



**PASLANMAZ ÇELİK KAPLANMIŞ A380 VE A360
ALAŞIMLARININ AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Mert Murathan ÖZEN

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR**

**PASLANMAZ ÇELİK KAPLANMIŞ A380 VE A360 ALAŞIMLARININ
AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Mert Murathan ÖZEN

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR**

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

**KARABÜK
Nisan 2023**

Mert Murathan ÖZEN tarafından hazırlanan “PASLANMAZ ÇELİK KAPLANMIŞ A380 VE A360 ALAŞIMLARININ AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Programı Seçin olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Anabilim Dalınız Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 27/04/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN (KTUN)

.....

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

Prof. Dr. Müslüm KUZU

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Mert Murathan ÖZEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PASLANMAZ ÇELİK KAPLANMIŞ A380 VE A360 ALAŞIMLARININ AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Mert Murathan ÖZEN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR

Nisan 2023, 120 sayfa

Alüminyum ve alüminyum alaşımları mukavemetli, hafif ve muadili oldukları malzemeye göre daha uygun fiyatlı olması sebebi ile keşfedildiği asırdan günümüze kadar havacılık ve uzaydan otomobillere, sağlık sanayinden savaş sanayine pekçok alanda kullanılmaktadır. Ancak bu alaşımlar sünek olmaları, sertliğinin az olması gibi sebeplerle genellikle sürekli aşınmaya maruz kalan yerlerde ya kompozit ana malzemesi olarak ya da kaplanarak kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmanın amacı; aşınma altında çalışan iki farklı alüminyum alaşımlarının uygun maliyetli bir kaplama çeşidi olan çift telli ark sprey kaplama yöntemi ile SS420 çelik kaplı A 380 ve A380 malzemelerinin aşınma özelliklerini incelemek olduğu vurgulanmıştır.

Bu çalışmada, çift telli ark sprey kaplam yöntemi ile SS 420 paslanmaz çelik kaplanmış A380(AlSi8Cu3Fe) ve A360(AlSi10Mg) altlık malzemeli numunelerin aşınma dirençlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Numunelerin karakterizasyonu

mikroyapıları, pürüzlülük, Brinell sertlik ölçümleriyle yapılmıştır. Aşınma deneyleri pin-on-flat yöntemi ile 20N sabit yük ve değişen hızlarda (1Hz, 2Hz, 3Hz) 10mm strok boyunca lineer hareket yapan SS 420 paslanmaz çelik bilya kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Aşınma sonrası mikro yapı incelendiğinde adhezyon ve pulluklanmanın yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Aşınma deneyinin sonucunda kalınlık arttıkça aşınma direncinin arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Aşınma, Abrasif Aşınma, Kaplama, Termal Sprey Kaplama,
Taguchi

Bilim Kodu : 91421

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

COMPARISON OF WEAR PROPERTIES OF STAINLESS STEEL COATED A380 AND A360 ALLOYS

Mert Murathan ÖZEN

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

**Assist. prof. Dr. Abdullah UĞUR
April 2023, 120 pages**

Aluminum and aluminum alloys have been used in many areas from aviation and space to automobiles, from the health industry to the war industry since the century they were discovered due to their strength, lightweight, and more affordable price compared to their equivalent materials. However, these alloys are generally used either as a composite main material or by coating in places subject to continuous wear due to their ductility and low hardness. The purpose of the study carried out; It is emphasized that the aim is to examine the wear properties of SS420 steel coated A 380 and A380 materials with double wire arc spray coating method, which is a cost-effective coating type of two different aluminum alloys operating underwear.

In this study, a comparison of the abrasion resistance of the A380(AlSi8Cu3Fe) and A360(AlSi10Mg) substrate material samples coated with SS 420 stainless steel by double wire arc spray coating method was made. The characterization of the samples was made by measuring their microstructure, roughness, and Brinell hardness. Wear

tests were carried out using the pin-on-flat method using SS 420 stainless steel balls that make linear motion along a 10mm stroke at a constant load of 20N and varying speeds (1Hz, 2Hz, 3Hz).

When the microstructure was examined after wear, it was observed that adhesion and plow were intense. As a result of the wear test, it was determined that the wear resistance increased as the thickness increased.

Key Word : Wear, Abrasive Wear, Coating, Thermal Spray Coating, Taguchi

Science Code : 91421

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütölmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Dr. Abdullah UğUR'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR.....	3
2.1. Soğuk Sprey Kaplama	3
2.2. Plazma Sprey Kaplama	6
2.3. HVOF	16
2.4. HVOF	26
2.5. Alev Püskürtmeli Termal Sprey Kaplama.....	29
2.6 D-Gun.....	34
2.7 Literatür Taramasından Çıkarımlar	42
BÖLÜM 3	43
TERMAL SPREY KAPLAMA	43
3.1. Termal Sprey Kaplama Tarihçesi.....	43
3.2.Termal Sprey Kaplama Tipleri.....	46
3.2.1. Alev Termal Sprey Teknikler	46

3.2.1.1. Düşük Hızlı	46
3.2.1.2 Yüksek Hızlı	47
3.2.2. Elektrikli Termal Sprey Teknikleri.....	50
3.2.2.1. Plazma Elektrik Sprey Teknikleri.....	50
3.2.2.2 Elektrikli Ark Sprey Tekniği	52
3.2.3. Soğuk Termal Sprey Tekniği.....	53
BÖLÜM 4	55
AŞINMA.....	55
4.1. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	56
4.1.1. Tribolojik Sisteme Bağlı Faktörler	56
4.1.1.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler	56
4.1.1.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler.....	59
4.1.1.3. Ortama Bağlı Faktörler	60
4.1.2. İşletme Bağlı Faktörler	61
4.1.2.1. Yük.....	61
4.1.2.2. Hareket.....	61
4.2. AŞINMA TİPLERİ	62
4.2.1. Adhesif Aşınma (Yapışma Aşınması)	63
4.2.2. Abresif Aşınma	67
4.2.3. Korozi Aşınma	70
4.2.4. Yorulma Aşınması (Fatigue Wear).....	71
4.2.5. Diğer Aşınmalar.....	74
4.2.5.1. Sürtünme Aşınması (Fretting Wear).....	74
4.2.5.2. Oymalı Aşınma	76
4.2.5.3. Erozi Aşınma	76
4.2.5.4 Öğütme Aşınması.....	77
4.2.5.5 Kavite Aşınması	78
4.3. AŞINMA DENEY VE ÖLÇÜM METODLARI	79
4.3.1 Aşınma Deney Metodları.....	79

4.3.2 Aşınma Ölçüm Metodları	80
4.3.2.1. Ağırlık Farkı Yöntemi.....	81
4.3.2.2. Kalınlık Farkı Yöntemi	81
4.3.2.3. İz Değişimi Yöntemi.....	82
4.3.2.4. Radyo İzotop Yöntemi.....	82
BÖLÜM 5	83
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	83
5.1. NUMUNE SEÇİMİ.....	83
5.2. NUMUNE HAZIRLAMA	85
5.3. SERTLİK TESTİ.....	88
5.4. MİKRO YAPILARI	89
5.6. AŞINMA TESTİ	89
5.5. PÜRÜZLÜLÜK TESTİ	91
BÖLÜM 6	93
DENEYSEL SONUÇLAR	93
6.1. SERTLİK TESTİ.....	94
6.2. SEM.....	94
6.3. EDX SONUÇLARI.....	102
6.4. PROFİL SONUÇLARI	106
BÖLÜM 7	109
SONUÇLAR	109
KAYNAKLAR	112
ÖZGEÇMİŞ	120

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

- Şekil 2.1. a)CSed HEA kaplamanın ve (b) CSed HEA- AlO_3 MMC kaplamanın 4
- Şekil 2.2. 9,4 MPa yükte ve 0,5 m/s kayma hızında test edilen (a) dökme demir astar, (b) GA ve (c) WA püskürtmeli dökme demir kaplamaların aşınmış yüzeylerinin morfolojilerini gösteren optik mikrograf [10]. 8
- Şekil 2.3. Kaplama kalınlığının ölçülmesini sağlayan kaplamaların (Ti40Al60N (a) ve Ti50Al50N (b) kesit görüntüleri [12]. 9
- Şekil 2.4. Halka tribometre üzerinde blok üzerinde aşınma tribolojik testlerinden sonrafarklı alüminyum alaşımı {(a),(c)} A380 ve {(b),(d)} A13} ile temas halinde olan Ti40Al60N{(a),(c)}, Ti50Al50{(b),(d)} kaplı halka yüzeyinden toplanan SEM görüntüleri [12]. 10
- Şekil 2.5. a) Al substrat üzerindeki PTWA-B kaplamasının enine kesitsel geri saçılmış elektron SEM görüntüleri,(b) intersplat bölgelerinde erimemiş partiküller, gözeneklilik ve koyu gri damarlar, (c) intersplat bölgesinde koyu gri faz içinde mikro çatlaklar [1]. 11
- Şekil 2.6. a) $R_a=195\pm 20$ nm, $R_q=250\pm 20$ nm ve $R_t=2,5\pm 0,5$ μ m pürüzlülük 12
- Şekil 2.7. a) Yağlanmamış testler için döngü sayısına karşı sürtünme grafiklerinin. 12
- Şekil 2.8. 100 N sabit yükte 0,5'ten 20 Hz'ye adım adım artan ileri geri hareket frekansı ile CrN kaplı TCR'ye karşı kayan termal püskürtme kaplı silindir iç çapı numuneleri için COF-Kayma Hızı Stribeck eğrisi [13]. 13
- Şekil 2.9. 100 N sabit yükte 0,5'ten 20 Hz'ye adım adım artan ileri geri hareket frekansı ile CrN kaplı TCR'ye karşı kayan termal püskürtme kaplı silindir iç çapı numuneleri için Yüzey Pürüzlülüğü-Frekans Stribeck eğrisi [13]. 14
- Şekil 2.10. SS 420 kaplamanın A380 alt tabakasına yapışma gücü [2]. 15
- Şekil 2.11. SEM görüntüleri [15]. 16
- Şekil 2.12. (a) FeCr – VC tozu, (b) FeCr – VC – Co tozu [18]. 18
- Şekil 2.13. "t1" (A) ve "t3"(B: genel bakış, C: delaminasyon detayı test koşulları altında WC–CoCr 5L ara katmanı üzerine bırakılan DLC tabanlı film üzerinde üretilen disk üzerinde top aşınma izlerinin SEM mikrografları (ikincil elektronlar) [19]. 20
- Şekil 2.14. (a)Al, (b)Al+25% WCCo, (c)Al+50% WCCo, (d)Al+75% WCCo, (e) %100 WCCo kaplamaların SEM görüntüleri [20]. 21
- Şekil 2.15. Ti-45Al-7Nb-2V-2Cr kaplamanın farklı yükler altındaki aşınma izinin üç boyutlu morfolojisi: (a) 35 N, (b) 40 N, (c)45 N ve (d) 50 N [29]. 27
- Şekil 2.16. Sertlik grafik [33]. 28

Şekil 2.17. Püskürtme parametrelerinin kaplama kalınlığı üzerindeki etki [34].	30
Şekil 2.18. Kaplanmış ve kaplanmamış LM24 ve LM25 numuneleri için hata çubukları ile yüke karşı mikro abrazyon aşınma hacmi grafiği [35].	31
Şekil 2.19. Toz Alev Sprey kaplanmış numune SEM görüntüleri [38].	33
Şekil 2.20. Tel Alev Sprey kaplanmış numune SEM görüntüleri [38].	34
Şekil 2.21. MAO ve Patlatma Tabancası (D-gun) sprej kaplama yöntemi ile hazırlanmış numunelerin XRD sonuçları [42].	36
Şekil 2.22. WC-Co, WC-Co-Cr ve Cr ₃ C ₂ -NiCr sermet kaplamaların yapıları sırasıyla; C1, C2, C3 [43].	38
Şekil 2.23. (a) Kaplamasız AA6063, (b) Kaplamalı AA6063 [45].	39
Şekil 2.24. a) Alümina kaplı malzemenin mikro yapısı (b) Alümina Titana kaplı malzemenin mikro yapısı [46].	40
Şekil 2.25. Alümina Titana Kaplı numunenin mikro yapısı [46].	40
Şekil 2.26. Alümina Titana kaplı numunenin mikro yapısı [46].	41
Şekil 2.27. Toz ve Patlatmalı Püskürtmeli kaplamalardan elde edilen XRD desenleri	42
Şekil 3.1. Termal Sprej Kaplamanın tarihsel gelişimi [50].	44
Şekil 3.2. Alev-Tel işlem şeması [53].	47
Şekil 3.3. Alev-Toz işlem şeması [54].	47
Şekil 3.4. HVOF işlem şeması [18].	48
Şekil 3.5. HVAF işlem şeması [56].	49
Şekil 3.6. D-Gun işlem şeması [57].	49
Şekil 3.7. Atmosferik Plazma Sprej Kaplama işlem şeması [60].	51
Şekil 3.8. Plazma Takviyeli Tel Ark Kaplama Tabancası [59].	52
Şekil 3.9. Çift Telli Ark Sprej Kaplama işlem şeması [61].	53
Şekil 3.10. Soğuk Sprej Kaplama işlem şeması [62].	53
Şekil 4.1. Sıklıkla karşılaşılan aşınma mekanizmaları [63].	63
Şekil 4.2. Endüstriyel bir parçada adeziv aşınma örneği [67].	64
Şekil 4.3. Adhesif aşınma şematik gösterimi [69].	64
Şekil 4.4. Yapışkan aşınma sürecinde gözlemlenen temsili yapışkan aktarım sürecinin şematik diyagramı; ince bir pul benzeri aşınma parçacığının (a) ve bir kama benzeri aşınma parçacığının (b) yapışkan transferi [70].	66
Şekil 4.5. Abrasif aşınma şematik gösterimi [15].	67
Şekil 4.6. a) İki ve b) üç cisimli abrazyon aşınmanın şematik gösterimi [15].	68

Şekil 4.7. Abrasif aşınma şematik gösterimi [70].	68
Şekil 4.8. Korozyona uğramış malzeme [63].	70
Şekil 4.9. Yorulma aşınması örneği [67].	72
Şekil 4.10. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi [73].	73
Şekil 4.11. Sürtünmeli aşınma mekanizmaları [75].	75
Şekil 4.12. Piston eteklerinde görülen sürtünme aşınması [76].	75
Şekil 4.13. Oymalı aşınma [68].	76
Şekil 4.14 Erozyon şematik gösterimi.	77
Şekil 4.15 Öğütmeli aşınma şematik gösterimi [68].	78
Şekil 4.16. Pompa çarkında gerçekleşen kavitasyon [78].	78
Şekil 4.17. Gemi pervanesinde gerçekleşen korozyon aşınması [79].	79
Şekil 4.18. Aşınma ölçüm testleri [80].	80
Şekil 5.1. a) A360 Alüminyum alaşımı, b) A380 Alüminyum alaşımı.	83
Şekil 5.2. Su Jeti kesme işlemi.	85
Şekil 5.3. Kumlama sonrası numuneler	86
Şekil 5.4. Kaplanmış numuneler; a) A380 kalın, b)A380 ince, c) A380 kalın, d) A380 ince	87
Şekil 5.5. Kaplanmış malzemelerin makro SEM görüntüleri	88
Şekil 5.7. QNESS Q10 A+ mikro sertlik ölçüm cihazı.	88
Şekil 5.8. SEM cihazı.	89
Şekil 5.9. Ball-on-Flat test cihazı.	90
Şekil 5.10. Ball-on-Flat test cihazı şematığı.	90
Şekil 5.11. Perthometre [84].	92
Şekil 6.1 Kaplama kalınlık SEM görüntüleri.	93
Şekil 6.2. A380 malzemenin aşınma testi sonrası makro görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) kaplamasız 3Hz, d) ince kaplamalı 1Hz, e) ince kaplamalı 2Hz, f) ince kaplamalı 3Hz, g) kalın kaplamalı 1Hz, h)kalın kaplamalı 2Hz, ı) kalın Kaplamalı 3Hz.	95
Şekil 6.3. A360 malzemenin aşınma testi sonrası makro görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) kaplamasız 3Hz, d) ince kaplamalı 1Hz, e) ince kaplamalı 2Hz, f) ince kaplamalı 3Hz, g) kalın kaplamalı 1Hz, h)kalın kaplamalı 2Hz, ı) kalın Kaplamalı 3Hz.	96
Şekil 6.4. Kaplamasız A380 ve A360 numuneler.	97
Şekil 6.5. İnce Kaplamalı A360 ve A380 numuneler.	97

Şekil 6.6. Kalın Kaplamalı A360 ve A380 numuneler.	97
Şekil 6.7. A380 malzemenin aşınma testi sonrası mezzo görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) kaplamasız 3Hz, d) ince kaplamalı 1Hz, e) ince kaplamalı 2Hz, f) ince kaplamalı 3Hz, g) kalın kaplamalı 1Hz, h)kalın kaplamalı 2Hz, ı) kalın Kaplamalı 3Hz.	98
Şekil 6.8. A360 malzemenin aşınma testi sonrası mezzo görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) kaplamasız 3Hz, d) ince kaplamalı 1Hz, e) ince kaplamalı 2Hz, f) ince kaplamalı 3Hz, g) kalın kaplamalı 1Hz, h)kalın kaplamalı 2Hz, ı) kalın Kaplamalı 3Hz.	99
Şekil 6.9. A380 malzemenin aşınma testi sonrası mikro görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) kaplamasız 3Hz, d) ince kaplamalı 1Hz, e) ince kaplamalı 2Hz, f) ince kaplamalı 3Hz, g) kalın kaplamalı 1Hz, h)kalın kaplamalı 2Hz, ı) kalın Kaplamalı 3Hz.	100
Şekil 6.10. A360 malzemenin aşınma testi sonrası mikro görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) ince kaplamalı 1Hz, d) ince kaplamalı 2 Hz, e) kalın kaplamalı 1Hz, f) kalın kaplamalı 2Hz.	102
Şekil 6.11 İnce kaplamalı numunelerin 100µm boyutta mikro görüntülerinin karşılaştırılması; a) A380, b) A360.	103
Şekil 6.12. Kalın kaplamalı numunelerin 500 boyutta mikro görüntülerinin karşılaştırılması; a) A380, b) A360.	103
Şekil 6.13. İnce kaplamalı A360 ve A380 numunelerin karşılaştırılması.....	104
Şekil 6.14. Kalın kaplamalı A380 numune.	105
Şekil 6.15. 3 Hz hızda aşınan kalın kaplamalı A360 numune.	106
Şekil 6.16. A 360 profil grafikleri.	107
Şekil 6.17. A380 profil grafikleri.	108

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1 Sertlik değerleri [37].	32
Tablo 2.2 Sertlik değerleri [42].	37
Tablo 3.1. Termal Sprey Tipleri [50].	46
Tablo 4.1. Aşınmanın bağlı olduğu faktörler.	56
Tablo 4.2 Ana malzemeye bağlı faktörler.	57
Tablo 4.3. Karşı malzemeye bağlı faktörler.	59
Tablo 4.4 Ortama bağlı faktörler.	60
Tablo 4.5. Hareket.	62
Tablo 4.6. Abrasif aşınmayı engelleme yolları [63].	70
Tablo 5.1. Altlık malzemelerin kimyasal özellikleri [82].	84
Tablo 5.2. Altlık malzemelerin fiziksel özellikleri [82].	84
Tablo 5.3. Metcoloy2'nin kimyasal özellikleri [83].	84
Tablo 5.4. Metcoloy 2'nin fiziksel özellikleri [83].	84
Tablo 5.5. Taguchi L9.	91
Tablo 6.1 Sertlik Sonuçları.	94
Tablo 6.2. Profillerin maksimum derinliğini gösteren çizelge.	108

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al : alüminyum

Ar : argon

Cu : bakır

H₂ : hidrojen

He : helyum

Mo : molibden

Ni : nikel

O : oksijen

KISALTMALAR

- AA : Aluminium Alloys (Alüminyum Alaşımı)
- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
- ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
- CAPS : Controlled Atmosphere Plasma Spraying (Kontrollü Atmosfer Plazma Püskürtme)
- COF : Coefficient of Friction (Sürtünme Katsayısı)
- CS : Cold Spray (Soğuk Sprey)
- DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
- DLC : Diamond-Like Carbon (Elmas Benzeri Karbon)
- EDAX: Energy-dispersive X-ray analysis (Enerji dağılımlı X-ışını analizi)
- EDS : Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağılımı Spektroskopisi)
- EDX : Energy Dispersive X-Ray Analysis (Enerji Dağıtıcı X-Ray Analizi)
- EIS : Electrical Impedance Spectroscopy (Elektriksel Empedans Spektroskopisi)
- EN : European Norm (Avrupa Normu)
- EPMA: Electron Probe Micro Analysis (Elektron Prob Mikro Analiz)
- ESD : Electro Spark Deposition (Elektro Kıvılcım Biriktirme)
- FMJ : Full Metal Jacket (Tam Metal Kaplama)
- FS : Flame Spray (Alev Püskürtme)
- HB : Hardness Brinell (Brinell Sertliği)
- HEA : High Entropy Alloys (Yüksek Entropili Alaşımalar)
- HV : Hardness Vickers (Vickers Sertliği)
- HVAF: High Velocity Air Fuel (Yüksek Hızlı Hava Yakıtı)
- HVOF: High Velocity Oxygen Fuel (Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtı)
- ISO : International Organization for Standardization (Uluslar Arası Standardizasyon Teşkilatı)
- LPPS : Low Pressure Plasma Spray (Düşük Basıncılı Plazma Sprey)
- MAO : Micro Arc Oxidation (Mikro Ark Oksidasyonu)
- MMC : Metal Matrix Composite (Metal Matrisli Kompozit)
- OCP : Open Circuit Potential (Açık Devre Potansiyeli)

- OECD : Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü)
- OM : Optical Microscope (Optik Mikroskop)
- PTWA: Plasma Transferred Wire Arc Thermal Spraying (Plazma Takviyeli Tel Ark Sprey)
- PVD : Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
- SAE : Society of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Topluluğu)
- SEM : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskop)
- SLM : Selected LASER Melting (Seçici Lazer Ergitme)
- STLE : Society of Tribologists and Lubrication Engineers (Tribologlar ve Yağlama Mühendisleri Derneği)
- TBC : Thermal Barrier Coating (Termal Bariyer Kaplama)
- TCR : Top Compression Ring (Üst Sıkıştırma Halkası)
- TEM : Transmission Electron Microscope (Transmisyon Elektron Mikroskop)
- TS : Türk Standardı
- VLM : Visible Light Microscope (Görünür Işık Mikroskop)
- VPS : Vacuum Plasma Spray (Vakumlu Plazma Sprey)
- WDS : Wavelength Dispersive Spectrometry (Dalga Boyu Dağılım Spektroskopisi)
- XRD : X-Ray Diffraction (X-Işını Difraktometresi)
- YY : Yüz Yıl

BÖLÜM 1

GİRİŞ

19.yy'dan günümüze kadar pek çok gelişime uğrayan alüminyum ve alaşımları havacılık ve uzay sanayinden otomotiv sanayine kadar pekçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu durumun sebebi olarak alüminyum alaşımlarının hafifliği, mukavemeti ve korozyon direncinin fazla olması gösterilmiştir. Öte yandan sünek olması ve erime sıcaklıklarının muadili (gri dökmedemir) metallerden düşük olması gibi sebepler bu malzemedan yapılmış parçaların aşınmaya ve sürünmeye karşı dayanımı zayıftır. Örneğin; ötektik altı alüminyum motor bloklarının çoğu, aşınmaya yönelik dayanıklılık gereksinimlerini karşılamak için bir demir gömlek kullanmak gerekmiştir. Ancak bu işlem de bir demir gömleğin kütlesi ve onunla ilişkili maliyeti gibi birçok olumsuzluklar beraberinde getirecektir.

Ötektik altı Al-Si alaşım motor bloklarının aşınma direnci iyileştirmenin bir yolu, termal püskürtme teknikleriyle bırakılan düşük karbonlu demir kaplamalar kullanmaktır. Bu sebeple pek çok çalışmada alüminyum alaşımı üzerine PTWA yöntemi ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. [1–4] Bu çalışmada abrasive aşınmanın yoğun olduğu yerlerde PTWA ile düşük karbonlu çelik kaplama yerine; kaplama maliyetinin daha uygun olan çift telli kaplama yöntemi ile düşük karbonlu çelik kaplamaların aşınması araştırılmıştır.

Çalışmada, ark sprey kaplam yöntemi ile paslanmaz çelik kaplanmış A380 ve A360 altlık malzemeli numunelerin aşınma dirençlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Numunelerin karakterizasyonu mikroyapıları, pürüzlülük, sertlik ölçüleriyle yapılmıştır. Aşınma deneyleri pin-on-flat yöntemi ile 20N sabit kuvvet ve değişen hızlarda (1 Hz, 2 Hz, 3 Hz) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aşınma testi 10mm strok boyunca lineer hareket yapan 6 mm çaplı SS 420 bilya kullanılarak Ball-on-Flat yöntemi ile gerçekleştirilmiştir

Sunulan tez çalışması 7 bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, giriş bölümü olarak verilmektedir. Bu bölümde, genel olarak Ötektik altı Al-Si alaşımı ve çalışmada neler yapıldığına kısaca değinilmiştir.

Bölüm 2’de Termal sprej kaplama işlemi ile kaplanmış alüminyum malzemelerin aşınması hakkında kaplama çeşidine göre genel literatür çalışması yer almaktadır. Ayrıca bu literatür taramasından elde edilmiş küçük bir inceleme de bu bölümde yer almaktadır.

Bölüm 3’te termal sprej kaplama yöntemi ve çeşitleri ayrıntılı olarak yer almaktadır.

Bölüm 4’te aşınma bir konu olarak ele alınmış olup aşınmaya etki eden faktörler, aşınma tipleri, aşınma deney ve ölçüm metodları yer almaktadır.

Bölüm 5’te deneysel çalışmalar başlığı altında bu çalışmada yapılan iş ve işlemler açıklanmaktadır.

Bölüm 6’da deneysel çalışma sonucunda elde edilen bulgulara yer verilmiştir.

Bölüm 7’de genel sonuçlara ve tartışmaya yer verilmiş olup Elde edilen sonuçlara göre gerekli analiz ve yorumlar yapılmıştır.

Son olarak ise kaynakça ve özgeçmiş yer almaktadır.

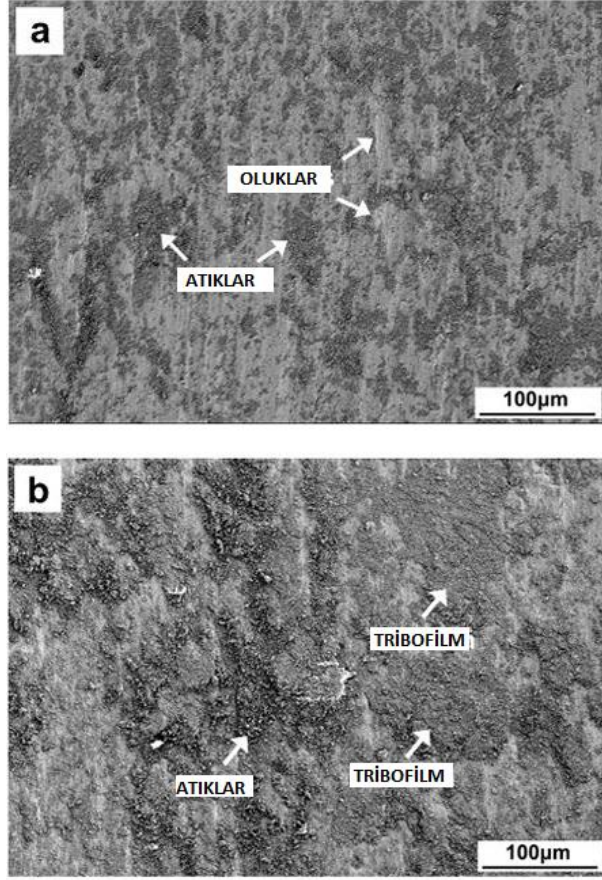
BÖLÜM 2

LİTERATÜR

Bu kısımda çeşitli silisyum bazlı alüminyum altlıklı malzemelerin bazı termal spreyc yöntemleri ile kaplanması ve bu kaplamaların aşınma davranışları üzerine literatür çalışmaları sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan termal spreyc kaplama yöntemleri Bölüm 3’de sunulmuştur. Ayrıca bu literatürler incelenmiş olup bazı sonuçlar Bölüm 2.6’da sunulmuştur.

2.1. Soğuk Spreyc Kaplama

Yin ve arkadaşları; soğuk püskürtme FeCoNiMn, HEA kaplamaların mikroyapıları ve tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Kaplamanın karakterizasyonlarını XRD, EDX, SEM cihazlarıyla gerçekleştirmişlerdir. Kaplanmış numunelerin tribolojik ölçümleri oda sıcaklığında 5 N sabit yük altında pin-on-disc yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup aşındırıcı malzeme olarak 5mm çaplı WC top kullanılmıştır. Ayrıca malzeme hacim kaybı; ASTM G99 standardına göre hesaplanmıştır. Bu çalışmada CS ile üretilen HEA kaplamaların çok düşük gözenekliliğe sahip olduğu ve HEA yapısını tamamen koruduğu gözlemlenmiştir. CS kaplama yöntemi ile kaplanmış numuneler lazer ile kaplanmış numunelerden daha düşük aşınma oranı verdiği ve daha iyi aşınma direnci sağladığı tespit edilmiştir. [5]



Şekil 2.1. a)CSed HEA kaplamanın ve (b) CSed HEA- AlO_3 MMC kaplamanın aşınmış yüzeyleri [5].

Trelka ve arkadaşları; 2022 yılında yayınladıkları çalışmada kullanılan altlık malzeme yüzeyinin soğuk püskürtmeli sermet kaplamaların [(Cr₃C₂-25(Ni₂₀Cr))- (Ni-grafit)] mikro yapı ve tribolojik özelliklerine etkisi araştırmışlardır. Tozların ve kaplamaların karakterizasyonları bir X-ray cihazı, EDAX, SEM, TEM, profilometre, ve Vickers sertlik ölçme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gevşek aşındırıcı parçacıklar ile aşındırıcı aşınma testleri, 50N yük altında, 250 g/dk akış hızında ve bir tekerlek (Ø50×20) 200rpm dönüş hızında gerçekleştirilmiştir. Sürtünme katsayısı ve kaplamaların aşınma indeksi testleri, şeması sunulan bir disk üzerinde 6 mm çapında sinterlenmiş Si₃N₄ top kullanılarak doğrusal kayma hızı $0.1ms^{-1}$ 20.000 döngü sayısı ile 5, 7 ve 8,5 mm yarı çaplarında gerçekleştirilmiştir. Al 7075 altlık üzerine püskürtülen tortular için 10N ve 20N'lik iki yük altında ve 25°C ve 250°C'lik iki sıcaklık altında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın mikro yapısı incelendiğinde: Al 7075 alaşım alt-tabakası üzerine püskürtülen kaplamalar, alt-tabakaya yapışan

seramik parçacıklarının çelik üzerindeki göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Çeliğe soğuk püskürtülen ve 25 °C'de 10 N altında incelenen sermet tortusu, en iyi aşınma direncini ve en düşük sürtünme katsayısını ortaya çıkardığı tespit edilmiştir [6].

Astarita ve arkadaşları; 2016 yılında soğuk püskürtmeli titanyum kaplamanın biriktirilmesiyle AA2024 aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine çalışma sunmuşlardır. Sürtünme ve aşınma testleri, bir konsolide protokolü izlenerek düz bir top test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Her testten önce numune ve top etanol ve basınçlı hava ile temizlendi, ardından hassas bir ölçekte tartılmıştır (0,01 mg doğruluk). Bu testler, Test Yöntemi ASTM G133, Prosedür A'nın talimatlarına kısmen uygun olarak yapılmıştır. Bir mikroskop veya beyaz ışık interferometresi olarak çalışan bir 3D temassız optik profilometre, PLu neox ile bir topografik yüzey edinimi gerçekleştirilmiştir. Lazerle tedavi edilen bölgenin makroskopik özelliklerini (derinlik ve genişlik) gözlemlemek ve mikroyapısal yönleri araştırmak için Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak mikroskobik analiz de yapılmıştır. Mikroyapıyı, tane sınırlarını ve faz dağılımını ortaya çıkarmak için Kroll reaktifi (2 mL HF, 6 mL HNO₃ ve 100 mL'ye kadar H₂O) kullanılmıştır. İncelenen her iki kaplama, işlem görmüş ve işlem görmemiş, işlem görmemiş AA2024 alaşımına göre daha iyi aşınma performansları gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle lazerle işlenmiş kaplama, dökme titanyumdan daha iyi, en iyi aşınma direncini gösterdiği tespit edilmiştir. Oksit tabakasının varlığı, tedavi edilen alandaki oksijen içeriğinde bir artışın gözlemlendiği EDX analizi ile doğrulanmıştır. Aşındırıcı aşınma mekanizmaları, kaplamanın ihmal edilebilir bir aşınması, ancak küre üzerinde ciddi bir aşınma ve kütle kaybı ile muamele edilen kaplamayı test ederken gözlemlenmiştir [7].

Watson ve arkadaşları; 2017 yılında ikosahedral fazda güçlendirilmiş alüminyum alaşımlı kaplamanın soğuk püskürtmeyle biriktirilmesi üzerine çalışma sunmuşlardır. Bu çalışmada, bir Al-Cr-Mn-Co-Zr alaşımından gaz atomizasyonu ile üretilen nanokompozit tozun, Al6061 levha altlıklarına yarı kristal takviyeli nanokompozit kaplamaların soğuk sprey kaplaması için hammadde olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. Kaplama mikroyapıları, XRD, VLM, SEM ve TEM kullanılarak değerlendirilmiştir. XRD verileri Bragg-Brentano geometrisinde CuK α

radasyonlu bir PANalytical Empyrean kırınım sisteminde elde edildi. Veriler, 20 10-95° aralığında 0.016°'lik bir tarama adımıyla elde edilmiştir. VLM için bu kesitler Keller reaktifi kullanılarak aşındırılmış ve SEM için cilalanmış durumda incelenmiştir. Geri saçılmış elektron (BSE) SEM görüntüleri, 5 hızlanma voltajında yüksek vakum modunda çalışan bir SEM kullanılarak elde edilmiştir. Kesilmiş numuneler, Cu Omni ızgaralarına monte edildi ve bunlar, 200 kV'luk bir hızlanma voltajında çalışan bir FEI Talos F200X S/TEM'de incelenmiştir. Vickers sertlik ölçümleri, 100 g yük ile bir Leco LM248 mikro-sertlik test cihazı kullanılarak metalografik kesitlerden elde edilmiştir. Çukur korozyon direnci, ASTM B117-09'a göre bir tuz-sis odasında 1008 saate (altı hafta) kadar sürelerle kaplanmış numunelerin maruz bırakılmasıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca, kullanılan spesifik koşullar; 35 °C, %95 nem, 5 g/L NaCl ve dikeyden 10°'lik bir plaka açısı olarak belirtilmiştir. Kaplamaların, hammadde tozu ile aynı faz kombinasyonunu, yani hacimce %35 ikosahedral kuasikristal dispersoidler ve biraz Al₉Co₂ içeren bir FCC Al matrisi sergilediği tespit edilmiştir. Arayüzün hemen altında substrat tane yapısında bir miktar iyileştirme ve 1-2 içinde kaplamadaki Al taneciğinde geniş bir bozulma gözlemlenmiştir. Kaplamalar ayrıca, tuz sisi maruziyetlerinde oyuk korozyonuna karşı bir direnç sergilediği gözlemlenmiştir [8].

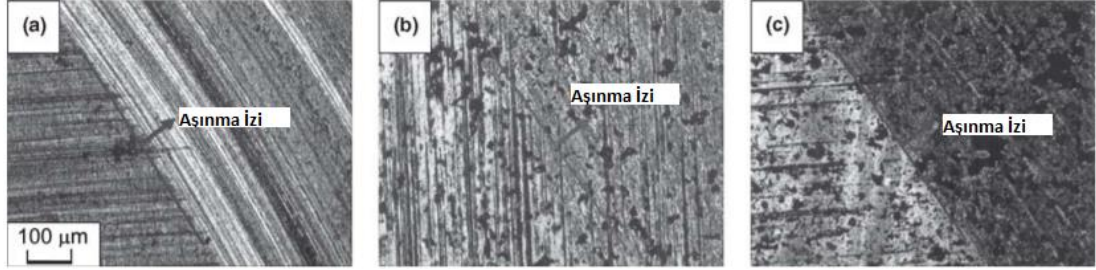
2.2. Plazma Sprey Kaplama

Ambiger ve arkadaşları; 2014 yılında alüminyum 7075-T6 malzeme üzerine plazma püskürtme yöntemi ile kaplanmış alümina-zirkonya kaplamaların aşınma davranışı üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kaplama mikroyapısı Al₂O₃, ZrO₂ ve Al₂O₃ + %40ZrO₂ kaplı numuneler, alt tabakanın mikro yapısını incelemek için SEM kullanılarak karakterize edilmiştir. Mikrosertlik testi; bekleme süresi 10 sn ve 250 g'lık bir yüke sahip kaplamaların bir kesiti üzerinde değerlendirilmiş; üç okumanın ortalama değeri kayıt edilmiştir. Aşınma testleri yapılmadan önce pim numunelerinin yüzey pürüzlülüğü Talysurf ile ölçülmüş ve beş okuma değeri ile kaydedilmiştir. Kuru kayma testleri; ASTM G99-04 standartlarına göre, bir Pim-Disk aşınma testi düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca; Kuru kayma aşınma testleri, sırasıyla 1000m, 2000m ve 3000m kayma mesafesi için 10N sabit yükte gerçekleştirilmiştir. Elektronik tartı terazisi kullanılarak numunelerin ağırlık kayıpları değerlendirilmiştir.

Hem kaplanmamış hem de kaplanmış numuneler için mikroyapısal davranışı ve aşınma mekanizmasını bulmak için SEM ile aşınma izleri gözlemlenmiştir. Alümina-Zirkonya kaplı numuneler, diğer kaplama malzemelerine kıyasla mükemmel aşınma özelliği gösterdiği tespit edilmiştir. Kaplanmış numunenin aşınmış yüzeylerinin SEM'inde, bu yüzeylerin, gerçek Al-7075T6'ninkinden maksimum aşınmaya dayanabilen çıplak alüminyumdan çok daha pürüzlü olduğu gözlemlenmiştir. Monolitik yapıdan dörtgen yapıya geçişte %8'lik hacim farkı nedeniyle değişen fazlarda genellikle Çatlaklar ve Kırıklar görülmüştür [9].

