

**T.C.  
BARTIN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**APS YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN OKSİT İÇERİKLİ ÇOK  
KATMANLI SERAMİK KAPLAMALARIN KURU KAYMA  
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZIRLAYAN  
HAKAN BAYRAK**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. M. SABRİ GÖK**

**BARTIN-2016**

**T.C.**  
**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**APS YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN OKSİT İÇERİKLİ ÇOK KATMANLI SERAMİK  
KAPLAMALARIN KURU KAYMA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZIRLAYAN**  
**Hakan BAYRAK**

**2008**

**DANIŞMAN**  
**Doç. Dr. M. Sabri GÖK**

**BARTIN-2016**

## KABUL VE ONAY

Hakan BAYRAK tarafından hazırlanan “APS YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN OKSİT İÇERİKLİ ÇOK KATMANLI SERAMİK KAPLAMALARIN KURU KAYMA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, 15.01.2016 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. M. Sabri GÖK (Danışman) .....

Üye : Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK .....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yunus TÜREN .....

Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Selma ÇELİKAY  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **BEYANNAME**

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. M. Sabri GÖK danışmanlığında hazırlamış olduğum “APS YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN OKSİT İÇERİKLİ ÇOK KATMANLI SERAMİK KAPLAMALARIN KURU KAYMA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

15.01.2016

**Hakan BAYRAK**

## ÖNSÖZ

Bu tezin önerilmesinde ve yönlendirilmesinde benden yardımlarını esirgemeyen araştırma konusunun seçimi ve yürütülmesi sırasında değerli bilimsel uyarı ve önerilerinden yararlandığım danışmanım Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. M. Sabri GÖK'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca; deneysel çalışmalarda ve analizlerde bana yardımcı olan Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK'e, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği öğretim üyesi Sayın Abdullah Cahit KARAOĞLANLI'ya, Makine Mühendisliği Bölümü araştırma görevlisi Sayın Mecit ÖGE'ye, yüksek lisans hayatım boyunca bana destek olan Metalurji ve Malzeme Mühendisliği lisans öğrencilerinden Sayın Emre AYDOĞDU'ya, literatür araştırması ve kaynak aramamda bana yardımcı olan Bartın Üniversitesi, Ljubljana Mühendislik Fakültesi kütüphanesi (Slovenya) ve Slovakya Teknik Üniversitesi Kosice kütüphanesi (Slovakya), İran Ulusal kütüphanesi (Tahran) çalışanlarına, öğrenciliğim boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme ve eşim Andrea BAYRAK'a canı gönülden teşekkür ederim.

Hakan BAYRAK

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## APS YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN OKSİT İÇERİKLİ ÇOK KATMANLI SERAMİK KAPLAMALARIN KURU KAYMA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

**Hakan BAYRAK**

**Bartın Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç.Dr. M. Sabri GÖK**

**Bartın- 2016, sayfa: XVI + 99**

Bu çalışmada, APS (Atmosferik Plazma Yöntemi) yöntemi ile AISI 316 L tipi paslanmaz çelik yüzeyine, önce bağ tabakası olarak NiCoCrAlY, bunun üzerine ferrokrom cürufu en üst yüzeye ise (cüruf tabakası üzerine) ticari olarak kullanılan tozlar kaplanarak çok katmanlı bir yapı oluşturulmuş ve kuru kayma aşınma davranışları incelenmiştir. Deneilerde üç farklı seramik tozu kullanılmıştır. Bunlar, WC +12 Co, ZrO +5 Co ve TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ticari tozlarıdır. Kaplama işlemine tabi tutulan numuneler üç farklı hız ve üç farklı yük altında kuru kayma aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Deney sonuçlarından, aynı koşullar altında ferrokrom cüruf tozu üzerine kaplanmış WC +12 Co nun en iyi aşınma direnci gösterdiği, bunu ZrO +5 Co ve TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ticari seramik tozlarının takip ettiği görülmüştür. Uygulanan deney şartlarında aşındırıcı ucun alt yüzeye ulaşmadığı, ferrokrom cürufunun sertliğinin ticari tozlara göre düşük olmasına karşın tokluğunun yüksek olmasından dolayı iyi bir aşınma performansı sergilediği görülmüştür.

### **Anahtar Kelimeler**

APS ; WC +12 Co; ZrO +5 Co; TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Kaplama; Kuru kayma

### **Bilim Kodu**

625.02.05

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **DRY SLIDING WEAR BEHAVIOR OF APS MULTI-LAYER OXID CERAMIC COATING**

**Hakan BAYRAK**

**Bartın University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. M. Sabri GÖK**

**Bartın-2016, pp: XVI + 99**

In this study AISI 316L stainless steel sample surface was multi-layer coated using APS method (atmospheric plasma spray) with NiCoCrAlY as a bound layer on the lower surface, ferrochrome on it's mid-layer and with one of these three commercial powders on the outer layer: WC +12 Co, ZrO +5 Co and TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. In our study we tested dry sliding wear resistance behaviour of these three powders under the three different speeds and three different pressures. On the basis of the results of our testing it can be concluded that in the same conditions WC +12 Co commercial powder applied on ferrochrome slag has higher resistance than ZrO +5 Co and TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders. Under the same wear test conditions ball on the disk didn't reach the lowest layer of our multi-layer coating. Samples had good performance due to the special features of the ferrochrome slag, which are lower hardness (slag was not cracking) and higher toughness (sturdiness).

#### **Key Words**

APS ; WC +12 Co; ZrO +5 Co; TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Coating; Dry sliding

#### **Science Code**

625.02.05

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY .....	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
KISALTMALAR .....	xv
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 Aşınma.....	3
1.2 Açıklayıcı Temel Terimler .....	8
1.3 Adheziv Aşınma .....	9
1.3.1 Adheziv Aşınma Hacminin Tahmini .....	10
1.3.2 Adheziv Aşınma Şekli .....	12
1.4 Abrasiv Aşınma.....	13
1.4.1 Sünek Malzemelerde Abrasiv Aşınma .....	14
1.4.2 Gevrek Malzemelerde Abrasiv Aşınma .....	15
1.5 Yorulma Aşınması .....	16
1.5.1 Elastik Temas Altında Yuvarlanma ve Kayar Temaslı Yorulma Aşınması.....	17
1.5.2 Plastik Temas Altında Kayma Temaslı Yorulma Aşınması.....	17
1.6 Koroziyon Aşınma .....	18
1.7 Elastik Temas Altında Seramiklerin Mekanik Aşınması .....	19



BÖLÜM 2 TERMAL SPREY KAPLAMALAR .....	20
2.1 Termal Sprey Kaplama ve Ekipmanlarının Tarihsel Gelişimi .....	21
2.2 Termal Sprey Kaplamalar ve Çeşitleri .....	22
2.2.1 Alev Sprey Kaplama.....	23
2.2.1.1 Toz ile Alev Sprey Kaplama .....	24
2.2.1.2 Tel ile Alev Sprey Kaplama .....	24
2.2.1.3 HVOF (High-Velocity Oxyfuel) Kaplama .....	24
2.2.2 Patlama Tabancası ile Sprey Kaplama .....	25
2.2.3 Elektrik Ark Sprey Kaplama .....	26
2.2.4 Plazma Sprey Kaplama.....	27
2.2.4.1 Atmosferik Plazma Sprey Kaplama .....	29
2.2.4.2 Vakum Altında Plazma Sprey Kaplama .....	29
2.2.5 Kinetik Enerji İşlemleri .....	31
2.2.5.1 Soğuk Sprey Kaplama .....	31
BÖLÜM 3 AŞINMAYA KARŞI KORUNMA YÖNTEMLERİ .....	32
3.1 Aşınmanın Malzeme Özellikleri ve İşleme Hususları ile İlişkisi .....	32
3.1.1 Pürüzlülüğün Aşınma ile İlişkisi .....	33
3.1.2 Sertlik ve Tokluğun Aşınma ile İlişkisi .....	34
3.2 Çok Katmanlı ve Kompozit Kaplamalar .....	37
3.3 Seramik Anti-Aşınan Kaplama.....	39
3.4 Polimer Kaplamalar .....	41
3.5 Elmas Benzeri Karbon (DLC) Kaplama.....	41
BÖLÜM 4 FERROKROM.....	43
4.1 Krom Cevherinin Özellikleri .....	43

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.2 Krom Cevherinin Metalurjik Davranışı.....	44
4.2.1 İndirgenebilirliği.....	44
4.2.2 Krom Kurtarma .....	44
4.2.3 Enerji Tüketimi.....	45
4.3 Son Yıllarda Ferrokrom Teknolojisindeki Yenilikler .....	45
4.4 Ferrokrom Üretiminin Çevreye Etkileri .....	46
4.5 Kromun İnsan Sağlığına Olan Etkileri .....	47
BÖLÜM 5 LİTERATÜR ÖZETİ.....	48
BÖLÜM 6 DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	66
6.1 APS Yöntemi İle Yüzey Kaplama.....	66
6.2 Metalografik Çalışmalar .....	67
6.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM- Scanning Elektron Microscopy) .....	67
6.4 Noktasal Analiz Çalışmaları (EDS- Energy Dispersive Spectroscopy) .....	67
6.5 X- 3D Optik Profilometre İncelemeleri.....	67
6.6 Sertlik Deneyleri.....	67
6.7 Kuru-Kayma Aşınma Deneyleri.....	67
BÖLÜM 7 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	69
7.1 Kayma Hızı, Yük Ve Kaplama Malzemesine Göre Aşınma Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	78
7.1.1 WC +12 Co (1200 Vickers) Kaplamanın Aşınma Davranışı .....	80
7.1.2 ZrO +5 Co (900 Vickers) Kaplamanın Aşınma Davranışı .....	84
7.1.3 TiO <sub>2</sub> +45 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (650 Vickers) Kaplamanın Aşınma Davranışı.....	88

**Sayfa**

BÖLÜM 8 SONUÇ VE ÖNERİLER .....	93
8.1 Genel Sonuçlar .....	93
8.2 Öneriler .....	94
KAYNAKLAR .....	95
ÖZGEÇMİŞ .....	99

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1. Tekrarlanan temaslarda üç temsilci türün aşınma eğrileri.....	4
2. Tekrarlanan temaslarda üç temsilci türün yüzey pürüzlülüğünün değişimi.....	4
3. Farklı yağlama koşulları altında kayma temasında bulunan metalik malzemelerin belirli aşınma oranlarının dağılımı.....	5
4. Belirli aşınma oranları ve seramiklerin kendilerine karşı yağsız kayma şartları altında sürtünme katsayılarının dağılımı.....	6
5. Farklı çalışma koşulları altında üç çeşit seramiğin aşınmış yüzey morfolojileri. Oklar malzeme yüzlerinin kayma yönünü göstermektedir.....	7
6. Aşınma ve birbirleri ile olan ilişkilerini tanımlayıcı anahtar kelimeler.....	8
7. Dört temsili aşınma şeklinin şematik gösterimi.....	9
8. Abraziv aşınma sürecinde gözlenen temsili abraziv transfer sürecinin şematik gösterimi; (a) ince pul gibi aşınma parçacığının abraziv transferi ve (b) kama benzeri bir aşınma parçacığının abraziv transferi.....	12
9. (a) Plastik deformasyonun hakim olduğu sünek malzemenin, abraziv aşınması ve (b) Gevrek kırılmanın hakim olduğu gevrek malzemenin abraziv aşınması.....	14
10. Pin-on-disk kayma işleminden sonra % 0.45 karbonlu çeliğin iki eşleşen aşınma yüzeylerinin enine kesit profilleridir.....	15
11. Abraziv aşınma direnci ve itriyum takviyeli zirkonyum oksit kırılma tokluğu arasındaki ilişki.....	15
12. Kırılgan malzemeler için abraziv aşınma modeli.....	16
13. Pirinç plaka üzerinde çelik pim 'in SEM tarafından çekilmiş bir fotoğrafı.....	18
14. Gevrek malzemedeki aşınma parçacıklarının oluşum şekli: (a) elastik temas altında kayma; (b) çatlak bölgesine çekme gerilmesinin uygulanması; (c) çatlak yayılımı; (d) aşınma parçacığının oluşumu.....	19
15. Bir hava plazma sprey tungsten kaplamanın kırık kesitinin taramalı elektro mikroskop görüntülerindeki katmanlı mikro yapı görüntüleri.....	20
16. Uçağın türbinli motor parçaları için mevcut ve potansiyel termal sprey kaplamalar uygundur.....	22
17. Genel alev sprey tabancalarının enine kesitleri. (a) Tel veya çubuk için.(b) Toz için.	23
18. Yüksek hız oksijen yakıt sistemi (HVOF) yanal kesiti.....	25
19. Patlama tabancası ile kaplama yanal kesiti.....	26

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
20. Genel elektrik ark sprey cihazının yanal kesiti. ....	27
21. Genel plazma sprey kaplama cihazının yanal kesiti.....	29
22. Tipik inert-atmosferli ve düşük basınçlı plazma odası.....	30
23. Aşınma testi öncesi ve sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülüğü.....	33
24. Farklı ark akımlarında püskürtülmüş HA kaplamaların sertlik ve gözeneklilik değerleri ölçülmüştür.....	34
25. Farklı ark akımlarında püskürtülmüş HA kaplamalarının SEM görüntüleri: (a) 250A, (b) 450 A ve (c) 500 A. ....	35
26. YAG lazer: öncesi (a) ve tatbik sonrası (b) elektrik ark ile kaplanmış WC-Co-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> alaşımının mikro yapısı. ....	36
27. Yüksek sertlikte (gevrek), Sert (tok) ve sert (rezilyans) kaplamaların gerilme $\epsilon$ stres $\sigma$ grafiği şematik olarak gösterilmektedir. ....	37
28. Çok katmanlı sert seramiğin tokluğunu geliştirme mekanizması. ....	38
29. Çok katmanlı bir fonksiyonu olarak çok katmanlı filmlerin Vickers sertlik grafiği. ...	38
30. (a) aşınma izlerinin SEM mikroskop görüntüsü. (b) aşınan numunenin yüzey grafiği. (c) ağırlığınca %15 NiAl (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - %13 TiO <sub>2</sub> ) nano kompozit HVOF kaplamanın mikroskobik aşınma enkaz görüntüsü.....	39
31. Backscattered elektro mikroskop ile (a) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ağırlığınca %13 TiO <sub>2</sub> tozlar ve karışımı (b) katkı maddeleri olmadan Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ağırlığınca %13 TiO <sub>2</sub> ve (c) katkı maddeleri ile Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ağırlığınca %13 TiO <sub>2</sub> . ....	40
32. sp <sub>2</sub> , sp <sub>3</sub> ve hidrojenin çeşitli formlarını içeren DLC üçlü faz diyagramı. ....	42
33. Alfa-LWF-1 tribometre temas geometrisi: (a) doğrusal temas; (b) konformal temas..	61
34. Öğütülmüş ferrokrom cürufunun SEM görüntüsü 1000x. ....	69
35. ZrO +5 Co APS kaplamanın kesit görünüşü 1000x. ....	70
36. ZrO +5 Co APS kaplama üzerinden Zr, Ca, Mg, Si, Al için çizgisel alınan EDS analiz raporu. ....	71
37. ZrO +5 Co APS kaplama üzerinden O, Cr, Co ve Ni için çizgisel alınan EDS analiz raporu. ....	72
38. WC +12 Co APS kaplamanın kesit görünüşü 500 x. ....	73
39. WC +12 Co APS kaplama üzerinden çizgisel alınan EDS analiz raporu. ....	74
40. TiO <sub>2</sub> +45 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> APS kaplamanın kesit görünüşü 400x. ....	74

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
41. Şekil 41: TiO <sub>2</sub> +45 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> APS kaplama üzerinden çizgisel alınan EDS analiz raporu.....	75
42. SEM aşınma yüzey görüntüsü (7, 10, 13 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 25x. ....	81
43. SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 75x. ....	82
44. SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 250x. ....	82
45. O, Mg, Si için aşınma yüzeyi üzerinden alınan çizgisel EDS analiz raporu (WC +12 Co). ....	83
46. Al, W, Co için aşınma yüzeyi üzerinden alınan çizgisel EDS analiz raporu (WC +12 Co). ....	84
47. 7N'luk yük 0.08 kayma hızında 4 nolu numune üzerinden alınmış SEM yüzey görüntüsü 25x. ....	85
48. SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 50x. ....	85
49. SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 500x. ....	86
50. O ve Si için aşınma yüzeyi üzerinden alınan çizgisel EDS analiz raporu (ZrO +5 Co). ....	86
51. Aşınma yüzeyi üzerinden alınan çizgisel EDS analiz raporu (ZrO +5 Co). ....	87
52. SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 25x. ....	88
53. SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 75x. ....	89
54. SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 300x. ....	89
55. 3D optik mikroskop aşınma oluşu görüntüsü WC +12 Co. ....	90
56. 3D optik mikroskop aşınma oluşu görüntüsü ZrO +5 Co. ....	91
57. 3D optik mikroskop aşınma oluşu görüntüsü TiO <sub>2</sub> +45 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....	92

## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo</b>		<b>Sayfa</b>
<b>No</b>		<b>No</b>
1.	Avrupa şartlarında ferrokrom sektöründe işletme maliyet analizi sonucu maliyet faktörlerinin maliyete etki % oranları. ....	45
2.	Atmosferik Plazma Sprey koşulları .....	66
3.	Kaplamaların uygulanan sabit yüklere göre hacim kayıp grafiği .....	79

## **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

a	:	Yarıçap
L	:	Uzunluk birimi
V	:	Aşınma hacmi
H	:	Aşınan malzemenin sertlik değeri
W	:	Sabit yük
$K_{ad}$	:	Adheziv aşınmanın aşınma katsayısı
$N_f$	:	Kritik yuvarlanma döngü sayısı
$R_a$	:	Ortalama pürüzlülük
y	:	Belirli bir yükseklikteki ölçüm noktası
$\sigma$	:	Stres
$\varepsilon$	:	Gerilme

## **KISALTMALAR**

ASTM	:	American society for testing and materials
MAPP	:	Metal asitilen propadiyen
SEM	:	Scanning electron microscope
FE-SEM	:	Field Emission-Scanning Electron Microscope
EDS	:	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
HVOF	:	High velocity Oxyfuel
DC	:	Doğru akım
kW	:	Kilo watt
kVA	:	Kilo volt amper
kWh	:	Kilo watt saat
MPa	:	Mega paskal



APS	:	Atmosferik plazma sprej
VPS	:	Vakum plazma sprej
LPPS	:	Low pressure plazma sprej
ATM	:	Atmosferik basınç
HA	:	Hidroksiapatit
HAP	:	Hidroksiapatit
HV	:	Vickers sertlik
CPSP	:	Critical sprej proses parametreleri
PA	:	Poliamidit
PE	:	Poliyeten
DLC	:	Diamond like carbon
ACD	:	Alerjik temas dermatit
RCF	:	Rolling contact fatigue
AT40	:	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - ağırlığına %40 TiO <sub>2</sub>
AT13	:	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - ağırlığına %13 TiO <sub>2</sub>
CC3T	:	Geleneksel Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - %3 TiO <sub>2</sub>
NC3T	:	Nano boyutta Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - %3 TiO <sub>2</sub>
CP-Ti	:	Ticari olarak saf titanyum
XRD	:	X ray ışın kırınım cihazı
SBF	:	Simulated body fluid
YAG laser	:	Yttrium alüminyum garnet - lazer
AISI	:	American iron and steel institute

# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

Literatürde cisimlerin yüzeylerinde mekanik etkenlerden dolayı küçük boyutlu taneciklerin yavaş fakat sürekli olarak kopup ayrılması sonucu malzemede istenilmeyen değişikliğin meydana gelmesi olayına aşınma denir.

İlerleyen teknoloji ile tokluğu yüksek aynı zamanda sert malzemelere ihtiyacın artması ile malzeme bilimcileri isteklere karşılık verebilecek nitelikte malzemeler üretmeye sürekli mecbur kalmaktadırlar. Günümüzde aşınma hasarının giderilmesi ya da en aza indirilmesi için Ar-Ge çalışmalarına önemli harcamalar yapılmaktadır. Aşınma; çalışma parçalarının her bölgesinde gerçekleşmeyip sistemde birbirleriyle temas halinde olan yüzeylerinde gerçekleşen bir durumdur. Bu nedenle her çalışma ortamında yüksek aşınma direnci gösteren bir malzeme üretmek hem çok zordur hem de ekonomik değildir. En iyi çözüm çalışma koşullarının göre uygun malzeme üretimidir.

Birbirleriyle temas halinde çalışan iş parçalarının tribolojik ömürlerini uzatmada kullanılan en ucuz ve yaygın yöntem yüzeyler arasında yağlayıcı bir tabakanın oluşturulmasıdır. Son yıllarda gittikçe önem kazanan diğer bir yöntem ise malzemelerin yüzeylerinin farklı ince seramik film tabakaları ile kaplama işlemidir.

Seramik kaplamaların uygulamalarında termal sprey olarak bilinen yöntemler kullanılmaktadır. Alev sprey, elektrik ark sprey ve plazma sprey bunların başlıcalarıdır. Bu enerji kaynakları, erimiş ya da yarı erimiş halde olan kaplama malzemesini ısıtmak için kullanılır. Elde edilen ısıtılmış parçacıklar hızlandırılmış gazlar veya atomizasyon jetleri tarafından hızlandırılarak kaplanacak iş parçası yüzeyine doğru itilir. Yüzeye itilen parçacıklar ile yüzey üzerinde bir bağ oluşur, daha sonra parçacıkların birikmesi nedeniyle kalınlaşır ve katmanlı bir yapı oluşturur (Davis, 2004).

Malzemelerin yüzeylerinin kaplanmasında kullanılan seramik tozlar çok çeşitlidir. Bu tozların yüzeye uygulanmasında, ergime noktası çok yüksek metal ve seramiklerin içyapısını değiştirmeden ve termal bozulmaya uğramadan uygulanmasına dikkat

edilmelidir. Bu yöntemler genellikle aşınma ve korozyon uygulanmasının yanı sıra elektromanyetik koruma, elektrik iletkenliği, direnç ve termal bariyer uygulamaları için kullanılırlar. Ayrıca radyasyona karşı direncin geliştirilmesi veya geciktirilmesi için de kullanılmaktadır. Endüstride; havacılık, tarım aletleri, otomotiv, birincil metaller, madencilik, kağıt, petrol ve gaz üretimi, kimyasallar, plastikler ve biyomedikal dahil hemen hemen her alanda kullanılmaktadır (Tucker, 1994).

Günümüzde bu işlemlerin büyük bir çoğunluğu plazma sprey kaplama yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Plazma sprey kaplamada, yüksek iletkenlik sağlayan plazma ortamı genellikle argon, nadir olmakla beraber, azot, hidrojen ya da helyum gazlarının dahil olması ile birlikte bir tungsten katot ve su ile soğutulan bir bakır anot arasında oluşturulur. Elektrik arkı yüksek frekanslı deşarj kullanan iki elektrot arasında başlatılır ve daha sonra DC güç kullanarak devam eder. Ark arasında iyonize olan gaz yüksek basınçlı plazmayı oluşturur. Nozuldan çıkıncaya kadar bu sıcaklık 30,000 °C 'den fazla olabilir, gaz ısısında ortaya çıkan artış, dolayısıyla gaz hacmindeki artış gaz basıncını ve hızını arttırmaktadır.

Uygulanmasında önemli olan bazı parametreler vardır. Bunlar gaz akışları, güç seviyeleri, toz besleme oranları ve taşıyıcı gaz akışları aynı zamanda iş parçasının soğukluğu için torç mesafe ve kaplama malzemesinin birikimi için püskürtme açısıdır. Uzaklık büyük önem taşımaktadır, yeterli mesafe tozların ısıtılması ve hızlandırılması için gereklidir, ama çok büyük bir mesafe tozların soğumasına ve hızlarını kaybetmesine neden olur çünkü gaz akımı hızla genişler, soğur ve yavaşlar.

Diğer önemli bir faktör ise; iş parçası üzerine biriktirme işlemi esnasında proses gazları ya da çevredeki ortam gazları (hava) ile toz parçacıklarını reaksiyona girmesidir. Bu oksidasyon elimine edilebilir bir gaz tarafından çıkış noktası örtüleyerek ya da düşürülmüş basınç ile soy gaz odası içinde uygulanarak engellemeye çalışılır.

Plazma sprey bu özellikleri nedeniyle aşınma direnci yüksek, korozyona ve termal bozulmaya direnç gösterecek metal ve seramik tozları gibi çoğu kaplama malzemesi için en önemli kaplama tekniği olmuştur.

Bu çalışmada atmosferik plazma sprey yöntemi ile AISI 316 L tipi paslanmaz çelik üzerine çok katmanlı bir tabaka oluşturularak, üretilen numunelerin kuru-kayma aşınma davranışları incelenmiştir. Çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran fark, kaplama işleminde

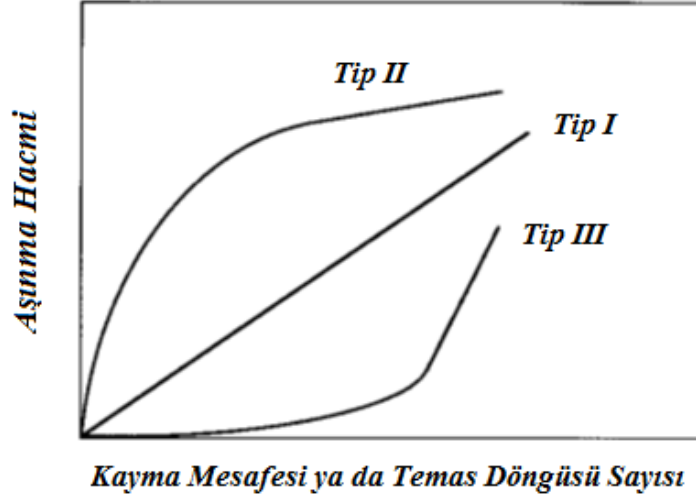
kullanılan tozlardan birisinin endüstriyel atık olmasıdır. Ferrookrom cürufundan elde edilen bu tozlar ticari tozlar ile birlikte sandoviç şeklinde yüzeyde biriktirilerek aşınma performansları değerlendirilmiştir.

## 1.1 Aşınma

Teknik anlamda aşınma; cisimlerin yüzeylerinde, mekanik etkenlerle (mekanik bir sebep veya mekanik bir enerji etkisiyle) mikro taneciklerin kopup ayrılması sonucu malzemede istenilmeyen bir değişikliğin meydana gelmesi olayıdır. DIN 50320'ye göre aşınma; katı cisim yüzey bölgesinden tribolojik zorlanma sonucu sürekli ilerleyen malzeme kaybı şeklinde ifade edilmiştir. Moore'a göre aşınma; kullanılan malzemelerin yüzeylerine gaz, sıvı ve katıların teması neticesinde çeşitli etkenlerle malzemenin yüzeyinden mikro tanelerin kopması sonucu meydana gelen yüzey bozulması olarak tanımlanır (Bhushan, 2000).

Çalışma koşullarının şiddetine ve malzeme seçimine bağlı olarak aşınma oranları  $10^{-15} - 10^{-1} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ , aralığında değişiklik göstermektedir. Bu bulgular tasarımda çalışma koşullarının ve malzeme seçiminin aşınma konusunda belirleyici parametreler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu gereksinimleri karşılamak için tek yol, tahmini aşınma şekilleri ve aşınma oranları ile aşınma haritaları oluşturmaktır (Garnham, 1995). Bir aşınma haritası tribolojik koşullarda en iyi açıklamalardan biri olarak kabul edilir ve çalışma koşullarında geniş bir yelpazede malzeme seçimine yardımcı olur.

Aşınma mekanizmaları sürtünme sırasındaki karmaşık değişiklikleri dikkate alarak farklı terimler ile açıklanmıştır. Buna bağlı olarak çeşitli aşınma türleri vardır. Bunlar; adheziv, abraziv, yorulma ve korozyon aşınmalarıdır. Tek bir aşınma mekanizması yoktur. Bu yüzden her aşınma şekli için farklı aşınma mekanizmalarını anlamak, aşınma konusuna önem kazandırmaktadır. Aşınma hacmi, aşınma yüzey pürüzlülüğü ve aşınan parçacık şekli aşınma karakteristiği hakkında bize önemli bilgiler verir. Aşınma hacmi eğrileri üç ana türde Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir (Bhushan, 2000).

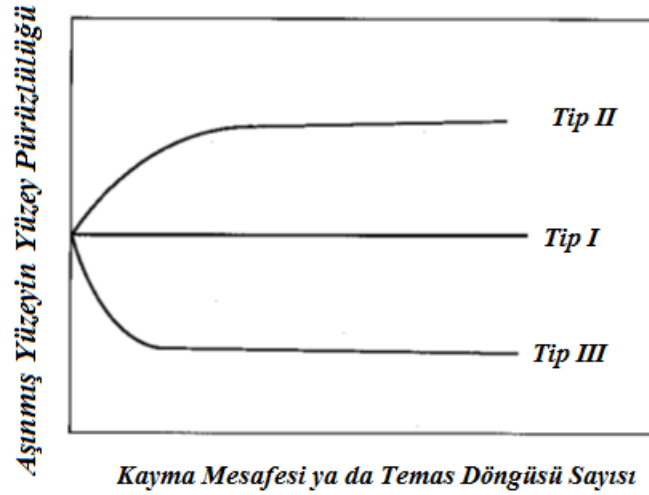


Şekil 1: Tekrarlanan temaslarda üç temsilci türün aşınma eğrileri (Bhushan, 2000).

Tip I tüm süreç boyunca sabit bir aşınma oranını gösterir.

Tip II başlangıçta yüksek olan aşınma sonrasında düşük sabit bir aşınma oranına geçiş yapar. Bu tür aşınmalar sıklıkla metallerde görülmektedir.

Tip III başlangıçta düşük aşınma oranında başlayıp ilerleyen evrelerde yıkıcı bir hasara sebebiyet verir. Bu tür aşınmalar sıklıkla seramiklerde görülmektedir (Bhushan, 2000).



Şekil 2: Tekrarlanan temaslarda üç temsilci türün yüzey pürüzlülüğünün değişimi (Bhushan, 2000).

Yıkıcı hasardan önce sürtünme miktarına, başlangıç yüzey kalitesine, malzeme özelliklerine ve sürtünme koşullarına bağlı olarak çatlak oluşumu gerçekleşir. Burada

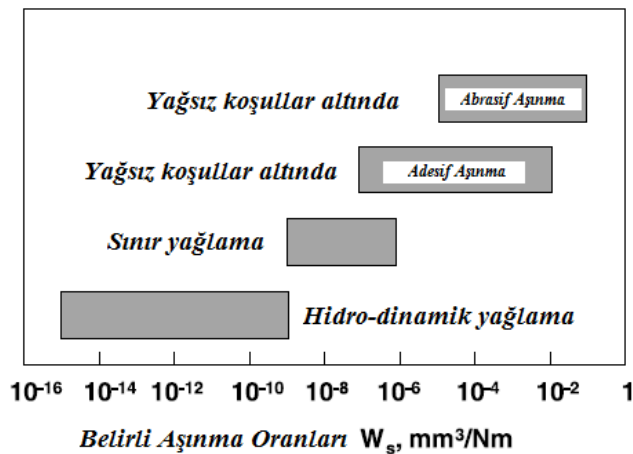
aşınmada önemli bir rol oynayan aşınma yüzeyleri üzerindeki pürüzlülük eğrileri üç ana türde meydana gelmektedir. Bunlar Şekil 2 'de gösterilmiştir (Bhushan, 2000).

Tip I Bu durumda yüzey pürüzlülüğü başlangıç değerinden fazla bir değişim göstermemektedir.

Tip II sürekli aşınma durumu, burada söz konusu yüzey pürüzlülüğü belirli bir değerde artmakta ve sonrasında stabil kalarak devam etmektedir.

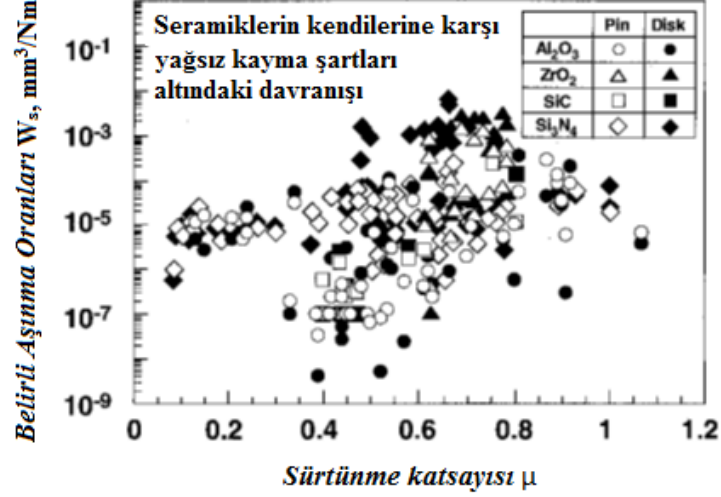
Tip III yüzey pürüzlülüğü ilk evrelerde önemli ölçüde azalma göstermekte sonrasında stabil kalmaktadır. Genellikle numuneler ve yüzey kaplama için parlatılan malzemelerde de görülmektedir (Bhushan, 2000).

Daha önce de belirtildiği gibi aşınma, malzeme yüzeyinde istenmeden oluşan değişiklik veya malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Yıpranma derecesi belirli bir aşınma hızı veya aşınma katsayısı ile tayin edilir. Aşınma oranı Şekil 1' de gösterilen aşınma hacmi eğrisinin eğimine karşılık birim mesafe başına düşen aşınma hacmi olarak tanımlanır. Belirli aşınma oranı birim mesafe ve birim yük başına aşınma hacmi olarak tanımlanır. Aşınma katsayısı belirli bir aşınma oranına ve aşınan malzemenin sertliğine bağlı olarak tayin edilir. Farklı yağlama koşulları altında kayma temasında bulunan metalik malzemelerin belirli aşınma oranları dağılımı Şekil 3' de özetlenmiştir.



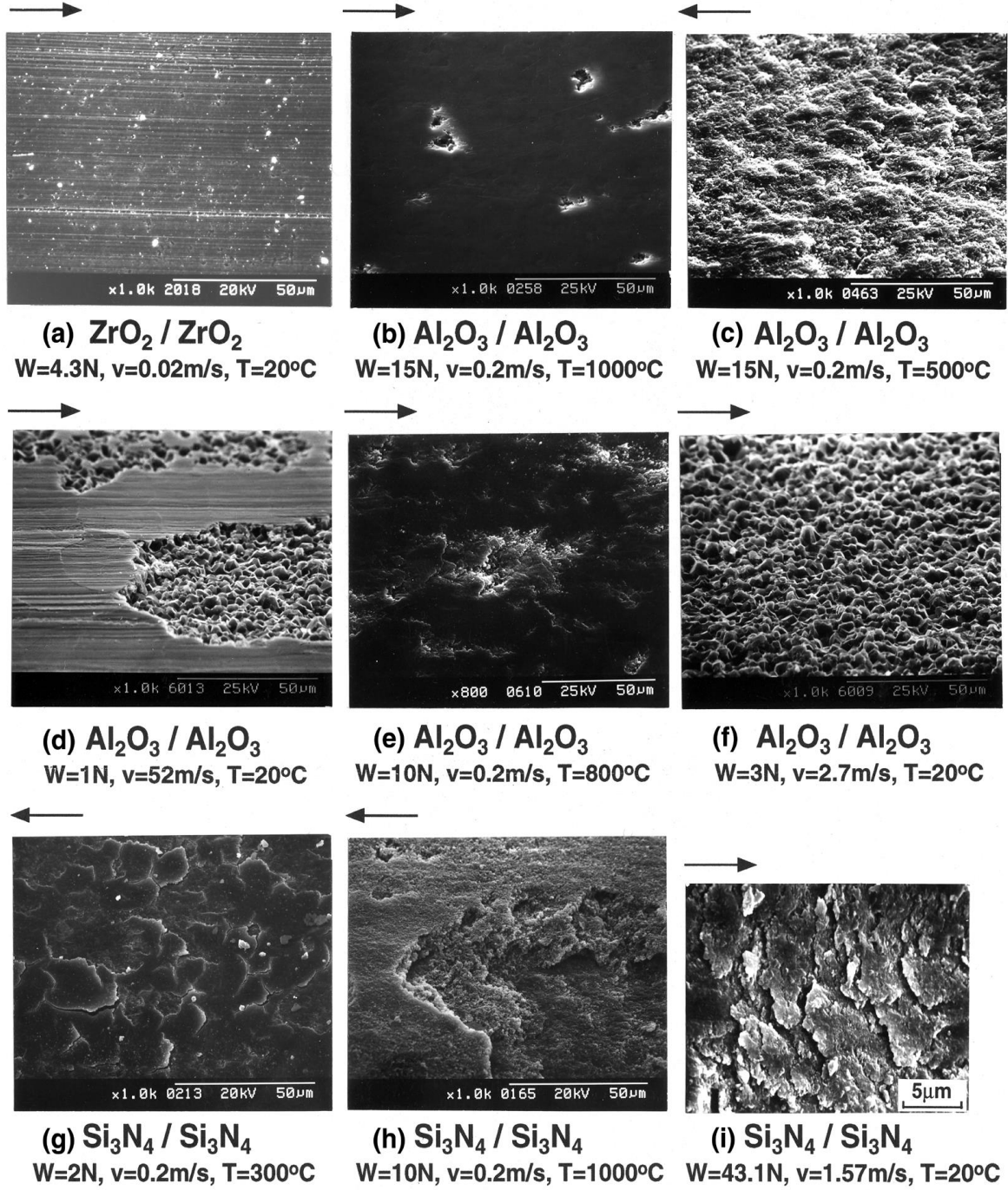
Şekil 3: Farklı yağlama koşulları altında kayma temasında bulunan metalik malzemelerin belirli aşınma oranlarının dağılımı (Bhushan, 2000).

Gözlenen aşınma oranları belirtilen yağlama farklılıklardan dolayı  $10^{-15}$  -  $10^{-1}$  mm<sup>3</sup>/Nm aralığında geniş bir dağılım göstermektedir. Belirli aşınma oranları ve sürtünme katsayılarının dağılımları, farklı normal yükler, sürgülü hızlar ve sıcaklık altında kendi içlerinde kuru kayma aşınmasına tabi tutulan dört çeşit seramik deney grafiği şekil 4' te gösterilmektedir.



Şekil 4: Belirli aşınma oranları ve seramiklerin kendilerine karşı yağsız kayma şartları altında sürtünme katsayılarının dağılımı (Bhushan, 2000).

Aşınma oranları benzer malzemeler arasındaki temas halinde dahi, malzeme ve sürtünme koşullarına bağlı olarak,  $10^{-9}$  -  $10^{-2}$  mm<sup>3</sup> / Nm aralığında değişir. Farklı temas şartlarında gözlenen seramik aşınma yüzeylerinin çeşitleri Şekil 5 'de gösterilmektedir. Aşınma yüzeyleri malzeme ve sürtünme koşullarına bağlı olarak oldukça farklı görünmektedir. Bu temas koşullarında küçük değişiklikler tribolojik sistemde aşınmanın önemli ölçüde değişiklik gösterdiği anlamına gelir. Sonuçlar Şekil 3, 4 gösterildiği üzere ve Şekil 5'te net bir şekilde aşınma ile ilgili aşağıdaki açıklama göstermektedir.



