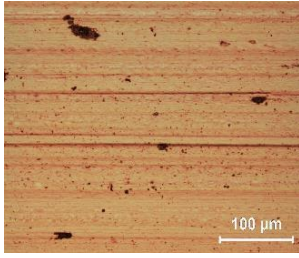
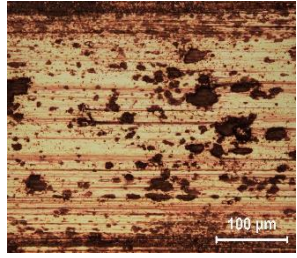
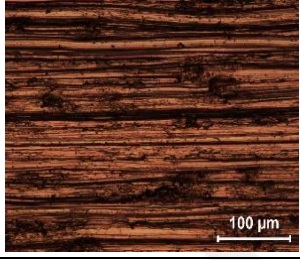
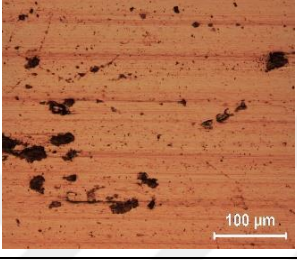
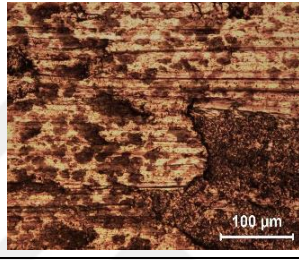
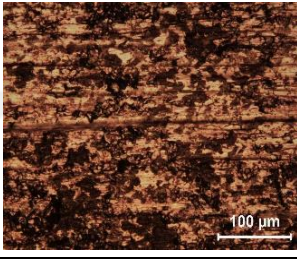
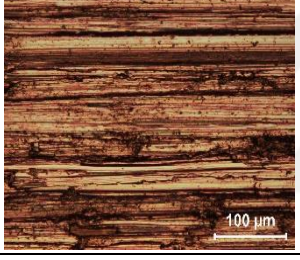
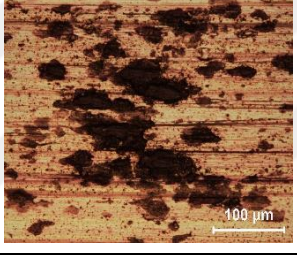
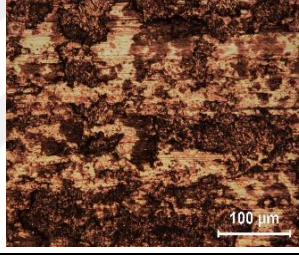
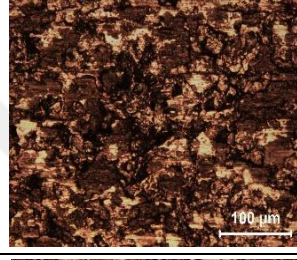
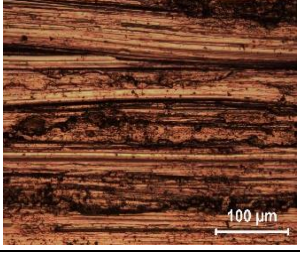
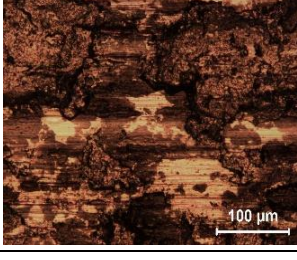
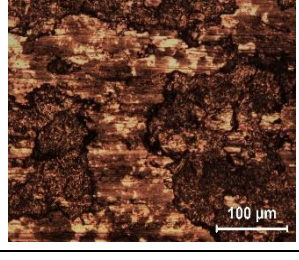
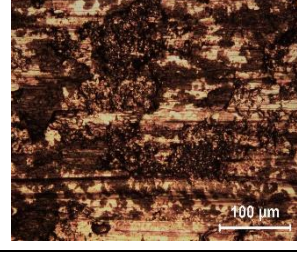


EKLER

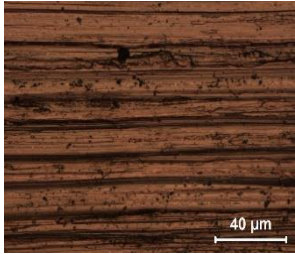
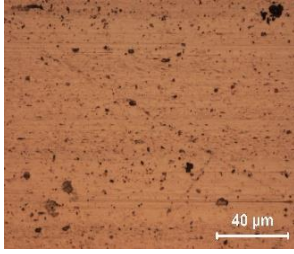
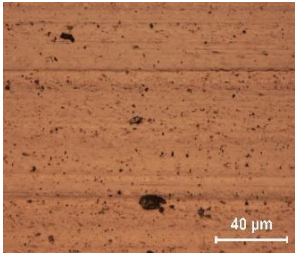
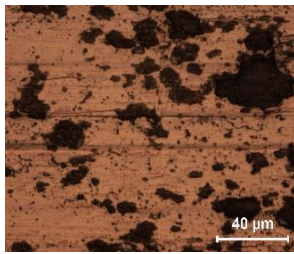
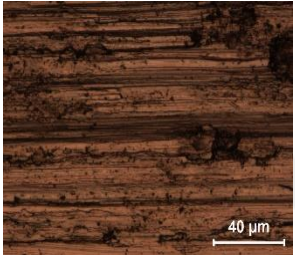
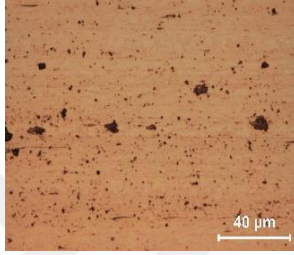
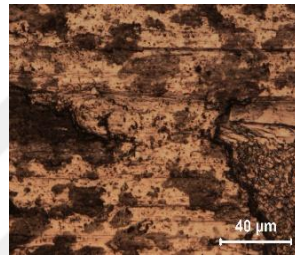
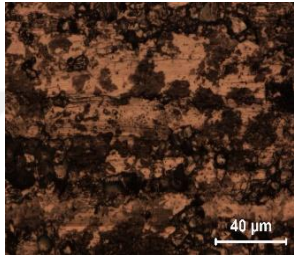
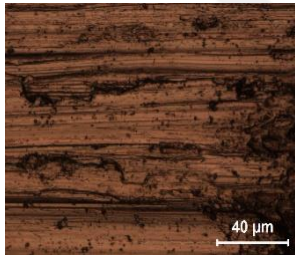
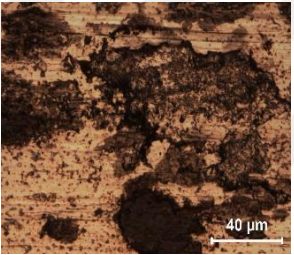
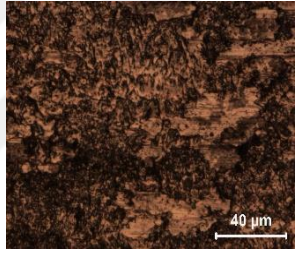
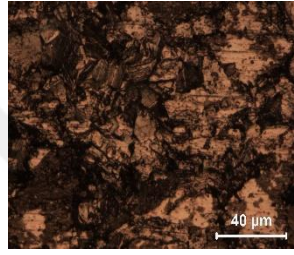
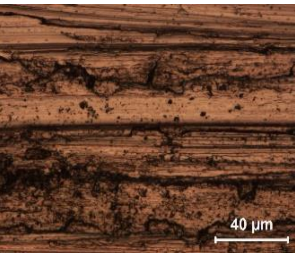
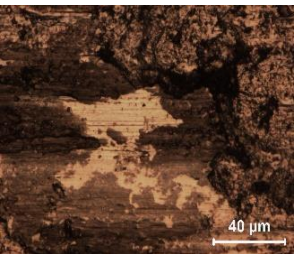
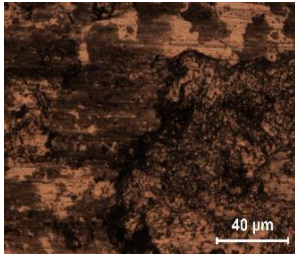
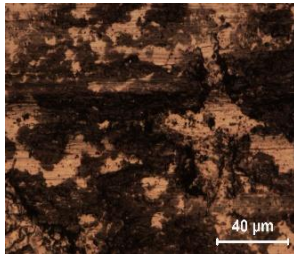
Ek Tablo 1. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 10 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

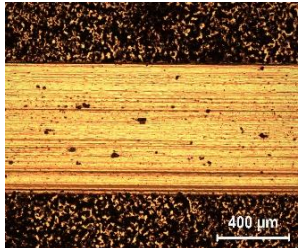
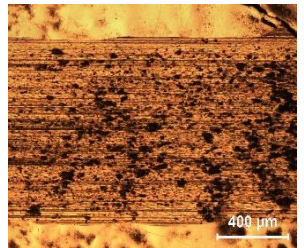
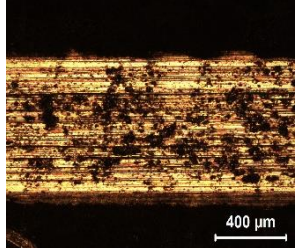
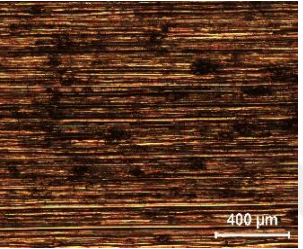
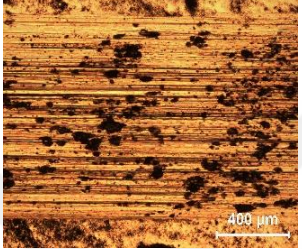
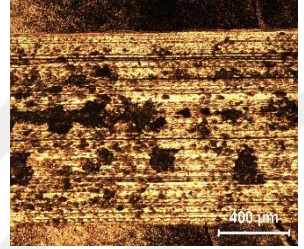
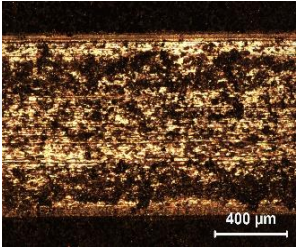
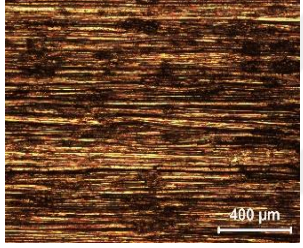
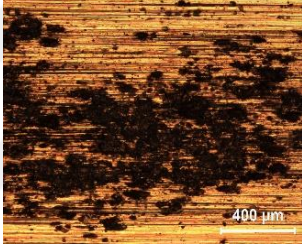
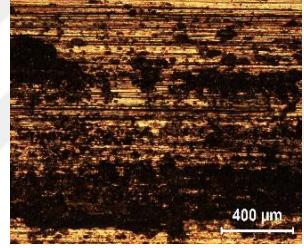
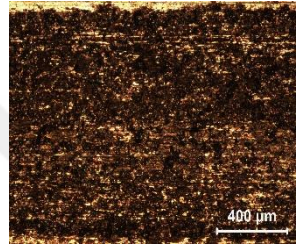
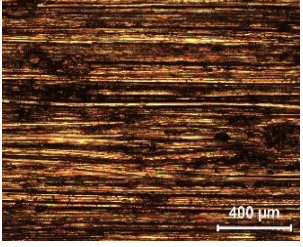
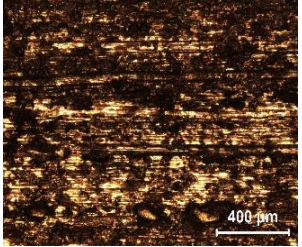
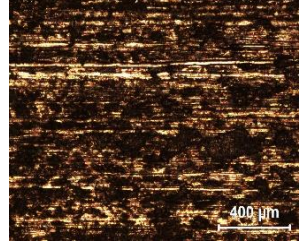
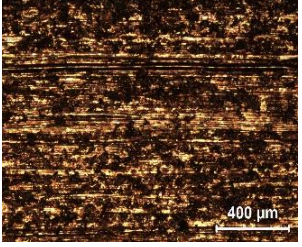
Ek Tablo 2. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 10 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x200)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

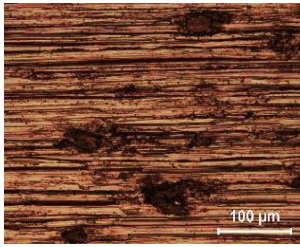
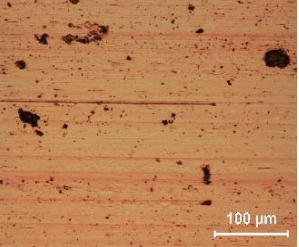
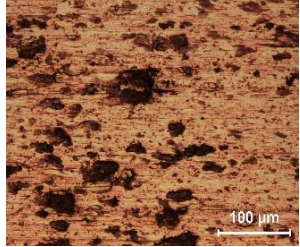
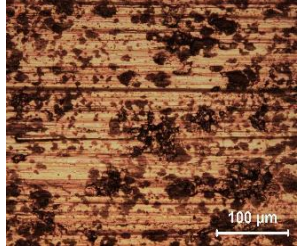
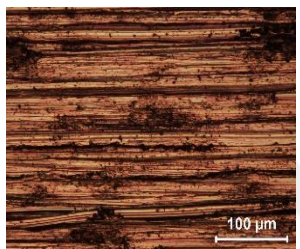
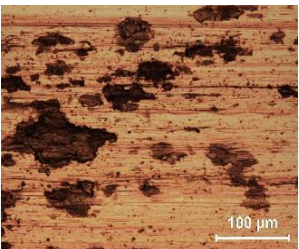
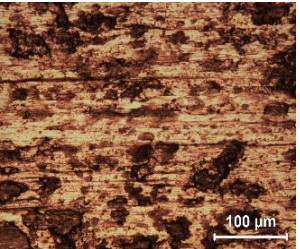
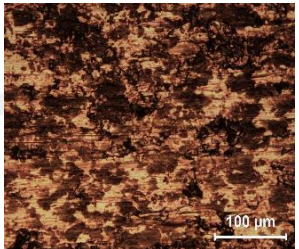
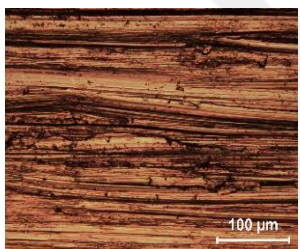
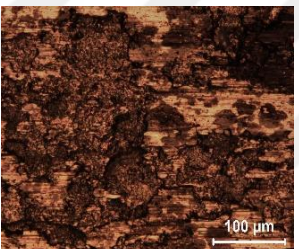
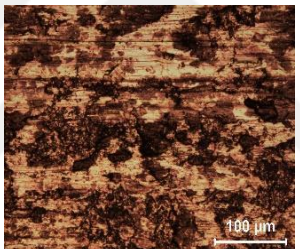
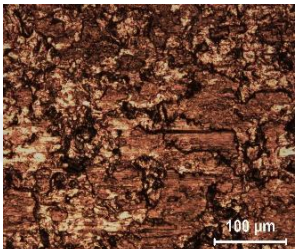
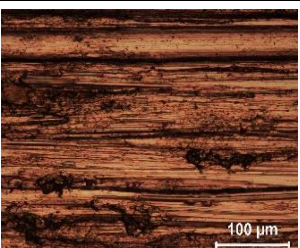
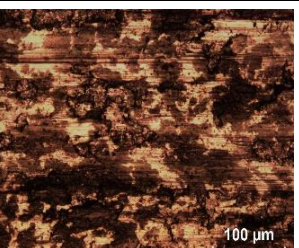
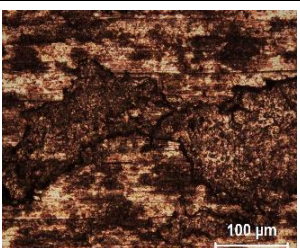
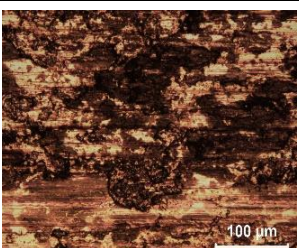
Ek Tablo 3. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 10 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x500)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