Tsunekawa ve arkadaşları; 2005 yılında katı yağlayıcı grafit ve h-BN yapısı içeren plazma püskürtmeli dökme demir kaplamalar üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada; Katı yağlayıcı olarak ortalama parçacık boyutu 10 um olan ağırlıkça %5 altıgen BN tozu kullanılmıştır. h-BN yapısı, SEM ile gözlemlenmiştir. Atomize dökme demir tozlarının temel malzemesi, C α K radyasyonu ile XRD kullanılarak tanımlanmıştır. Grafit miktarı, oksijen akışında yanma sırasında kızılötesi ışık absorpsiyonu ile gerçekleştirilen karbon analizi ile ölçülmüştür. Numune görünümü ve kesitleri, optik tarama mikroskobu ve SEM ile karakterize edildi ve element dağılımı, bir EPMA ile analiz edilmiş. Kaplama tabakalarının Vickers sertliği 2.94 N'lik bir yük ile ölçülmüştür. Rulman çeliğinden (SUJ2; 750HV0.3 ile su verilmiş ve temperlenmiş) halkalar üzerindeki kaplamaların aşınma ve sürtünme deneyleri, disk üzerinde halka konfigürasyonlu bir aşınma test cihazı kullanılarak incelenmiştir. Aşınma testi gerçekleştirilmeden önce, halkanın yüzeyi ve kaplama, sırasıyla 0.28 ve 1.44 μ m Ra değerlerine metalografik olarak hazırlanmıştır. Normal kuvvet (Fn) in uyguladığı 9.4 MPa'da tutularak hava atmosferinde hiçbir katkı maddesi içermeyen parafin bazlı yağ ile aşınma testleri yapılmıştır. Seçilen dönüş hızı 0,5 m/s'dir ve numuneler toplam 2000 m mesafe boyunca aşınmaya tabi tutulmuştur. Aşınma testlerinden sonra Mitutoyo SJ-301 kontak profilometre ile kaplamaların yüzey profili gözlemlenmiştir. Işık mikroskobu ve SEM ile aşınmış yüzeylerin ve döküntülerin kesitleri gözlenmiştir. WA ve WA/h-BN kompozit tozları ile püskürtülen dökme demir kaplamalar, yüksek bir tutuş noktası gösterdiği ve iyi aşınma önleme performansı sergilediği gözlemlenmiştir. Katı yağlayıcı içeren nispeten düşük sertliğe sahip kaplamalar, özellikle kendi

kendini yağlama etkisinden dolayı, özellikle daha yüksek yüklerde en düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu tespit edilmiştir [10].

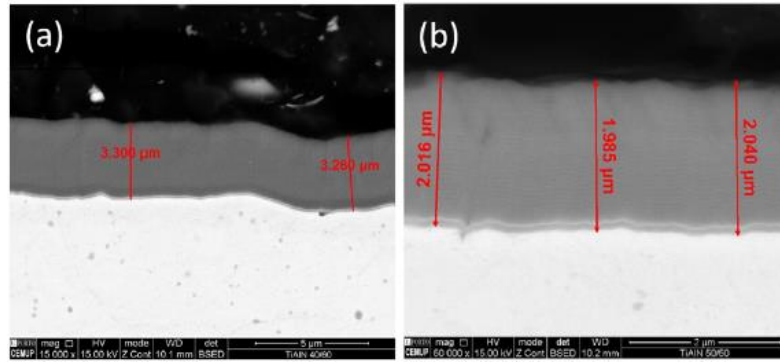


Şekil 2.2. 9,4 MPa yükte ve 0,5 m/s kayma hızında test edilen (a) dökme demir astar, (b) GA ve (c) WA püskürtmeli dökme demir kaplamaların aşınmış yüzeylerinin morfolojilerini gösteren optik mikrograf [10].

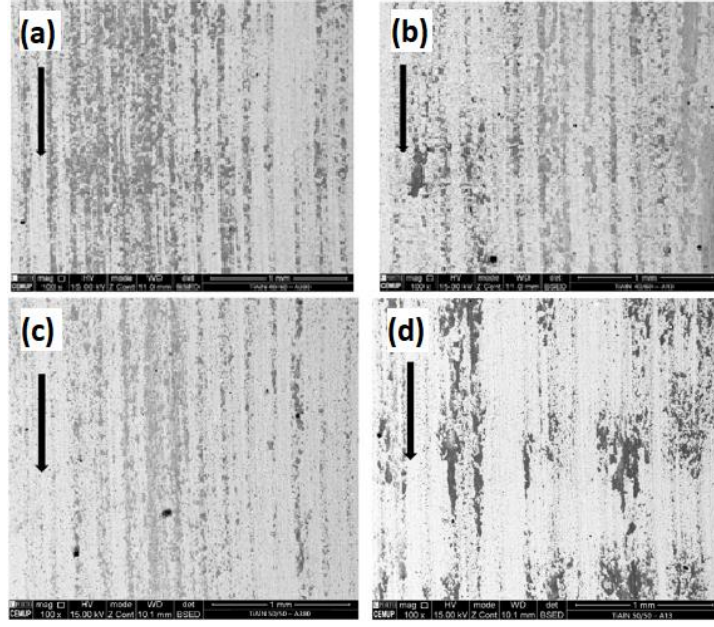
Özşahin ve arkadaşları; 2010 yılında Yüksek hızlı darbe yüklerine maruz kalan alüminyum plakaların balistik performansına yüzey kaplamanın etkisi üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Kaplama işlemi; çalışmada AA 6061 T651 altlık üzerine kaplamalar Metco 68F-NS-1 (kobalt, molibden, krom tozu) ve Metco 201NS (zirkonyum oksit tozu) kullanılarak plazma püskürtme tekniği ile yüzeylerine uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Kaplama hakkında, özellikle yağışların boyutu hakkında daha fazla bilgi edinmek için, TEM incelemeleri yapılmıştır. Deneilerde 9 mm çapında ve 19 mm uzunluğunda pirinç (CuZn36) kap ve kurşun-antimon alaşımli çekirdekten oluşan FMJ Parabellum mermiler kullanılmıştır. Darbe hızları, Oehler Research optik balistik cihazlarının (Model 55 fotoelektrik ekranlar ve Model 35P kronograf) yardımıyla ölçülmüştür. Kaplamalı ve kaplamasız plakaların ön yüzdeki penetrasyon derinlikleri ve arka yüzdeki çıkıntılar karşılaştırıldığında, kaplama katmanlarının alüminyum yüzeyinden delaminasyonu ile kaplanmış olanlarda plakaların balistik direncinde iyileşme tespit edilmiştir. 390 m/s ve üzeri darbe hızları için, Co-Mo-Cr kaplamanın balistik performansın iyileştirilmesi üzerindeki etkileri, ZrO₂ kaplamanın etkilerinden daha etkili olduğu bulunmuştur [11].

Nunes ve diğerleri; 2017 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada Şiddetli aşınmaya maruz kalan yüksek basınçlı döküm kalıpların ömrünün uzatılması üzerine bir

çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada; A380 ve A13 olan iki farklı malzeme altlık olarak kullanılmış ve PVD işlemi ile bu iki farklı alaşıma TiAlN 50/50, TiAlN 40/60 olmak üzere ikişer farklı kaplama uygulanmıştır. Kalınlık ölçümü, morfoloji karakterizasyonu ve aşınma izleri, EDAX Genesis EDX ile sağlanan SEM kullanılarak değerlendirilmiştir. Kaplama bileşimini gerekli doğrulukta değerlendirmek için, kaplamaların kimyasal bileşimini ve aralarındaki efektif farkı doğrulamak için WDS sistemi ile donatılmış bir EPMA sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tribolojik aşınma testleri kuru koşullarda, normal yük olarak 70N ve 33.9m/dak lineer hız ve pin-on-disc yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ti40Al60N, laboratuvar testlerinde çok iyi bir aşınma davranışı gösterdiği, daha düşük sürtünme katsayısı sunduğu ve daha düzensiz yüzeyinin temasın neden olduğu gözlemlenmiştir [12].

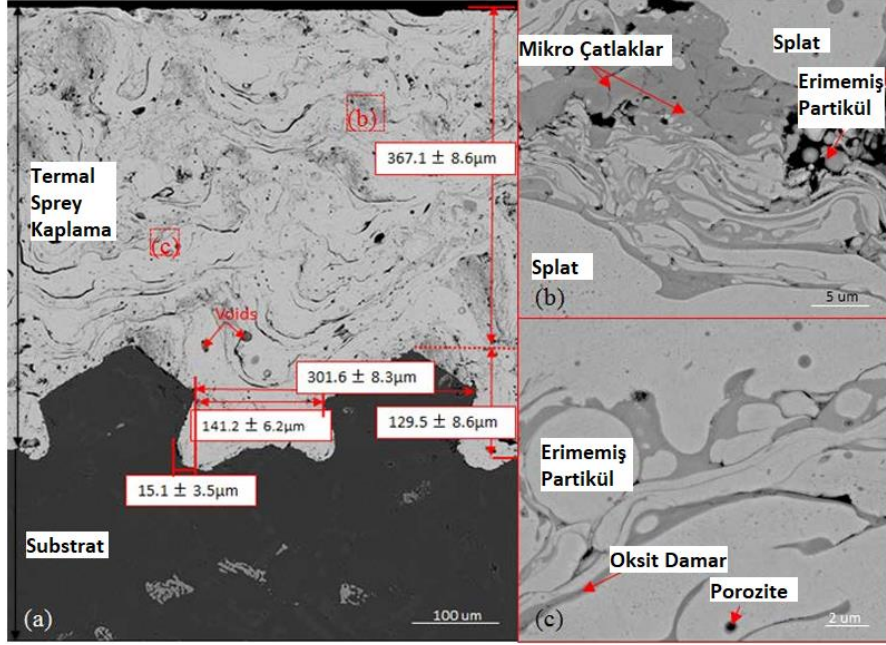


Şekil 2.3. Kaplama kalınlığının ölçülmesini sağlayan kaplamaların (Ti40Al60N (a) ve Ti50Al50N (b) kesit görüntüleri [12].



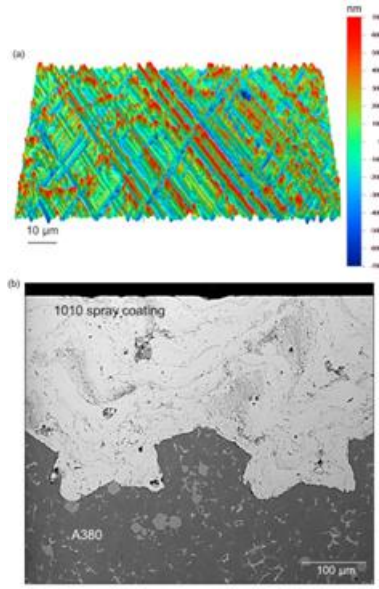
Şekil 2.4. Halka tribometre üzerinde blok üzerinde aşınma tribolojik testlerinden sonra farklı alüminyum alaşımı {(a),(c)} A380 ve [(b),(d)] A13 ile temas halinde olan Ti40Al60N[(a),(c)], Ti50Al50[(b),(d)] kaplı halka yüzeyinden toplanan SEM görüntüleri [12].

Zou ; 2016 yılında gerçekleştirdikleri çalışmalarda Alüminyum motor deliği üzerinde termal sprey kaplamaların karakterizasyonu üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada A380 altlık üzerine iki farklı PTWA yöntemi ile 1080 çelik kaplama yapılmıştır. Bu çalışmada; kaplanmış delik, ateşlenmeyen yüzer astar testine tabi tutulmuştur. Çeliğin bileşimine bağlı olarak kritik kayma hızı ve basıncı ve hafif aşınma ile şiddetli aşınma arasındaki geçişler, çeliğin aşınma davranışı incelenerek rapor edilmiştir. Dökme demir delik karşılaştırma amacıyla test edilmiştir. Aşınmamış bölge, aşınma mekanizmalarını belirlemek ve karşılaştırma için analiz edilmiştir. Ayrıca Aşınmamış bölge yapışma testleri yapılmıştır. PTWA kaplaması, splatler, gözenekler, oksitler ve erimeyen partiküller içeren bir lamel yapısına sahip olduğu ve Gözenekliliğin hacim oranı % 5.8 olduğu tespit edilmiştir. Aşındırıcı aşınma ve splat delaminasyonu, PTWA kaplamalı alüminyum motor deliğinin aşınmasına katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Kaplamalı motor deliğinin sürtünme kuvveti, dökme demir motor deliğine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda; 19.51 MPa'lık bir kohezyon kuvveti ve 29.03 MPa'lık bir yapışma kuvveti kaydedilmiştir [1].

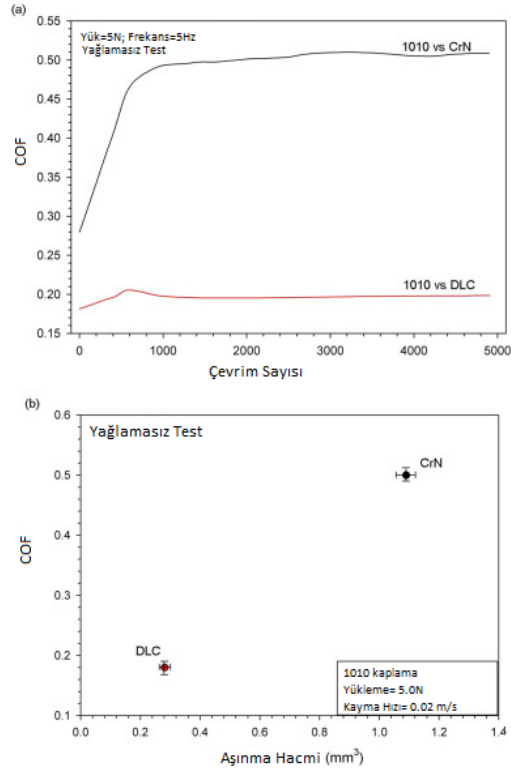


Şekil 2.5. a) Al substrat üzerindeki PTWA-B kaplamasının enine kesitsel geri saçılmış elektron SEM görüntüleri,(b) intersplat bölgelerinde erimemiş partiküller, gözeneklilik ve koyu gri damarlar, (c) intersplat bölgesinde koyu gri faz içinde mikro çatlaklar [1].

Banerji ve diğerleri; 2017 yılında gerçekleştirdikleri çalışmalarda demir oksitlerin termal olarak püskürtülmüş 1010 çelik kaplı silindir deliklerinin kayma sürtünmesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada TCR, DLC ve krom nitrür (CrN) içeren kaplamalar kullanılmıştır. Bu çalışmadaki tribolojik testler; 50N yük ve altında 2.0 – 40.0mm strok aralığında, 5.0 ila 8.0Hz frekansta ileri-geri test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. İlk yağlamasız kayma periyodu ile sınır yağlamalı kayma testleri, DLC için 0.10 ve CrN için 0.16'lık düşük kararlı durum COF değeriyle sonuçlandığı bulunmuştur. DLC kaplı TCR'ye karşı sınır yağlamalı kayma sırasında gözlenen 1010 kaplamanın düşük sürtünme ve aşınması, kayma yüzeylerinde oluşan bir yağ kalıntısı tabakasının üstünde amorf bir karbon tabakasından oluşan kompozit bir tribolayer nedeniyle olduğu tespit edilmiştir [4].



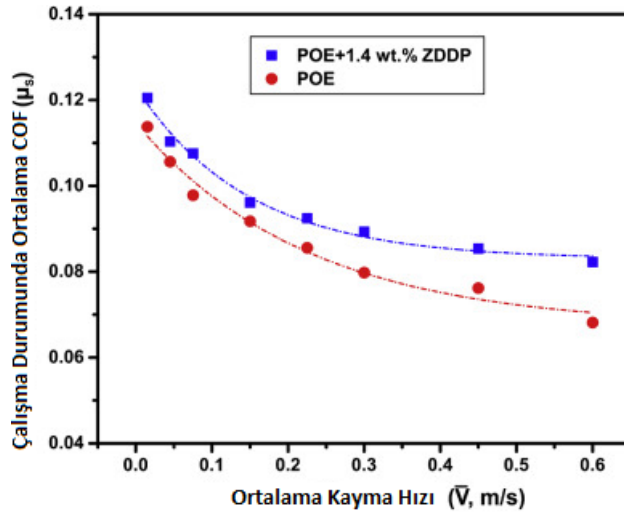
Şekil 2.6. a) $R_a=195\pm 20$ nm, $R_q=250\pm 20$ nm ve $R_t=2,5\pm 0,5$ µm pürüzlülük parametreleri ile 1010 sprey kaplamalı motor deliği üzerinde çapraz çizgili honlama işaretlerini gösteren optik profilometri görüntüsü; b) 1010 sprey kaplama ve A380 substratının enine kesitinin sem görüntüsü [4].



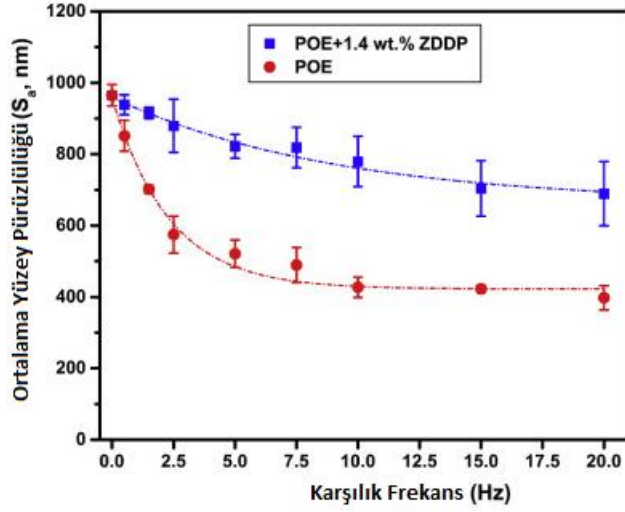
Şekil 2.7. a) Yağlanmamış testler için döngü sayısına karşı sürtünme grafiklerinin

temsili katsayısı; b) CrN ve DLC kaplı piston segmanlarına (yük= 5,0 N, kayma hızı 0,02 m/s) karşı 1010 püskürtme kaplama üzerinde gerçekleştirilen yağsız testler için ortalama COF [4].

Lou ve diğerleri; 2019 tarihinde gerçekleştirdikleri çalışmada Termal spray düşük karbonlu çelik kaplamaların kuru ve yağlanmış sürtünme davranışı üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada benzinli motorda yaklaşık 10 MPa olan TCR'nin yaşadığı tepe basıncı dikkate alınarak, 25 °C'de ve 100 N (8,3 MPa) sabit yük altında farklı kayma hızlarında yağlamalı kayma testleri yapılmış; tribolayers evrimini belirlemek için, Raman spektroskopisi gözlemleri, 5 Hz'lik belirli bir ileri geri hareket eden frekansta gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak Stribeck eğrileri de kullanılmıştır. COF değeri; İlk 20 döngü için 0,18 olurken bir 900 döngü çalıştırdıktan sonra 0,34'e arttığı gözlemlenmiştir. Yerinde yapılan Raman gözlemlerine göre, kayma testleri ilerledikçe kayma kaynaklı yüzey oksitlerinin bileşimleri ağırlıklı olarak düşük döngülerde ve yüksek döngülerde çoğunlukla Fe_3O_4 'ten Fe_2O_3 'e değiştiği gözlemlenmiştir. Stribeck eğrileri şeklinde çizilen COF değerleri, oksidasyon aşınmasının spray kaplı yüzeyin pürüzlülüğünü azalttığı zaman sınır yağlamadan karışık yağlama rejimine geçişin daha düşük bir hızda gerçekleştiği bulunmuştur [13].

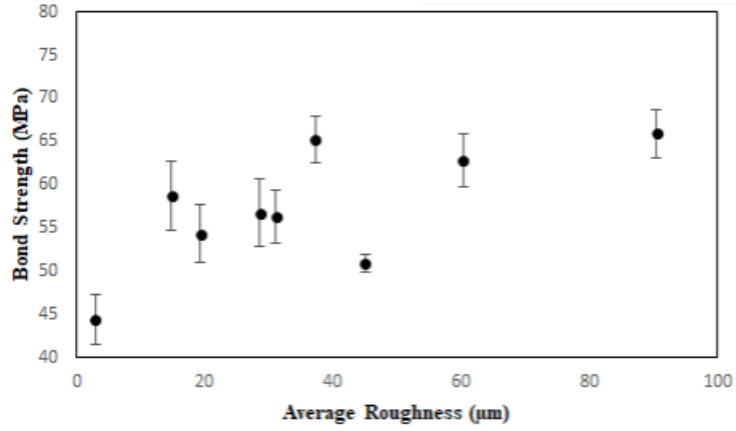


Şekil 2.8. 100 N sabit yükte 0,5'ten 20 Hz'ye adım adım artan ileri geri hareket frekansıyla CrN kaplı TCR'ye karşı kayan termal püskürtme kaplı silindir iç çapı numuneleri için COF-Kayma Hızı Stribeck eğrisi [13].



Şekil 2.9. 100 N sabit yükte 0,5'ten 20 Hz'ye adım adım artan ileri geri hareket frekansı ile CrN kaplı TCR'ye karşı kayan termal püskürtme kaplı silindir iç çapı numuneleri için Yüzey Pürüzlülüğü-Frekans Stribeck eğrisi [13].

O'Neil ve diğerleri; 2022 yılında yayınladıkları çalışmada plazma aktarımlı tel ark kaplama ile otomotiv motorunun yeniden imalatı için dökme demir ve alüminyum alaşımın darbeli Su Jeti ile pürüzlendirilmesini araştırmışlardır. Bu çalışmada Mikroyapısal karakterizasyon, SEM kullanılarak gerçekleştirilmiş ve pürüzlülük değeri bir profilometre ile ölçülmüştür. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 60 μm 'den büyük olan numuneler için PTWA sprey kaplamanın altlık yüzey profilini yansıttığı gözlemlenmiştir. Ortalama 20 μm yüzey pürüzlülük değerinin üzerinde, ayrılmaya dayalı bozulmadan sonra yüzeyde kalan kaplama miktarının arttığı tespit edilmiştir [2].

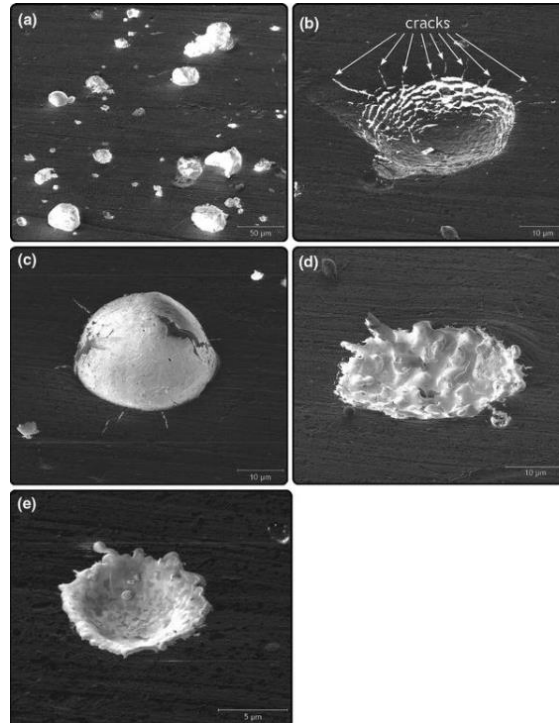


Şekil 2.10. SS 420 kaplamının A380 alt tabakasına yapışma gücü [2].

Venci ve diğerleri; 2009 tarihinde Al-Si döküm alaşım alt tabaka üzerine atmosferik plazma püskürtme ile biriktirilen demirli kaplamaların mikro yapılarının ve tribolojik özelliklerinin korelasyonu üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada bir termal sprej kaplama yöntemlerinden Atmosferik Plazma Sprej kaplama işlemi kullanılarak; EN AlSi10Mg malzemesi üzerine Metco 92F ve Sulzer Metco 4052 kaplanmıştır. Test malzemelerinin mikro yapısı, kaplamaların kaplanmış yüzeye dik olarak kesildiği OM ile analiz edilmiştir. Kaplamalarda bulunan fazlar, XRD ile analiz edilmiştir. Sertlik, 10 kg'lık bir yük altında bir Vickers sertlik test cihazı kullanılarak ve bir mikro-Vickers sertlik test cihazı kullanılarak 100 g'lık bir yük altında mikrosertlik ölçülmüştür. Tribolojik testler, disk üzerinde pimli tribometre üzerinde kuru kayma koşulları altında, oda sıcaklığında (≈ 25 °C) ortam havasında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi numunesi olarak 2.5 mm çapında ve 30 mm uzunluğunda test edilen malzemelerin silindirik pimleri kullanılmıştır. Ayrıca testler 1 m/s'lik sabit kayma hızı, 5000 m'lik sabit kayma mesafesi ve 5 / 10 / 15 / 20 ve 25 N'lik normal yük. Yaklaşık 5 mm²'lik temas alanı dikkate alındığında, özgül yük sırasıyla 1 / 2 / 3 / 4 ve 5 MPa koşullarında incelenmiştir. Testten sonra pimlerin aşınmış yüzeyleri ve aşınma ürünleri SEM ile incelenmiştir. İncelenen koşullar için her iki kaplamanın da gri dökme demire göre daha iyi aşınma direncine ve daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her iki kaplama da genellikle standart pistonlu makinelerde ortaya çıkan yük taşıma kapasitesi kriterlerini karşıladığı tespit edilmiştir. Aşınma mekanizmaları analizi, baskın aşınma mekanizmasının adhesif aşınma olduğu tespit edilmiştir [14].

2.3. HVOF

Ceviz 2022 yılında yaptığı çalışmada; AA7075-T6 alaşımı ve AA7075-T6 alaşımları üzerine HVOF termal sprey ile kaplanmış WC-10Co-4Cr kaplamanın farklı sıcaklıklardaki sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemiştir. Çalışmada; AA7075-T6 alaşımının farklı sıcaklıklarda (RT, 100°C, 200°C ve 300°C) bir WC4Co bilyesine karşı termal sürtünme davranışı, aşınma oranı (W), COF (μ) ve sertliğini karakterize etmek için yüksek sıcaklıklı bir pin-on-disk tribometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak; 100°C'ye kadar aşınma mekanizmasının abrazif olduğu, ancak sıcaklık artışı adhezif aşınmaya, plastik deformasyona ve oksidasyon yorgunluğuna neden olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan yüke ve AA7075-T6 alt tabakasının termal genişmesine bağlı olarak oksit katmanları ve çatlak ilerlemesi meydana geldiği tespit edilmiştir. 200°C'den sonra aşınmış yüzeydeki oksit tabakaları sürtünme katsayısının düşmesine neden olduğu ve 300°C'de oksit delaminasyonu ve yığılmalar olduğunu ifade etmiştir [15].



Şekil 2.11. SEM görüntüleri [15].

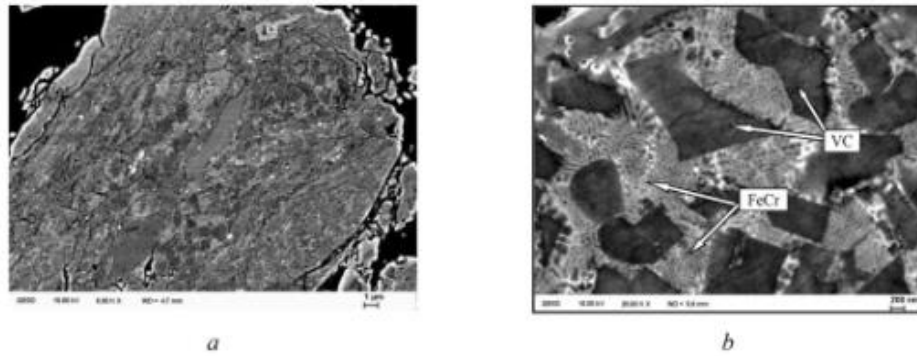
Edrisy ve arkadaşları; 2005 yılında Termal sprey çelik kaplamalar için aşınma mekanizması haritaları üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada PTWA 1020, HVOF 1020 kullanılmıştır PTWA işlemi ve HVOF işlemi kullanılarak alüminyum alaşımları üzerine bırakılan düşük karbonlu çelik bazlı termal sprey kaplamalardaki aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Çalışmada Aşınma testleri, kuru hava atmosferinde alet çeliği pimlerine karşı 5 ila 75 N yük aralığında ve 0,2 ila 2,5 m/s kayma hızı aralığında bir çevre odası ile donatılmış disk üzerinde pim tipi bir tribometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınmış yüzeylerin ve gevşek döküntülerin mikro yapılarını, morfolojilerini ve bileşimlerini karakterize etmek için SEM kullanılmıştır. Düşük kayma hızlarında ve yüksek yüklerde, temas yüzeylerinde aşırı derecede deforme olmuş demir splat uçlarının kırılması nedeniyle kaplamaların aşınma oranları yüksek olduğu dolayısıyla hepsi bir mekanik aşınma rejimi sergilediği tespit edilmiştir. Aşınma haritalarının, aşınma oranlarının kaplamaların bileşimlerine ve dolayısıyla üretimlerinde kullanılan termal püskürtme tekniğine duyarlı olduğunu gösterdiği tespit edilmiştir [3].

Picas ve arkadaşları; 2017 yılında yayınladıkları çalışmada hafif alaşımlı yüzeylerde dubleks kaplama sisteminin (HVOF + PVD) karakterizasyonunu araştırmışlardır. Kaplamaların SEM gözlemi için numuneler enine bir kesitten alınmış ve standart metalografik tekniklerle hazırlanmıştır. Kaplamaların gözenekliliği ve kalınlığı, optik mikroskop kullanılarak değerlendirilmiştir. Ayrıca Pürüzlülük (Ra), kaplama sertliği ölçülmüştür. Dubleks kaplama sistemlerinin tribolojik değerlendirmesi, kuru koşullarında, ASTM G-99 aşınma testi standardına göre pin-on-disc tribometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler yaklaşık %50 bağıl nem ve 25 °C ortam koşullarında; 6 mm çapında bir WC-6Co sinterlenmiş bilya, 5 N'luk bir yük ile 0,05 m·s⁻¹ sabit doğrusal hızda kaplanmış alt tabakalara kaydırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Koruyucu kaplamalar olmadan hafif metal alt tabakalar zayıf tribolojik davranış gösterdiği tespit etmişlerdir. Kalın HVOF ara katmanlarının kullanılmasının, alt katmanın (alüminyum veya magnezyum) özelliklerinin ince üst seramik katmanın özelliklerini önemli ölçüde etkilemediği gözlemlenmiştir [16].

Pradeep Kumar ve arkadaşları; 2021 yılında yayınladıkları çalışmada HVOF kaplama yöntemi ile gerçekleştirilen alüminyum altlık üzerine WC-Co

kaplamalarının kuru kayma sürtünmesi ve aşınma performansını araştırmışlardır. Numune ve kaplamaların karakterizasyonları SEM ve EDS cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiş olup WC-Co kompozit tabakalar üzerinde mikroyapı incelemeleri, sürtünme aşınma testleri ve sertlik testleri yapılmıştır. Bu çalışmalarında; kaplamaların kuru kayma sürtünme ve aşınma verimleri ASTM-G99 standardına göre disk (çelik) pimli makine kullanılarak oda sıcaklığında 0.314–1.257m/s kayma hızı ve 25–100N yük aralığında incelemiş kayma testi için bir disk pimi kullanılmıştır. Kaplamalı numuneler; altlık malzeme ile karşılaştırıldığında, HVOF püskürtmeli WC-Co kaplamaları sertlikte daha iyi bir artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, kobalt konsantrasyonunda bir artış, WC-%10'dan daha düşük sertlik, daha düşük aşınma ve daha yüksek sürtünme katsayısına yol açtığı tespit edilmiştir [17].

Hutsaylyuk ve arkadaşları; 2020 yılında HVOF yöntemi ile alüminyum alaşımının aşınma direncinin iyileştirilmesi üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada altlık malzeme olarak AA 7075 kullanılıp üzerine HVOF kullanılarak (FeCr – VC) ve (FeCr – VC – Co) kaplama yapılmıştır. Bu kaplama tozlarının mikroyapı görüntüleri aşağıda verilmiştir.

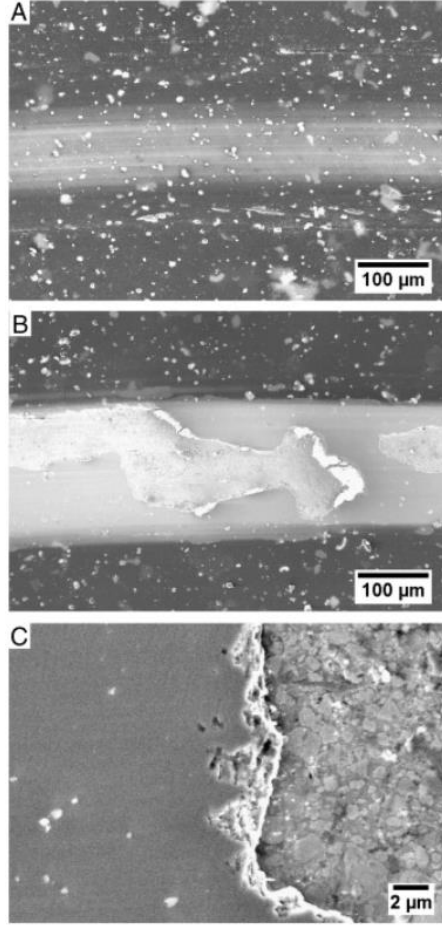


Şekil 2.12. (a) FeCr – VC tozu, (b) FeCr – VC – Co tozu [18].

Kaplamaların elastik-plastik özellikleri, P – f (h) yükleme diyagramının otomatik olarak kaydedilmesiyle “Mikron-gama” cihazında dinamik girinti yöntemiyle incelenmiştir. Malzemelerin yüzey katmanlarının aşınma direncini değerlendirmek için bir çizik yöntemi kullanılmıştır. HVOF yöntemi ile elde edilen kaplamalarda, toz

karışımların tam olarak erimemiş damlacıklarının kristalleşmesine bağlı olarak tipik bir katmanlı yapının oluştuğu gözlemlenmiştir. Katmanlar, aralarında oksit tabakaları ile lamelli kaplamalar oluşturduğu tespit etmişlerdir. Kaplama oluşturmak için toz karışımına kobalt ilavesiyle aşınma direncinin arttığı tespit etmişlerdir [18].

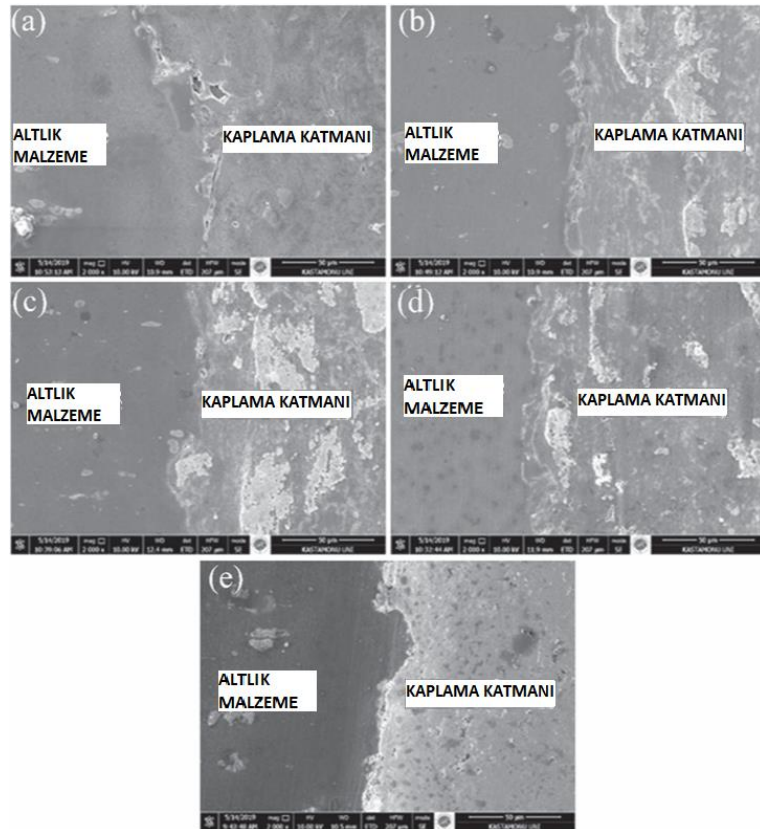
Bolelli ve arkadaşları; 2011 yayınladıkları çalışmada AA6082-T6 altlık üzerine uygulanan HVOF WC-CoCr/CVD DLC hibrit kaplama sistemlerinin aşınma ve korozyon davranışını incelemişlerdir. Tribolojik testler; sinterlenmiş alümina bilyeler (nominal sertlik HV = 19 GPa) kullanılarak, toplam kayma mesafesi 5000 m, bağlı doğrusal hız 0,3 m/s, aşınma izi yarıçapı 6 mm, sıcaklık ve bağlı nem sırasıyla % (25 ± 2) °C ve % (55 ± 2) parametrelerinde ince film kaplı numuneler üzerinde kuru koşullarda tek yönlü disk üzerinde bilye tribolojik testler yapılmıştır. Ayrıca bu testler; normal yük 5 N, bilye çapı 6 mm "t1", Normal yük 5 N, bilye çapı 3 mm "t2", Normal yük 10 N, bilye çapı 3 mm "t3" olmak üzere 3 farklı kombinasyonda gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak; "t1" testinde, çıplak alüminyum üzerine bırakılan film, sürtünme katsayısında ani artış sergilemediği; bununla birlikte, bu sistemin çizilme yapışma testinde t1 ve t3 arasında gözlemlenenlere biraz benzer olan çatlaklar ve lokal delaminasyonlar bulunmuştur [19].



Şekil 2.13. "t1" (A) ve "t3"(B: genel bakış, C: delaminasyon detayı test koşulları altında WC–CoCr 5L ara katmanı üzerine bırakılan DLC tabanlı film üzerinde üretilen disk üzerinde top aşınma izlerinin SEM mikrografları (ikincil elektronlar) [19].

Akkaş ve arkadaşları; 2020 yayınladıkları çalışmalarında, HVOF termal püskürtme yöntemi kullanılarak AA2024 üzerinde üretilen WCCo-Al kompozit kaplamaların mikro yapısal, mekanik ve elektriksel iletkenlik özellikleri araştırılmıştır. Kaplamaların karakterizasyonları; SEM, EDS ve bir tür sertlik ölçüm (50 ve 200 g yük altında 16 s bekleme süreli ve Astm-E92 standardına göre ölçüm yapılmış) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış numuneler; mikro yapıları, faz kompozisyonları, mikro sertlikleri, elektriksel iletkenlikleri ve aşınma özellikleri açısından karşılaştırılmıştır. Elektriksel iletkenlik değerleri; 2.067 m/Ω·mm² birimlerinde ölçülmüş ve Astm-B193 standardına göre hesaplanmıştır. Aşınma testleri; oda koşullarında, Ø6 mm çapında 100Cr6 malzemeden yapılmış küresel çelik bilyeler kullanılıp Astm-G133 standardına göre ileri geri aşınma test yöntemi

ile hem yüzeylere hem de kaplama katmanlarına uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu testler; 10 N yük altında 350 m kayma mesafesi ile gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı bilyeler için kullanılmıştır. Tribolojik testler; 1, 3, 5, 7, and 9N yükler altında gerçekleştirilmiştir. Aşınmadan sonra kaplamaların mikro yapısı, faz bileşimi ve yüzeyleri SEM ve bir XRD grafiği kullanılarak incelenmiştir. XRD sonuçlarında, WCCo-Al kaplama tabakasının Al, Al_{0.52}Co_{0.48}, Al₃₀Mg₂₃, Al_{0.47}Co_{0.53}, MgCuAl₂, WCu₂Al₈, AlCo, Al₁₂W ve BNi₂ fazlarından oluştuğu gözlemlenmiştir. WCCo ilavesinin kaplamaların sertliğini arttırdığını tespit etmiştir. WCCo ilavesi kaplamaların elektriksel iletkenliğini, aşınma oranlarını ve sürtünme katsayılarını düşürdüğü tespit edilmiştir. Girinti testlerinde, kaplamaların sertlik değerlerinin genel olarak artan uygulanan yük ile arttığı tespit edilmiştir. Korozyon testlerinde kaplama tabakasındaki WCCo miktarı arttıkça kaplamaların korozyon direncinin arttığı gözlemlenmiştir [20].