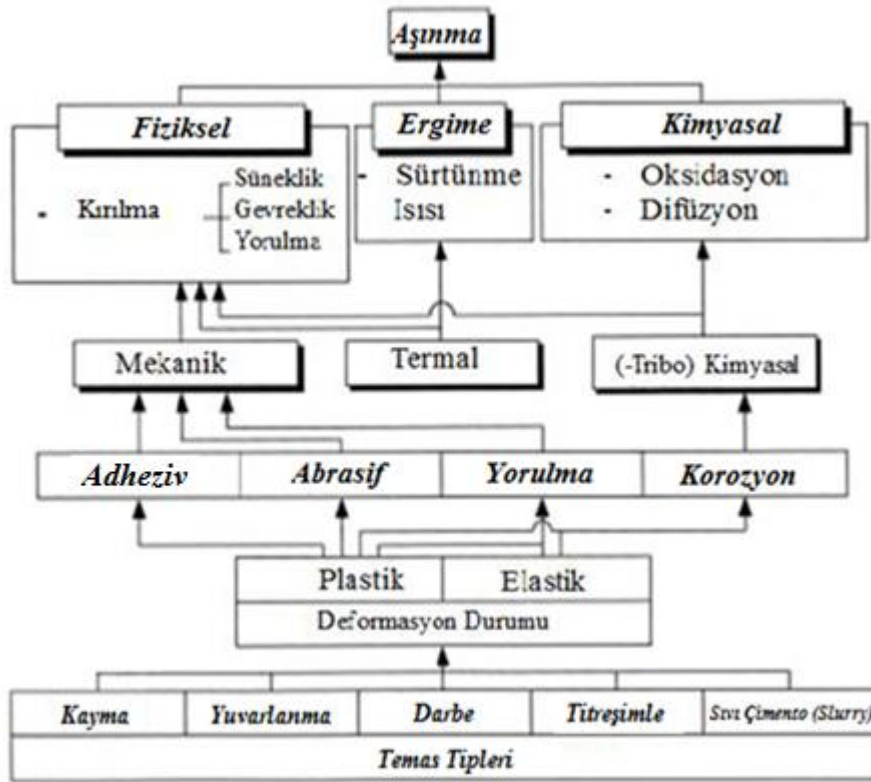
Şekil 5: Farklı çalışma koşulları altında üç çeşit seramiğin aşınmış yüzey morfolojileri. Oklar malzeme yüzlerinin kayma yönünü göstermektedir (Bhushan, 2000).

Aşınma bir malzeme özelliği değildir. Aşınma bir sistem tepkisidir (Bhushan, 2000).



## 1.2 Açıklayıcı Temel Terimler

Aşınmayı tanımlamak için kullanılan birçok terim vardır. Bu terimler bazen aşınma mekanizmasını karmaşık ve anlaşılması zor bir hale getirir. Bu da bizim aşınma mekanizmaları ile ilgili analizlerimizin sonucunu yorumlaya bilmek için daha fazla dikkat sarf etmemize neden olur. Aşağıda aşınma ve bunların karşılıklı ilişkilerini tanımlayıcı anahtar kelimeler özetlenmiştir. Bu özet, Şekil 6' de gösterilmektedir.

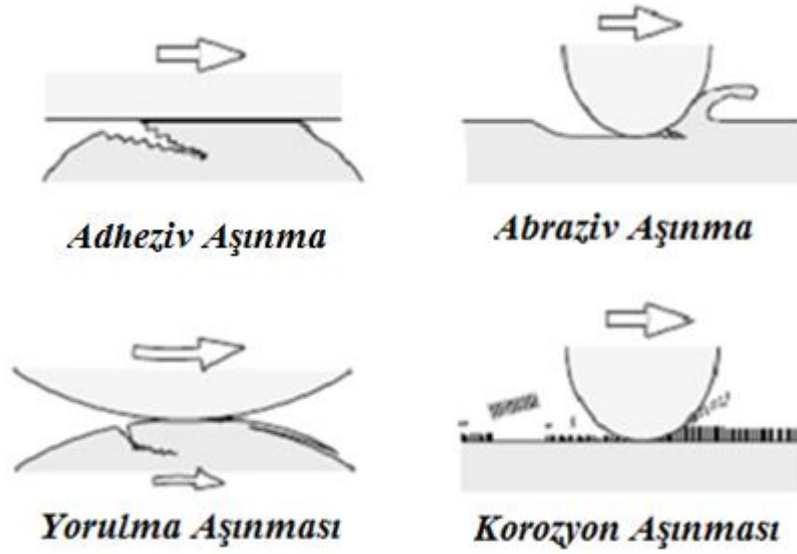


Şekil 6: Aşınma ve birbirleri ile olan ilişkilerini tanımlayıcı anahtar kelimeler (Bhushan, 2000).

Yukarıdaki şemada aşınma katı yüzeylerin etkileşen temas türleri açısından incelenmiştir. Uygulamada birçok farklı temas yapılandırmaları vardır. Normal veya eğimli sıkıştırma ve gevşetme, tek yönlü kayma, tek yönlü yuvarlama, karşılıklı kayma, karşılıklı yuvarlama ve kayarak yuvarlanma tüm farklı iletişim yapılandırmaları ile temas hareketleri açısından sınıflandırılır.

Bu aşınma temas türleri kayma aşınması, yuvarlanma aşınması, darbeli aşınma, sürtünme aşınması ve çamur aşınması olarak tarif edilmektedir. Aşınma ile ilgili bu açıklamaların tümü teknik ve temas türlerinin görünüşlerine dayanarak oluşturulmuştur. Bu terimler

bilimsel bir şekilde aşınma mekanizmalarını temsil etmemektedir. Abraziv ve adheziv aşınma plastik deformasyon meydana getirir. Yorulma ve korozyon aşınması duruma göre plastik ya da elastik deformasyon meydana getirir. Abraziv ve adheziv aşınmada parçacıkların kopması plastik deformasyon nedeni ile olur ama yorulma aşınmasında aşınma mekanizması esneklik ve gevreklik sebebi ile oluşur. Korozyon aşınmasını, kimyasal reaksiyonlar ve sürtünme katsayısı etkiler. Geleneksel olarak kabul edilen temsili aşınma şekilleri, Şekil 7 de gösterilen dört aşınma şekli olarak kabul edilir ve bu aşınma şekillerine dayalı aşınma mekanizmaları ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 7: Dört temsili aşınma şeklinin şematik gösterimi (Bhushan, 2000).

Buna ek olarak, seramiklerin mekanik aşınma esasına dayalı aşınma mekanizması da bu konuya dâhildir.

### 1.3 Adheziv Aşınma

Plastik temas altında iki yüzey arasında temas ara yüzü kısmen kayma davranışına direnecek kadar güce sahip ise dislokasyondan kaynaklanan büyük plastik deformasyon ile sıkıştırma ve kesme davranışları sergiler. Temas bölgesinde bu tür büyük deformasyonların bir sonucu olarak, bir çatlak başlangıcı oluşur, çekme ve kesmeler nedeniyle çatlak yayılır. Çatlak temas ara yüzüne ulaştığında, bir aşınma parçacığı oluşur ve adheziv aşınma transferi tamamlanmış olur. Temas ara yüzü yeterli adheziv aşınma direncine ulaştığında meydana gelen aşınma türüne adheziv aşınma adı verilir (Garnham, 1995).

### 1.3.1 Adheziv Aşınma Hacminin Tahmini

Gerçek temas noktalarının tamamının  $n$  olduğunu varsayalım, yeni bir temas noktası, eski temas noktasının kaybolmasının ardından oluşması durumunda kayma esnasında toplamdaki temas sayısı  $n$  sabit kalır. Dairesel bir temas alanı olduğunu varsayarsak yarıçapı  $a$ ,  $2a$  mesafe kayması sonucu üretilen aşınma parçacıklarının olası hacmi  $2 \pi a^3 / 3$  tarafından yarım küre hacmi olarak kabul edilir (Bhushan, 2000). Bu varsayımlara dayanarak,  $L$  mesafe kayma yaptıktan sonra  $n$  temas noktası için olası aşınma hacmi  $V$  (Eşitlik 1):

$$V = n \cdot \frac{2}{3} \pi a^3 \cdot \frac{L}{2a} \quad (1)$$

Plastik deformasyon sabit basınç altında aşınan malzemenin sertlik değeri hemen hemen  $H$  eşit olduğundan,  $n$  temas noktaları  $n\pi a^2$  için toplam gerçek temas alanı şu şekilde ifade edilir (Eşitlik 2):

$$n\pi a^2 = \frac{W}{H} \quad (2)$$

Eşitlik 1' in içine Eşitlik 2' ye ilave ederek,  $L$  kayma sonrası mesafe,  $W$  sabit yük, olası aşınma hacmi  $V$  Eşitlik 3'te verilmiştir.

$$V = \frac{1}{3} \cdot \frac{WL}{H} \quad (3)$$

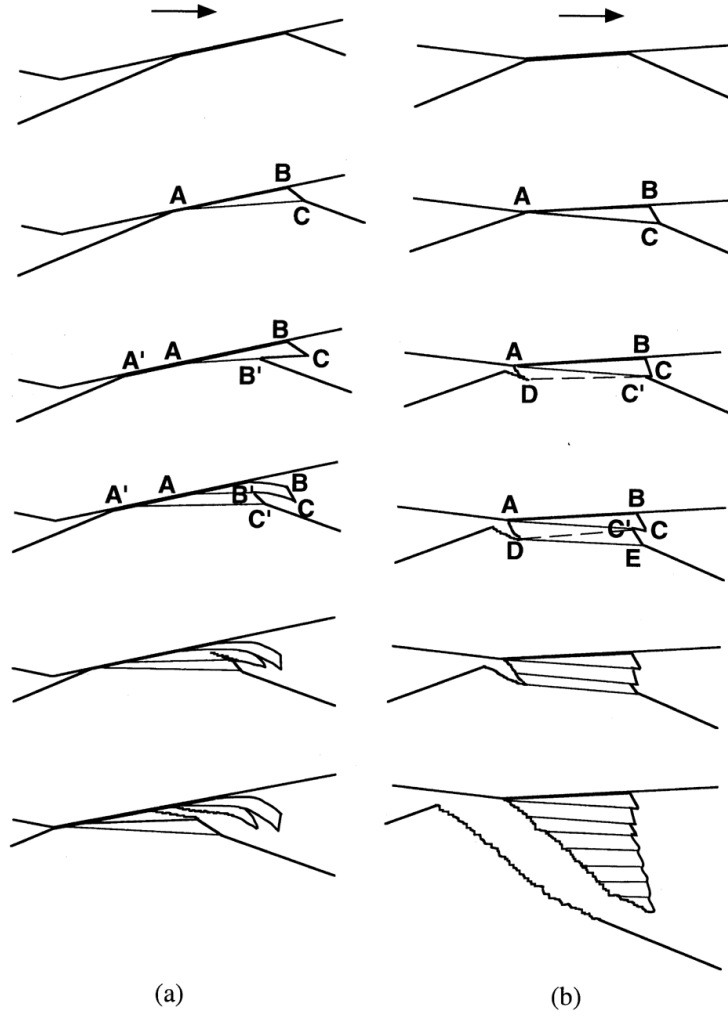
Eşitlik 3' te adheziv aşınma hacmi, sabit yükü ve kayma mesafe ile doğru orantılı olduğu ve aşınan malzemenin sertliği ile ters orantılı olduğunu göstermektedir. Eşitlik 2 ile ilişkisini göz önüne alındığımızda da, kayma sırasında toplam reel temas alanı ile orantılıdır. Şekil 8' de gösterildiği gibi aşınma parçacıklarının büyüklüğü sadece temas büyüklüğüne bağlı değildir (Bhushan, 2000).

Pratikte ise, adheziv aşınma çeşitli şekillerde oluşabilir. Ayrıca bir aşınma parçacığı her zaman sadece yumuşak malzemedan oluşmayabilir, sert ve/veya yumuşak her iki malzemedan de oluşabilir. Her temas noktasında aşınma parçacığı üretme ihtimali de eşit değildir. Ortamda temas bölgesinde mikroskobik malzemenin mikroskobik temas şekline, mikroskobik yüzey kirliliğine ve diğer bozukluklarına bağlıdır. Tüm bu değişkenleri karşılamak amacıyla, bir  $K_{ad}$  değişken parametresi Eşitlik 3' ün içine yerleştirilir ve aşınma hacmi şu şekilde ifade edilir (Eşitlik 4):

$$V = K_{ad} \cdot \frac{WL}{H} \quad (4)$$

Burada  $K_{ad}$  adheziv aşınmanın aşınma katsayısıdır.  $K_{ad}$  sürtünmeye maruz kalan çiftin aşınma oranını açıklamak için bir temel değerdir.  $K_{ad}$ ' yi etkileyen fiziksel etmenler, plastik temas bölgesindeki aşınma hacim oranı ve kuvvete etki eden malzeme özellikleri, sıkıştırma ve kesme bölgesinin geometrisi olarak tanımlanır.

Metallerin adheziv aşınması, çalışma koşulları ve malzeme özelliklerine bağlı olarak  $K_{ad}$  katsayıları  $10^{-7}$  ile  $10^{-2}$  arasında değişiklik gösterir. Bir aşınma katsayısı  $K_{ad}$  sabit bir değer değildir, ancak adheziv aşınma oranı aralığı içinde bir değerde olduğu kabul edilmelidir (Bhushan, 2000).



Şekil 8: Abraziv aşınma sürecinde gözlenen temsili abraziv transfer sürecinin şematik gösterimi; (a) ince pul gibi aşınma parçacığının abraziv transferi ve (b) kama benzeri bir aşınma parçacığının abraziv transferi (Bhushan, 2000).

### 1.3.2 Adheziv Aşınma Şekli

Güçlü adheziv aşınmanın olduğu temas ara yüzünde basınç altında teğet kesen temas bölgesinde kayma düzlemleri boyunca kaymalar meydana gelir. Kaymaların bir sonucu olarak, pul gibi kesilmiş çıkıntılar oluşturulur, Şekil 8a'da gösterildiği gibi temastan sonra bölgede gerilme ve kayma kombini ile çatlak oluşumu ve sonrasında o çatlağın yayılımı takip eder.

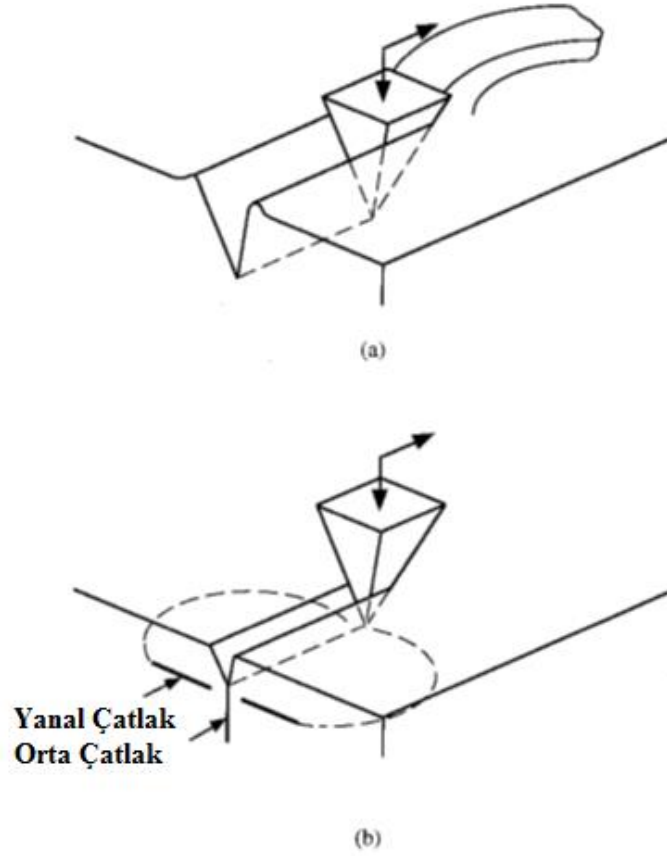
Temas bölgesinde büyük bir plastik deformasyon oluşmaktadır. Şekil 8 (b)' de gösterildiği gibi, temastan sonra bölgede gerilme ve kayma kombini ile çatlak oluşumu ve sonrasında o çatlağın yayılımı takip eder, kamaya benzer bir şekil oluşturur. Şekil 8 (a) ve (b)' de

aşınma parçacıklarının kırılma yüzeylerinin kırınımsal analizi pul gibi aşınma parçacığının kırılma yüzeyinin büyük kısmı basınç ve kayma kırılması şeklinde olduğun görülür. Kırılma yüzeyinin tüm parçaları Şekil 8 (b) kama gibi aşınmış parçaları bir gerilme ve kayma kırığı şeklindedir. Oluşan her iki aşınma şekli (pul ve kama gibi) adheziv aşınmanın temel oluşum şekilleridir (Garnham, 1995).

Adheziv aşınma sürecinde, bir yüzeyden diğer yüzeye parçacık transferi ve geri transfer şeklinde dönüşümler olur. Bunun bir sonucu olarak, iki yüzey arasında büyük oranda aşınma parçacıkları oluşur. Bu adheziv aşınma mekanizmasının bir başka temel prensibidir (Garnham, 1995). Tekrarlanan kayma işleminde bu aşındırıcı parçacıklar serbest parçacıklar olarak temas ara yüzeyinde ya da karşıt yüzeyde kalır ve sivri formda olanlar karşıt temas yüzeyini kazırlar. Bu Şekil 8 (a)' da ya da Şekil 8 (b)' de gösterildiği gibi adheziv aşınmanın uygulamada yaygın olarak görülen açıklayıcı bir başka deformasyon şekilleridir.

#### **1.4 Abraziv Aşınma**

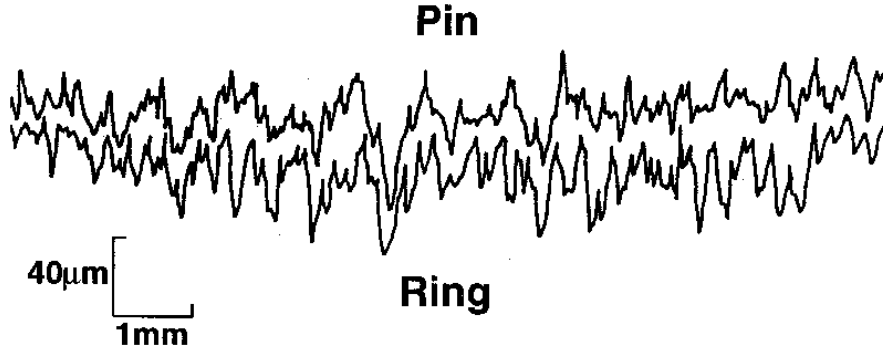
Eğer iki temas yüzeyi iç içe eğimli veya kıvrımlı bir şekilde temas etmekteyse kazımalı bir kayma gerçekleşir. Kazımanın bir sonucu olarak, malzeme yüzeyinde belirli bir hacimde azalma olur ve abraziv bir oyuk malzemenin zayıf yüzeyi üzerinde oluşur. Bu tip aşınmalara abraziv aşınma denir. Burada anlatılmak istenen sert ve keskin bir çıkıntının düz bir yüzeyi kazıyarak oyuk oluşturmasıdır. Aşınan malzeme sünek bir özelliğe sahip olduğunda, aşınma parçacığı uzun bir şerit gibi mikro kesme mekanizması tarafından oluşturulur. Aksine aşınan malzeme gevrek bir özelliğe sahip olduğunda aşınma parçacığı çatlak yayılımı şeklinde oluşur. Bu mekanizmalar Şekil 9 (a) ve (b) de şematik olarak anlatılmıştır (Bhushan, 2000).



Şekil 9: (a) Plastik deformasyonun hakim olduğu sünek malzemenin, abraziv aşınması ve (b) Gevrek kırılmanın hakim olduğu gevrek malzemenin abraziv aşınması (Bhushan, 2000).

#### 1.4.1 Sünek Malzemelerde Abraziv Aşınma

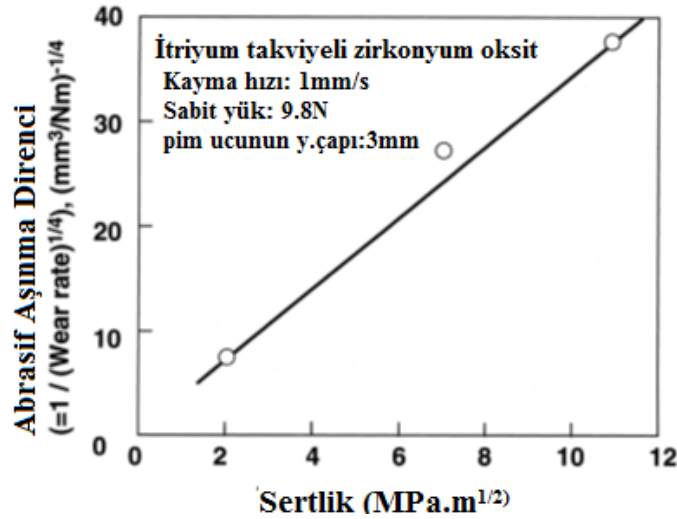
Pürüzsüz temas yüzeylerine sahip aynı sünek malzemelerden yapılmış iki aşınma çiftinin kayma işlemi gerçekleştirildikten sonra aşınma yüzeyi üzerinde benzer oyuklar görünmektedir. Şekil 10' da gösterildiği gibi tepeler ve çukurlar, eşleşme yüzeyleri ile iyi örtüşmektedir. Bunun sonucunda, sert aşındırıcı pürüzler eşleşme yüzeyi üzerinde girinti oluşturmuş olduğu anlamına gelir. Örneğin, tekrarlanan kayma işlemi sırasında temas yüzeyinde sertleşme, faz dönüşümleri ve üçüncü gövde oluşumu meydana gelmektedir. Bu nedenle, tekrarlanan kayma işlemlerinde abraziv aşınma içinde sünek bir malzeme tipik aşınma şekli olarak kabul edilmektedir (Garnham, 1995).



Şekil 10: Pin-on-disk kayma işleminden sonra % 0.45 karbonlu çeliğin iki eşleşen aşınma yüzeylerinin enine kesit profilleridir (Bhushan, 2000).

#### 1.4.2 Gevrek Malzemelerde Abraziv Aşınma

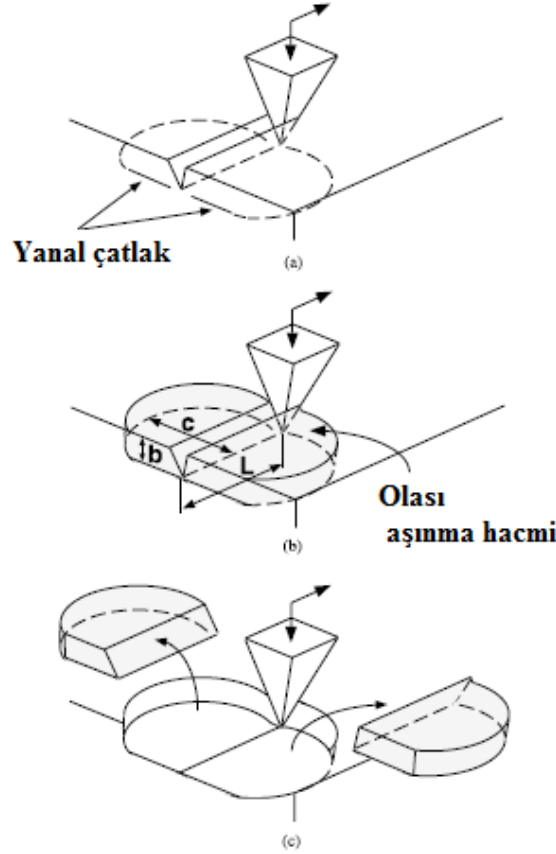
Söz konusu gevrek bir malzeme olduğunda, bir aşınma parçacığına bağlı çatlak başlaması ve yayılması nedeniyle gevrek kırılmalar oluşur. Şekil 9 (b)'de gördüğümüz gibi orta ve yan çatlaklar buna bir örnektir. Bu nedenle gevrek malzemenin aşınma oranı malzemenin kırılma tokluğuna bağlıdır (Garnham, 1995). Şekil 11 zirkonyum oksit 'in abraziv aşınma teması altındaki aşınma oranı kırılma tokluğunun etkisini göstermektedir.



Şekil 11: Abraziv aşınma direnci ve itriyum takviyeli zirkonyum oksit kırılma tokluğu arasındaki ilişki (Bhushan, 2000).



Bu bilgiden kırılma tokluğunun gevrek malzemelerde abraziv aşınma oranı belirlemek için önemli bir parametre olduğu açıktır. Gevrek bir malzeme çizilebilir aşınma hacmi, Şekil 12 gösterilen şematik şekle göre tarif edilmektedir.



Şekil 12: Kırılgan malzemeler için abraziv aşınma modeli (Bhushan, 2000).

Bir aşınma parçacığı yüzeyine ulaşan yanarda çatlak yayılması ile elde edildiği kabul edilmiştir.

### 1.5 Yorulma Aşınması

Tekrarlanan döngüsel temaslarda aşınma parçacıklarının oluşması için adheziv ve abraziv aşınma işleminin gerçekleşmesine gerek yoktur. Tekrarlanan temaslar ile aşınma parçacıklarının üretilmesi için gerekli olan diğer aşınma durumları vardır. Böyle tekrarlı temaslardan sonra oluşan aşınmaya yorulma aşınması denir. Tekrarlanan temas sayısı yüksek olduğunda, aşınma mekanizması yüksek çevrimli yorulma mekanizması olduğu beklenilmektedir. Düşük olduğunda, düşük çevrimli yorulma mekanizması beklenilmektedir (Garnham, 1995).

### 1.5.1 Elastik Temas Altında Yuvarlanma ve Kayar Temaslı Yorulma Aşınması

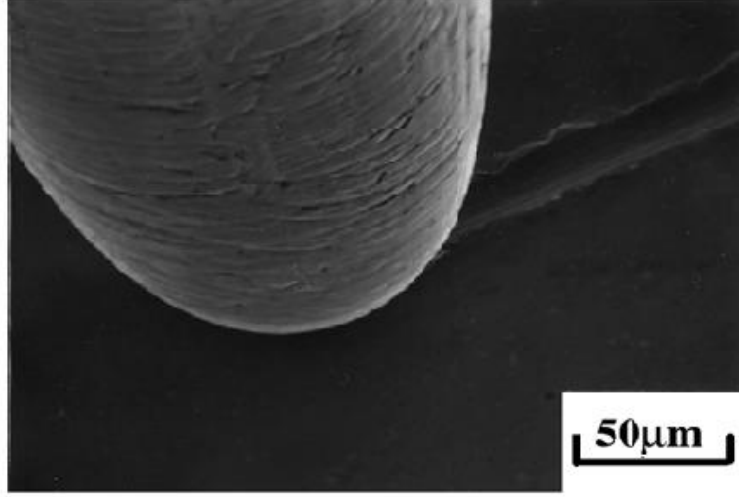
Genellikle yuvarlanma elemanları ile gözlenen elastik temas halinde, ana aşınma mekanizması temas bölgesinde yüksek çevrimli yorulma kırılması olduğu görülmektedir. Aşağıdaki gibi pul pul veya soyulma şeklinde aşınan parçacıkların üretimi için kritik yuvarlanma döngü sayısı  $N_f$  deneysel olarak verilmektedir (Eşitlik 5):

$$N_f \propto \frac{1}{W^n} \quad (5)$$

$W$  sabit yük ve  $n$  yuvarlanma parçasına bağlı bir sabittir. Yuvarlanma yönüne göre yaklaşık  $n$ 'nin değeri 3 tür. Rulman tasarımlarında bu deneysel yasa yaygın olarak kabul edilmiştir. Onun temel dayanağı olan pul pul olma veya soyulma şekilleri kırılma olgularının istatistiğine bakarak teoride değişikliğe gidilebilir. Elastik ve elastik-plastik temas altında tekrarlanan sürtünme bazı stres yoğunlaşma noktaları etrafında bölgesel plastik zorlanma birikimine neden olur ve çatlaklar sürtünme döngüleri belirli bir sayıya ulaşıktan sonra oluşur. Böyle bir durumda, malzemenin mikro yapısındaki homojensizliği nedeniyle oluşan çatlak oluşum ve yayılım mekanizmaları yorulma kırılması meydana getirir (Garnham, 1995).

### 1.5.2 Plastik Temas Altında Kayma Temaslı Yorulma Aşınması

Metalik malzemeler arasındaki sürtünme, temas ara yüzünde yıkıcı aşınma olmaksızın uyumluluk gösterir. Bunu kolaylıkla Şekil 13' de görebiliriz.



Şekil 13: Pirinç plaka üzerinde çelik pim 'in SEM tarafından çekilmiş bir fotoğrafı (Bhushan, 2000).

Bu şekilde bir aşınma parçacığı tek seferde kayma ve sadece yüzeysel bir şekilde rahatça oluk oluşturamaz. Abrasiv kayma tekrarlanarak aynı oluk üzerinde plastik çapak kaldırma işlemi yapar.

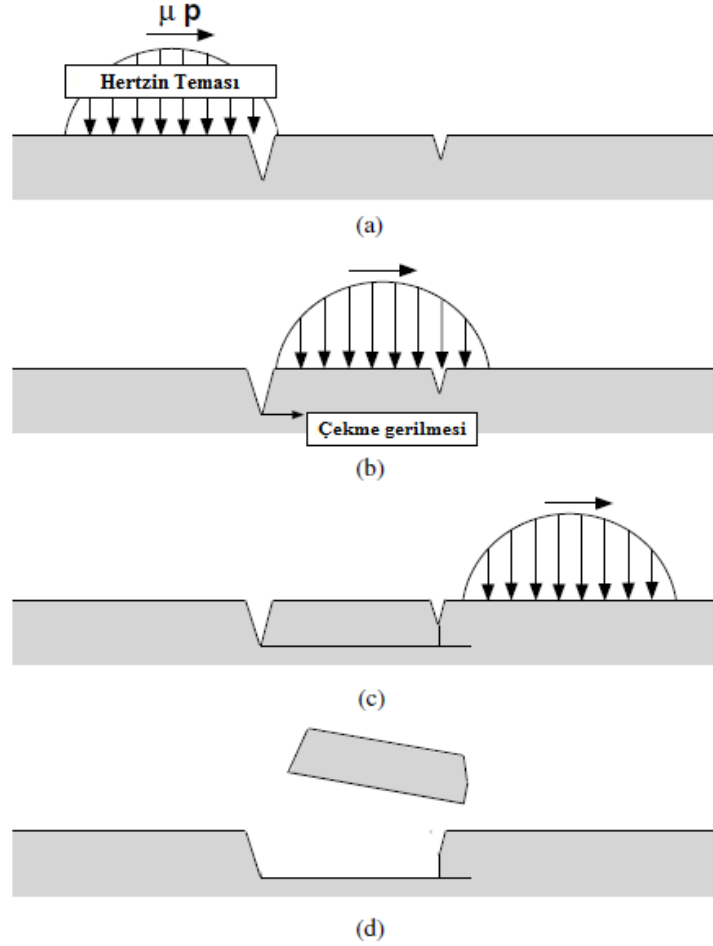
### 1.6 Korozi Aşınma

Korozi aşınma, özellikle korozi sıvılar veya gazlarda, birbiri ile reaksiyona giren ürünlerde, kimyasal ya da elektro-kimyasal etkileşimler ile ağırlıklı olarak malzeme yüzeylerinde gerçekleşir. Bu reaksiyon ürünleri malzeme yüzeyine güçlü bir şekilde yapıştırlarsa ve ana malzeme gibi davranışta bulunurlar ise aşınma mekanizması ana malzeme ile hemen hemen aynı özelliklere sahip demektir. Bununla birlikte çoğu durumda bu reaksiyon ürünleri ana malzemeden çok farklı davranış sergilerler. Bu nedenle aşınma ana malzemeden oldukça farklıdır ve aşındırıcı bir ortamda katı maddelerin etkileşimi ile oluşan bir reaksiyon hakimdir (Davis, 2001). Bu tür tribolojik aşınma türlerine korozi aşınma denir.

Korozi aşınma olarak, tribolojik reaksiyon malzeme yüzeyi üzerinde bir reaksiyon katmanı oluşturur. Aynı zamanda, bu katman bir sürtünme ile kaldırılır. Bu nedenle, göreceli büyüme oranı ve kaldırma oranı ana malzemenin bir sonucu olarak, reaksiyon katmanlarının aşınma oranını belirler. Korozi aşınmada reaksiyon katmanının büyümesi ve katman kaldırma şekilleri çok önemlidir (Davis, 2001).

## 1.7 Elastik Temas Altında Seramiklerin Mekanik Aşınması

Seramik bir yüzey ile temas halinde, aşınma parçacıkları mekanik yorulma mekanizması olmaksızın üretilir. Hatta elastik temas altında bile aşınma gerçekleşmektedir. Bu nedenle elastik temas altında yüzeyde oluşan kılcal çatlaklar tarafından yönetilen bir aşınma türüdür.



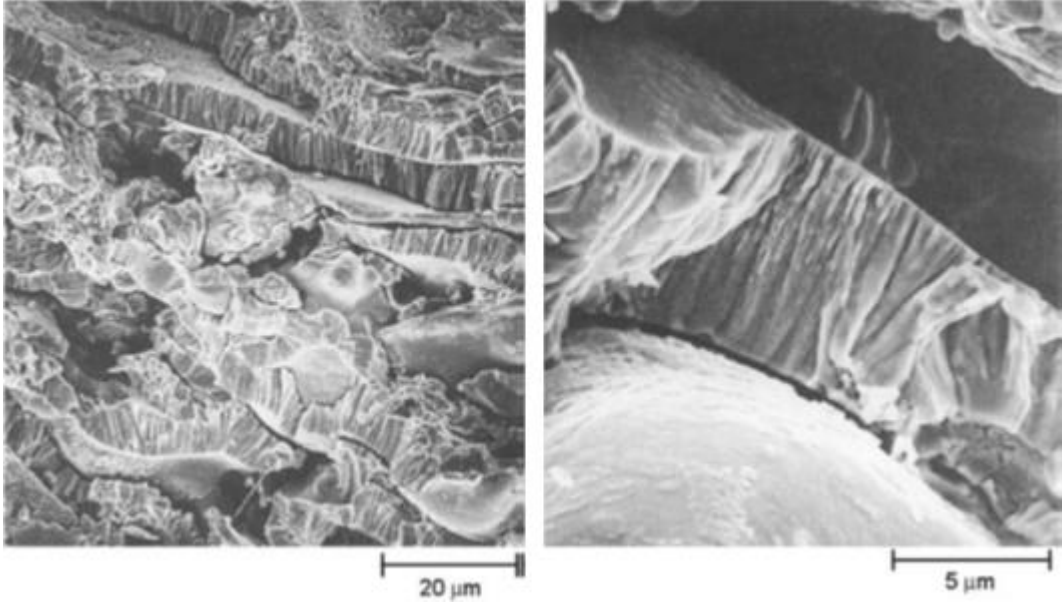
Şekil 14: Gevrek malzemede aşınma parçacıklarının oluşum şekli: (a) elastik temas altında kayma; (b) çatlak bölgesine çekme gerilmesinin uygulanması; (c) çatlak yayılımı; (d) aşınma parçacığının oluşumu (Bhushan, 2000).

Burada gevrek bir aşınmada parçacığının yüzey çatlağının yayılması ile kopması Şekil 14'de şematik olarak gösterilmiştir. Bu tür çatlak yayılmaları elastik temas altında sürtünmenin neden olduğu çekme gerilmesinin artırılması ile hızlandırılabilir (Bhushan, 2000).

## BÖLÜM 2

### TERMAL SPREY KAPLAMALAR

Termal sprej metal veya metal olmayan malzemeleri uygulamak için kullanılan kaplama işlemi grubuna verilen genel bir terimdir. Alev sprej, elektrik ark sprej ve plazma sprej olmak üzere üç ana başlıkta incelenir. Bu enerji kaynakları, erimiş ya da yarı erimiş halde (toz, tel veya çubuk formda) olan kaplama malzemesini ısıtmak için kullanılır. Elde edilen ısıtılmış parçacıklar hızlandırılmış gazlar veya atomizasyon jetleri tarafından hızlandırılarak iş parçası yüzeyine doğru itilir. Şekil 15'te görüldüğü gibi yüzeye itilen parçacıklar ile yüzey üzerinde bir bağ oluşur, daha sonra parçacıkların birikmesi nedeniyle kalınlaşır ve katmanlı bir yapı oluşturur.



Şekil 15: Bir hava plazma sprej tungsten kaplamanın kırık kesitinin taramalı elektro mikroskop görüntülerindeki katmanlı mikro yapı görüntüleri (Davis, 2004).

Termal sprej kaplama işlemlerinin önemli bir avantajı, kaplamaların üretilmesi için kullanılabilen malzemelerin çok çeşitli olmasıdır. Neredeyse ayrışmaya uğramadan eriyen her malzeme kullanılabilir. İkinci bir avantajı ise iş parçasına önemli bir ısı girişi olmaksızın kaplama yapabilmektedir (Davis, 2004).

Örneğin, tungsten metali gibi çok yüksek ergime sıcaklığına sahip olan malzemelerin kaplanmasında, altlık malzemenin özelliklerinin değiştirmeksizin ve aşırı termal

bozulmaya maruz kalmaksızın uygulanabilir. Üçüncü avantaj parça özelliklerini veya boyutlarını değiştirmeden aşınmış ve hasar görmüş kaplamalara çoğu durumda ikinci kat uygulanabilirliği mevcuttur. Bir dezavantajı, sprej işleminin düz bir çizgi doğrultusunda yapılma zorunluluğudur (Davis, 2004).