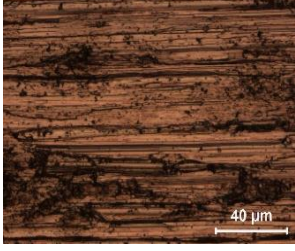
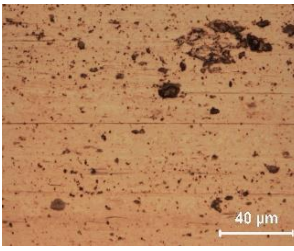
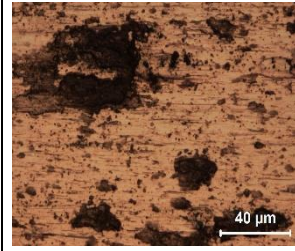
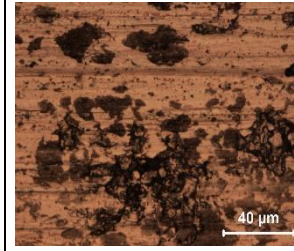
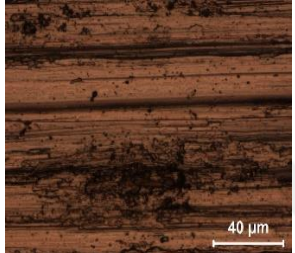
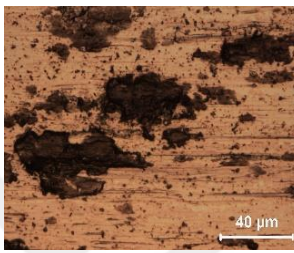
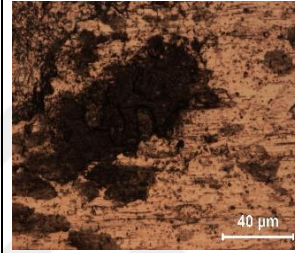
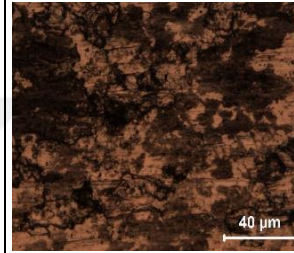
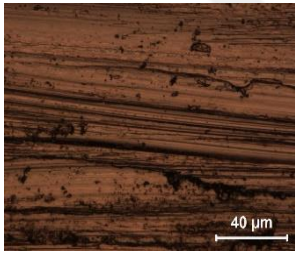
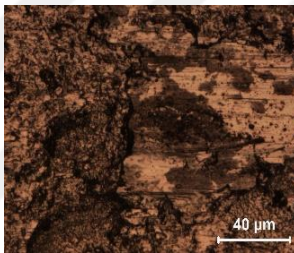
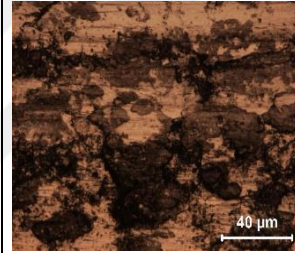
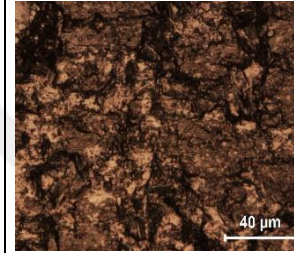
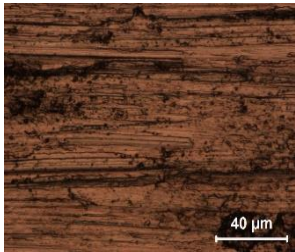
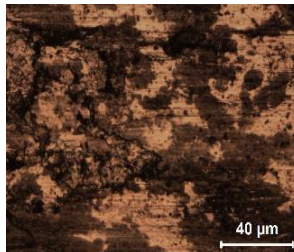
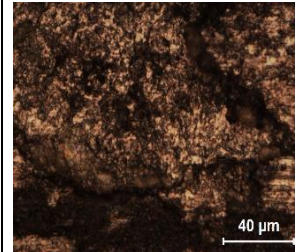
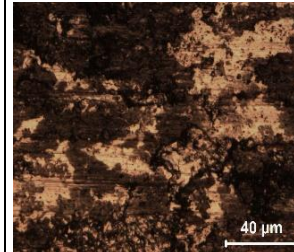
Ek Tablo 4. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 20 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

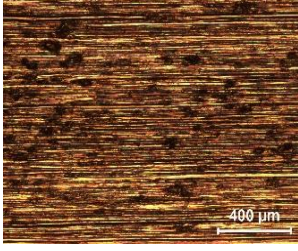
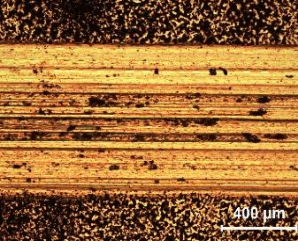
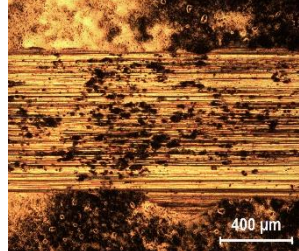
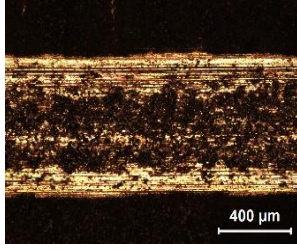
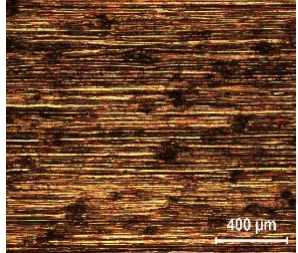
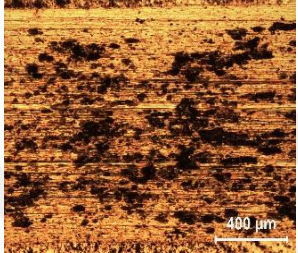
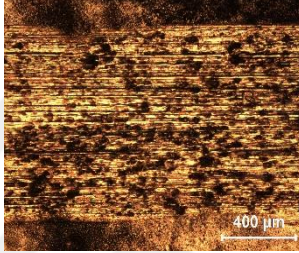
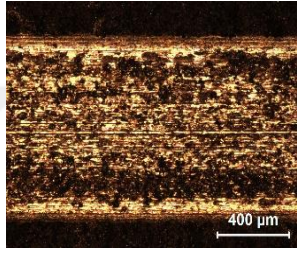
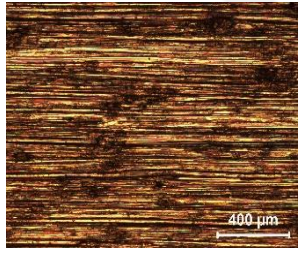
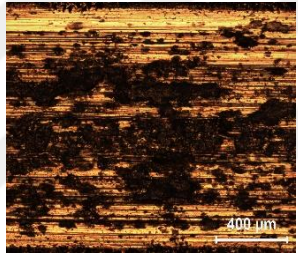
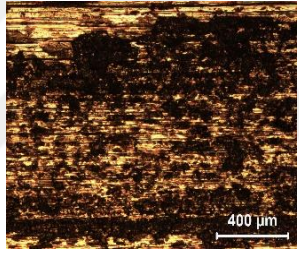
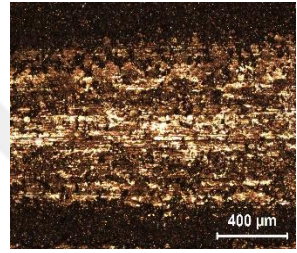
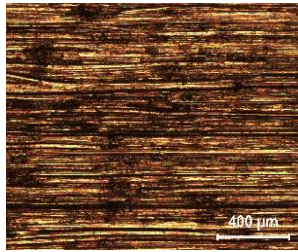
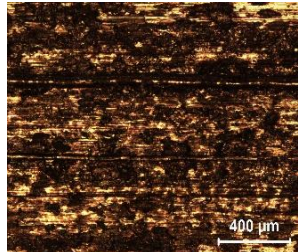
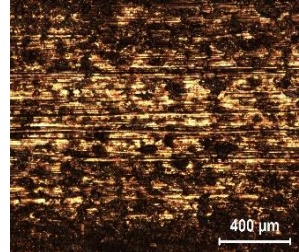
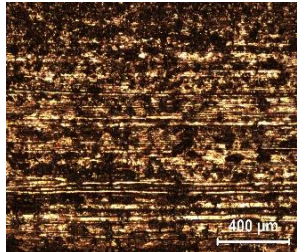
Ek Tablo 5. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 20 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x200)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

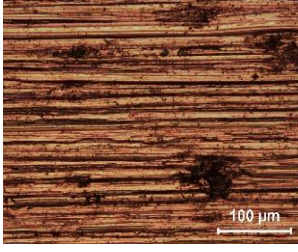
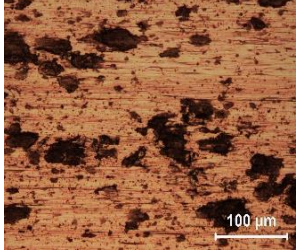
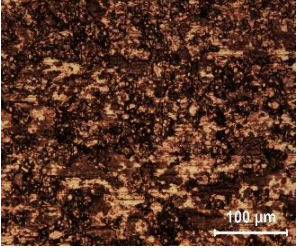
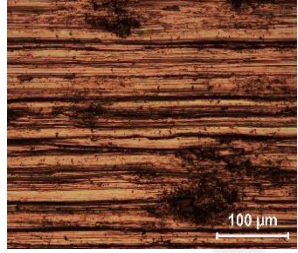
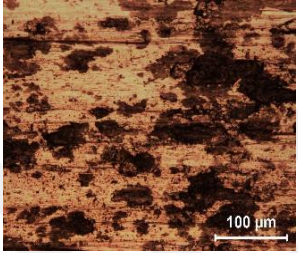
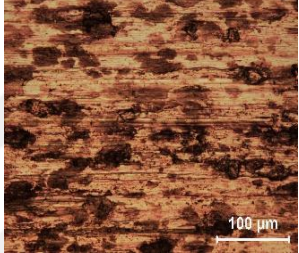
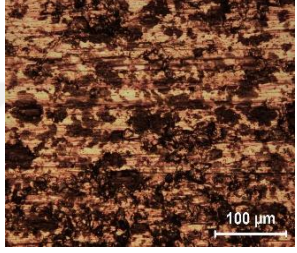
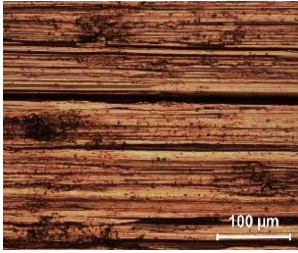
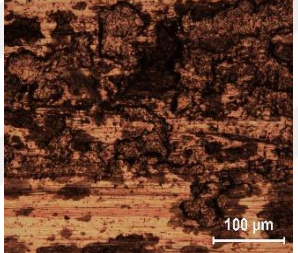
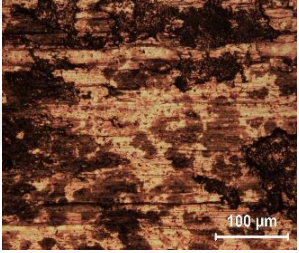
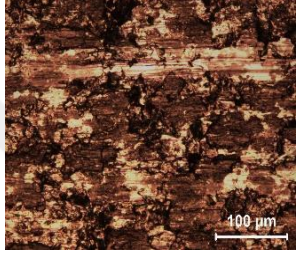
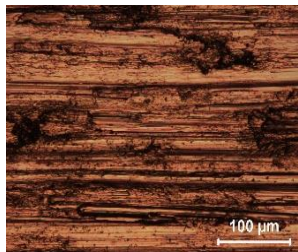
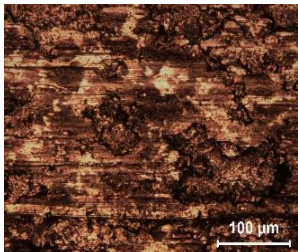
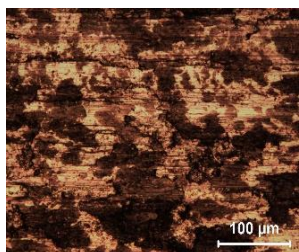
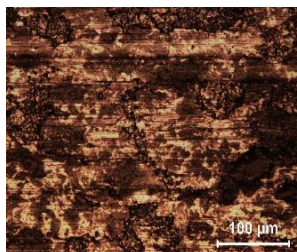
Ek Tablo 6. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 20 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x500)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

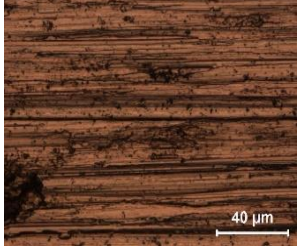
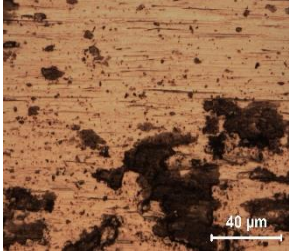
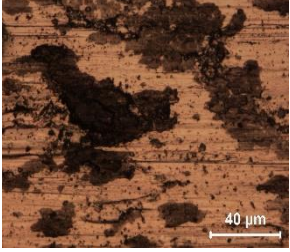
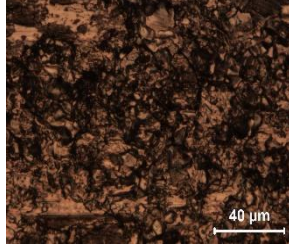
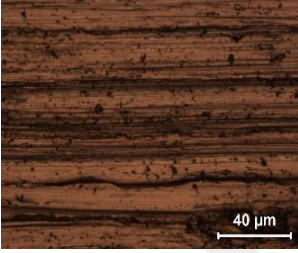
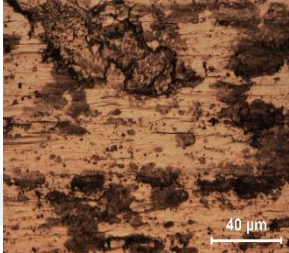
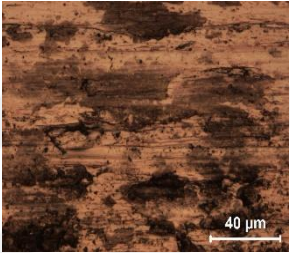
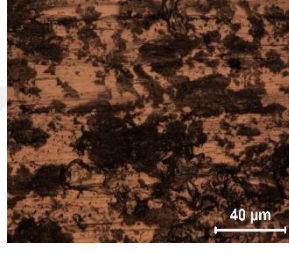
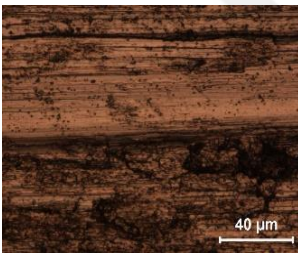
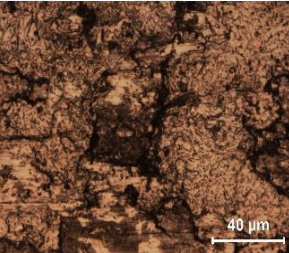
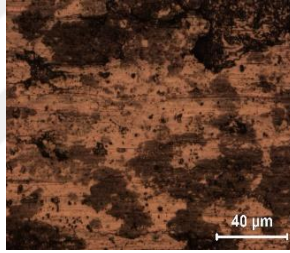
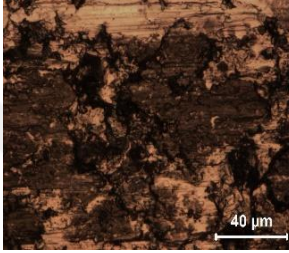
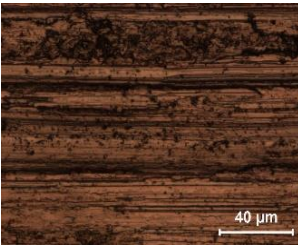
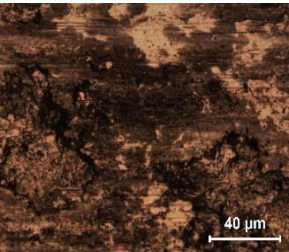
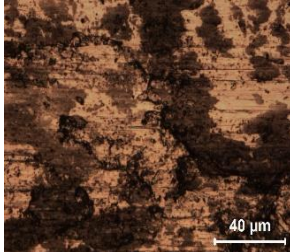
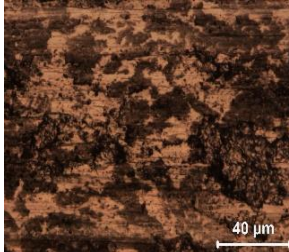
Ek Tablo 7. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 30 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