Şekil 2.14. (a)Al, (b)Al+25% WCCo, (c)Al+50% WCCo, (d)Al+75% WCCo, (e) % 100 WCCo kaplamaların SEM görüntüleri [20].

Kiragi ve arkadaşları; 2019 yılında Taguchi metodu kullanılarak TiAlN Kaplı alüminyum alaşımın eroziv aşınma tepkisinin parametrik optimizasyonunu araştırmışlardır. Bu araştırmada, AA1050 ve AA5083 alüminyum alaşımli substratlar üzerinde TiAlN kaplamalar geliştirmek için yüksek hızlı oksijen-yanık termal püskürtme kullanılmıştır. Kaplamaların karakterizasyonları SEM, EDS ve sertlik testleri ile sağlamışlardır. Eroziv aşınma çalışmaları, ASTM G-134 standardına göre bir su jeti erozyon test cihazı kullanılarak; 15°'den 90°'ye 15°'lik aralıklarla erozyon ölçümü yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, kontrol faktörlerinin kaplama aşınma performansı üzerindeki etkisini incelemek için dört seviyede çizilen dört kontrol faktörülü L-16 ortogonal dizi standardına sahip Taguchi tekniği kullanılmıştır. Aşındırıcı besleme hızı, darbe hızı, çarpma açısı ve aşındırıcı boyutu, kaplamanın aşındırıcı aşınmasını etkileyen önemli faktörler olarak seçilmiştir. Bu nedenle, kullanılmıştır. ANOVA tekniği; tepki parametreleri üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olan faktörleri ve optimum koşulları araştırmak için Minitab 16 yazılımı kullanılarak istatistiksel analiz için kullanılmıştır. Yüksek hızda, yüksek çalışma hızı için tepelerin ve vadilerin ayrılması, çatlaklar, aşınma olukları ve krater oluşumu gözlemlenmiştir. Hem AA1050'nin hem de AA5083 aşındırıcı aşınma hızına hakim olan en önemli kontrol faktörlerinin çarpma hızı, çarpma açısı olduğu tespit edilmiştir [21].

Magnani ve arkadaşları; 2009 yılında AA7050 T7 üzerine soğutma altında püskürtülen Cr 3C 2NiCr-HVOF kaplamaların korozyon ve aşınma özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, Diamalloy 3007 tozu kullanılarak HVOF tekniği ile sermet kaplamalar hazırlanmıştır. Püskürtme parametrelerinin korozyon, sürtünme ve aşındırıcı aşınma direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kaplamalar; SEM, EDS, XRD ve Vickers mikrosertlik sertlik ölçme test(Her numune için 300 g'lık bir yük ve ortalama 20 girinti) cihazı kullanılarak karakterize edilmiştir. Her kaplama için aşınma testleri; %20 bağıl nem ve oda sıcaklığında, 139 rpm dönme hızı, 50 N yük ve aşındırıcı SiO₂ parçacıkları ile lastik tekerlek ekipmanı (ASTM G 65-91 D) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi; %20 bağıl nem ve oda sıcaklığında, disk üzerinde bilye ekipmanı, ASTM G 99-90 kullanılarak yapılmıştır. Farklı kaplamaların yapısal karakterizasyonu, daha yüksek oksijen veya daha yüksek basınçlı hava akışı kullanılarak hazırlanan numunelerin alt tabakaya iyi bağlandığını,

standart koşullar kullanılarak hazırlanan numunenin ise kaplama içinde bir miktar delaminasyonla çatlaklar gösterdiği gözlemlenmiştir. İncelenen tüm kaplamalar, alüminyum alaşımına kıyasla yüksek kayma gösterdiği ve aşındırıcı aşınma direnci, AA7050-T7alüminyum alaşımından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yüksek taşıyıcı gaz akışı kullanılarak püskürtülen kaplama, %3.5 NaCl çözeltisi içinde en yüksek korozyon direncini gösterdiği ve yaklaşık 26 saatlik testten sonra bile alt tabakaya çukurlaşma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Daha uzun daldırma süreleri (72 saat) için yapılan testler, standart ve daha yüksek oksijen akışı kullanılarak püskürtülen numuneler için toplam empedans değerlerinin önemli ölçüde düştüğü gözlemlenmiştir [22].

Yao ve arkadaşları; 2017 yılında yayınladıkları çalışmada HVOF püskürtme Fe-bazlı amorf kaplamaların ısıl iletkenliği ve aşınma davranışını araştırmışlardır. Toz ve kaplanmış kaplamaların EDX, SEM ve Vickers mikrosertlik test cihazı (15 ölçüm 100 gf uygulanan yük ve 10 s girinti süresi) ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin termal stabilitesi, diferansiyel tarama kalorimetresi ile bir argon atmosferi altında oda sıcaklığından 1000 °C'ye kadar 20 °C/dk hızında sürekli ısıtma modunda incelenmiştir. Kaplamanın bağlanma gücü, ASTM C633-01 standardına belirlenmiştir. Kayma testleri, 30 N yük, 1 mm strok uzunluğu, 20 Hz frekans, 30 dakikalık süre ve havada oda sıcaklığı ile 400 °C sıcaklık aralığında ileri geri hareket ile gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların aşınma hacmi kaybı, konfokal taramalı lazer mikroskopu kullanılarak ölçülmüştür. Her iki Fe bazlı kaplama da, %0,9'un altında gözenekliliğe ve ortalama %0,16-0,18'lik son derece düşük oksijen içeriğine sahip yoğun, katmanlı yapılar gözlemlenmiştir. Her iki kaplama da referans paslanmaz çelik kaplamadan (5.85 W/(m·K)) çok daha düşük termal iletkenlik gösterdiği, termal bariyer özelliği gösterdiği bulunmuştur. Amorf kaplama, oda sıcaklığından 400 °C'ye kadar yüksek karbonlu martensitik GCr15 çeliğine kıyasla daha iyi aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Sıcaklık yükseldikçe, tribolojik reaksiyonun katkısı arttığı, bu da sürtünme katsayısına ve kaplamanın aşınma hızının en yüksek 200 °C'de ve en düşük 400 °C'de olmasına yol açtığı tespit edilmiştir [23].

Özkavak ve arkadaşları; 2019 yılında yayınladıkları çalışmada Al-2024, Al-6082 ve Al-7075 alaşımları üzerinde HVOF püskürtmeli WC-Co ve WC-CoCr kaplamaların

aşınma özellikleri karşılaştırmışlardır. Kaplamaların özellikleri, püskürtmeli kaplamaların mikro yapıları, tribolojik özellikleri ve kayma aşınma direnci dikkate alınarak kaplama ve altlık tipine göre incelenmiştir. WC-CoCr kaplamaların, WC-Co kaplamalara göre daha ince bir kaplama verirken daha yüksek sertlik sergilediği tespit edilmiştir. Kaplamada Cr bulunması karbür tanelerinin bağlanmasını arttırdığı tespit edilmiştir. WC-CoCr kaplamalar, WC-Co kaplamalara kıyasla tüm Al alaşımlı alt tabakalar için daha iyi aşınma direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Kaplama işlemi sırasında WC fazının hafif ayrışması meydana geldiği ve bu da aşınma direncine katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. En yüksek aşınma direnci Al-7075 alaşımı üzerine WC-CoCr kaplamada elde edilmiştir [24].

Özel; 2013 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada HVOF püskürtmeli WC-Co/NiCrBSi, Cr₃C₂ kaplamaların mikroyapısı ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Bu çalışmada; altlık malzeme olarak AA7075-T651, AA5083, AA2024-T4 kullanılmış olup HVOF prosesi ile kaplama gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış numuneler; bir SEM, enerji dağılımlı EDX, XRD; sertlik ve bağlanma kuvveti vasıtasıyla karakterize edilmiştir. Maksimum sertlik ve minimum yüzey pürüzlülüğünün WC-Co ile kaplanmış numunelerde elde edildiği gözlemlenmiştir. AA2024-T4 substratları kullanılan numunelerin bağlanma güçlerinin maksimum olduğu tespit edilmiştir [25].

Magnani ve arkadaşları; 2008 yılında yayımlanan çalışmalarında AA7050 T7 üzerine püskürtülen WC-Co kaplamaların korozyon ve aşınma direncine HVOF parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada tozun ve kaplamalar bir EDS cihazı ile birleştirilmiş bir JEOL 5310 SEM ve X-ray jeneratörü kullanılarak karakterize edilmiştir. Aşınma testleri; %20'den düşük sabit bir bağıl nem, 15 N'lik bir yükleme ve 25 °C'lik bir sıcaklık ortamında, 100m test mesafesi ve 131rpm test hızında, ASTM G99-90'da açıklanan disk üzerinde bilye ekipmanı testine göre gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aşınma testleri; 139 rpm'lik bir dönüş hızı 50 N'luk bir yükleme altında ASTM G65-91 D'de açıklanan lastik tekerlek ekipmanı kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış numunelerin korozyon direnci, 80 mL havalandırılmış ve karıştırılmamış %3.5 NaCl sulu çözeltisi içinde püskürtülen HVOF kaplı numunelerin elektrokimyasal ölçümleriyle değerlendirilmiştir. EOC ve

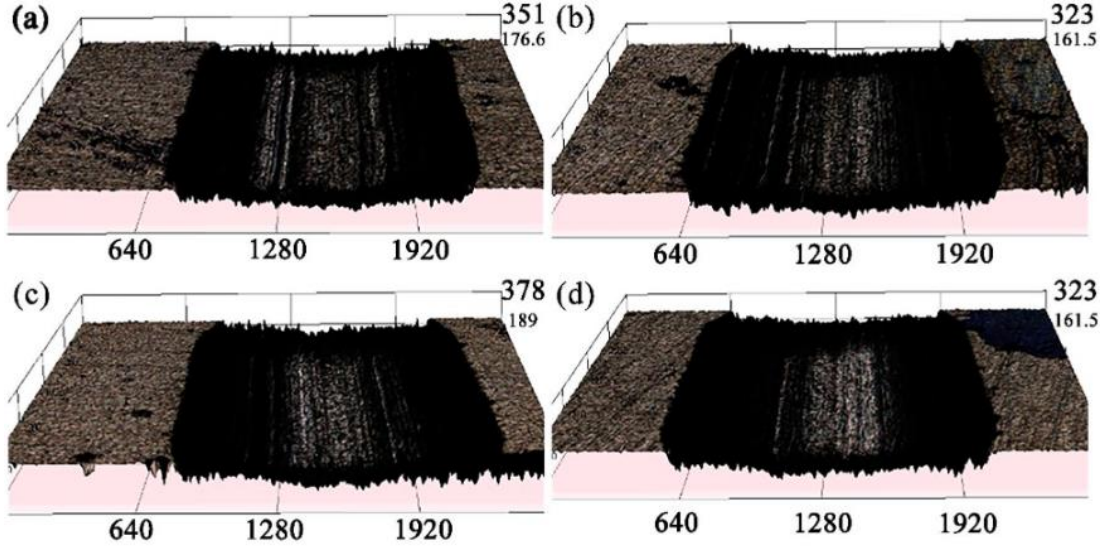
EIS ölçümleri, bir bilgisayara bağlı bir Potansiyostat/Galvanostat ve bir Frekans Tepki Analizörü kullanılarak yapılmıştır. EOC değerine 10 mV (rms) uygulanarak, 5×10^4 'ten 10^{-2} Hz'ye başlanarak ve 10 nokta /on yıl okunarak yapılmıştır. Tüm numuneler için, 72 saate kadar farklı daldırma süreleri için E OC ölçümleri yapıldı ve %3,5 NaCl sulu çözeltisine 26 saat daldırıldıktan sonra EIS diyagramları kaydedilmiştir. W19S, W19H ve W19F numunelerinin yüzeyi % 3.5 NaCl + %1.0 Alümin çözeltisi içinde daldırma testleri ile (2 saate kadar) incelenmiştir. Termal püskürtme parametrelerinin optimizasyonu, daha kompakt ve homojen bir kaplama sağlamaya katkıda bulunduğu, böylece NaCl %3,5 çözeltisi içinde alüminyum alaşımının iyi korozyon korumasına sahip bir kaplama sağladığı tespit edilmiştir. Değişen farklı püskürtme parametreleri arasında, oksijen akışındaki artış (daha yüksek alev sıcaklığı), daha korozyona dayanıklı bir kaplama elde etmede daha büyük bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. W19H numunesi, havalandırılmış ve karıştırılmamış %3,5 NaCl çözeltisinde yüksek korozyon direncini gösterdiği tespit edilmiştir. WC-Co kaplamalar, alüminyum alaşımının aşınma oranını azalttığı ve kaplanmış numuneler arasında önemli bir fark gözlemlenmiştir [26].

Ki ve arkadaşları; 2012 yılında yayınladıkları çalışmada A356'da demir esaslı termal sprey kaplamaların aşınma davranışını araştırmış ve dökme demirle karşılaştırılmışlardır. Kaplanmış numunelerin karakterizasyonları; SEM, XRD ve 10 kg yük altında Vickers makro sertlik ve 300g micro sertlik test cihazı kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Aşınma testleri; kuru kayma koşullarında, 1 m/s ve 2 m/s kayma hızında, 5000 m kayma mesafesi ve 9,8-73,5 N arasında normal yük altında gerçekleştirmek için pim ve disk tribometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. X-ışını kırınım analizinde; demir (Fe), α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃ C-2 kaplamasında; demir (Fe), FeNi, α - Fe₃O₄, α -Fe₂O₃, FeO, α FeCr, Cr₂O₃ fazlarının varlığı FeO, Fe₃Ni, α -FeCr fazları C-1 kaplamada gözlemlenmiştir. C-2 kaplamanın sertliği C-1 kaplamadan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Tribolojik test sonuçları, araştırılan koşullar için, C-2 kaplamasının, C-1 ve dökme demir ile karşılaştırıldığında daha tatmin edici aşınma ve sürtünme değerlerine sahip olduğunu göstermiştir [27].

Kramer ve arkadaşları; 1992 tarihinde aldıkları patentte alüminyum motor borularında termal püskürtme alüminyum-bronz kaplamalar üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada önerilen kaplamaların alüminyum döküm silindir bloklarında çizilmeye ve aşınmaya dayanıklı bir yüzey sağlandığı bulunmuştur [28].

2.4. HVAF

Yin ve arkadaşları ; 2021 yılında yayınladıkları çalışmada, TiAl bazlı kaplamalar ile AA5083 substratın geliştirilmiş aşınma direnci ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ti-45Al-7Nb-2V-2Cr alaşımlı kaplamanın orijinal yüzeyi ve kaplama ile altlık arasındaki bağlanma ara yüzü, SEM kullanılarak gözlemlendi ve kaplamanın bağlanma mekanizması analiz edilmiştir. Kaplama karakterizasyonları SEM, XRD(Cu- α = 1.54,056 , 40 kV ışık tüpü voltajı, 30 mA akım, sürekli tarama, 0.02°'lik tarama adımı ve 0.6 s'lik zaman adımı), mikrosertlik test cihazı (yükü100g, yükleme süresi 15sn) ile gerçekleştirmişlerdir. Kuru sürtünme testleri; oda sıcaklığında, Φ 3.969 mm çapında ve 1330 HV sertliğe sahip ZrO₂seramik bilye kullanılarak, Test yükü 35, 40, 45 ve 50 N test yüklerinde, 5 Hz sabit frekansda sürtünme katsayısı eğrisi elde edilerek gerçekleştirilmiştir. Titanyum alüminyum kaplamanın mikro sertliği, alüminyum alaşımlı alt tabakanınkinden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. TiAl alaşımlı kaplamanın aşınma mekanizması, oksidasyon aşınması ve aşındırıcı aşınma olarak tespit edilmiştir. Ti-45Al-7Nb-2V-2Cr'nin sürtünme katsayısı, alüminyum alaşımlı alt tabakanınkinden düşük olduğu tespit edilmiştir. Ti-45Al-7Nb-2V-2Cr kaplamanın ortalama aşınma hacmi, farklı yükler altında alüminyum alaşımlı alt tabakanınkinden daha küçük olduğu gözlemlenmiştir [29].



Şekil 2.15. Ti-45Al-7Nb-2V-2Cr kaplamanın farklı yükler altındaki aşınma izinin üç boyutlu morfolojisi: (a) 35 N, (b) 40 N, (c)45 N ve (d) 50 N [29].

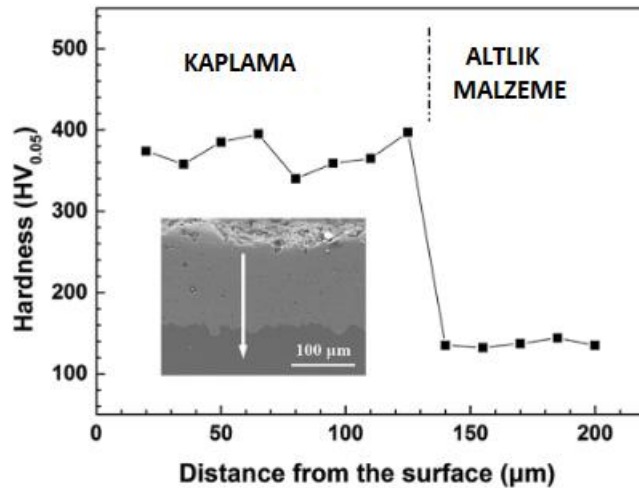
Trompetter ve arkadaşları; 2010 yılında alüminyum yüzeyler üzerine termal olarak püskürtülen NiCr alaşım parçacıklarının HVAF yapıştırılması üzerindeki yüzey oksitlerinin etkisi üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Bu çalışmada; alt tabaka yüzey katmanlarının kalınlığının ve bileşiminin, uyarıların bir alt tabakaya bağlanma kabiliyetini güçlü bir şekilde etkilediği gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları; başarılı bağlanmanın yalnızca alt tabaka ve yüzey oksidi mekanik olarak birbirine kenetlenen özellikler üretmek için önemli ölçüde deforme olduğunda meydana geldiğini doğrulamıştır [30].

Verstak ve arkadaşları; 2003 yılında aşınmaya ve yüksek sıcaklık korozyonuna karşı koruma için aktif yanmalı HVAF kaplamaları üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada; son derece düşük oksijen içeriği ve yüksek yoğunluk, AC-HVAF kaplamaların ayırt edici özellikleridir ve bu da şiddetli aşınma ve korozyon koşulları altında mükemmel performans göstermelerini sağladığı tespit edilmiştir. Kaplamaların mikro yapısı esas olarak katı parçacıklardan ve kısmen de ince erimiş parçacıklardan oluştuğu tespit edilmiştir [31].

Evdokimenko ve arkadaşları; 2011 yılında Yüksek hızlı hava-yakıt püskürtme ile kaplanan intermetalik Ni-Al kaplamaların özellikleri üzerine bir çalışma

sunmuşlardır. Bu çalışmada; ticari PN85Yu15 ve PTYu5N tozlarından HVAF kaplamaların özellikleri ve çelik, bakır ve alüminyum yüzeyler üzerine bırakılan test NAS tozu analiz edilmiştir. Metaller arası fazın, yalnızca püskürtme parçacıkları nikel erime noktasına ulaştığında, ısıya duyarlı PTYu5N tozunun yüksek hızlı hava yakıtlı püskürtmesi sırasında tüm serbest alüminyumu oluşturduğu tespit edilmiştir [32].

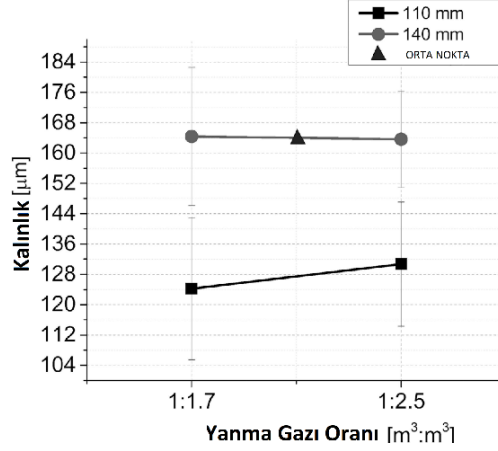
Gao ve arkadaşları; 2018 yılında HVAF püskürtme ile sentezlenen Al bazlı amorf metalik kaplamanın yüksek korozyon ve aşınma direnci başlıklı bir çalışma sunmuşlardır. Kaplanmış numunelerin sertlikleri altlık malzemeye göre daha fazla olduğu gözlemlenmiş ve aşağıdaki şekilde sunulmuştur. Bu çalışmada Kaplamanın, AA 2024'ünkinden daha iyi bir oyuklaşma potansiyeli ve daha düşük bir korozyon potansiyeli sunduğu ve klorür içeren ortam altında alt tabaka için feda edilebilir bir anot bazlı katodik koruma sağladığı bulunmuştur. Mükemmel korozyon direnci, agresif anyonların adsorpsiyonu için daha küçük itici güçten ve amorf kaplama üzerinde oluşan pasif filmdeki daha düşük taşıyıcı yoğunluğundan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Al bazlı amorf kaplamanın aşınma direnci, esas olarak düzgün ve koruyucu bir oksit filmin oluşumu ile ilişkili olan AA 2024 alt tabakadan daha üstün olduğu tespit edilmiştir [33].



Şekil 2.16. Sertlik grafik [33].

2.5. Alev Püskürtmeli Termal Sprey Kaplama

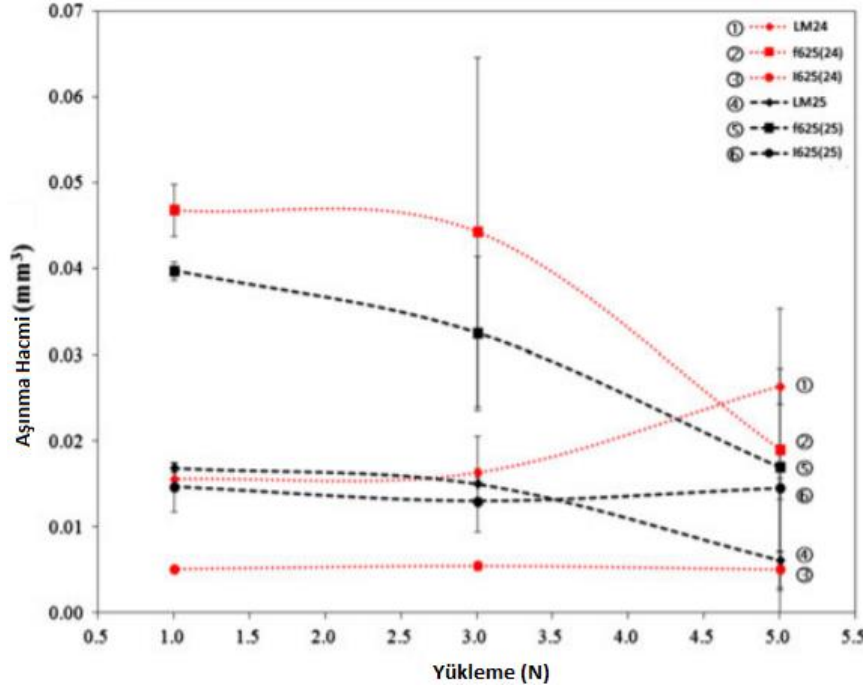
Arboleda ve arkadaşları; 2018 yılında çalışmada, alev püskürtme parametrelerinin AA7075 altlıklı Al₂O₃ - %13TiO₂ kaplamaların fiziksel, yapısal ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. NiCrAl ve AT-13 besleme stoğu tozları, sırasıyla 7075 alüminyum alaşımlı bir substrat üzerine bir bağ kaplama (BC) ve bir üst kaplama (TC) püskürtmek için kullanılmıştır. Tanımı başka bir yerde bulunabilecek olan yüzey pürüzlülük parametreleri Ra, Rt, RSM, R_{pc} ve güç spektral yoğunluğu (PSD)¹⁸, tüm deneylerden sonra ölçülmüştür. Deneylerin tekrarlanabilirliğini doğrulamak için her püskürtme koşuluna göre üretilen kaplamaların difraktogramları karşılaştırılmıştır. Difraktogramların arka plan gürültüsünü modellemek için yedinci dereceden bir polinom kullanılırken, diğer parametrelerin yanı sıra ölçek faktörü, kristal yapı, doku parametreleri, gerinim analizi, her biri için 9 ila 12 yineleme kullanılarak rafine edilmiştir. Kaplamaların; yapısal karakterizasyonu SEM kullanılarak gerçekleştirilmiş, kesitleri de ASTM E 1920-03(2014) standardına göre hazırlanan numunelerden analiz edilmiştir. Sadece yanma gazları oranı kaplamanın pürüzlülük parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Parçacıkların alevin en sıcak bölgesinde daha uzun kalma süresi nedeniyle 1:2.5 yanma gazları oranı için daha düşük yüzey pürüzlülük değerleri ve daha düşük poroziteler elde edilmiştir. Kaplamaların kalınlığı, yanma gazları oranından etkilenmediği, sabit yanma gazı oranında püskürtme mesafesi daha büyük olduğunda daha kalın kaplamalar üretildiği tespit edilmiştir [34].



Şekil 2.17. Püskürtme parametrelerinin kaplama kalınlığı üzerindeki etki [34].

Culliton ve arkadaşları; 2013 yılında yüksek bakırlı LM24 ve düşük bakırlı LM25 olmak üzere iki dökme alüminyum alaşımına uygulanan püskürtülmüş NiCrBSi ve WC/12Co Alevli Sprey kaplamaların tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Görüntü analizi teknikleri kullanılarak metalografik analiz, kaplama kalınlığı ölçümleri ve gözeneklilik ölçümleri yapılmış ve sistem başına en az beş numune test edilmiştir. Hem düzlem içi, HIP (kaplama büyüme yönüne paralel) hem de düzlem dışı, HOP (kaplama büyüme yönüne normal) mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. HIP ölçümleri, 0,3 kg'lık bir yükte bir mikrosertlik girintisi kullanılarak; kompozit sertlik olarak da adlandırılan HOP ölçümleri ise bir nanotest sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış panellerin yüzey pürüzlülüğü (Ra) Profiler üzerinde ölçülmüştür. Sürtünme Katsayısı (μ) kuru sürtünme testleri, ASTM F732'ye göre 60 dakika boyunca 5 N yük altında pistonlu düz pim (AISI 5120) geometrisinde çalışan bir TE 67 disk üzerinde pim makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Pin-on-Disk aşınma analizi, ileri geri hareket eden bir pin-on-flat geometrisinde çalışan bir TE 67 pin-on-disk makinesinde gerçekleştirilmiş; numuneler, 60m'lik bir kayma mesafesi boyunca 0,02 m/s'de 5 N yüke tabi tutulmuştur. Abrasif aşınma direnci ağırlık kaybı ölçümlerinden tahmin edilmiştir. Mikroaşınma testi, bir mikro aşınma test cihazında gerçekleştirilmiş ve bir AISI 52100 bilyeli yatak ile termal sprej kaplamanın yüzeyi arasındaki yuvarlanma temasının etkisini ölçmek için kullanılmıştır. Düşük sertlikteki LM25 alaşımı, SiC aşınma parçacıklarının gömülmesine ve mikro sertleşme etkilerine maruz kaldığı, bu da yük arttıkça aşınmanın azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir. S/N eğrisi, ince film Cr-CrN çok katmanlı kaplamanın

AL7075-T6 alaşımının aşınma yorulma ömrünü yüksek ve düşük döngüsel yorulmada sırasıyla %70 ve %22 artırdığı gözlemlenmiştir [35].



Şekil 2.18. Kaplanmış ve kaplanmamış LM24 ve LM25 numuneleri için hata çubukları ile yüke karşı mikro abrazif aşınma hacmi grafiği [35].

Ardila-Rodriguez ve arkadaşları; 2019 yılında seçici lazer eritme ve alev püskürtme ile alüminyum alaşımlı substrat üzerinde Al/MWCNT kompozit katman kaplama üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma, bir alüminyum alaşımı 6013 (AA6013) substrat üzerinde bir Al/MWCNT kompozit tabakası imal etmek için SLM ve FS olmak üzere iki işleme yolunu karşılaştırılmıştır. Vickers mikrosertlik sonuçları, FS ve SLM ile işlenmiş kaplamaların sertlik değerlerinde sırasıyla %44 ve %9'luk bir artış gösterdiği tespit edilmiştir [36].

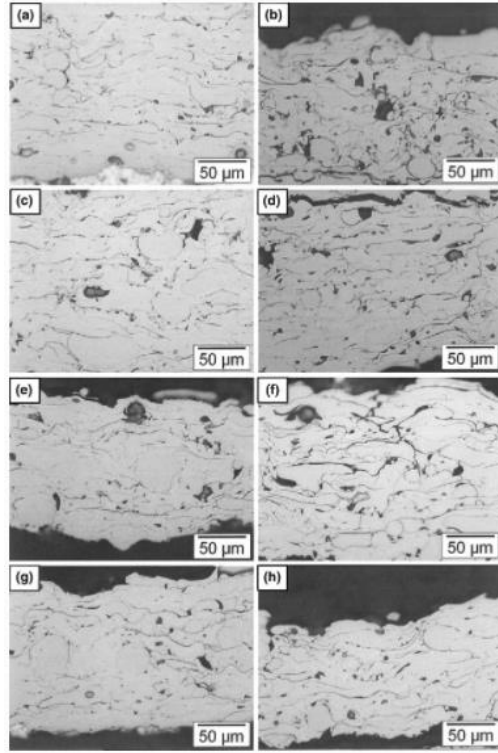
Çögür; 2007 yılında toz alev spreyleme yöntemi kullanarak kaplanan farklı malzemelerin aşınma davranışlarını bir çalışma ile incelemişlerdir. Bu çalışmada , Alüminyum alaşımı (Al 5754) ve Ç1030 düşük karbonlu çelik üzerine alev spreyleme yöntemiyle toz kaplanmış Bakır Alüminyum esaslı RotoTec 19850 ve Krom nikel bazlı RotoTec 19985 kaplamalar kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada, numunelerin yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik, mikroyapı ve aşınma davranışları

incelemiştir. Al 5754 üzerine yapılan kaplamanın Ç1030 üzerine yapılan kaplamaya göre pürüzsüzlüğün fazla olduğu tespit edilmiştir. En yüksek mikrosertliğin RotoTec 19985 kaplı numunelerde olduğu gözlemlenmiştir [37].

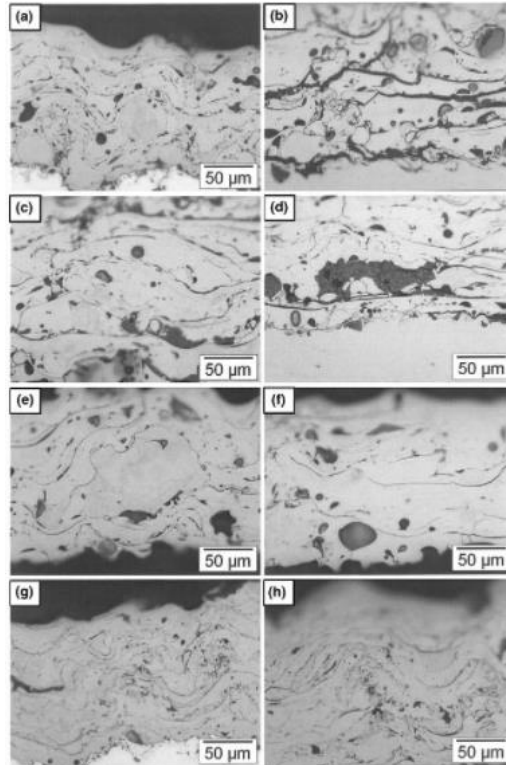
Tablo 2.1 Sertlik değerleri [37].

Malzeme Çeşidi	Kaplama Tozu	Yüzyden Merkeze Doğru Ölçüm Noktaları (mm)	Sertlik Değerleri (HV 0,1 kgf)		
Al 5754 – Alüminyum alaşımı	19850 (A parçası)	0.25	213		
		0.50	210		
		0.75	205		
		1	89		
		1.25	77		
		1.5	74		
	19985 (B parçası)	0.25	253		
		0.50	248		
		0.75	201		
		1	84		
		1.25	75		
		1.50	73		
		Ç1030 düşük karbonlu çelik (imalat çeliği)	19850 (C parçası)	0.25	214
				0.50	212
0.75	209				
1	174				
1.25	170				
1.5	169				
19985 (D parçası)	0.25		257		
	0.50		254		
	0.75		249		
	1		172		
		1.25	171		
		1.50	169		

Voyer; 2010 yılında aşınmaya dayanıklı amorf demir esaslı alev püskürtme kaplamalar üzerine bir çalışma sunmuştur. Çalışmada alt tabaka olarak 35 mm x 35 mm x 3 mm boyutlarında alüminyum ve yumuşak çelik numuneler kullanılmıştır. Bu çalışmada kaplamaların faz içeriği ve aşınma direnci sadece püskürtme durumunda değerlendirilmiştir. Altta iki şekilde bu tel ve toz alev sprej kaplama SEM görüntüleri sunulmuştur. Burada kaplamalar, toz püskürtmeli kaplamalar için %2,5 ila %7,1 ve tel püskürtmeli kaplamalar için %2,2 ila %9,8 arasında değişen gözeneklilik değerleri ile tel kaplamalar nispeten daha gözenekli olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, amorf demir bazlı kaplamaların toz ve tel alevle püskürtülmesinin, aşınmaya dayanıklı kaplamalar üretmek için plazma ve HVOF püskürtme tekniklerine uygun bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır [38].



Şekil 2.19. Toz Alev Sprey kaplanmış numune SEM görüntüleri [38].



Şekil 2.20. Tel Alev Sprey kaplanmış numune SEM görüntüleri [38].

McGrann ve arkadaşları ; 1998 yılında termal spreyle kaplı çelik ve alüminyumun yorulma ömrü üzerinde kaplama kalıntı geriliminin etkisi üzerine çalışma sunmuşlardır. Bu çalışma, tungsten karbür-kobalt (WC-Co) termal spreyle kaplama sistemlerinin yorulma performansını araştırılmıştır. Kaplamadaki kalıntı gerilme ile kaplanan parçanın yorulma ömrü arasında doğrudan bir ilişki olduğu bulunmuştur. [39].

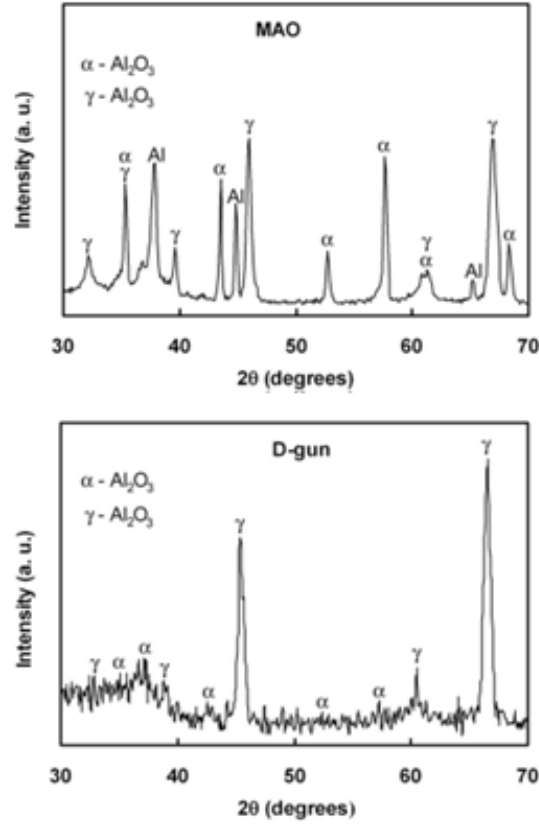
2.6 D-Gun

Rajasekaran ve arkadaşları; Al-Mg-Si alaşımı üzerindeki püskürtme tabancasıyla püskürtülen Cu-Ni-In kaplamanın düz yorulma ve aşındırma yorulma davranışı üzerindeki öğütmenin etkisini değerlendirmişlerdir. Al-Mg-Si alaşım numuneleri üzerinde püskürtme tabancasıyla püskürtülen Cu-Ni-In kaplama üzerinde tek eksenli düz yorulma ve aşındırma yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Üç koşuldaki numuneler dikkate alındı: kaplanmamış, kaplanmış ve kaplamadan sonra öğütülmüş. Zemin kaplamalı numuneler, kaplamasız ve kaplamalı numunelere kıyasla üstün düz yorulma ve sürtünme yorulma ömürleri sergilemiştir. Ömür iyileştirme, yüzey kalitesi ve yüzeydeki artık basınç gerilmeleri açısından tartışılmıştır [40].

Haridasan ve arkadaşları; 2018 yılında gerçekleştirdikleri projede patlatma tabancasıyla püskürtülen alümina kaplamanın tribolojik davranışı üzerinde altlık malzemelerinin etkisi deneysel çalışmalarla araştırılmıştır. Bu deneysel çalışmada, tipik altlık malzemeleri olarak paslanmaz çelik (veya SAE kalite 304, 316) ve Alüminyum alaşım AA1050 üzerinde denemeler yapılmıştır. Alümina kaplı yüzey üzerindeki sertlik, 200gf yükte Vickers Sertlik Test Cihazı, Model No. DHV3000 (Chroma Systems) kullanılarak ölçülmüştür. Püskürtülen kaplamaların mikro yapısı, Quanta FEG SEM kullanılarak incelenmiştir. Sürtünme kuvveti ve kaplamanın aşınması, Döner Tribometre ile incelenmiştir. Sertleştirilmiş EN31 diskin karşı yüzeyinde aşınma izi çapı 80mm, yük 15N ve kayma hızı 1ms-1 tutularak aşınma testleri yapılmıştır. Her numunenin aşınma kaybı, hassas bir terazi kullanılarak disk üzerinde pim testinden önce ve sonra numunelerin ağırlığı ölçülerek değerlendirilen

ağırlık kaybından tahmin edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, 0.25 mm'lik bir kesme uzunluğu kullanılarak ölçülmüştür. Deneysel sonuçlara bakıldığında, alüminyum alaşımı üzerine kaplanmış alüminanın paslanmaz çeliklere kıyasla tribolojik tepkisinin, çevresel bozulmaya direnmede üstün olan dayanıklı yüzey kaplamaları ürettiğini gösterdiği gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar, alüminyum alaşımı üzerine kaplanmış alüminanın paslanmaz çeliklere kıyasla tribolojik tepkisinin, çevresel bozulmaya direnmede üstün olan dayanıklı yüzey kaplamaları ürettiğini gösterdiği tespit edilmiştir. D-gun püskürtmeli kaplamaların performans özellikleri, yanma gazlarının bileşimine, tozun parçacık boyutuna, taşıyıcı gazın basıncına, frekansa ve bekleme mesafesine ek olarak alt tabaka malzemesinden büyük ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir. Anında soğuyan ve katılaştıran patlama püskürtmeli parçacıklar, daha yumuşak ve sünek malzemelerin üst alt katmanlarını sıkıştırma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Daha iyi işlevsel performans ve bileşenlerin uzun ömürlü olması için, patlama tabancası püskürtme yoluyla kapasitenin artırılmasına yol açan paslanmaz çelikler gibi daha sert malzemelere kıyasla Alüminyum gibi daha yumuşak ve daha sünek malzemelerin seçilmesi daha iyi olduğu tespit edilmiştir [41].