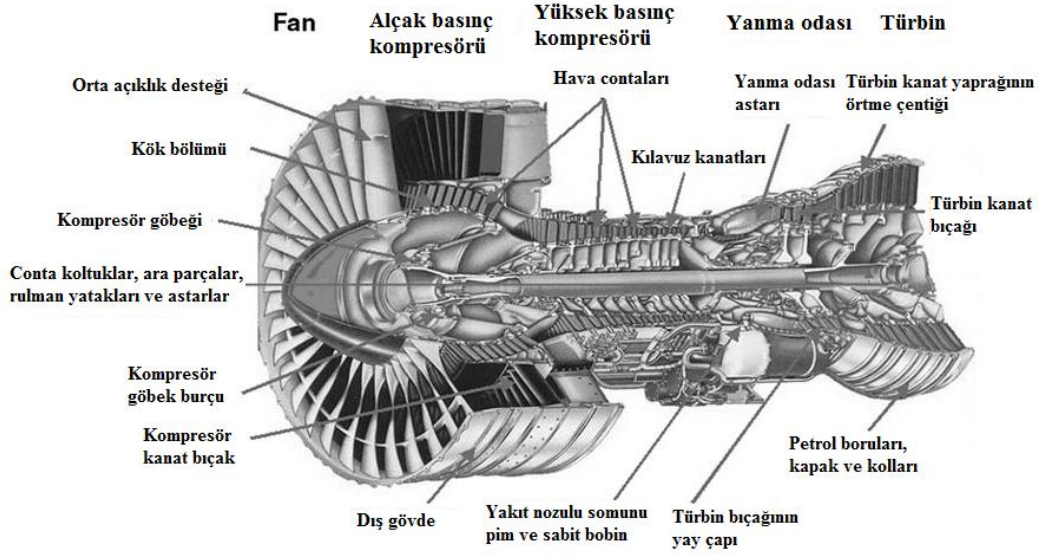
Termal sprej kaplama, kaplamayı gerçekleştirmeye uygun torç veya tabanca ile bir defadan fazla iş parçasının üstünden geçmesi ile gerçekleştirilebilir. Tabanca ve torç'un standartları vardır. Torç ve tabanca derin boşluk ve küçük yerleri kaplamak için uygun değildir. İş parçası yüzeyine parçacıkların bağlanma mekanizması henüz tam anlamıyla anlaşılmamıştır. Ancak iş parçası yüzeyinin pürüzlü hale getirme ve kaplama işlemi esnasında büzülen parçacıkların mekanik ara-sabitleme işlemi için büyük ölçüde yardımcı olduğu düşünülmektedir (Tucker, 1994). Genellikle, çoğu termal sprej kaplamalarda yeterli bağlanma için pürüzlü bir yüzey tabakası gerekmektedir. İş parçasına kaplama parçacıkları olduğu gibi biriken kaplamaların bazılarının yayılımı ya da bölgesel birikimi kaplama ve iş parçalarının özel kombinasyonları ile bir kaç durumda gözlenmiştir. Sonuç olarak mikro yapı ve kaplamaların özellikleri, son derece değişken olabilir.

Termal sprej kaplama uygulamaları çok çeşitlidir, genellikle malzeme yüzeyinin aşınma ve / veya korozyona karşı direncini arttırmak için uygulanmaktadır. Diğer uygulamalar, elektromanyetik koruma, elektrik iletkenliği veya direnç gibi ısı iletkenliği, termal bariyer olarak boyutsal iyileştirme için kullanılmaktadır. Ayrıca radyasyona karşı direncin geliştirilmesi veya geciktirilmesi için de kullanılmaktadır. Bunlar havacılık, tarım aletleri, otomotiv, birincil metaller, madencilik, kağıt, petrol ve gaz üretimi, kimyasallar, plastikler ve biyomedikal dahil neredeyse her sanayide kullanılmaktadır (Tucker, 1994).

## **2.1 Termal Sprej Kaplama ve Ekipmanlarının Tarihsel Gelişimi**

Termal sprej kaplama patent kökeni ilk olarak M.Ü Schoop tarafından 1882-1889 yılları arasında, Zürih, İsviçre'de alınmıştır. Bu patentler torç içine kurşun ve kalay telleri beslenerek modifiyeli oksijen asitli kaynaklı bir işlemi tanımlamaktadır. Daha sonra işlem modifiye edilerek torçlara toz halinde malzemelerin beslenmesi kabul görüldü. Toz parçacıkları ısıtılarak jet yardımıyla iş parçasının yüzeyine doğru hızlandırılır bu işlem sırasında toz parçacıkları darbe, yayılım (eriyik halde) ve katılaşmaya maruz kalırlar. Kaplamalar sonuç itibarıyla aşamalı olarak darbelenen damlacıklardan meydana gelmiştir.

Ayrıca 1908 yılında elektrik ark sprey kaplama daha fazla metal püskürtmeyi sağladığı için, Schoop tarafından patenti alınmıştır. Çelik, paslanmaz çelik ve çinko tarafından tel ark metalizasyonu donanımı ve işlem kontrolünü desteklemesinin yanı sıra ilk olarak korozyonu önlemek için koruyucu kaplama olarak çinko uygulanmıştır. Böylece "Metalizasyon" sanayi sektörü başlamıştır (Davis, 2004).



Şekil 16: Uçağın türbinli motor parçaları için mevcut ve potansiyel termal sprey kaplamalar uygundur (Davis, 2004).

## 2.2 Termal Sprey Kaplamalar ve Çeşitleri

Termal sprey kaplama çeşitleri genellikle üç ana kategoriye ayrılır; alev sprey, elektrik ark sprey ve plazma sprey, her kategori kendi altında bölümlere ayrılır. Soğuk sprey termal sprey kaplama ailesine son olarak katılmıştır (Davis, 2004). Termal sprey kaplama işleminde genellikle bazı ön ısıtma işlemleri kullanılır, ancak büyük ölçüde bu kinetik enerji işlemidir.

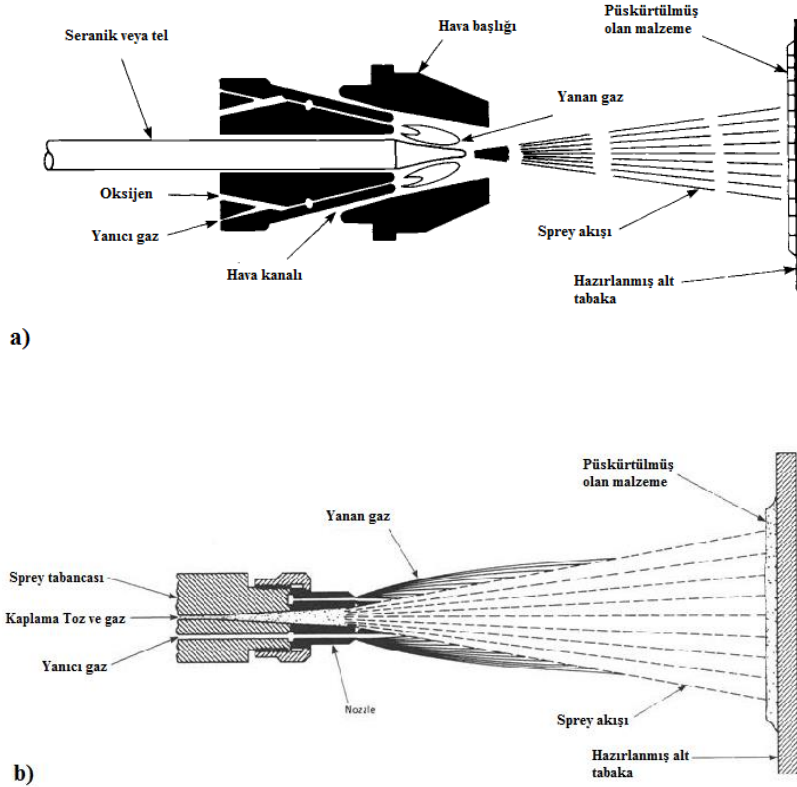
Uygun termal sprey yöntemi tipik olarak şöyle belirlenebilir:

- İstenen kaplama malzemesi
- Kaplama performans gereksinimleri
- Ekonomi
- Parça boyutu ve taşınabilirlik

## 2.2.1 Alev Sprey Kaplama

Alev sprej kaplamada, kaplama malzemesini eritmek için ısı kaynağı olarak yanıcı gazlar kullanılır. Alev sprej tabancaları çubuk, tel veya toz halindeki malzemeleri püskürtmek için tasarlanmıştır. Çoğu alev sprej tabancaları işletme maliyeti ve kaplama özelliklerini dengelemek için gazların çeşitli kombinasyonlarını kullanmak üzere mekanize edilmişlerdir (Tucker, 1994).

Asetilen, propan, metil-asetilen-propadiyen (MAPP) gaz, hidrojen ve oksijen ile birlikte, alev sprej gazları olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Genel olarak, tabancanın nozul ve / veya hava başlıklarının malzemesi ve boyutları, tel boyutları ve gaz çeşidine uyum türde imal edilmiştir. Şekil 17 (a) ve (b) 'de toz ve tel alev sprej tabancaları şematik olarak gösterilmektedir. Tüm pratik amaçlar için, çubuk ve tel tabancaları benzerdir. Alev sıcaklığı ve özellikleri, oksijen-yanıcı gaz oranı ve basınca bağlıdır (Tucker, 1994).



Şekil 17: Genel alev sprej tabancalarının enine kesitleri. (a) Tel veya çubuk için. (b) Toz için (Tucker, 1994).



### **2.2.1.1 Toz ile Alev Sprey Kaplama**

Alev sprej işleminde toz besleme stoğu oksijen-yanıcı gaz karışımı içine çekilerek eritilir ve alev ve hava jetleri tarafından iş parçası yüzeyine püskürtülerek işlem tamamlanır. Parçacık hızı düşük (<100 m/s) ve bağ kuvveti yüksek hızlı kaplama işlemlerinden daha düşüktür. Porozite yüksek olabilir ve birbiri ile olan bağ gücü de genellikle düşüktür. Tüm malzemeler için genellikle püskürtme oranları 0,5-9 kg/sa. aralığındadır. Ancak önemli ölçüde yüksek oranlarda püskürtme düşük erime noktalarına sahip olan malzemelerde kullanılır. İş parçasının yüzeyi alev ile temas halinde olacağından dolayı yüksek çalışma sıcaklıklarında çalışabilir kabiliyete sahip olmalıdır (Davis, 2004).

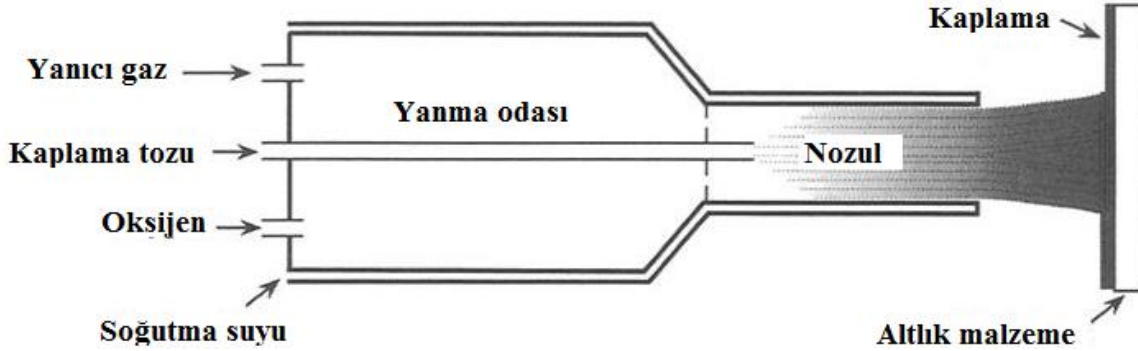
### **2.2.1.2 Tel ile Alev Sprey Kaplama**

Tel ile alev sprej kaplamada, alevin birincil işlevi besleme malzemesini eritmektir. Daha sonra bir hava akımı ile eriyik haldeki malzeme atomize edilir ve iş parçasına doğru itilir. Paslanmaz çelik gibi malzemeler için püskürtme hız oranları 0,5-9 kg /sa. arasındadır. Çinko ve kalay alaşımları gibi düşük erime noktasına sahip malzemeler, daha yüksek oranlarda püskürtülür. İş parçalarının sıcaklıkları genellikle alev ile eritmek için gerekli olan aşırı enerji girdisinden dolayı 95 ile 205 °C arasında değişir. Aslında çoğu termal sprej kaplama yönteminde, enerji girişinin % 10'dan daha azı kaplama malzemesini eritmek için kullanılır (Davis, 2004).

### **2.2.1.3 HVOF (High-Velocity Oxyfuel) Kaplama**

HVOF kaplamada, yakıt gazı (hidrojen, propan ya da propilen) ve oksijen ile 2500-3100°C arasındaki sıcaklıklarda bir yakma jeti oluşturmak için kullanılır. Yanma, yanma odası içerisinde çok yüksek basınçlarda gerçekleşir. Küçük çaplı bir namlu içerisinden (genel olarak 8-9 mm) çıkan gaz çok yüksek parçacık hızı ile süpersonik bir püskürtme üretir. İşlemin, pek çok uygulama için cazip hale getirilmesi son derece yoğun ve güçlü bağ yapısına sahip kaplamalar üretilmesindedir. Her iki durumda da (toz veya tel beslemede) 2,3-14 kg/sa. arasında püskürtme kabiliyetine sahiptir (Davis, 2004).

Uygun donanım, işletme parametreleri ve toz seçimi ile yüksek yoğunluğa ve güçlü bağ yapısına sahip, 69 MPa 'ı aşan kaplamalar elde etmek mümkündür. Kaplama kalınlığı genellikle 0,05-0,50 mm aralığındadır, fakat zaman zaman bazı malzemeler için gerektiğinde büyük ölçüde daha kalın kaplamalar, kullanılabilir. Günümüzde HVOF kaplamalar kullanım nedenleri arasında en güçlüsü aşınma direncinin yüksek olmasıdır. (Tucker, 1994).

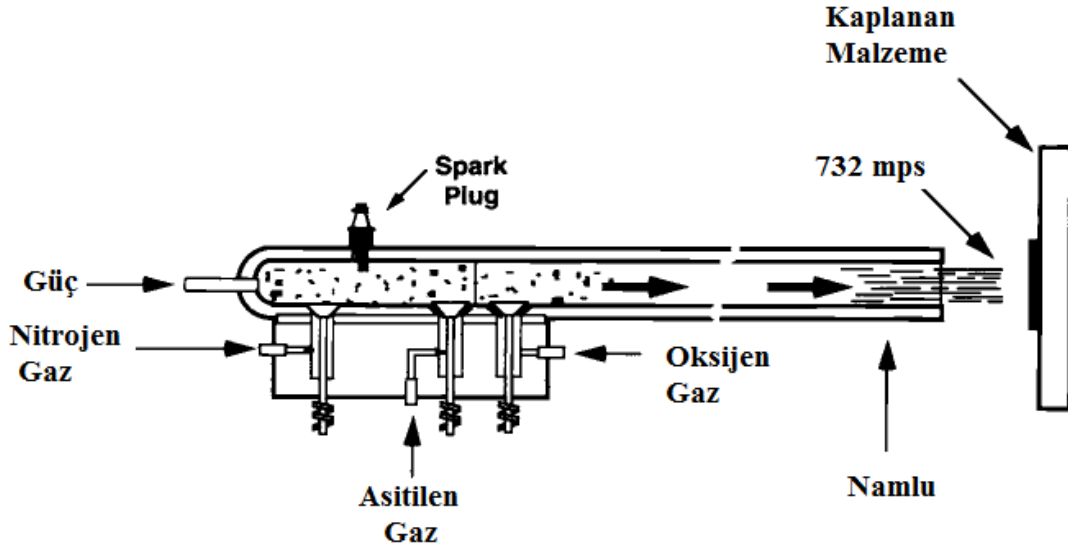


Şekil 18: Yüksek hız oksijen yakıt sistemi (HVOF) yanal kesiti (Tucker, 1994).

### 2.2.2 Patlama Tabancası ile Sprey Kaplama

Patlama tabancası ile spreysel kaplama işlemi, oksijen ve bir yanıcı gaz ile genellikle asetilen ile birlikte 1 m uzunluğunda bir kovan içine besleme tozu ilave edilerek gerçekleşir. Bir kıvılcım karışımı ateşler ve namlu uzunluğu boyunca ilerleyen kontrollü bir patlama gerçekleşir. Yüksek sıcaklık ve basınçla (1 MPa ) namlunun ucundan dışarı iş parçasına doğru patlama sonucu parçacıklar itilir. Çok yüksek bağlanma mukavemetleri ve yoğunlukları aynı zamanda düşük oksit içeriği, bu işlemi kullanışlı hale getirir (Davis, 2004).

Patlama tabancası kaplamaları yüksek bağ mukavemeti (genellikle testlerde bağ mukavemeti, 69 MPa 'ı aşmaktadır) ve termal spreysel kaplamalar arasında düşük gözenekli (genelde metalografik ölçümlerde %2 den az) kaplama özelliğine sahiptir. Genel olarak kullanılan gazlar kontrollü bir biçimde kullanılmalıdır, aksi takdirde metal ve karbürlerin oksidasyonuna neden olurlar. Genellikle en zorlu uygulamalar için tercih edilir, ancak çoğu zaman da en ekonomik kaplama işlemi olduğu için seçilebilir. Nedeni uzun ömürlü olmasıdır (Tucker, 1994).

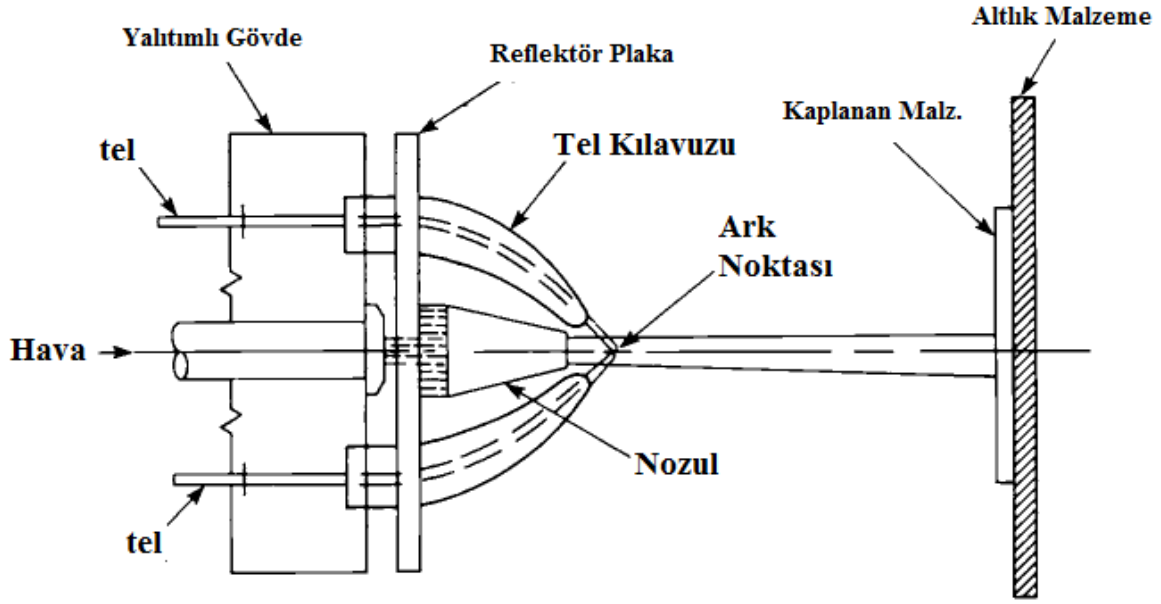


Şekil 19: Patlama tabancası ile kaplama yanıl kesiti (Tucker, 1994).

### 2.2.3 Elektrik Ark Sprey Kaplama

Elektrik ark sprey kaplama işleminde (ayrıca telli ark sprey işlemi olarak da bilinir), yüksek doğru akım (DC) güç kaynağına bağlı iki sarf tel elektrot tabanca içine beslenir ve teller yakıt tankında erir ve aralarında bir ark oluşturur. Erimiş metal atomize hava akımı ile iş parçasına doğru itilir. Verilen enerjinin hepsi metallerin erimesi için kullanılmaktadır. Püskürtme oranları, birincil tahrik, erime noktası ve iletkenliğin bir fonksiyonu olarak değişir. Sıcak gaz iş parçasına doğru yönlendirilmediğinden iş parçasının sıcaklığı düşük olabilir. Ayrıca, püskürtme metotları inert gazlar kullanılarak veya atmosfer kontrollü bir bölgede gerçekleştirilebilir (Davis, 2004).

Elektrik ark (tel ark) sprey kaplamada tel şeklinde metal kullanılır. Bu işlem, gaz alevi ya da elektriksel olarak uyarılmış plazma gibi harici bir ısı kaynağı olmadığı için termal sprey kaplama tekniklerinden farklılık gösterir. Elektrik ark sprey, alev sprey işleminden daha fazla avantaj sunmaktadır. Genel olarak, bazı malzemeler için 69 MPa 'ın üzerinde daha yüksek bağ gücü sergiler. Nikel bazlı alaşımlarda 55 kg/sa. biriktirme oranı tespit edilmiştir. Elektrik ark işlemi çoğu durumda diğer termal sprey kaplama işlemlerinden daha ucuzdur. Elektriksel güç gereksinimleri düşük ve birkaç istisna dışında, argon gazı gibi pahalı bir gaz gerekmemektedir. Elektrik ark sprey işleminin en yaygın tel çapı yaklaşık olarak 1.5 mm'dir ve nispeten sünek ve elektriksel olarak iletken teller kullanılmaktadır (Tucker, 1994).



Şekil 20: Genel elektrik ark sprej cihazının yan kesiti (Tucker, 1994).

#### 2.2.4 Plazma Sprej Kaplama

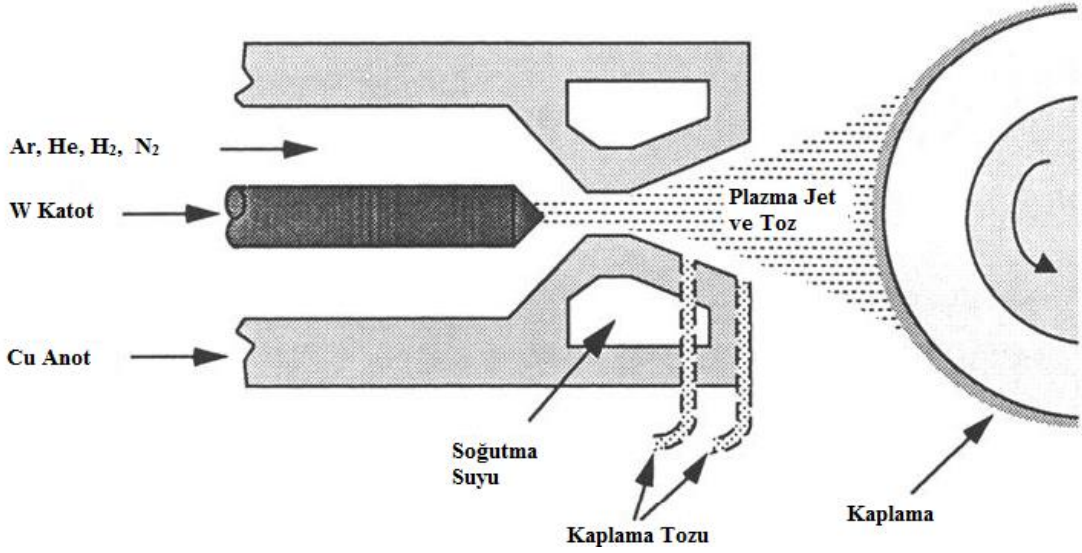
Plazma, genellikle argon, bazen, azot, hidrojen ya da helyum gazlarının dahil olmasıyla birlikte, bir tungsten katot ve su ile soğutulan bir bakır anot arasında oluşturulur. Genel plazma sprej torcu, Şekil 2.1 'de şematik olarak gösterilmiştir. Bir elektrik ark yüksek frekanslı deşarj kullanan iki elektrot arasında başlatılır ve daha sonra DC güç kullanarak devam eder. Ark arasında iyonize olan gaz yüksek basınçlı plazmayı oluşturur. Nozuldan çıkıncaya kadar bu sıcaklık 30,000 °C 'den fazla olabilir, gaz ısısında ortaya çıkan artış, dolayısıyla gaz hacmindeki artış gaz basıncını ve hızını arttırmaktadır (Gaz hızları, süpersonik olabilir ancak parçacık hızları ile karıştırılmamalıdır). Plazma sprej üflemlerinin güç seviyeleri genellikle 20 ila 80 kW aralığında, ancak 200 kW kadar yükselebilir (Tucker, 1994; Choudhury vd., 2015).

Genellikle argon gazı temel alınır çünkü kimyasal olarak inert bir gazdır ve iyonlaşma karakterine sahiptir. Gaz entalpisi, atomlu gazlar; hidrojen ya da azot ilave edilerek yükseltilebilir. Gaz entalpisi hidrojen ya da azot ilave edilmesiyle iki atomlu gazlara yükseltilebilir. Toz genellikle sadece torç dışında ya da nozul (anot) çıkış bölgesinde gaz akımına ilave edilir. Yüksek hızlı plazma gaz akışı yüksek sıcaklık altında ısıtılır ve hızlandırılır. Torç tasarımı ve işlem parametreleri toz parçacıklarının sıcaklığının ve hızlarının belirlenmesinde kritik önem taşır. İşletme parametrelerinden kasıt gaz akışları,

güç seviyeleri, toz besleme oranları ve taşıyıcı gaz akışları aynı zamanda iş parçasının soğukluğu için torç mesafe ve kaplama malzemesinin birikimi için püskürtme açısıdır. Uzaklık büyük önem taşımaktadır, yeterli mesafe tozların ısıtılması ve hızlandırılması için gereklidir, ama çok uzun bir mesafe tozların soğumasına ve hızlarını kaybetmesine neden olur çünkü gaz akımı hızla genişler, soğur ve yavaşlar. Kaplama toz parçacıklarının boyutu ve morfolojisi ısıtma ve hızlanma oranını güçlü bir şekilde etkiler bu da çökelme yapar ve kaplamanın kalitesini etkiler. Genellikle ince boyut dağılımına sahip olan kaplama tozları maliyetleri artırmaktadır fakat bununla beraber gelişmiş bir birikme ve bağ yapısına sahip kaplamaların üretilmesi bazı durumlarda yüksek maliyeti saf dışı bırakabilir. İş parçası üzerinde plazma sprey toz kaplama biriktirme hızları genellikle yaklaşık olarak 300-550 m/s aralığındadır (Tucker, 1994).

Sıcaklıklar genellikle erime noktasının altında ya da biraz üstündedir. Yüksek hızlarda ve sıcaklıklardaki parçacıkların erime noktasının üzerinde olmaları fakat aşırı ısıtmaya maruz kalmamaları nedeniyle en yüksek yoğunluklarda ve bağ güçlerinde verimli kaplamalar gerçekleştirilmesini sağlar. Genellikle plazma sprey kaplama yoğunluğu alev sprey kaplamaların yoğunluğuna göre, çok daha yüksektir, teorik olarak 80-95% aralığındadır. Genellikle kaplama kalınlığı, yaklaşık 0,05-0,50 mm arasında değişir, ancak bazı uygulamalar için çok daha kalın olabilir (boyutsal yenileme veya termal bariyer). Bağ kuvvetleri 34 MPa'dan düşük 69 MPa'dan daha yüksek MPa'lar arasında değişmektedir. (Tucker, 1994).

Kaplama tozunun sıcaklığı ve hızının yanı sıra, üçüncü çok önemli bir faktör iş parçası üzerine biriktirme işlemi esnasında işlem gazları ya da çevredeki ortam gazları (hava) ile toz parçacıklarının reaksiyon oranları da önemlidir. Plazma sprey kaplama, hava ile birlikte toz parçacıklarının oksidasyon oranı torç tasarımı, çalışma parametreleri ve mesafenin bir fonksiyonudur. Metal ve karbür tozları oksidasyon kaplama yoğunluğunu kapsamlı bir şekilde ciddi derecede azalmasını sağlar bağ kuvveti ve eş zamanlı performans değişimlerinde birleşme kuvvetini artırır. Bu oksidasyonu neredeyse elimine edilebilir bir gaz tarafından çıkış noktasını örtüleyerek ya da düşürülmüş basınç ile soy gaz odası içinde uygulanarak engellemeye çalışılmaktadır.



Şekil 21: Genel plazma sprej kaplama cihazının yan kesiti (Tucker, 1994).

#### 2.2.4.1 Atmosferik Plazma Sprej Kaplama

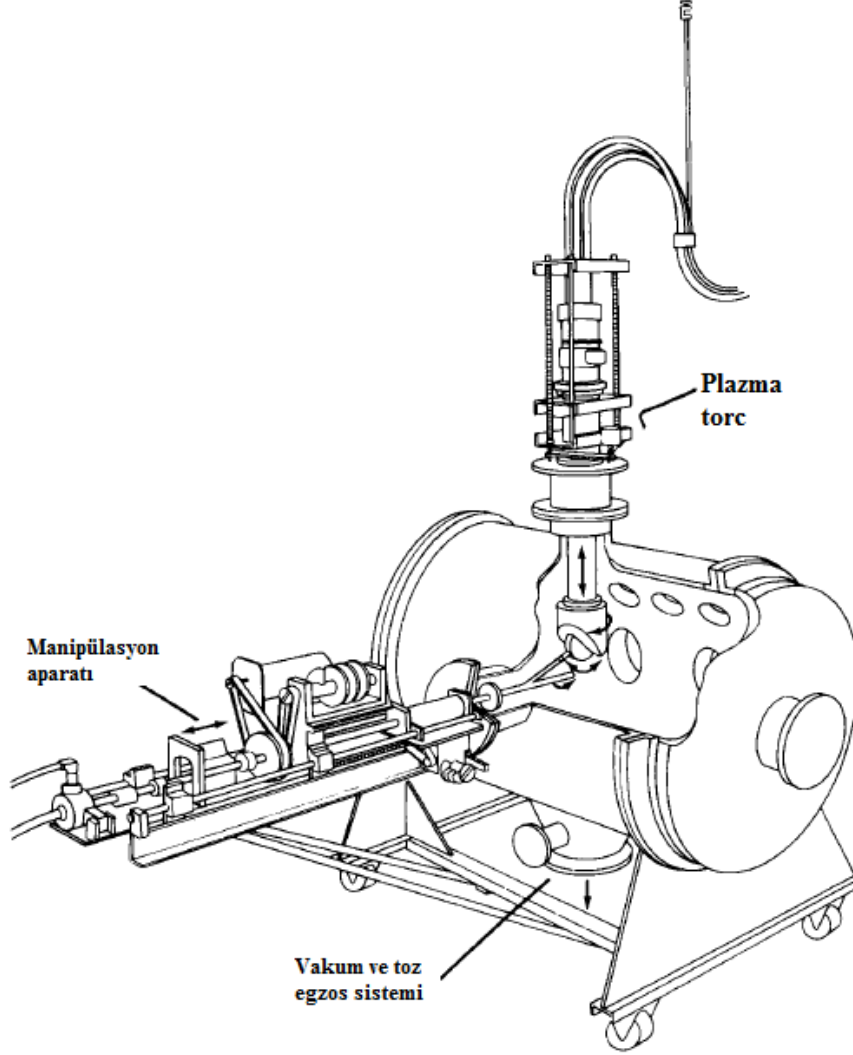
Geleneksel plazma sprej kaplama, yaygın olarak hava veya atmosferik plazma sprej olarak adlandırılır (APS). Dünyada erime noktası bilinen bütün malzemelerin erime sıcaklıklarının üzerinde bir sıcaklığa sahiptir, plazma sprej sıcaklığı 6.000-15.000 °C aralığındadır (Davis, 2004).

Plazma üretmek için, bir inert gaz genellikle argon veya argon-hidrojen karışımı bir gaz ile DC ark oluşturarak süpersonik bir ısıtma gerçekleştirilir. Toz besleme stoğu inert bir taşıyıcı gaz ile ortama ilave edilir ve plazma jeti tarafından iş parçasına doğru püskürtülür. Sprej soğutma ve düzenleme oranlarını iş parçasının sıcaklığını 95-205 °C arasında tutmak için önemlidir. Ticari atmosferik plazma sprej tabancaları 20 ila 200 kW aralığında çalışır. Buna göre, püskürtme oranları büyük ölçüde tabanca tasarımına, plazma gazlarına, toz püskürtme düzenlerine, malzeme özelliklerine, boyutuna, dağıtımına, kaplama tozunun erime noktasına, morfolojisine, gözle görülür yoğunluğuna ve özellikle parçacık özelliklerine bağlıdır (Choudhury vd., 2015).

#### 2.2.4.2 Vakum Altında Plazma Sprej Kaplama

Vakum Plazma Sprej (VPS) düşük basınçlı plazma sprej olarak da bilinir. (LPPS, Sulzer Metco tescilli markasıdır), 0,1-0,5 atm aralığında basınçlarda bir oda içinde plazma sprej

işlemi yapılmaktadır. Düşük basınçlarda plazma sprey kaplamalar yakınsak ve ıraksak nozullar aracılığıyla, çapı ve uzunluğu yükseltilecek daha yüksek gaz hızına çıkartmak mümkündür. Oksijen ve yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmaksızın iş parçaları çok daha düşük oksit içeriğine sahip, daha yoğun, daha güçlü bağ yapısına sahip kaplamalar üretilir (Davis, 2004).



Şekil 22: Tipik inert-atmosferli ve düşük basınçlı plazma odası (Tucker, 1994).

İnert bir ortam içinde yapılan termal sprey (düşük basınç odası), özellikle uçak motoru endüstrisinde yaygın olarak kabul edilen bir uygulama haline gelmiştir. İnert atmosfer, düşük basınçlı plazma sprey sistemlerini uygulamak için etkili bir yol olduğu kanıtlanmıştır. Yüksek reaktif oksidasyon olmaksızın, yüksek sıcaklıkta uçak motoru parçalarını sıcak korozyona dayanıklı Ni-Co-Cr-Al- Y tipte kaplamalar ile kaplanmaktadır (Tucker, 1994).

## **2.2.5 Kinetik Enerji İşlemleri**

Kinetiğin başlangıcından itibaren termal sprej işlemleri önemli bir etken olmuştur. Patlama tabancası, HVOF ve yüksek enerjili plazma sprej kaplamalarının başlamasıyla birlikte, termal sprej kinetik enerji bileşeni daha önemli hale gelmiştir. Kinetik enerji işlemlerinde son gelişme "soğuk sprej" olarak bilinmektedir (Davis, 2004).

### **2.2.5.1 Soğuk Sprej Kaplama**

Soğuk sprej kaplama işlemleri, gaz olarak nitrojen veya helyum ile dinamik-gaz teknikleri kullanılarak sünek metallerin toz şeklinde beslenerek 300 ila 1200 m/s hızlar arasında tatbik edilmesi ile iş parçası üzerine malzeme çöktürme işlemidir. İşlem genellikle "soğuk gaz dinamik sprej" olarak adlandırılır. Çünkü kısmen de olsa nozuldan yayılan genleşmiş gaz ve parçacıklar düşük sıcaklıklardadır (0 ile 800°C). Toz besleme oranları 14 kg/sa. 'e kadar mümkündür (Davis, 2004).



## BÖLÜM 3

### AŞINMAYA KARŞI KORUNMA YÖNTEMLERİ

İmalat sektörünün başladığı günden bu yana aşınma üreticilerin en çok maliyet harcadığı ve zaman ayırdığı problemlerinden biri olmuştur. Aşınmaya karşı dayanıklı kaplamalar ürünlerin ömürlerinin uzatılması için yüksek oranda aşınmayı azaltmak ya da ortadan kaldırmayı hedeflemektedir. Aşınmaya karşı dayanıklı kaplamalar bazı ortamlarda yağlayıcı özellik gösterir. Ayrıca, mukavemet ve tokluk gibi mekanik özellikleri güçlendirmek için aşınmaya karşı dayanıklı kaplamalar kullanılmıştır. Son yıllarda aşınmaya karşı dayanıklı kaplamalar hızla gelişim göstermiştir.

Pek çok çalışma koşullarında, aşınma yüzeylerinin mekanik özelliklerini arttırmak için yağlama uygulanarak aşınma en aza indirilmiştir. Ancak, bazı durumlarda, sadece yağ veya gres yağı ile yağlamak aşınma direncinin gereksinimlerini karşılamak için yeterli değildir. Aşınmaya karşı dayanıklı kaplamalar ürün yüzeylerini korumak için uygulanabilir tek seçenek olduğu düşünülebilir. Ancak çalışma sıcaklıklarının çok yüksek olduğu, çalışma süresinin uzun olduğu durumlarda ya da yağlama için uygun olmayan ortamlarda (vakum, radyoaktif, vb.) aşınmaya karşı dayanıklı kaplamalar daha iyi bir seçenek olmaktadır. Bu gibi durumlarda, aşınmaya karşı dayanıklı kaplama yüzeyi aşınma sorunlarını çözmek için cazip bir araçtır (Zygmunt, 1989).

Aşınma düzensiz veya pürüzlü yüzeyler nedeniyle iki temas yüzeyi arasındaki sürtünme sırasında meydana gelir. İnişli çıkışlı yüzeyler birbirine temas ettiğinde, aşındırıcı kuvvetler meydana gelir. Malzemeyi yağlamak dahi aşınmayı engelleyemiyorsa, geliştirilmiş anti-aşındırıcı özellikleri olan kaplamaların kullanılması gerekmektedir (Zygmunt, 1989).

#### 3.1 Aşınmanın Malzeme Özellikleri ve İşleme Hususları ile İlişkisi

Malzemenin aşınması yüzey pürüzlülüğü, sertlik, tokluk ve geometrik teması olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. İşlem tekniklerini geliştirmek için bu faktörler aşağıda açıklanmaktadır.

### 3.1.1 Pürüzlülüğün Aşınma ile İlişkisi

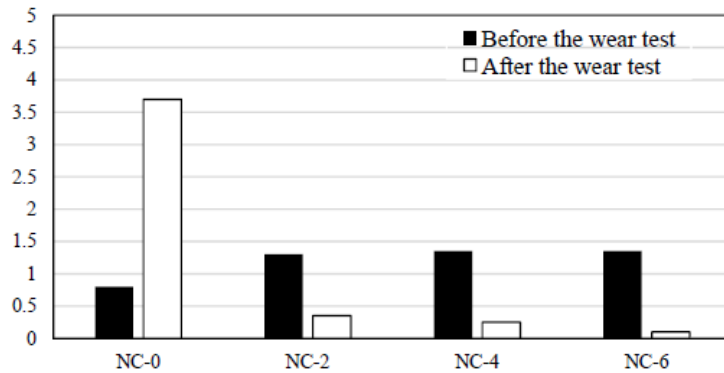
Pürüzlülük yüzey dokusunun bir ölçüsüdür. İdeal formda gerçek yüzey pürüzlülüğü dikey sapma ile ölçülür. Sapmalar büyükse yüzey pürüzlüdür; sapmalar küçük ise yüzey pürüzsüzdür. Pürüzlülük kaplamanın ile etkileşiminde kritik bir rol oynar. Pürüzlü yüzeyler genellikle daha hızlı aşınma ve pürüzsüz yüzeyler daha yüksek sürtünme katsayılarına sahiptir (De Garmo vd, 2011).

Aşağıda  $R_a$  olarak tanımlanan ortalama pürüzlülük formülüdür (Eşitlik 6):

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (6)$$

Burada  $y_i$  yüksekliğindeki ölçüm noktasıdır;  $n$  toplam ölçüm noktasının sayısıdır.