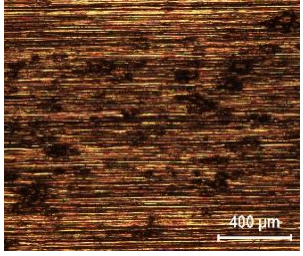
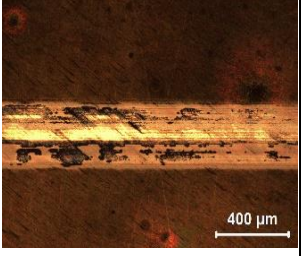
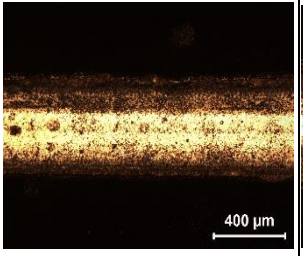
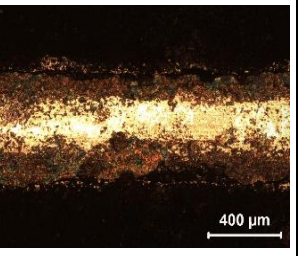
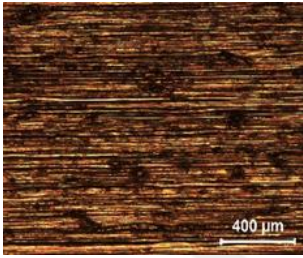
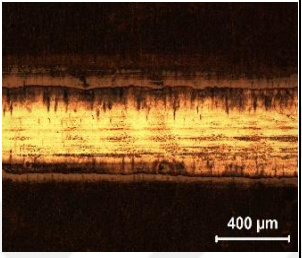
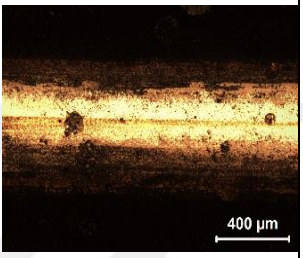
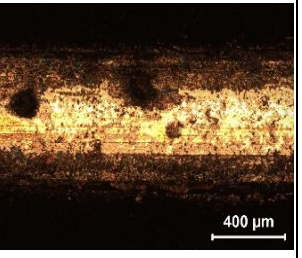
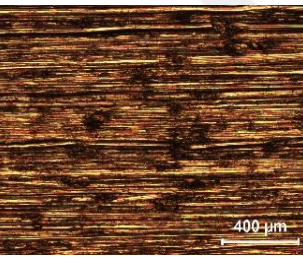
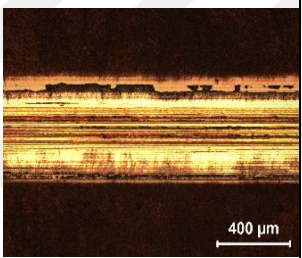
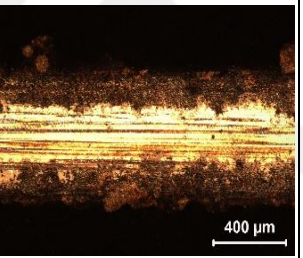
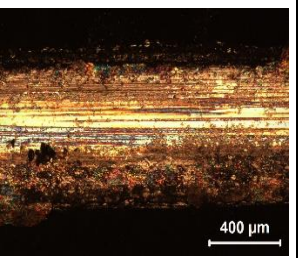
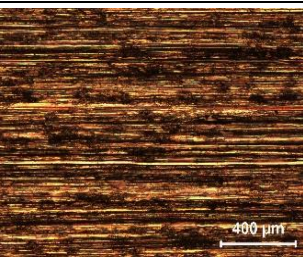
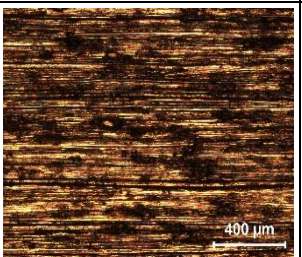
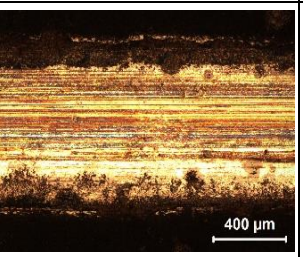
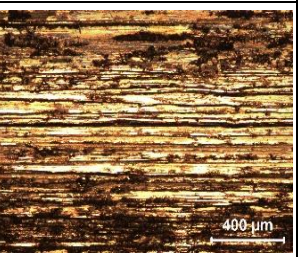
Ek Tablo 8. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 30 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x200)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

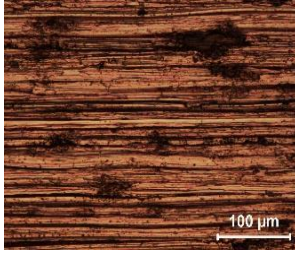
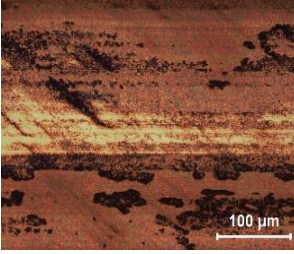
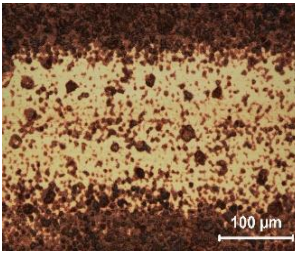
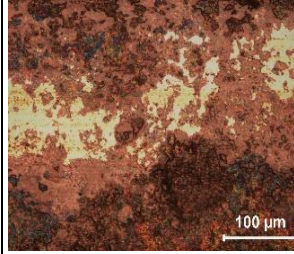
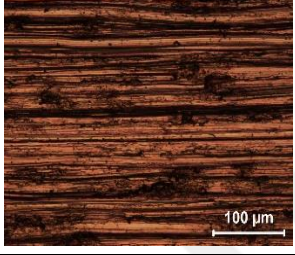
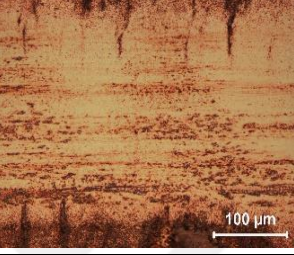
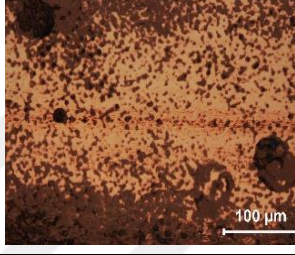
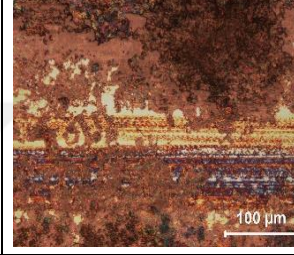
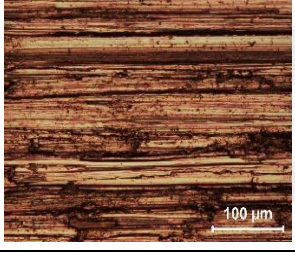
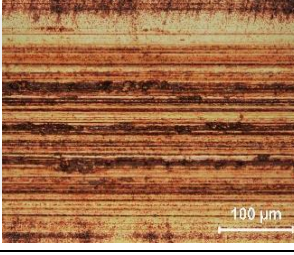
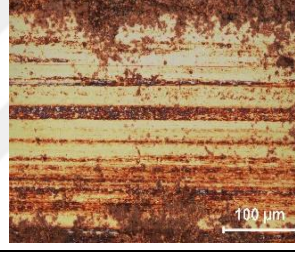
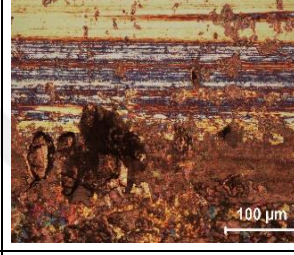
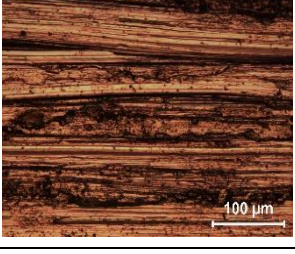
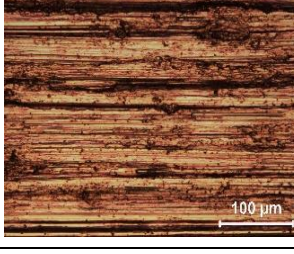
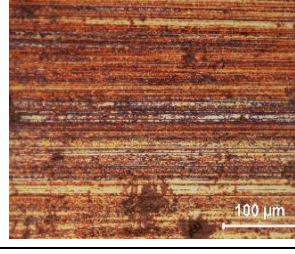
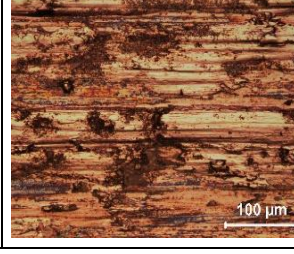
Ek Tablo 9. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 30 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x500)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

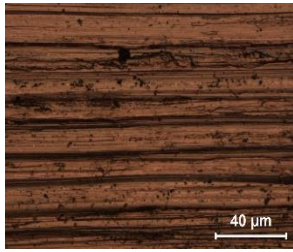
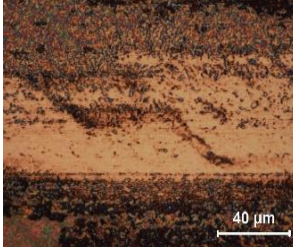
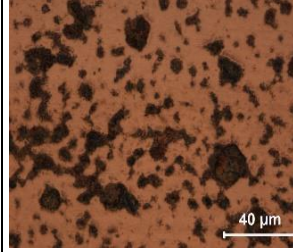
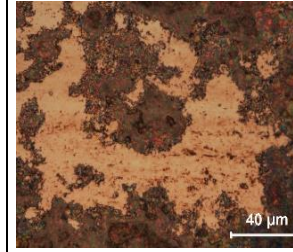
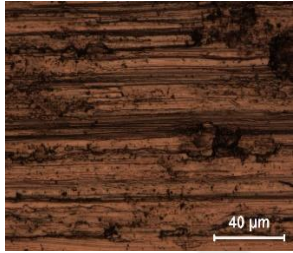
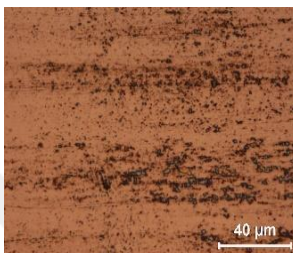
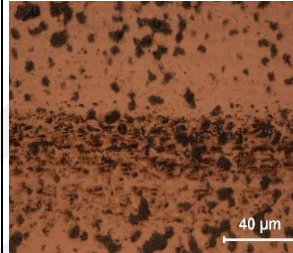
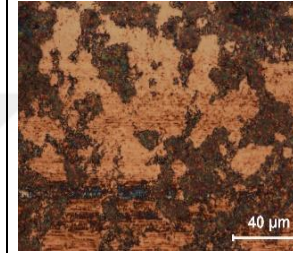
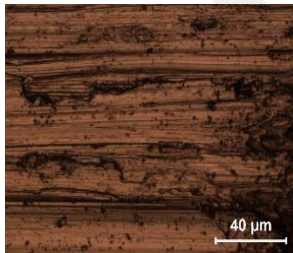
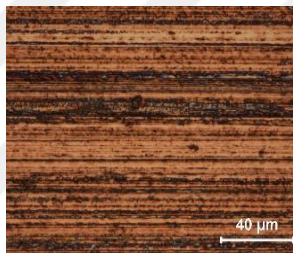
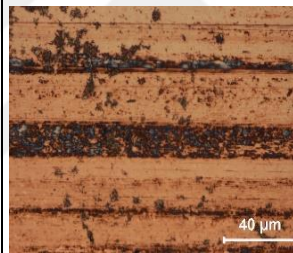
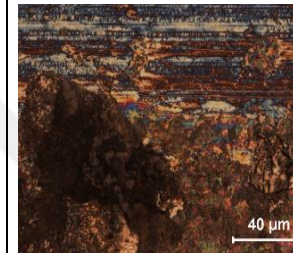
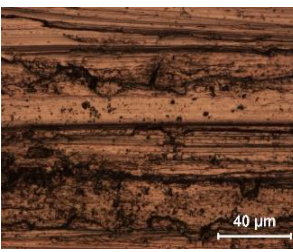
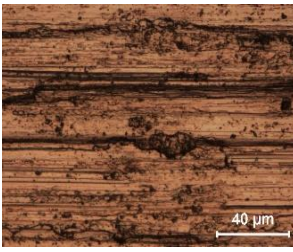
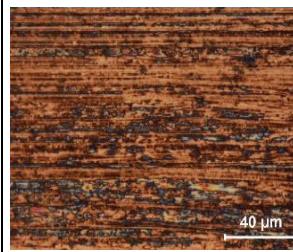
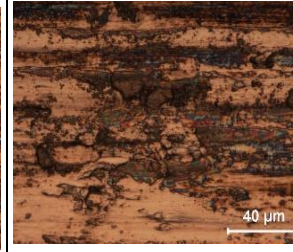
Ek Tablo 10. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 10 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

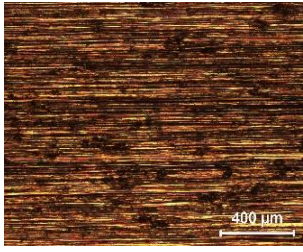
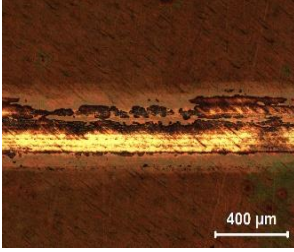
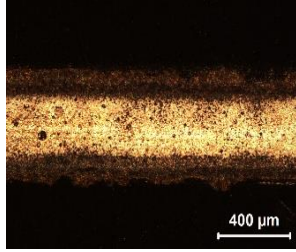
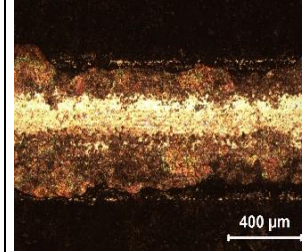
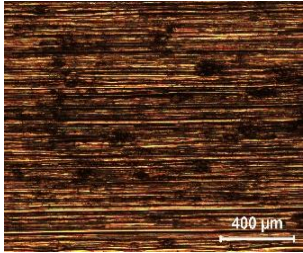
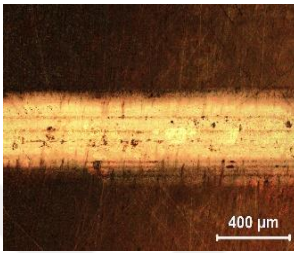
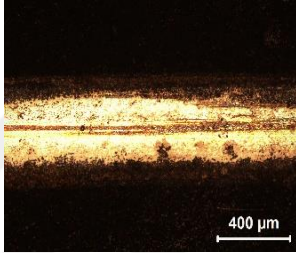
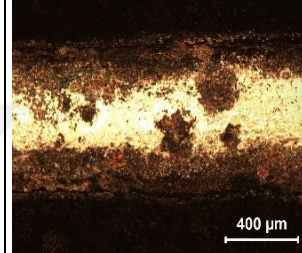
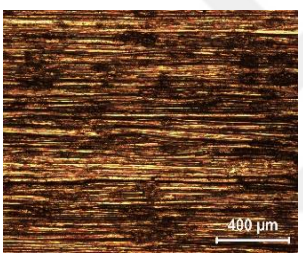
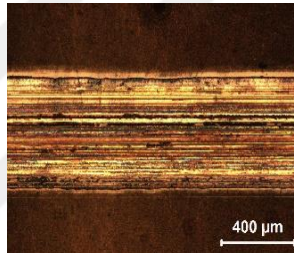
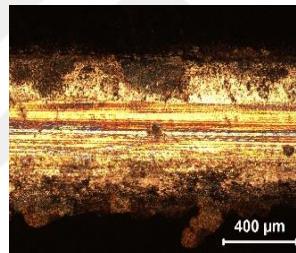
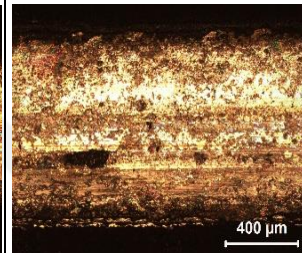
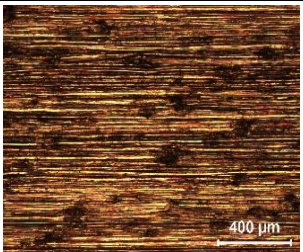
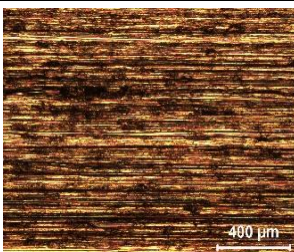
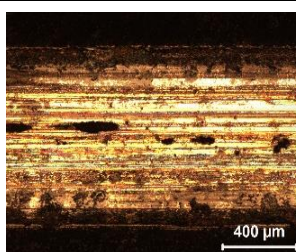
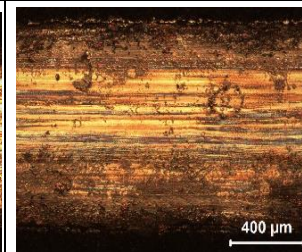
Ek Tablo 11. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 10 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x200)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