Raman ve arkadaşları; 2008 yılında revize edilen çalışmalarında AA 6063 üzerine Mikro Ark Oksidasyon ve Patlatma Tabancası Püskürtmesi ile hazırlanan Alümina kaplamaların düz yorulma ve sürtünme yorulması altında performansı incelenmiştir. Bu çalışma, iki farklı yöntemle MAO ve patlatma tabancası (D-gun) spreyi hazırlanan alümina kaplamaların AA 6063 yorulma testi numuneleri üzerinde düz yorulma ve aşındırma yorulma yüklemesi altındaki performanslarının karşılaştırması yapılmıştır. Aşağıdaki şekilde MAO ve D-gun sprej kaplama yöntemi ile hazırlanmış numunelerin XRD sonuçları verilmiştir [42].



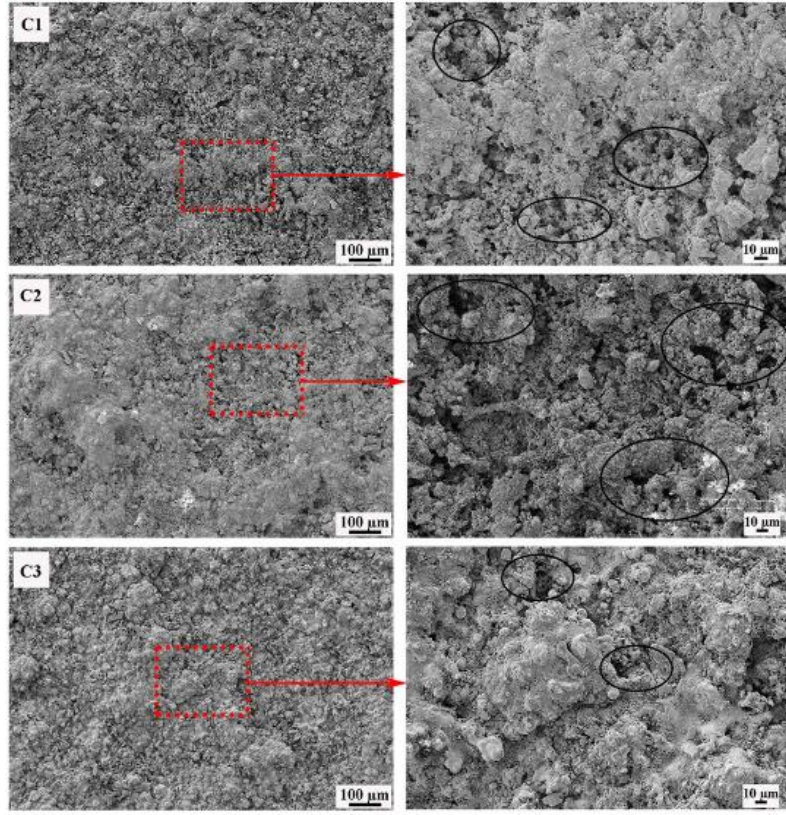
Şekil 2.21. MAO ve Patlatma Tabancası (D-gun) sprey kaplama yöntemi ile hazırlanmış numunelerin XRD sonuçları [42].

MAO ve D-gun kaplamaların sertlik değerleri, pürüzlülük ve artık gerilmelerinin sayısal değerleri aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Bu iki kaplamaların yüzey pürüzlülüğü yakın olduğu gözlemlenmiştir. D-gun püskürtmeli alümina kaplı numuneler, MAO kaplı numunelere kıyasla biraz daha yüksek yüzey kalıntı basınç gerilimi sergilediği tespit edilmiştir. D-gun sprey kaplamalı numuneler, MAO kaplı numunelere kıyasla üstün düz yorulma ve aşındırma yorulma ömürleri sergilemiştir [42].

Tablo 2.2 Sertlik değerleri [42].

Malzeme	Sertlik (HV)	Pürüzlülük (μm)		Yüzey Artık Gerilme (MPa)
		R _a	R _{max}	
MAO kaplama	1360	0,51	2,88	(-36) ila (-40)
D-gun ile kaplanmış alümina kaplama	1020	0,52	2,82	(-33) ila (-54)
AA6063 substrat	80	0,6	3,83	(-57) ila (-66)

Arunnellaiappan ve arkadaşları; 2020 yılında AA5083'te patlama tabancasıyla püskürtülen WC-Co, WC-Co-Cr ve Cr₃C₂-NiCr sermet kaplamaların korozyon davranışı üzerine çalışma sunmuşlardır. Bu kaplamaların SEM görüntüleri Aşağıdaki şekilde sunulmuştur. Toz kombinasyonlarının kaplamaların faz bileşimi, yüzey morfolojisi ve enine kesit mikro yapısı üzerindeki etkisi XRD, SEM ve EDS kullanılarak incelenmiştir. Çalışmadaki elektrokimyasal korozyon sonuçları, kaplanan tüm numunelerin OCP değerlerinin alt tabakadan daha yüksek bir değere kaydırıldığını ve Cr₃C₂-NiCr tozu ile kaplanan numunenin kararlı bir OCP ve diğer kaplanan numunelere göre daha pozitif değer gösterdiği tesbit edilmiştir. [43].

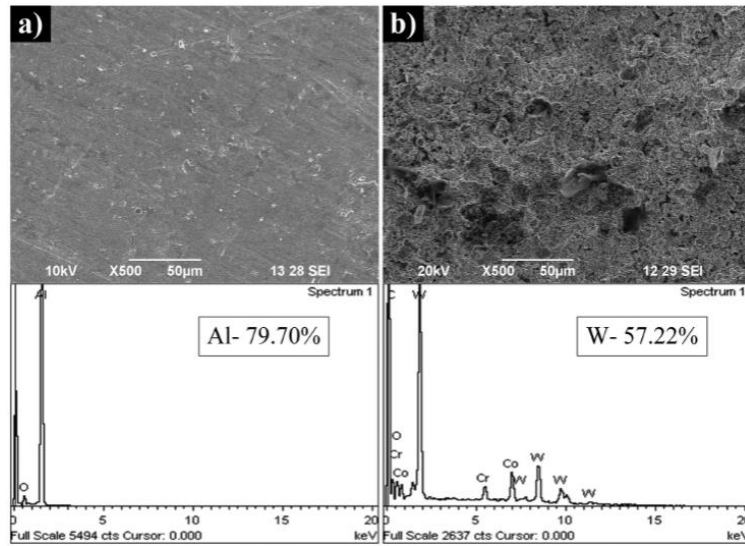


Şekil 2.22. WC–Co, WC–Co–Cr ve Cr₃C₂–NiCr sermet kaplamaların yapıları sırasıyla; C1, C2, C3 [43].

Wu ve arkadaşları; 2013 yılında alüminyum alaşımlı substrat üzerinde D-Gun sistemi ile Wc-17co aşınmaya dirençli kaplamalar üzerine araştırma sunmuşlardır. Kaplamanın mikro yapısını SEM, EDX, XRD ile analiz edilmiştir. WC-17Co kaplamanın sertliği yaklaşık 1100~1300 HV, ortalama gözenekliliğin %1'den az olduğu tespit edilmiştir. Püskürtme işlemi sırasında WC parçacıkları dekarbürizasyon meydana geldi ve W₂C ve Co₃W₃C fazlarından oluşan kaplamayı biriktirdiği tespit edilmiştir [44].

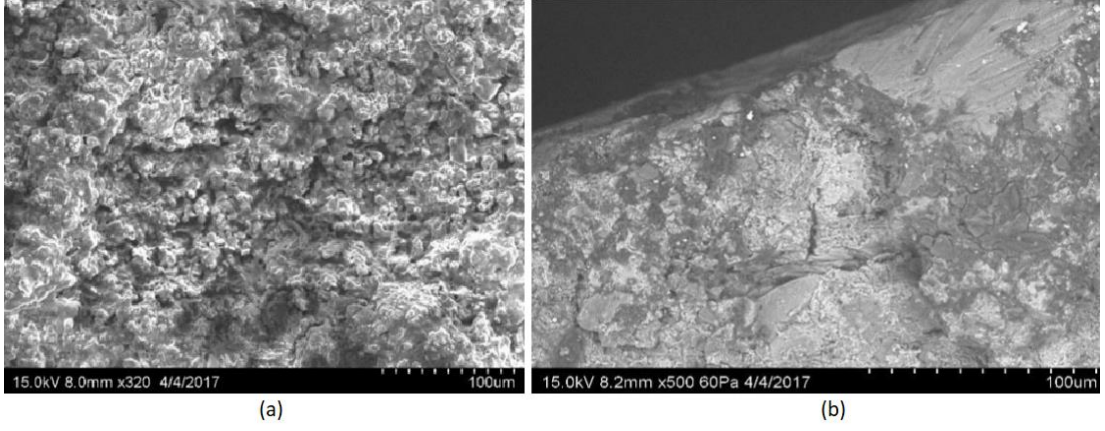
Kumar ve arkadaşları; 2018 yılında yapılan tungsten karbür kaplı AA 6063 alaşımının patlatma tabancası tekniği kullanılarak mekanik ve aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmadaki numunelerin kaplamalı ve kaplamasız hallerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri aşağıdaki şekilde sunulmuştur. Bu çalışmada; Yük (10, 20, 30 K), kayma hızı (1, 2, 3 ms⁻¹) ve kayma mesafesi (750, 1250, 1750 m) alınarak Taguchi'nin L27 ortogonaline dayalı olarak

kaplanmış numune üzerinde aşınma analizi yapılmıştır. Kaplanmış numunelerin, kaplanmamış alt tabakaya göre sertlikte 5,6 kat artış gösterdiği tespit edilmiştir. Aşınma oranının yük ve kayma hızındaki artışla arttığı, kayma mesafesindeki artışla ise aşınma oranında ilk artış ve ardından düşüş gözlemlenmiştir. Varyans analizi, yükün malzeme kaybı üzerinde daha yüksek bir etkiye sahip olduğunu öngördüğü bulunmuştur. Yük ve kayma mesafesi etkileşimi, malzeme kaybı üzerinde diğer herhangi bir bağımsız parametrenin etkisinden daha yüksek bir etki gösterdiği tespit edilmiştir [45].

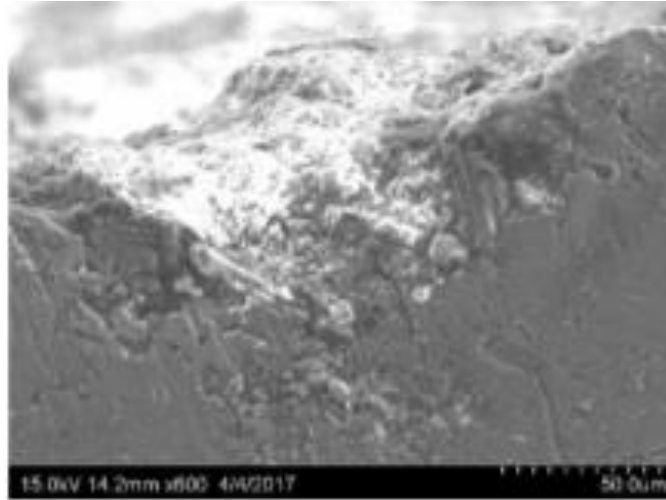


Şekil 2.23. (a) Kaplamasız AA6063, (b) Kaplamalı AA6063 [45].

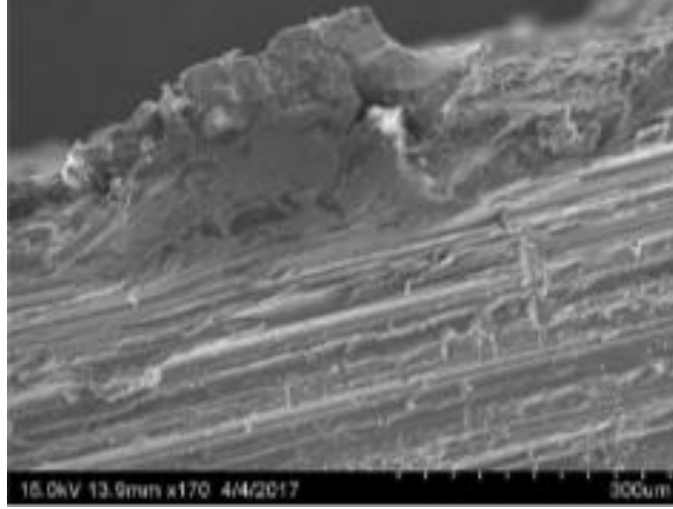
Kumar ve arkadaşları; 2017 yılında alüminyum yüzey seramik yüzey kaplamalarının patlatma tabancası kullanılarak deneysel incelenmesi üzerine bir çalışma yayınlamışlardır. Bu çalışmada; Alümina Titania'da malzemenin mikro sertliği kaplanmamış alüminyum ve alümina kaplı malzemeye göre daha fazla arttığı tespit edilmiştir. SEM fotoğraflarından alümina Titania'nın aşınma direncinin alümina kaplı malzemeye göre arttığı gözlemlenmiştir. Aşağıdaki şekle baktığımızda Mikroyapılar, Alumina Titania durumunda kaplama kalitesinin iyi olduğunu gözlemlenmiştir [46].



Şekil 2.24. a) Alümina kaplı malzemenin mikro yapısı (b) Alümina Titana kaplı malzemenin mikro yapısı [46].

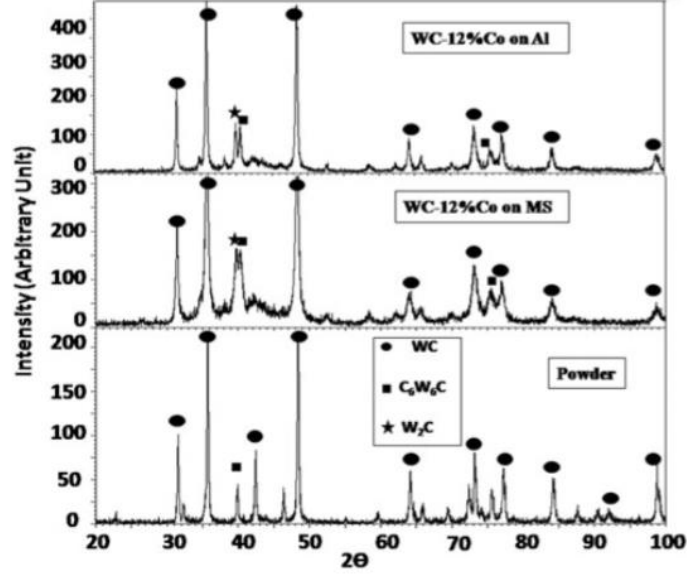


Şekil 2.25. Alümina Titana Kaplı numunenin mikro yapısı [46].



Şekil 2.26. Alümina Titana kaplı numunenin mikro yapısı [46].

Roy ve arkadaşları; 2013 yılında WC kaplamasının elektrosark tekniği ve patlatma püskürtme ile elde edilen katı parçacık erozyon davranışı üzerine bir çalışmada bulunmuşlardır. Bu çalışmada ESD tarafından bırakılan WC kaplamasının oda sıcaklığındaki erozyon tepkisini değerlendirilmiş ve bu kaplamanın erozyon davranışını patlatmalı püskürtmeli WC-Co kaplamanınkiyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada d-gun ile WC-Co kaplama yapılmış yumuşak çelik altlıklı ve alüminyum altlıklı numuneler de karşılaştırılmıştır. Toz ve patlatmalı püskürtmeli kaplamalardan elde edilen XRD desenleri Şekil 12'de verilmiştir. Patlatmalı püskürtme kısmi amorfizasyonla sonuçlanmıştır. Toz, öncelikle WC ve Co₆W₆C içermesine rağmen, kaplama, WC ve Co₆W₆C fazlarına ek olarak W₂C içerdiği tespit edilmiştir. Al substrat üzerindeki patlatma püskürtmeli kaplamanın sertliği, yumuşak çelik substrat üzerindeki aynı kaplamanın sertliğinden daha düşüktür olduğu gözlemlenmiş ve Elastik modülün de benzer bir eğilim gösterdiği tespit edilmiştir [47].



Şekil 2.27. Toz ve Patlatmalı Püskürtmeli kaplamalardan elde edilen XRD desenleri [47].

2.7 Literatür Taramasından Çıkarımlar

Bir önceki başlık ile verilen literatür bilgilerine bakıldığı zaman çıkarılan genel sonuçlar aşağıda verilmiştir. Tüm bu aşınma çalışmalarına bakıldığında elde edilen buluntular;

- Araştırmaların hepsinde numuneler Vickers sertlik test cihazı, EDS ve SEM ile karakterize edildiği
- Kaplamanın hacim kaybı, farklı bilyelere karşı test edildiğinde farklı sonuçlar gözlemlendiği
- Kaplamalı Alüminyum parçaların kaplamasız parçalara ve hatta muadili parçalara kıyasla sürtünme kuvveti ve aşınma dirençlerinin daha ideal olduğu
- Kaplama kalınlıkları arttıkça malzemenin aşınma direnci arttığı
- Sıcaklık artışının plastik deformasyona ve oksidasyon yorgunluğuna neden olduğu
- Kaplamaların oda sıcaklığında aşınma tipleri abrasiv ve adeziv aşınma iken, daha yüksek yıcaklıklarda adhesive aşınma direncinin arttığı

tespit

edilmiştir

BÖLÜM 3

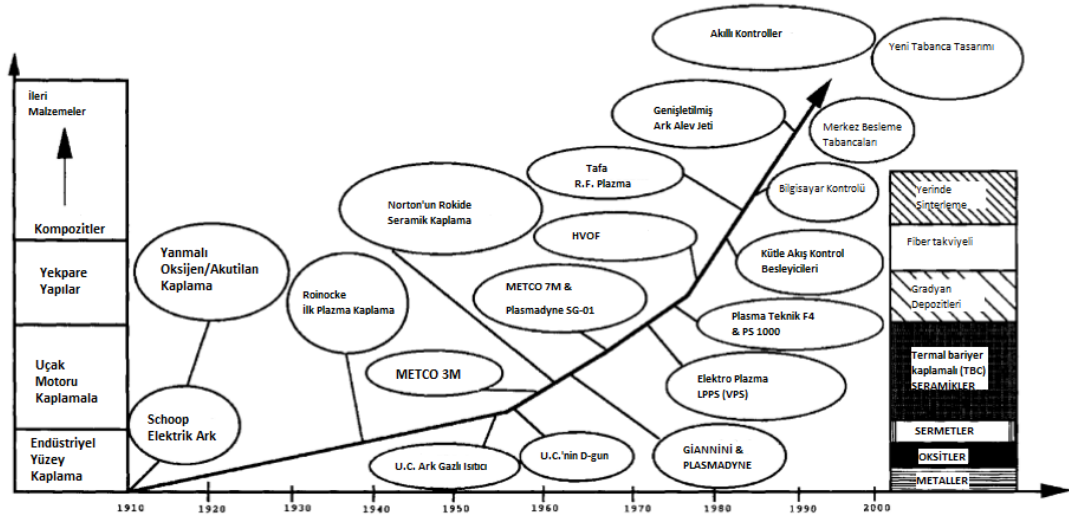
TERMAL SPREY KAPLAMA

Kaplama İlk çağ uygarlıklarından bu yana bir parçanın aşınma dayanımını, korozyonunu, sertliğini v.b parçaların kullanım yerlerine göre istenilen özelliklerini arttırmak için sıklıkla baş vurulan yöntemlerden biridir. Ancak bu yöntem 18 yüzyılda Giovanni Galvani isimli bir bilim insanının galvaniz yöntemini keşfetmesi ve bunu bilimsel temeller üzerine otutturup açıklaması ile kaplama bilimsel bir anlam kazanmıştır. Giovanni Galvani elektrik akımı ile iyonların hareket ettiğini bulmuş ve bu yolla metal iyonlarını iki elektrot arasında transfer etmiş ve bu sayede ilk metal yüzey kaplama işlemini gerçekleştirmiştir [48]. Birçok bilimsel kaplama yöntemi mevcuttur ancak bu tezde termal püskürme kaplama üzerinde durulmuştur.

Termal Sprey kaplamalar bir parçaya; sertlik, mulavemet, aşınma dayanımı, yalıtkanlık ya da iletkenlik gibi özellikler kazandırmak için kullanılan bir kaplama yöntemidir. Bu yöntem ana hatları ile aşağıdaki şablonda görüldüğü gibi sınıflara ayrılabilir. Bu çalışmada Alev Termal Sprey hakkında gerçekleştirildiği için bu sınıf Termal Sprey kaplamalar hakkında bu bölümün 2. kısmında alev termal spreylere kaplamalardan bahsedilecektir.

3.1. Termal Sprey Kaplama Tarihçesi

İş parçalarına mekanik ve kimyasal olarak birçok yarar sağlayan termal spreylere kaplamanın tarihsel gelişimi; 1911 tarihinde başlamış 1950'lerin ortalarında yüksek erime noktalı malzeme ihtiyacı ve plazma'nın keşfi ile ivmelenmiş 1980'lerde HVOF'un keşfi ile daha da hareketlenmiş ve yeni tabanca tasarımları ve akıllı kontrolcüler ile hala devam etmektedir [49,50]. Aşağıdaki grafikte tarihsel gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 0.1. Termal Sprey Kaplamanın tarihsel gelişimi [50].

Termal sprey kaplama işleminin tarihinin; 1882 ve 1899'daki birkaç patentten sonra, 1911'de İsviçreli bilim insanı Dr. Max Ulrich Schoop, korozyon performansını artırmak için kendi keşfettiği ilkel bir alev püskürtme yoluyla metal yüzeylere kalay ve kurşun kaplamalar uygulamaya başladığı bilinmektedir [49–51]. Daha sonra Dr. Schoop 1912'de metal tel püskürtmek için ilk cihaz üretmiştir. Bu işlemin prensibi; bir tel, bir yanma alevine beslenmesi ve ardından alevi çevreleyen basınçlı hava ile erimiş metali atomize edip parçacıkları bir kaplama oluşturmak için hedefe püskürtmesi olarak tarif edile bilmektedir. Bu tekniğe alev püskürtme (FS) adı verilmekte olup tozlar, teller veya çubuklar kullanan geniş bir termal püskürtme yöntemi grubunu kapsamaktadır [49].

Schoop daha sonra çabalarını başka bir yöne odaklamış olup 1914'te hammadde malzemesini eritmek için elektrik kullandığında tanıtmıştır. Bu teknik, tabanca içinde birlikte beslenen iki iletken malzeme teli arasında bir elektrik arkı oluşturmaya dayanmaktadır. Bu ark, tellerin ucunda oluşturulur ve bir basınçlı hava jeti, erimiş metali alt tabakaya püskürtmesi olarak tarif edile bilmektedir. Toz FS kavramı, 1930'ların başında F. Schori tarafından, Venturi etkisiyle metalik bir tozun alev beslenmesiyle tanıtılmıştır. Bu işlem tozun nozulde eritilmesi ve eriyiğin egzoz yanma gazları (oksijen ve asetilen) tarafından püskürtülmesi ile gerçekleşmektedir [49].

Bu erken tekniklerle ilgili malzemelerinin hepsinde düşük erime noktalı malzemeler kullanılması ancak 20. yy'ın ortalarına gelindiğinde yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelere olan talepler artmıştır. Bu sebeple yaklaşık 1955 yılında Patlam tabancasının (D-gun) Union Carbide Corporation adlı şirket tarafından bulunmuştur[52]. hemen ardından 1960 yılında atmosferik plazma püskürtmenin (APS) geliştirilmesi, termal püskürtme uygulamaları açısından bir dönüm noktası olmuştur [49].

1960 yılında, , Gerdien ve Lotz (1922) tipi plazma üreticisine dayalı APS'yi tanıtmıştır. Nitrojen veya argon gibi gazların hidrojen veya helyum ile karışımı bir elektrik arkıyla iyonlaştırılır ve bir plazma jeti oluşturulur. Plazma kaynaklarıyla ilişkili yüksek sıcaklıklar, çok çeşitli malzemeleri eritebilir ve bu, örn. zirkonyum ve alüminalar, eğer malzemenin buharlaşma sıcaklığı erime noktasından en az 300K daha yüksekse. Havacılık ve uzay endüstrisindeki TBC uygulamaları başlangıçta bu tekniğin en yaygın kullanım alanlarıydı [49].

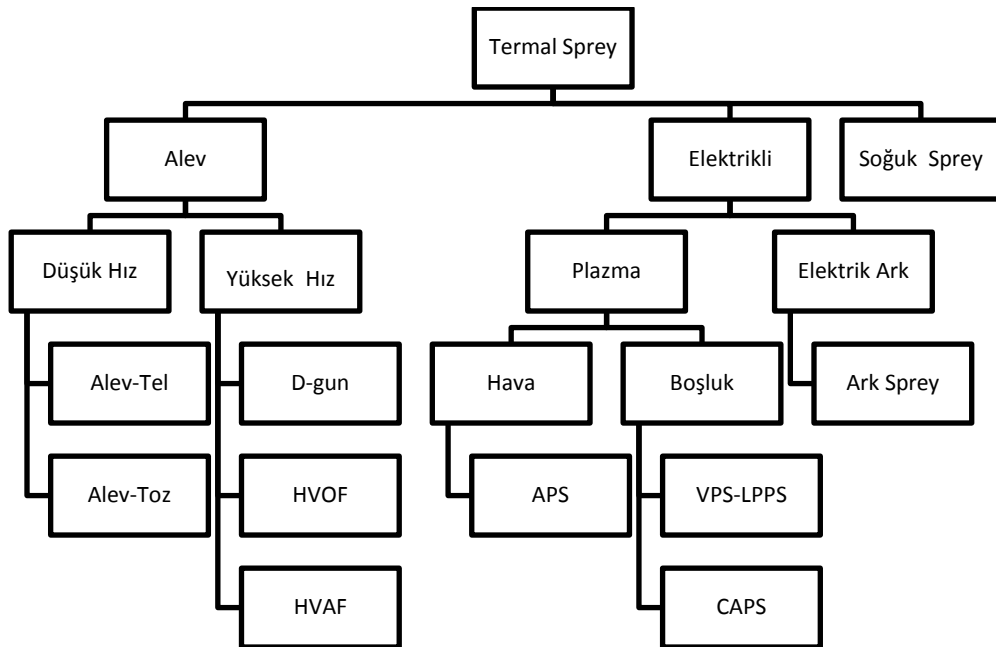
Termal sprey kaplama tekniklerinin gelişiminde ikinci zıplama; 1980'lerde VPS/LPPS ve Jet Kote/hiper hızlı oksiyakıt tabancası (HVOF) teknikleri ve yüksek sıcaklıklı kaplamaların icadıyla olmuştur [49,50]. 1970'lerin sonu ve 1980'lerin başında, VPS ve LPPS geliştirilmiştir. VPS ve LPPS, APS'nin metalik malzemelerin yüksek oranda oksidasyonu veya kaplamalarda önemli ölçüde gözeneklilik gibi bazı dezavantajlarını hafifletmek için tasarlanmıştır. Bu teknikler, atmosferik oksijenin erimiş malzeme ile etkileşimini önlemek için yumuşak vakum veya CAPS kullanır [49]. 1980'lerde Browning Engineering Corporation'ın metal tozları püskürtmek için HVOF adlı yeni bir teknik tanıtmasıyla termal sprey uygulamalarında büyük bir sıçrama meydana geldi. Bu süreçte, uçuş halindeki parçacıkların hızının 700-800 ms'ye çıkarılmasında yüksek basınç önemli bir rol oynar. Bir yakıt gazı (propilen, propan, hidrojen, vb.) ve oksijen veya bazen havanın karışımı , basınçlı su soğutmalı bir odada yakılır. Egzoz yanma gazları, süpersonik jetin içinde şok elmaslarının oluşturulduğu atmosfere bir nozül aracılığıyla genişler. Kontrollü atmosferlere ve portatif ekipmanlara ihtiyaç duymadan yüksek yoğunluklu ve yüksek yapışma gücüne sahip kaplamalar elde edilir [49]. Yeni tabanca tasarımlar, kontrol

sistemlerinin keşfi ile termal sprey kaplamalardaki gelişme devam etmekte ve yeni termal sprey kaplama teknikleri ortaya çıkmaktadır.

3.2.Termal Sprey Kaplama Tipleri

Termal sprey kaplama çeşitleri temelde alev püskürtme plazma püskürtme ve soğuk sprey olmak üzere 3 tipte gerçekleştirilmektedir. Bunlar aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 0.1. Termal Sprey Tipleri [50].



3.2.1. Alev Termal Sprey Teknikler

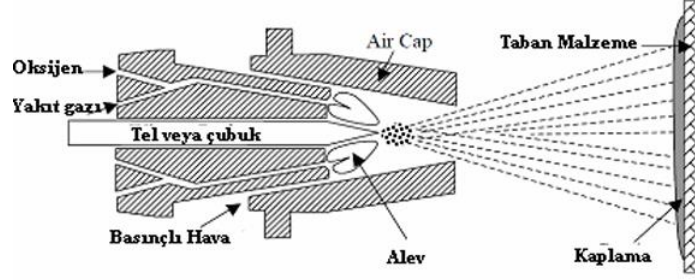
3.2.1.1. Düşük Hızlı

Bu düşük hızlı alev püskürtmeli termal sprey kaplamalar olarak tanımlanmıştır. Bu kısım kullanılan kaplama malzemesinin şekline göre sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırma;

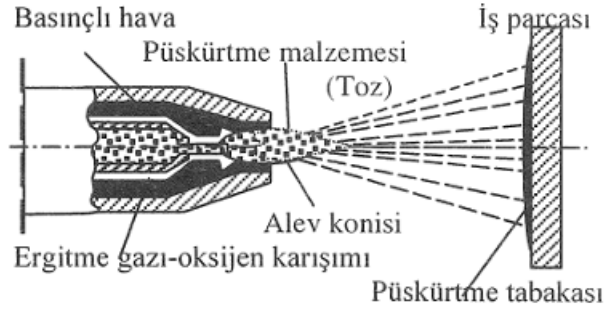
- Alev-Tel
- Alev-Toz

olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Alev püskürtmeli Termal Sprey Kaplamanın temeli 1991 yılında Dr. Schoop'a kadar dayanmakta olup temelde aynı işlemler

uygulanmaktadır. Bu işlemler; bir tel, bir yanma alevine beslenmesi ve ardından alevi çevreleyen basınçlı hava ile erimiş metali atomize edip parçacıkları bir kaplama oluşturmak için hedefe püskürtmesi olarak tariflendirile bilmektedir [49,50,53]. Şekil 3.2’de bir Alev-Tel, şekil 3.3’de ise bir Alev-Toz Püskürtme işlemleri gösterilmiştir.



Şekil 0.2. Alev-Tel işlem şeması [53].

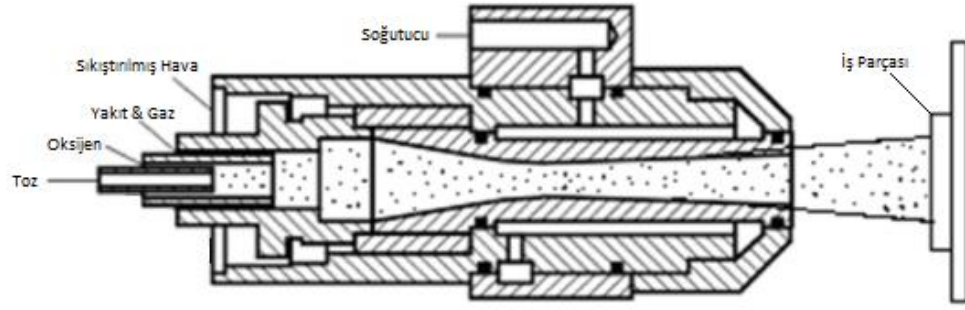


Şekil 0.3. Alev-Toz işlem şeması [54].

3.2.1.2 Yüksek Hızlı

3.2.1.2.1 Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Termal Sprey

1980'lerde Browning Engineering Corporation'ın metal tozları püskürtmek için yüksek hızlı oksı-yakıt (HVOF) tekniğini tanıtmasıyla ilk kez tarih sahnesine çıkmıştır[49] Bu teknikte kullanılan tabanca şematik olarak aşağıda sunulmuştur.

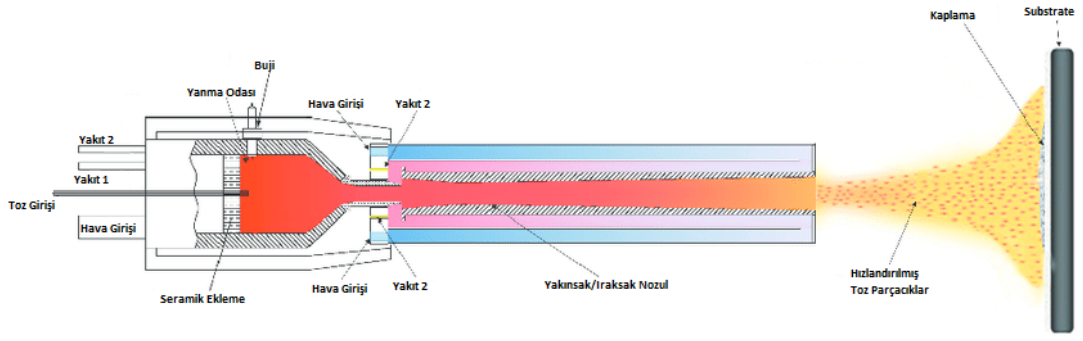


Şekil 0.4. HVOF işlem şeması [18].

HVOF işlemi toz malzemenin oksijenin yanması ve bir yakıt gazı kullanılarak eritildiği ve şekilde gösterildiği gibi bir yüzeye doğru basınçlı hava kullanılarak 600-800 m/sn aralığında seyir eden bir hızla gerçekleşen alev biriktirme tekniğidir. Bu teknikte yanma bölgesinde, toz malzeme alev girer ve burada malzemenin erime sıcaklığına ve besleme hızına bağlı olarak erimiş veya yarı erimiş hale gelmektedir. HVOF kaplama sırasında alev sıcaklığı 2300 - 3000°C arasında olduğu ve yakıt olarak da propan, propilen, hidrojen veya kerosen kullanıldığı bilinmektedir [55].

3.2.1.2.2 Yüksek Hızlı Hava-Yakıt (HVAF)

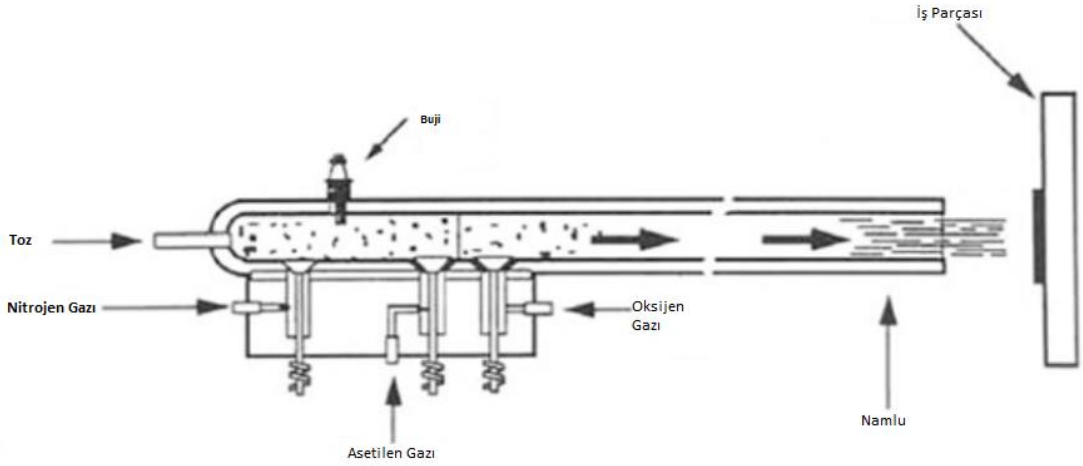
HVOF tekniği ve HVAF tekniği benzer olup yalnızca Toz, taşıyıcı gaz olarak N₂ ile sıcak arka duvardaki bir açıklıktan aksel olarak prosese enjekte edilir. Uçuş sırasında parçacık hızını daha da artırmak ve parçacıkların sıcaklığını kontrol etmek için bölmenin birinci ve ikinci nozul arasına yakıt da eklenmektedir. HVAF işlemi, parçacıkları 1100-1200 m/s'nin üzerinde bir hızla çıkaran yaklaşık 1.400 m/s'lik bir hızla sahip bir jet akımı oluşturabilmektedir. Alev içindeki parçacıkların yüksek hızı, yüzeyde ve tabakalar arası parçacık sınırlarında minimum boşluk/gözenek oluşumu ile kompakt/yoğun kaplamalar üretmektedir. HVAF alevinin sıcaklığının 1.950°C'den az olduğu, ayrıca tabancadan çıkan parçacıkların da sıcaklığının yaklaşık 1.500°C olduğu bilinmektedir. Kaplamaların, ASTM C633 standardı yapışma testi yöntemi uygulandığında çok yüksek bağ mukavemetleri olduğu gözlemlene bilmektedir. HVAF prosesinin biriktirme verimi, diğer termal püskürtme proseslerine göre oldukça yüksek ve metal tozları için %58-65, karbür tozları için %50-75 aralığında olduğu bilinmektedir. [56]



Şekil 0.5. HVAF işlem şeması [56].

3.2.1.2.3 Patlamalı Püskürtme (D-Gun)

D-gun spray prosesi, son derece iyi bir yapışma kuvveti, düşük gözeneklilik ve basma artık gerilimleri ile kaplama yüzeyleri sağlayan bir tür alev püskürtmeli termal spray kaplama yöntemidir. Bu yöntem aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 0.6. D-Gun işlem şeması [57].

Bu yöntemde yanma odasında (2-3 cm iç çapa sahip, 1-1.5 m uzunluğun); oksijen ve asetilenin yanma odasına kaplama tozu ile eş zamanlı verilmesi, ardından da bujinin ateşlenmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Gaz karışımının yanması ile gaz akışı boyunca yayılan yüksek basınçlı şok dalgaları (patlama dalgaları) oluşur bu sebepten yanma odasına patlama odası da denebilmektedir. Patlama odasında üretilen sıcak gazlar ve

toz namluya doğru hareket eder (toz parçacıklar 1200m/sn hıza kadar hızlandırılır) ve bu hareket esnasında toz parçacıklar plastikleşme aşamasına kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra bu parçacıklar namludan çıkar ve bir kaplama oluşturmak için iş parçasının yüzeyine çarpar. Bu kaplamanın kalınlığı arttırılmak için bu işlem tekrarlanmaktadır [57].