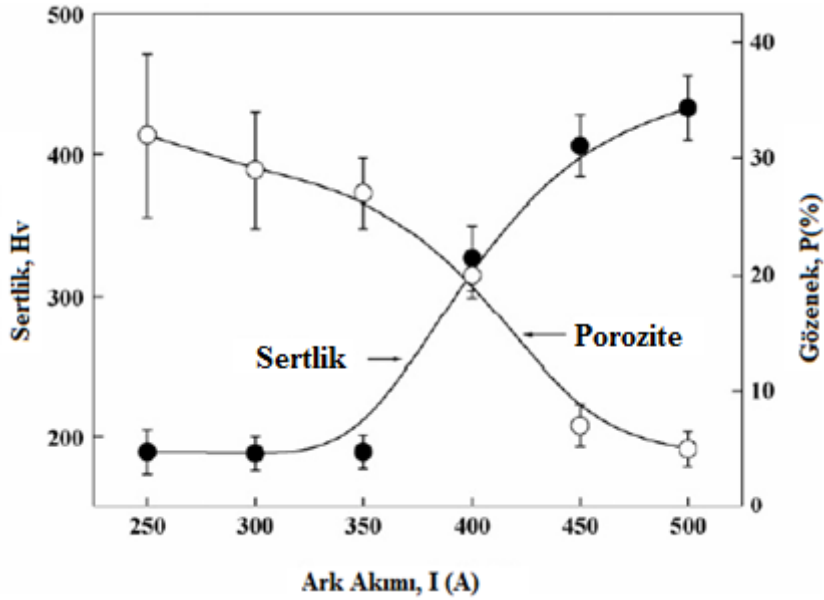
İşlenmemiş DC53 soğuk iş takım çeliği numunelerine 2, 4, 6 saat nitrokarbür işlemine tabi tutulup difüzyonla nitrokarbür emilimi sağlanmıştır. Sırasıyla numuneler NC-0 (nitrokarbür işlemine tabi tutulmayan DC53 takım çeliği), NC-2, NC-4 ve NC-6, olarak işaretlenmiştir. Numunelerin yüzeylerinin pürüzlülüğü blok-on-rolling aşınma testine tabi tutulmadan önce ve sonra ölçülmüştür. Nitrokarbürleme sonrasında yüzey pürüzlülüğü nedeniyle yüzeyde nitrür oluşumu yüksektir. Şekil 23' de görüldüğü gibi. Aşınma testi sonrası NC-0 numunenin yüzey pürüzlülüğü artmıştır güçlü bir aşınmamaya maruz kaldığı için fakat yüzeyi nitrokarbür kaplı numunelerin pürüzlülüğü parlatma etkisinden dolayı azalmıştır (Wen, 2010).



Şekil 23: Aşınma testi öncesi ve sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülüğü (Wen, 2010).

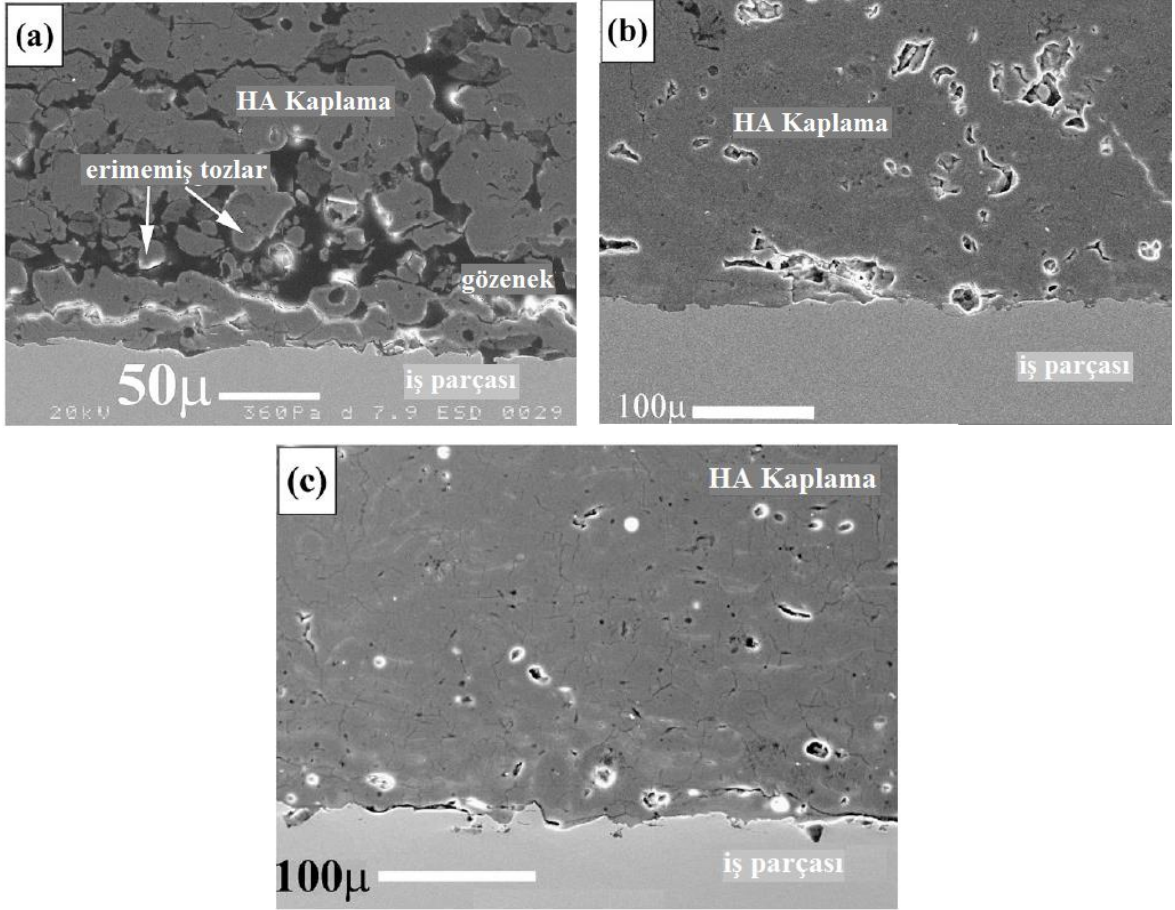
### 3.1.2 Sertlik ve Tokluğun Aşınma ile İlişkisi

Sertlik ölçümü malzemenin plastik deformasyon mukavemetini ölçer. Girinti sertlik testi sertliği belirlemek için kullanılan süreçlerin çoğunluğunu kapsar. Ancak sertlik, temel bir malzeme özelliği olarak kabul edilemez. Bunun yerine, malzemelerin yüzey özellikleri hakkında kısmen de olsa fikir verebilmesi için kullanılan isteğe bağlı ölçüm şeklidir. Sertlik denklemi test edilen sertlik ile malzeme yüzeyi arasındaki temas alanı üzerine uygulanan basınca dayalı tanımlanır. Bunun bir sonucu olarak, sertlik değerleri genel olarak basınç birimi cinsinde yazılır. Kaplamanın sertlik ölçümünde hazırlama yöntemleri ve koşulları değiştirilebilir. Şekil 24' da gösterildiği gibi atmosferik plazma sprey ile kaplanmış hidroksiapatit (HA) kaplamaların sertliği ark akımlarından etkilenmiştir (Morks, 2007).



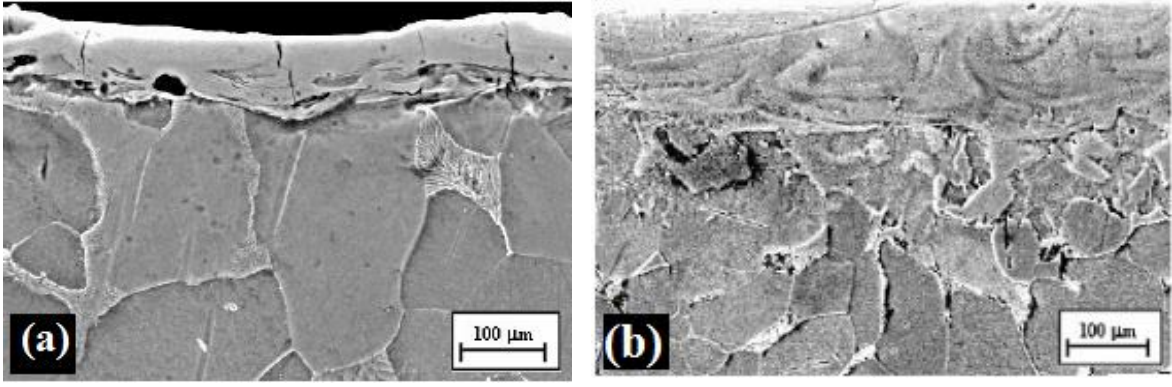
Şekil 24: Farklı ark akımlarında püskürtülmüş HA kaplamaların sertlik ve gözeneklilik değerleri ölçülmüştür (Morks, 2007).

Kaplamaların sertliği artan ark akımı ile artmaktadır çünkü artan ark akımı HA kaplamanın yoğunluğunu arttırmıştır. HA kaplamaların morfolojileri Şekil 25 'de gösterilir. Düşük ark akımında (350 A) kaplamalarda bir süre gözenek ve erimemiş tozlar mevcuttur. Ark akımı 500A'ya arttıkça, püskürtülen kaplamaların yoğunluğu kademe kademe artmıştır. HA kaplamaların yapısındaki erimmiş HA parçacıklarının yoğunluğu, plazma gücünün artırılması sonucu gerçekleşmiştir.



Şekil 25: Farklı ark akımlarında püskürtülmüş HA kaplamalarının SEM görüntüleri: (a) 250 A, (b) 450 A ve (c) 500 A (Morks, 2007).

Elektrik ark ile kaplanmış WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımının YAG lazer ile tavlama işlemi öncesinde ve sonrasında muayene sonuçları Şekil 26' te gösterilmiştir. Lazer tatbikinden sonra dış tabakada mikro çatlak gözlenmemiştir. İş parçası ve kaplama arasında bir sınır çizgisi oluşmamıştır. Lazer tatbik edilen WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımın kaplaması kalındır. Ayrıca, ısıdan etkilenmiş bölge büyük ölçüde olup bölgedeki karbon içeriği yüksektir. Elektro-ark yöntemiyle kaplanan WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaların sertlik 843 HV'dir. Lazer tatbikinden sonra, mikro sertliği 784 HV e düşer, lazer tatbiki kaplama sertliğini azaltır, fakat kaplamanın birbiri arasındaki bağ kuvvetini artırır (Radek ve Bartkowiak, 2010).

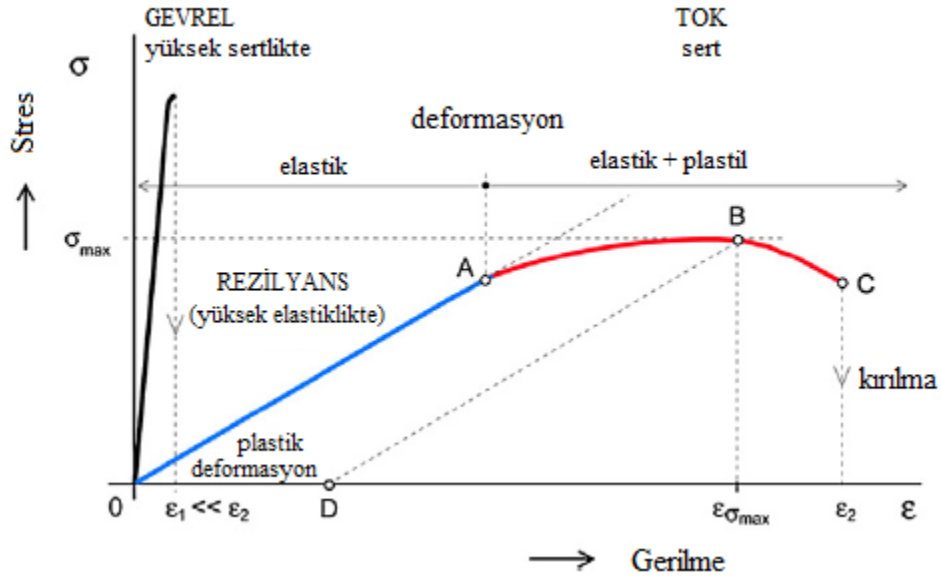


Şekil 26: YAG lazer: öncesi (a) ve tatbik sonrası (b) elektrik ark ile kaplanmış WC-Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alaşımının mikro yapısı (Radek ve Bartkowiak, 2010).

En yaygın olarak kullanılan malzemelerden biri olarak bilinen çelikler, çoğunlukla nitrokarbürleme yöntemi kullanılarak güçlendirilirler. DC53 takım çeliği birkaç saat 570°C de nitrokarbürleme işlemine tabi tutulduğunda, bileşik tabakalar, esas olarak  $\epsilon$ -nitür ( $\text{Fe}_3\text{N}$ ) ve az miktarda da olsa  $\gamma$ -nitür ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) oluşmaktadır. Nitrokarbür tatbiki sadece sertliği artmaz, aynı zamanda numunenin sürtünme katsayısını da azaltır. Nitrokarbür tatbik edilmiş numunenin anti aşındırıcı özelliği difüzyon bölgesinin nüfus ettiği derinliğin artışı ile ilişkili olduğu bulunmuştur. Nitrokarbürleme sonrası şiddetli adheziv aşınma kısmen daha hafif bir aşınma ile yer değiştirir. Nitrokarbürlenmiş DC53 takım çeliğinin mikro sertliği nitrokarbür tatbik edildiği sürenin uzunluğu ile doğru orantılıdır. Tatbik süresi ne kadar artarsa mikro sertlik o kadar artar. 2 saat nitrokarbür tatbik edilen numunenin en düşük mikro sertlik değeri 980 HV<sub>0.05</sub>, 6 saat nitrokarbür tatbik edilen numunenin en yüksek mikro sertlik değeri 1120 HV<sub>0.05</sub> 'tir (Wen, 2010).

Kaplamaların tokluğu Şekil 27' da gösterilmiştir. Malzemenin daha yüksek bir elastik deformasyona sahip olması gerekirse Hooke kanununa göre  $\sigma = E\epsilon$  ,  $\sigma$  stres  $\epsilon$  gerilmedir, bu formülde E Young modülü indirgenmelidir. Gevrek, sert ve esneklik için strese  $\sigma$  karşılık gerilmenin  $\epsilon$  bağılılığı sert kaplamalar için grafiği şematik olarak Şekil 27' da gösterilmektedir. Süper sert malzemeler çok gevrek, kopmaları neredeyse hiçbir plastik deformasyon sergilemeden ve çok düşük gerilmelerde ( $\epsilon = \epsilon_1$ ) gerçekleşir. Sert ve tok malzemeler kırılmadan önce elastik ve plastik deformasyon sergilerler. Yüksek tokluğa sahip malzeme yüksek gerilmelere çatlama dayanıklılık gösterir ( $\epsilon_1 \ll \epsilon \leq \epsilon_{max}$ ). Tok malzemelerin sertliği daha yüksek olduğu durumlar  $\epsilon_{max} \sigma_{max}$  'dan daha yüksek olduğu durumlarda elde edilir (Musil, 2012).

## KAPLAMALAR

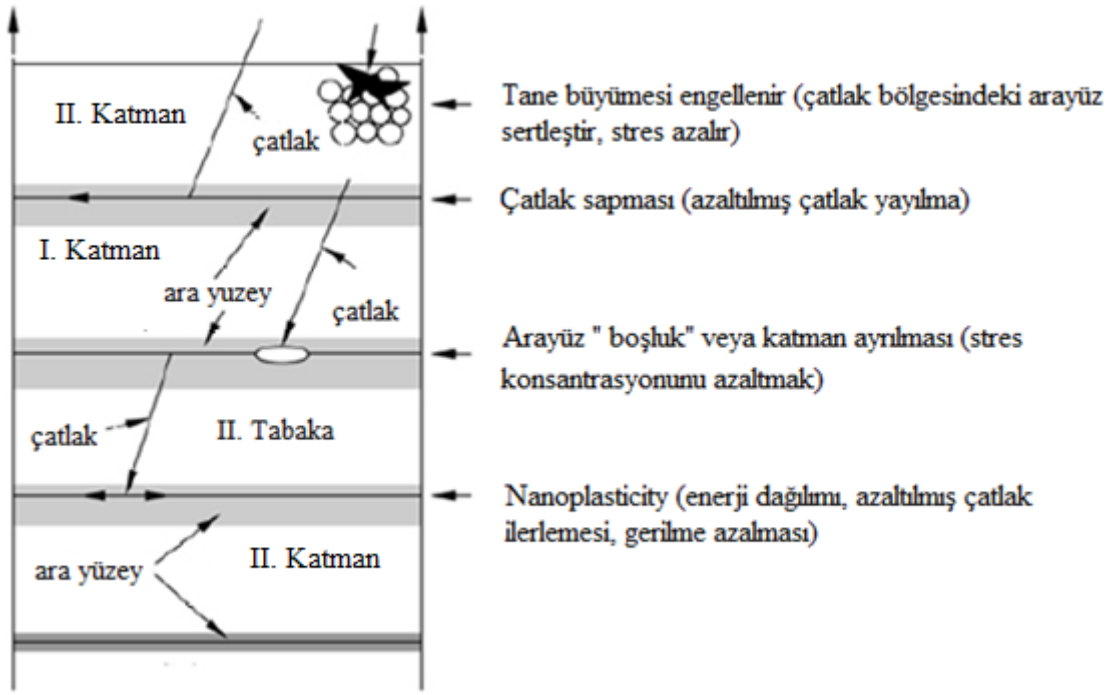


Şekil 27: Yüksek sertlikte (gevrek), Sert (tok) ve sert (rezilyans) kaplamaların gerilme  $\epsilon$  stres  $\sigma$  grafiği şematik olarak gösterilmektedir (Musil, 2012).

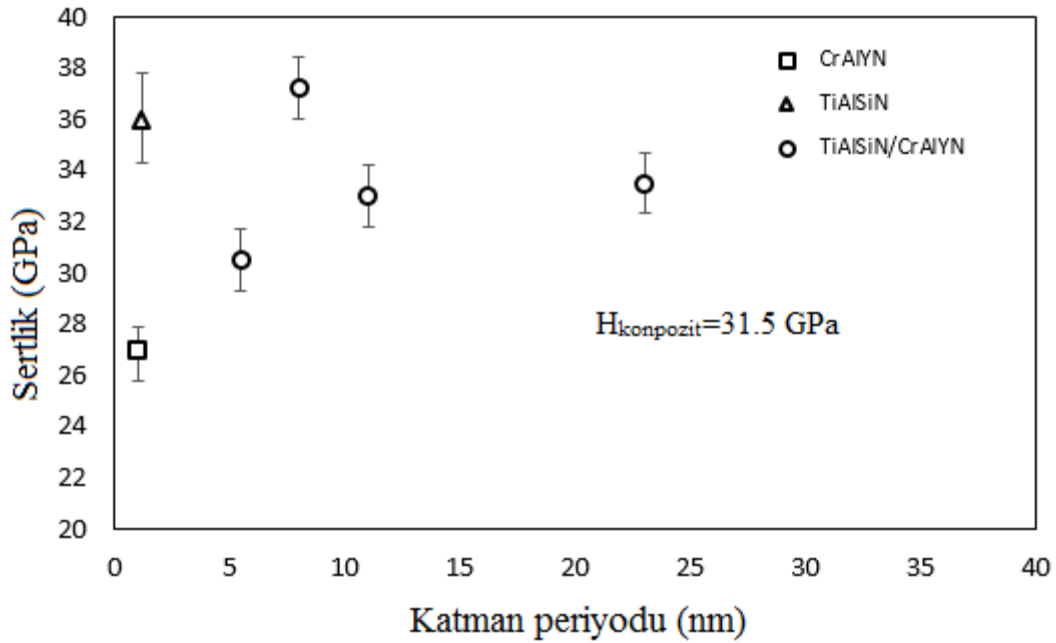
### 3.2 Çok Katmanlı ve Kompozit Kaplamalar

Çok tabaklı kaplamalar genellikle kaplamaların kırılma tokluğunu arttırmak için etkili bir araç olarak kullanılırken sertliğini korumakta, aşınma direncini ve diğer mekanik özelliklerini arttırmaktadır. Çok katmanlı yapılarda sertleştirme mekanizmaları Şekil 28' şü şekilde gösterilmektedir. Çatlak bölgelerindeki küçük boyutlu taneler, çatlak sapmasına ve ara yüze açılarak stres konsantrasyonunun azalmasına ayrıca enerji sarfiyatı ve gerilimi rahatlatması için ara yüzde plastik deformasyon oluşturur (Voevodin vd., 2005).

TiAlSiN / CrAlYN filmleri 8.7 nm kaplama ve en yüksek sertlik 37.1 GPa ile semente karbür silisyum ve SUS304 paslanmaz çelik iş parçaları üzerine kaplanmıştır ve dayanımının tek katmanlı TiAlSiN ve CrAlYN değerinden yüksek olduğu Şekil 29' de göstermektedir (Mori vd., 2012).



Şekil 28: Çok katmanlı sert seramiğin tokluğunu geliştirme mekanizması (Mori vd., 2012).

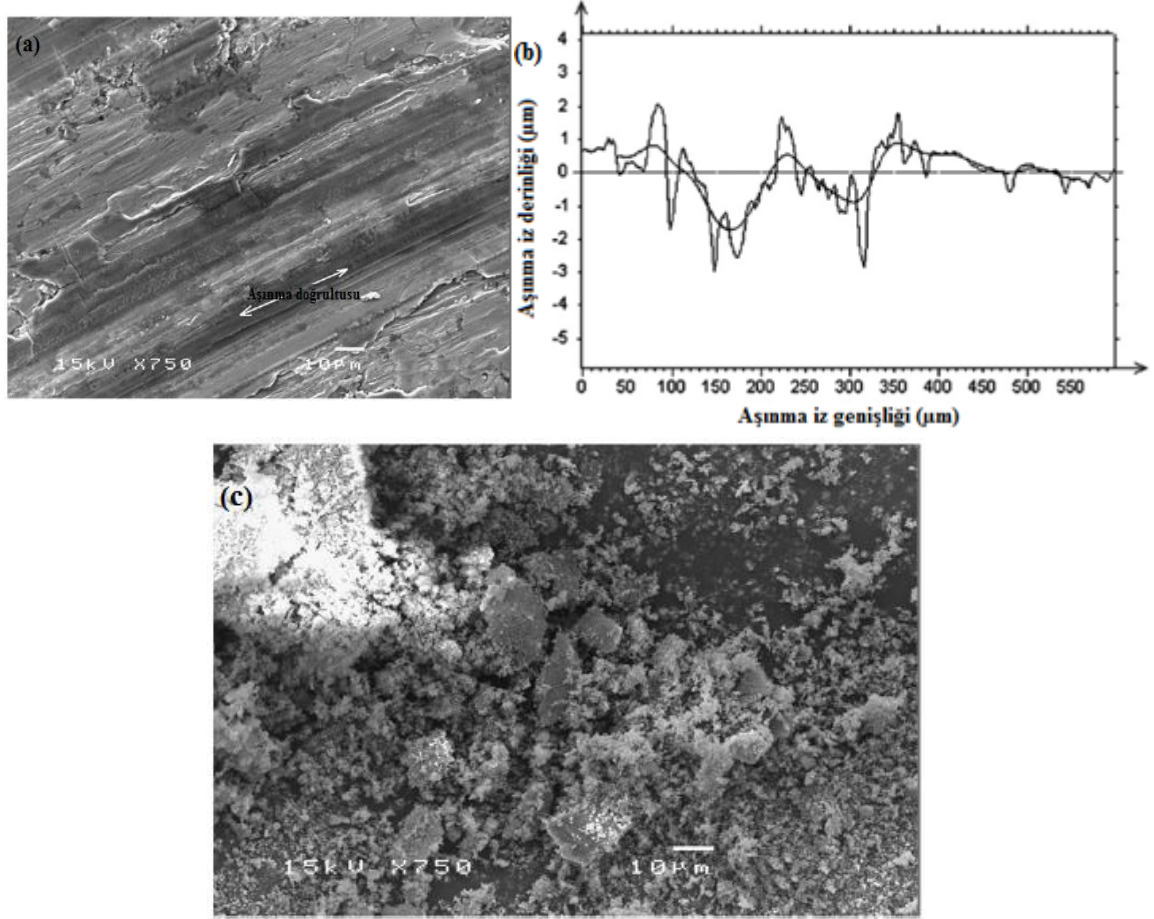


Şekil 29: Çok katmanlı bir fonksiyonu olarak çok katmanlı filmlerin Vickers sertlik grafiği (Mori vd., 2012).

Komite tarafından ağırlıklıca %15 NiAl ( $Al_2O_3$  - %13  $TiO_2$ ) nano kompozit kaplamannın tokluğu ve sertliği NiAl intermetalik kaplamadan daha iyi olduğu belirlenmiştir. Nano kompozit kaplamannın aşınma davranışı olan yüksek kırılma tokluğu gevrek NiAl intermetalik kaplamaya göre daha yüksektir. Ağırlıklıca % 15 NiAl ( $Al_2O_3$  - %13  $TiO_2$ )



nano kompozit kaplama için ortalama belirli aşınma hızı  $0,78 \pm 0,33 \times 10^{-15} \text{ m}^3 / \text{Nm}$ , NiAl intermetalik kaplamanın aşınma hızından daha az olduğu ölçülmüştür. Aşınan parçasının SEM mikro görüntüsü Şekil 30' de gösterilmiştir. NiAl intermetalik ve ağırlıkça %15 NiAl ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  - %13  $\text{TiO}_2$ ) nano kompozit kaplamalar arasında aşınma direncindeki değişiklikler takviye malzemesi olarak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - %13  $\text{TiO}_2$  nano parçacıklar ekleyerek çatlak yayılmasına dayanıklılık kazandırmaktadır (Movahedi, 2013).



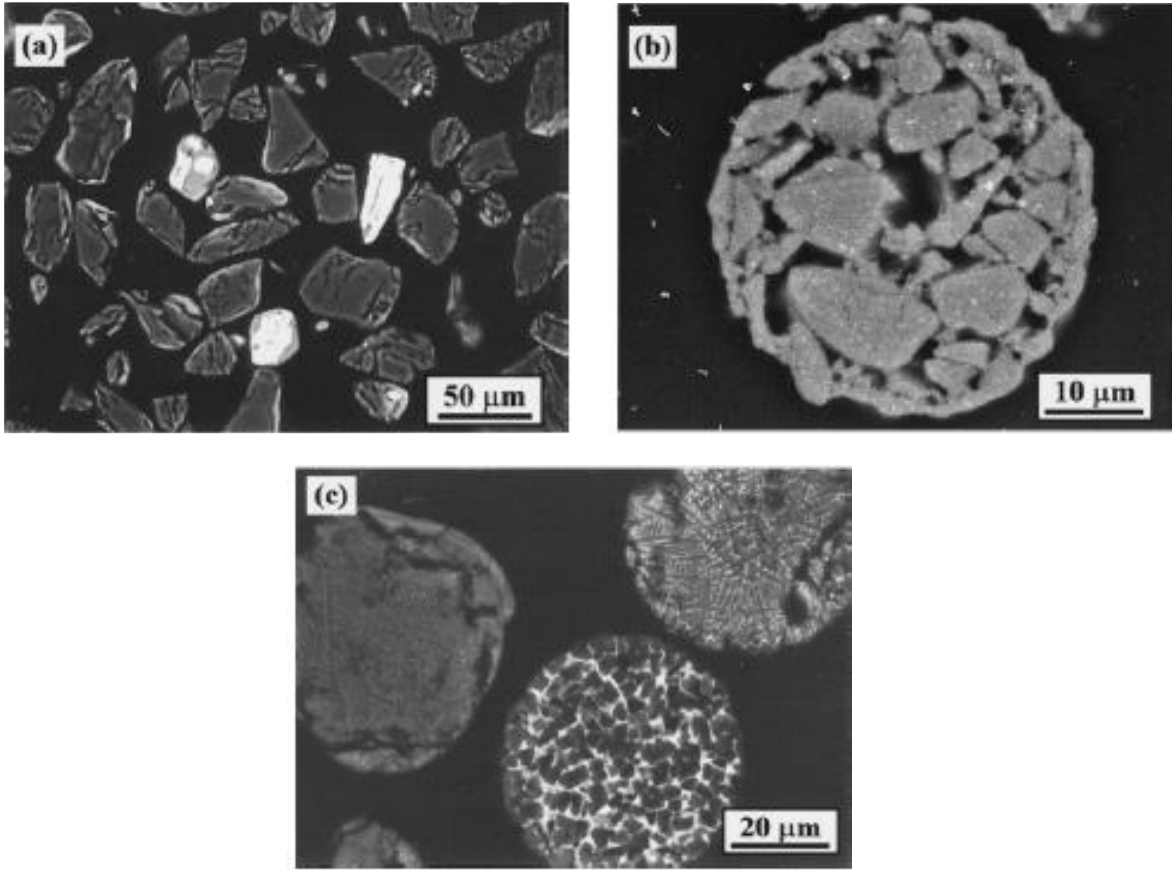
Şekil 30: (a) aşınma izlerinin SEM mikroskop görüntüsü. (b) aşınan numunenin yüzey grafiği. (c) ağırlıkça %15 NiAl ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  - %13  $\text{TiO}_2$ ) nano kompozit HVOF kaplamanın mikroskobik aşınma enkaz görüntüsü (Movahedi, 2013).

### 3.3 Seramik Anti-Aşınan Kaplama

Seramik kaplama metal veya seramik malzemelerin yüzeyleri üzerine uygulanabilir. Seramik, nispeten yüksek sertlik, korozyon direnci ve ısı direncine sahip olduğundan, yaygın bir şekilde koruyucu kaplama olarak da kullanılabilir. Genel seramik kaplamalar  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2 / \text{TiO}_2 / \text{Cr}_2\text{O}_3$ , SiC,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{ZrO}_2$ , CaO, CrN / AlCrN, CrN / BCN,  $\text{SiO}_2$ , WC, ve TiC 'dir. Bu kaplamaların özelliği ve mikro yapısı, kritik spray işlem



parametrelerinden etkilendiği saptanmıştır (CPSP). Sprey koşullarının özel parametreleri kaplama sprej parametresinin optimizasyonuna ve anti-aşındırıcı performansa göre belirlenir. Kaplama tozu CPSP kontrol ve katkı malzemeleri ekleyerek plazma sprej boyutunda onarım işlemi olarak da kullanılabilir. Yeniden yapılandırma plazma sprej kaplama işlemine ek olarak sprej tozlarının ön ısıtma ve bir toplama odası içinde havayla sıkıştırması da dahildir. Şekil 31’da farklı püskürtülen tozlar enine kesit görünüşünü göstermektedir. Nano boyutta yapılandırılmış  $Al_2O_3$  ve ağırlığınca % 13  $TiO_2$  kaplama tozları karıştırılır ve sprej için uygun boyuta yeniden yapılandırılır.  $\alpha-Al_2O_3$  parçaları siyah olarak gösterilmektedir.  $TiO_2$  taneleri katkı malzemeleri içinde çözülmüş tozlardır ve parlak bölgeler olarak gösterilmiştir (Czerwinski, 2012).



Şekil 31: Backscattered elektro mikroskop ile (a)  $Al_2O_3$  ağırlığınca %13  $TiO_2$  tozlar ve karışımı (b) katkı maddeleri olmadan  $Al_2O_3$  ağırlığınca %13  $TiO_2$  ve (c) katkı maddeleri ile  $Al_2O_3$  ağırlığınca %13  $TiO_2$  (Czerwinski, 2012).

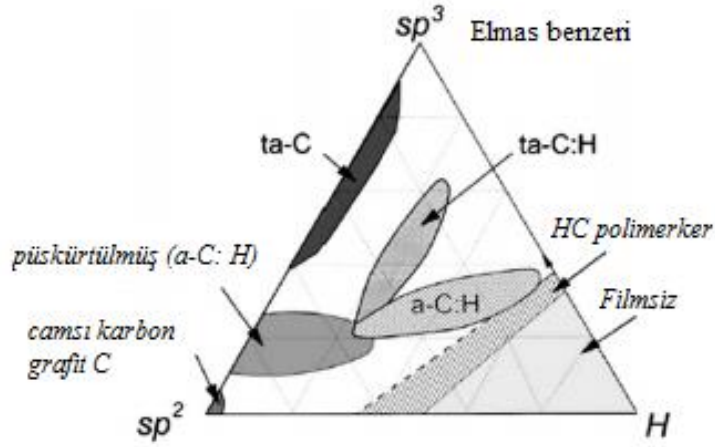
### 3.4 Polimer Kaplamalar

Polimer metal matris üzerine akışkan bir şekilde sürtünme önleyici kaplama olarak kaplanır. Örneğin PA (Poliamid) ve PE (polietilen) gibi polimerler, doğrudan akışkan bir şekilde metal malzemelerin yüzeyinde biriktirilir, burada bir akışkan (sıvı veya gaz) taneli malzeme aracılığıyla geçirilir ve tanecikli malzeme dinamik sıvı benzeri durumdan statik katı benzeri duruma dönüştürülür. Yani polimer malzeme metal matris yüzeyinde katılaştır. Polimer kaplamanın ortalama kalınlığı yaklaşık 0,3 mm'dir. Polimer kaplama, sürtünme katsayısını azaltabilir. Kalın polimerik kaplama yerine ince polimerik kaplama daha kullanışlıdır, kalın polimer kaplama aşınma bölgesini daha hızlı ısı vererek aşınmayı hızlandırabilir. PA kaplamaların çelik karşıtı sürtünmelerde sürtünme katsayısı ince PA kaplamalarda, kalın PA kaplamalara göre daha düşüktür (0,15'in altında) (Zygmunt, 1989).

Polimer kaplamalarda, alaşımlar ve seramikler katkı maddesi olarak kullanılabilir. Polimer kaplamalarda katkı maddesi alaşım veya seramik kullanıldığı zaman, polimerin, uzun molekül zincirleri alaşım tanelerini ya da seramik tanelerini bağlar. Bileşik yoğun bir kaplama tabakası oluşturarak, taneler kompozit bir bağlantı yapacak ve bu durum aşınma direncini artıracaktır (Zygmunt, 1989).

### 3.5 Elmas Benzeri Karbon (DLC) Kaplama

Elmas benzeri karbon (DLC) elmasın bazı tipik özellikleri gösteren, amorf yapıda karbondan malzeme üretilmesidir. Şekil 32' de gösterildiği gibi  $sp^2$  ve  $sp^3$  bağları ve hidrojen içeriği oranına bağlı olarak, DLC birkaç gruba ayrılır. Ağırlıklı olarak  $sp^2$  bağlarla amorf karbon (a-C) kaplamalar diyagram sol alt köşesinde bulunmaktadır. Hidrojene amorf karbon (a-C: H) bazı hidrojen içeriği ve kısmen düşük  $sp^3$  bağları vardır. Hidrokarbon polimerler ise sağ köşesinde yer almaktadır. Püskürtülmüş amorf hidro karbon (a-C: H)  $sp^2$  bağların ve  $sp^3$  bağlarına da sahiptir ve bu şemanın orta kısmında yer alır. Plazma destekli buhar biriktirme ile hidrojenle daha fazla  $sp^3$  bağı oluşturarak dört yüzlü (tetrahedral) amorf karbon (ta-C: H) kaplamalar meydana getirir. Tetrahedral amorf karbon (ta-C) çoğunlukla  $sp^3$  bağları ve çok az da olsa hidrojen içerir (Sedlaček vd., 2008).



Şekil 32:  $sp^2$ ,  $sp^3$  ve hidrojenin çeşitli formlarını içeren DLC üçlü faz diyagramı (Sedlaček vd., 2008).

DLC kaplamalar, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek mikro sertlik özelliklerini bir arada sergiler. Birçok tribolojik ve aşınma uygulamalarına karşı son derece dayanıklıdır. Çelik rulman yüzeylerinde DLC kaplamalar yağlayıcı içindeki olumsuz kirleticilerin etkisini azaltır. Günümüze kadar yapılan çalışmalar DLC kaplamaların çok düşük sürtünme ve yüksek aşınma direnci sahip olmalarından dolayı iş parçalarının tribolojik özelliklerini ve dayanıklılığını arttırdığı gözlenmektedir. Ancak, koruyucu kaplamalar sert kirleticiler tarafından kırılır ise çalışan bileşenlere daha fazla zarar verebilir (He vd., 2010).

## BÖLÜM 4

### FERROKROM

Ferrokrom paslanmaz çelik üretimi için ana hammadde olarak kullanılmaktadır. Ark fırınlarda kok kömürü, kömür, katran, vb. gibi uygun karbonlu tetikleyiciler kullanarak kromit cevherlerinin erimesi sağlanır. Eritme süreci sırasında cüruf oluşur ve metalik ferrokrom ağır faz olmasından dolayı fırının alt kısmında birikir fırının alt tarafından akıtılarak alınır ve cüruf ile ilişkisi kesilir. Güney Afrika'da ferrokrom genel olarak toz altı veya açık ark fırınlarında kromit cevherinden üretilmektedir. Kromit 'in kristal yapısı spinel mineral olup, aşağıdaki genel formüle sahip olan, spinel kristal ailesinin bir parçasını oluşturur:  $(Fe^{2+}, Mg^{2+}) O \cdot (Al^{3+}, Cr^{3+}, Fe^{3+})_2O_3$  (Nkohla, 2006).

Krom cevheri tetikleme maliyet analizi günümüzün rekabetçi ortamında ferrokrom üreticilerinin karşılaştığı önemli sorunlardan biridir. Bu konuda mevcut cevherin kalitesi ve çeşitli oranlarda olmasına bağlıdır. İkinci olarak elektrik tüketimi ve fırınların optimum verimliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olmasıdır.

#### 4.1 Krom Cevherinin Özellikleri

Mevcut cevher küçük tane boyutlarında istiflenmiş kromitlerden oluşmaktadır. Küçük tane boyutuna sahip kromitlerin her biri kendi içinde oldukça fazla taneler arası çatlaklar barındırmaktadır. Krom cevheri bağlarında ağırlıklı olarak kıvrılmış az miktarda magnezyum ( $MgCO_3$ ) içerir. Krom cevherinin erime sıcaklığı  $1650 - 1660^\circ C$ 'dir. Ana cevherde yüksek seviyede  $MgO/Al_2O_3$  bulunur. Cevher içerisindeki  $SiO_2$  ve  $MgO$  içerikleri  $Cr_2O_3$  ile aynı eğilimi göstermektedir. Ayrıca  $MgO$ ,  $SiO_2$  ile kıvrım içerisinde doğrudan bağlantılıdır.  $MgO$  az miktarda bağ yapısında ve cevher çatlaklarında magnezyumkarboksit şeklinde ( $MgCO_3$ ) 'de bulunmaktadır. Düşük bir  $MgO / Al_2O_3$  oranı daha yoğun bir krom cevheri anlamına gelir. Cevher içerisinde  $Cr_2O_3$  ile  $MgO / Al_2O_3$  eğilim tam tersidir. Cevher içerisinde  $Al_2O_3$  içeriği  $Cr_2O_3$  ile pozitif bir ilişki içinde olduğundan,  $Cr_2O_3$  içeriğinde azalma  $MgO / Al_2O_3$  oranında artmaya neden olmaktadır. Cevheri içerisinde  $Cr_2O_3$  ile Fe pozitif bir ilişki içindedirler. Genel olarak,  $Cr_2O_3$  arttıkça Cr / Fe oranı da artar. Bu artış nispeten ılımlı gerçekleşmektedir (Farjadi ve Azari, 2004).

## 4.2 Krom Cevherinin Metalurjik Davranışı

### 4.2.1 İndirgenabilirliği

Krom cevherinin indirgenmesi cevherin mineralojisi tarafından belirlenir. İndirgenmeye etki eden faktörler krom cevheri içerisinde bulunan MgO yapısal formu, MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı, kromit tane boyutu, cevher içerisindeki tane dağılım oranı ve cevher eritme sıcaklığıdır. Ana bağlayıcı olarak kıvrımlı bağ yapısına sahip olivin (magnezyum ve demir silikati) çok yoğun ve sert değildir, buda gaz ve kromit taneleri arasında indirgenmeyi gerçekleştirmek için iyi bir temas sağlayacak yeterli gözeneğe sahip bir yapıyı oluşturur. Ayrıca, fırının indirgenme bölgesine ulaşmaya kadar aşınma ve ezilmeye karşı dayanıklılık gösterecek yeterli mekanik mukavemete sahiptir. Kromit taneler arası yoğun mikro çatlaklar, reaksiyonlar için iyi bir yüzey alanı oluşturmaktadır. Cevherin yüksek ergime sıcaklığı katı haldeki cevherin tetiklenmesi için erime bölgesine ulaşmadan önce daha fazla zaman sağlar. Bu da cüruf içerisinde daha az Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> barındıracağını ifade eder (Farjadi ve Azari, 2004).