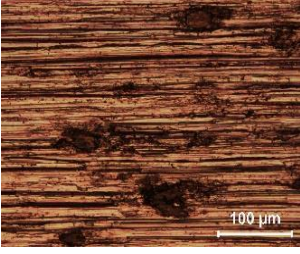
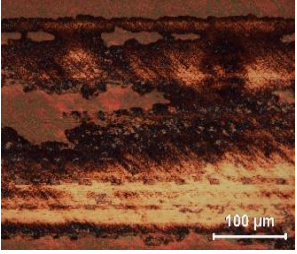
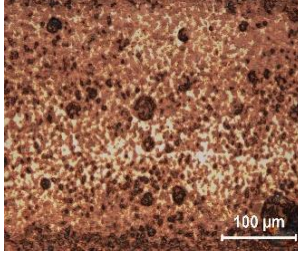
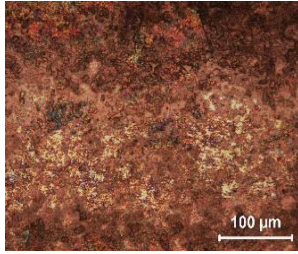
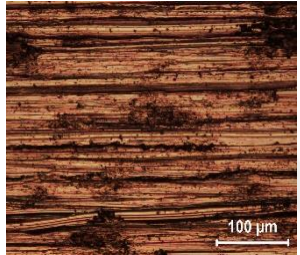
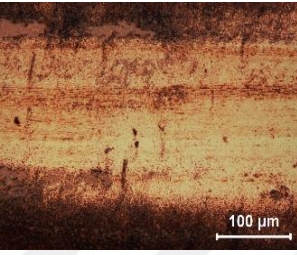
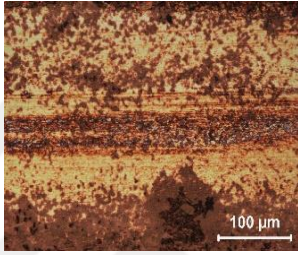
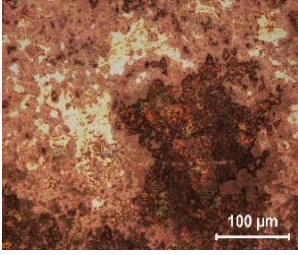
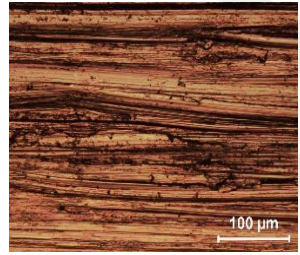
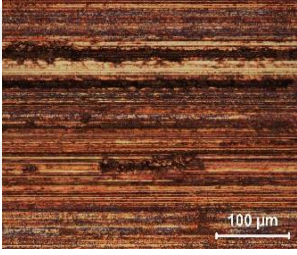
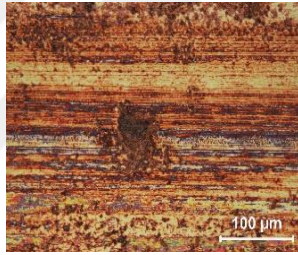
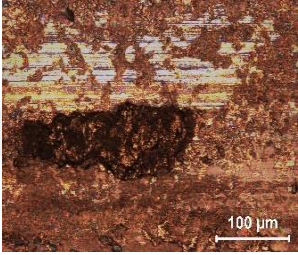
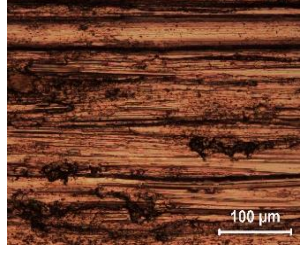
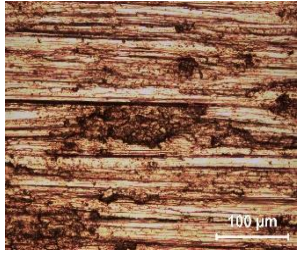
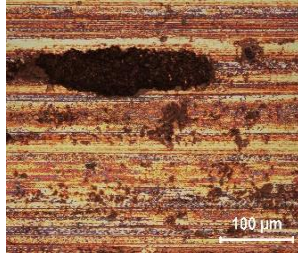
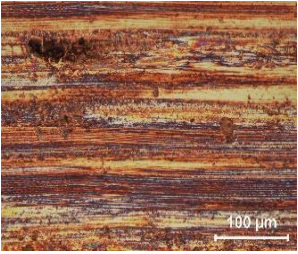
Ek Tablo 12. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 10 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x500)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

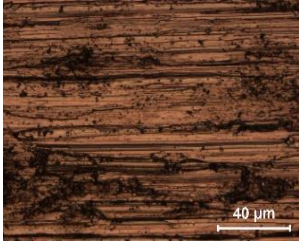
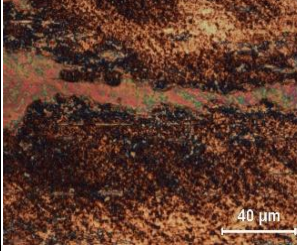
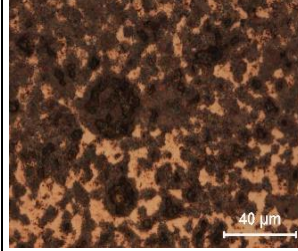
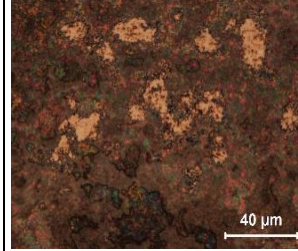
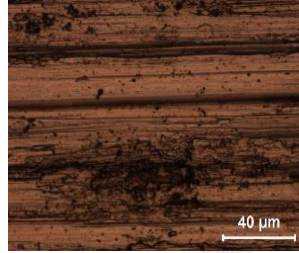
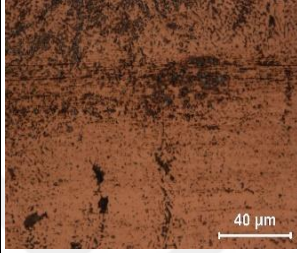
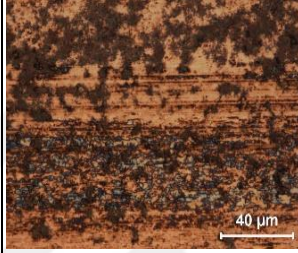
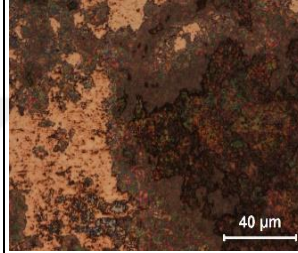
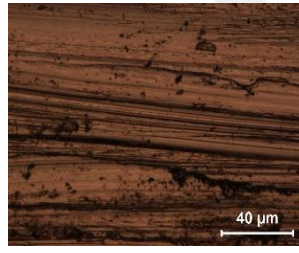
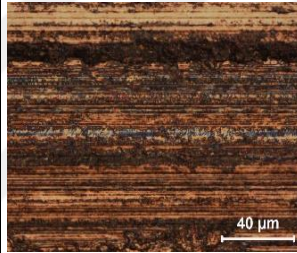
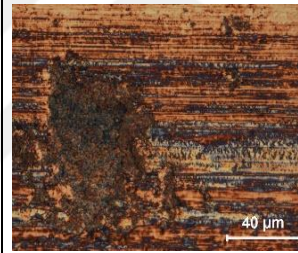
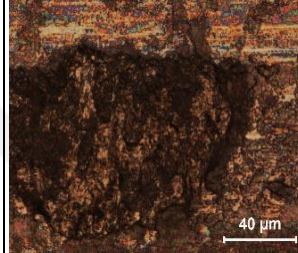
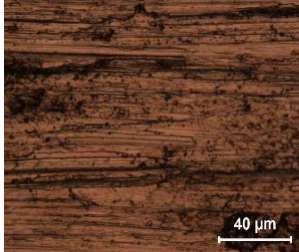
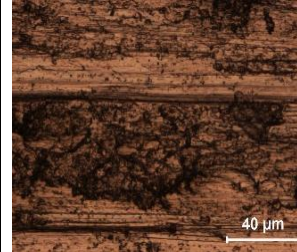
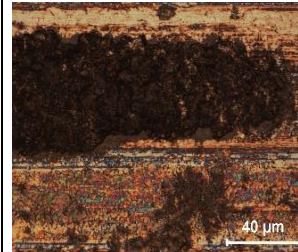
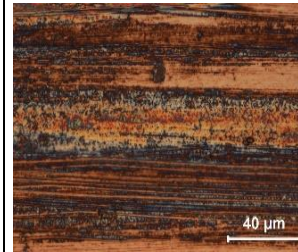
Ek Tablo 13. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 20 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

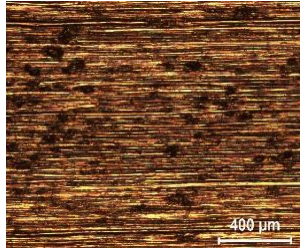
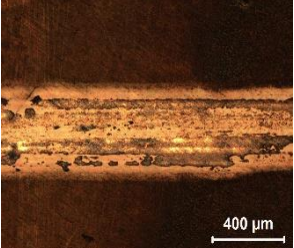
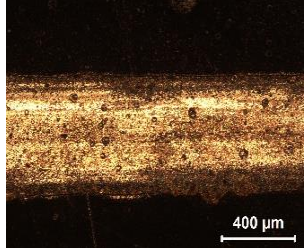
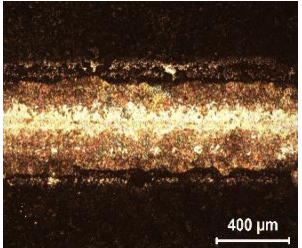
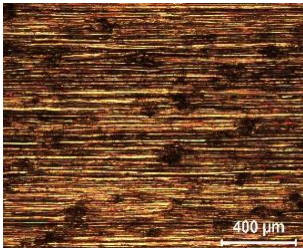
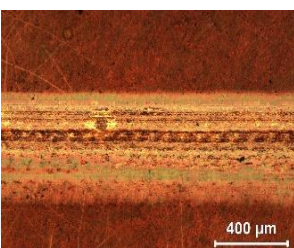
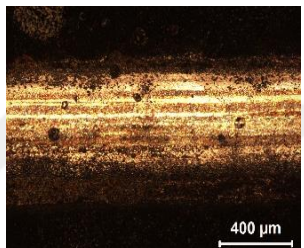
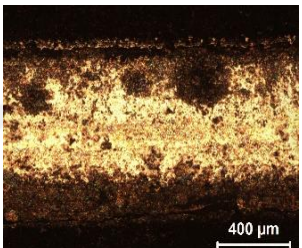
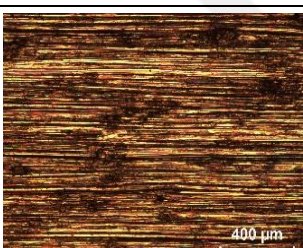
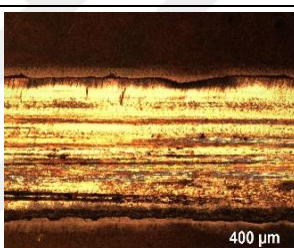
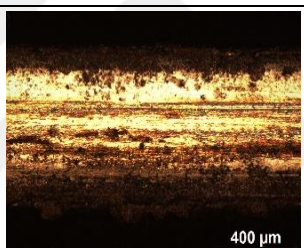
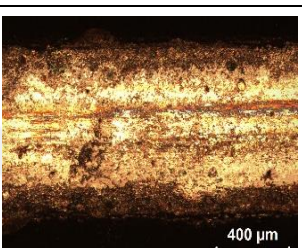
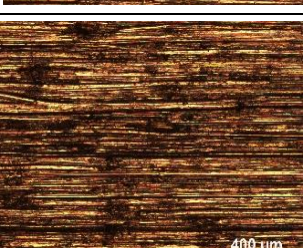
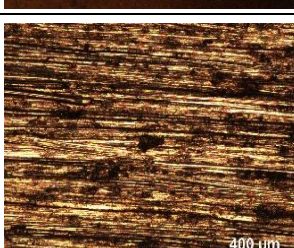
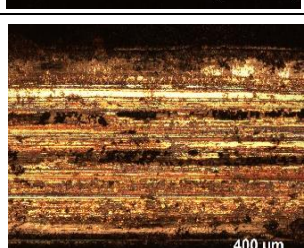
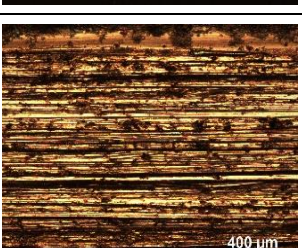
Ek Tablo 14. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 20 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x200)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

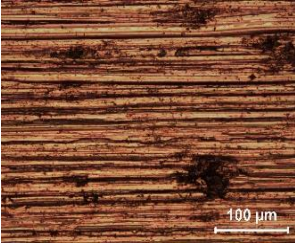
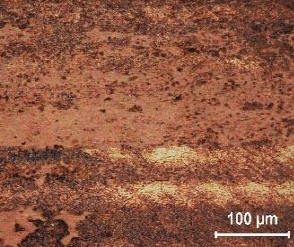
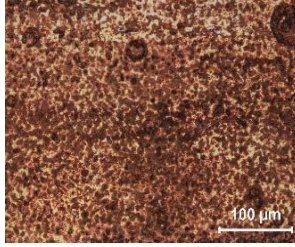
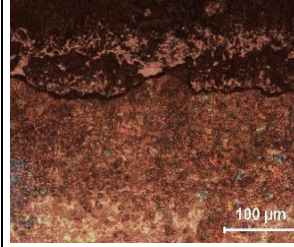
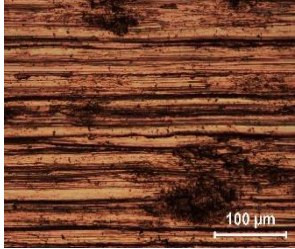
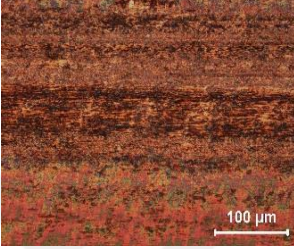
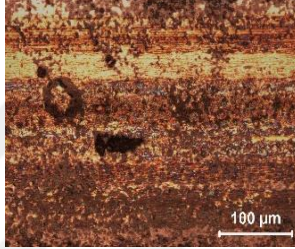
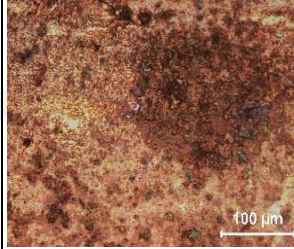
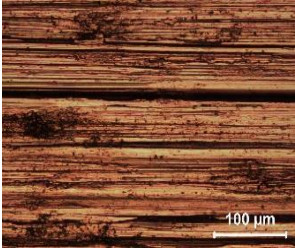
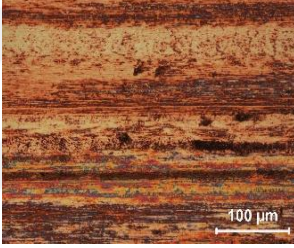
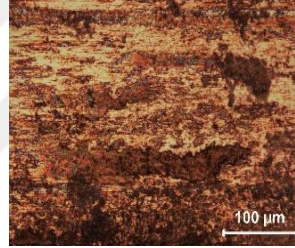
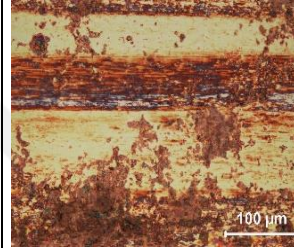
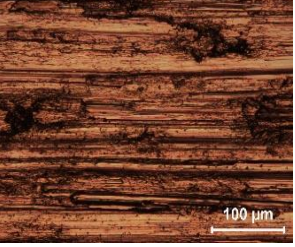
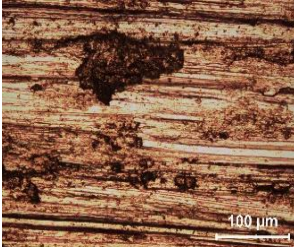
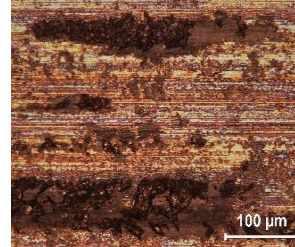
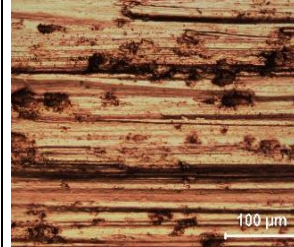
Ek Tablo 15. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 20 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x500)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