Prosesin yüksek sıcaklık ve hız parametrelerini göz önüne aldığımızda, aşınmaya, korozyona ve oksidasyona dayanım gösteren kaplamaların imal edilmesi istenmektedir. Bu sebeple bu uygulama; uçakların gaz türbin motorları ve ekipmanlarında, nükleer güç endüstrisinde, kağıt ve plastik sanayinde, tekstil makina parçaları ve kesici uç takımlarında koruyucu görevi üstlenmek ve malzemelerin ömrünü artırmak amacıyla kullanılmaktadır [58].

3.2.2. Elektrikli Termal Sprey Teknikleri

Elektrikli Termal Sprey Tekniklerinin temeli Elektrik ark Teknolojisine dayanmaktadır. Elektrik ark; 1760'lı yıllarda Joseph Priestley'in elektrikli deşarjını keşfermesi ile başlamıştır. Daha sonra önce 1897'de J.J. Thomson'un elektronun keşfi ardından da atom yapısının anlaşılması ile araştırmalar hız kazanmıştır. Sonrasında 1914 yılında Schoop'un ilk kaplama sistemi tasarımı yapılmıştır [49].

3.2.2.1. Plazma Elektrik Sprey Teknikleri

Plazma Ark Sprey Kaplama yöntemi temel olarak; bir nozul, bir plazma gazı kaynağı, bir voltaj kaynağı ve kaplama malzemesinden (toz ya da tel) oluşmaktadır. Bu yöntem gerçekleştirildiği ortama göre 2 (iki) kısma ayrılabilir. Bunlar;

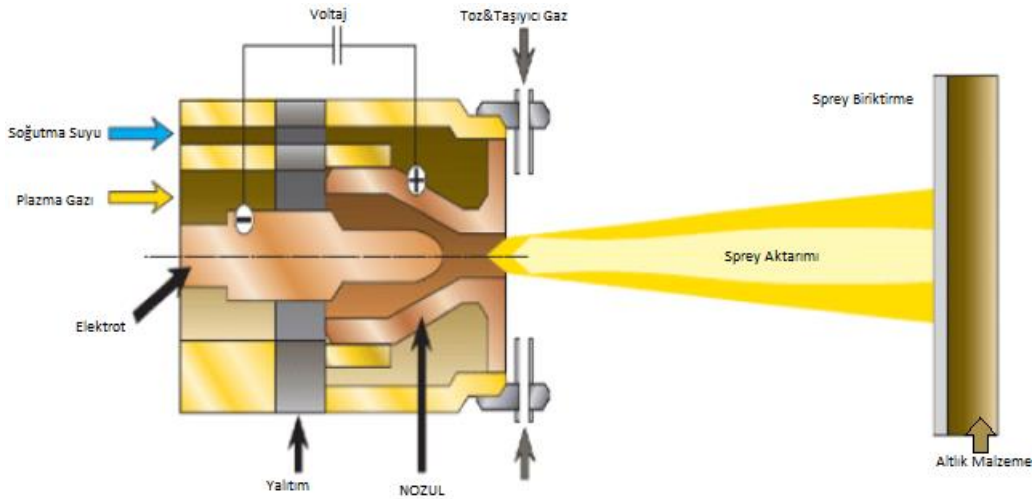
- Hava (Atmosferik)
- Boşluk (Havasız Ortam)

olarak tanımlanabilmektedir. Bu kaplamalar aşağıda tanımlanmıştır.

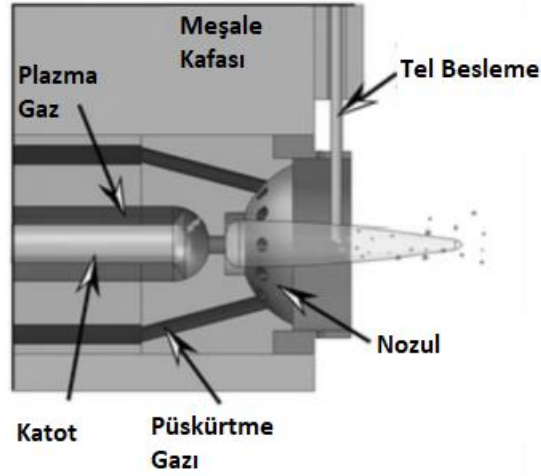
3.2.2.1.1 Hava

Plazma ark kaplama işleminde; nozulun merkezine doğru kaplama malzemesi beslemesi yapılır. Nozulun merkezine doğru beslenen kaplama malzemesi plazma ile ergitilir ve eriyik yine plazma gazı ile iş parçası yüzeyine taşınarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olur [15,37,53,58,59].

İşlem sırasında katot ile nozul arasındaki bir gaz karışımı yüksek voltaj ile iyonize edilip ayrıştırılarak plazma oluşumu sağlanır. Plazma gazı (Ar, He, N_2 , H_2) yüksek hızlarda nozulun dışarı atılır. Oluşan plazma, tamamlanan elektrik devresi nin anoduna kadar ilerletmekte ve bir akım yardımı ile katottan kaplama malzemesine kadar sabit tutulmaktadır. Sabit tutulan bu plazma, yüksek sıcaklıklara kadar çıkabilmektedir. Yüksek sıcaklıktaki plazma ile erigitilen kaplama malzemesi ve püskürtülmüş plazma gazı bir sprej meydana getirmektedir. Oluşan bu sprej bünyesinde barındırdığı eriyik'i altlık malzeme üzerine taşır ve burada biriktirerek kaplama gerçekleştirilmektedir. Plazma sprej kaplama için iki farklı örnek olarak iki farklı Atmosferik Plazma Sprej Kaplama ve Plazma Takviyeli Tel Ark Kaplama verilebilmektedir. Ancak PTWA kaplamada telden erigiyiği sıyırmak için plazma gazına ek olarak püskürtme gazında mevcuttur [59].



Şekil 0.7. Atmosferik Plazma Sprej Kaplama işlem şeması [60].



Şekil 0.8. Plazma Takviyeli Tel Ark Kaplama Tabancası [59].

Plazma Sprey Kaplama sıcaklığı 14700°C kadar yüksek sıcaklıklara ulaşabildiği için plazma sprey kaplama; seramikler de dahil malzeme her türlü kaplama malzemesi olarak kullanılabilir [59].

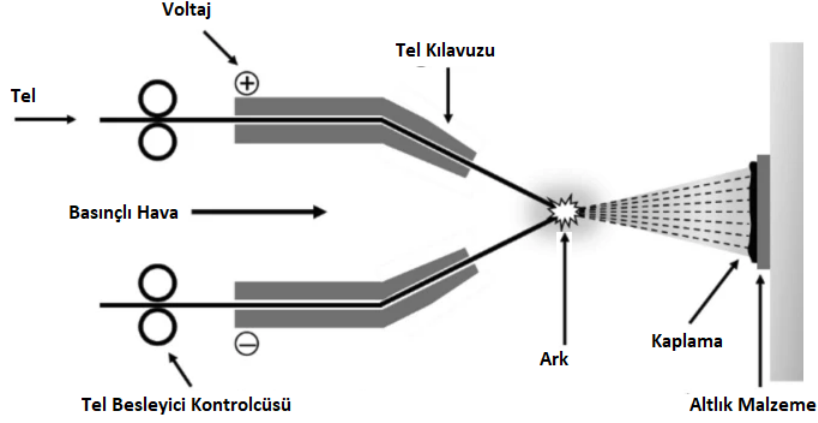
3.2.2.1.2 Boşluk

Havasız ortamda gerçekleşen işlemler Atmosferik ortamda gerçekleşen işlemlerle aynıdır. Yalnızca havasız ortamı sağlamak için genellikle vakumlu ortam yada koruyucu gaz kullanılır. Bu teknikler aşağıdaki şekilde şematize edilmiştir.

3.2.2.2 Elektrikli Ark Sprey Tekniği

Tel ark püskürtme teknolojisi, 1914 yılında Schoop tarafından geliştirilmiş olup en eski termal sprey kaplama işlemlerinden biri olarak bilinmektedir [49]. Bu yöntemde ark; birbiriyle uzantıları çakışıp “>” şekli oluşturacak biçimde konumlandırılmış kaplama iki telinin birbirine negative (-) diğerine pozitif (+) elektriksel yük verilmesi ile bir ark oluşmaktadır. Bu ark oluşumunda ortaya çıkan sıcaklık ile kaplama teller eriyik hale geçmektedir. Ergiyik malzeme yüksek basınçlı hava ile optimize edilip altlık malzemenin altlık malzemeye püskürtülerek malzeme yüzeyinde biriktirek kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olur [53,58,59]. Bu çalışmada; Metcoloy2

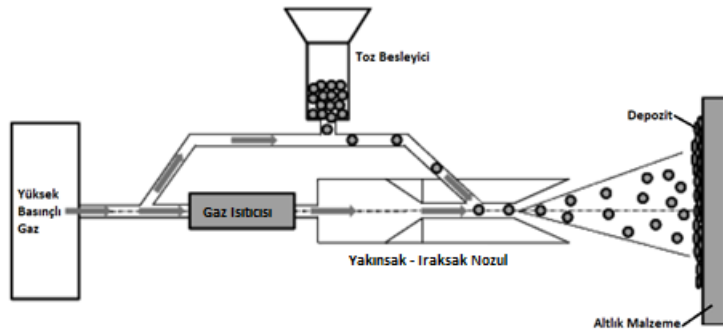
paslanmaz çeliği bu yöntem ile A380 ve A360 malzemelerin üzerinde biriktirilerek kaplama sağlanmıştır.



Şekil 0.9. Çift Telli Ark Sprey Kaplama işlem şeması [61].

3.2.3. Soğuk Termal Sprey Tekniği

Soğuk sprej prosesi; ergime olmaksızın çok yüksek hızlarda (HVOF prosesinden daha yüksek) püskürtme kabilyetine sahip ama yalnızca sünek metal (Bakır, nikel, alümyum g.b.) malzemelerin kaplanmasında kullanılablen bir kaplama yöntemidir. Bu yöntem 1980'li yıllarda Soviyet bilim insanları tarafından geliştirilmiş bir termal sprej kaplama yöntemidir. Bu yöntem temel olarak gaz ısıtıcı, yakınsak-ıraksak nozul, toz besleyici, yüksek basınçlı gaz gibi elemanları kullanılmaktadır. Bu yöntem aşağıdaki şekilde şematize edilmiştir [62].



Şekil 0.10. Soğuk Sprey Kaplama işlem şeması [62].

Soğuk sprey kaplama yöntemi temelde ısınan yüksek basınçlı havanın enerjisinden faydalanarak toz-yağlayıcı karışımının bir altlık malzeme üzerinde biriktirilerek kaplamanın gerçekleşmesidir.

BÖLÜM 4

AŞINMA

Aşınmanın belirli bir tanımı tam olmamakla birlikte bazı kuruluşlar aşağıdaki tanımlamaları yapmıştır. 1976 yılında yayınlanan Alman DIN 503020 standardına göre aşınma [63]: “Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (Katı, Sıvı, Gaz) teması ile mekanik etkiler ile yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen istenmeyen yüzey hasarları” olarak tanımlamıştır. DIN 503020 standardında: “mekanik etkiler” ifadesi ile bu tanımada korozyonun ve kimyasal faktörlerin dikkate alınmadığı , “küçük parçacıkların ayrılması” ifadesi ile aşınma olayı dışında oluşacak fiziki sebeplerin ihmal edildiği ve “istenmeyen yüzey hasarları” ifadesinde ise talaşlı imalatın atlandığı gözlemlenmiştir. OECD’e göre aşınma [64]: “Yüzeydeki izafi hareketin sonucunda meydana gelen artık maddelerin kaybı” olarak tanımlamışlardır. OECD’de: yine korozyonun ve kimyasal faktörlerin ihmal edildiği gözlemlenmiştir. STLE’e göre aşınma [65]: “Genellikle kayma nedeni ile malzeme kaybı” olarak tanımlanmıştır. STLE’de ise tanımlamanın eksik olduğu belirlenmiştir. Tüm bu tanımlamalar neticesinde aşınma: “Ana malzemenin başka malzemelerle (Katı, Sıvı, Gaz) teması veya birbirine göre izafi hareketleri sonucu mekanik ya da kimyasal etkilerle ana malzemenin temas yüzeyinde meydana gelen istenen ve istenmeyen hasarlardır.” olarak tanımlanabilmektedir. Ayrıca aşınma birçok farklı endüstriyel uygulamada meydana gelir ve ekipman arızası, aşınmış parçaların değiştirilmesi ve onarımlar sırasındaki aksama süreleri nedeniyle yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Örneğin; 1978'de gerçekleştirilen araştırma bulguları; aşınma maliyetinin ABD ekonomisine yaklaşık 20 milyar dolar olduğu tespit edilmiştir [15].

Aşınma 5(Beş) temel unsurdan oluşmaktadır. Bu temel unsurlar şunlar:

- Ana Malzeme
- Karşı Malze

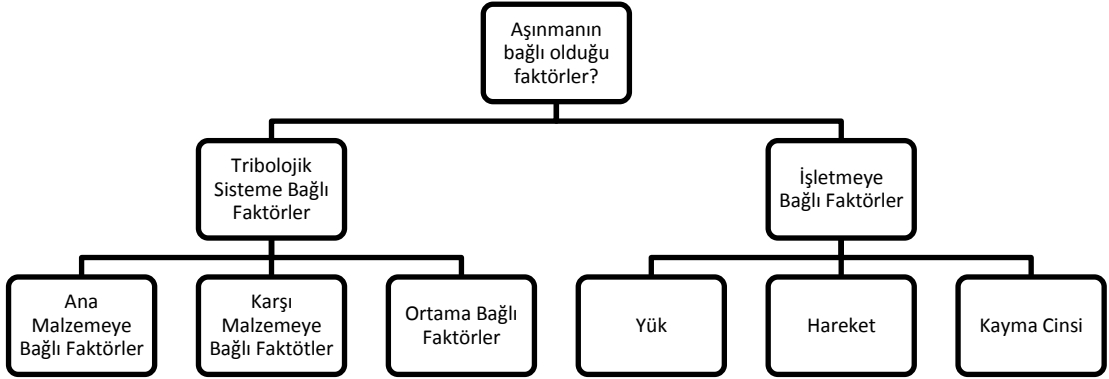
- Ara Malzeme
- Yük
- İzafi Hareket

olarak tanımlanmıştır [63].

4.1. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Aşınmayı etkileyen faktörler tablo 4.1’de gösterilmiştir [63].

Tablo 0.1. Aşınmanın bağlı olduğu faktörler.



4.1.1. Tribolojik Sisteme Bağlı Faktörler

Bu faktörler 3(üç) kısımda belirlenmiştir. Bunlar;

- Ana Malzemeye Bağlı Faktörler
- Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler
- Ortama Bağlı Faktörler olarak belirtilmiştir [63].

4.1.1.1. Ana Malzemeye Bağlı Faktörler

Bu faktörler 8(sekiz) kısımda belirlenmiştir. Bunlar tablo 4.2’de gösterilmiştir

Tablo 0.2 Ana malzemeye bağlı faktörler.



Malzeme Cinsi

Aşınma sırasında da aşınan ve aşındıran malzemelerin birbiri ile kaynaklanabilir malzemeler olmaması gerektiği bilinmektedir [63]. Bu sebeple malzeme cinsi aşınmayı etkileyen faktörlerden biridir.

Malzeme Mikro Yapısı

Mikro yapıda bulunan fazlar ve tane boyutu mekanik özellikleri önemli ölçüde etkileyen bir faktörler olduğu bilinmektedir [63,66,67]. Örneğin, tane boyutu ne kadar küçük ise malzemenin o kadar mukavim ve tok olduğu bilinmektedir [6].

Malzemenin Yüzey Sertliği

Malzeme yüzey sertliğinin, malzemenin aşınma derecesi üzerinde belirgin bir etkisi olduğu bilinmektedir [63,66,67]. Bir malzemenin sertliğinin artması ile aşınma direncinin artacağı ancak bir değerden sonra malzemenin aşınmaya karşı direnç göstermeyeceği tahmin edilmektedir. Genel olarak bir malzemenin yüzey sertliğini arttırmak için imalatta ısıl işlem ve kaplama olarak iki farklı iki farklı işlem uygulanmaktadır. Bu çalışmada farklı altlıklar üzerine aynı kaplamaların aşınmaları karşılaştırılmıştır [63].

Elastiklik Modülü

Malzemelerin elastik modülü mekanik özellikleri önemli ölçüde etkileyen bir faktörler olduğu bilinmektedir [15,63,66,67]. Elastiklik modülü farklı iki malzemenin aşınmasında, düşük elastiklik modülüne sahip malzemenin, gerçek temas alanı biraz daha fazla olduğu için izafi hareket sırasında bu malzemede soğuk kaynak olma ihtimali artacağından aşınma hızında bir artış meydana gelmektedir. Teğetsel gerilmenin, akma sınırını aşması durumunda, burada plastik deformasyon meydana gelerek yüzey pürüzleri tepelerinden koparak aşınmayı hızlandırmaktadır [63,66–68].

Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey Pürüzlülüğünün mekanik özellikleri önemli ölçüde etkileyen bir faktörler olduğu bilinmektedir [63,66–68]. Sürtünme esnasında yüzeyden kopan küçük partiküllerin, büyük bir kısmını yüzeyde bulunan pürüzler oluşturmaktadır. Sürtünme durumunda yüzey pürüzlerine gelen teğetsel gerilmenin, akma sınırını aşması durumunda, burada plastik deformasyon meydana gelerek yüzey pürüzleri tepelerinden koparak aşınmayı hızlandırmaktadır [63]

Malzeme Şekil ve Boyutları

Bir çok araştırmada malzemenin şekil ve boyutlarının aşınmaya olan etkisinin önemli olduğu tespit edilmiştir [63,66–68]. Geometrik kesiti ideal daireye yakın olan numunelerin daha az aşındığını ve aşınma sonucunda ideal daireye yaklaşma olduğu bilinmektedir. Bu duruma; toprak işleme aletlerindeki kesici ağızların zamanla parabolik bir şekil aldığı ve parabolik şeklin aşınmaya karşı daha dirençli olması gibi örnekler verilebilmektedir [63].

Soğuk Şekil Vermenin Etkisi

Soğuk şekil değiştirme sırasında meydana gelen pekleşme malzemenin sertliğinin artmasına neden olduğu bilinmektedir. [63,66–68]. Ayrıca malzemelerin

Sürtünmeleri esnasında verilen enerjinin bir miktarı devamlı olarak soğuk deformasyon meydana getirdiğinden malzeme yüzeyinin pekleşmesine neden olmaktadır. Bu pekleşme, malzemenin sertleşmesine ve dolayısıyla aşınmaya karşı dirençlerinin artmasına sebep olmaktadır [63].

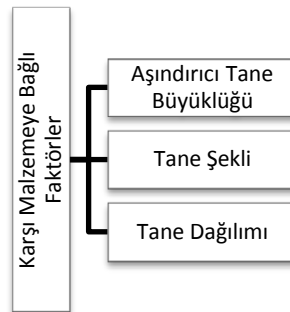
Isıl İşlem

Isıl işlemin mekanik özellikleri önemli ölçüde etkileyen bir faktörler olduğu bilinmektedir. Özellikle Isıl işlemin metalleri dayanım ve sertlik açısından etkilediği bilinmektedir. Örneğin; çeliklerde sertliğin artması aşınma direncini arttırmaktadır [63,66–68].

4.1.1.2. Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler

Bu faktörler 3(üç) kısımda belirlenmiştir. Bunlar tablo 3.3’de gösterilmiştir.

Tablo 0.3. Karşı malzemeye bağlı faktörler.



Aşındırıcı Tane Büyüklüğü

Tane büyüklüğü arttıkça, malzemenin aşınmaya karşı direncinin azaldığı ve aşındırıcı tanelerin parabolik şekilli olması, keskin köşeli tanelere göre aşınmayı azalttığı bilinmektedir. Malzemelerde artan tane büyüklüğüne bağlı olarak aşınma miktarlarının arttığını ve köşeli tanelerin yuvarlak tanelere kıyasla daha fazla aşındırıcı etki yapmaktadır. Ayrıca aşınmanın, abrasif tane boyutlarının artması ile

belirli bir mikrometreyle boyutuna kadar hemen hemen doğrusal olan aşınma artışının, bu boyuttan sonra sabit kaldığı bilinmektedir [63,66–68].

Tane Şekli

Aşındırıcılarda şekil fazla önemli olmamakla birlikte aynı şekilli iki aşındırıcı birbiri ile karşılaştırıldığında biri diğerinden daha az dirençsiz olabilmektedir. Örneğin; Silisyum karbür (SiC) aşındırıcı taneleri ise daha sert ve keskin köşeli olmalarına rağmen, alüminyum oksit aşındırıcılara göre aşırı derecede kırılğan oldukları bilinmektedir [63,66–68].

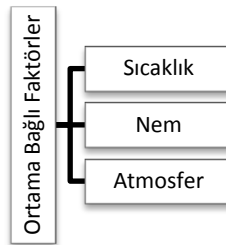
Tane Dağılımı

Malzemelerin kristal yapılarının aşınma direncine etkisinin araştırılmasıyla; sıkı paket yapıya sahip malzemenin aşınma dirençlerinin, diğer kristal yapılarına sahip olanlara göre daha büyük olduğu bilinmektedir [63,66–68].

4.1.1.3. Ortama Bağlı Faktörler

Bu faktörler 3(üç) kısımda belirlenmiştir. Bunlar tablo 3.4’de gösterilmiştir. Aşınmayı etkileyen önemli faktörlerden biri de aşınma ortamının atmosferi, nemi ve sıcaklığıdır. Temas halinde bulunan yüzeylerin sürtünmeden dolayı yüzeylerde bölgesel olarak sıcaklık artışına sebep olmaktadır. Yüzeylerde meydana gelen bu sıcaklık artışı, malzemenin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirerek malzemenin aşınmaya karşı direncini etkilemektedir.

Tablo 0.4 Ortama bağlı faktörler.



Sıcaklık

Sürtünen makina parçalarında meydana gelen aşınmaya etki eden bir faktör olduğu bilinmektedir. Örneğin; hafif aşınma bölgesinde artan sıcaklığın aşınma miktarını arttırdığı bilinmektedir . Ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerin yüksek aşınma direncine sahip olduğu bilinmektedir [63,66–68].

Nem

Yüksek nem oranının, abrasif aşınma miktarlarının yaklaşık %15 artmasına sebep olduğunu ve su buharının diğer yağlayıcılara benzer olarak abrasyon etkisini arttırdığı bilinmektedir [63,66–68].

Atmosfer

Bilindiği üzere aşınmanın gerçekleştiği ortam aşınma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ortam eğer Atmosferik bir ortam ise eğer oksijen yüzeyde koruyucu oksit tabakası oluşturmaktadır. Ortam olarak soy gaz (argon vb.) kullanılan yerlerde ise oksit oranı azalacak ve aşınma olasılığı artmış olacaktır [63,66–68]

4.1.2. İşletme Bağlı Faktörler

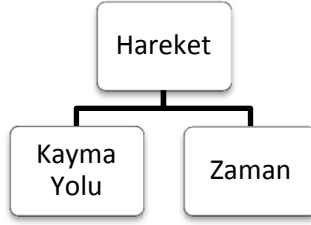
4.1.2.1. Yük

Uygulanan kuvvetin artmasına bağlı olarak aşınma miktarının arttığı bilinmektedir [63,66–68].

4.1.2.2. Hareket

Bu faktörler 2(iki) kısımda belirlenmiştir. Bunlar tablo 3.5’de gösterilmiştir.

Tablo 0.5. Hareket.



Kayma Yönü

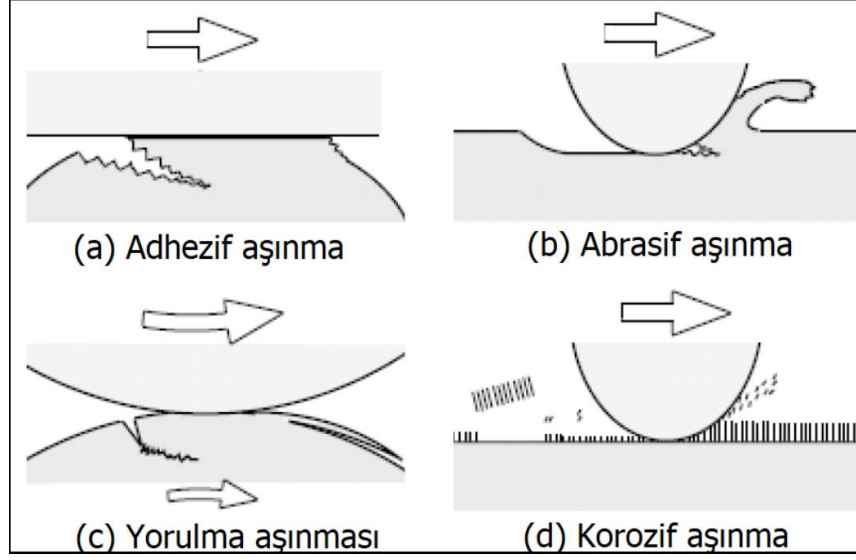
Yağlamalı ve yağlamasız şartlarda aşınma hacmi, kayma mesafesiyle orantılı ve bu orantı da kayma mesafesi arttıkça aşınma da artma şeklinde olduğu bilinmektedir. Kayma mesafesi ile aşınma miktarının orantılı olduğu bilinmektedir [63,66–68]

4.2. AŞINMA TIPLERİ

Aşınma birden fazla tipte gerçekleşmektedir. Ancak aşınma temel olarak 4 (dört) tipte gerçekleşmekte olup diğer aşınmalar da bu yazıda verilmiştir. Bu temel aşınma mekanizmaları;

- Adhesif Aşınma
- Abrasif Aşınma
- Korozif Aşınma
- Yorulma Aşınması

olarak bilinmektedir.



Şekil 0.1. Sıklıkla karşılaşılan aşınma mekanizmaları [63].

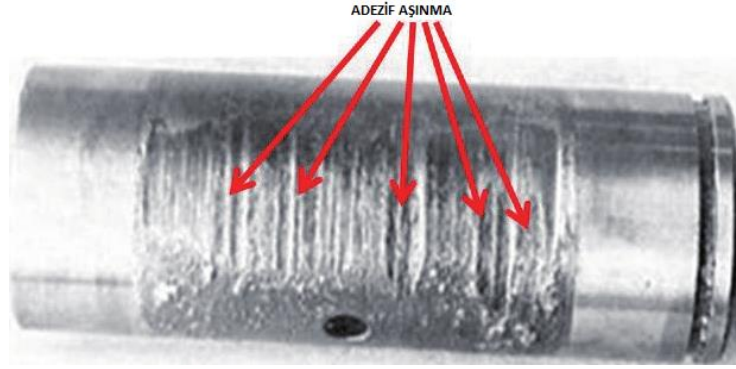
Bunların yanında diğer bazı aşınmalar;

- Sürtünme Aşınması
- Kazımalı Aşınma
- Erozyon Aşınma
- Darbe Aşınması
- Kaviteasyon Aşınması

olarak sınıflandırılabilir.

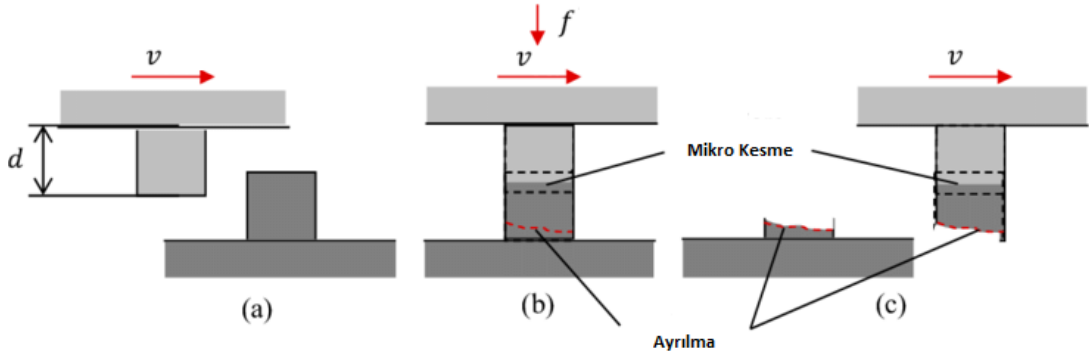
4.2.1. Adhezif Aşınma (Yapışma Aşınması)

İster katı ister sıvı isterse gaz olsun bir maddenin atomları arasında bir çekim kuvveti olduğu gibi iki farklı maddenin de birbirlerinin atom ve molekülleri arasında bir çekim kuvveti olabilmektedir. Buna adhezyon denmektedir [68]. Adhezyon olayı kısaca; iki farklı malzemenin bir kuvvet etkisi altında birbirine sürtünerek sürtünen yüzeydeki pürüzlerin birbirine geçici olarak yapışmasıyla gerçekleşmektedir.



Şekil 0.2. Endüstriyel bir parçada adezif aşınma örneği [69].

Adhezyon aşınması; yapışmış bu pürüzlerin, metallerin hareketine devam etmesi ile nispeten daha yumuşak olan malzemeden küçük parçalar kopması ve karşıt yüzeye yapışması ile gerçekleşmektedir [63,68,70]. Bu aşınma aşağıdaki şekilde görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 0.3. Adhesif aşınma şematik gösterimi [71].

Teorik Modelleme

Adhesif aşınma nicel bir ifade olarak 1950'li yıllarda Archard tarafından tanımlanmıştır. Archard bu tanımlamayı yaparken aşağıdaki varsayım ve kabulleri kullanmıştır. Bunlar;

- Gerçek temasın eşit büyüklükte n tane temas noktasından oluştuğu varsayılırsa ve eski temas noktasının kaybolmasından sonra yeni bir temas noktası oluşursa, kayma sırasında toplam temas sayısı n sabit kalmaktadır

- Yarıçapı a olan dairesel bir temas alanı varsayarak, $2a$ mesafesini kaydırıldıktan sonra oluşan aşınma parçacıklarının olası hacmi, $\frac{2\pi a^3}{3}$ ile tanımlanan yarım küre hacmi olarak kabul edilmektedir olarak verilmiştir. Bu varsayımlara göre elde ettiği ilk denklem;

$$V = n \cdot \frac{2}{3} \pi a^3 \cdot \frac{L}{2a} \quad \#3.1$$

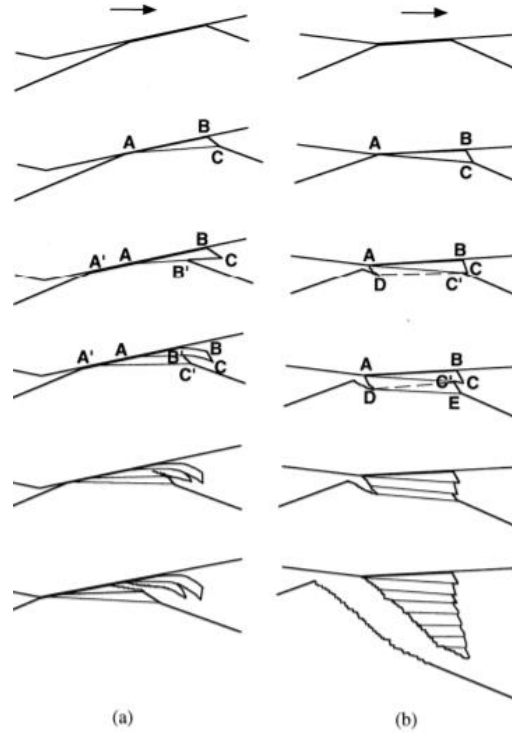
olarak verilmiştir. Plastik deformasyonlu normal temas basıncı, aşınan malzemenin sertlik değerine H neredeyse eşit olduğundan, n temas noktası $n\pi a^2$ için toplam gerçek temas alanı şu şekilde ifade edilmiştir:

$$n\pi a^2 = \frac{W}{H} \quad \#3.2$$

Bu iki denklemi birleştirirsek:

$$V = \frac{W \cdot L}{3H} \quad \#3.3$$

şeklinde bir denklem türetmiş oluruz. Yani basit ifade ile aşınma hacmi; uygulanan yük ve aşınma mesafesi ile orantılı iken malzemenin yüzeydeki penetrasyon sertliği ile ters orantılı olduğu söylenebilmektedir. Ancak aşağıdaki şekilde de ifade edildiği üzere çeşitli modlar yoluyla adezif aşınma meydana gelebilir ve aşınma parçacıklarının boyutu, temasın boyutu tekabül ettiği anlamına gelmez. Buna ek olarak, bir aşınma partikülü her zaman sadece nispeten yumuşak malzemenin oluşmayıp bazen her iki parçada da görülebilmektedir.



Şekil 0.4. Yapışkan aşınma sürecinde gözlemlenen temsili yapışkan aktarım sürecinin şematik diyagramı; ince bir pul benzeri aşınma parçacığının (a) ve bir kama benzeri aşınma parçacığının (b) yapışkan transferi [72].

Tüm bu değişkenleri barındırmak için yazılan denkleme boyutsuz bir K_{ad} değişkeni ilave edilerek Archard'ın adhesif aşınma için nicel ifadesine ulaşılmış oluruz ki bu ifade;

$$V = K_{ad} \cdot \frac{W \cdot L}{3H} \quad \#3.4$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada; V aşınma hacimi K_{ad} sabit , W normal yük, L aşınma mesafesi, H ise malzemenin yüzeydeki penetrasyon sertliği olarak ifade etmektedir [72].

Abrasif Aşınmayı Engelleme Yolları

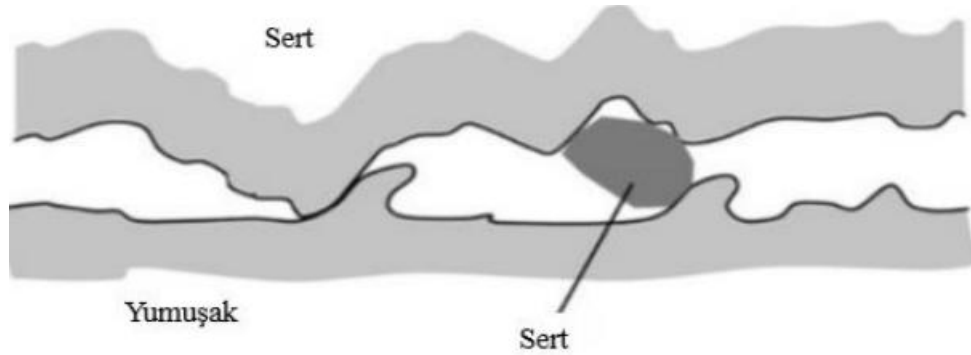
Adhesif aşınma önlemek için 4 (dört) basit şekilde engellenebilmektedir. Bunlar;

- Sürtünmeyi azaltıp mikro yapışmaya neden olacak ısıyı uzaklaştırmak için Yağlama
- Birbirleri içerisinde çözünmeyen yada birbirlerine yapışmayacak malzemeleri kullanmak
- Pürüzsüz ve düz yüzeyler kullanmak
- Eğer malzemelerimiz metal ise de metal metal temasından uzak tutmak için malzemelerden birinin yüzeyini fosfat gibi filmler ile kaplamak

olarak verilebilmektedir [63].

4.2.2. Abresif Aşınma

Abrasif aşınma en sık görülen aşınma türüdür. Bu aşınma türü kısaca; temas halindeki parçaların birbirlerini mekanik olarak zorlaması (sürtünme, delme, v.b) sonucu parçalardan mikro ya da makro boyutlarda depozitler oluşması olarak tanımlanabilmektedir [66,68–70,73]. Ayrıca bu aşınma türü yırtılma veya çizilme aşınması olarak da adlandırılmaktadır [63,68,70,73]. Bu aşınma türüne görsel bir örnek aşağıya verilmiştir.



Şekil 0.5. Abrasif aşınma şematik gösterimi [15].

Abrasif aşınma oluşum bakımından temel olarak ikiye ayrılabilir [63,68,70,73]. Bunlar;

- İki elemanlı abrasif aşınma
- Üç elemanlı abrasif aşınma

olarak ifade edilebilmektedir. Bunlar şematik olarak gösterilmiştir [70].

kaydırıldıktan sonra daha sert pürüzlerle sürülen olası aşınma hacmi V aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$V = d^2 \cdot \tan(\theta) \cdot L \#3.5$$

Plastik temas altındaki normal temas basıncının, aşınan malzemenin H sertlik değerine eşit olduğu varsayılabileceğinden, $\pi(d \tan \theta)^2/2$ 'nin gerçek temas alanı aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

$$\frac{1}{2} \pi (d \cdot \tan \theta)^2 = \frac{W}{H_v} \#3.6$$

Yukarıdaki iki denklemi birbirine eşitlenirse; normal yük W altında ve kayma mesafesi L'den sonra olası aşınma hacmi V aşağıdaki gibi tanımlanmış olacaktır:

$$V = \frac{2}{\pi \cdot \tan \theta} \cdot \frac{W \cdot L}{H_v} \#3.7$$

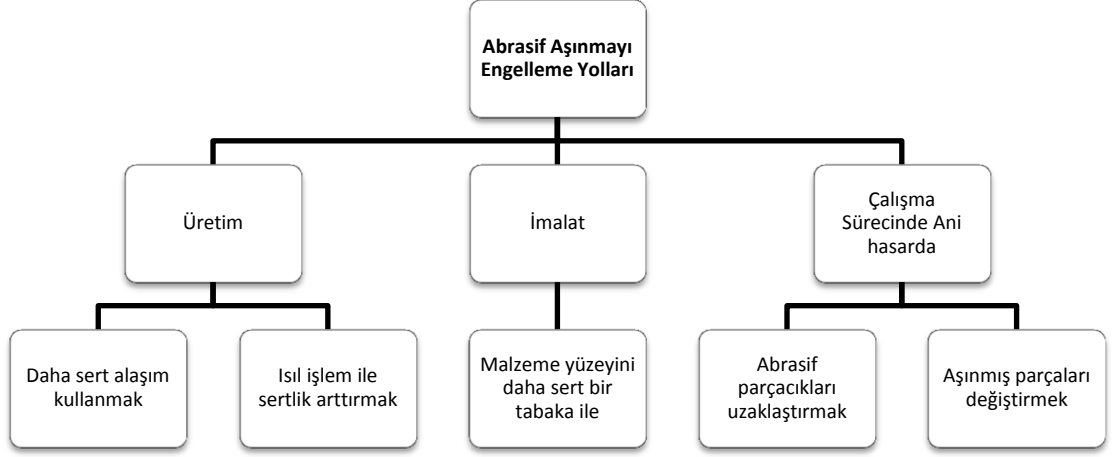
Ancak aşındırıcı kanal açma gibi işlemler ve diğer abrasiv aşınmalarda, aşınma hacminin her zaman kanal hacmine eşit olmadığı bilinmektedir. Bu sebepten ötürü son denklemde K_{ab} parametresi tanımlanarak yeni denklem aşağıdaki gibi olmaktadır [72].

$$V = K_{ab} \cdot \frac{W \cdot L}{H} \#3.8$$

Abrasif Aşınmayı Engelleme Yolları

Abrasif aşınma temel olarak malzeme üretiminde, parka imalatında ve kullanımsırasında olmak üzere 3 (üç) kısımda engellenebilmektedir. Bunlar aşağıdaki tabloda verilmiştir [63]. Ayrıca bu çalışmada motor sızdırmaz plakaların bağlantı yerlerinde gerçekleşebilecek abrasiv aşınmaların engellenmesi için altlık olarak kullanılan alüminyum alaşımından daha yüksek olan sertliğe sahip olan paslanmaz çelik kaplanmış ve abrasiv aşınma davranışları incelenmiştir.