### 4.2.2 Krom Kurtarma

Krom kurtarma esas cevherin indirgenebilirliğine bağlıdır. Kromun geri kazanımı girdi krom cevherinin dışında cüruf ve bazı fırın tozlarından elde edilebilmektedir. Sert ve yoğun cevher yapısı düşük toz oranına sahip yapılara göre referans alınabilir fakat cevherin indirgenebilirliği cevherin boyutuna bağlı olarak değişebilir ve buda cüruf içerisindeki Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğini arttırabilir. Katı haldeki krom cevherlerinin fırınlarda indirgenebilirliği iyi olduğu için en kullanışlılarıdır. İyi krom cevheri erirmeden önce katı halde iken kolaylıkla indirgenebilir. Sonuç olarak cüruf içerisinde %1,5- 4 arasında Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermektedir. Ayrıca önemli olan kalıba döküm sırasında metal ve cürufun tamamen birbirinden ayrılması için cürufun viskozitesi düşük olmalıdır bu sayede döküm esnasında kayıp an aza indirgenir (Farjadi ve Azari, 2004).

### 4.2.3 Enerji Tüketimi

Krom cevherini İyi bir indirgenme ve özellikle katı halde indirgenmesini sağlamak için normalden daha fazla CO gazı kullanılması yardımcı olabilir. Enerji tüketim ton başına erimiş Cr cevherinin %1 'i 56 kWh 'a tekabül etmektedir (Farjadi ve Azari, 2004).

### 4.3 Son Yıllarda Ferrokrom Teknolojisindeki Yenilikler

Günümüz demir alaşımlarının teknolojik zorlukları işletme ve yatırım maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Atıkların aza indirilmesi ve değerlendirilmesi, dünya piyasa fiyatlarındaki düşme eğilimi, çalışma ortamının iyileştirilmesi gibi problemler başlıcalarıdır. Tüm dökme metal fiyatlarında olduğu gibi ferro alaşım fiyatlarında da uzun vadede düşüş gözlenmektedir. Bu krom fiyatlarında da açıkça düşüş olduğunu göstermektedir. Ferrokrom sektöründe, işletme maliyetleri dört farklı maliyet faktörüne ayrılabilir. Avrupa şartlarında bunların maliyet faktörleri ve etkileri şunlardır:

Tablo 1: Avrupa şartlarında ferrokrom sektöründe işletme maliyet analizi sonucu maliyet faktörlerinin maliyete etki % oranları (Daavittila vd., 2004).

<b><u>Maliyet faktörleri</u></b>	<b><u>% Etki oran</u></b>
Kromit	% 30
Elektrik	% 30
İndirgen madde	% 20
Diğer	% 20

Bu rakamlardan işletme maliyetlerinin yaklaşık yarısını elektrik ve indirgeyici maddenin oluşturduğunu kolayca görebiliriz. Her şeye rağmen teorik olarak işletme içinde gerekli olan krom indirgeyicileri ve elektrik maliyetlerinde düşüş gözlenmektedir. Bir üretim işleminde, her zaman kullanılan donanımlardan bağımsız olarak, ısı ve malzeme kayıpları mevcuttur. Bununla birlikte, bu kayıplar azaltmak için gelişmiş ısı yalıtımına sahip teknolojik fırın ve işlemler kullanılarak azaltmak mümkündür. Fırın boyutunu artırarak göreceli olarak enerji kaybını azaltır. İşlemede üretim esnasında çıkan CO gazının ileri gaz işleme sistemleri ile zenginleştirilip tekrar kullanımı sağlanabilir. Yine de, tüm bunlara rağmen, maliyeti etkileyen en önemli faktör fırındır (Daavittila vd., 2004).

Ferro alaşım ürünlerinin fiyatlarındaki düşme eğilimi üreticilerin dikkatini daha çok üretim maliyetlerine yöneltmiştir. Bunların hepsi ile birlikte işletme maliyetleri birim işlemlere, kullanılabilirlik ve birim boyutuna etkisi dikkate alınmıştır. Ayrıca, çevre koruma ve çalışma koşulları hesaba katılmalıdır. Ferro alaşım üretim işlemlerinin çoğu geleneksel ve geleneksel işlemlerin yerini alacak yeni teknolojiler pazarlarda yerini almaya başlamaktadır. Ferro nikel, geleneksel döner fırın / elektrik fırını, ferro silisyum ve ferro mangan daldırma ark ocakları tarafından üretilmektedir. Elbette, donanım teknolojileri ve proses otomasyonu oldukça gelişmiştir ve dolayısıyla üretim tesislerindeki işlemi hızlandırmış ve atık maliyetini düşürmüştür. Yeni işlem teknolojisinin büyük bir bölümü ferrokrom üretiminde başlatılmıştır. Özellikle 1980'li yıllarda, yoğun ilgi görmüş araştırma ve plazma eritme gibi yeni yöntemlerin uygulanması ile ön indirgeme ve doğrudan indirgenme çalışmaları yapılmıştır. Yine de, bazı DC fırınları hariç tüm ferrokrom üretimleri, daldırma ark ocaklarında gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte ferrokrom eritme süreçlerinde topaklaştırma, ön ısıtma ve ön-indirgenme gibi bu tür ön-muamele yöntemleri geliştirilmiş ve ticari olarak kullanılmaktadır (Daavittila vd., 2004).

#### **4.4 Ferrokrom Üretiminin Çevreye Etkileri**

Afrika kıtasının güney kıyısında büyük maden kaynaklarının işletilmesi ile çevre bilincinin ve yönetimi açısından madencilere ve dökümcülere büyük bir sorumluluk yüklenmiştir. Özellikle, Güney Afrika ferrokrom sanayi, dünyanın en büyüklerinden biridir, ferrokrom cevherinin ergitilmesinin çevresel etkilerini ele alan büyük bir sorumluluk ile karşı karşıyadır. Ferrokrom üretimi esnasında dikkat edilmez ise altı heksavalent kromun (+6 değerlikli krom Cr-VI) özellikle atmosfer, su ve toprağa yayılma etkisi açısından büyük risk taşır. Çevresel risk dışında, Cr-VI aynı zamanda insan ve hayvan yaşamı için bir risk oluşturmaktadır. Ancak, ferrokrom üretimi düzgün yönetilirse, insan veya çevre üzerinde olumsuz etkileri yoktur. İstisnasız ferrokrom üretiminin her evresinde risk ve tehlikelere karşı önlem alınması gerekir (Gericke, 1995).

Günümüzde gürültü kirliliğiyle mücadele, duman, toz ortam havası ve atmosfer kirliliğinin önlenmesi için yeterli ve iyi kurulmuş teknolojiler mevcut olduğundan, özellikle ferrokromun üretiminden kaynaklanan Cr-VI etkileri engellemek yüksek derecede mümkündür. Cr-VI kanserojen bir madde olduğundan kuşku lanılmaktadır. 1991 yılında OECD nin " The State of the Environment " başlıklı raporuna göre, krom akciğer kanseri,

mide-bağırsak kanseri ve dermatit ile ilişkilidir. Ancak krom insanlar için keşfedilmeyi bekleyen bir elementtir. Amerika Sağlık ve İnsan Hizmetleri Bakanlığına göre, günlük olarak 50-200 gram, yetişkinlerde 131-132 gram arasında Cr-III alınması şeker, protein ve yağ metabolizmalarına yardımcı olduğundan tavsiye edilmektedir. Diğer taraftan, Cr-VI yüksek konsantrasyonlar da maruz kalma ölümcül olabilir ve Cr-VI'nın 7,5 mg / kg vücuda kütle olarak alınması halinde öldürücü olacağı ifade edilmiştir (Gericke, 1995).

#### **4.5 Kromun İnsan Sağlığına Olan Etkileri**

Krom toksit, yüz yıldan uzun bir süredir bilinmesine rağmen tozlar, mekanizmalar ve insan sağlığı üzerindeki kromun etkileri hakkında bilim adamları ve üzerinde çalışanlar tarafından bilinmeyen veya belirsiz birçok şey vardır. İnsanların krom kirliliğine ne şekilde maruz kaldığını kısaca belirtecek olursak; eğer bir kromit maden veya ferrokrom üretim tesisi yakınında yaşıyorsanız, kroma maruz kalmanız muhtemeldir. Krom ile kirlenmiş toprak ya da su ile cildinizi temizlemek, kirli havayı solumak, kirli içme suyu veya kirli gıdaların yenmesi (örneğin, kirli eller veya mutfak eşyaları), kirlenmiş toz ve toprak sizin kromu bünyenize almanızda yardımcı olur (Ontario Air Standards, 2011).

Cr-VI ile Cilt teması alerjik temas dermatit (ACD) denen cildin kroma tepkisi nedeni ile iltihap, egzama, açık yaralar ve kalıcı duyarlılığa neden olabilir. Egzama ve ACD krom kirlenmeye maruz kalan çevrelerdeki kişilerde bulunmuştur. Cr-VI büyük miktarlarda yutulması bulantı, kusma, mide ve bağırsak hasarı, anemi, böbrek ve karaciğer hasarına neden olabilir. Cr-VI'nın kanser ile bir dizi bağlantıya sahip olduğu ve insanda kanserojen madde yapıcı özelliğine sahip olduğu düşünülmektedir. Bu etkilerin birçoğu, krom ile kirlenmiş içme suyuna maruz kalan kişilerde gözlenmiştir. Cr-III ve Cr-VI solunum burunu tahriş edebilir, boğaz ve akciğerlerde iltihap üretir (Mining Watch Canada, 2012).

Krom sanayi çalışmaları sırasında Cr-VI'nın nefesle içeri çekilmesi burun kanaması, ülser ve burun deliklerinde semptom (burun delikleri arasındaki yapıda), astım, akciğer kanseri, sinonazal kanseri ve muhtemelen diğer kanserlere neden olduğu bilinmektedir. Cr-VI solunumuna maruz kalmak en tehlikeli yol gibi görünmektedir. Krom kirlenmiş topraklarda genel nüfusun maruz kaldığı akciğer kanseri ile bağlantılıdır. Çok az sayıda yapılan çalışma insanlardaki potansiyel üreme ve gelişim hormonlarını etkilediğini belirtmektedir (Mining Watch Canada, 2012).



## BÖLÜM 5

### LİTERATÜR ÖZETİ

Tao vd. (2010) yaptıkları çalışmada, atmosferik plazma sprej yöntemi ile  $Al_2O_3$  ve  $Cr_2O_3$  kaplanan numunelerin oda sıcaklıklarında tribolojik özelliklerini, bakır alaşımlı bir karşıt malzeme ile kuru kayma yöntemi ile incelemiştir.  $Al_2O_3$  kaplamanın aşınma direnci, bu çalışmada kullanılan koşullar altında  $Cr_2O_3$  kaplamadan daha üstün olduğu saptanmıştır. Biriken tribolojik ısı etkisinin dağılımını kolaylaştırması ve kaplama sertliğinin azalmasını hafiflettiği içindir ki  $Al_2O_3$  kaplama daha iyi ısı iletkenliğine sahiptir.

Termal sprej yöntemi ile seramik kaplamalar öncelikle aşınma direnci, termal bariyer ve korozif ortamlar için endüstriyel uygulamalarda geniş tamamlayıcı yüzey özellikleriyle alternatif sunmaktadır. Plazma sprej iyi yüzey modifikasyon tekniklerinden biridir, çeşitli seramik seramik kaplamalar için iyi yapılandırılmıştır.  $Al_2O_3$  ve  $Cr_2O_3$  kaplamalar, genel termal sprej seramik kaplama çeşitleridir. Türbin pompaları gibi gelişmiş endüstriyel uygulamalar için ilgi çekiciliği artmaktadır. Geçmiş yıllarda, plazma sprej  $Al_2O_3$  ve  $Cr_2O_3$  kaplamaların gerek kendi gibi kaplamalar ile gerekse metal karşıt yüzeylerle kuru kayma veya yağlı sürtünme koşulları altında tribolojik özelliklerini araştırmak için pek çok çaba harcanmıştır.

Önceki çalışmalar 400N'dan daha düşük sabit yük uygulamalarında kayma aşınması ve erozyon dayanıklılığı olarak  $Al_2O_3$ 'in  $Cr_2O_3$  kaplamaya göre daha iyi bir aday olduğu kabul görülmüştür. Bununla beraber, sürtünme ve aşınma davranışlarını değerlendirmek için plazma sprej  $Al_2O_3$  ve  $Cr_2O_3$  kaplamalar yüksek yükte, yüksek hızda ve korozif ortam dahil olmak üzere nispeten ağır koşullar altında birkaç deneme girişiminde bulunulmuştur. Bu nedenle kısmen düşük ısı iletkenliği ve oluşan mikro aşınma yüzeyi arasında istiflenmiş gözenekler, ara katmanlar, dikey çatlaklar plazma sprej seramik kaplamaların ağır şartlar altında farklı tribolojik davranışları sergileyebileceği kabul edilmiştir. Bu çalışma plazma sprej  $Al_2O_3$  ve  $Cr_2O_3$  kaplamaların 500N sabit yük altında bakır alaşımlı karşıt yüzey karşısında kuru kayma aşınma karakteristiği ve mikro incelemelerden yararlanılarak termomekanik özellikleri gözeneklilik, çatlak, sertlik ve ısı iletkenliğini araştırmak için yapılmıştır. Plazma sprej  $Al_2O_3$  ve  $Cr_2O_3$  kaplamaların tribolojik özellikleri bakır

alaşımına karşı kuru kayma aşınması 500N sabit yük altında bir blok-on-ring tarafından oda sıcaklığında 0.84 m / sn. kayar hızı kullanılarak yapılmıştır. Bu işlem sonrasında başlıca sonuçları özetleyecek olursak:

$Al_2O_3$  / bakır alaşımlı sürtünme çifti,  $Cr_2O_3$  / bakır alaşımlı sürtünme çiftinden, daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranı sergiler. Bu şartlar altında bakır alaşımlı sürtünme çifti olarak  $Al_2O_3$  kaplama daha iyi bir aday olduğunu belirtmektedir. Yüksek aşınma direncine sahip  $Al_2O_3$  kaplamanın ağırlıklı olarak daha iyi ısı iletkenliği önemsenmektedir. Biriken ısı nedeniyle oluşan tribolojik ısı dağılımını kolaylaştırmak ve sertleşme reaksiyonlarını hafifletme özelliğine sahip olduğu için tercih edilmiştir.

$Cr_2O_3$  kaplamanın başarısızlığı ağırlıklı çatlak yayılımının alt film tabakalarına transferi ve parçacık saçılması iken  $Al_2O_3$  kaplamanın aşınma mekanizması bazı mikro-aşınma ve yorulma kaynaklı gevrek kırılma ile birlikte plastik deformasyon olmuştur.

Kang vd. (2014) yaptıkları bu çalışmada, plazma sprey  $Al_2O_3$  – ağırlığınca % 40  $TiO_2$  kompozit seramik kaplamaların hasar mekanizmasını ve çalışma ömrü tahmin edebilmek için rolling-sliding temas koşulları altında çift - silindir test makinesinde incelemişlerdir. Kaplamalarda maksimum kayma gerilmesi dağılımı sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Hasar modellerini esas olarak bu araştırma sırasında abrazyon ve adeziv aşınma yüzeyinden katman ayrılması tespit edilmiştir.

Plazma sprey  $Al_2O_3$  – ağırlığınca % 40  $TiO_2$  kompozit seramik (AT40 kaplama) kaplamalar, genellikle mekanik parçaların yüzey özelliklerini yüksek sıcaklık direncini, korozyon direncini ve aşınma direncini geliştirmek için kullanılmıştır. Rolling-sliding temas koşulları altında AT40 kaplamaların en yaygın hasar modelleri aşınma ve yuvarlanma temas aşınmasıdır (RCF: rolling contact fatigue). Aşınma hasar yüzeyi genellikle malzeme yüzeyinin kayma aşınmasının olduğu yüzeye teması ile yüzeyden malzeme kaldırması durumunda gerçekleşir. RCF hasarı dönme temas koşullarında malzeme yüzeyinde sınırlı çatlama veya çukurlaşma / katman ayrılması içeren kalıcı bir hasar oluşturur. Termal sprey kaplamaların RCF davranışları yaygın olarak incelenmiştir. RCF hasar mekanizmasının ana parametreleri üzerinde (örneğin temas stres, yüzey pürüzlülüğü, kaplama kalınlığı, bağ dayanımı, dönme hızı ve kaplama sertliği vb.) ve çalışma ömrü üzerinde RCF'nin etkisi tartışılmıştır. Rolling-sliding temas koşulu altında plazma sprey kaplama üzerinde sadece birkaç araştırma RCF hasar sürecini analiz etmek

için yapılmıştır, ancak araştırmalarda kayma oranları büyüklükleri %50 ile sınırlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, geniş yelpazesi (0 -75%) ile rolling-sliding temas koşulları altında termal sprey kaplamaların aşınma ve RCF arasında rekabet mekanizması ayrıntılı olarak araştırılması gerekmektedir. Mevcut araştırmada, plazma sprey AT40 kompozit seramik kaplamanın R1 =% 0, R2 =% 25, R3 =% 50 ve R4 =% 75 aşınma oranları ile bir çift silindir testi makinesinde rolling-sliding temas koşulları altında kaplamaların hasar mekanizması ve çalışma ömrü detaylı olarak incelendi. Bu işlem sonrasında başlıca sonuçları özetleyecek olursak:

Plazma sprey AT40 kaplamaların hasar mekanizması ve tahmini çalışma ömrü farklı rolling-sliding temas koşulları altında detaylı olarak incelenmiştir. Farklı aşınma oranları altında AT40 kaplamaların çalışma ömrü karakterize edilebilirliği sonucuna varılmıştır. Rolling-sliding temas durumunda AT40 kaplamaların hasar modelleri başta abraziv ve adheziv aşınmalar ile yüzeyden katman kaldırılmıştır. Katman kaldırma olayının hasar olasılığı aşınma oranı (R1 =% 0, R2 =% 25, R3 =% 50 ve R4 =% 75) arttıkça arttı. Farklı aşınma oranları altında AT40 kaplamalarda maksimum kayma gerilmesi dağılımı hem, maksimum kayma gerilme yüzeyi hem de maksimum kayma gerilme tepe değerinin her ikisinin artması aşınma oranının arttığını göstermiştir. Yüksek kayma oranı altında kısmen maksimum kayma gerilme yüzeyi temas bölgesi içinde adhezyon kuvvet, çarpışma ve plastik deformasyon ile ilişkili aşındırıcı parçacıklar, oluşmasına neden olmuştur. Rolling-sliding temas durumunda AT40 kaplama üzerine abraziv kayma nedeniyle iki ana nedenden adheziv katman ayrılma hasarını oluşturmuştur:

Adheziv aşınma nedeniyle katman ayrılması ana itici güç olarak kabul edilir ara yüzünde maksimum kayma gerilmesi nedeniyle yüzeyin aşınmaya karşı kaplama kalınlığının incelmeye sürütünmenin etkisini hızla artmıştır.

Abraziv aşınma sonucu katman kaldırılma hasarı nedeniyle yüzeydeki dikey çatlaklar gevrek kırılmalara neden olmuştur.

Singh vd. (2011) yaptıkları bu çalışmada, pin-on-disk tipi kuru kayma ve pota tipi çamur erozyon test mekanizmaları kullanılarak geleneksel ve nano boyutta Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - %3 TiO<sub>2</sub> (Yani CC3T ve NC3T, sırasıyla) seramik plazma sprey yöntemi ile kaplanan kaplamaların tribolojik davranışları araştırıldı. Neredeyse tüm makinelerde dayanıklılık ve güvenilirlik

ana nedendir. Seramik kaplamalar aşınma önleyici amaçla endüstriyel makine parçalarına uygulanmaktadır. Yüksek aşınma ve korozyon direnci, düşük ısı iletkenliği, elektrik yalıtımı ve yüksek erime sıcaklığına sahip seramik malzemeler, yüksek tokluk ve plastik şekillendirilebilirlik ile birleştiğinde seçkin kombinasyonlara sahip malzemeler elde edilir. Seramik kaplamalar genellikle aşınan bölümlerin ömrünü uzatmak için kullanılır. Plazma sprej, seramik kaplamaları üretmek için endüstride yaygın olarak kullanılan yüksek sıcaklık kaplama işlemlerinden bir tanesidir. Plazma sprej, seramik ve metaller üzerinde seramik, metal, plastik ve sermetlerin biriktirilmesi için kullanılabilir. Plazma sprej teknikleri esas olarak aşınma önleyici, korozyon karşı ve Isıl bariyer tabakaları geliştirmek için, geniş bir uygulama aralığı içinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. En sık kullanılan seramik sprej malzemeler, alümina, alüminyum / titanyum oksit, krom oksit ve zirkonyum oksit çeşitleridir. Şu an, bu kaplamaların en ekonomik ve başarılı uygulamaları, motor performansını ve verimliliğini artırmak için havacılık ve yanma türbinlerinde kullanılmaktadır. Ancak, havacılık dışı bir sürü sektörde aşınma sorunu önemli bir problemdir. İçten yanmalı motor parçaları ve diğer otomotiv parçaları ayrıca giderek termal sprej teknikleri kullanılarak kaplanmaktadır.

Birçok araştırmacı plazmanın sprej  $Cr_2O_3$  bazlı seramik kaplamaların diğer kaplama malzemelerine kıyasla tribolojik performansının iyi olduğu ve düşük aşınma oranına sahip olduğunu gözlemlemiştir. Bildirilen laboratuvar ve saha test sonuçları, geleneksel kaplamaların aksine, nano boyutlu kompozit kaplamaların sürtünme, aşınma, hatta yüksek temas yükleri, oksitleyici ortamlarda ve yüksek sıcaklıklarda dahil olmak üzere çok ağır tribolojik koşullar altında çok daha üstün özellikleri olduğunu göstermiştir. Bazı nano kompozit kaplamalar metal kesme ve metal şekillendirme aletlerinin sertliklerini ve aşınma ömürlerini uzatmak için çok kullanışlıdır. Titanyum oksit, bu kaplamalar için önemli bir katkı malzemesidir.

Önceki çalışmalarda rapor edildiği gibi kompozit tozlar tek parça tozlar ile karşılaştırıldığında daha az gözenekli yapıya sahip kaplamalar elde etmek için kullanılmıştır. Ayrıca  $TiO_2$  takviyeli plazma sprej oksit esaslı seramik kaplamaların kırılma tokluğunu ve aşınma direncini iyileştirmiştir. Titanyum oksit iri taneli krom oksit ile birlikte kullanıldığı zaman, önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi titanyum oksit taneleri eriyerek krom oksit tanelerini bağlayıcı matris görevi görür. Bu çalışmada, nano yapı ve geleneksel  $Cr_2O_3$  - %3  $TiO_2$  kaplamalar (NC3T ve CC3T sırasıyla), SS304 çelik

yüzeylerde, plazma sprey tekniği kullanılarak kaplanmıştır. Onların pin-on-disk tipi kuru kayma aşınması ve çamur erozyon test mekanizmaları çeşitli parametreleri dikkate alınarak tribolojik performansları değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Kuru kayma aşınması altında yıpranmış kaplamalarda, iki ana aşınma mekanizmasının plastik deformasyon izleri ve adheziv yırtılma olduğunu belirlenmiştir. Sürtünme katsayısına ve aşınma oranına karşılık adheziv yırtılma yüksek değerlerdeyse plastik deformasyon izleri, daha düşük bir ortalamaadır. Çamur erozyonu deneyleri için seçilen erozif ortam ortamı % 10, 20 ve 30 parçacık boyutu 75-106 µm SiO<sub>2</sub> içeren çamur ve su karışımıdır. Çamur erozyonuna maruz kalan kaplamalarda görülen başlıca hasar mekanizmaları kaplama yüzeyinden malzeme ayrılması ve gevrek kırılmalara neden olan çatlakların yayılımı olmuştur. Kaplamaların mikro yapılarını incelemek aynı zamanda erozyon mekanizmasını araştırmak için FE-SEM (Field Emission-Scanning Electron Microscope) ve EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) analizi cihazları kullanılmıştır. Kaplamaların mikro-sertlik ve gözeneklilik özellikleri de incelenmiştir. Mevcut çalışmada görüldüğü gibi CC3T kıyasla NC3T tribolojik performansı daha iyidir. Bu işlem sonrasında başlıca sonuçları özetleyecek olursak:

Nano yapı (NC3T) toz ile kaplanmış numune ile mikro yapı (CC3T) toz kaplama numuneleri karşılaştırıldığında NC3T'nin daha yüksek sertlik ve daha az gözenekli yapıya sahip olduğunu gözlenmiştir.

Tüm kaplamalar için sürtünme katsayısı 0.6 ve 0.75 arasında değiştiği gözlenmiştir. 60 N sabit yük altında NC3T kuru kayar aşınma direnci içindeki test koşullarında 50 ve 60 N sabit yük altında CC3T'nin sunduğu aşınma direncinden daha iyidir. Genel olarak, NC3T, CC3T'den daha iyi bir aşınma direnci göstermektedir.

Pota tipi çamur erozyon testi iki kaplamanın erozyon performansını araştırmak için kullanılmıştır. Çamur karışımındaki %10'dan %30'a kadar artış ile malzeme kaybındaki artış gözlenmiştir. NC3T performansı her karışım evresinde CC3T performansından daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Tüm kaplanmış numuneler benzer koşullarda test edilmiş ve bunların tribolojik performans farklılıkları kaplamaların oluşmasına yönelik kullanılan toz boyutlarının farklı olması nedeniyle ortaya çıkan ağırlık kaybı olarak ölçülmüştür. NC3T nano yapı kaplama tozu

erimesi ile oluşturulan, iki modelli mikro yapı nano metrik taneler ve kaba tanelerden meydana gelmiştir. Bununla birlikte, geleneksel kaplama, tamamen erimiş gözenekli bir kaplamadan meydana gelmiştir. Nano yapılı kaplamalar (NC3T), geleneksel kaplamalardan (CC3T) daha yüksek bir mikro-sertlik, düşük bir sürtünme katsayısı ve daha iyi bir aşınma direnci göstermektedir.

Fernhdez vd. (1996) yaptıkları bu çalışmada, SAE 4620 çeliğine karşı doğrusal kayma teması ile plazma sprey  $Al_2O_3$  kaplamaların kuru kayma, abraziv ve yağlı aşınma davranışında  $CO_2$  lazer tedavisinin etkilerini incelemek için çalışmalar yapılmıştır. Testler, farklı hızlarda, farklı sabit yükler altında, bir blok-on-ring sürtünme ve aşınma test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Aşınma mekanizması ve lazer tedavisi ile uyumu, gözenek ve mikro yapı değişiklikleri de incelenmiştir. Plazma sprey seramik kaplama aşınma ve korozyon direncini arttırmak için birçok mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Ancak, onların koruyucu özelliklerinin kuvvetleri yüzeydeki mikro kusurlar ile sınırlıdır. Bu tür özelliklerini geliştirmek için, yüzeye lazer tedavisi uygulamak yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada plazma sprey  $Al_2O_3$  kaplamanın  $CO_2$  lazer tedavisinden önce ve sonra aşınma davranışları incelenmiştir. Seramik kaplamaların adhezyon kuvvetini, gözeneklilik ve mikro sertlik özellikleri üzerinde lazer tedavisinin etkilerini belirlenmiştir. Aşınma mekanizmasını belirlemek ve lazer tedavisi olmayan seramik kaplamaların, lazer tedavisi olan seramik kaplamaların aşınma davranışını karşılaştırılmıştır. Lazer tedavisi yapılmış seramik kaplamalar ve lazer tedavisi yapılmamış seramik kaplamalar ile karşılaştırıldığında, kuru kayma ve abraziv aşınma koşulları altında eşleştirildiği SAE 4620 çeliğine karşı, her ikimside daha iyi bir aşınma davranışı göstermiştir. Ancak lazer tedavisi gören seramik kaplamanın yağlı aşınma davranışı, çok iyi değildir. Lazer tedavisi nedeniyle sertlik, gözeneklilik ve bağ değişiklikleri seramik kaplamaların aşınma davranışlarını da değiştirmektedir. Bu işlem sonrasında başlıca sonuçları özetleyecek olursak:

$CO_2$  lazerle işlemi plazma sprey seramik kaplamaların yüzeyinde 0.1 mm erimiş tabaka kalınlığı elde edilmesini sağlar. Bu yöntem kaplamalardaki dikey çatlakları asgari düzeyde iyileştirdiği gözlenmiştir.

Lazer tedavisi görmüş kaplamalar tedavi görmemiş kaplamalara göre kuru kayna ve abraziv aşınma şartlarında davranışının daha iyi olmasını kanıtlamıştır.

Yağlama şartları altında CO<sub>2</sub> lazer tedavisi olan ve olmayan kaplamaların deneyleri yapılmış, fakat CO<sub>2</sub> lazer tedavisi edilmiş kaplamaların aşınma davranışları lazer tedavisi görmemiş kaplamalara göre kötü bir performans sergilemiştir. Gözeneklerin lazer tedavisiyle kapanması sonucu malzeme yüzeyinin yağ tutması engellenmiştir.

Ghazali vd. (2015) yaptıkları bu çalışmada, İyi bir sertlik, süneklilik kombinasyonu ve aşınma direnci sayesinde, TiO<sub>2</sub> kaplamalar en yüksek potansiyel sert seramik kaplamalardan biridir. Seramik kaplamalar ortam şartları olan aşınma ve korozyonu önlemek için endüstride yaygın olarak kullanılan iyi bir aday yapmaktadır. Özellikle plazma sprej yöntemi, kaplama malzemelerinin mükemmel bir şekilde çökmesini sağlar; Oldukça gözenekli ve kısmen sünek, ağır çalışma ortamlarında kullanışlıdır. Sert, sünek ve aşınma direnci ile iyi kombinasyonu nedeniyle titanyum kaplamalar en iyi potansiyel sert seramik kaplamalardan biri olarak kabul edilir.

Son zamanlarda, nano boyutlu tozlar yaygın olarak, plazma sprej kaplamalarda kullanılmaktadır. Nano boyutta TiO<sub>2</sub> kaplamalar üzerinde pek çok araştırma yapılmış geleneksel mikro boyutta yapılan TiO<sub>2</sub> kaplamalardan daha gelişmiş aşınma direnci olduğunu göstermiştir. Nano tozların uygulanması kötü kaplamaların olasılığını azaltmaktadır. Bu tozlardan biriken kaplamalar göstergelerle içinde tam olarak erimiş ya da kısmen erimiş bölgelerden oluşan iki model yapı oluşturur. Diğer taraftan, herhangi bir Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamada TiO<sub>2</sub> varlığı ile mekanik davranışlarda artış olduğu saptanmıştır.

Karşılaştırmalı bir çalışma plazma sprej kaplama yoluyla ticari yumuşak çeliklerin aynı tip üzerinde biriken aynı sertliğe sahip her iki tozun aşınma önleyici kaplamalar olarak nano boyutlu tozların etkinliğini incelemek amacıyla yapılmıştır. Kaplama sonrası nano boyuttaki kaplama malzemesi tam eriyik ve yarı eriyik parçacıkların değişik bölgelerde bulunan iki modellenmiş mikro yapı sergilemiştir. Bu iki modellenmiş yapı, geleneksel kaplamalara göre daha yüksek aşınma direncine sahiptir. Buna ek olarak, iki modellenmiş kaplamaların aşınma ve plastik deformasyon izleri daha düzgündür. Plazma sprej nano boyutta Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ağırlığına %13 TiO<sub>2</sub> kaplamalar üzerine yapılan araştırmalar nano boyuttaki kaplamaların mikro boyuttaki kaplamalara göre daha yüksek aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir. Ancak, nano boyutta kaplamalar geleneksel kaplamalara göre daha düşük sertlik değeri gösterirler. Son zamanlarda yapılan araştırmalar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramik kaplamalara titanyum ilave edilmesi ile bazı mekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip

olduğunu onaylamıştır.  $Al_2O_3$  kaplamalara ağırlığınca %3-40  $TiO_2$  takviyeli termal spreylere kaplamalar son zamanlarda çok yaygın hale gelmiştir. Plazma spreylere işleme sırasında, iş parçası üzerinde biriken nano boyuttaki  $TiO_2$  parçacıkları plazma alevi tarafından ısıtılır. Titanyum tozlar zayıf bir ısı iletkenliğine sahiptir ve bu kaplama yüzeyinde gözenekli bir yapı oluşturur, bunun sonucunda malzemenin iç yüzeyine ısı transferi daha da zorlaşır. Bu dış ve iç kısım arasında önemli bir sıcaklık farkı oluşturur. Sıcaklık  $2045^{\circ}C$ 'yi aştığında  $Al_2O_3$  erime sıcaklığına ulaşmış olur, bütün tozlar erir ve iş parçası üzerinde erimiş şekilde kaplama yüzeyini oluşturur.  $1840^{\circ}C$  ( $TiO_2$  erime sıcaklığı) ile  $2045^{\circ}C$  arasındaki sıcaklıklarda, yalnızca  $TiO_2$  eriyiği meydana gelir. Kuru kayma işleme sırasında erimiş  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  parçacıkları için bir birleştirme matrisi rolü oynayacaktır. Bu süreç içerisinde oluşan aşınma izleri arasındaki boşluğu azaltacaktır. Sıcaklık  $TiO_2$ 'in erime sıcaklığından düşük olduğu zaman nano tabakaları bir arada tutan geniş matris alanları oluşturur.  $Al_2O_3$  kaplama tozlarına  $TiO_2$  çeşitli miktarlarda eklenmesi onların mekanik özelliklerini değiştirebilir. Çok ilginçtir ki  $Al_2O_3$  içine ağırlığınca %13  $TiO_2$  eklendiğinde iş parçası yüzeyindeki birikme etkinliğini %50-78 arasında yükseltgenir.  $TiO_2$  erime sıcaklığı ( $1854^{\circ}C$  civarında)  $Al_2O_3$  erime sıcaklığına göre ( $2045^{\circ}C$  civarında) düşük olması nedeniyle  $Al_2O_3$  içine  $TiO_2$  karıştırılarak erime sıcaklığını düşürmek üzere tasarlanmıştır. Düşük erime sıcaklığı  $Al_2O_3 - TiO_2$  tozu erime sürecini kolaylaştıracaktır. Ayrıca,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  tozu kullanılarak elde edilen kaplama saf  $Al_2O_3$  tozundan daha az gözenekli olduğun düşünülmektedir. Ek olarak, plazma spreylere sırasında toz erime derecesi, iletim ya da elde edilen ısıyı yaymak toz parçacıklarının kabiliyetine bağlıdır.

Saf alüminyum oksit kaplama aşınma oranı  $Al_2O_3 - TiO_2$  kaplama aşınma oranından daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada kaplamanın aşınma direncinin artışı, kırılma tokluğunun artması ile sürtünme kuvvetinin azalması ve kaplamanın sürtünme kat sayısına bağlı olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Bir  $Al_2O_3$  kaplama içinde  $TiO_2$  kırılma tokluğunu artırarak ve sürtünme katsayısını azaltarak aşınma direncini arttırmaya katkıda bulunmuştur. Saf  $TiO_2$  kaplamaların belirli aşınma oranları  $1.62 \times 10^{-5} - 4.19 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 / \text{Nm}$  arasında iken  $Al_2O_3 / TiO_2$  kaplamaların aşınma oranları  $2.0 \times 10^{-3} - 28.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 / \text{Nm}$  aralığında değiştiği saptanmıştır. Bu  $TiO_2$  kaplamaların aşınma direncinin arttırılmasında en çok tercih edilen seramik sonucuna varmıştır. Ayrıca  $Al_2O_3 - \%13 TiO_2$  kullanılarak kaplamanın iyi aşınma direnci sağladığı bulunmuştur. Literatürler de belirtildiği gibi optimize hacim olarak kabul edilen belirli bir miktar, ağırlığınca %13  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3 / TiO_2$  karışımı kullanılmıştır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, yumuşak çelik yüzeyine



optimum aşınma direnci sağlayabilecek en iyi nano boyuttaki kaplamaları elde etmektir. Bu işlem sonrasında başlıca sonuçları özetleyecek olursak:

Optimize kaplama parametreleri ile plazma spreyle nano parçacıklar yumuşak çelik yüzeylere başarıyla iktiva edilmiştir. Benzersiz özelliklere sahip iki modelli yapı gibi her iki çökme olduğu tespit edilmiştir. İki modele sahip bölgelerin dağılımı mikro sertliğin belirlenmesinde büyük rol oynar, kısmen erimiş bölgelerin mikro sertliği tamamen erimiş bölgelerin mikro sertliğinden daha düşüktür. İki modelli yapının gelişmiş sünekliliği daha yüksek tokluğa neden olur. Söz konusu yapı, böylece, sünek ve kırılma tokluğu gelişmiştir, sert nano yapılı seramik kaplamaların iyi bir dolgu etkisi veren kısmen ergimiş olan nano özelliklerini koruma yeteneğine sahip olduğu fark edilmiştir, bunun sonucu olarak, aşınma direnci için önemli olan çatlak başlangıcını ve ilerlemesine engel olacak dirence sahiptir.

Dai vd. (1996) yaptıkları bu çalışmada, plazma spreyle  $TiO_2$  kaplama paslanmaz çeliğe karşı farklı sabit yükler ve kayma hızları altında bir block-on-ring düzeneği ile aşınma direnci test edilmiştir. Aşınma olayında  $TiO_2$  kaplamanın kütle kaybında artış sabit yüklerin artması ile artmakta fakat kayma hızlarındaki artış ile azalmakta olduğu tespit edilmiştir. Mekanizma taşlama aşınması, adheziv aşınma, mikro mekanik delaminasyon aşınması, plastik deformasyon aşınması, erime aşınma ve  $Fe_2O_3-Fe_3O_4$  ince film oluşumu açısından açıklanmıştır. Plazma spreyle  $TiO_2$  kaplama yüksek sertlik, yüksek yoğunluk, iyi süneklilik ve iş parçası yüzeyine iyi adheziv bağlanma özelliğine sahiptir. Bu kaplama,  $540^{\circ}C$ 'nin altında aşınmaya karşı direnç için mil rulmanlarında ve pompa contaları gibi hafif rulman uygulamaları için kullanılmıştır. Plazma spreyle  $TiO_2$  içeren kompozit kaplamalar, aynı zamanda sürtünme, kavitasyon, erozyon ve abraziv aşınmalara karşı direnç için kullanılmaktadır. Çalışmalarımızda paslanmaz çeliğe karşı  $TiO_2$  kaplamanın kuru koşullarda iyi bir aşınma direncine sahip olduğu bulunmuştur. Bu çalışmanın, üç farklı sabit yük ve iki farklı kayma hızlarında paslanmaz çeliğe karşı plazma spreyle  $TiO_2$  kaplama aşınma mekanizması araştırıldı ve plazma spreyle  $TiO_2$  kaplama aşınma mekanizmaları üzerindeki yük ve hızın etkisi belirlendi. Bu işlem sonrasında başlıca sonuçları özetleyecek olursak:

Paslanmaz çeliğe karşı plazma spreyle  $TiO_2$  kaplamanın aşınma kütle kaybı sabit yüklerin artışı ile birlikte artmıştır. Düşük yüklerde paslanmaz çeliğe karşı  $TiO_2$  kaplamanın aşınma mekanizması  $Fe_2O_3$  film, yorulma ve adheziv aşınma oluşumu ile kontrol edilmiştir.