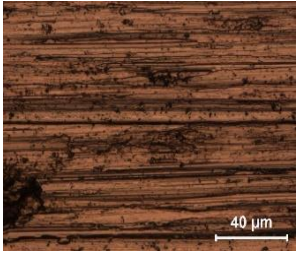
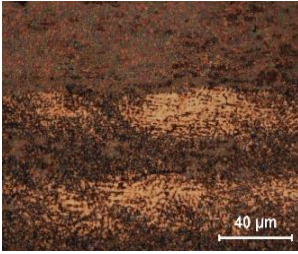
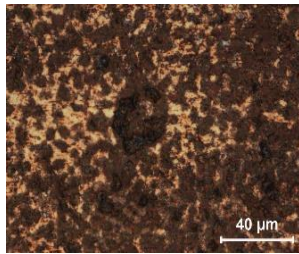
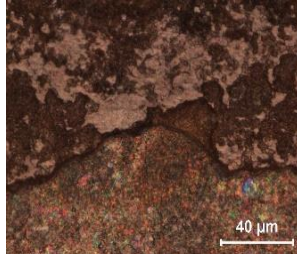
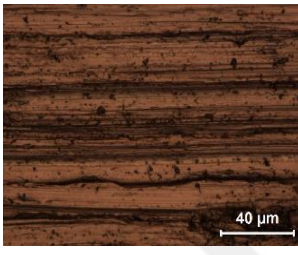
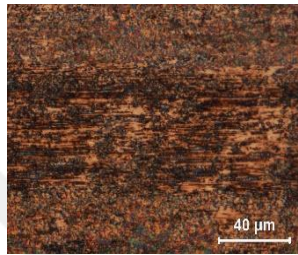
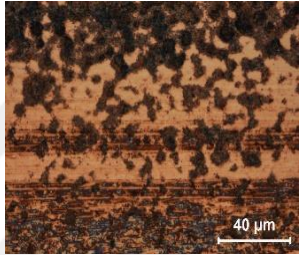
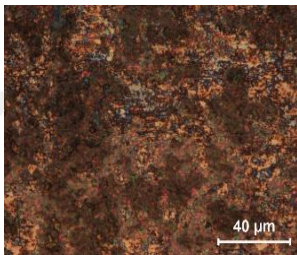
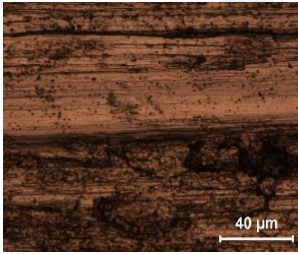
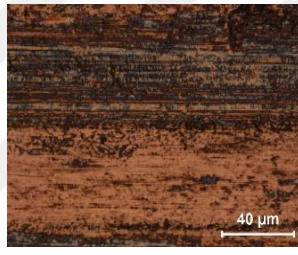
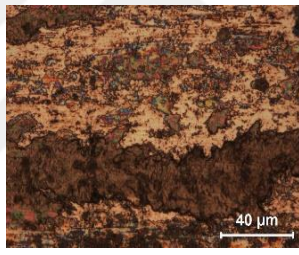
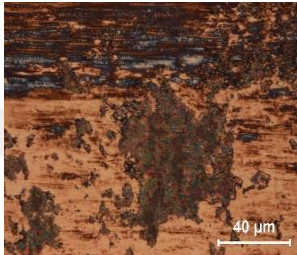
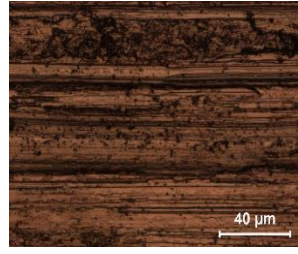
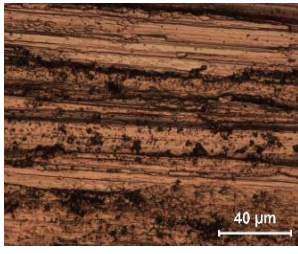
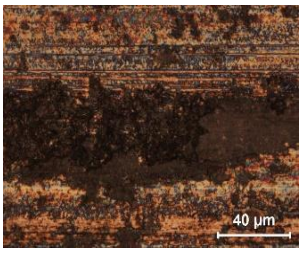
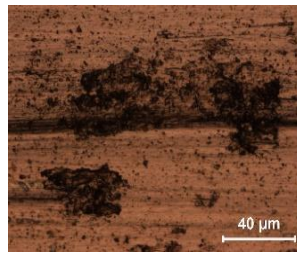
Ek Tablo 16. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 30 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

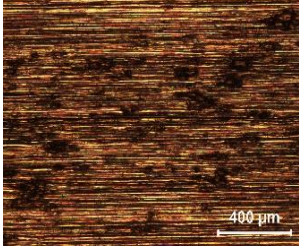
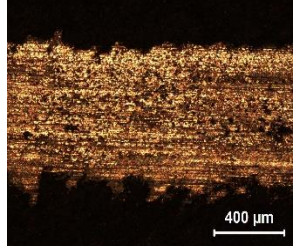
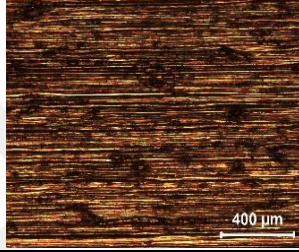
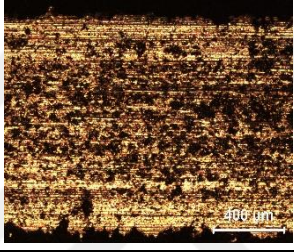
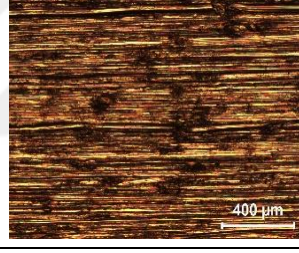
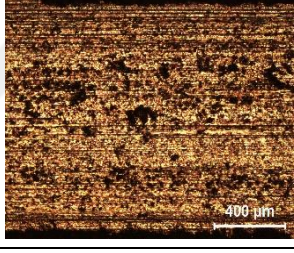
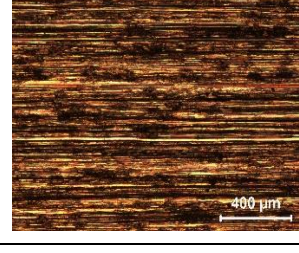
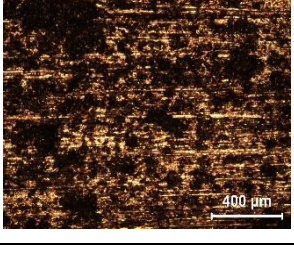
Ek Tablo 17. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 30 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x200)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

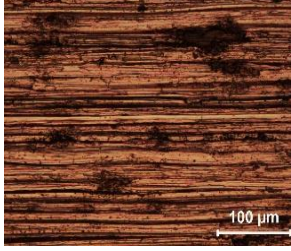
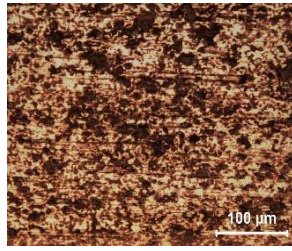
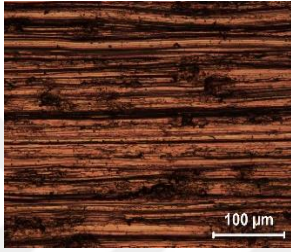
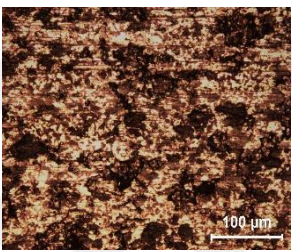
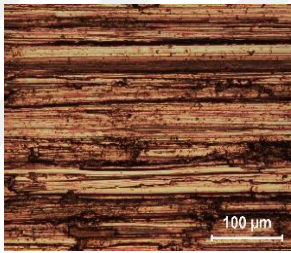
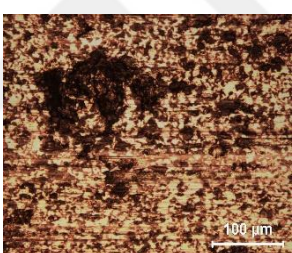
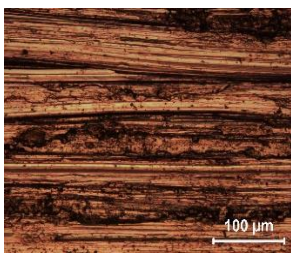
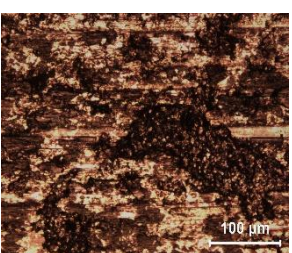
Ek Tablo 18. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 30 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x500)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

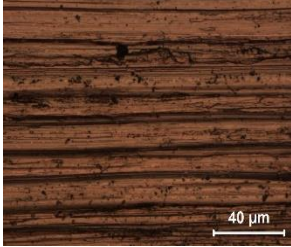
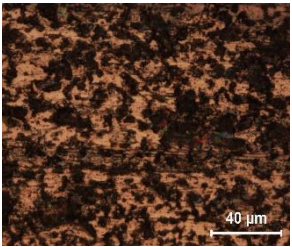
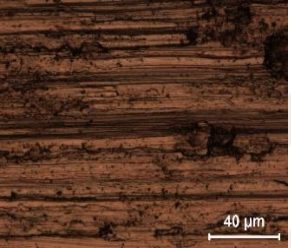
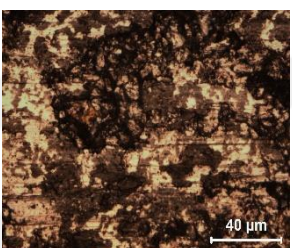
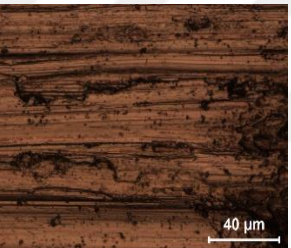
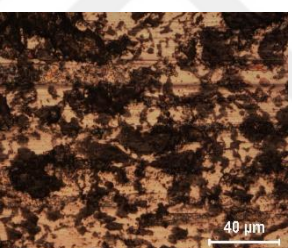
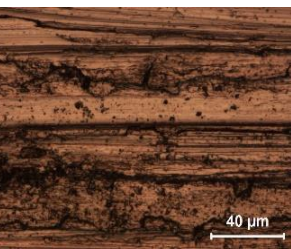
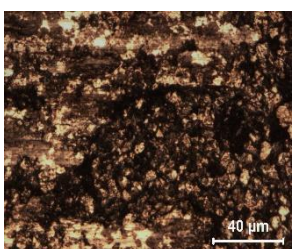
Ek Tablo 19. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama+ 950 °C 1 saat difüzon tavlaması uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 10 mm\’s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

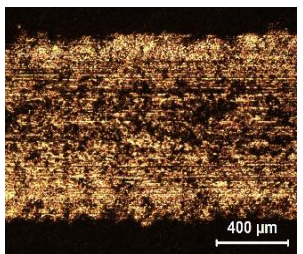
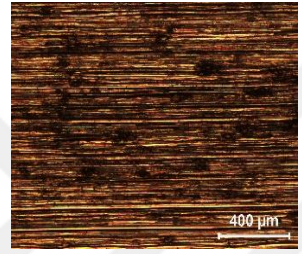
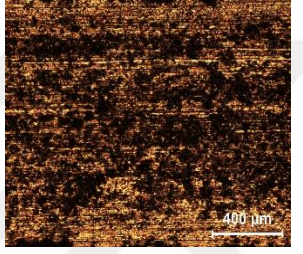
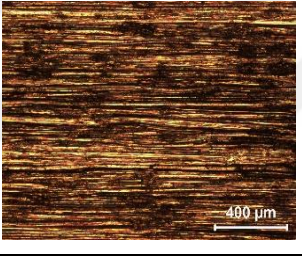
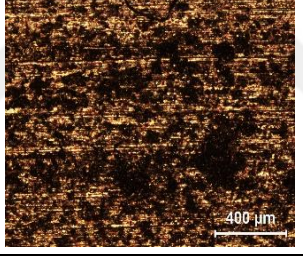
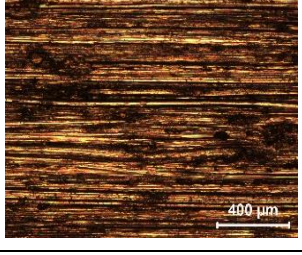
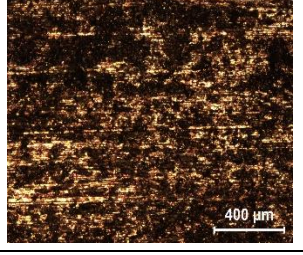
Ek Tablo 20. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama + 950 °C 1 saat difüzon tavlaması uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 10 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x200)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

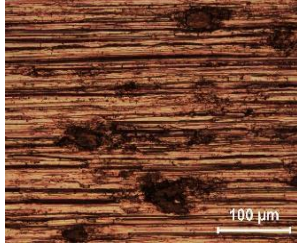
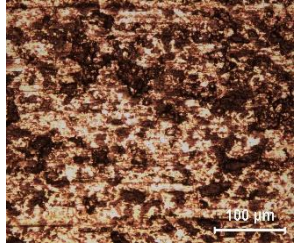
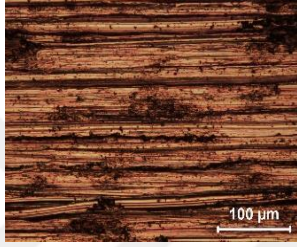
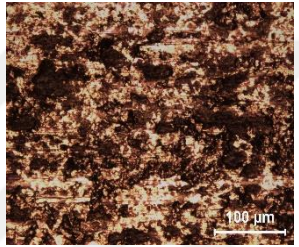
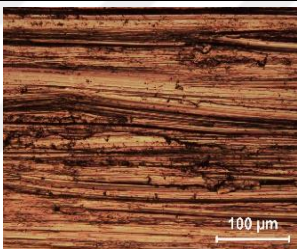
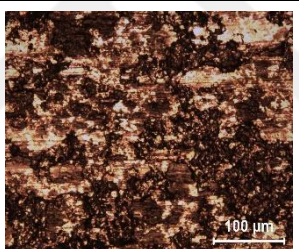
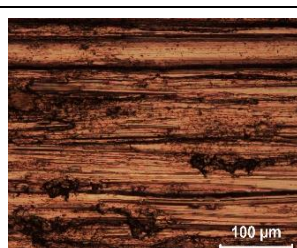
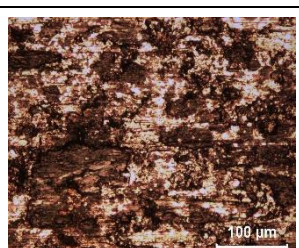
Ek Tablo 21. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama + 950 °C 1 saat difüzon tavlaması uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 10 mm\’s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x500)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

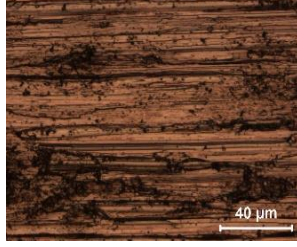
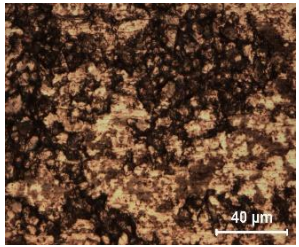
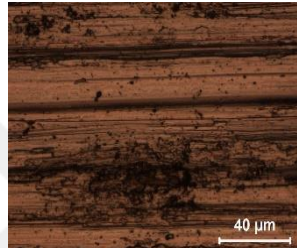
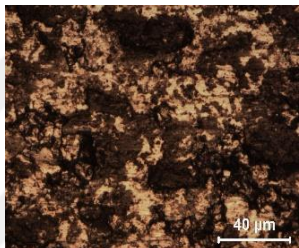
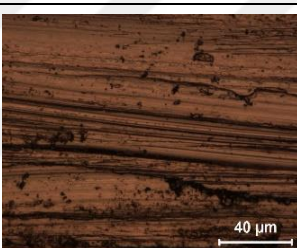
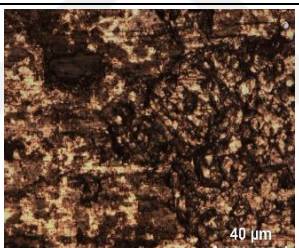
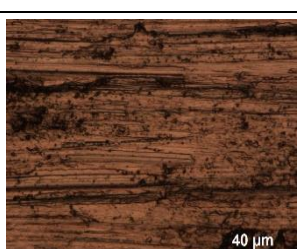
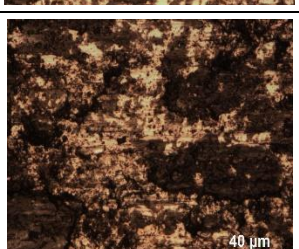
Ek Tablo 22. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama + 950 °C 1 saat difüzon tavlaması uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 20 mm\’s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