Tablo 0.6. Abrasif aşınmayı engelleme yolları [63].



4.2.3. Korozif Aşınma

Malzeme bir biri ile temas halinde gerçekleşen izafi hareketi sıvı ya da gaz atmosferinde gerçekleştiği zaman temas yüzeylerinde kimyasal veya elektrokimyasal etkileşimlerle reaksiyon ürünleri oluşmaktadır. Bu reaksiyon ürününün yüzeye yapışması ve ardından da temas halindeki malzemelerin izafi hareketi sonucu bu reaksiyon ürünlerinin yüzeyden kaldırılması ile bir tribokimyasal aşınma meydana gelmektedir. Oluşan bu aşınmaya korozif aşınma denmektedir [63,72].



Şekil 0.8. Korozyona uğramış malzeme [63].

Korozif aşınma iki kademedede gerçekleşmektedir. Bu aşamalar ;

- Temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girer girer yüzeyde yüzeyde bir bir tabaka tabaka oluşması,
- Daha sonra temas noktasında çatlak oluşur veya abrazyon etkiden dolayı oluşan tabaka hasara uğraması

olarak tanımlanabilmektedir. Bu aşınma türünü engellemek için genellikle kaplamalar uygulanmaktadır [63].

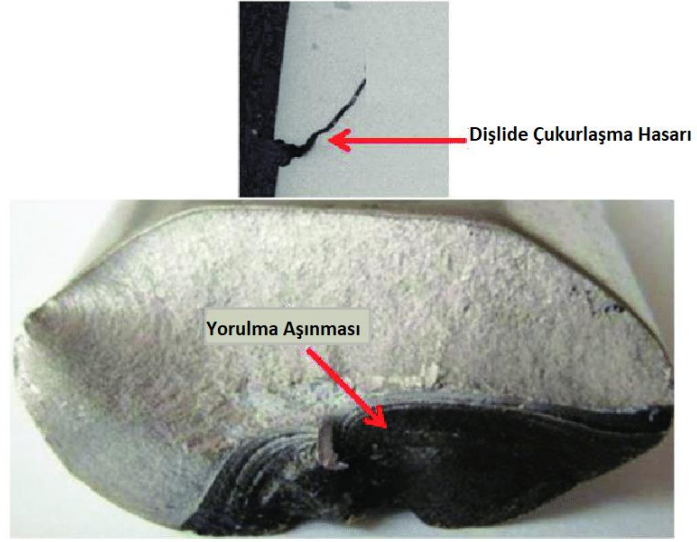
Korozif Aşınmalarda bilenen türü metallerde gözlemlenen oksidatif aşınmadır. Çelik ve normal atmosferik hava arasındaki oksidatif reaksiyona dayalı olarak ve çeliktan bir oksit filminin belirli bir kritik kalınlıkta yüzeyden ayrılmasının beklendiği film çıkarma modeli varsayılarak korozif aşınma katsayısı (K_c), K_{ad} ve K_{ab} aynı şekilde Quinn ve arkadaşları tarafından ifade edilmiştir [72]. Bu ifade denklem 1'de gösterilmiştir.

$$K_c = \frac{d_A}{L^2 q^2 v} \exp\left(-\frac{Q}{R_g T}\right) \quad \#3.9$$

Burada A , Arrhenius sabiti; Q , aktivasyon enerjisi; R_g , gaz sabiti; T , mutlak sıcaklık; q , oksit yoğunluğu; v , kavrama hızı; L , aşınma temasının yapıldığı mesafe olarak tanımlanmaktadır [72].

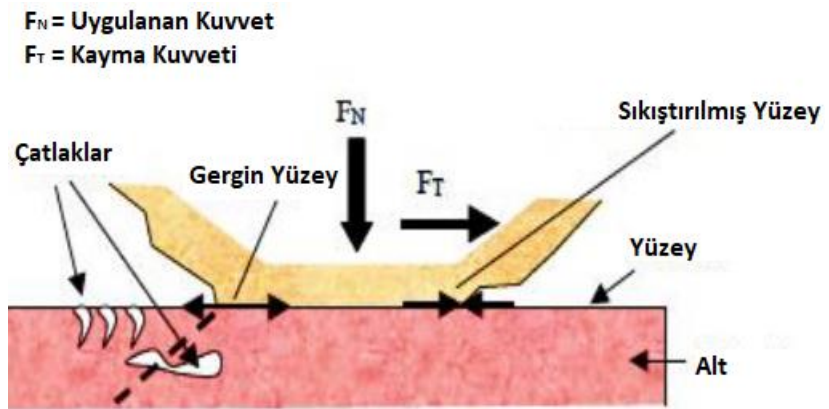
4.2.4. Yorulma Aşınması (Fatigue Wear)

Bu aşınma ilk kez 1911 yılında Eden, Rose ve Cunningham tarafından tespit edilmiş bir aşınma mekanizmasıdır [63]. Birbirine göre tekrarlı izafi harekette bulunan iki malzemenin temas yüzeylerinde basın oluşması ve bu basıncın da deformasyona uğramış yüzeyin altında kayma gerilmesine sebep olması ile başlayan olaya **yorulma** adı verilmiştir [63].



Şekil 0.9. Yorulma aşınması örneği [69].

Değişen ve tekrarlı kaymalı gerinimler sonucunda yüksek kayma gerinimi bulunan yerlerde plastic deformasyon ve dislokasyona bağlı boşluklar oluşmaktadır. Oluşan bu boşluklar zamanla yüzeye doğru hareket ederek yüzeyde çukurlar oluşturur bu sayede de yorulma aşınması gerçekleşmiş olmaktadır [63,68,70]. Ayrıca Yorulma aşınması; uzun süreli kaymalı aşınmada, düşük genlikli titreşimli yüzey teması esnasında, ağır yük altında malzeme yüzeyinde static çekme gerilmesi oluşması durumunda da oluşmaktadır [63]. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi aşağıda verilmiştir [74]. Bu aşınma genellikle; tekerlek göbekleri, pres bağlantıları aks ve shaft yatak çerçeveleri ve makinaların bağlantı elemanları gibi yerlerde gerçekleşmektedir [63].



Şekil 0.10. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi [74].

Yorulma aşınmasını engellemek için genellikle temas eden parçalara:

- Parçanın tasarımını iyileştirmek
- Parçanın temas yüzeyinde pürüzlülüğü arttırmak
- Parça yüzeyinde basma gerilimleri oluşturmak
- Parçaları kaplamak

gibi işlemler uygulanmaktadır [63]. Bizim bu tezde Termal spreyci kaplama kullanılması iş parçasında hem yüzeyde pürüzlülüğü optimize etmiş ve yorulma aşınma dayanımına olumlu bir katkıda bulunmuştur.

Yuvarlanma elemanlarında genel olarak gözlenen elastik temas durumunda, ana aşınma mekanizması durumunda, ana aşınma mekanizması; temas bölgesinde yüksek devirli yorulma hasarı olarak bilinmektedir. Yıpranma veya pullanma yoluyla aşınma parçalarının üretilmesini belirlemek için kritik haddeleme çevrim sayısı (N_f) gerekmektedir. Bu sayı deneysel olarak aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$N_f \propto \frac{1}{W^n} \quad \#3.10$$

Plastik olarak deforme olmuş tabakanın düşük devirli yorulma ile aşınma parçacıkları olarak ayrıldığını varsayarsak N_f değiştirilmiş Coffin-Manson ilişkisi aşağıda verilmiştir.

$$N_f = \left[\frac{C_s}{\Delta\gamma_s} \right]^D \quad \#3.11$$

Burada; C_s monotonic etikili kesme şekil değiştirmesi, $\Delta\gamma_s$ dalga geçişi başına efektif kayma gerinimi, D ise genellikle '2' alınan bir sabit olarak bilinmektedir.

Birim aşınma hacmini üretmek için gereken plastik işi göz önünde bulundurarak ve yukarıdaki denklemin ilişkisini tanıtarak aşınma hacim/yük/mesafe ile tanımlanan özgül aşınma oranı aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

$$W_s = \frac{r_p \mu}{k C_s^D \Delta \gamma_s^{1-D}} \#3.12$$

Burada; W_s özgül aşınma oranı, r_p plastiğin toplam kayma işine oranı, k aşınmanın ortalama kayma akış gerilimi olarak adlandırılmıştır. Buna ek olarak bu denkleme $k = H_{(sertlik)}/(3 * 3^{1/2})$ ilişkisini dahil ederek, yukarıda bahsedilen K_{ad} ve K_{ab} ile aynı şekilde tanımlanan yorulma aşınma katsayısı (K_f) şu şekilde ifade edilmiştir [72]:

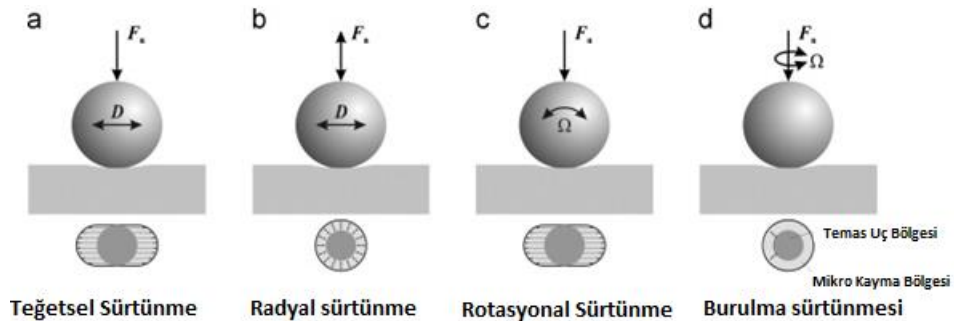
$$K_f = W_s H = \frac{3 * 3^{1/2} r_p \mu}{C_s^D \Delta \gamma_s^{1-D}} \#3.13$$

4.2.5. Diğer Aşınmalar

Bu aşınmalar haricinde başka aşınmalar da vardır. Bazı aşınmalar aşağıda sunulmuştur.

4.2.5.1. Sürtünme Aşınması (Fretting Wear)

Sürtünme aşınması, terimden de anlaşılacağı gibi, kayma yüzeyleri arasındaki bağıl hareket çok küçük olduğunda gözlemlenebilen kayma aşınmasının özel bir şekli olarak tanımlanabilmektedir [63,67]. Sıklıkla karşılaşılan sürtünme aşınması mekanizmaları aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Burada teğetsel sürtünme aşınması (a)'da, Radyal sürtünme (b)'de, Rotasyonel sürtünme (c)'de, Burulma sürtünme aşınması da (d)'de verilmiştir.



Şekil 0.11. Sürtünmeli aşınma mekanizmaları [75].

Titreşimli ortamda çalışan somun, perçin gibi bağlantı elemanları ve otomobil şaftlarının birleşme noktalarında piston ve yataklarında çok rastlanılan bir hasar tipi olarak bilinmektedir[67]. Aşağıda bir örneği verilmiştir.



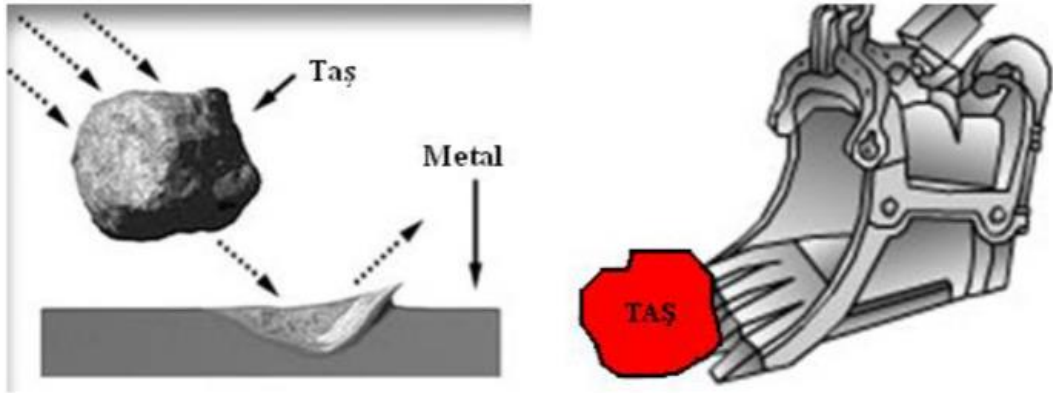
Şekil 0.12. Piston eteklerinde görülen sürtünme aşınması [76].

Sürtünme aşınmasını engellemek için titreşimi azaltma ve hatta gidermek, bağlantı noktalarında elastomer malzeme kullanmak, yada bağlantı noktalarını yağla gerekmektedir [67]. Ancak bu aşınmalar sadece malzeme için zararlı olmamakla birlikte malzemenin üretimi için gerekli olabilmektedir. Sürtünme aşınması bir başka yönüyle malzeme imalatı sırasında ürün ortaya koyabilmek için gerekli olan aşınmalar olarak bilinmektedir. Örneğin; torna, freze gibi alışılmış imalat yöntemleri bu mantığa göre yüzeyden parça (talaş) kaldırarak ürün ortaya koyarken; su jeti, bilyalı dövme gibi imalat yöntemleri de aynı mantıkla üretim gerçekleştirmektedir.

Bu tezde ball-on-disk cihazı ile numuneleri teğetsel sürtünme aşınmasına uğratarak kuru kayma koşulunda yalnızca F kuvveti değiştirilerek malzemenin abrasive ve adhesive aşınma dayanımları test edilmiştir.

4.2.5.2. Oymalı Aşınma

Oymalı aşınma, malzeme yüzeyinin çok yüksek gerilmelerdeki çarpma durumlarında, yüzeyden bir parçanın kesilerek veya oyularak kopmasıyla meydana gelmektedir. Bu tip aşınmaya genellikle hafriyat, madencilik, petrol kuyularını delme işlemi ve benzeri koşullarda çalışan malzemelerin kesme ve delme görevi yapan kısımlarında görülmektedir [77]. Bu aşınma aşağıdaki şekilde görsel olarak örneklenmiştir.



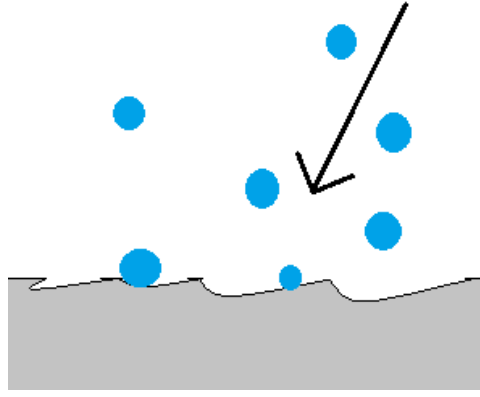
Şekil 0.13. Oymalı aşınma [70].

Ayrıca bu tür aşınma diğer türlere göre çok daha hızlı geliştiğinden parçaların yenisiyle değiştirilmesi engellemeye çalışacak işlemlerden daha ekonomik olacaktır [67].

4.2.5.3. Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınma; bir sıvı içerisindeki sert partiküllerin malzeme yüzeyinden yüksek hızlarda kayması ve yuvarlanması ve bu işlemlerin periyodik olarak devam etmesi esnasında çok sayıda parça kopması sonucunda meydana gelen aşınma tipi olarak nitelendirilmiştir [63,66]. Kısacası eroziyon aşınma genellikle Şekil-‘de görüldüğü üzere metal ve partikül yada parçaların periyodik olarak tektarlanan temasları sonucu metalden parça kopması oluşan aşınma türü olarak adlandırılabilir. Eroziyon

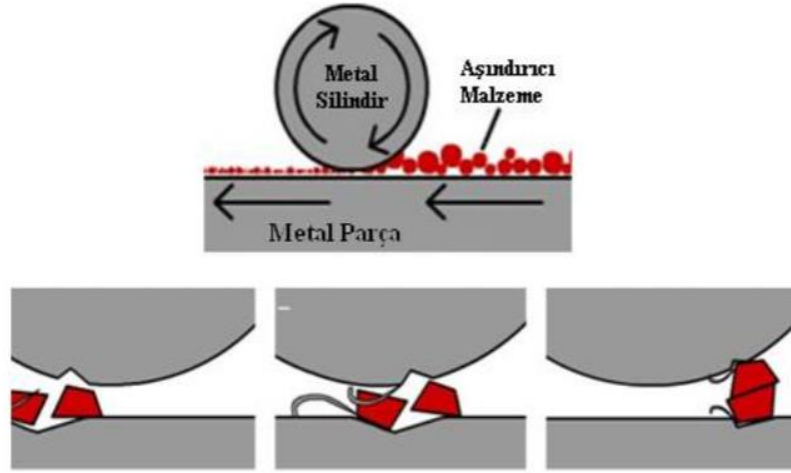
aşınmaya örnek olarak uçak üzerine çarpan yağmur damlalarının, sıvı damlacıklarını dışarı atan fanların, akışkan püskürtme yansıtıcılarının oluşturduğu aşınmalar verilebilmektedir [63]. Ayrıca bu aşınmanın yapısı; aşınan malzemeye, aşındırıcının özelliğine, darbelerin durumuna ve şiddetine, başlangıçtaki partikül kütesine, partikül hızına ve geliş açısına bağlı olduğu bilinmektedir. Malzemelerin erozif aşınmaya gösterdiği tepki; aşındırıcının şekli, sertliği, tokluğu ve boyutlarındaki farklılıkları ile büyük açıdan önem taşımaktadır [70].



Şekil 0.14 Erozyon şematik gösterimi.

4.2.5.4 Öğütme Aşınması

Öğütmeli aşınma, iki yüzeyin arasında abrasyona dayanabilen parçacıkların olduğu ve bu yüzeylerin birbiri üzerinde hareket etmesi sonucunda ortaya çıkan bir aşınma mekanizmasıdır. Bu ara yüzeyde yer alan parçacıklar, ya bir yüzeyden aşınarak gelmekte ya da her iki yüzeyin birlikte aşınması sonucu ortaya çıkmaktadır [68]. Bu aşınma türü yüksek basınç altındaki partiküllerin metal yüzeyi ile düşük hızlarda karşılaşmaları sonucunda metal çizikler yüzeyinden parçacıkların kesilip çok sayıda ufak çizikler açılarak kopartılması sonucu meydana gelmektedir. Bilyalı değirmenlerde görülmektedir. En çok buldozer ve kepçe kesici uç yüzeylerinde aşınma sonucu körleşme oluşumu olarak karşımıza çıkmaktadır [63,70]. Bu aşınmaya görsel bir örnek aşağıda sunulmuştur.



Şekil 0.15 Öğütmeli aşınma şematik gösterimi [70].

4.2.5.5 Kaviteasyon Aşınması

Kaviteasyon; genellikle gemiler gibi sıvı ile teşebbülü olan araçlarda suyun yoğunlaşması esnasında yoğunlaşma bölgesindeki sıvının buhar basıncının altına düştüğü ya da buharbasıncına eşit olduğu zaman başlayan bir olaydır [63,78,79]. Ayrıca bu araç eğer gemi ise hızının artması ile beraber pervane, dümen ve şaft gibi uzantılarda kaviteasyona bağlı aşınma ortaya çıktığı bilinmektedir [79].

Kaviteasyon aşınması (çukurcuk aşınması); hızın ani etkisi altında oluşan baloncukların metal yüzeyde çukurcuklar oluşturmasıyla sonuçlanan aşınma şekli olarak tanımlanabilmektedir. Ayrıca kaviteasyon aşınması genellikle gemilerin, pompaların perçanelerinde ve kompresör silindirlerinin iç kısmında meydana gelmektedir [78,79].



Şekil 0.16. Pompa çarkında gerçekleşen kaviteasyon [78].

Kavitasyonu önlemenin ideal yöntemi, yüzeylere yakın negatif basınçlardan kaçınmak olduğu bilinmektedir. Ancak pratikte bunun genellikle imkansız olduğu bilinmektedir [79]. Kavite aşınmasını engellemek için bazı yöntemler kullanılmaktadır. Gemilerde yüksek köşeye ait yuvarlanma çapının büyümesi, yük dağılımlarının mil ve kavis üzerinde değişikliklerle değiştirilmesi gibi bir durum buna örnek verilebilmektedir [63,79].

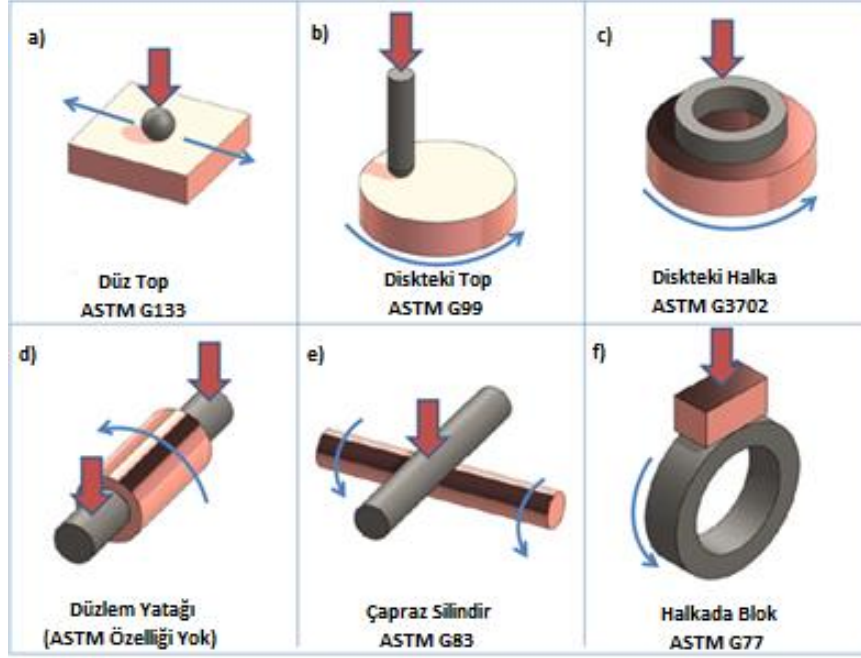


Şekil 0.17. Gemi pervanesinde gerçekleşen korozyon aşınması [79].

4.3. AŞINMA DENEY VE ÖLÇÜM METODLARI

4.3.1 Aşınma Deney Metodları

Bir aşınma ölçüm yöntemlerinin tanımlanması ve katagorize edilmesi için bazı standartlar gerekmektedir. Bunun için de gibi birçok standartta test yolları mevcuttur. Bu çalışmada ASTM standardına göre işlem yapılacağından bu standart ile ilgili bazı test tipleri ve kodları aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 0.18. Aşınma ölçüm testleri [80].

Bu çalışmada termal spreyle kaplı malzemenin adhesif ve abrasif aşınma davranışı incelenmesi gerekçesi aşağıdaki şekilde gösterilen testler uygulanabilmektedir. Ancak bu çalışmada İngilizcesi ball-on-flat (düz top) olan ASTM G133 kodlu test gerçekleştirilmiştir.

4.3.2 Aşınma Ölçüm Metodları

Aşınma ölçümünü gerçekleştirmek için çok sayıda yöntem mevcuttur. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir [68,81]. Bunlar;

- Ağırlık Farkı Yöntemi
- Kalınlık Farkı Yöntemi
- İz Değişimi Yöntemi
- Radyo İzotop Yöntemi

4.3.2.1. Ağırlık Farkı Yöntemi

Ekonomik oluşu, ayrıca ölçümün, aletin duyarlılık durumuyla ilişkisi ve kolaylığı gerçekleştirilebilmesi sebebiyle sıkça tercih edilmektedir. Ağırlık kaybı ölçümleri hassas teraziler yardımıyla yapılmaktadır. Aşınma birimi gram veya miligram cinsinden ifade edilmektedir. Metre yada kilometre olarak tespit edilen, sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı yol başına kütle (gr/km) şeklinde ifade edilebilmektedir. Ağırlık kaybı birim alan için hesaplanacaksa birim; alan başına kütle (gr/cm²) şeklinde ifade edilmektedir. Ağırlık kaybını hacimsel aşınma miktarı olarak belirtmek için aşınma oranı, kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılarak, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybindan bulunabilmektedir [68,81]. Bu tanımlara göre, en çok kullanılan ağırlık farkı ölçme metodundaki bağıntı şudur;

$$W_a = \frac{\Delta m}{F \cdot s \cdot \rho} \#3.14$$

Burada; W_a Aşınma oranı ($mm^3/N.m$); Δm , ağırlık kaybı (gr), F, yükleme ağırlığı (N); s, aşınma yolu (m); ρ , yoğunluk (gr/mm^3) olarak tasvir edilmiştir. Aşınma oranının matematiksel olarak çarpma işlemine göre tersi ise, aşınma direnci (W_r) olarak tanımlanmaktadır [68,81].

$$W_a = \frac{1}{W_r} \#3.15$$

4.3.2.2. Kalınlık Farkı Yöntemi

Bu yöntemde ölçüm; ilk olarak aşınma sırasında oluşan boyut değişikliğinin ölçülmesi, yani değeri ile karşılaştırılması yolu ile elde edilmesi ile başlamaktadır. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerlerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanmaktadır [68,81]. Ceviz [15]; 2021 yılında gerçekleştirdiği AA7075-T6 alaşımı ve AA7075-T6 alaşımı alt tabaka üzerine HVOF termal sprey ile kaplanmış WC-10Co-4Cr kaplamanın farklı sıcaklıklardaki

sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi üzerine hazırladığı bir doktora tezinde bu metodu kullanmıştır.

4.3.2.3. İz Değişimi Yöntemi

Sürtünme yüzeyinde, plastik deformasyona bağlı olarak belirli geometride bir iz oluşmaktadır. Deney boyunca, bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülmektedir. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak genellikle Vickers veya Brinell sertlik ölçme uçları kullanılmaktadır [68,81]. Bu yöntemde kısaca aşınma deneyi sırasında oluşan plastic deformasyona bağlı oluşan izin karakteristik boyutlarını değişimi incelenerek gerçekleştirilmektedir.

4.3.2.4. Radyo İzotop Yöntemi

Bu yöntem Sürtünme yüzey bölgesine proton, nötron veya yüklü γ parçacıkları göndererek bu bölgeyi radyoaktif hale getirilme esasına dayanmaktadır. Ayrıca bu yöntem; aşınmanın büyük hassasiyetle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi gibi avantajlara sahiptir. Ancak ekonomik olmaması nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmadığı bilinmektedir [68].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, alüminyum altlıklı termal sprey kaplamanın aşınma dayanımı incelenmiştir. Bunun için öncelikle altlık malzemeler seçilip hazırlanmış ve kaplama işlemine geçilip numuneler hazırlanmıştır. Numune hazırlama işleminden sonra mikro yapıları SEM cihazı ile incelenmiştir. Daha sonra sırası ile sertlik, pürüzlülük testleri yapılmıştır.

5.1. NUMUNE SEÇİMİ

Bu çalışma için yüksek korozyon direnci ve yüksek basınçta sızdırmazlık kabiliyeti bakımından ideal olan ve ucuz çin motorlarında blok malzemesi ve sızdırmazlık malzemesi olarak kullanılan A380 ve A360 alüminyum alaşımların altlık malzeme olarak kullanılmıştır. Numunelerin resimleri aşağıdaki şekilde sunulmuştur.



Şekil 0.1. a) A360 Alüminyum alaşımı, b) A380 Alüminyum alaşımı.

Bu malzemelerin kimyasal özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 0.1. Altlık malzemelerin kimyasal özellikleri [82].

	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Ti	Pb	Al
A360 (%)	0,5	9,00-10,00	0,1	0,40-0,60	0,30-0,45	0,1	0,1	0,15	0,05	diğer
A380 (%)	1	7,50-9,00	3,00-4,00	0,5	0,3	1	0,2	0,2	0,1	diğer

Fiziksel özellikleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 0.2. Altlık malzemelerin fiziksel özellikleri [82].

	A380 (ETİAL-160)	A360 (ETİAL-171)
ÖZGÜL AĞIRLIK (gr/cc)	2,76	2,64
ERGİME ARALIĞI (C)	540-595	575-595
ISISAL İLETKENLİK (cal/cm.sC)	0,23	0,27
KOROZYON DAYANIMI	ORTA	ÇOK İYİ
DÖKÜLEBİLİRLİLİK	İYİ	MÜKEMMEL
İŞLENEBİLME	İYİ	ORTA

Kaplama malzemesi olarak hem pürüzlü yüzey olması hem serkliğinin fazla olması hem de oksitlenmeye dayanabilmesi için paslanmaz çelik Metcoloy2 kullanılmıştır. Bu konuda piyasada birçok fazla örneği olmasına rağmen Bu kaplama malzemesinin kimyasal özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 0.3. Metcoloy2'nin kimyasal özellikleri [83].

Element	C	P	S	Mn	Ni	Cr	Si	Fe
Yüzde (%)	0.35	0.02	0.02	0.35	0.5	13	0.5	diğer

Fiziksel özellikleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 0.4. Metcoloy 2'nin fiziksel özellikleri [83].

Yoğunluk (g/cc)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (mm/mm)	Erime Sıcaklığı (C)
6,74	275,79	0,018	1,426

5.2. NUMUNE HAZIRLAMA

Kaplama için öncelikle alüminyum alaşımların kesim işlemi; ikinci bir işleme gerek kalmaması hemde termal kaplama için gereken kolay eldedilmesi için su jeti ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlem 135mm/dk hızda 350gr/dk debide 3800 bar basınçta ve 0.76mm nozullu su jeti yardımı ile 25x17x7 mm ebatlarında kesilerek tamamlanmıştır. Kaplamasız parçalar ve kesme işlemi aşağıdaki şekillerde sunulmaktadır.



Şekil 0.2. Su Jeti kesme işlemi

Kesilmiş parçalara; kaplamanın yüzeye yapışması için gerekli pürüzlü yüzeyi elde etme amacı ile kumlama işlemi uygulanmıştır.



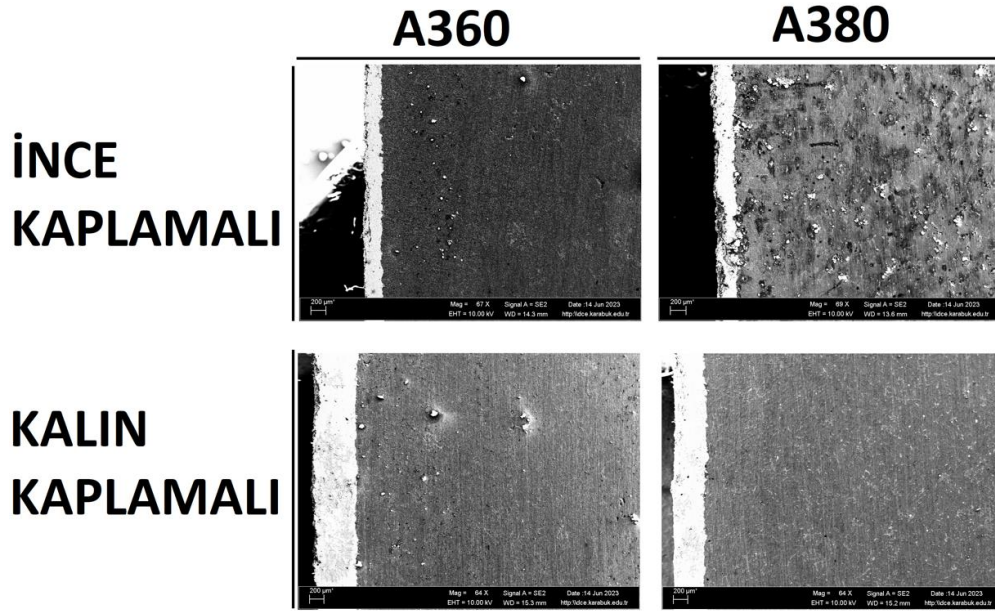
Şekil 0.3. Kuşlama sonrası numuneler

Kuşlama işlemleri yapılan malzemeler kaplamasının yapışmasını arttırmak için kaplamalara CrNi alt kaplama uygulanmıştır. Ardından CrNi kaplı malzemelerin geniş iki yüzü çift telli ark sprey kaplama yöntemi ile Metcoloy2 teli kaplanmıştır. Kaplama işlemleri A380 ve A360 malzemelere 3'er kalın (400 µm) 3'er ince (200 µm) olmak üzere toplam 12 parçaya uygulanmıştır. Kaplanmış numuneler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 0.4. Kaplanmış numuneler; a) A380 kalın, b)A380 ince, c) A380 kalın, d) A380 ince

Şekil 63'de; A380 altlıklı 400 μ m ve 200 μ m SS 420 kaplamalar sırası ile a, b ; A360 altlıklı 400 μ m ve 200 μ m SS 420 kaplamalar ise sırası ile d, c sembolleri ile belirtilmiştir. Ayrıca SEM görüntüleri makroları alınmış ve Şekil 64'te sunulmuştur.



Şekil 0.5. Kaplanmış malzemelerin makro SEM görüntüleri

5.3. SERTLİK TESTİ

Bu çalışmada mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılarak numune ve altlıkların mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. Mikro sertlikler QNESS Q10 A+ marka-model cihaz ile ölçülmüş olup cihazın resimi sırasıyla şekil 5.7’de sunulmuştur.



Şekil 0.6. QNESS Q10 A+ mikro sertlik ölçüm cihazı [84].

Mikro sertlik deneyleri 500 gr yük altında TS EN ISO 6507 standardına göre Brinell sertlik ölçümü yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler kaplama için 3 kez tekrarlanmış ve ortalama değer kabul edilmiştir.

5.4. MİKRO YAPILARI

Numunelerin mikro yapı incelemeleri, Karabük Üniversitesi Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma Geliştirme Merkezi'nde (MARGEM) aşınma deneyleri tamamlandıktan sonra incelenmiştir. Mikro yapıları CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM marka Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM) ile incelenmiş olup EDX dedektörü ile numune yüzeyinin elementel haritasının çıkarılması yine aynı cihazla gerçekleştirilmiştir. Kullanılan cihazın resmi Şekil 40'da sunulmuştur.

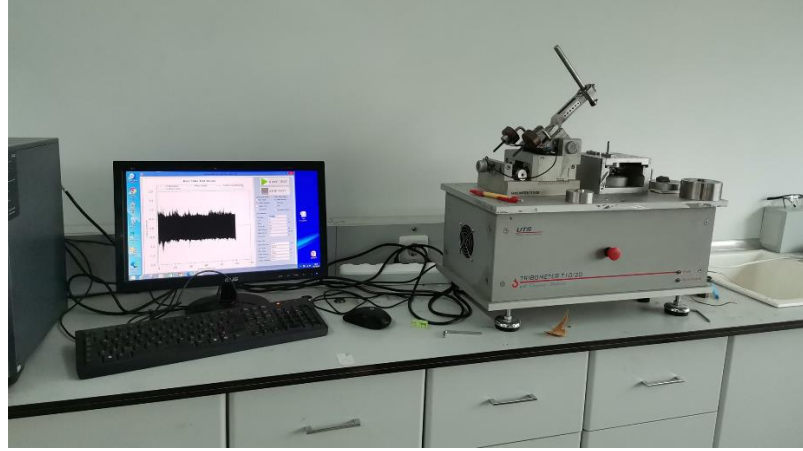


Şekil 0.7. SEM cihazı.

Numunelerin gözenek dağılımı, gözenek büyüklüğü ve gözeneklerin birbiriyle bağlantısını incelemek amacıyla öncelikle numuneler X100 büyütmeli SEM görüntülenmiştir. Aşınma testi yapılan numunelerin aşınma izleri X100 büyütmeli olarak ve deney yapılmamış numunelerin de iç yapısı X200 büyütmeli olarak incelenmiştir.

5.6. AŞINMA TESTİ

Aşınma Testleri Pin on Flat yöntemi ile aşağıdaki Şekil-69'daki görselde sunulan makinada gerçekleştirilmiştir.



Şekil 0.8. Ball-on-Flat test cihazı.



Şekil 0.9. Ball-on-Flat test cihazı şematığı.

Aşınma deneyleri, 200 μ m ve 400 μ m kaplama kalınlıklı ve kaplamasız A380 ve A360 altlık malzemeli kaplamalarda 6mm SS 420 bilya ile Şekil 70'de şematize edilmiş ASTM G133'e uygun Ball-on-Flat yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aşınma; 20N sabit yük ve hızlar(1 Hz, 2 Hz, 3 Hz) değiştirilerek yapılmıştır. Bu işlem sonucunda 3 farklı hız, 3 farklı kalınlık gibi parametreler olduğu için yaklaşık 162 test yapılması gerekmektedir. Bu nedenle; aşınma testleri hem maliyet

hem de zaman açısından dezavantajlı olacağı için bu Minitab18 programı kullanılarak bir 3 seviyeli 3 faktörlü bir L9 Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Bu Taguchi yöntemi ile hem zamandan hem de maliyetten 1/3 oranında tasarruf sağlatarak toplamda 36 testte aşınma testlerini tamamlamamızı sağlamıştır. Bu yöntemde kullanılan veriler alttaki tabloda sunulmuştur.

Tablo 0.5. Taguchi L9.

Sıra	A380			A360		
	Kalınlık (µm)	Kuvvet (N)	Hız (Hz)	Kalınlık (µm)	Kuvvet (N)	Hız (Hz)
1	0	20	1	0	20	1
2	0		2	0		2
3	0		3	0		3
4	200		2	200		2
5	200		3	200		3
6	200		1	200		1
7	400		3	400		3
8	400		1	400		1
9	400		2	400		2

5.5. PÜRÜZLÜLÜK TESTİ

Pürüzlülük; cismin yüzeyinde bulunan düzensiz kısa dalga boyu uzunluklar olarak tanımlanabilmektedir. Pürüzlülük değeri Perthometre ile ölçülür. Bu çalışmada kullanılan Perthometre şekilde sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan numunelerin pürüzlülük testleri, Karabük Üniversitesi Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma Geliştirme Merkezi'nde (MARGEM) gerçekleştirilmiştir.