Yüksek yükte, taşlama aşınması ve mikro mekanik delaminasyon aşınması tespit edildi. Sürtünme katsayısı aşınma kütle kaybı konusunda net bir etkiye sahip olduğu görülmemiştir.

Kayma hızının azalması ile paslanmaz çeliğe karşı plazma spreylenmiş  $TiO_2$  kaplamanın aşınma kütle kaybı artar. Bunun nedenlerinden biri karışık bir demir oksit  $Fe_2O_3-Fe_3O_4$  ince film oluşumu, bir başka nedeni de yüksek sıcaklığın  $TiO_2$  kaplamasını yumuşatmasıdır. Yüksek hızda paslanmaz çeliğe karşı  $TiO_2$  kaplama aşınma mekanizması erime aşınmasına ve plastik deformasyona neden oldu; düşük hızda oksidasyon, yorulma ve adheziv aşınmaya (yüksek yükte yüklü iken) neden olduğu belirlenmiştir.

Palanivelu ve Ruban Kumar (2014) yaptıkları bu çalışmada, çeşitli kaplama teknikleri arasında, plazma spreylenmiş kaplama metal yüzeyini aşınma ve korozyon gibi çeşitli yüzey sorunlarına karşı korumak için etkili bir tekniktir. Bu çalışmada hedeflenen tasarım, biyo-uyumluluk ve yüzey özelliklerini geliştirmek için, toksit olmayan, ticari olarak saf (CP-Ti olarak gösterilen) titanyum implant iş parçası üzerinde iki tabakalı bir kaplama üretmektir. Bunu elde etmek için,  $Al_2O_3$  - ağırlığınca %13  $TiO_2$  (AT13) ve hidroksiapatit (HAP), plazma spreylenmiş kaplama tekniği kullanılarak CP-Ti implant iş parçası üzerine kaplanmıştır. Ayrıca alt-tabakalar, çeşitli kaplanmış karakterizasyon tekniklerine tabi tutuldu. Kristal boyutta kaplanmış HAP'nin morfolojisi sırasıyla X ray (XRD) ışın kırınım cihazı ve taramalı mikroskop (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi CP-Ti implant yüzeyi üzerine iki tabakalı (AT 13/HAP) kaplamanın aşınma oranı ve sürtünme katsayısını belirlemek için, 37 C'de yapay vücut sıvısı (SBF: Simulated body fluid) ortamında bilyeli disk(ball-on-disk) test cihazı kullanılarak yapıldı. İki tabakalı kaplanmış yüzeyin adhezyon mukavemeti 14-20 N. yük aralığı ile artan yük koşulları altında mikro aşınma testi ile değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar tek kat kaplamalı HAP ve AT13 implant yüzeyleri üzerinde tekrarlanmıştır.

Çoğu zaman, biyomedikal implantlar titanyum ve alaşımları, 316L paslanmaz çelik, Kobalt krom alaşımlı ve magnezyum alaşımları gibi hafif metalleri kullanarak imal edildi. Titanyum esaslı alaşımlar diğer implantlardan daha iyi korozyon direnci, biyo-uyumluluk ve daha üstün mekanik özellikler göstermektedir. Bu alaşımlar otomotiv, havacılık, biyomedikal vb. diğer endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Seramik katmanlı kaplamalar (kullanılarak  $TiO_2$ , zirkonyum oksit, alüminyum oksit ve silisyum oksit) bu

metal yüzeyi daha yüksek bir erime noktasına ve iyi bir adheziv koruma sağlaması için termal bariyer kaplama gibi davranmaktadır. Bu tür kaplamalar gelişmiş süpersonik havacılık endüstrisinde kullanılmaktadır. HAP kaplı titanyum implantlar sayesinde mükemmel biyo-uyumluluk ve osteokondüksiyon biyomedikal uygulamalar- da tercih edildi.

Bu nano yapıları AT13 kaplı titanyum implant yüzeyi, üstün bir aşınma direncine ve adhezyon mukavemetine sahip olduğu gözlenmiştir. Aşınma ve korozyonun birleşik etkisine biyomedikal Ti alaşımları kullanılan implantların tek başına karşı koyması zor bir işittir. Bunu karşı koymak için, çeşitli yüzey kaplama teknikleri benimsenmiş ve onlar plazma sprej kaplama, dönel kaplama, dip daldırma kaplama, elektroforetik biriktirme ve sprej ile kaplama çeşitleridir. Saf HAP böylece, düşük mekanik mukavemete sahip olduğu için yük taşıyıcı uygulamalarda kullanılamaz. Ama aynı zamanda daha iyi çalışma ömrü, biyo-uyumluluk ve mekanik uyumluluk için implant yüzeylerine kaplanmaktadır.  $ZrO_2$  ve  $Al_2O_3$  - hacimce %13  $TiO_2$  nano kaplı Ti-13Nb-13Zr alaşımı aşınmaya dirençli olduğu bilinmektedir.  $ZrO_2$  ve  $Al_2O_3$  - hacimce %13  $TiO_2$  kaplamanın tek tabaka ile karşılaştırıldığında aşınma direnci 200-500 kat artış görüldüğü araştırmalar sonucu bilinmektedir.  $Al_2O_3$  - hacimce %13  $TiO_2$  kaplı titanyum yüzey pürüzlülüğü; sertlik ve bağlanma mukavemeti erimiş alümina parçacıkları nedeniyle kısmen hızla artmıştır. 150  $\mu m$  HAP kaplama kalınlığı önemli ölçüde Ti-6Al-4V iş parçasının  $\alpha + \beta$  karışık faz yorulma direncini azaltır. Plazma sprej kaplam işlemi kullanılarak iki katmanlı kaplama (AT13 / HAP) CP-Ti yüzeyleri uyarlayarak kaplanan malzemenin aşınma direnci, mikro sertlik ve sürtünme katsayısı geliştirilmiştir. CP-Ti implantlar yüzeyi üzerine kaplanmış HAP, AT13 ve iki katmanlı (AT13 ve HAP) aşınma oranı 37°C de SBF ortamında bırakılarak ve ayrıca yüzey morfolojileri, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma direnç ölçüleri incelenmiştir. Çift-katlı (AT13 / HAP) plazma sprej kaplamalar CP-Ti implantı yüzeyini korumak için daha iyi aşınma ve adheziv mukavemete sahip olduğu rapor edilmiştir. Sonuçlar CP-Ti yüzeyi kaplanmış iki tabakalı (AT13 / HAP) tek kat HAP ve AT13 yüzeyleri kaplanmış olanlara oranla gelişmiş aşınma oranı ve sürtünme katsayısına sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu işlem sonrasında başlıca sonuçları özetleyecek olursak:

CP-Ti yüzeyinde iki tabakalı (AT13 / HAP) kaplama yüzeyinin mikro sertliği  $728 \pm 12HV$  (HV:Vickers sertlik) kaplama yapılmamış CP-Ti yüzeyinin  $196 \pm 10HV$  mikro sertliğinden

yaklaşık 3.714 kat artmış olduğunu göstermektedir, kaplamaların ortalama pürüzlülük değerleri 8-10  $\mu\text{m}$  aralığındadır.

Çift katlı (AT13 / HAP) kaplanmış yüzeyin yüzey çizilme direnci tek tabakalı HAP kaplı yüzeyinden 1,402 kat daha fazladır.

Çift-katlı (AT13 / HAP) kaplanmış yüzeyin aşınma oranı ve sürtünme katsayısı, HAP kaplanmış yüzeyden sırasıyla 1,73 ve 1,22 kat daha düşük olmaktadır.

Bu gözlemlere dayanarak, iki katmanlı (AT13 / HAP) kaplı CP-Ti implant endodontik implantlar için önerilmektedir.

Fernandez vd. (1995) yaptıkları bu çalışmada, çelik AISI D2 karşı kuru ve yağlı temas şartları altında çeşitli hızlarda ve farklı yükler altında plazma sprey  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplama aşınma davranışları incelenmiştir. Teğetsel darbe aşınma modelini açıklamak için hız ile aşınmanın artışı ve aşınma mekanizmalarını belirlemek için SEM analizi yapılmıştır. Minimum aşınma ve yıpranma-hasar mekanizması makine elemanları değiştirme maliyet tasarrufu sektöründe çok önemli bir yer kaplar. Seramik malzemeler, yüksek sertlik ve kimyasal duyarızlığı nedeniyle, yüksek aşınma direnci, korozyon ve yüksek sıcaklık oksidasyonu durumları için çok ilgi görmüştür. Sanayide seramik kullanılması yüksek maliyet ve kırılabilir bir karaktere sahip olması nedeniyle uygulama alanlarını sınırlar. Bu nedenle, çelik gibi ucuz ve darbe dayanımı yüksek malzemeler üzerine seramik kaplamalar, daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik kaplama bir anti-aşınma tabakası ve darbeye dayanma desteği olarak çelik iş parçası kullanılmaktadır. Plazma sprey seramik kaplamalar için çok önemli bir işlem olup kalınlığı 3mm ve gözeneklilik yaklaşık %5 oranda elde edilmelidir. Daha iyi anlamak için aşınma önleyici uygulamada seramik kaplamaların uygulanması, yüksek sıcaklıklar, çevre şartları, yağlama, hızlar, yükler, temaslar (nokta, doğrusal ve uygulama yüzeyi) gibi farklı şekillerde, tamamen tribolojik inceleme gereklidir. Plazma sprey seramik  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , WC - Co,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , vb. kaplamalar, yüksek sıcaklıklarda lineer temas bölgelerinde olumlu tribolojik davranışı gösterdi: yüksek aşınma direnci ve kaplamada var olan gözeneklerin yağ depolanması nedeniyle kolay yağlanması en belirgin avantajlarından. Aşınma direnci yüksek  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  tozu gibi birkaç katkı malzemesi önemli ölçüde sürtünmeyi azaltmaktadır.

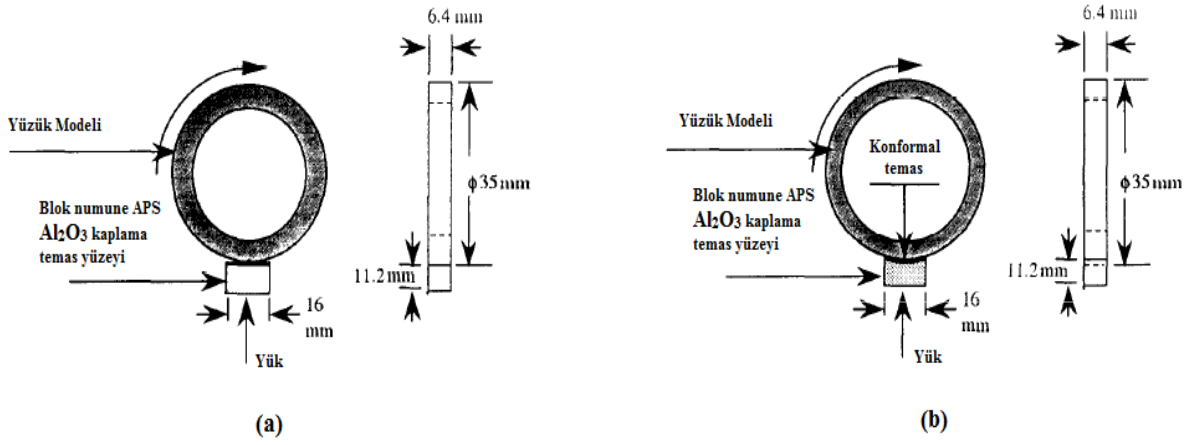
Plazma sprej seramik kaplamalar, kayma hasar mekanizmaları plastik deformasyon, adhezyon aşınması, gevrek kırılma ve yüzey parlatma etkilerine sahip olabilir. Plazma sprej  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplamalara lazer tedavisi sonrasında belli bir ölçüde kuru kayma aşınma direncinin arttığı gözlenmiştir, ancak yağlı ortamlarda gözenek karakteristiğinin olmayışı yağ depolama özelliğini yitirmesine ve bu kayba bağlı olarak yağlı ortamlarda çalışan yüzeylerin aşınma oranının arttığı gözlemlenmiştir. Tüm tribolojik çalışmaları değerlendirmede doğrusal temas yapılandırma kullanılmıştır.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplama uygulama temas yüzeyinin aşınma davranışı doğrusal temas yüzeyinden farklı olduğunu göstermektedir. Uygulama temas yüzeyinin kararlı aşınma durumundan dolayı aşınma oranı düşüktür. Uygulama temas yüzeyinin kararlı aşınma halindeyken aşınma oranı düşüktür. Aynı zamanda kuru kayma ve yağlı aşınmanın her ikisinde de maksimum aşınma yükü söz konusudur. Minimum kuru kayma aşınma hızı yaklaşık  $1\text{ms}^{-1}$  ve maksimum kuru kayma aşınma hızı yaklaşık  $5\text{ms}^{-1}$  dir. Plazma sprej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplamanın aşınma oranı Hızla teğetsel darbe aşınma modeli için önerilen hız aralığı  $1-3\text{ms}^{-1}$  arasında olmalıdır. Ayrıca, yağlı kayma durumunda, plazma sprej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplamanın aşınması  $1\text{ms}^{-1}$  altında düşük hızlarda ve daha sonra, kinetik enerji ile orantılı olarak aşınma hızı  $1\text{ms}^{-1}$  den  $2,8\text{ms}^{-1}$  e keskin biçimde arttırır. Ve bunların sonucunda, plazma sprej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplamanın uygulama temas yüzeyinin çelik AISI D2 karşı aşınma arıza tipleri şunlardır: plastik deformasyon, adheziv aşınma ve gevrek kırılmadır. Bu işlem sonrasında başlıca sonuçları özetleyecek olursak:

Plazma sprej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplama konformal temas ile doğrusal temas aşınma davranışı farklıdır. Konformal teması doğrusal temas ile karşılaştırsak düşük aşınma oranına sahip olmasını, sürekli aşınma evresi altında düşük temas stresine borçludur.

Kuru kayna aşınmasında minimum aşınma hızı yaklaşık  $1\text{ms}^{-1}$  ve maksimum aşınma hızı yaklaşık  $5\text{ms}^{-1}$  dir. Önerilen teğetsel darbe aşınma modeli plazma sprej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplamaların aşınma hızının  $1-3\text{ms}^{-1}$  artması ile aşınma oranının artacağını açıklamaktadır. Pürüz etkisi ve ani sıcaklık etkileri  $3-5\text{ms}^{-1}$  arasında aşınmayı yavaş yavaş arttırmaktadır ardından  $5\text{ms}^{-1}$  sonrasında etkisini hızla arttırmaktadır.

Yağlanmış durumda, plazma sprej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kaplamanın aşınma oranı  $1\text{ms}^{-1}$  altında düşük hızlarda önemsemeyecek kadar küçük kalır fakat daha sonra  $1 - 2,8\text{ms}^{-1}$  arasında hareketli numunenin kinetik enerji ile orantılı olarak keskin bir artış görülür.

Plazma sprey  $Al_2O_3$  kaplamının çelik AISI D2 karşı konformal temas kuru kayma aşınması hasar tipleri plastik deformasyon, adheziv, ayrıca gevrek kırılma vardır.



Şekil 33: Alfa-LWF-1 tribometre temas geometrisi: (a) doğrusal temas; (b) konformal temas (Fernandez vd., 1995).

Rico vd. (2010) yaptıkları bu çalışmada, plazma sprey  $Al_2O_3$  - %13  $TiO_2$  kaplamaların aşınma davranışı farklı sabit yükler altında pin-on-disk testi ile gerçekleştirilerek belirlenmiştir. Mikro-metrik tozlardan oluşan geleneksel kaplamalar ve nano-metrik taneciklerden oluşan kaplama tozları ile kaplanmış numuneler incelenmiştir. Geleneksel ve nano kaplamaların aşınma oranları karşılaştırılmış ve mikro yapının aşınmaya etkili enerjisi kullanılarak analiz edilmiştir. Modifiye kaplamanın gelişmiş özelliklere sahip olduğu mikro yapı açısından onaylanmıştır.

Bu kaplamada, kısmen erimiş bölümlerinin seramik matris bileşimine takviye yoluyla aşınma direncini geliştirmiş olması muhtemeldir. Seramik kaplamalar genellikle tribolojik uygulamalarda şu özelliklerinden dolayı: düşük yoğunluk, sertliği ve kimyasal inertliği için kullanılırlar. Aşınma direnci sınırlayıcı faktör olduğunda alüminyum okside dayalı kaplamalar iyi bir alternatiftir. Bununla birlikte, alüminyum oksit esaslı bir kaplamanın ana dezavantajı gevrekliğidir. Bir kaplamanın sertliğini arttırmak amacıyla, diğer seramik malzemeler ile farklı miktarlarda özellikleri arasında dengeyi sağlamak için alüminyum oksit ile karıştırılabilir. Titanyum oksit, düşük bir erime noktasına sahiptir ve alüminyum tanelerini iş parçası yüzeyine bağlamada büyük rol oynamaktadır. Yüksek yoğunluklu kaplamalar uygun sertlikler ve artan tokluklar seramik malzemelere alüminyum oksit karıştırılarak elde edilebilir. Alüminyum oksit – titanyum oksit kaplamalar, genellikle

atmosferik plazma sprey işlemi ile kaplanır. Burada yüksek sıcaklıkların altında, iş parçasına iyi bir yapışma ve sınırlı düzeyde gözenekli kaplamalar üretilebilmektedir.

Alüminyum oksit – titanyum oksit sisteminde gözeneklilik, sertlik, elastisite modülü ve aşınma direnci parametrelerinin etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. İki ana zorlukla karşılaşmıştır kaplamaların imalatı sırasında: Nano parçacıkların küçük boyutu, geleneksel plazma donanımları ile tozların doğrudan püskürtülmesine engel olur ve işlem dikkatli bir şekilde kontrol edilmediği takdirde muhtemelen plazmadaki yüksek sıcaklıklar termal sprey sırasında orijinal nano yapısını tahrip edebilir. Yeni bir teknolojik işlem sprey-kurutma (spray-drying) ile nano parçacıkların hazırlanması için geliştirilmiştir. Nano tozların ortalama boyutları geleneksel tozlarınkine benzer (yaklaşık 30-50 µm). Bu tozlar, geleneksel plazma donanımı kullanılarak tatbik edilebilir. Plazma sprey sırasında sıcaklık alümina ve titanyum oksidin erime noktaları arasında bir ara değerde tutularak nano yapı korunabilir. Günümüzde alüminyum oksit + %13 titanyum oksit kaplamaların mekanik özellikler ve modifiye edilmiş aşınma davranışı incelenmiştir. İyi bir aşınma direncine sahip olduğu bilinmesine rağmen, bu çalışmayı aşınma mekanizmalarını, değişkenleri ve aşınma süreçlerinin kontrol parametrelerini anlamaya yönelik sistematik bir yaklaşım olarak yapmışlardır. Aşınma davranışı ana malzemenin bir özelliği değildir. Bu nedenle aşınan malzemenin temas özelliklerine (mikro yapı, pürüzlülük, tane boyutu, mekanik özellikler) ve test koşullarına bağlıdır (kontak geometrisi, sabit basınç, sıcaklık, sürme hızı). Karakteristik gevrek kırılma mekanizmasını tarif eden seramik aşınma ve çeşitli aşınma modelleri konuyla ilgili çok sayıda makale vardır. Bu çalışmada, geleneksel ve nano alüminyum oksit + %13 titanyum oksit kaplamaların sürtünme davranışlarının karşılaştırılmasını farklı sabit basınçlar altında gerçekleştirmişlerdir. İki kaplama mikro boyutlu ve nano boyutlu hammaddelere dayalı üretilmiştir; Bu kaplamalar, aynı kompozit yapıya sahip fakat farklı mikro yapıdadır. Mikro yapı, bölgesel mekanik özellikleri, genel etkilerin özellikleri ve aşınma arasındaki bağlantı araştırılmıştır. Bu işlem sonrasında başlıca sonuçları özetleyecek olursak:

Young modülü, sertlik ve kırılma tokluğu verilerinin istatistiksel analizleri yapılmıştır. Mekanik özelliklerinden bağımsız olarak, nano kaplama, bir kompozit malzeme gibi davranış sergilemiştir. Her bir bileşenin özellikleri, derinlik-girinti algılama cihazı ile tespit edilmiştir ve kaplamalarda etkin özellikleri karıştırma oranlarına göre elde edilmiştir.

Boyut analizleri ile geliştirilen bir enerjik yaklaşım, aşınma verilerini açıklamak için kullanılmıştır. Aşınma katsayısı,  $kH$  cinsinden yazmak aşınma oranı, tribosistem giriş enerjisi ve aşınma sürecinde malzeme tarafından yayılan enerjinin bir formunu içeren boyutsuz parametrenin bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Giriş enerjisi sürtünme katsayısının bir normalleştirilmiş ürünüdür, normal basınç ve normal kayma hızı olarak ifade edilebilir.

Nano kaplamanın çok fazlı karakteri etkin Young modülü, sertlik ve kırılma tokluğu ile tanımlanmıştır. Bir malzemenin genel aşınma davranışını genel ya da etkili özellikleri tarafından test edilmesini önerilmektedir.

Malzemeler, bu çalışmada incelenen mikro ve nano, aynı bileşime fakat farklı özelliklere sahip mikro yapılarıdır; bunun sonucu olarak, farklı etki özelliklerine sahiplerdir. Bunların aşınma özellikleri açık bir şekilde farklıdır, ancak aynı denklem ile tanımlanabilir çünkü birimsiz parametreler kullanılmış ve her iki numunede aynı aşınma mekanizmasına sahiptir. Her kaplamanın gösterdiği farklı bir davranış etkilendiği mekanik özellikler ile belirlemiştir.

Yin vd. (2007) yaptıkları bu çalışmada, yüzey modifikasyon tekniği olarak, plazma sprej seramik kaplamalar etkili ve ekonomik bir yöntemdir. Plazma sprej ile metal yüzeyler üzerinde biriken  $Al_2O_3$  seramik kaplamalar aşınma, korozyon ve ısı direnci için önemli ölçüde dikkat çekmiştir. Ancak bu kaplamalar düşük termal yayılma karakterli plazma sprej işlemi ile gözenekli mikro tabaka ve eriyiklerin iş parçası yüzeyine kötü yapıştığını göstermektedir. Ayrıca mikro hatalar, düşük termal yayılım gücü ve büyük ölçüde seramiğin içsel gevrekliğinin birleşmesi plazma sprej  $Al_2O_3$  kaplamaları zorlu çalışma koşulları altında sınırlı ilerlemesine müsaade etmektedir.

Seramik matrisler içine ikinci bir metal fazı başarıyla ilave edilmiş ve mekanik davranışları iyileştirilmiştir. Sünekliliği ve ısıl iletkenliği iyi olan Al eklenmesi ile oluşan Al /  $Al_2O_3$  kompozit kaplama malzemesi hazırlanmıştır. Bu kompozit kaplama malzemesinin geliştirilmiş mekanik özellikler ve termal yayılıma sahip olduğu bulunmuştur.  $Al_2O_3$  ve Al /  $Al_2O_3$  kompozit kaplamalar atmosferik plazma sprej yöntemi ile hazırlanmıştır. Bir blok-on-ring düzeneği kullanarak farklı derecelerde  $Al_2O_3$  kaplama ile Al /  $Al_2O_3$  kompozit kaplamaların karşılaştırıldığında, sürtünme sonucu



aşınma özellikleri incelenmiştir. Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit kaplamanın aşınma direnci, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamadan daha üstün olduğu bulunmuştur. Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit kaplamanın aşınma direncindeki gelişme daha yüksek kırılma tokluğu ve adheziv mukavemete ayrıca daha iyi termal yayılma gücüne sahip olduğu gözlenmiştir. Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit kaplama ile ilgili olarak, temelde adheziv aşınma mekanizması içinde mikro-aşınma ve yorulmadan kaynaklı gevrek kırılma olduğu ve tabaka sınırları boyunca katman ayrılması sadece yüksek yükte meydana geldiği gözlenmiştir. Ancak, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama hasarı artan yük ile fazlaşmıştır tabaka sınırları boyunca transfer film ayrılması, tabaka içinde gevrek kırılma ve katman ayrılması, baskın olmuştur. Bu işlem sonrasında başlıca sonuçları özetleyecek olursak:

Bir blok-on-ring düzeneği üzerinde farklı sabit yükler (50, 100, 200 ve 300 N) altında Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama karşılaştırıldığında Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit kaplamanın aşınma katsayısı %40-80 oranda azaldığı gözlenmiştir, Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit kaplama Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamadan yüksek aşınma direncine sahiptir.

Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit kaplamanın Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e göre yükseklik aşınma direnci daha yüksek kırılma tokluğu ve adheziv mukavemet ayrıca daha iyi termal yayılma gücüne sahip olduğunu göstermiştir.

Zhang vd. (2008) yaptıkları bu çalışmada, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramik benzersiz termal, mekanik, kimyasal ve elektriksel özellikleri yüksek erime noktasına, sertliğe, yüksek oksidasyon, korozyon, aşınma direnci ve termal kararlılık gibi son zamanlarda kritik uygulamalar için endüstride kullanımı artmaktadır. Ama içsel gevreklik büyük ölçüde yapısal bileşenlerin uygulama alanlarını kısıtlar. Alternatif bir yaklaşım, istenen özellikleri sağlamak için, metal iş parçası üzerinde, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramik kaplamalar kullanmaktır.

Plazma sprey yöntemi özellikle aşınmaya karşı dayanıklı yüzeyler için, ticari olarak kullanılan seramik kaplamalar hazırlamak için en sık kullanılan yöntemdir. Ancak seramik ve metal arasında, termal fiziksel özellikleri (ısı genleşme katsayısı, ısı iletkenliği vb.) arasında büyük bir fark termal stres konsantrasyonu ile sonuçlanabilir. Bu yüzden kaplama ve iş parçası yüzeyi arasındaki yapışma mukavemeti her zaman düşük olmalıdır. Kaplamaların özelliklerini geliştirmek adına, kademeli kaplamalarla ilgili çalışmalar, son yıllarda araştırılan önemli konulardan biri haline gelmiştir. Alümina kaplamaların tribolojik davranışları birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Buna oranla kademeli

kaplamaların tribolojik davranışı ile ilgili olarak daha az çalışma bildirilmiştir. Fe<sub>3</sub>Al yüksek sıcaklık alaşımı ve seramik arasında yüksek sıcaklık malzemesidir, bir yarı seramik (semi-seramik) malzemedir. Fe<sub>3</sub>Al intermetalik ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramik arasında iyi uyumluluk vardır. Metal yüzeyler ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalar arasında gerçekçi geçiş malzemesi olması beklenmektedir. Fe<sub>3</sub>Al - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> çift katmanlı kaplamalar, Fe<sub>3</sub>Al - Fe<sub>3</sub>Al / %50 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üç-katmanlı kaplamalar ve Fe<sub>3</sub>Al - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kademeli kaplamalar, farklı bileşimlerle Fe<sub>3</sub>Al / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> karma tozlar, plazma sprey yöntemi kullanılarak düşük karbonlu çelik iş parçası üzerine kaplanmıştır. Üç çeşit kaplamanın sürtünme ve aşınma direnç davranışları, farklı yükler altında incelenmiştir. Testler yaklaşık 1.57 ms<sup>-1</sup> arasında bir kayma hızında, sert metalle karşı kuru kayama aşınma koşulları altında doğrusal temas halinde bir MRH-3 standart makinesi kullanılarak gerçekleştirildi. Farklı yükler altında aşınma oranları ölçüldü ve sürtünme katsayıları kaydedilmiştir. Aşınma mekanizmalarını tespit etmek amacıyla SEM analizleri yapılmıştır. Bu işlem sonrasında başlıca sonuçları özetleyecek olursak:

Fe<sub>3</sub>Al - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kademeli kaplama Fe<sub>3</sub>Al - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> çift katmanlı kaplama ve Fe<sub>3</sub>Al - Fe<sub>3</sub>Al / %50 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üç katmanlı kaplamadan daha yüksek aşınma direncine sahiptir. Kaplama bileşiminin eğimli dağılımı kaplamaların aşınma direncine fayda sağlamıştır. Fe<sub>3</sub>Al - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kademeli kaplama derinliği boyunca farklı sürtünme de eğimli kaplama bileşimindeki değişikliklerine bağlıdır ve aşınma test süreleri aşınma mekanizmalarının değişimini göstermektedir. Fe<sub>3</sub>Al - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kademeli kaplamaların aşınma oranları kaplamanın derinliği boyunca farklıdır ve saf Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sahip kaplamaların yüzeyi iyi bir aşınma direnci göstermemiştir.

Aşınma oranı ve sürtünme katsayıları da farklı yükler altında farklılık göstermektedir. Doğrusal temas sürtünme plazma-sprey Fe<sub>3</sub>Al - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dereceli kaplamaların hasar türleri şunlardır: plastik deformasyon, adheziv aşınma, seramik parçacıkların gevşemesi, çatlak çekirdeklenmesi ve yayılımı, gevrek kırılmadır.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada  $TiO_2 +45 Cr_2O_3$ ,  $ZrO +5 Co$ ,  $WC +12 Co$  ticari tozları ve ferrokrom tozları AISI 316 L tipi paslanmaz çelik alt yüzey üzerine APS (Atmosferik Plazma Yöntemi) kullanılarak kaplanmıştır. Kaplama işlemi, alt yüzey üzerine NiCoCRAIY bağ tabakası, ferrokrom cürufu ve cüruf yüzeyi üzerine yukarıda belirtilen ticari tozlar kaplanarak sandviç tipi katmanlı bir yapı oluşturulmuştur. Ferrokrom cürufunun kaplama malzemesi olarak kullanımının amacı sertliğin düşük tokluğunun yüksek olmasıdır.

#### 6.1 APS Yöntemi İle Yüzey Kaplama

Yüzeyi kaplanacak malzemeler 50x50x10 mm boyutlarında bir hidrolik testere yardımıyla kesilmişlerdir. Kesme işleminden sonra numuneler freze tezgâhına bağlanarak yüzeylerinden ince bir paso talaş kaldırılarak yüzeyleri temizlenmiştir. Temizleme işlemi sonrasında yeterli pürüzlülük oranının sağlanması için numunelerin yüzeyi kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Kumlama işlemi sonrasında Tablo 2’de belirtilen plazma parametrelerinde altlık üzerine önce bağ tabakası olan NiCoCRAIY tozu kaplanmıştır. Bu yüzey üzerine ferrokrom cürufu en son olarak da ticari tozlar kaplanmıştır.

Tablo 2: Atmosferik Plazma Sprey koşulları.

Ark debisi	80–100 l/min
Ark basıncı	0.689 MPa
Yardımcı gaz akış hızı	5–15 l/min
Yardımcı gaz basıncı	0.345 MPa
Sprey hızı	2.7–6.8 kg/h
Ark gerilimi	61–68 V
Hava akımı	70–100 mm

## **6.2 Metalografik Çalışmalar**

Deney numuneleri APS yöntemi ile kaplama işlemine tabi tutulduktan sonra kaplama ara yüzeyinin incelenmesi amacıyla metalografik muayene yapılmıştır. Bunun için numuneler sırasıyla 80 mesh'den 1200 mesh'e kadar zımpara işlemine tabi tutularak yüzeyleri temizlenmiş, sonrasında 6  $\mu$  ve 1  $\mu$ 'luk elmas pasta ile yüzeyleri parlatılmış SEM ve optik mikroskopta incelenebilecek hale getirilmiştir.

## **6.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM- Scanning Elektron Microscopy)**

Yüzeyleri kaplanan numunelerin ara yüzeyleri SEM mikroskobunda incelenerek çeşitli büyütmelerde fotoğrafları çekilmiştir. Ayrıca, kuru-kayma aşınma deney testine tabi tutulan numunelerin aşınma yüzeylerinden fotoğraflar alınarak, numune yüzeyinde meydana gelen aşınma tipinin tespit edilmesinde faydalanılmıştır.

## **6.4 Noktasal Analiz Çalışmaları (EDS- Energy Dispersive Spectroscopy)**

SEM mikroskobunun bir ünitesini oluşturan EDS modülü ile numunelerin ihtiyaç duyulan noktalarından noktasal, bölgesel ve çizgisel analizleri yapılmıştır.

## **6.5 X- 3D Optik Profilometre İncelemeleri**

Numunelerin aşınma hacim kayıplarının belirlenmesinde ve yüzey profillerinin tespit edilmesinde kullanılmıştır.

## **6.6 Sertlik Deneyleri**

Deney numunelerinin sertlikleri Qness marka mikro sertlik cihazında 2 g yük ve 1 g/sn yükleme hızı kullanılarak alınmıştır.

## **6.7 Kuru-Kayma Aşınma Deneyleri**

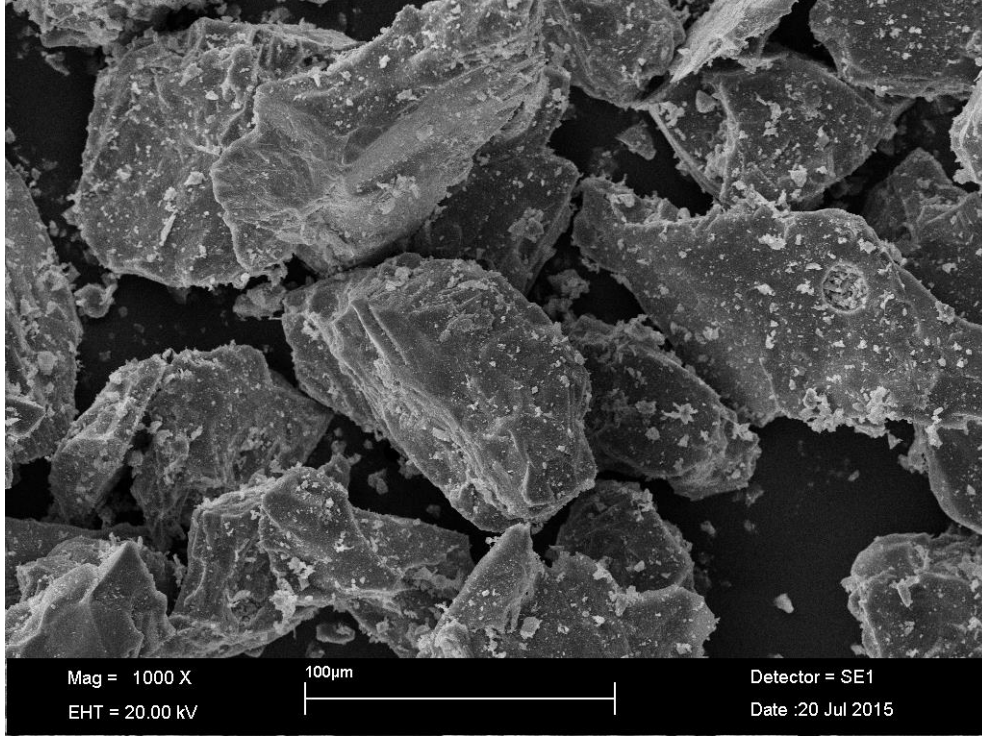
Kuru-kayma aşınma testleri oda sıcaklığında 6 mm çapında tungsten karbür bilya kullanılarak Ball-on-disk tribometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sert karbür bilya

sertlikleri 19GPa'dır. APS yöntemi ile yüzeyi kaplanmış 50x50x8 mm boyutlarındaki numuneler deney cihazının döner tablasına yerleştirilerek sabitlenmiştir. Aşınma testleri 0.08, 0.16 ve 0.26 m/s kayma hızlarında 7 N, 10 N ve 13 N'luk yükler altında gerçekleştirilmiştir. Numunelere toplamda 500, 700 ve 900 m'lik yollar aldırılmıştır. Deneylerin geçerliliğini arttırabilmek için her bir deney 3 defa gerçekleştirilerek ortalama değer alınmıştır. Aşındırma işleminden sonar numunelerin hacim kayıplarını belirlemek için aşınma oluşunun kesit görünüşünde 3D profil metre ile kesit yüzeyin görüntüsü alınmıştır. Bir çember üzerinde 90 derecelik açılarla toplamda 4 bölgenin kesit yüzeyi alınmıştır.

## BÖLÜM 7

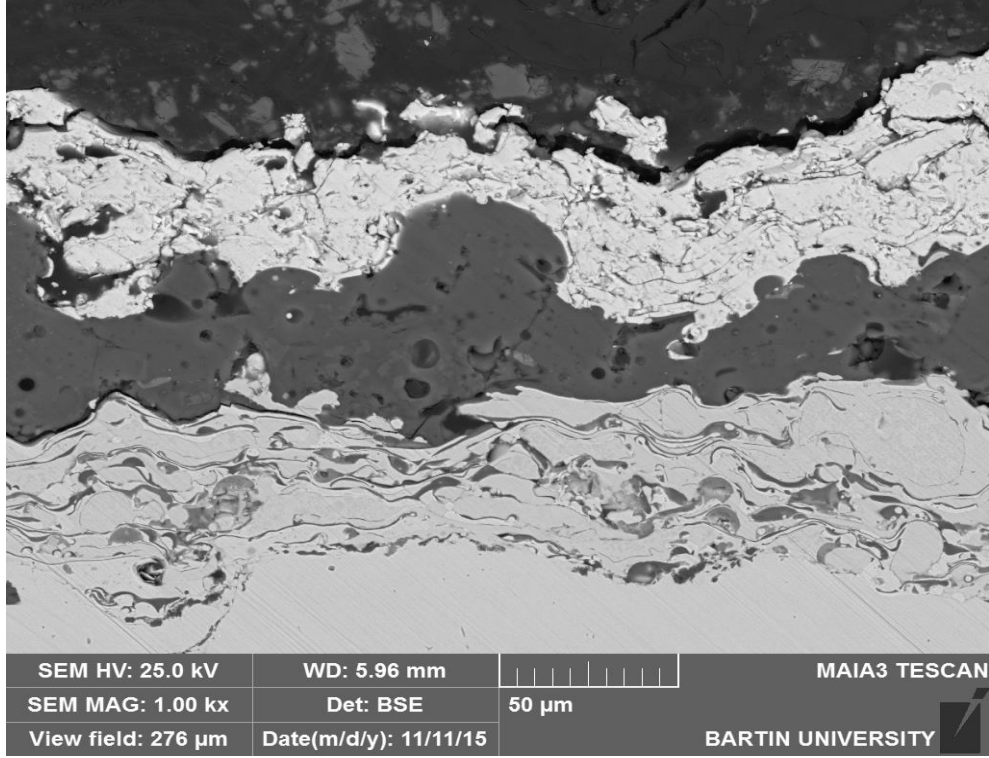
### BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada  $TiO_2 +45 Cr_2O_3$ ,  $ZrO +5 Co$ ,  $WC +12 Co$  ticari tozları (45-63  $\mu m$ ) ve ferrokrom tozları (63-100  $\mu m$ ) AISI 316 L tipi paslanmaz çelik alt yüzey üzerine APS (Atmosferik Plazma Yöntemi) kullanılarak kaplanmıştır. Alt yüzey üzerine NiCoCRAIY bağ tabakası kaplanmıştır. Kaplama işleminden sonra numunelere 7, 10 ve 13 N'luk yükler altında kuru kayma aşınmasına tabi tutulmuştur. Kaplama işleminde kullanılan ferrokrom tozlarının SEM görüntüleri Şekil 34'de verilmiştir. Tozların prizmatik formada olduğu gözlenmiştir.