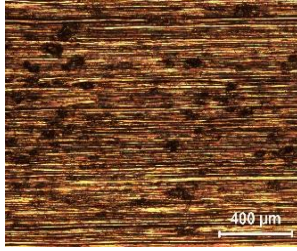
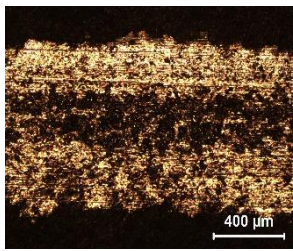
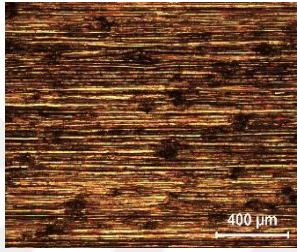
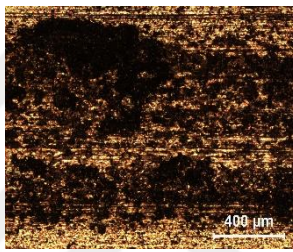
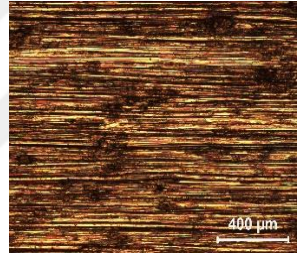
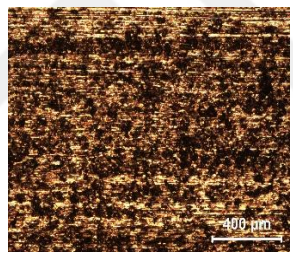
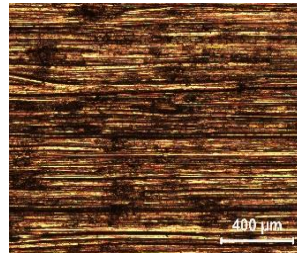
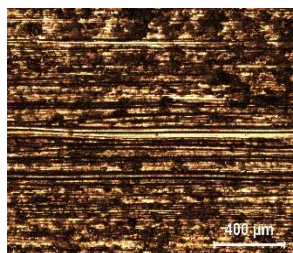
Ek Tablo 23. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama + 950 °C 1 saat difüzon tavlaması uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 20 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x200)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

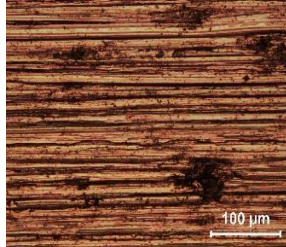
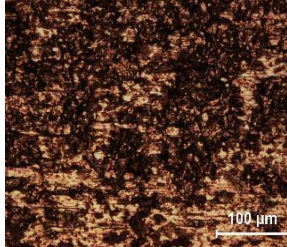
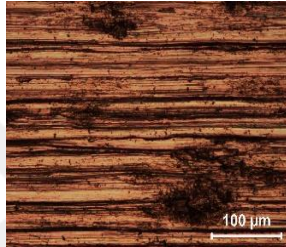
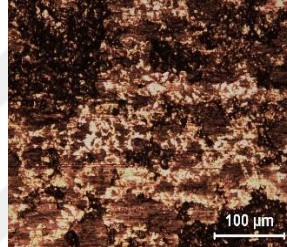
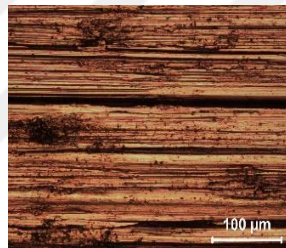
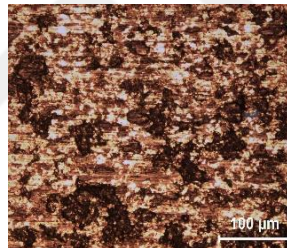
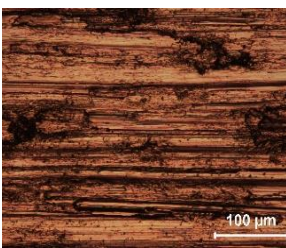
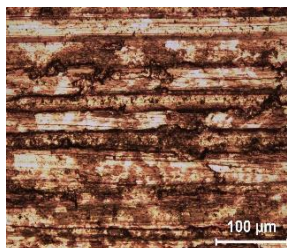
Ek Tablo 24. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama + 950 °C 1 saat difüzon tavlaması uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 20 mm\’s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x500)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

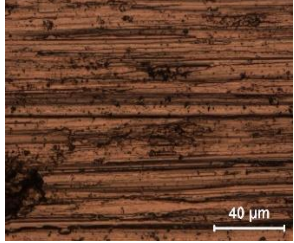
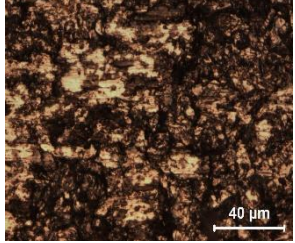
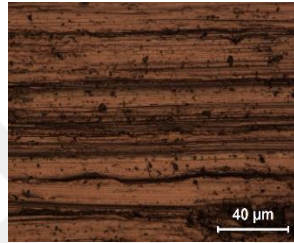
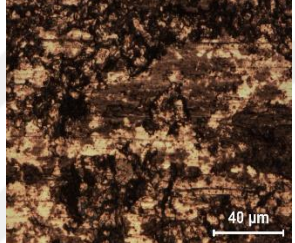
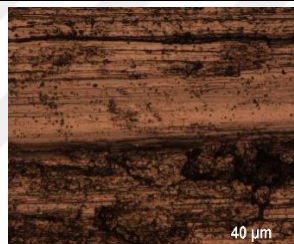
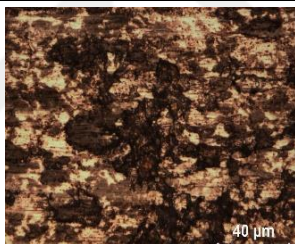
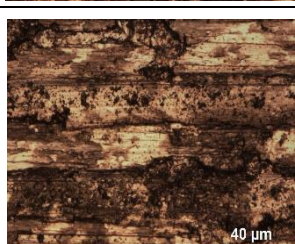
Ek Tablo 25. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama + 950 °C 1 saat difüzon tavlaması uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 30 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

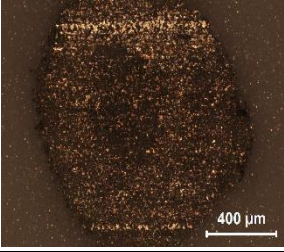
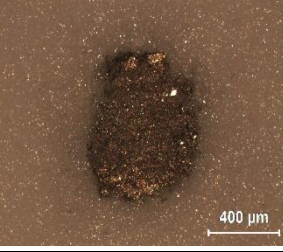
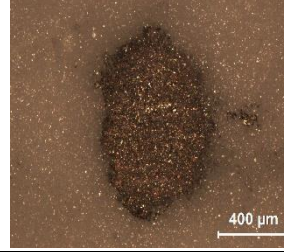
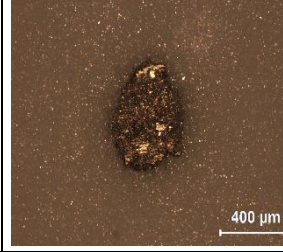
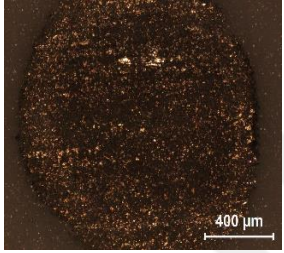
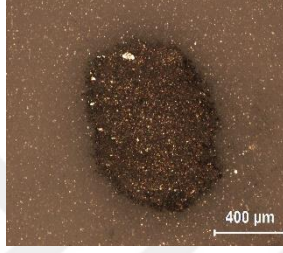
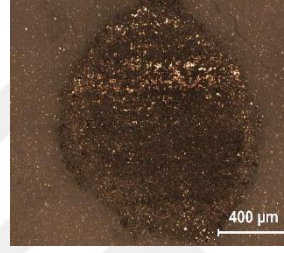
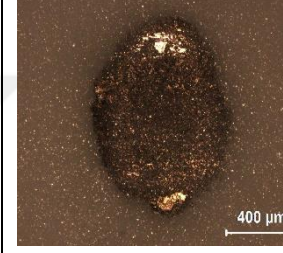
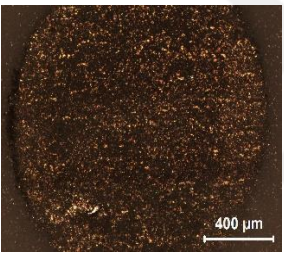
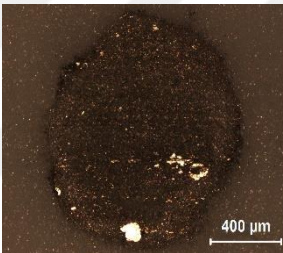
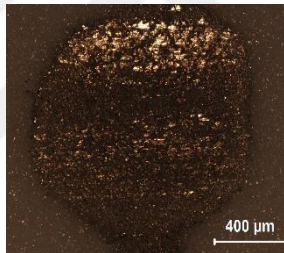
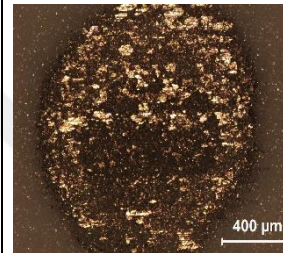
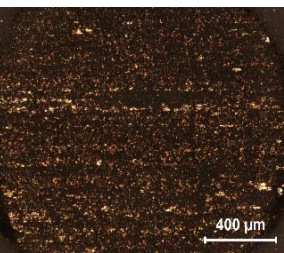
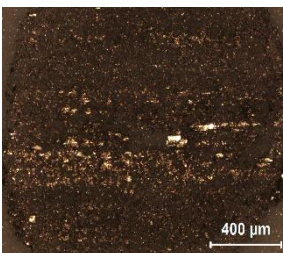
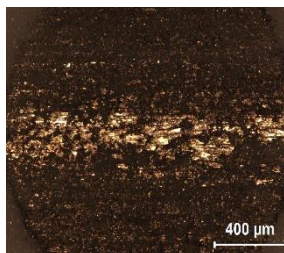
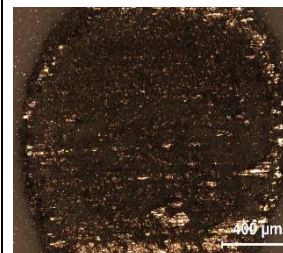
Ek Tablo 26. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama + 950 °C 1 saat difüzon tavlaması uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 30 mm/s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x200)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

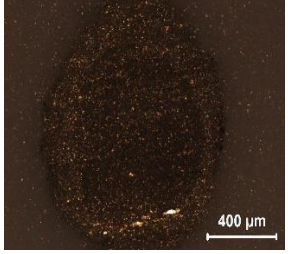
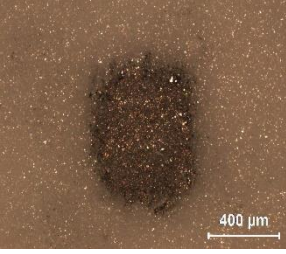
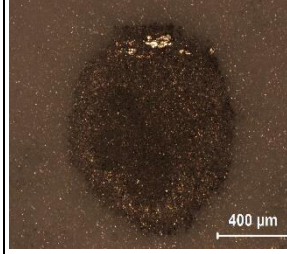
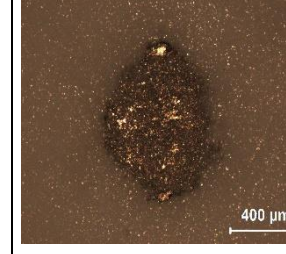
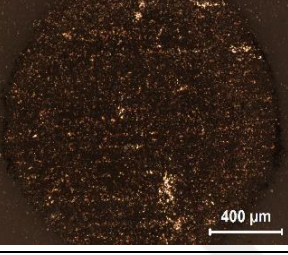
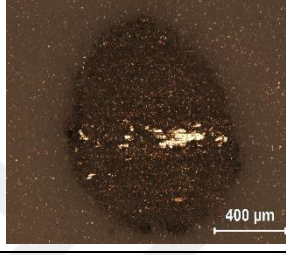
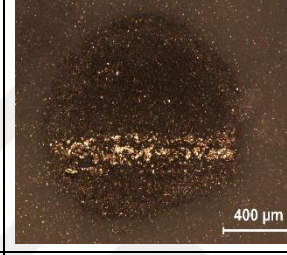
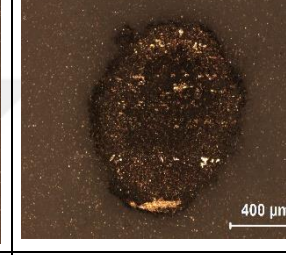
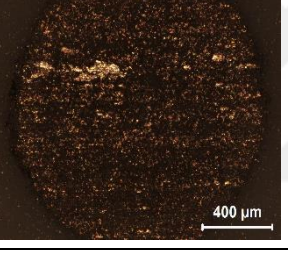
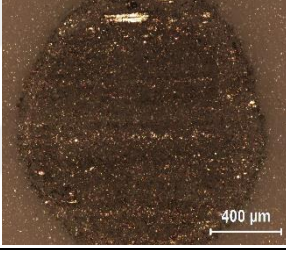
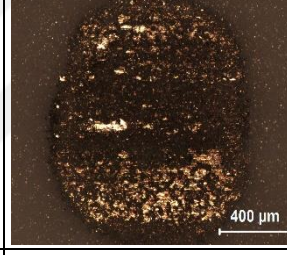
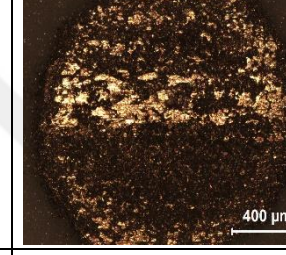
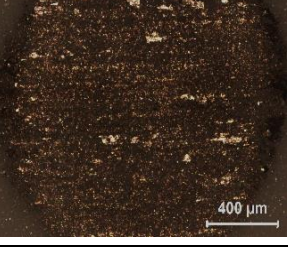
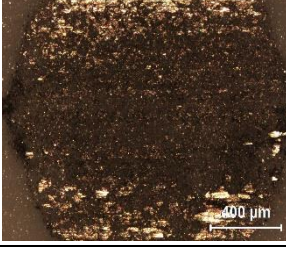
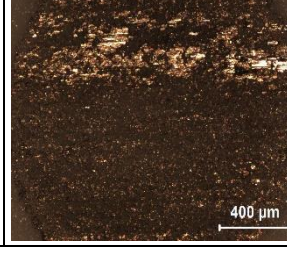
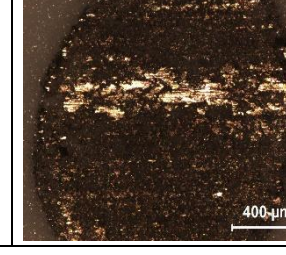
Ek Tablo 27. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama + 950 °C 1 saat difüzon tavlaması uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 30 mm\’s hız için yüke bağlı aşınma yüzey görüntüleri (x500)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

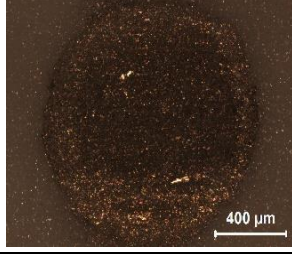
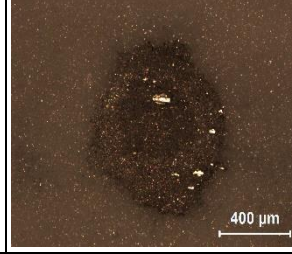
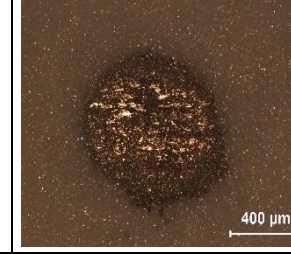
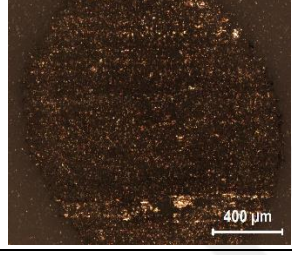
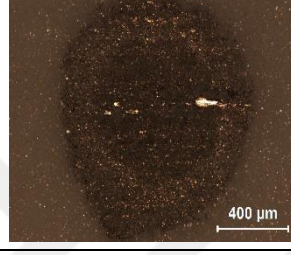
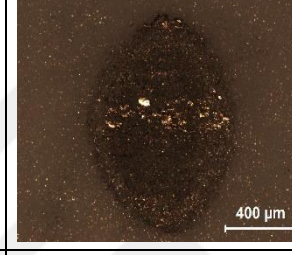
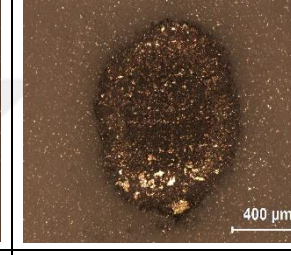
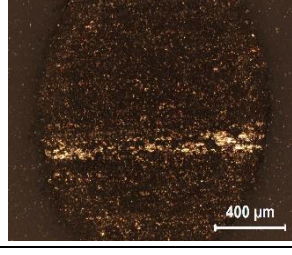
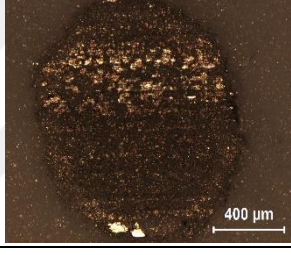
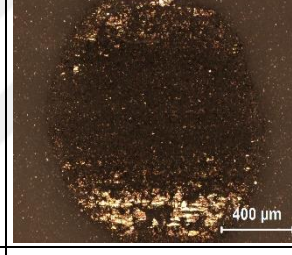
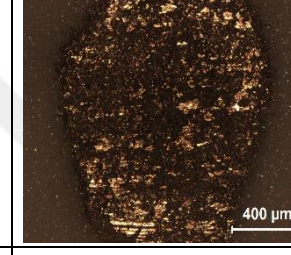
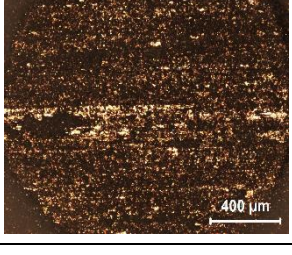
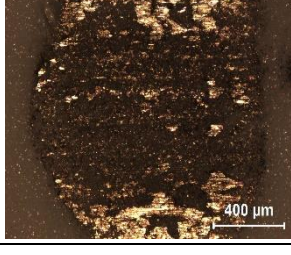
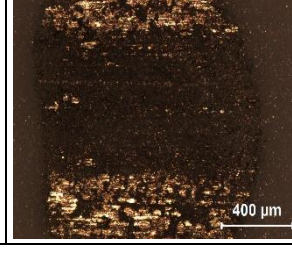
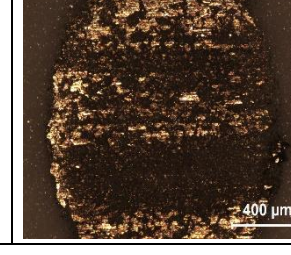
Ek Tablo 28. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 10 mm\’s hız için Al₂O₃ karşı malzeme yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