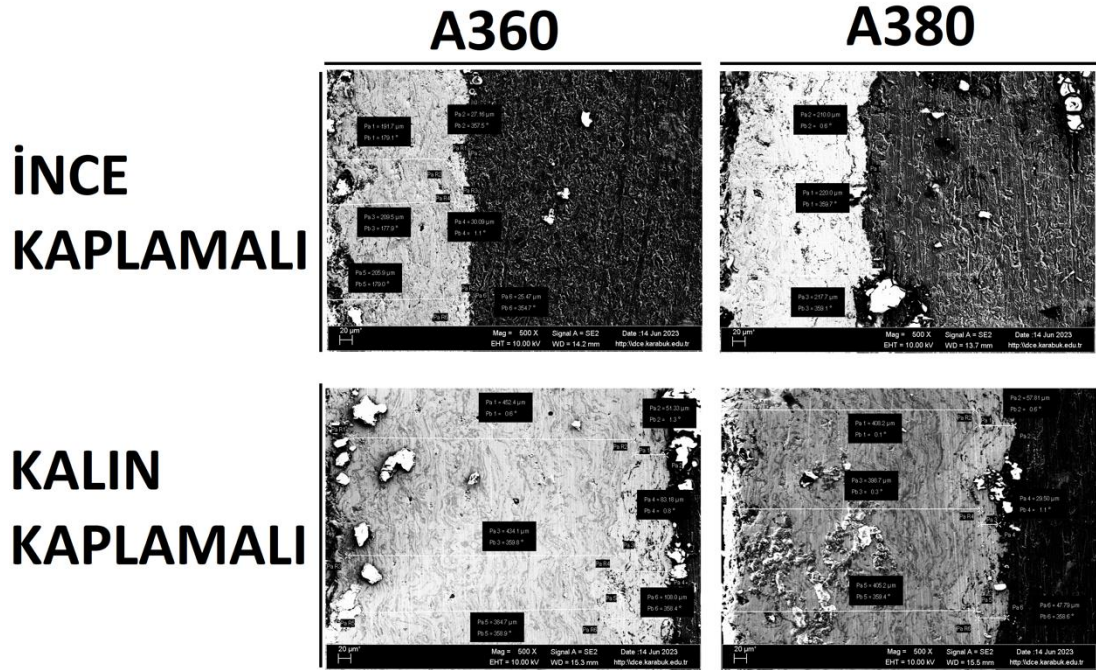
Şekil 0.10. Perthometre [85].

Ölçümler numunelerin her iki yüzeyinden 3'er defa olmak üzere toplamda 72 defa yapılmıştır. Pürüzlülük, tek çizgi boyunca ölçülmüş, aritmatik ortalama (R_a) ve derinlik R_z gibi parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışmada SS 420 çelik kaplı A380 ve A360 malzemelerin sertlikleri, aşınma yüzeyi mikro yapıları aşınma profilleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kaplama kalınlıkları Şekil 6.1'deki SEM görselleri üzerinde sunulmuştur. Bu görsellere bakıldığında ince kaplamalar ortalama 200µm, kalın kaplamalar ise 400µm olduğugözlemlenmiştir. Ayrıca, bütün numunelerde ara kaplama olarak ortalama 50µm kalınlığında CrNi kaplama olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 0.1 Kaplama kalınlık SEM görüntüleri.

6.1. SERTLİK TESTİ

Deney numunelerinden üç tekrarlı olumlu olarak alınan sertlik sonuçları ortalama olarak tablo 6.1’de verilmiştir. Tablo 6.1 incelendiğinde A360 malzemesinin sertliğinin; 380’e oranla %34.3 daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca kaplama sonrasında da malzemelerde özellikle A 360 malzemesinde sertlik artışı olmuştur. Kalın kaplamalı A360 malzemesinin sertliği ince kaplamalı A360 malzemesine göre %78.80 fazlayken ince kaplamalı A360 malzemesinin sertliği kaplamasız A360 malzemesini Sertliğinden %24.25 fazladır. Kullanılan kaplama malzemesinin ana malzeme altlık malzemesinden daha sert olması ve kaplama işleminin sıcaklıkla yapılmasından dolayı ortaya çıkan durumun normal olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca A360’ın 400µm kalınlıktaki sertliğinin 380’in 400µm kalınlıktaki kaplamadaki sertliğinin 360’ın 200µm kalınlıktaki sertliğine yaklaşık olarak geldiği gözlemlenmiştir.

Tablo 0.1 Sertlik Sonuçları.

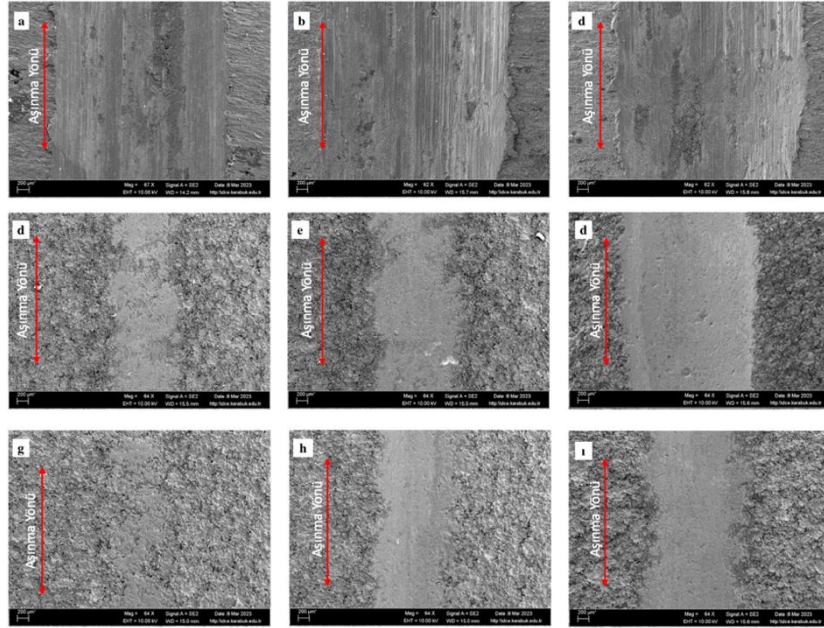
DENEY SİRALAMASI	MALZEMELR					
	A360-T0			A380		
	A360	A360 İNCE	A360 KALIN	A380	A380 İNCE	A380 KALIN
1.	101 HB	125 HB	227 HB	75,7 HB	75,7 HB	132 HB
2.	103 HB	128 HB	224 HB	77,5 HB	80 HB	133 HB
3.	101 HB	129 HB	232 HB	73,9 HB	82,5 HB	134 HB
ORTALAMA	101,7 HB	127,3 HB	227,7 HB	75,7 HB	79,4 HB	133 HB

6.2. SEM

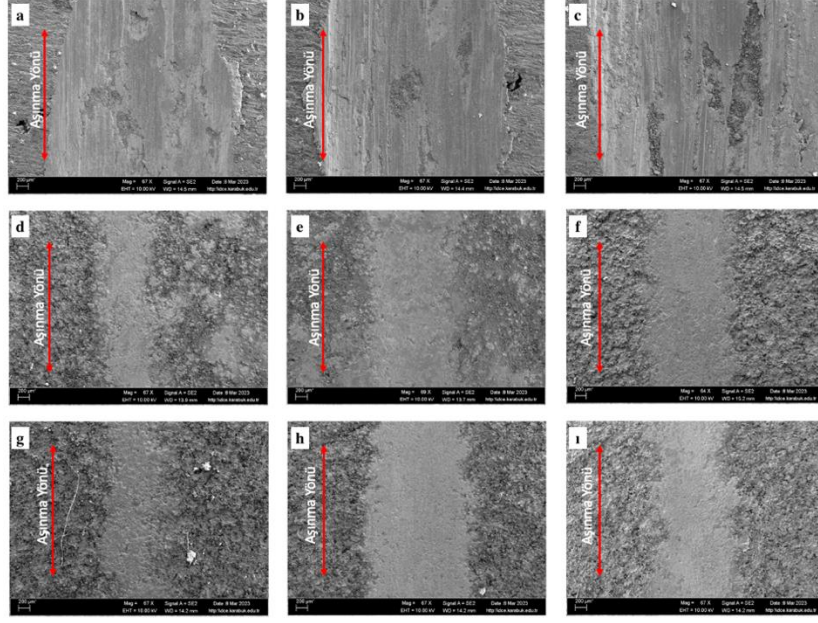
Üretilen alüminyum altlıklı numunelerin ve kaplamasız alüminyum altlıkları aşınma yüzeylerinin mikro yapı görüntüleri ve EDX verileri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MARGEM) laboratuvarlarında bulunan SEM cihazında incelenmiştir. İnceleme sırasında numunelerin makro (200µm), mezo (100µm) ve mikro (10µm) görüntüleri

alınmıştır. Bu görüntüleri almakta ki amaç makro için aşınma yolunu belirlemek, mezzo ve mikro için ise aşınma ve hasar cinsine belirlemiştir. Ayrıca şekillerde a,b,c görüntüleri kaplamasız numuneye ait olup d, e, f, görüntüleri ince kaplamalı numunelere, g, h, ı görüntüleri ise kalın kaplı numunelere aittir. Ayrıca a, d, g görüntülere 1 Hz; b, e, h Görüntülerin 2 Hz; c, f, ı görüntüleri ise 3 Hz hızlarda aşınma uğramış numunelerden alınmıştır.

Makro SEM görüntüleri aşağıda görülmüş olup aşınma yönleri şekil üzerinde gösterilmiştir.



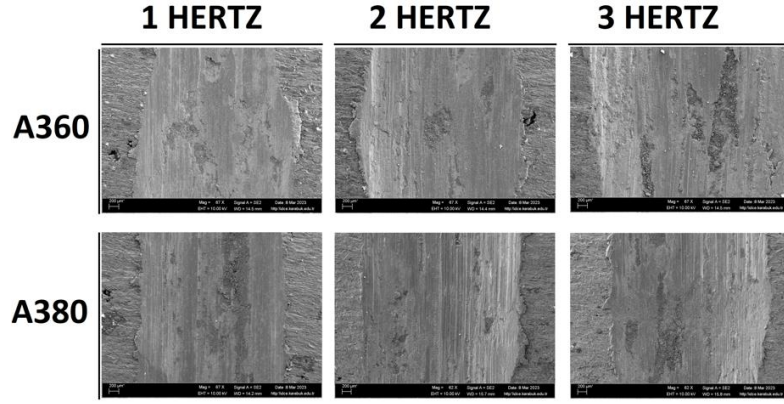
Şekil 0.2. A380 malzemenin aşınma testi sonrası makro görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) kaplamasız 3Hz, d) ince kaplamalı 1Hz, e) ince kaplamalı 2Hz, f) ince kaplamalı 3Hz, g) kalın kaplamalı 1Hz, h)kalın kaplamalı 2Hz, ı) kalın Kaplamalı 3Hz.



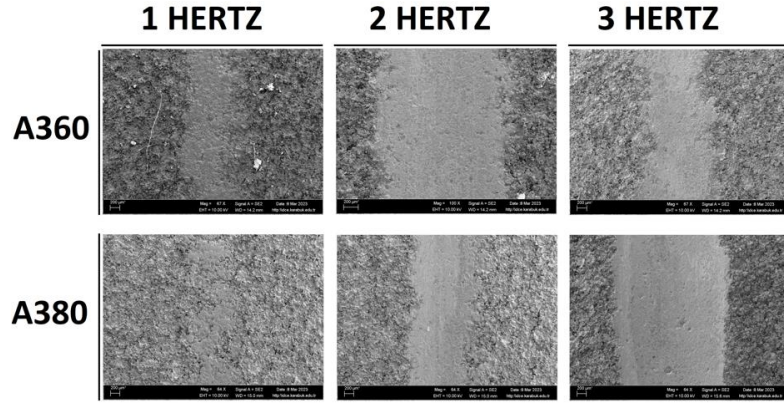
Şekil 0.3. A360 malzemenin aşınma testi sonrası makro görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) kaplamasız 3Hz, d) ince kaplamalı 1Hz, e) ince kaplamalı 2Hz, f) ince kaplamalı 3Hz, g) kalın kaplamalı 1Hz, h)kalın kaplamalı 2Hz, i) kalın Kaplamalı 3Hz.

Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'ye bakılacak olursa öncelikle kaplamaların kalınlıkları arttıkça yüzey pürüzlülüklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Sonrasında ise kaplamaların kalınlıklarının arttıkça aşınma dayanımı tespit edilmiştir. Ayrıca yine bu şekillere bakıldığında hem A380 hem de A360 altlıklı numunelerde aşınma hızının arttıkça aşınma dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Tüm bunlardan farklı olarak A380 & A360 altlıklı kaplamaları görüntüleri karşılaştırıldığında hem A360 hem de A360 altlıklı kaplamalı numunelerdeki aşınma izi görüntüleri daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin de kum kalıba döküm A360 malzemenin A380 malzemeye daha sert olması olarak yorumlanmıştır.

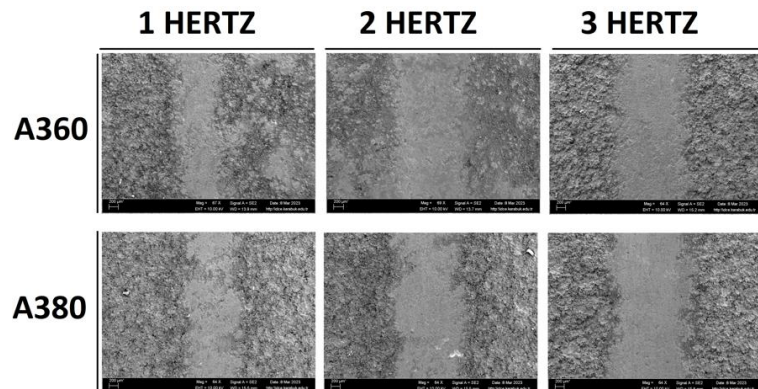
Aşağıdaki Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6'de kaplamalı ve kaplamasız A380 ve A360 malzelmelerin 1 Hz, 2 Hz ve 3 Hz hızda aşınma yüzeylerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Burada Şekil 76'de kaplamasız numuneler, Şekil 6.5'de 200µm kalınlıklı ince kaplamalı numuneler, Şekil 78'de 400 µm kalınlıklı kalın kaplamalı numunelerin görselleri sunulmuştur.



Şekil 0.4. Kaplamasız A380 ve A360 numuneler.



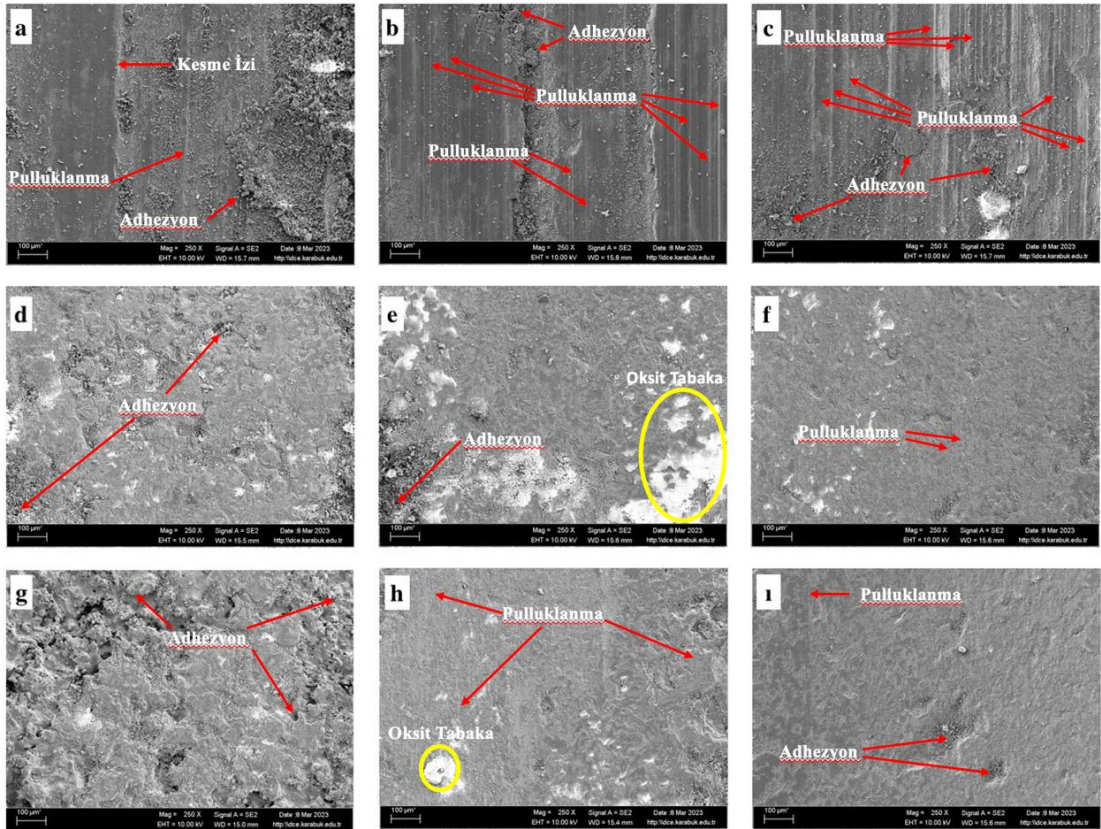
Şekil 0.5. İnce Kaplamalı A360 ve A380 numuneler.



Şekil 0.6. Kalın Kaplamalı A360 ve A380 numuneler.

Şekil 6.4'ya bakıldığı zaman A360 numunenin 20 N kuvvet altında 1 Hz, 2 Hz ve 3 Hz hızlarda aşındırılmasında A360 numunelerin daha az aşınma izi gözlemlenmiştir. İlaveten A360 altlıklı SS420 kaplı numunelerin, A380 altlıklı SS420 kaplı numunelere göre de daha az aşınma izi tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak da A360 ve A360 altlıklı SS 420 kaplı numunelerin, A380 altlıklı SS420 kaplı numunelere göre de daha sert bir malzeme olduğu verilebilmektedir.

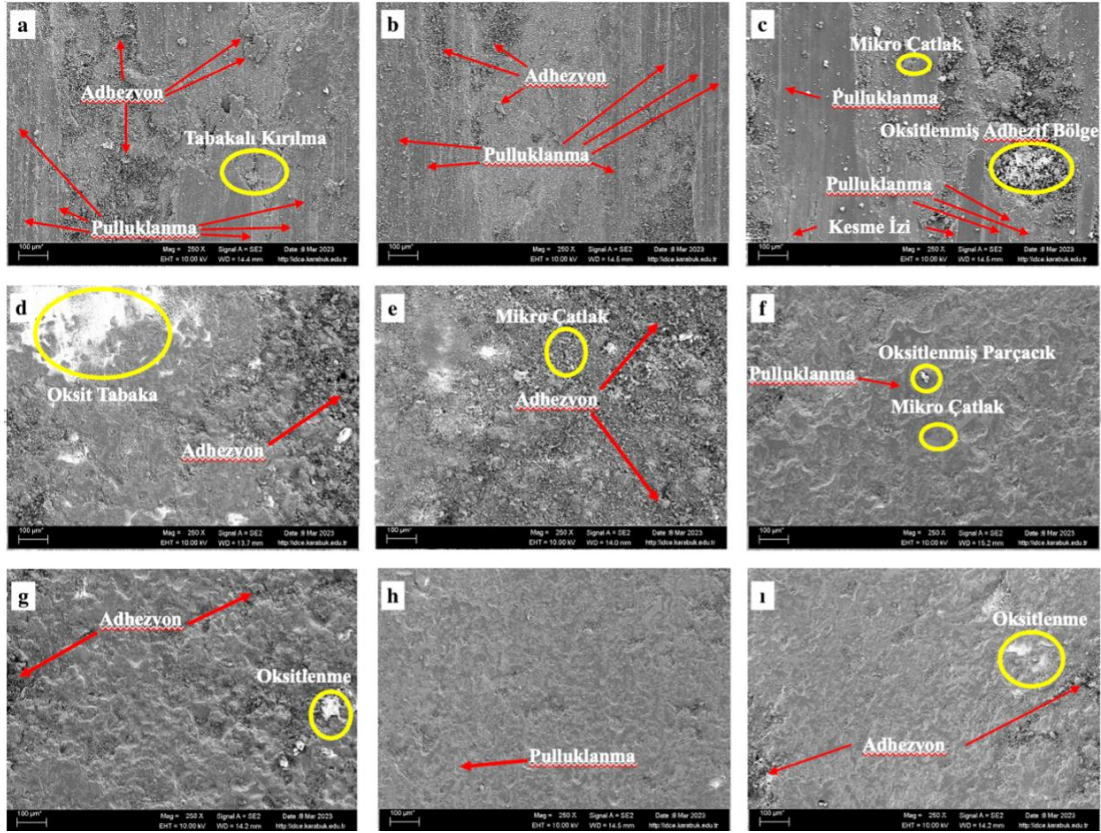
Mezzo SEM görüntüleri Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'te verilmiş olup tespit edilen hasarlar şekil üzerinde gösterilmiştir. Bunlardan 6.7'deki görüntüler 380 malzemenin SEM görüntüleri iken Şekil 6.8'deki görseller A 360 altlıklı numunelere ait görüntüler sunulmaktadır.



Şekil 0.7. A380 malzemenin aşınma testi sonrası mezzo görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) kaplamasız 3Hz, d) ince kaplamalı 1Hz, e) ince kaplamalı 2Hz, f) ince kaplamalı 3Hz, g) kalın kaplamalı 1Hz, h)kalın kaplamalı 2Hz, i) kalın Kaplamalı 3Hz.

Şekil 6.7'ye bakıldığında kaplamasız A380 numunelerde oksitlenmeler olduğu gözlemlenmiştir. Hatta kaplanmış parçalarda da oksitlenmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kaplamasız A380 malzemenin aşınma yüzeyinde kesik izleri ve kırılmalar gözlemlenmiş olup çok sayıda pulluklanma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu kesik izlerinin 1 ve 2 Hz hızlarda fazla olduğu ancak 3 Hz da az olduğu gözlemlenmiştir.

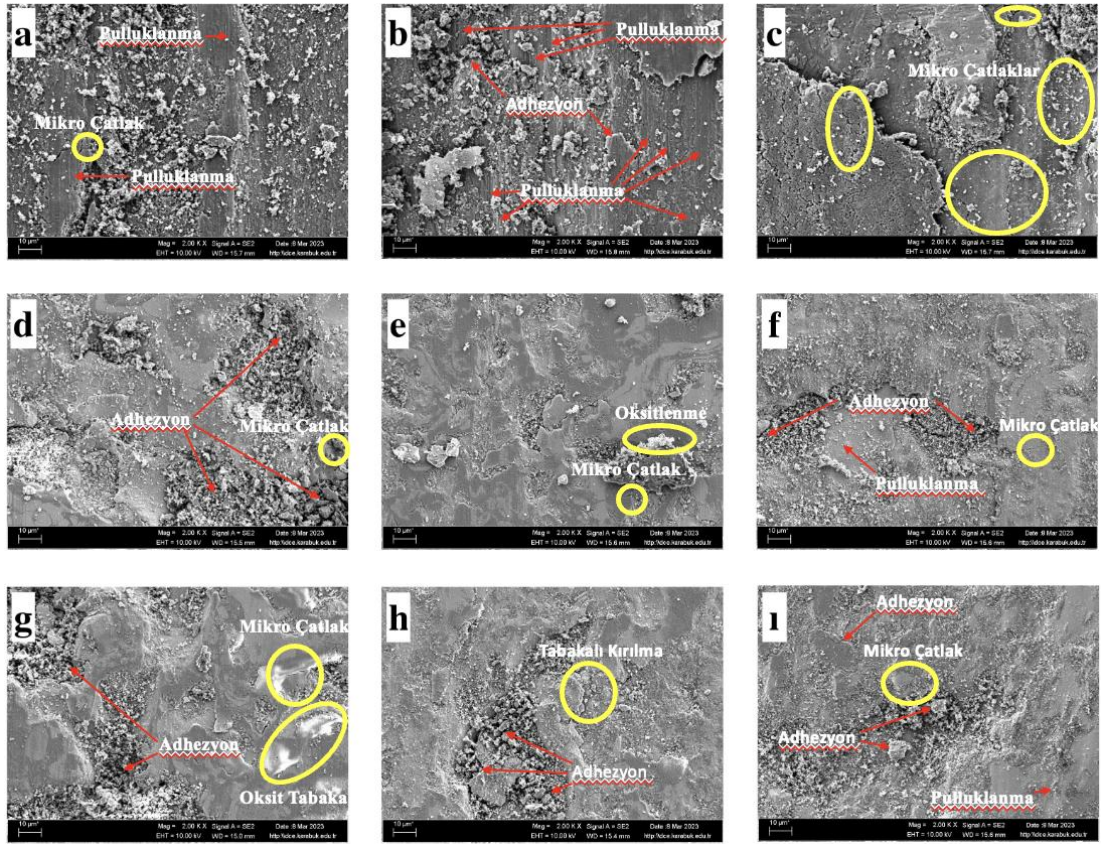
İnce kaplamalı A380 altlıklı numuneye bakıldığında aşınmadan sonraki SEM görüntülerinde mikro çatlaklar oluşumu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak yine ince kaplamalı A380 altlıklı malzemenin aşınma yüzeyinde adhezyon ve pulluklanmalara da rastlanmıştır.



Şekil 0.8. A360 malzemenin aşınma testi sonrası mezzo görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) kaplamasız 3Hz, d) ince kaplamalı 1Hz, e) ince kaplamalı 2Hz, f) ince kaplamalı 3Hz, g) kalın kaplamalı 1Hz, h) kalın kaplamalı 2Hz, i) kalın Kaplamalı 3Hz.

Şekil 6.8’deki mezzo görüntüye bakıldığında ise hem kaplamalı hem de kaplamasız A360 numunelerde oksitlenmeler ya da oksit tabakalar gözlemlenmiştir. Kaplamasız A360 nummunelerin aşınma yüzeylerinde pulluklanmanın yoğun olduğu ve ufak çapta tabakalı kırılmalar gözlemlenmiştir.

Mikro boyutlar için SEM görüntüleri Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’da verilmiş olup tespit edilen hasarlar şekil üzerinde gösterilmiştir. Bunlardan 6.9’teki görüntüler 380 malzemenin SEM görüntüleri iken Şekil 75’teki görseller A 360 altlıklı numunelere ait görüntülerdir.

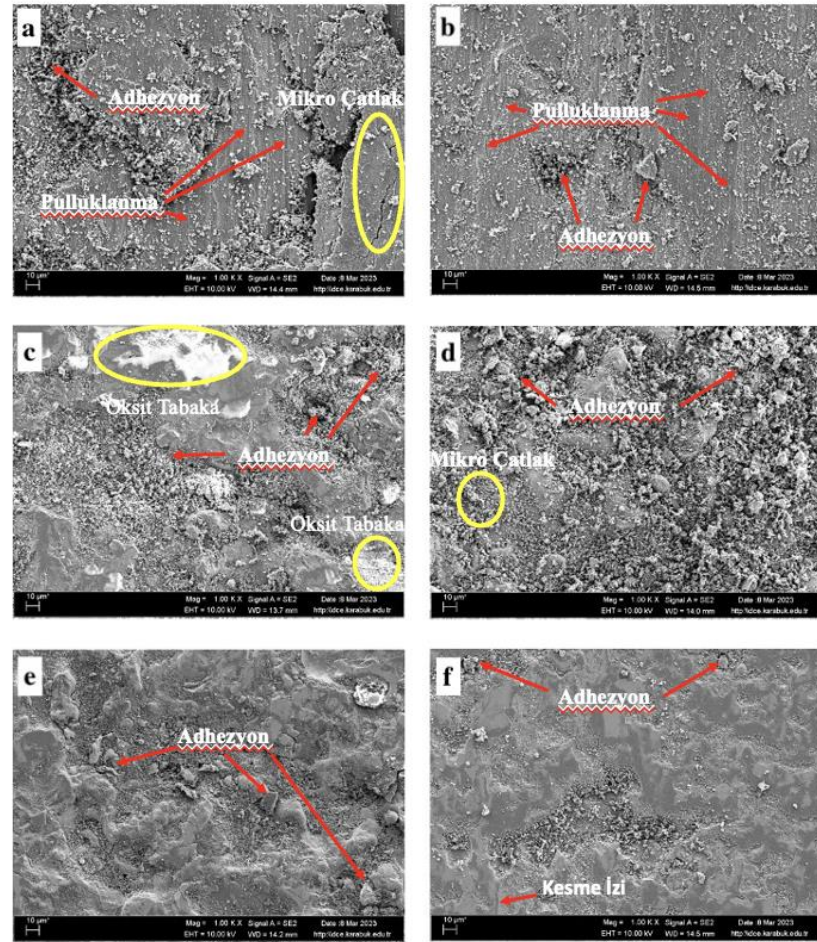


Şekil 9.9. A380 malzemenin aşınma testi sonrası mikro görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) kaplamasız 3Hz, d) ince kaplamalı 1Hz, e) ince kaplamalı 2Hz, f) ince kaplamalı 3Hz, g) kalın kaplamalı 1Hz, h)kalın kaplamalı 2Hz, i) kalın Kaplamalı 3Hz.

Şekil 6.9'a bakıldığında kaplamasız A380 malzemenin aşınma yüzeyinde 1 Hz ve 2Hz hızda pulluklanmaların ve adhezyonların olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 3 Hz hızdaki A380 malzemeye bakıldığında mikro çatlakların olduğu tespit edilmiştir.

İnce kaplamalı A380 malzemenin aşınma yüzeyinde mikro ölçekte adhezyonlar gözlemlenmiştir. Ayrıca yine aşınma yüzeyinde oksitlenme ve pulluklanma tespit edilmiştir.

Kalın kaplamalı A380 malzemenin aşınma yüzeyine bakıldığında; oksitlenme, mikro çatlaklar oluşumu ve adhezyon gözlemlenmiştir. Buna ek olarak aşınma yüzeyinde tabakalı kırılmalara da tespit edilmiştir.

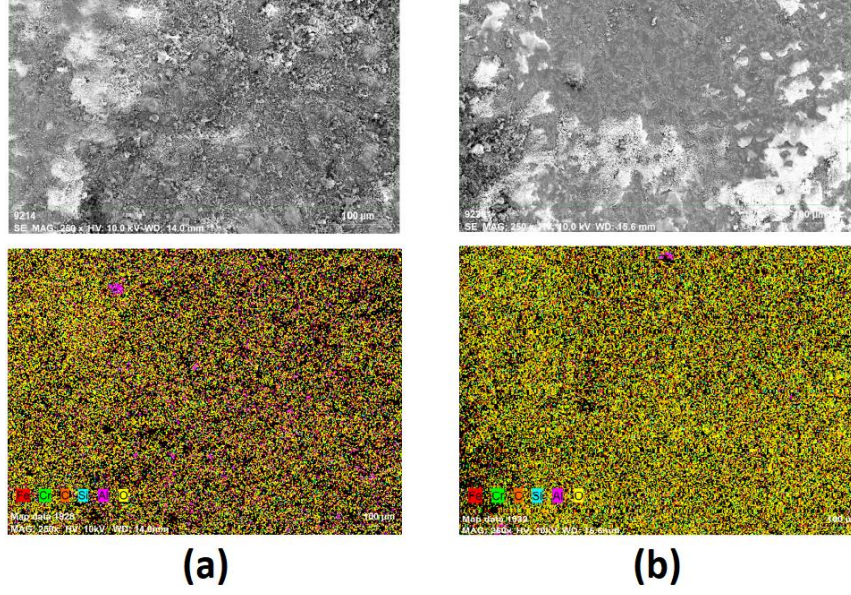


Şekil 0.10. A360 malzemenin aşınma testi sonrası mikro görüntüleri; a) kaplamasız 1Hz, b) kaplamasız 2Hz, c) ince kaplamalı 1Hz, d) ince kaplamalı 2 Hz, e) kalın kaplamalı 1Hz, f) kalın kaplamalı 2Hz.

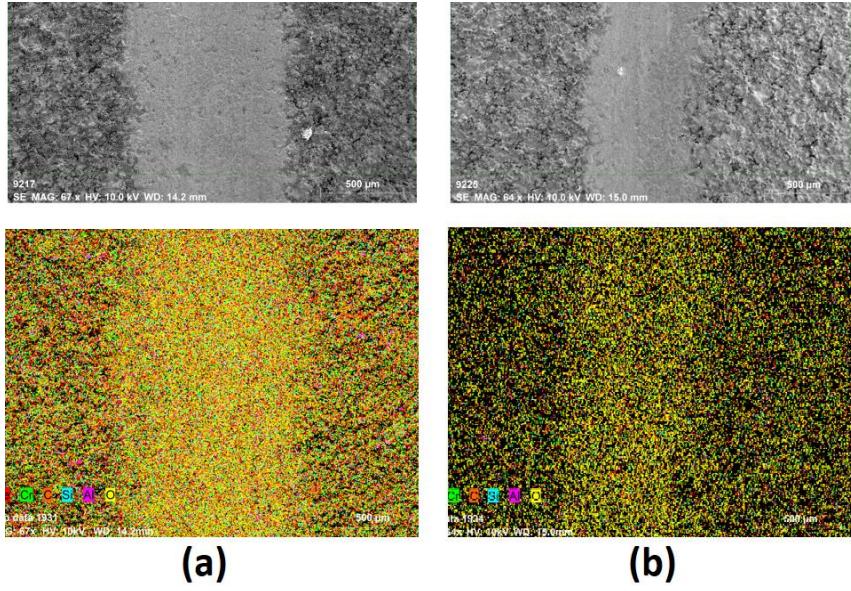
Şekil 6.10'daki A360 altlıklı numunelerin aşınma yüzeylerinin SEM görüntülerine bakıldığında kaplamasız numune yüzeyinde pulluklanmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Başkaca hasar tipi olarak adhezyon da gözlemlenmiştir. A360 altlıklı ince kaplamalı numunelerin aşınma yüzeyine bakıldığında adhezyonun fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu yüzeyde oksit tabakalar tespit edilmiştir. Şekil 75'de bulunan e ve f görsellerine bakıldığında aşındırıcının sırasıyla 1Hz ve 2 Hz hızlarda kalın kaplamalı A360 numunenin yüzeyinde oluşturduğu aşınma görüntüleri sunulmuştur. Burada adhezyonun fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ancak ince kaplamalı A360 numuneye nazaran daha az miktarda adhezyon ve adhezyon bölgesi oluşumu tespit edilmiştir.

6.3. EDX SONUÇLARI

EDX görüntüleri ince kaplamalı A360 ve A380 altlıklı numunelerin aşınma bölgesi 100µm boyutunda ve kalın kaplamalı A360 ve A380 altlıklı numunelerin aşınma bölgesi 500µm boyutunda iki farklı görselde incelenmiştir. Şekil 6.11 İnce Kaplamalı Numunelerin 100µm Boyutta Mikro Görüntülerinin Karşılaştırılması, Şekil 6.12 ise kalın kaplamalı numunelerin 500µm boyutta mikro görüntülerinin karşılaştırılması sunulmuştur.



Şekil 0.11 İnce kaplamalı numunelerin 100µm boyutta mikro görüntülerinin karşılaştırılması; a) A380, b) A360.

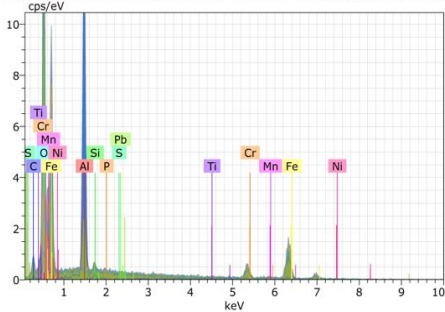
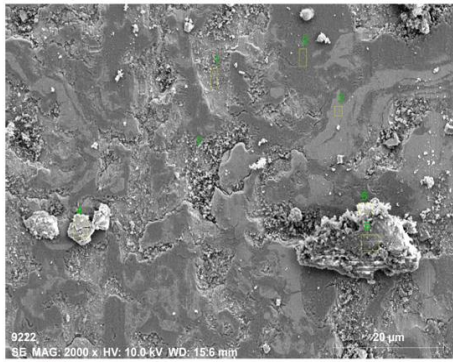


Şekil 0.12. Kalın kaplamalı numunelerin 500 boyutta mikro görüntülerinin karşılaştırılması; a) A380, b) A360.

Şekil 6.11 ve Şekil 6.12'deki gözlemlere bakıldığında kaplamalar yüzeyinde oksitlenmenin olduğu gözlemlenmiştir. Hatta bu oksitlenmenin aşınma yüzeyinde aşınma çizgisi boyunca yoğunlaştığı tespit edilmiştir.