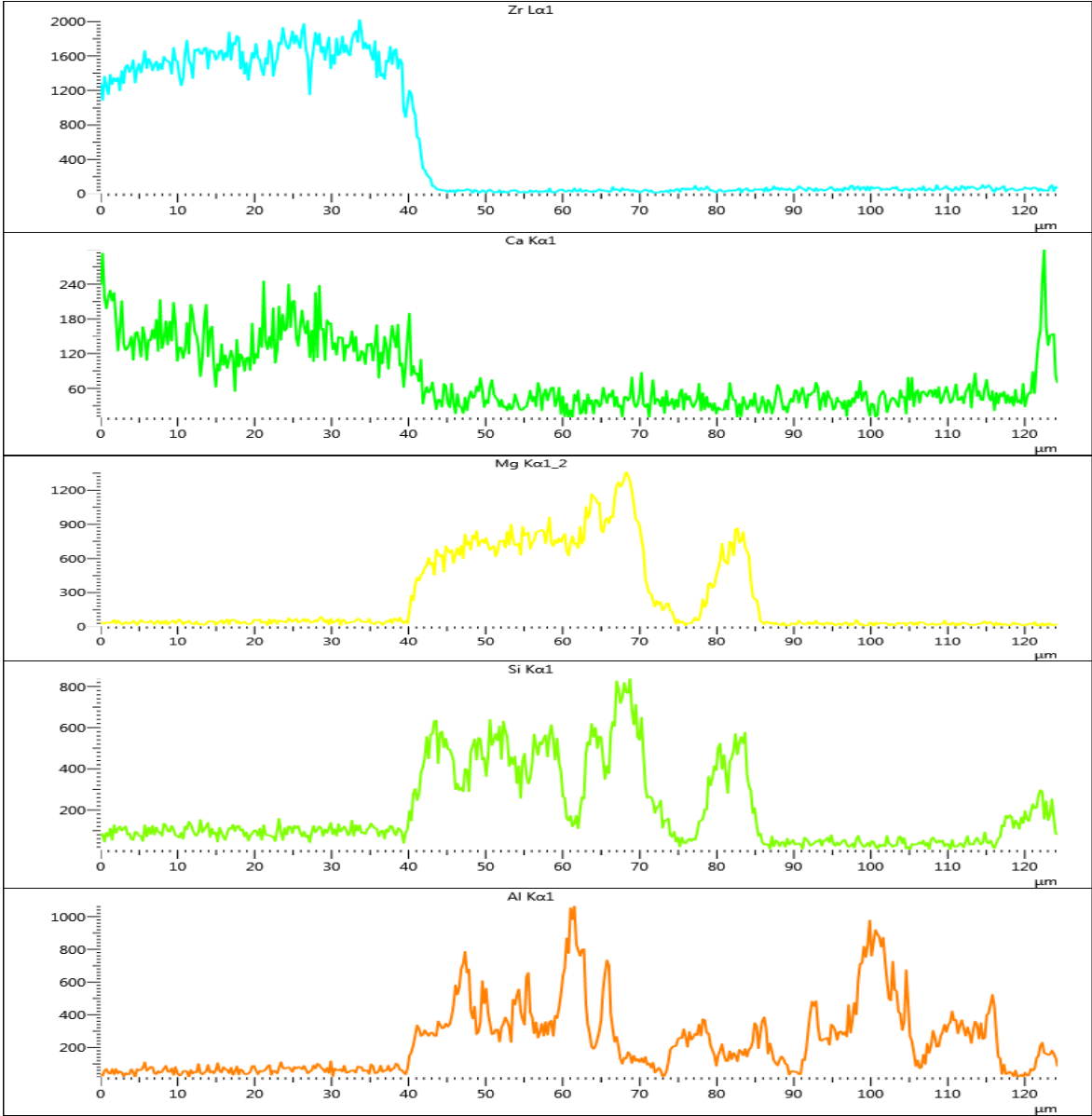
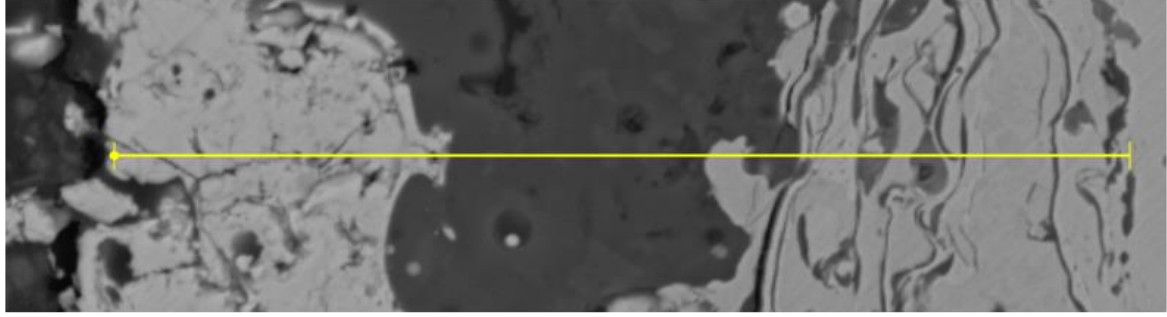
Şekil 34: Öğütülmüş ferrokrom cürufunun SEM görüntüsü 1000x.

Şekil 35' de AISI 316 L tipi paslanmaz çelik üzerine  $ZrO +5 Co$  ticari tozu, ferrokrom cüruf tozu ve NiCoCRAIY bağ tabakası APS yöntemi ile kaplama işleminden sonra alınan SEM mikro yapı fotoğrafı verilmiştir. Fotoğraf üzerinde 4 bölge işaretlenmiştir. Bunlar 1- AISI 316 L alt yüzey; 2- NiCoCRAIY bağ tabakası; 3- Ferrokrom cüruf tabakası; 4-  $ZrO +5 Co$  ticari tozudur. Katmanlar arasındaki elemental farkı anlaya bilmek için SEM mikroskobu yardımı ile yapılan EDS analizi Şekil 36 ve 37 de verilmiştir.



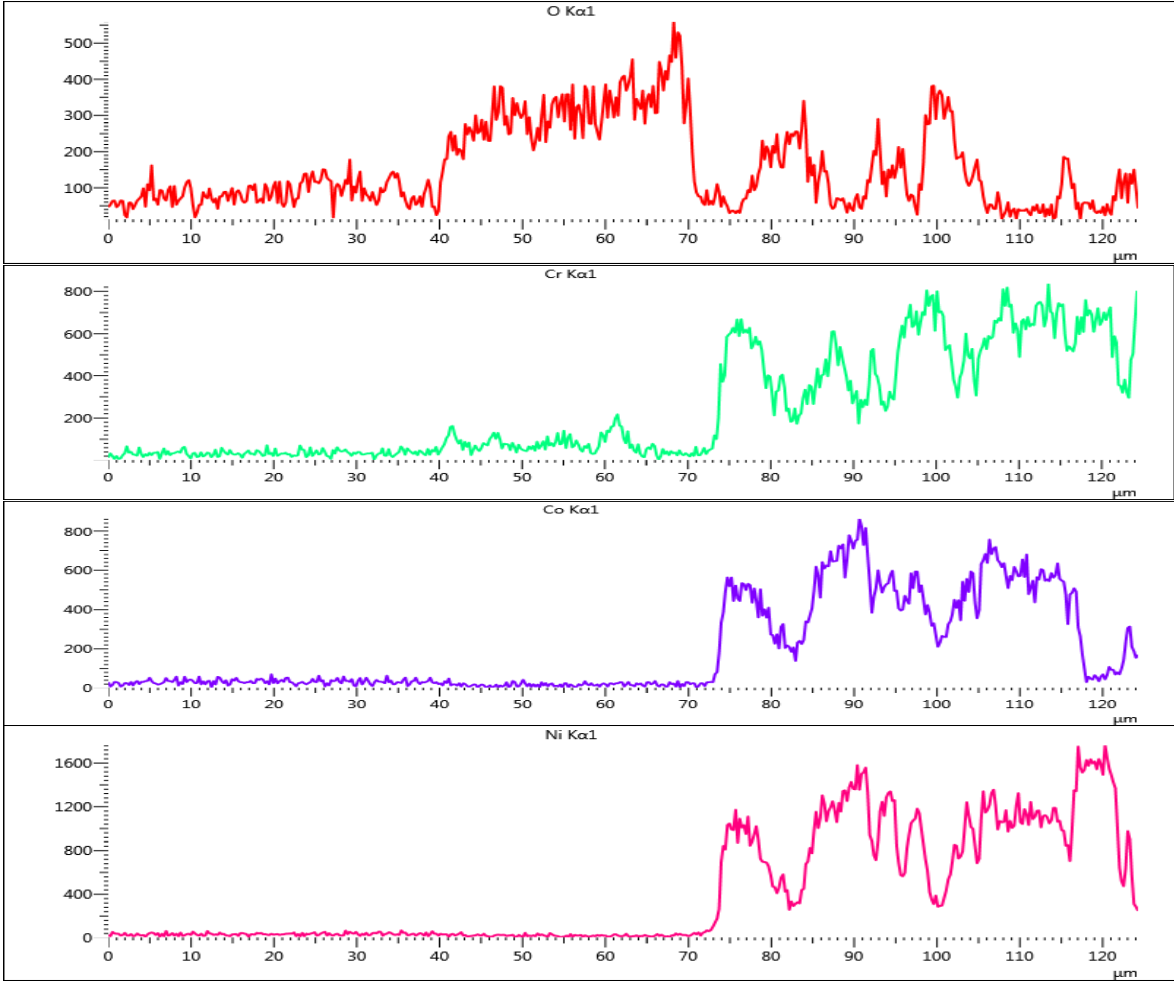
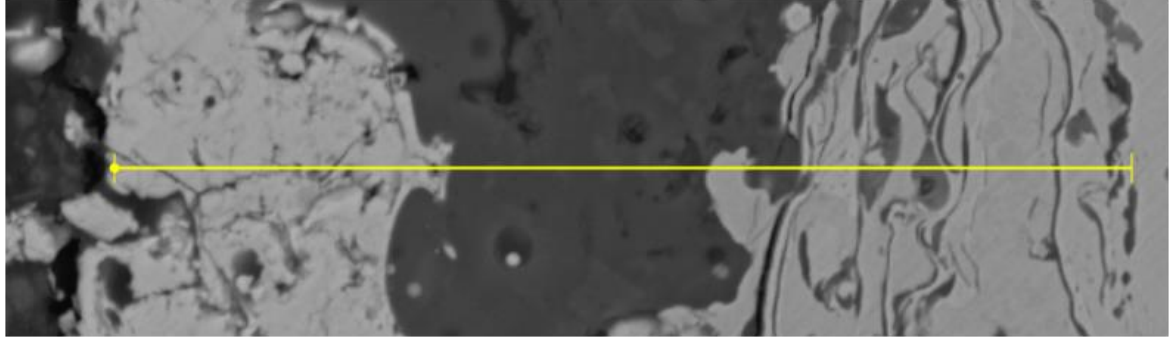
Şekil 35: ZrO +5 Co APS kaplamanın kesit görünüşü 1000x.

SEM mikroskobundan alınan EDS değerlerine göre fotoğraf üzerinde sol tarafta kalan beyaz bölgede Zr elementinin ve Ca elementinin varlığı görülmektedir. SEM resmi üzerinde siyah bölge olarak görülen ve ferrokrom cüruf kaplama bölgesi olan kısımda ise ferrokrom cürufunun oksijenli bileşikleri olan Mg, Al, Si ve O elementlerinin varlığı açıkça görülmektedir. Alt yüzey üzerine atılan bağ tabakasının ise (en sağda kalan kısım) Cr, Co, Ni ve Al den ibaret olduğu anlaşılmaktadır.



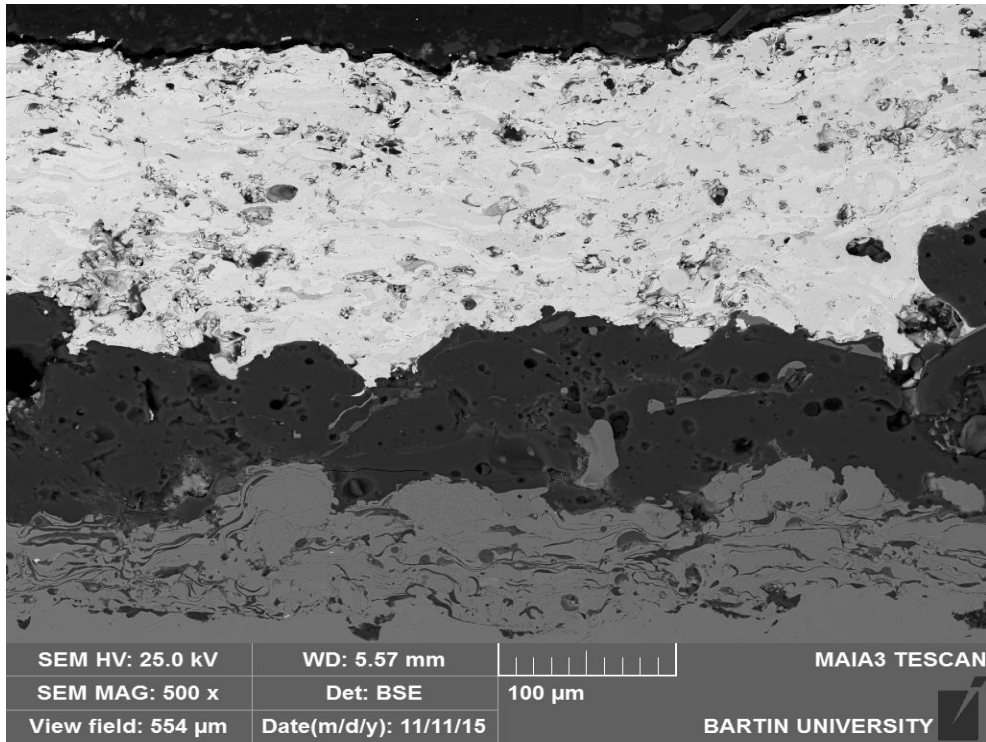
Şekil 36: ZrO +5 Co APS kaplama üzerinden Zr, Ca, Mg, Si, Al için çizgisel alınan EDS analiz raporu.



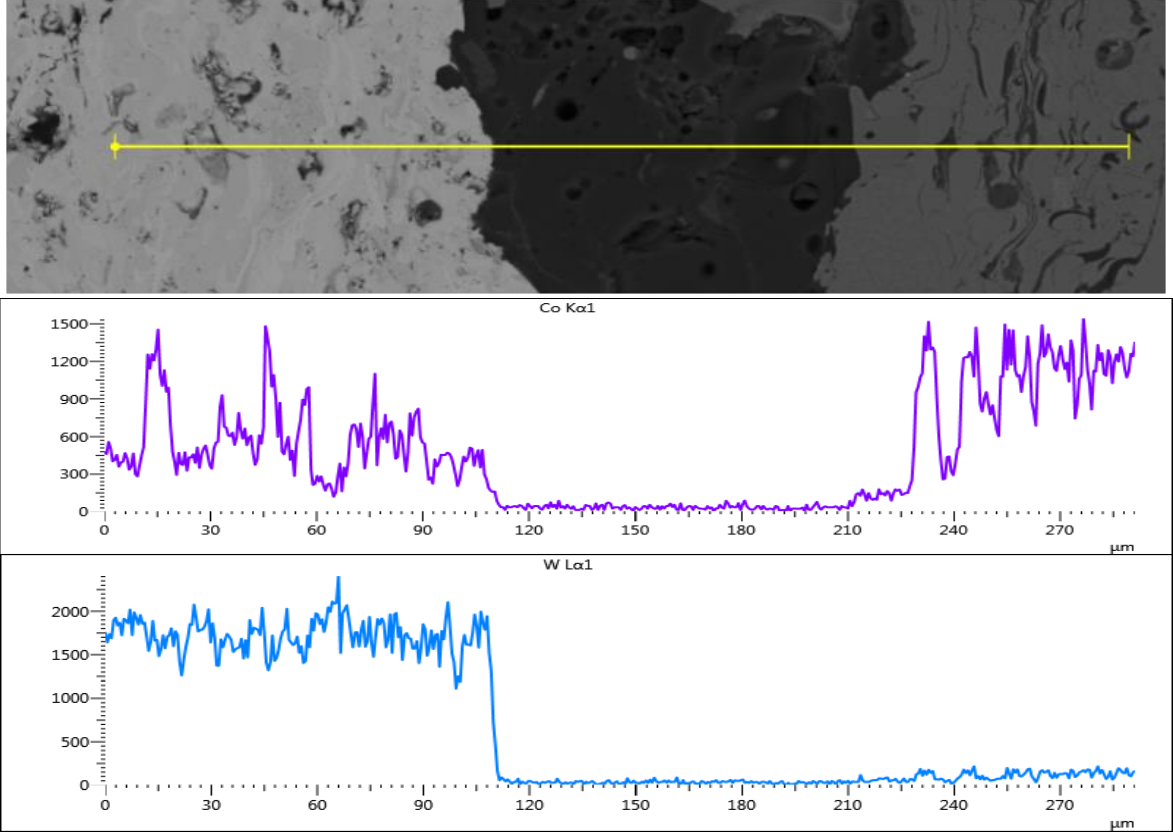


Şekil 37: ZrO +5 Co APS kaplama üzerinden O, Cr, Co ve Ni için çizgisel alınan EDS analiz raporu.

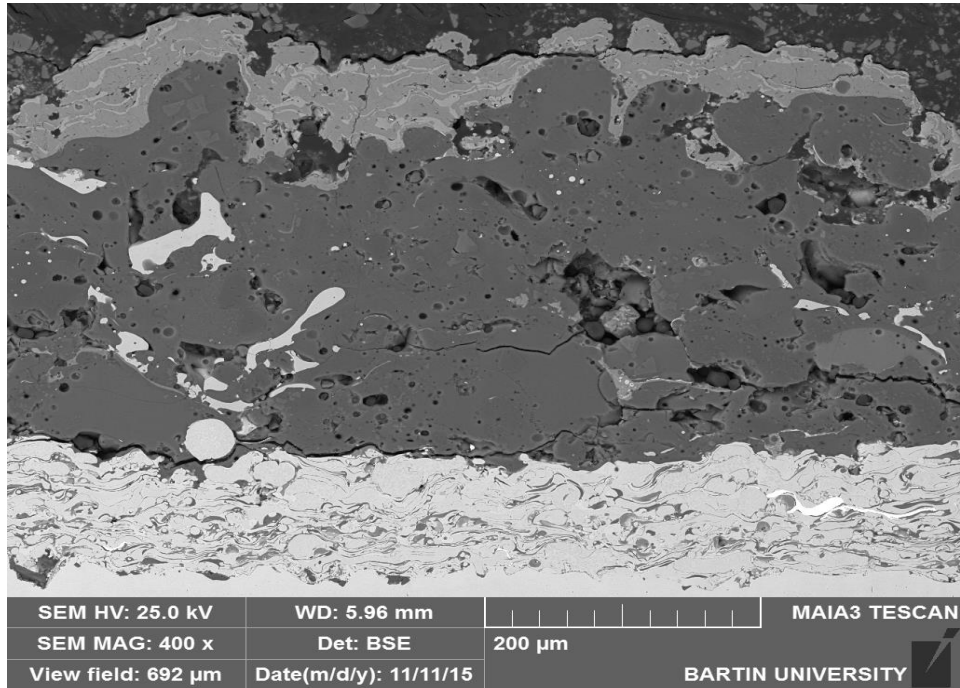
Şekil 38’ de AISI 316 L tipi paslanmaz çelik üzerine WC +12 Co ticari tozu, ferrokrom cüruf tozu ve NiCoCRAIY bağ tabakası APS yöntemi ile kaplama işleminden sonra alınan SEM mikro yapı fotoğrafı verilmiştir. Yine yapının dört katmandan oluştuğu görülmektedir. Gerçi alt yüzey tabakasının çok dar kısmı fotoğrafa girmiş olsa da düz bir form olarak seçilmektedir. Yine SEM mikroskobundan alınan EDS değerleri incelenecek olursa (Şekil 39), fotoğraf üzerinde sol tarafta kalan beyaz bölgede W elementinin ve Co elementinin varlığı görülmektedir. Bundan sonra gelen bölgelerde kullanılan kaplama malzemesinde herhangi bir değişim olmadığından benzer EDS analiz sonuçları elde edildiği için tekrar verilmemiştir.



Şekil 38: WC +12 Co APS kaplamamın kesit görünüşü 500 x.



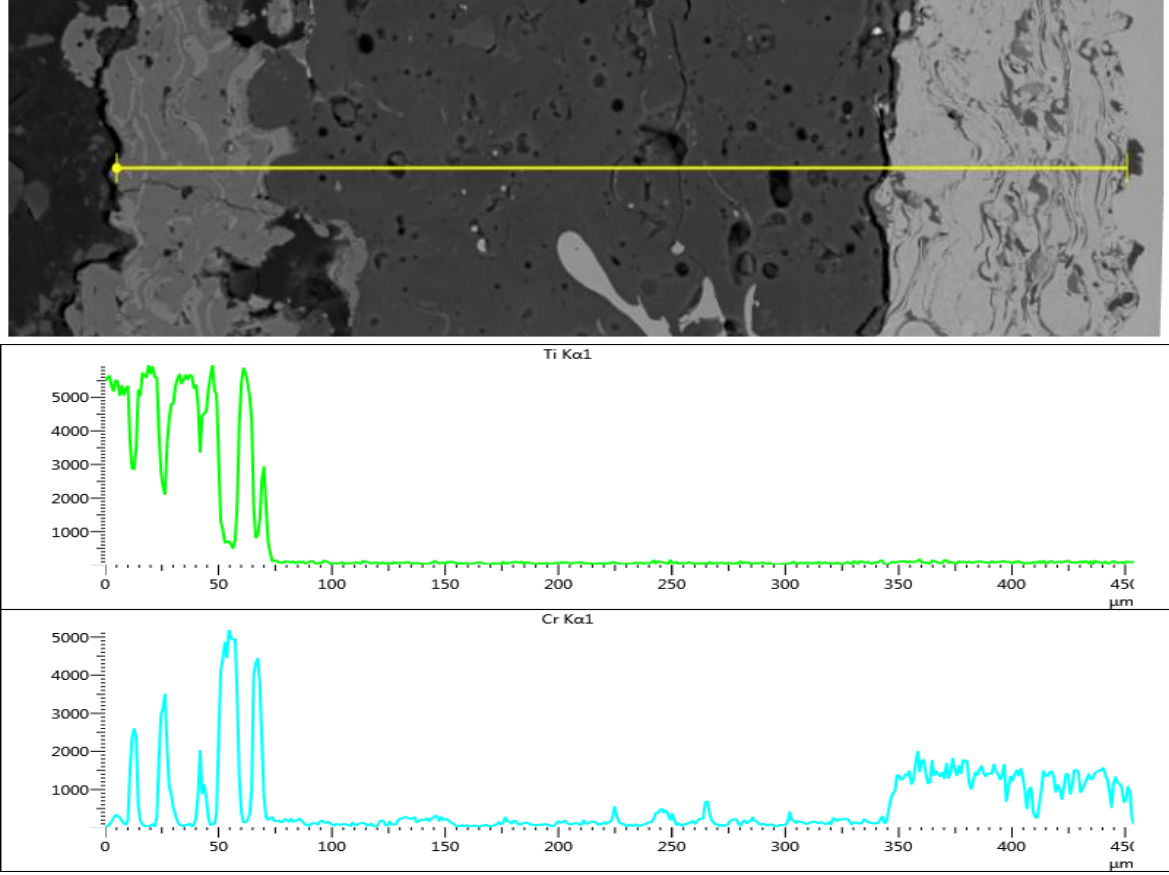
Şekil 39: WC +12 Co APS kaplama üzerinden çizgisel alınan EDS analiz raporu.



Şekil 40: TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> APS kaplamanın kesit görünüşü 400x.

Şekil 40' de AISI 316 L tipi paslanmaz çelik üzerine TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ticari tozu, ferrokrom cüruf tozu ve NiCoCRAIY bağ tabakası APS yöntemi ile kaplama işleminden sonra alınan

SEM mikro yapı fotoğrafı verilmiştir. Şekil 41 ise SEM mikroskobundan alınan EDS analiz değerleri verilmiştir, fotoğraf üzerinde sol tarafta kalan yaklaşık 40 µm kalınlığında beyaz bölgede Ti elementinin ve Cr elementinin varlığı görülmektedir. Bundan sonra gelen bölgelerde kullanılan kaplama malzemesinde herhangi bir değişim olmadığından benzer EDS analiz sonuçları elde edildiği için tekrar verilmemiştir.



Şekil 41:  $TiO_2 + 45 Cr_2O_3$  APS kaplama üzerinden çizgisel alınan EDS analiz raporu.

Numunelerin aşınma testleri, pin-on disk test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 6 mm çapında Tungsten Karbür (WC) aşındırıcı sert bilyeler kullanılarak, kuru sürtünme şartlarında, 0,18 m/sn sabit kayma hızında 7, 10, 13N yükler altında 1000 m ve 1500 m kayma mesafesinde, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aşınma izleri optik profil metre ile taranarak 2D (2 boyutlu) ve 3D (3 boyutlu) aşınma iz profilleri çıkarılmıştır. 2D aşınma iz profilleri Solid Works 2012 programına aktarılarak 3D olarak modellenmiş ve hacimsel aşınma miktarları hesaplanmıştır. Ayrıca her bir numune için Taramalı Elektron Mikroskop (SEM)'nda aşınma yüzeyi taranarak SEM görüntüleri (mikroğrafları) elde edilmiştir.

Öncelikle artan yüke bağlı olarak tüm numunelerin hacimsel kayıplarında artış olmuştur. En düşük kayıp WC +12 Co numunede gerçekleşirken bunu yüzeyi ZrO +5 Co, ve TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplı numuneler sırasıyla takip etmiştir.

Aşındırıcı olarak kullanılan bilya üzerine yük uygulandığı zaman alt yüzey üzerindeki en büyük gerilme etkileşim dairesinin merkezinde (bilya-numune temas noktası) oluşacaktır. Etkileşim bölgesinde meydana gelen ortalama basınç  $w/\pi.a^2$  formülü ile orantılı olacaktır. Burada w uygulanan yük, a ise etkileşim alanının yarıçapıdır. Hem etkileşim hem de bu yüzey altındaki bölgelerde artan yük ile birlikte maksimum basma gerilmesi ve bilyanın kayma kuvvetinin etkisiyle teğetsel kayma gerilmeleri meydana gelecektir. Kaplama bölgesinin plastik deformasyona uğramasında bu gerilmeler etkili olacaktır. Ayrıca artan yüke bağlı olarak adheziv aşınma mekanizmasının temelini oluşturan soğuk kaynama mekanizması daha aktif olarak meydana gelecektir. Bu durum ise daha fazla oranda aşınma parçacıklarının oluşmasına sebebiyet verecektir. Çok daha yüksek yüklerde ise daha yüksek oranlarda oluşacak kayma gerilmeleri plastik akışı hızlandıracaktır. Ayrıca artan yüke bağlı olarak basma gerilimi değerleri artacak, bu ise yüzey bölgesinde çatlak çekirdeklenmelerine ve kaplamanın kırılarak dökülmesine sebebiyet verecektir. Literatürde kaplama yüzeyinden aşınma etkisi ile kopan parçacıklar sistemde abraziv aşındırıcı olarak iş göreceği de belirtilmektedir (Ageorges ve Ctibor, 2008).

Aşınma, yüzeylerin birbirleri üzerinde izafi hareketi sonucunda oluşur. Bu esnada malzemelerde fiziksel ve kimyasal değişimler oluşur. Aşınma süresince malzeme bileşimi ve topoğrafyasında değişime sebep olur. Bu sırada ortaya çıkan enerjinin de; sürtünme, aşınma, hız, sıcaklık, ses ve dinamik davranışlar üzerinde etkisi olur dolayısı ile aşınma çok kompleks bir yapıya sahiptir.

Tribolojik etkileşimde farklı parametreler rol oynamaktadır. Örneğin, alt yüzey ve kaplamanın sertliği, kaplamanın kalınlığı, pürüzlük ve aşınma parçacıkları buna örnek verilebilir. Tribolojik etkileşimde ilk temas pürüzler vasıtası ile olacağından malzeme yüzey pürüzlüğünün düşük olması istenir. Çünkü pürüzler üzerindeki gerilim ve şekil değişimi çatlakların oluşmasına ve yayılmasına, dolayısıyla aşınma parçacıklarının oluşmasına sebebiyet verir. Sistemden atılan veya tekrar sisteme dahil olan bu parçacıklar aşınma mekanizmasının oluşmasında önemli rol oynar.

APS yöntemi ile uygulanan yüzey modifikasyonu işlemlerinde genellikle sertliği düşük ve tokluğu yüksek bir alt malzeme üzerine yüksek sertlik ve ergime direncine sahip parçacıklar mekanik olarak yapıştırılır. Tribolojik birçok uygulama için bu durum geçerlidir. Yumuşak alt yüzey üzerine ince sert bir kaplama yapıldığında kaplama üzerlerine uygulanan yükü yeterli bir şekilde destekleyemeyeceklerdir. Ancak kaplama tabakası sahip olduğu sertlikle orantılı olarak, aşındırıcı ve alt yüzey arasında bir ara tabaka oluşturacak ve alt yüzeyin sürülme aşınmasına maruz kalmasını da önleyecektir. Wiklund vd. (1999), tarafından yapılan çalışmalarda artan kaplama kalınlığı ile aşınma direncinin arttığı ve yine Ronkainen vd. (1999), tarafından da artan alt yüzey sertliği ile etkileşim alanın azalarak sürtünmenin azaldığını belirtmişlerdir.

Sert ve pürüzlü olan bir kayma sisteminin karşı yüzeyle etkileşimi sırasında sistemden ayrılan küçük aşınma parçacıkları pürüzlerin arasına girmesi sonucu iki sonuç ortaya çıkabilir. Birincisi sistemde yük ve hareketin etkisi ile abrasiv aşındırıcı olarak iş görebilir. Diğer bir seçenek ise bu parçacıklar yüzeyde pürüzler tarafından açılan olukların içerisine girerek veya yumuşak alt yüzeye batarak yük taşıyıcı eleman gibi iş görürler.

Tribolojik etkileşimlerde aşınma proseslerinin sonucunda etkileşim bölgelerinde atıklar meydana gelir. Kaymalı yüzeyler arasındaki etkileşim bölgesinde meydana gelen bu atıklar sürtünme katsayısının değişiminde önemli rol oynar. Hwang vd. (1999) tarafından yapılan bir çalışmada, bu araştırmacılar sürtünme katsayısının sürtünen yüzeyler arasındaki aşınma parçacıklarının temizlenmesi veya ara yüzeye parçacık ilave edilmesiyle değiştirilebileceği deneysel olarak ispat edilmiştir. Ayrıca bu işlemde parçacık boyutunun önemli olduğunu ve parçacık oranının o kadar önem taşımadığı belirtilmiştir. Farklı sertliğe sahip malzemeler üzerinde yapılan kayma testi deneylerinde yumuşak ve sert yüzeyler arasında önemli farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Yumuşak ve işlenebilir malzemelerin aşınma atıkları büyük ve bir araya gelme eğilimi gösterirken sert malzemelerin aşınma atıkları daha küçük ve toplanma eğiliminden yoksundurlar. Kaplanmış yüzeylerde sürtünme ve aşınmadan dolayı oluşan atıkların sisteme etkileri parçacık büyüklüğü ve şekli ile kaplama kalınlığı ve sertlik ilişkisi ile parçacık, kaplama ve yüzeyi kaplanan malzeme sertliği ile yakından ilişkilidir.

## 7.1 Kayma Hızı, Yük Ve Kaplama Malzemesine Göre Aşınma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kuru kayma (adhezyon) aşınması genel anlamda etkileşimli iki yüzey arasında lokal bölgelerde meydana gelen soğuk kaynama ve daha sonrasında bu kaynak bağlarının kopmasıdır. Bu esnada meydana gelen aşınma parçacıkları geçici veya kalıcı olarak yüzeylerden birisine yapışır (Research Group on Wear of Engineering Materials, 1969). adheziv aşınmada farklı parametreler etkin rol oynamaktadır. Örneğin Rabinowicz'e (1965) göre pürüzlerin sertliği malzemenin hacim sertliğinden çok daha önemlidir. Çünkü gerçek alandaki etkileşim pürüzler vasıtasıyla meydana gelmektedir. Archard'ın adheziv aşınma teorisinde ise aşınma hacmi; kayma hızı, normal yük ve malzeme sertliğinin bir fonksiyonu olarak meydana gelmektedir. (Archard, 1953; Archard ve Hirst, 1956). Sırası ile en düşük çevresel hızda (0.08 m/sn) ve 7, 10 ve 13 N luk yükler altında gerçekleştirilen aşınma deneylerinden sonra elde edilen aşınma hacmi değerleri verilmiştir. Yüke bağlı olarak grafikler değerlendirildiğinde artan yüklerle birlikte numunelerin aşınma hacimlerinde artış olduğu görülmüştür. Ancak bu artışın doğrusal bir artış olmayıp 7 ve 10 N yük ile yapılan deneylerden hesaplanan hacim kayıpları farklı numunelere göre yaklaşık 1.5 - 2 kat olurken, 13 N luk yükte hacim kayıpları 10 N luk yük altında deneye tabi tutulan numunelere yakın değer vermiştir (Tablo 3).

Tablo 3: Kaplamaların uygulanan sabit yüklere göre hacim kayıp grafiği.

Deney parametreleri		Üst kaplama tabakası		
		WC +12 Co	ZrO+5 Co	TiO <sub>2</sub> +45 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Devir (dev/dak)	Yük (N)	Hacim Kaybı (µm <sup>3</sup> )	Hacim Kaybı (µm <sup>3</sup> )	Hacim Kaybı (µm <sup>3</sup> )
0.08	7	0,05	0,07	0,11
	10	0,11	0,11	0,17
	13	0,17	0,19	0,27
0.16	7	0,07	0,07	0,11
	10	0,11	0,13	0,17
	13	0,19	0,22	0,29
0.26	7	0,08	0,09	0,12
	10	0,12	0,17	0,18
	13	0,2	0,27	0,31

Aşındırıcı olarak kullanılan bilya üzerine yük uygulandığı zaman alt yüzey üzerindeki en büyük gerilme etkileşim dairesinin merkezinde (bilya-numune temas noktası) oluşacaktır. Etkileşim bölgesinde meydana gelen ortalama basınç  $w/\pi.a^2$  formülü ile orantılı olacaktır. Burada  $w$  uygulanan yük,  $a$  ise etkileşim alanının yarıçapıdır. Hem etkileşim hem de bu yüzey altındaki bölgelerde artan yük ile birlikte maksimum basma gerilmesi ve bilyanın kayma kuvvetinin etkisiyle teğetsel kayma gerilmeleri meydana gelecektir. Kaplama bölgesinin plastik deformasyona uğramasında bu gerilmeler etkili olacaktır. Ayrıca artan yüke bağlı olarak adheziv aşınma mekanizmasının temelini oluşturan soğuk kaynama mekanizması daha aktif olarak meydana gelecektir. Bu durum ise daha fazla oranda aşınma parçacıklarının oluşmasına sebebiyet verecektir. Çok daha yüksek yüklerde ise daha yüksek oranlarda oluşacak kayma gerilmeleri plastik akışı hızlandıracaktır. Ayrıca artan yüke bağlı olarak basma gerilimi değerleri artacak bu ise yüzey bölgesinde çatlak çekirdeklenmelerine ve kaplamamın kırılarak dökülmesine sebebiyet verecektir. Literatürde kaplama yüzeyinden aşınma etkisi ile kopan parçacıkların sistemde abraziv aşındırıcı olarak iş göreceği de belirtilmektedir (Ageorges ve Ctibor, 2008).

Yükün maksimum değere (13N) ulaşması ancak aşınma hacimlerinin aynı oranda artmamasının sebebi ise; yüksek yüklerin sebep olduğu bir yoğunlaştırma işlemi ile açıklanmaktadır (Betancourt-Dougherty ve Smith, 1998). Yoğunlaştırma işlemi sayesinde meydana gelen basma yükleri ile gözenek ve bazı çatlaklar kapanmakta böylece daha

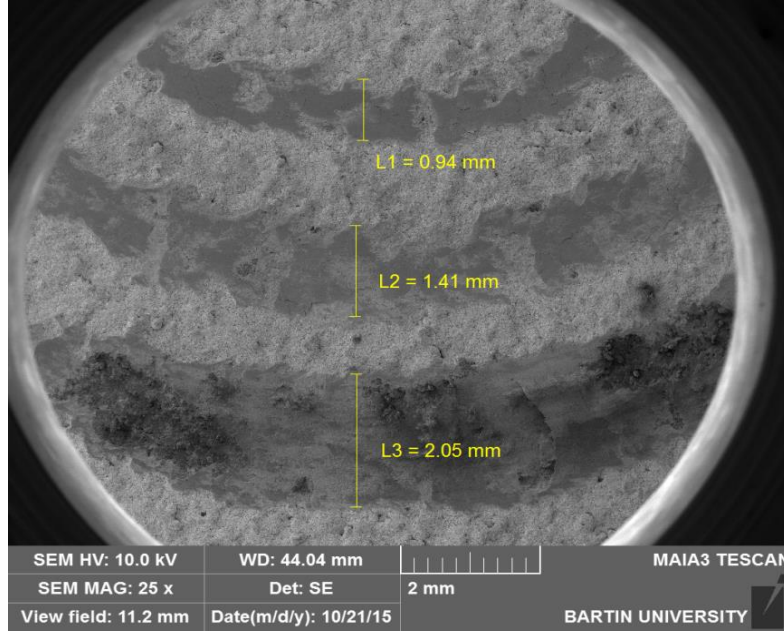


yoğun ve daha sert bir yapıya sahip bir kaplama tabakası oluşacağı için meydana gelen aşınma oranı düşmektedir. Artan yük ile birlikte meydana gelen pekleşme de aşınma oranı üzerinde etkiye sahiptir (Betancourt-Dougherty ve Smith, 1998). Diğer bir sebep ise artan yüke bağlı olarak yüzeyde oluşan koruyucu oksit tabakasının oluşmasıdır. Temas halindeki yüzeylerin öncelikle pürüzler vasıtası ile etkileşimde olduğu ve bu pürüzlerin küçük alana sahip temas tepelerinde ani bir sıcaklık artışına yol açtığı bilinmektedir. Bu ani sıcaklık artışı ise oksitlenmeyi hızlandırıcı etki göstermektedir. Numunelerin 7 N luk yük altında ve farklı kayma hızlarında elde edilen aşınma hacim kaybı değerleri verilmiştir. Kayma hızının aşınma üzerinde etkili parametre olduğu gözlenmektedir. Artan kayma hızı ile birlikte numunelerin hacim kaybı değerlerinin arttığı görülmektedir. Artan kayma hızı ile birlikte aşındırıcı bilyanın aynı noktadan geçme zamanı kısalmıştır. Dolayısıyla kaplama tabakası üzerinde meydana gelen ısının atılması daha uzun zaman alacak ve lokal ısı artışı muhafaza edilecektir. Bu durumda malzemenin akma dayanımı değeri düşecek ve aşınma oranı yükselecektir.