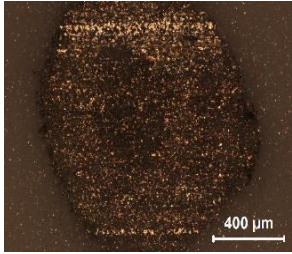
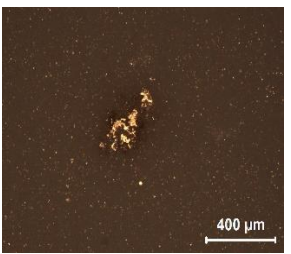
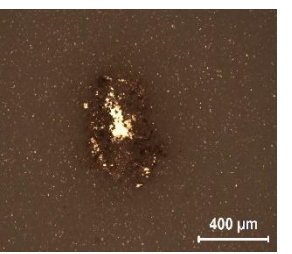
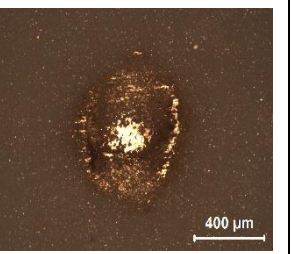
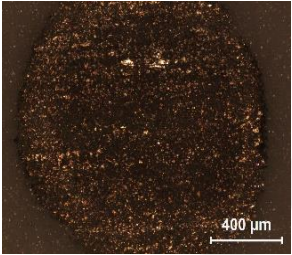
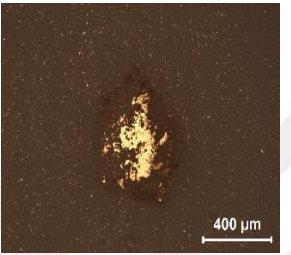
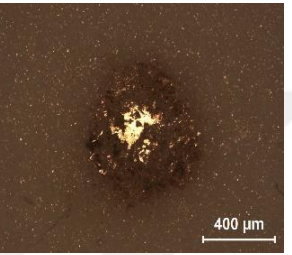
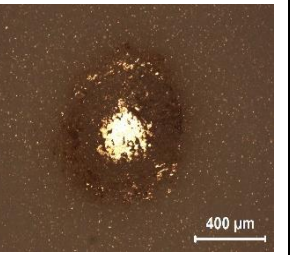
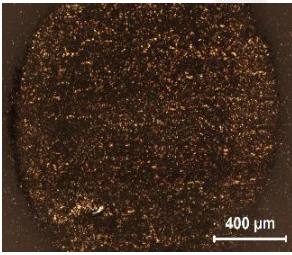
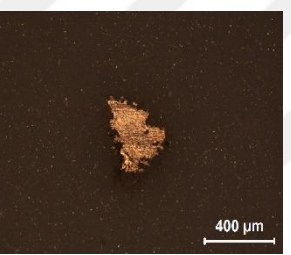
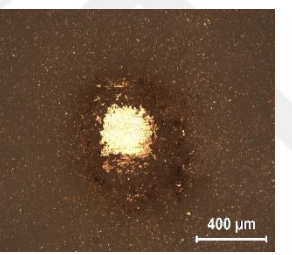
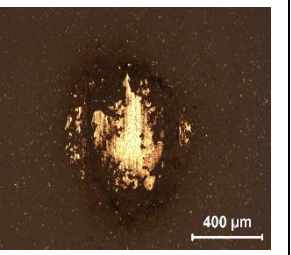
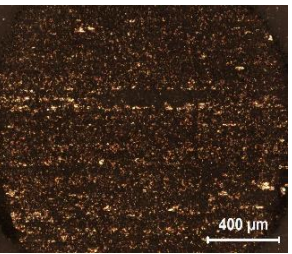
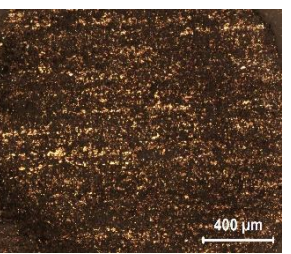
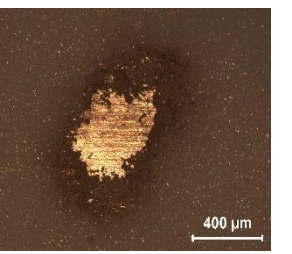
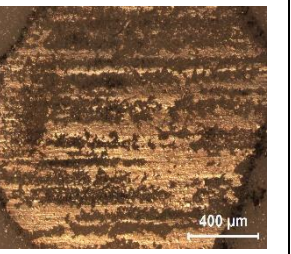
Ek Tablo 29. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 20 mm\’s hız için Al₂O₃ karşı malzeme yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

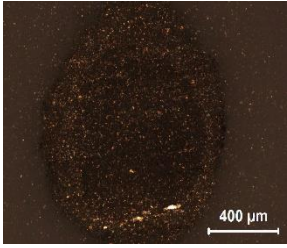
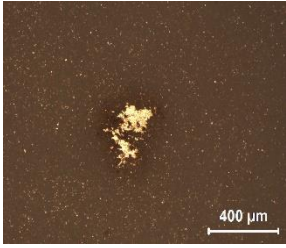
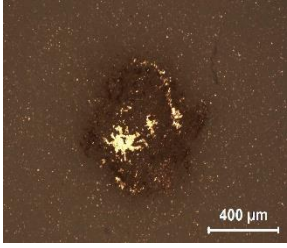
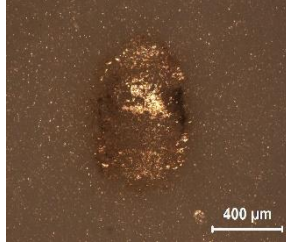
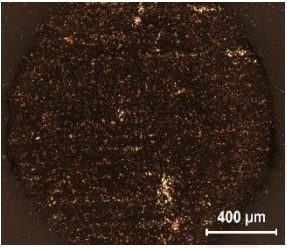
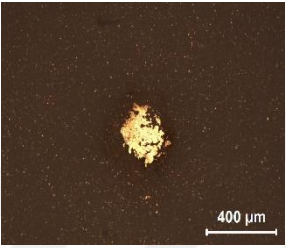
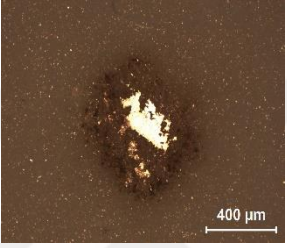
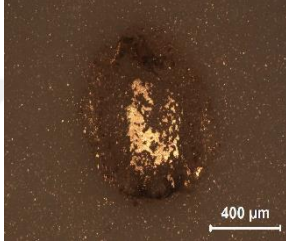
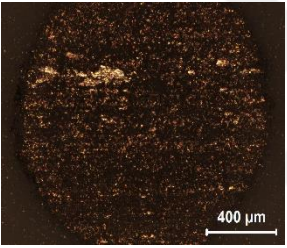
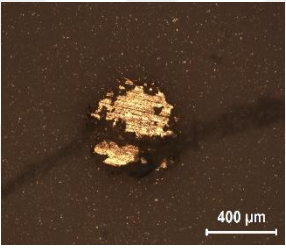
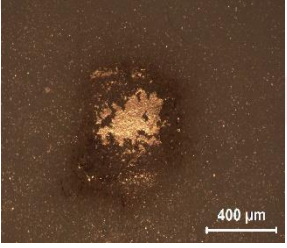
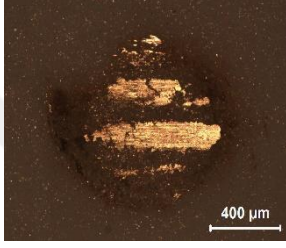
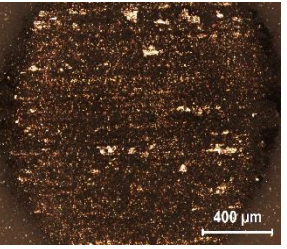
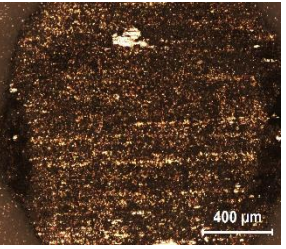
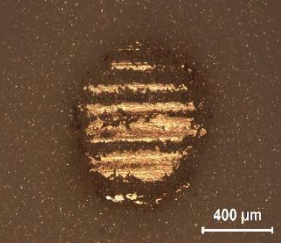
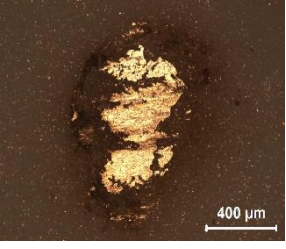
Ek Tablo 30. İşlem görmemiş, 600, 700 ve 800 °C 6 saat kutu sementasyon alüminyumlama uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 30 mm\’s hız için Al₂O₃ karşı malzeme yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	700 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.	800 °C 6 Saat Kutu Sem. Al.
1,8				
3,75				
7,5				
15				

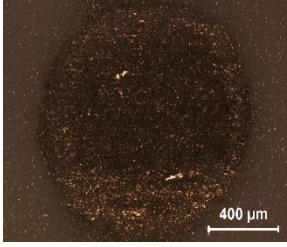
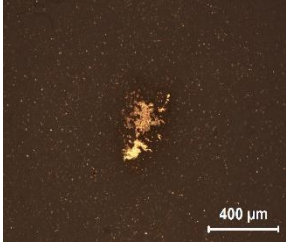
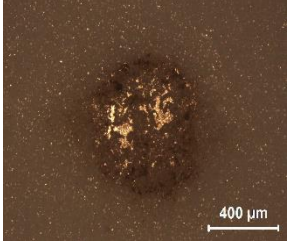
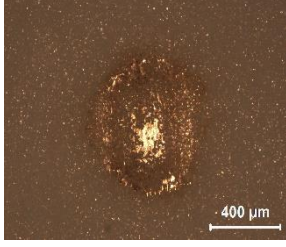
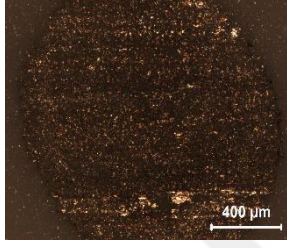
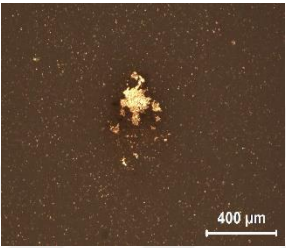
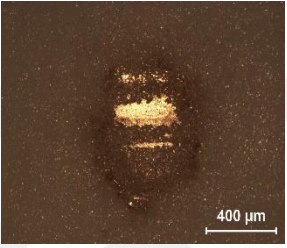
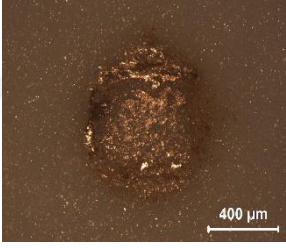
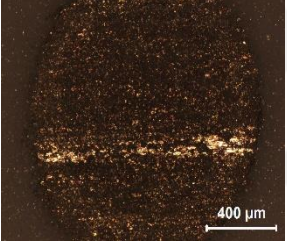
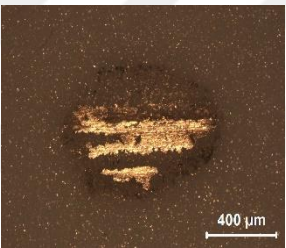
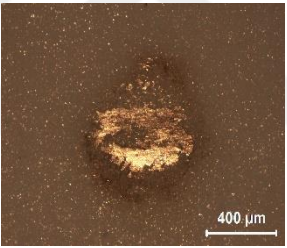
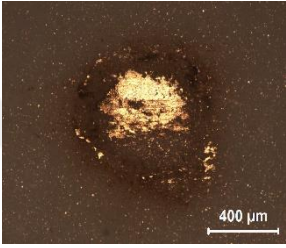
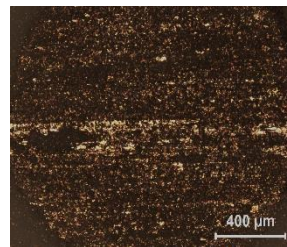
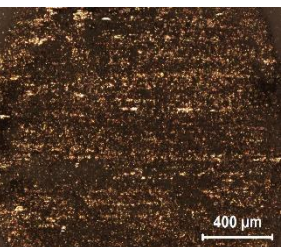
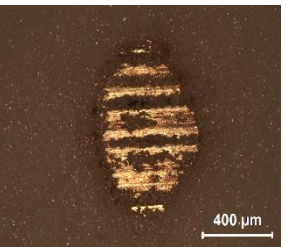
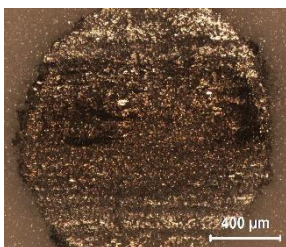
Ek Tablo 31. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 10 mm\’s hız için Al₂O₃ karşı malzeme yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

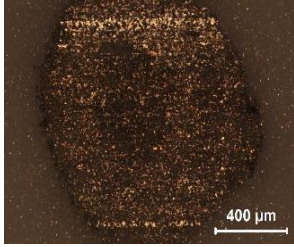
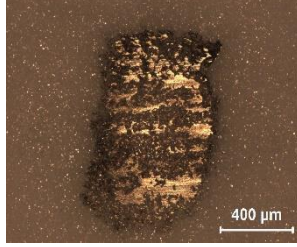
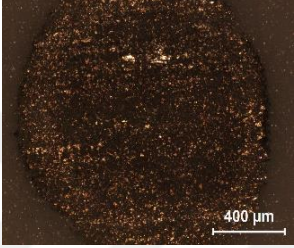
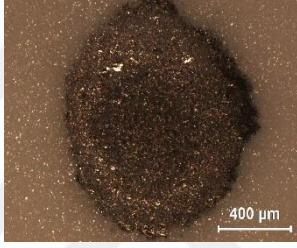
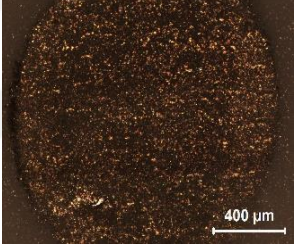
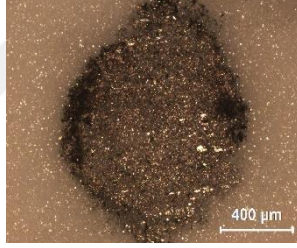
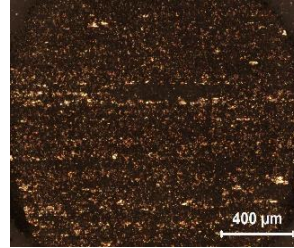
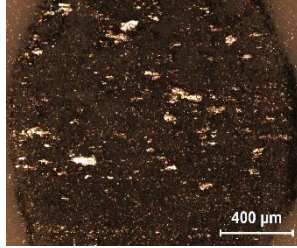
Ek Tablo 32. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 20 mm\’s hız için Al₂O₃ karşı malzeme yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