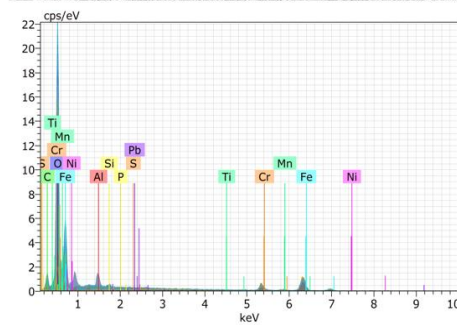
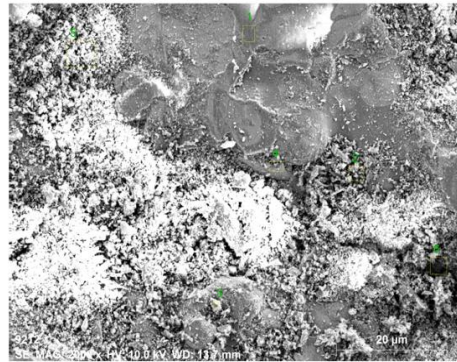
Şekil 6.13’de A380 ve A360 altlıklı SS420 kaplamalı numunelerin belirli noktalarının bileşenleri sunulmuştur. Bu görseller incelendiğinde iki numunede de kaplamanın koparak altlıkların meydana çıktığı mikro parçalar tespit edilmiştir. Bu iki numune karşılaştırıldığında A360 altlıklı numuneden kopan aşınma artışı A380 altlıklı numuneden kopandan daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi olarak da A360 altlıklı numunenin A380 altlıklı numuneden daha olduğu sert ve aşınma direncinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

İNCE KAPLANMIŞ A380



Mass percent (%)	C	O	Al	Si	P	S	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Pb
1	3.76	31.61	0.13	0.37	0.00	0.00	0.05	7.03	1.06	54.73	0.90	0.35
2	2.35	46.73	0.11	0.47	0.02	0.00	0.33	6.15	0.00	43.31	0.54	0.00
3	4.02	3.85	0.57	0.30	0.17	0.00	0.44	9.00	0.09	80.52	1.04	0.00
4	3.00	15.87	0.08	0.06	0.08	0.00	0.08	11.00	1.25	67.86	0.74	0.00
5	3.15	9.45	66.65	0.87	0.00	0.00	0.15	1.60	3.26	14.48	0.00	0.39
6	4.34	38.05	5.98	1.15	0.02	0.18	0.00	9.43	0.23	40.34	0.11	0.28
7	4.24	37.21	4.57	0.76	0.05	0.09	0.00	6.41	1.25	44.13	0.80	0.49
Mean value:	3.55	26.11	11.14	0.57	0.05	0.04	0.15	7.23	1.02	49.34	0.59	0.22
Sigma:	0.74	16.33	24.60	0.37	0.06	0.07	0.17	3.05	1.13	21.23	0.40	0.21
Sigma mean:	0.28	6.17	9.30	0.14	0.02	0.03	0.06	1.15	0.43	8.02	0.15	0.08

İNCE KAPLANMIŞ A360

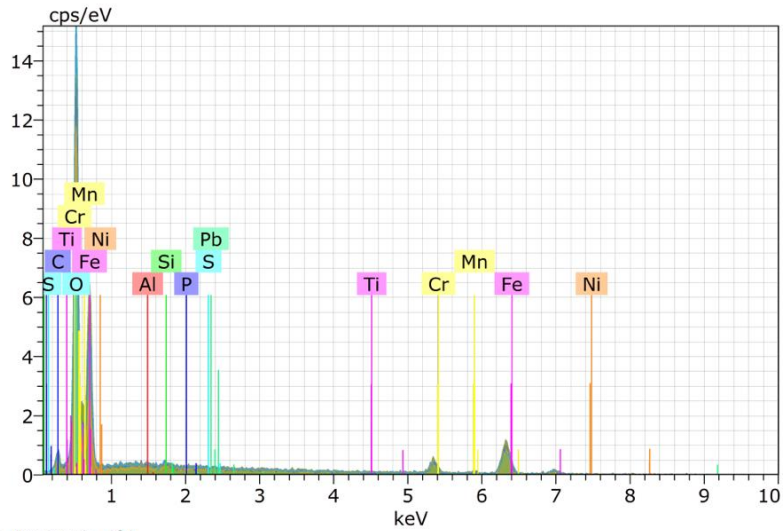
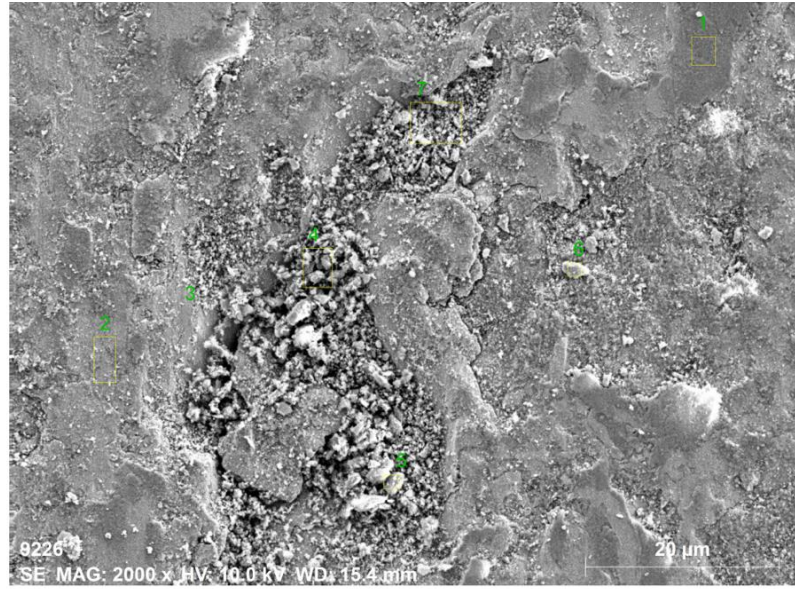


Mass percent (%)	C	O	Al	Si	P	S	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Pb
1	2.79	48.22	0.02	0.21	0.02	0.00	0.16	6.32	0.71	41.18	0.39	0.00
2	2.64	38.37	0.00	0.37	0.00	0.01	0.01	10.01	2.05	46.54	0.00	0.00
3	5.60	39.24	2.13	0.49	0.05	0.00	0.00	6.20	1.74	40.04	4.50	0.00
4	0.67	8.18	0.00	0.02	0.01	0.00	1.57	10.03	2.17	77.26	0.00	0.11
5	3.25	44.49	0.02	0.42	0.00	0.00	0.00	5.74	1.21	45.02	0.04	0.00
6	1.24	16.47	0.07	0.41	0.05	0.06	0.76	16.57	3.25	61.11	0.00	0.00
Mean value:	2.70	32.50	0.37	0.29	0.02	0.01	0.42	9.14	1.86	51.86	0.82	0.02
Sigma:	1.73	16.24	0.86	0.17	0.02	0.02	0.64	4.12	0.88	14.56	1.81	0.05
Sigma mean:	0.71	6.63	0.35	0.07	0.01	0.01	0.26	1.68	0.36	5.94	0.74	0.02

Şekil 0.13. İnce kaplamalı A360 ve A380 numunelerin karşılaştırılması.

Kalın kaplamalı A380 altlıklı numune aşınma yüzeyinin EDX sonucu Şekil 6.14’de sunulmuştur. Bu sonuçlara bakılarak aşınma yüzeyinde oksitlenmenin olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca aşınma sonucunda numuneden parça kopmamış ve aşınma altlık malzemeye ulaşmıştır. Buna ek olarak Şekil 6.15 incelenerek, A360 altlıklı

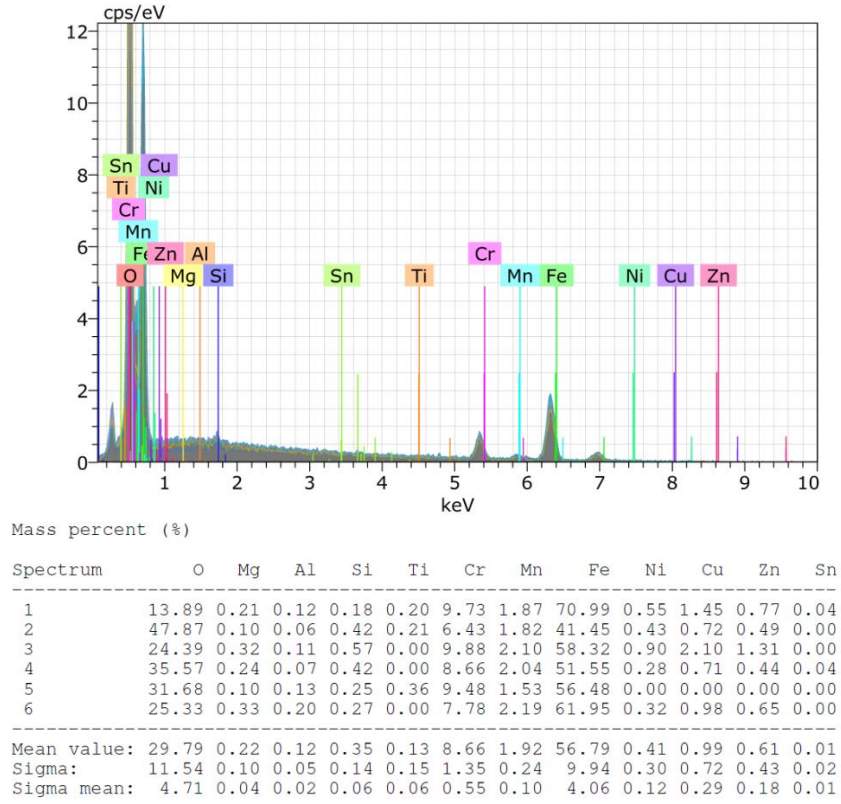
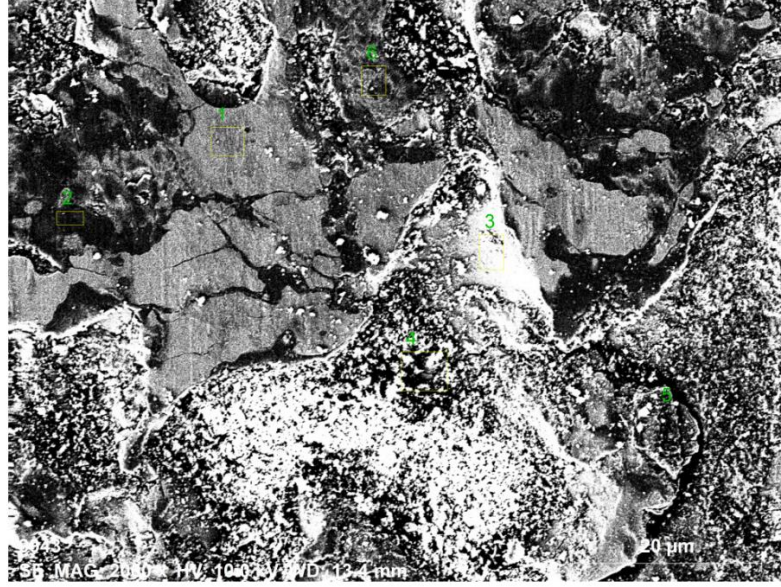
numuneye bakıldığında yine oksitlenmenin aşınma aşınma yüzeyinde oksitlenmenin olduğu aşınma sonucunda numuneden parça kopmadığı ve aşınmanın altlık malzemeye ulaşmadığı gözlemlenmiştir.



Mass percent (%)

Spectrum	C	O	Al	Si	P	S	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Pb
1	2.27	45.72	0.10	0.50	0.11	0.00	0.00	6.55	1.23	43.19	0.33	0.00
2	3.47	26.79	0.00	0.15	0.04	0.08	0.50	10.20	0.40	57.89	0.47	0.00
3	2.97	23.42	0.11	0.12	0.08	0.00	0.18	8.36	0.31	63.82	0.63	0.00
4	1.92	38.82	0.00	0.12	0.00	0.00	0.12	7.40	0.99	50.52	0.00	0.11
5	3.32	44.73	0.02	0.35	0.12	0.02	0.08	6.16	1.15	43.57	0.46	0.00
6	2.84	37.60	0.19	0.16	0.00	0.00	0.00	8.04	1.14	49.05	0.72	0.24
7	3.21	42.68	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	8.29	0.64	44.91	0.00	0.10
Mean value:	2.86	37.11	0.06	0.20	0.08	0.01	0.13	7.86	0.84	50.42	0.37	0.06
Sigma:	0.57	8.76	0.08	0.17	0.07	0.03	0.18	1.34	0.38	7.82	0.28	0.09
Sigma mean:	0.22	3.31	0.03	0.06	0.03	0.01	0.07	0.51	0.14	2.96	0.11	0.03

Şekil 0.14. Kalın kaplamalı A380 numune.



Şekil 0.15. 3 Hz hızda aşınan kalın kaplamalı A360 numune.

6.4. PROFİL SONUÇLARI

Çalışmada Kaplamalı numunelerde gerçekleşen aşınma profilinin düz bir profil oluşturacak kadar düzenli olmadığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak üretim

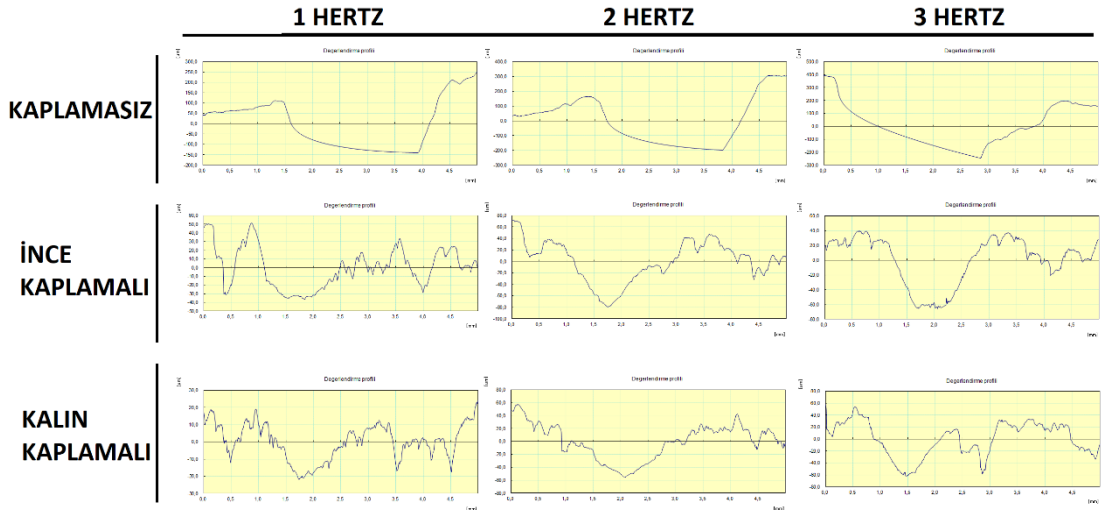
yöntemimizden kaynaklı pürüzsüz bir yüzey elde edilememesi sunulmuştur. Buna ek olarak; aşınma profilindeki bu düzensizliğin sebebi iki şekilde yorumlanmıştır. Bunlar:

- Kaplama malzemesinin üretimi sırasında kullanılan ısıdan dolayı meydana gelen iç gerilmi
- Kaplama malzemesinin aşınma sırasında parçalanarak deneye da 3. gövde aşındırıcı olarak pulluklama mekanizmasını arttırması

olduğu düşünülmektedir.

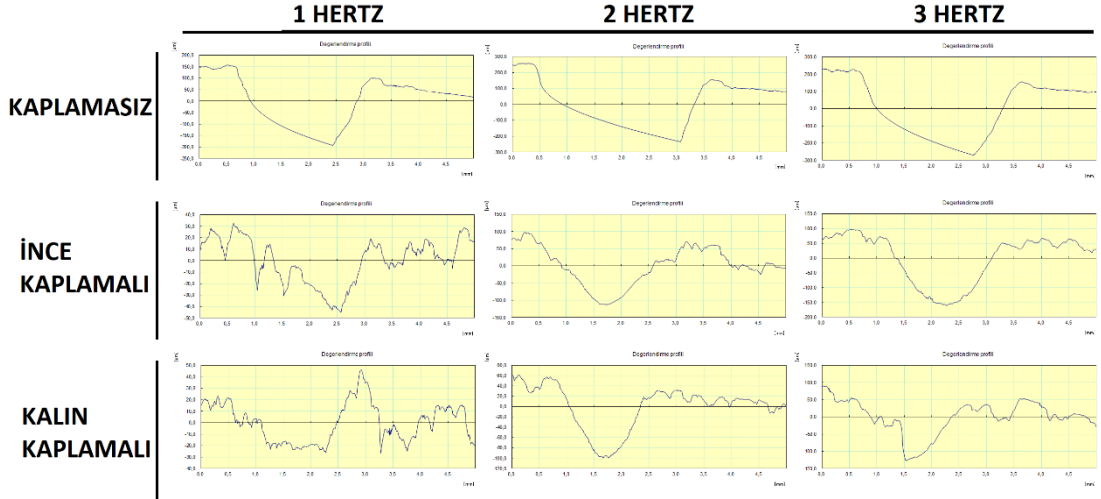
Şekilli 6.16 ve şekil 6.17'deki grafiklere ve tablo 6.2 incelendiğinde kaplamasız numunelerin kaplamalı numunelere göre daha çok aşındığı gözlemlenmiştir. İlaveten, Kaplamalı bu numunelerde ince kaplı numunelerin kalın kaplı numunelerden daha çok aşındığı gözlemlenmiştir. Bu durum sonucunda kaplama kalınlığı arttıkça malzemenin aşınma dayanımının arttığı tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen aşınma testi sonrasında 360 malzemelerin kaplama durumlarına göre profil sonuçları şekil 6.16'da verilmiştir. Aşınma grafikleri incelendiğinde kaplamasız olan numunelerde yüksek miktarda aşınma gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 0.16. A 360 profil grafikleri.

Gerçekleştirilen aşınma testi sonrasında A380 malzemelerin kaplama durumlarına göre profil sonuçları şekil 6.17’de verilmiştir. Aşınma grafikleri incelendiğinde o profillerin benzer şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu grafiklerin yorumları da yukarıda belirtildiği gibi yapılabilir.



Şekil 0.17. A380 profil grafikleri.

Profil grafiklerinin anlaşılabilirliğinin artırılması için maksimum derinlik mesafeleri tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 0.2.Profillerin maksimum derinliğini gösteren çizelge.

Min	A360			A380		
	1 hz	2 hz	3 hz	1 hz	2 hz	3 hz
Kaplamasız	140 µm	198 µm	247 µm	193 µm	235 µm	272 µm
İnce Kaplamalı	36.5 µm	79.4 µm	66 µm	44.8 µm	113 µm	161 µm
Kalın Kaplamalı	22 µm	55.8 µm	62.4 µm	26.8 µm	100 µm	128 µm

Tablo incelendiğinde maksimum derinliklerinin 3 Hz hızında olan numunelerde gözlemlendiği görülmüştür. Durum literatür ile uyumludur.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu çalışmada hafif ve ekonomik olmasından dolayı piyasada sıklıkla kullanılan A360 ve A380 malzemelerinin aşınma dayanımlarının arttırılmasını sağlayacak ekonomik bir kaplama yöntemi olan çift telli elektrik ark termal spery kaplama yöntemi ile iki farklı kalınlıkta kaplanması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra da kaplamasız ve iki farklı kalınlıkta kaplama işlemi uygulanmış malzemelerin ball on flat aşınma davranışları incelenmiştir. Balon flat aşınma davranışlarının incelenmesinde 20N'luk yük ve 10mm strok boyu sabit alınmış ve 1hz, 2hz, 3hz hızlarında deneyler gerçekleştirmiştir.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde maddilenebilir.

- A 360 ve A380 malzemelerinin Dökümleri başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir.
- A360 ve A380 malzemelerine termal sprey yöntemiyle yüksek sertlikli SS 420 malzemesini kaplanması ve istenilen kalınlıkların (200 µm ve 400 µm) gerçekleştirilmiştir.
- Kaplama işlemi sonrasında yüzeyden yapılan ölçme işlemleri sonrasında A360 malzemesinin sertliğinde kaplamasız ve farklı kaplamaları arasında farklılıklar gözlemlenmiştir. 400µm kaplamalı: A360 malzemesinin kaplamasız: A360 malzemesine göre %120 oranında daha sert olduğu tespit edilmiştir.
- Kaplama işlemi sonrasında yüzeyden yapılan ölçme işlemleri sonrasında A380 malzemesinin sertliğinde kaplamasız ve farklı kaplamaları arasında

farklılıklar gözlemlenmiştir. 400µm kaplamalı: A380 malzemesinin kaplamasız: A380 malzemesine göre %60 oranında daha sert olduğu tespit edilmiştir.

- Kaplama işlemi sonrasında 360 ve 380 malzemelerinin 400 mikron metrelik kalınlıkta malzeme sertlikleri kıyaslandığında 360'ın sertliğinin %50 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Aşınma test sonuçları incelendiğinde iki malzemenin de en fazla kaplamasız olan numunelerin aşındığı ve en çok kütle kayıplarının da 3hz deneylerde gerçekleştiği gözlemlenmiştir.
- Kaplanmış numunelerin aşınma görüntülerinde pulluklama mekanizması, mikro çatlaklar ve oksitlenme yüksek o gözlemlenmiştir.
- Kaplamalı numunelerin aşınmalarının EDX ve Map görüntüleri incelendiğinde hiçbir deney koşulunda kaplama altına gözlemlenmiştir. Fakat aşınma işlemi sonrasında yüksek miktarda oksitlenme gözlemlenmiştir.
- Aşınma deneyleri sonucunda aşınma derinliğinin en çok 3Hz hızında kaplamasız A380 malzemede gerçekleştiği ayrıca bu aşınma derinliğinin en az 1hz hızda kalan kaplamalı A360'ta gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Çalışmada elde edilen kazanımlar sonucunda gelecek projelerde çalışılabilir olması için bazı öneriler aşağıda sunulmaktadır.

- Hem A360 hem de A380 altlıklı numunelere erozyon testleri uygulanıp malzemenin erozif ortamdaki davranışı ve erozyon dayanımı incelenebilir.
- Her iki altlıklı malzemede ara kaplama olarak CrNi kaplama yerine akımsız nikel kaplama (NiB ya da NiP) gerçekleştirilerek üretilen yeni malzemenin aşınma dayanımı ve tribolojik özellikleri incelenebilir.
- Çalışmada incelenen kaplanmış malzemelerin imalatı sırasında altlık malzeme, farklı kesme parametrelerinde kesilip üretim sırasında kaplanarak en uygun kesme parametresi incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Zou, J., "Characterization of thermal spray coatings on aluminum engine bore", (2016).
2. O'Neil, N. and Kabir, A. S., "Pulsed Waterjet Roughening of Cast Iron and Aluminum Alloy for Automotive Engine Remanufacturing with Plasma Transferred Wire Arc Coating", *Coatings 2020, Vol. 10, Page 864*, 10 (9): 864 (2020).
3. Edrisy, A., Perry, T., and Alpas, A. T., "Wear mechanism maps for thermal-spray steel coatings", *Metallurgical And Materials Transactions A 2005 36:10*, 36 (10): 2737–2750 (2005).
4. Banerji, A., Lukitsch, M. J., McClory, B., White, D. R., and Alpas, A. T., "Effect of iron oxides on sliding friction of thermally sprayed 1010 steel coated cylinder bores", *Wear*, 376–377: 858–868 (2017).
5. Yin, S., Lupoi, R., Li, W., Xu, Y., Song, B., Yan, X., and Kuang, M., "Cold sprayed FeCoNiCrMn High Entropy Alloy (HEA) coating: microstructure and tribological property", .
6. Trelka, A., Żórawski, W., Maj, Ł., Petrzak, P., Soboń, D., and Góral, A., "The Effect of the Substrate on the Microstructure and Tribological Properties of Cold Sprayed (Cr₃C₂-25(Ni₂₀Cr))-(Ni-graphite) Cermet Coatings", *Materials 2022, Vol. 15, Page 994*, 15 (3): 994 (2022).
7. Astarita, A., Rubino, F., Carlone, P., Ruggiero, A., Leone, C., Genna, S., Merola, M., and Squillace, A., "On the Improvement of AA2024 Wear Properties through the Deposition of a Cold-Sprayed Titanium Coating", *Metals 2016, Vol. 6, Page 185*, 6 (8): 185 (2016).
8. Watson, T. J., Nardi, A., Ernst, A. T., Cernatescu, I., Bedard, B. A., and Aindow, M., "Cold spray deposition of an icosahedral-phase-strengthened aluminum alloy coating", *Surface And Coatings Technology*, 324: 57–63 (2017).
9. Al, C., Ambiger, K. D., and Kumar, A. C., "ANTI-WEAR BEHAVIOUR OF PLASMASPRAYED ALUMINA & ZIRCONIA COATINGS ON ALUMINIUM 7075T6", *International Journal Of Technical Research And Applications*, 2 (4): 235–242 .
10. Tsunekawa, Y., Ozdemir, I., and Okumiya, M., "Plasma sprayed cast iron coatings containing solid lubricant graphite and h-BN structure", *Journal Of Thermal Spray Technology 2006 15:2*, 15 (2): 239–245 (2006).
11. Özşahin, E. and Tolun, S., "Influence of surface coating on ballistic performance of aluminum plates subjected to high velocity impact loads", *Materials & Design*, 31 (3): 1276–1283 (2010).

12. Nunes, V., Silva, F. J. G., Andrade, M. F., Alexandre, R., and Baptista, A. P. M., "Increasing the lifespan of high-pressure die cast molds subjected to severe wear", *Surface And Coatings Technology*, 332: 319–331 (2017).
13. Lou, M., White, D. R., Banerji, A., and Alpas, A. T., "Dry and lubricated friction behaviour of thermal spray low carbon steel coatings: Effect of oxidational wear", *Wear*, 432–433: 102921 (2019).
14. Vencl, A., Mrdak, M., and Banjac, M., "Correlation of microstructures and tribological properties of ferrous coatings deposited by atmospheric plasma spraying on Al-Si cast alloy substrate", *Metallurgical And Materials Transactions A: Physical Metallurgy And Materials Science*, 40 (2): 398–405 (2009).
15. Ceviz, M., "AA7075-T6 Alaşımı AA7075-T6 Alaşımı Alt Tabaka Üzerine HVOF Termal Sprey ile Kaplanmış WC-10Co-4Cr Kaplamanın Farklı Sıcaklıklardaki Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Doktora Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, (2021).
16. Picas, J. A., Menargues, S., Martin, E., Colominas, C., and Baile, M. T., "Characterization of duplex coating system (HVOF + PVD) on light alloy substrates", *Surface And Coatings Technology*, 318: 326–331 (2017).
17. Pradeep Kumar, G. S., Keshavamurthy, R., Umesh, V., Tambrallimath, V., Yadav, Y., Toufeeq, T., and Arun, S., "Dry Sliding Friction and Wear Performance of HVOF Sprayed WC–Co Coatings Deposited on Aluminium Alloy", *Journal Of The Institution Of Engineers (India): Series D*, 102 (2): 331–344 (2021).
17. Hutsaylyuk, V., Student, M., Zadorozhna, K., Student, O., Veselivska, H., Gvosdetskii, V., Maruschak, P., and Pokhmurska, H., "Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method", *Journal Of Materials Research And Technology*, 9 (6): 16367–16377 (2020).
18. Bolelli, G., Bonferroni, B., Coletta, G., Lusvardi, L., and Pitacco, F., "Wear and corrosion behaviour of HVOF WC–CoCr/CVD DLC hybrid coating systems deposited onto aluminium substrate", *Surface And Coatings Technology*, 205 (17–18): 4211–4220 (2011).
19. Akkaş, M., "The mechanical and corrosion properties of WCCo–Al coatings formed on AA2024 using the HVOF method", *Mater. Res. Express*, 7: 76515 (2020).
21. Kiragi, V. R., Patnaik, A., Singh, T., and Fekete, G., "Parametric Optimization of Erosive Wear Response of TiAlN-Coated Aluminium Alloy Using Taguchi Method", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 28 (2): 838–851 (2019).
22. Magnani, M., Suegama, P. H., Espallargas, N., Fugivara, C. S., Dosta, S., Guilemany, J. M., and Benedetti, A. v., "Corrosion and wear studies of Cr 3C 2NiCr-HVOF coatings sprayed on AA7050 T7 under cooling", *Journal Of Thermal Spray Technology*, 18 (3): 353–363 (2009).

23. Yao, H., Zhou, Z., Wang, L., Tan, Z., He, D., and Zhao, L., "Thermal Conductivity and Wear Behavior of HVOF-Sprayed Fe-Based Amorphous Coatings", *Coatings* **2017**, Vol. 7, Page 173, 7 (10): 173 (2017).
24. Varol Ozkavak, H., Şahin, Sarac, M. F., and Alkan, Z., "Comparison of wear properties of HVOF sprayed WC-Co and WC-CoCr coatings on Al alloys", *Materials Research Express*, 6 (9): 096554 (2019).
25. Özel, S., "Microstructure and mechanical properties of HVOF sprayed WC-Co/NiCrBSi, Cr₃C₂ coatings on al alloys", *Materialpruefung/Materials Testing*, 55 (9): 694–700 (2013).
26. Magnani, M., Suegama, P. H., Espallargas, N., Dosta, S., Fugivara, C. S., Guilemany, J. M., and Benedetti, A. V., "Influence of HVOF parameters on the corrosion and wear resistance of WC-Co coatings sprayed on AA7050 T7", *Surface And Coatings Technology*, 202 (19): 4746–4757 (2008).
27. Internet: Ki R., Batra N.K., and Jindal S, "Wear Behaviour of Ferrous Based Thermal Spray Coatings on A356", https://www.researchgate.net/publication/228534974_Wear_Behaviour_of_Ferrous_Based_Thermal_Spray_Coatings_on_A356 (2022).
28. Kramer, M. S., Rivard, C. J., Heights, S., and Koltuniak, F. A., "(52) (58) Thermally sprayed aluminum-bronze coatings on aluminum engine bores Assignee: General Motors Corporation, Detroit", (1991).
29. Yin, Y., Zhu, S., Chang, Q., Wang, W., Gao, G., Wang, X., Yang, S., and Han, G., "Improved wear resistance and mechanical properties of Al matrix with TiAl-based coatings", <https://doi.org/10.1080/02670844.2021.1971431>, 37 (11): 1440–1448 (2021).
30. Trompetter, C. , H. M. , M. D. , M. P. , M. A., "The Effect of Substrate Surface Oxides on the Bonding of NiCr Alloy Particles HVOF Thermally Sprayed onto Aluminum Substrates", *Journal Of Thermal Spray Technology*, (19): 1024–1031 (2010).
31. Verstak, A. and Baranovski, V., "Activated Combustion HVOF Coatings for Protection against Wear and High Temperature Corrosion", *Thermal Spray 2003: Proceedings From The International Thermal Spray Conference*, 535–541 (2003).
32. Evdokimenko, Yu. I., Kisel, V. M., Buchakov, S. V., Rogozinskaya, A. A., Yurchenko, D. Z., and Litvin, R. V., "Properties of intermetallic Ni–Al coatings deposited by high-velocity air–fuel spraying", *Powder Metallurgy And Metal Ceramics*, 49: (2011).
33. Gao, M., Lu, W., Yang, B., Zhang, S., and Wang, J., "High corrosion and wear resistance of Al-based amorphous metallic coating synthesized by HVOF spraying", *Journal Of Alloys And Compounds*, 735: 1363–1373 (2018).

34. Arboleda, J. A., Serna, C. M., Cadavid, E., Barrios, A. C., Vargas, F., and Toro, A., "Effect of Flame Spray Deposition Parameters on The Microstructure of Al₂ O₃ - 13 %TiO₂ Coatings Applied Onto 7075 Aluminum Alloy", *Materials Research*, 21 (5): (2018).
35. Culliton, D., Betts, A., Carvalho, S., and Kennedy, D., "Improving tribological properties of cast Al-Si alloys through application of wear-resistant thermal spray coatings", *Journal Of Thermal Spray Technology*, 22 (4): 491–501 (2013).
36. Ardila-Rodríguez, L. A. , M. B. B. , de O. A. C. , T. D. N., "Al/MWCNT composite layer deposition on Aluminum alloy substrate by Selective Laser Melting and Flame Spray", *Journal Of Manufacturing Science And Engineering*, 10 (141): (2019).
37. Çöğür, T., "Toz alev spreyleme yöntemi kullanılarak kaplanan farklı malzemelerin aşınma davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, (2007).
38. Voyer, J., "Wear-Resistant Amorphous Iron-Based Flame-Sprayed Coatings", *Journal Of Thermal Spray Technology*, 19: 1013–1023 (2010).
39. McGrann, R. T. R., Greving, D. J., Shadley, J. R., Rybicki, E. F., Bodger, B. E., and Somerville, D. A., "The effect of residual stress in HVOF tungsten carbide coatings on the fatigue life in bending of thermal spray coated aluminum", *Journal Of Thermal Spray Technology*, 546–552 (1998).
40. Rajasekaran, B., Ganesh Sundara Raman, S., Joshi, S. V., and Sundararajan, G., "Effect of detonation gun sprayed Cu–Ni–In coating on plain fatigue and fretting fatigue behaviour of Al–Mg–Si alloy", *Surface And Coatings Technology*, 201 (3–4): 1548–1558 (2006).
41. Sendilvelan, S., Haridasan, V. P., Velayudham, A., and Sendilvelan, & S., "Investigation on the influence of substrate materials on the tribological behaviour of detonation gun sprayed alumina coating", *Www.Tjprc.Org SCOPUS Indexed Journal Editor@tjprc.Org*, (2018).
42. Ganesh Sundara Raman, S. , R. B., "Relative performance of alumina coatings prepared by micro arc oxidation and detonation gun spray on AA 6063 under plain fatigue and fretting fatigue loading", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, (61): 465–471 (2008).
43. Arunnellaiappan, T., Baskaran, S., Arun, S., and Prithivirajan, R., "Corrosion behaviour of detonation gun sprayed cermet coatings on AA5083", *Surface Engineering*, 37 (2): 263–270 (2020).

44. Wu, X. and Guo, Z. M., "The Research of the Wc-17co Abrasion-Resistant Coating by the D-Gun System on the Aluminium Alloy Substrate", *Advanced Materials Research*, 650: 211–215 (2013).
45. Anil Kumar, R. and Radhika, N., "Enhancement of mechanical and wear properties of tungsten carbide coated AA 6063 alloy using detonation gun technique", *Transactions Of The IMF*, 96 (4): 212–219 (2018).
46. Kumar, S., Sriharsha, P., Samatham, M., and Reddy, B. R. H., "Experimental Investigation on Ceramic Surface Coatings on Aluminum using Detonation Gun", *International Journal Of Current Engineering And Technology*, 7 (3): 867–871 (2017).
47. Roy, M., "Solid Particle Erosion Behavior of WC Coating Obtained by Electrospark Technique and Detonation Spraying", *Tribology Transactions*, 57 (6): 1028–1036 (2014).
48. Internet: Öztürkgalvano, "Metal Kaplama Tarihiçesi", <http://www.ozturkgalvano.com.tr/metal-kaplamanin-tarihcesi/> (2023).
49. Guilemany, J. M. and Nin, J., "Thermal spraying methods for protection against wear", Surface Coatings for Protection Against Wear, *Woodhead Publishing Limited*, Barcelona, İspanya, 249–253 (2006).
50. Heimann, R. B., "Brief History of Thermal Spraying", Plasma-Spray Coating: Principles and Applications, Wiley. Ed., *John Wiley & Sons*, (2008).
51. Internet: "Alev Sprey", <https://teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10715/42048/alev-sprey> (2022).
52. Tucker, R. C. (Jr.), "A Brief History of the Development of Thermal Spray Processes and Materials", ASM International. Ed., (2013).
53. Minisker, M. A., "Termal Sprey Yöntemiyle Oluşturulan Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2009).
54. Kahraman, N., "Toz Alev Spreyleme Yöntemi ile Kaplanan Numunelerde Kaplama Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2000).
55. Ba Bai, J. S., "Production of Coated and Free-Standing Engineering Components using the HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) Process", Doktora Tezi, *Dublin Şehir Üniversitesi*, Dublin, (2003).
56. Sadeghimeresht, E., "Corrosion Behavior of HVAF-Sprayed Bi-Layer Coatings", Lisans Tezi, *West Üniversitesi*, İsveç, (2016).

57. Singh, L., Chawla, V., and Grewal, J. S., "A Review on Detonation Gun Sprayed Coatings", *Journal Of Minerals And Materials Characterization And Engineering*, 11: 243–265 (2012).
58. Meşekıran, N., "Farklı üst kaplama içeriğine sahip termel bariyer kaplamaların (TBC) oksidasyon davranışlarının incelenmesi", *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bartın, (2015).
59. O'Neil, N., "Optimized Surface Roughening by Pulsed Waterjet for Suitable Adhesion Strength of Plasma Transferred Wire Arc Coating", Yüksek Lisans Tezi, *Carleton Üniversitesi*, Ottawa, (2020).
60. Bravo, S., Torres-González, J., Morales-Hernández, J., Martínez-Franco, E., González, J. C., Mercader-Trejo, F. E., Rodríguez-López, A., Manzano-Ramírez, A., Esparza, A., and Herrera-Basurto, R., "Effect of the manufacturing parameters on the quality of the ceramic thermal barrier coating after ageing by thermal treatment", *Revista Mexicana De Ingeniería Química*, 20: 229–239 (2021).
61. Wagner, N., "Effect of Process Parameters on Twin Wire Arc Sprayed Steel Coatings", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 6650–6655 (2021).
62. Wang, X., Feng, F., Klecka, M. A., Mordasky, M. D., Garofano, J. K., El-Wardany, T., Nardi, A., and Champagne, V. K., "Characterization and modeling of the bonding process in cold spray additive manufacturing", *Additive Manufacturing*, 8: 149–162 (2015).
63. Kurgan, N., "Aşınma", Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, (2020).
64. "Wear", *Tribology Series*, 16: 93–142 (1990).
65. Internet: "Introduction to Tribology", https://www.stle.org/files/What_is_tribology/Tribology_Wear.aspx (2022).
66. Orhan, A., "Gaz Tungsten Ark Kaynak Yöntemiyle Üretilen Fe Esaslı Kaplama Tabakalarının Aşınma ve Mikroyapı Karakteristiklerinin Araştırılması", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2008).
67. Swain, B., Bhuyan, S., Behera, R., Mohapatra, S. S., and Behera, A., "Wear: A Serious Problem in Industry", *Tribology In Materials And Manufacturing*, (2020).
68. Milli, A., "Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile (B4C+FeTi) Takviyeli Fe Esaslı Kompozit Üretimi", Yüksek Lisans, *Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ, (2017).

69. Terwey, J. T., Fourati, M. A., Pape, F., and Poll, G., "Energy-Based Modelling of Adhesive Wear in the Mixed Lubrication Regime", *Lubricants*, (2020).
70. Internet: Sunyoto, T., "Wear Mechanisms", https://www.academia.edu/8424741/Survey_of_Wear_Mechanisms_Adhesive_Wear_at_BULLET_Abrasive_Wear_at_BULLET_Fatigue_Wear_at_BULLET_Corrosive_Wear_at_BULLET_Mechanical_Wear_of_Ceramics_under_Elastic_Contact (2023).
71. Özmen, Y., Aksoy, T., & Can, A., "Aşınmaya Etki Eden Faktörler ve Aşınmanın Azaltılması İçin Alınabilecek Tedbirler", *4. Denizli Malzeme Sempozyumu, Denizli*, 651, 663. (1991).
72. Torrance, A. A., "Modelling abrasive wear", *Wear*, 281–293 (2005).
73. Dalbehera, S., "Effect of cenosphere on Mechanical and tribological properties of natural fibre reinforced composite", Doktora Tezi, *National Institute of Technology Rourkela*, (2016).
74. Internet: Ay, İ., "Aşınma Hasarları", <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/?view=lectures&lecture=ha> (2022).
75. Internet: Mahadeshwara, M. R., "Fretting Wear", <https://www.tribonet.org/wiki/fretting-wear/> (2022).
76. Internet: "Piston Hasarları Tanınması ve Giderilmesi", <https://docplayer.biz.tr/47663202-Piston-hasarlari-taninmasi-ve-giderilmesi.html> (2022).
77. Mindivan, H., "Aşınma Deney Formu", Bilecik, (2018).
78. Szala, M. and Łukasik, D., "Cavitation Wear of Pump Impellers", *Journal Of Technology And Exploitation In Mechanical Engineering*, 40–44 (2016).
79. Internet: Frisch, J., "Pervane ve Dümenlerde Kaviteyona Bağlı Aşınma", https://www.tersanederjisi.com/yayin/739/pervane-ve-dumenlerde-kaviteyona-bagli-asinma_23519.html#.Y7CRxGhBxPb (2023).
80. Internet: Lee, A., "In our element: what value for coefficient of friction should I use in my calculations?", <https://materion.com/about/new-at-materion/in-our-element-what-value-for-coefficient-of-friction-should-i-use-in-my-calculations> (2022).
81. "Malzeme Üretim Laboratuvarı II. Ders Polimer Aşınma ve Sertlik Deney Föyü", Samsun, (2020).
82. Internet: Eti Alüminyum, "Dökümhane Ürünleri", <https://www.etialuminyum.com/urunler/ham-aluminyum-urunler/dokumhane-urunleri/#1518779253242-c5aa3aef-5182> (2022).

83. Internet: Sulzer Metco, "Metcoloy® #2 Wire", <https://www.gordonengland.co.uk/sef/attachment.php?aid=371> (2022).
84. Internet: Margem Laboratuvarları, "Sertlik Lab.", <https://dce.karabuk.edu.tr/icerikGoster.aspx?K=S&id=1097&BA=index.aspx#> (2023).
85. Internet: Margem Laboratuvarları, "Metroloji Lab.", <https://dce.karabuk.edu.tr/icerikGoster.aspx?K=S&id=1107&BA=index.aspx> (2023)

ÖZGEÇMİŞ

Mert Murathan ÖZEN ilk ve orta öğrenimini Karabük’te tamamladı. Karabük Demir Çelik Lisesi’nden mezun oldu. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde öğrenime başlayıp bazı sağlık sorunlarından dolayı 2017 yılında mezun oldu. 2020 yılında Şehit Ercan Hırçın Ortaokulu’nda memur olarak göreve başladı. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Eğitimine başlamıştır.