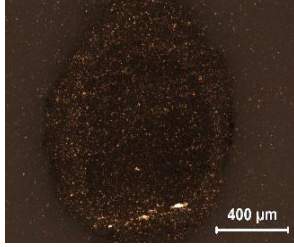
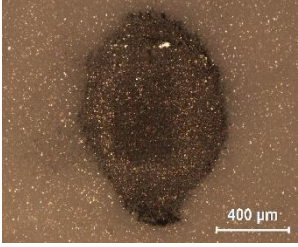
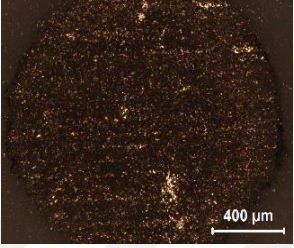
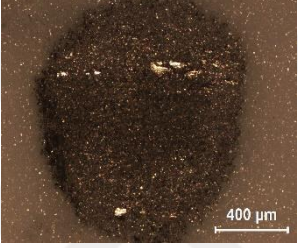
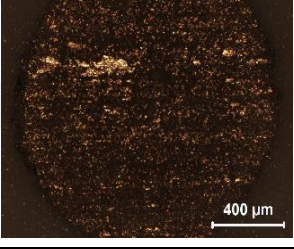
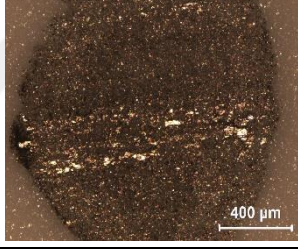
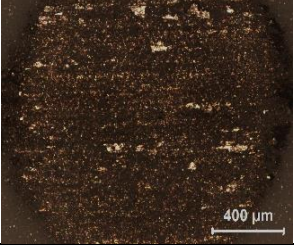
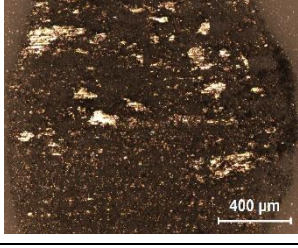
Ek Tablo 33. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat, 700 °C 30 saat ve 800 °C 5 saat TO uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımının 30 mm\’s hız için Al₂O₃ karşı malzeme yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO	800 °C 5 Saat TO
1,8				
3,75				
7,5				
15				

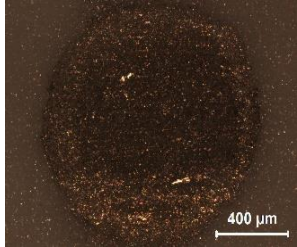
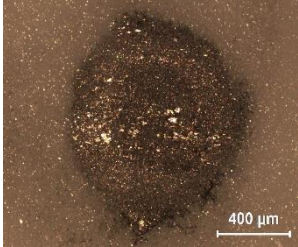
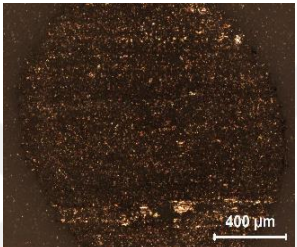
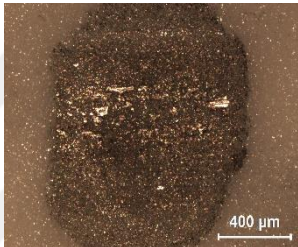
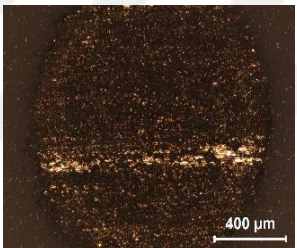
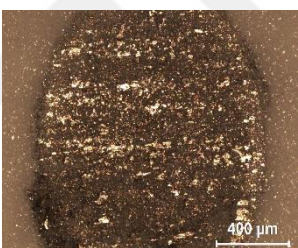
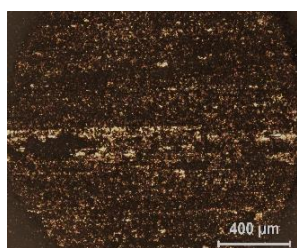
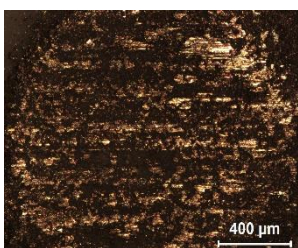
Ek Tablo 34. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama+ 950 °C 1 saat difüzon tavlamaşı uygulanmış Ti-6Al-4V alaşıımının 10 mm\’s hız için Al₂O₃ karşı malzeme yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

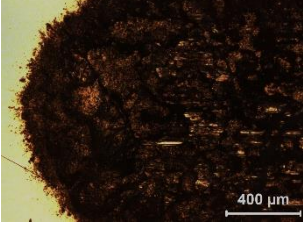
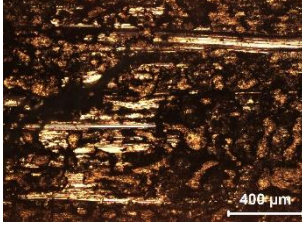
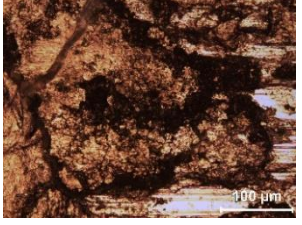
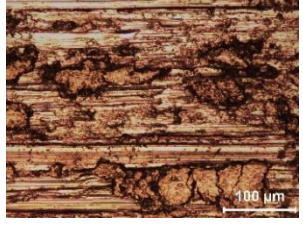
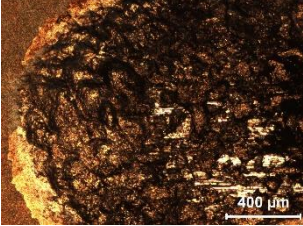
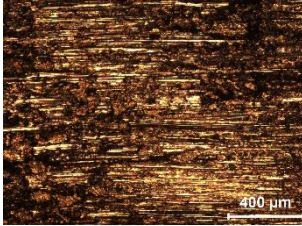
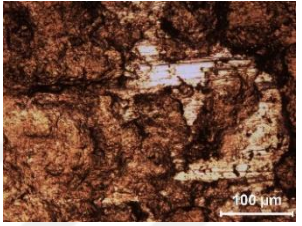
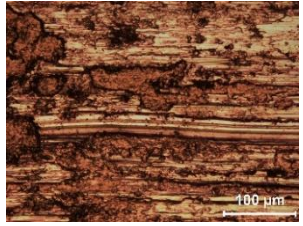
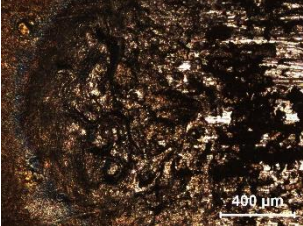
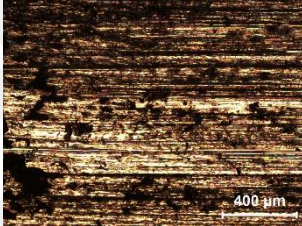
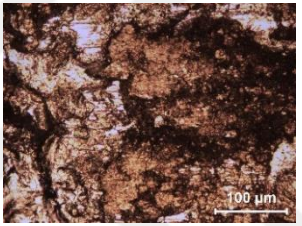
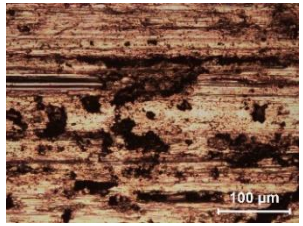
Ek Tablo 35. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama+ 950 °C 1 saat difüzon tavlamaşı uygulanmış Ti-6Al-4V alaşıımının 20 mm\’s hız için Al₂O₃ karşı malzeme yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

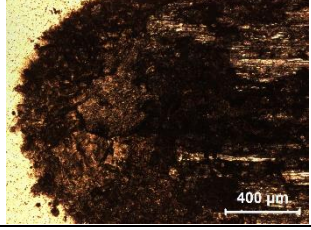
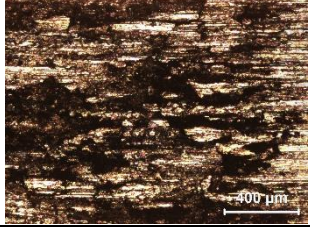
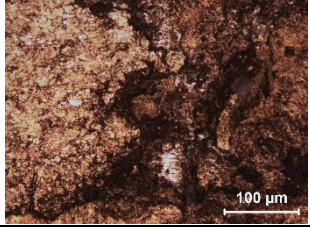
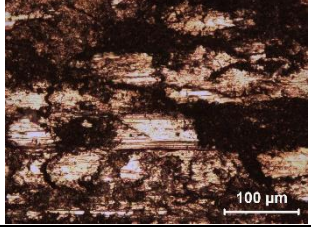
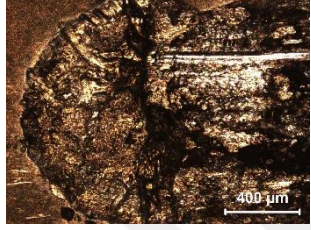
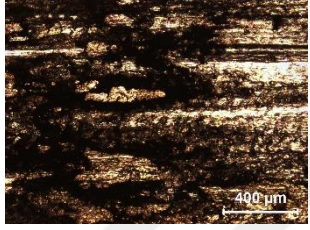
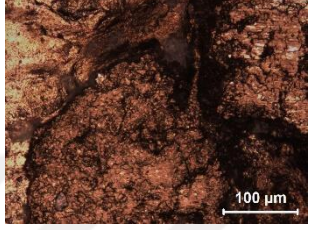
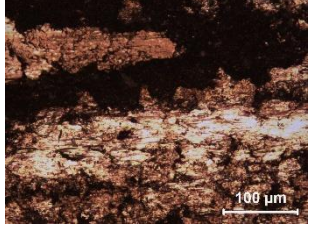
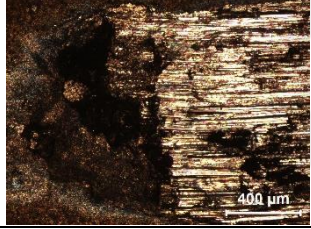
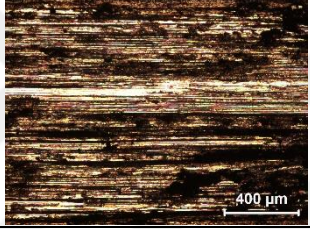
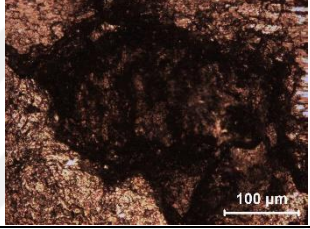
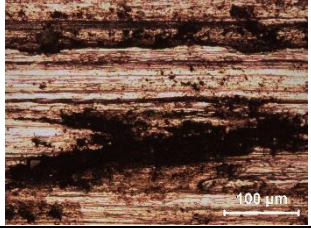
Ek Tablo 36. İşlem görmemiş ve 750 °C 3 dk sıcak daldırma alüminyumlama+ 950 °C 1 saat difüzon tavlamaşı uygulanmış Ti-6Al-4V alaşıımının 30 mm\’s hız için Al₂O₃ karşı malzeme yüzey görüntüleri (x50)

Yük (N)	İşlem Görmemiş	750 °C Sıc. Dal. Al.+ 950 °C 1 Saat Isıl İşlem
1,8		
3,75		
7,5		
15		

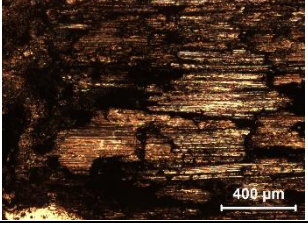
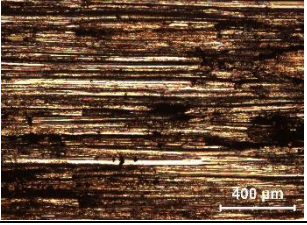
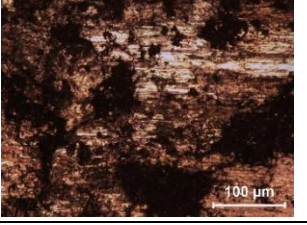
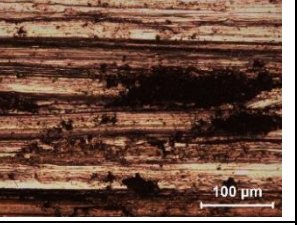
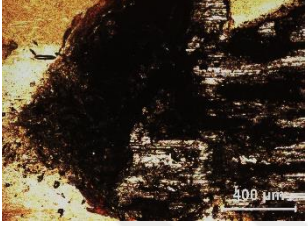
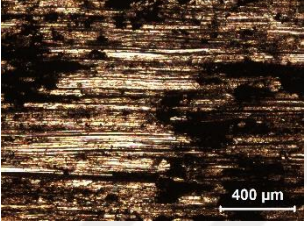
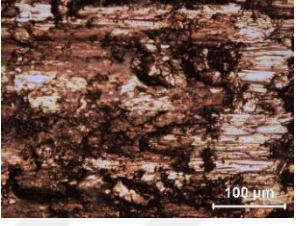
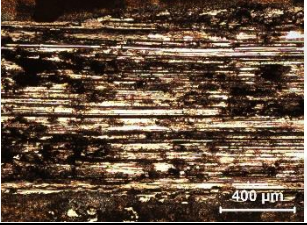
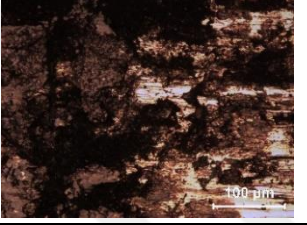
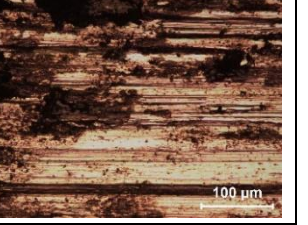
Ek Tablo 37. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat ve 700 °C 30 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının 25 °C’de gerçekleştirilen darbeli kayma deneyleri sonrası darbe ve kayma bölgelerinin düşük (a) ve yüksek (b) büyütme aşınma iz görüntüleri (x50-x200)

	Darbe Bölgesi	Kayma Bölgesi	Darbe Bölgesi	Kayma Bölgesi
İşlem Görmemiş				
600 °C 60 Saat TO				
700 °C 30 Saat TO				
	(a)		(b)	

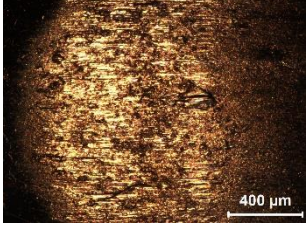
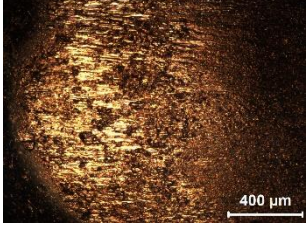
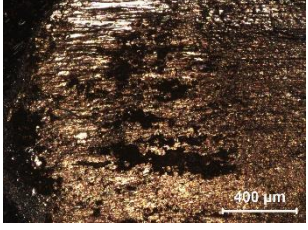
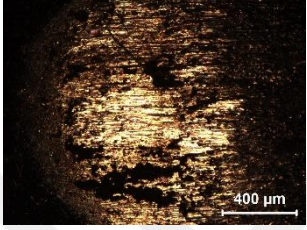
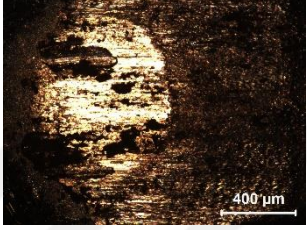
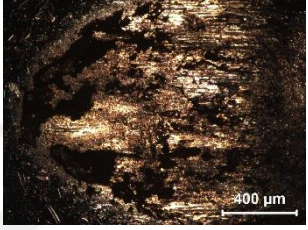
Ek Tablo 38. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat ve 700 °C 30 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının 350 °C’de gerçekleştirilen darbeli kayma deneyleri sonrası darbe ve kayma bölgelerinin düşük (a) ve yüksek (b) büyütme aşınma iz görüntüleri (x50-x200)

	Darbe Bölgesi	Kayma Bölgesi	Darbe Bölgesi	Kayma Bölgesi
İşlem Görmemiş				
600 °C 60 Saat TO				
700 °C 30 Saat TO				
	(a)		(b)	

Ek Tablo 39. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat ve 700 °C 30 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının 550 °C’de gerçekleştirilen darbeli kayma deneyleri sonrası darbe ve kayma bölgelerinin düşük (a) ve yüksek (b) büyütme aşınma iz görüntüleri(x50-x200)

	Darbe Bölgesi	Kayma Bölgesi	Darbe Bölgesi	Kayma Bölgesi
İşlem Görmemiş				
600 °C 60 Saat TO				
700 °C 30 Saat TO				
	(a)		(b)	

Ek Tablo 40. İşlem görmemiş, 600 °C 60 saat ve 700 °C 30 saat TO yapılmış Ti-6Al-4V alaşımının 25, 350 ve 550 °C’ de gerçekleştirilen darbeli kayma deneyleri sonrası karşı malzeme iz görüntüleri (x50)

	İşlem Görmemiş	600 °C 60 Saat TO	700 °C 30 Saat TO
25 °C			
350 °C			
550 °C	