### **7.1.1 WC +12 Co (1200 Vickers) Kaplamanın Aşınma Davranışı**

Şekil 42' da üst yüzeyi WC +12 Co kaplanan numunenin 0.26 kayma 7, 10 ve 13 N hızlarda kuru kayma deneylerine tabi tutulduktan sonra aşınma yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü verilmiştir. Öncelikle fotoğraf üzerinde de görüleceği gibi artan yüke bağlı olarak aşınma izlerinin genişlediği açıkça görülmektedir. Ayrıca ileride yüksek büyütmedeki fotoğraflar üzerinde daha iyi anlaşılacağı üzere, aşınma izleri üzerinde koyulaşan bir tabakanın varlığı görülmektedir. Bu tabakanın içerisinde küçük beyaz renkli adacıkların varlığı görülmektedir. Artan yük ile birlikte tabakanın daha fazla koyulaştığı da dikkat çekmektedir. Literatürde Tribolojik katman olarak isimlendirilen bu katman oluşması için etkileşimli yüzeyler arasında birçok kez malzeme transferi meydana gelmektedir. Öncelikle çok düşük yüzey pürüzlülüğü ölçeğinde meydana gelen bu durum yüzey pürüzlerinin plastik deformasyona uğraması sonucu oluşmaktadır (Meyer, 2002; Scherge vd., 2003). Bu durumda zamanla yüzeyde aşınma parçacıkları oluşmaya başlamaktadır. Bu aşınma parçacıklarının oluşmasında kaplama katmanının pekleşme kabiliyeti, mikro yapısı ve tokluğu gibi birçok parametre etkili olmaktadır. Pektleşme kabiliyetinin pekleşen kaplama yüzeyinin sertlik kazanarak sert parçacıkların kırılıp yüzeyden bir aşındırıcı parçacık olarak transfer edilmesinde etkili bir faktör olacağı

düşünülmektedir. Kaplama tokluğunun ise plastik deformasyona uğrama ve dolayısıyla pekleşme kabiliyeti üzerinde etkili bir etmen olarak değerlendirilmesi mümkündür.

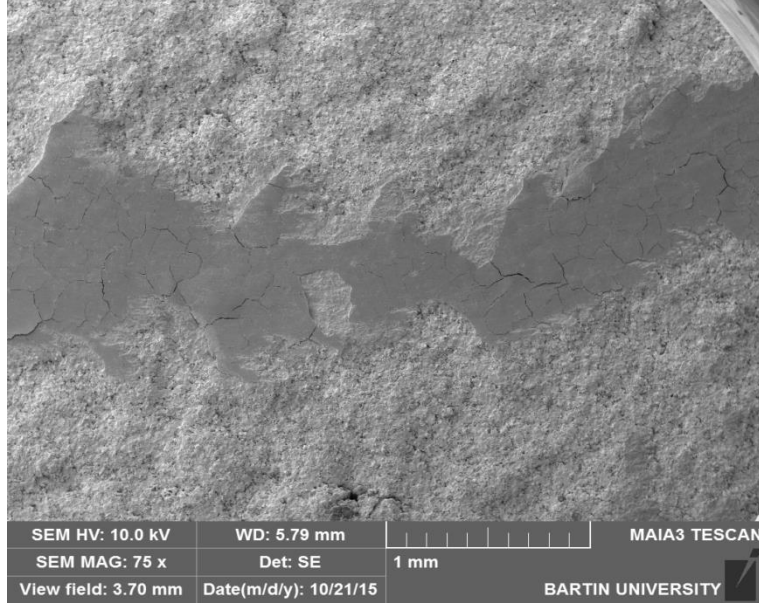


Şekil 42: SEM aşınma yüzey görüntüsü (7, 10, 13 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 25x.

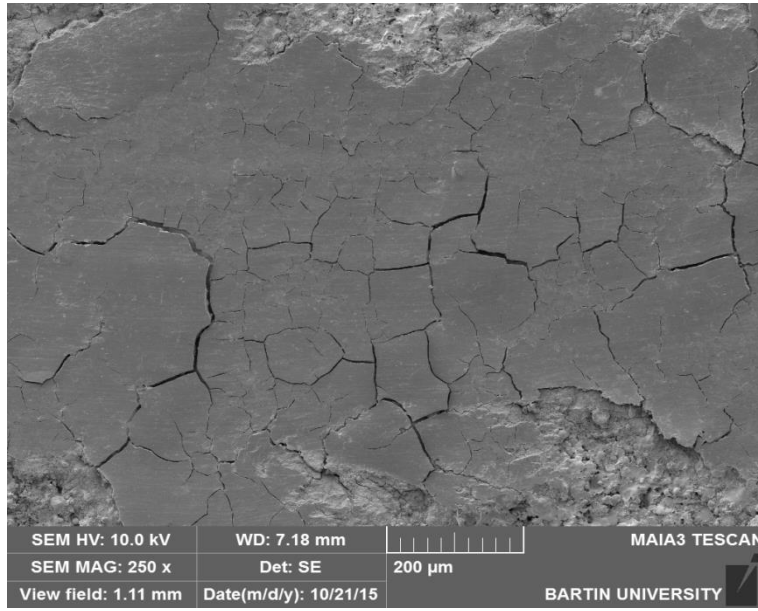
Şekil 43' da WC +12 Co ile 0.08 kayma hızında gerçekleştirilen deney sonucunda aşınma yüzeyinden alınan 75x büyütmede tribolojik katmanın varlığı açıkça görülmektedir. Bu katman tabakası daha yüksek büyütmede incelenecek olursa Şekil 44' yüzeyde tekrarlı yükler altında oluşan mikro çatlakların meydana geldiği ve bu çatlakların adacıklar halinde yüzeyde birleşip plaklar halinde yüzeyden ayrıldığı görülmektedir.

İlk kez Suh, (1973) tarafından düşük kayma hızlarında aşınma atıklarının şekillenmesinde delaminasyon tipi aşınma teorisi ortaya konulmuş ve sonrasında bu teori kabul görmüştür. Delaminasyona bağlı olarak atıkların oluşması dört adımda gerçekleşmektedir.

Normal ve açısız yükler altında yüzey katmanlarında plastik deformasyonun meydana gelmesi, İnküzyonların veya ikinci faz parçacıklarının çevresinde deformasyon etkisi ile boşluk veya çatlakların çekirdeklenmesi, yüzeye paralel olarak çatlakların gelişmesi, ince ve uzun olarak aşınma parçacıklarının şekillenmesi ve bunların yüzeyden atılması olarak tarif edilmektedir. Numunenin yukarıda anlatılan delaminasyon tipi aşınmaya maruz kaldığı görülmüştür.

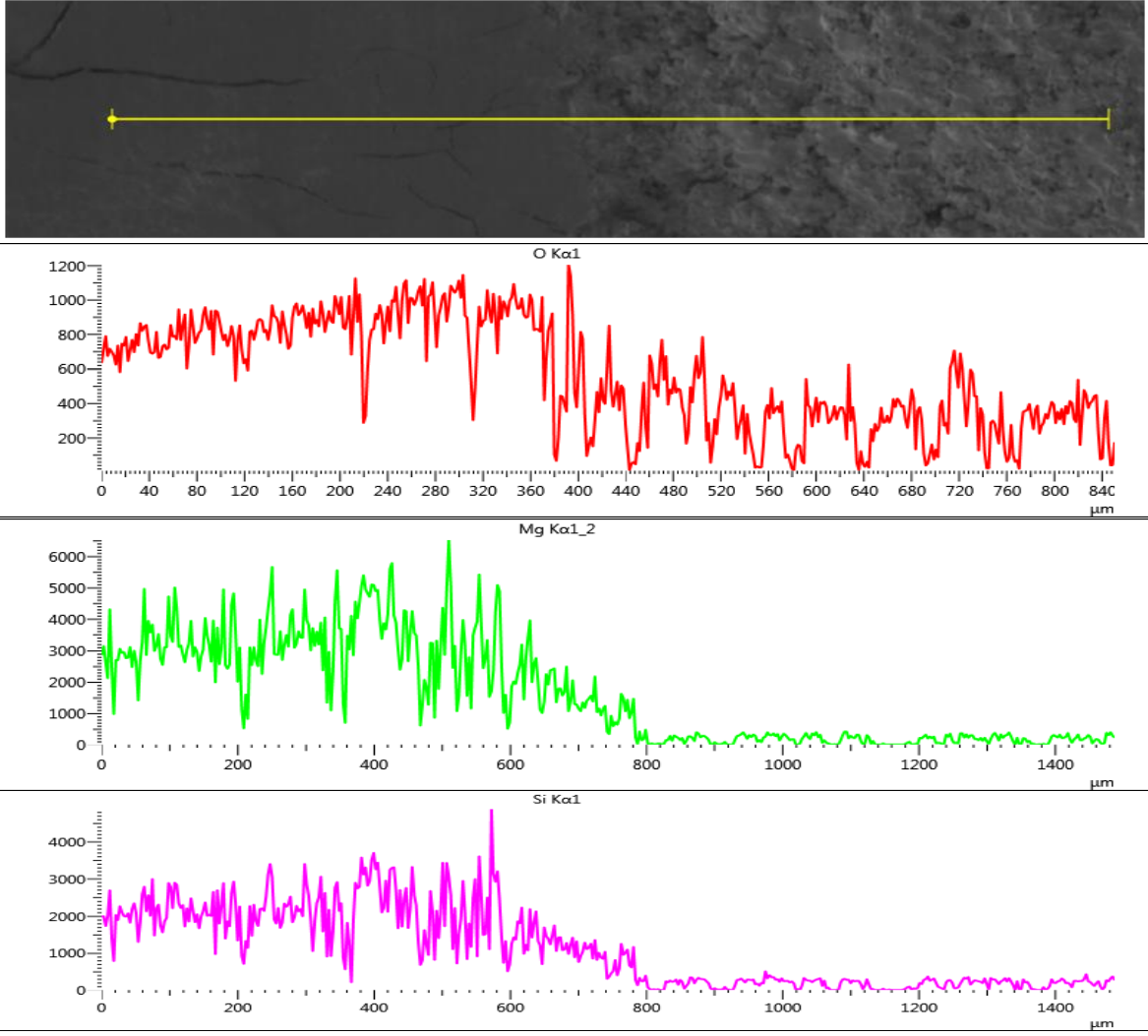


Şekil 43: SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 75x.

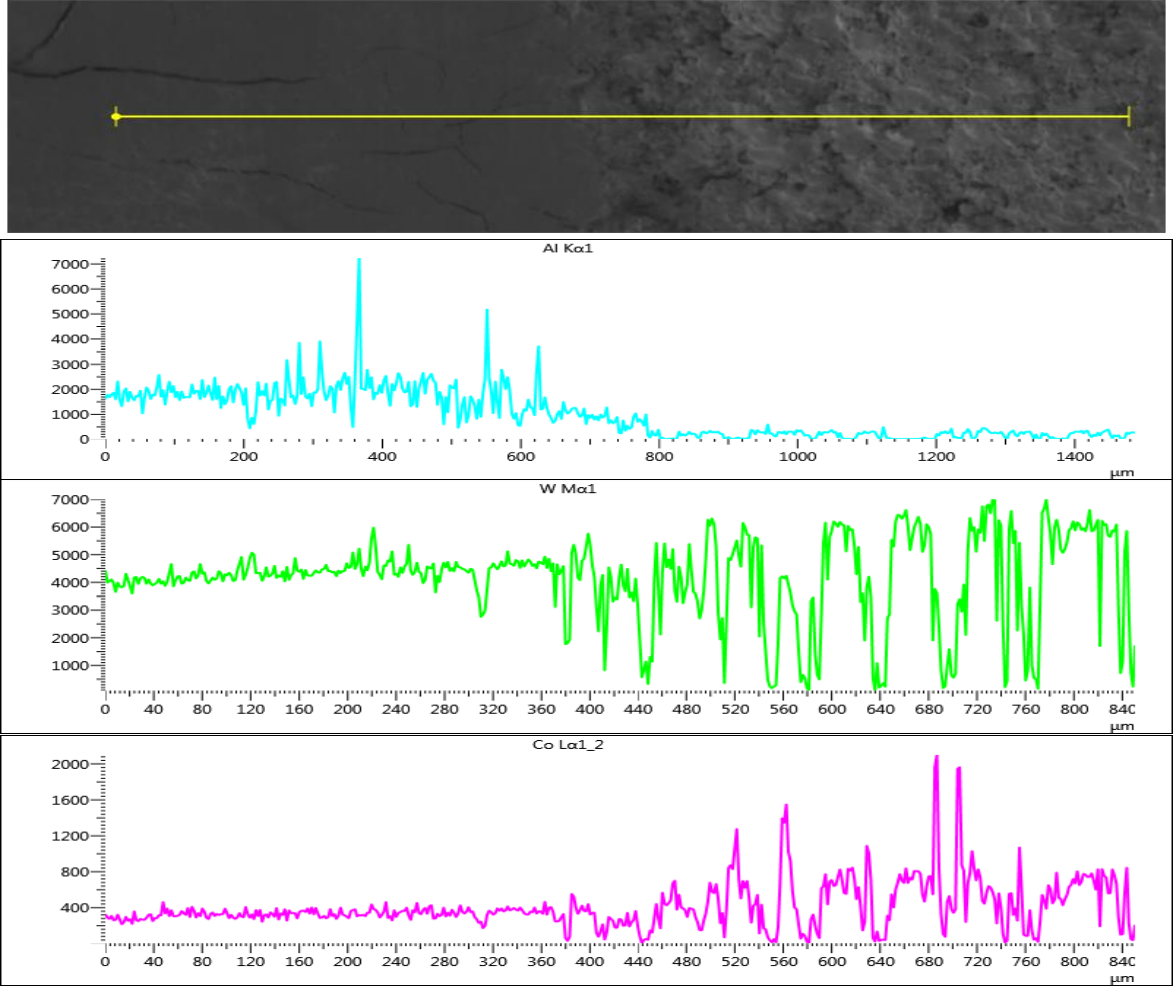


Şekil 44: SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 250x.

Şekil 45 ve 46’de aşınma yüzeyinden başlayarak, kaplama bölgesine uzanan bir hat boyunca SEM mikroskobu yardımı ile EDS analizi alınmıştır. Kaplama bölgesinde W ve Co elementinin varlığı görülürken, aşınma bölgesinde ferrokrom cürufunun bileşimini oluşturan bileşiklerden Al, Ca ve Mg elementlerinin varlığı ile birlikte oksijen elementinin varlığı görülmektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki en üst yüzeye atılmış olan WC +12 Co yüzeyinin ortadan kalkmış olduğu ancak onun altında olan cüruf tabakasının varlığını koruduğu ve aşındırıcı bilyanın alt yüzeye ulaşmasına izin vermediği görülmüştür.



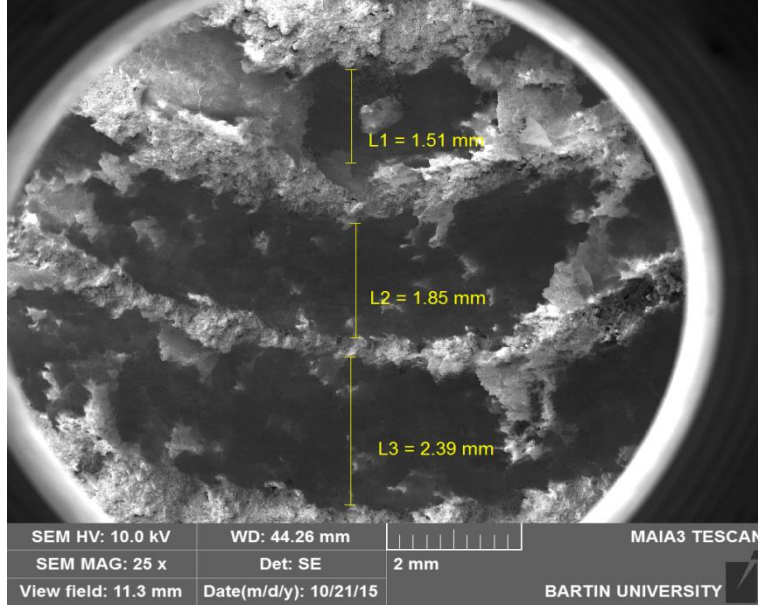
Şekil 45: O, Mg, Si için aşınma yüzeyi üzerinden alınan çizgisel EDS analiz raporu (WC +12 Co).



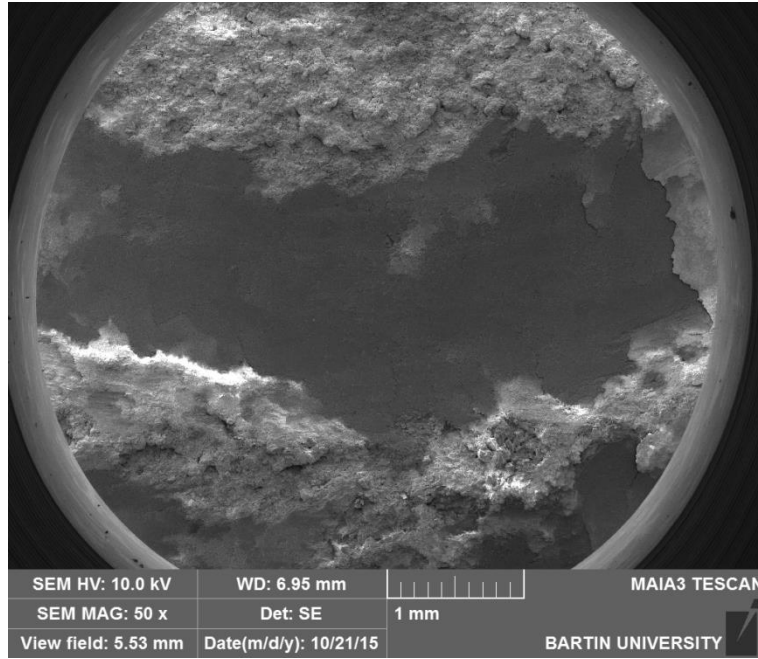
Şekil 46: Al, W, Co için aşınma yüzeyi üzerinden alınan çizgisel EDS analiz raporu (WC +12 Co).

### 7.1.2 ZrO +5 Co (900 Vickers) Kaplamanın Aşınma Davranışı

Şekil 47' de en üst yüzeyi ZrO +5 Co ile kaplanan numunenin üç farklı yük 7, 10, 13 N'luk yük ve 0.26 m/sn hızda aşınma deneylerine tabi tutulduktan 25 x lik büyütmede yüzeyinden alınmış SEM fotoğrafı verilmiştir. Bir öncekinde olduğu gibi yine numune yüzeyinde de tribolojik katmanın varlığı görülmektedir. Aşınma yolunun biraz daha genişlemiş olduğu görülmektedir. Aşınma mekanizması olarak değerlendirilecek olursa üst yüzeyi ZrO +5 Co kaplı numunenin aşındırılması esnasında oluşan tribolojik katmanın daha kuvvetli olduğu görülmektedir. Şekil 48 bunun sebebini ZrO +5 Co kaplanmış yüzeyin WC +12 Co esaslı yüzeye göre daha yumuşak olması ile açıklamak mümkündür.



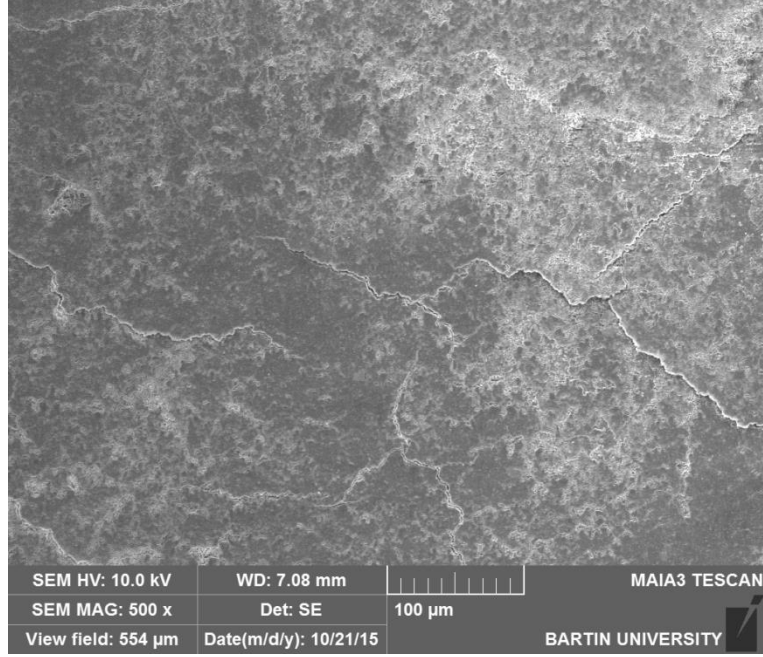
Şekil 47: 7N'luk yük 0.08 kayma hızında 4 nolu numune üzerinden alınmış SEM yüzey görüntüsü 25x.



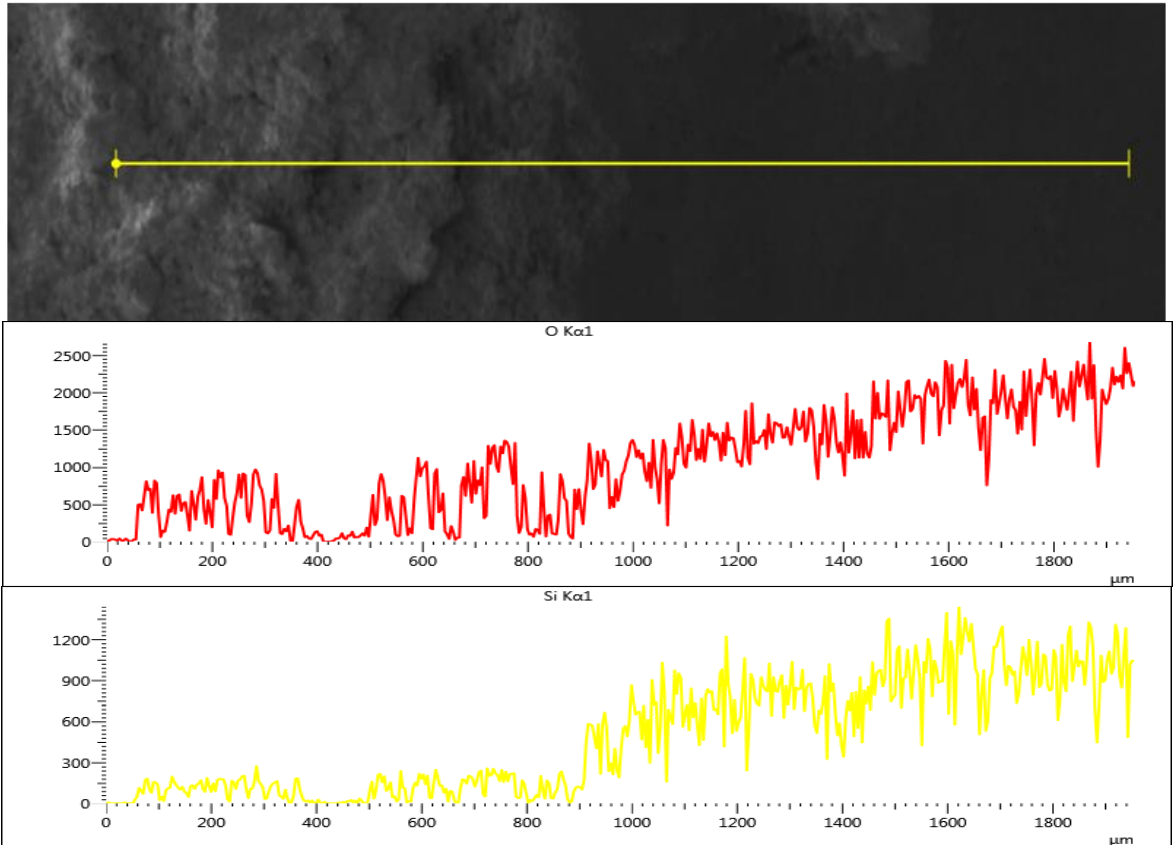
Şekil 48: SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 50x.

Böylelikle aşındırıcı çelik bilya yukarıdaki katmanı kaldırarak ferrokrom cürufu kaplı alt yüzeye ulaşmış bu tabakanın daha yumuşak bir karaktere sahip olmasından dolayı şekilde de görüleceği gibi pürüzsüz yüzey oluşmuştur. Ayrıca yüzeyin çok daha koyu olması yüzeyde şiddetli bir oksit tabakasının oluştuğunu göstermektedir.

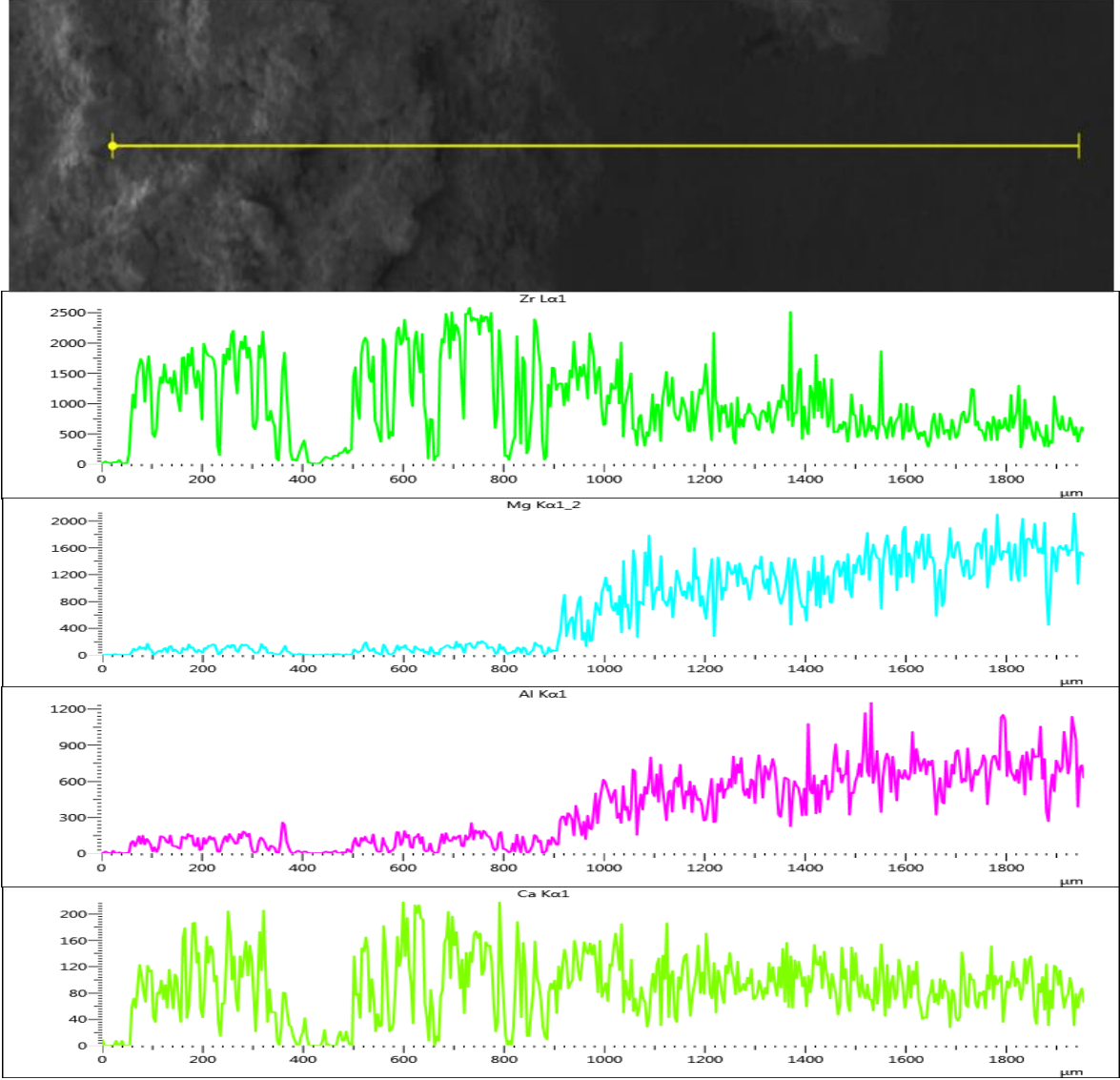




Şekil 49: SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 500x.



Şekil 50: O ve Si için aşınma yüzeyi üzerinden alınan çizgisel EDS analiz raporu (ZrO +5 Co).



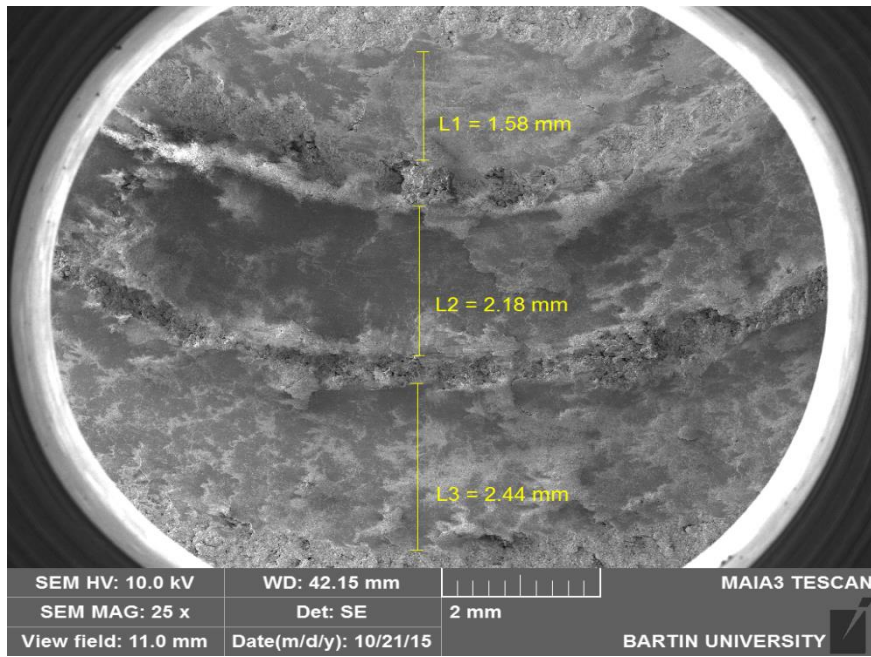
Şekil 51: Aşınma yüzeyi üzerinden alınan çizgisel EDS analiz raporu (ZrO +5 Co).

Şekil 49’de 500x de verilen aşınma izi fotoğrafında bir önceki numune ile kıyaslanacak olursa, yorulma sonucu meydana gelen çatlamların daha büyük adacıklar şeklinde meydana geldiği görülmektedir. Aşınma yüzeyi üzerinden katmanlar arasındaki elemental farkı anlayabilmek için SEM mikroskobu yardımı ile alınan çizgisel EDS analiz raporu Şekil 50 ve 51’de verilmiştir. Yumuşak ve tokluğu daha yüksek olan bu cüruf tabakası daha iyi plastik deforme olarak aşınma mekanizmasının daha yumuşak gerçekleşmesine yardımcı olmuştur.

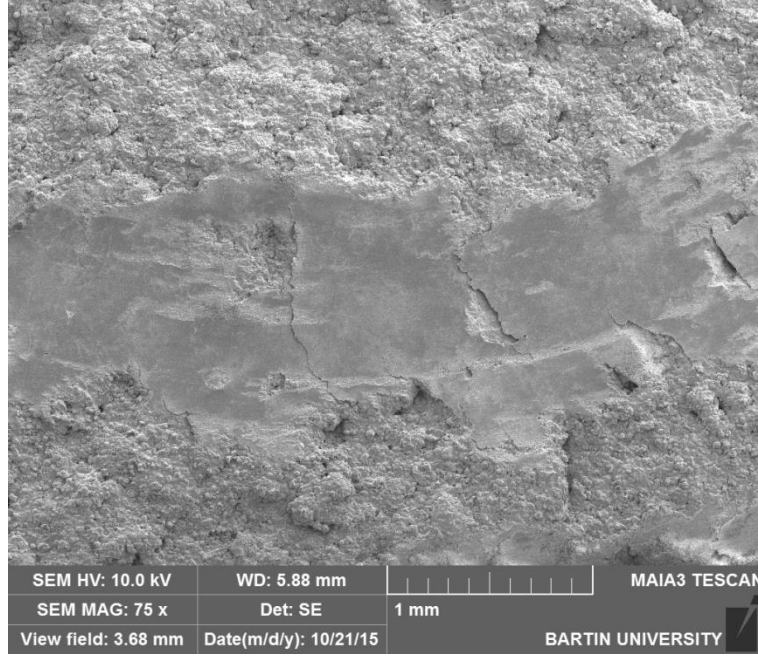


### 7.1.3 TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (650 Vickers) Kaplamanın Aşınma Davranışı

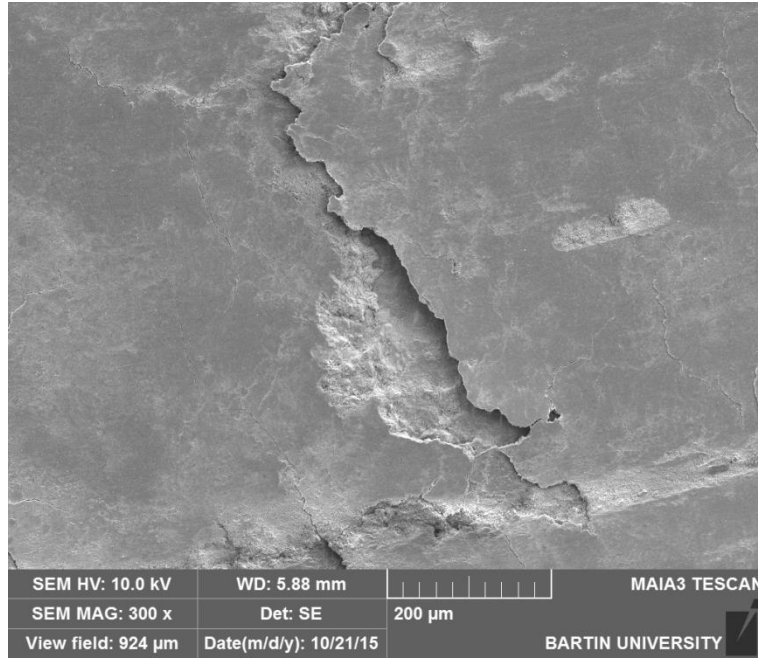
Şekil 52’da üst yüzeyi TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplanan numunenin 0.26 kayma 7, 10 ve 13 N hızlarda kuru kayma deneylerine tabi tutulduktan sonra aşınma yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü verilmiştir. Numuneler içerisinde en düşük aşınma direncine sahip numune olmuştur. Yine bu numune üzerinde de tribolojik katmanın varlığı görülmüştür. Numunen fazla aşınmasının sebebi en düşük yüzey sertliğine sahip olmasıdır. Dolayısı ile aşındırıcı bilya yüzeyi ile temasta bulunan etkileşim alanı artmıştır. Böylece aşındırıcı bilya daha fazla malzeme üzerinde plastik deformasyona sebep olmuştur.



Şekil 52: SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 25x.



Şekil 53: SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 75x.

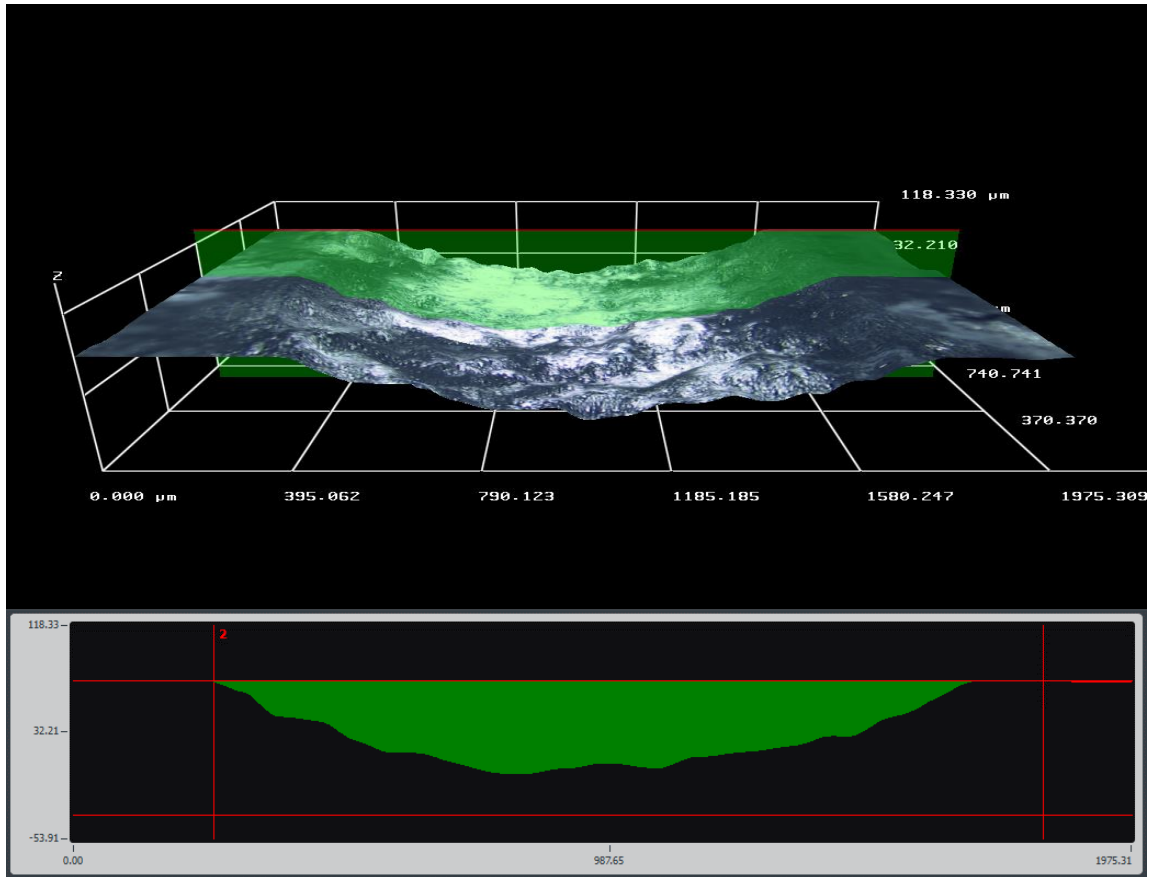


Şekil 54: SEM aşınma yüzey görüntüsü (7 N, 0.08 m/sn kayma hızı) 300x.

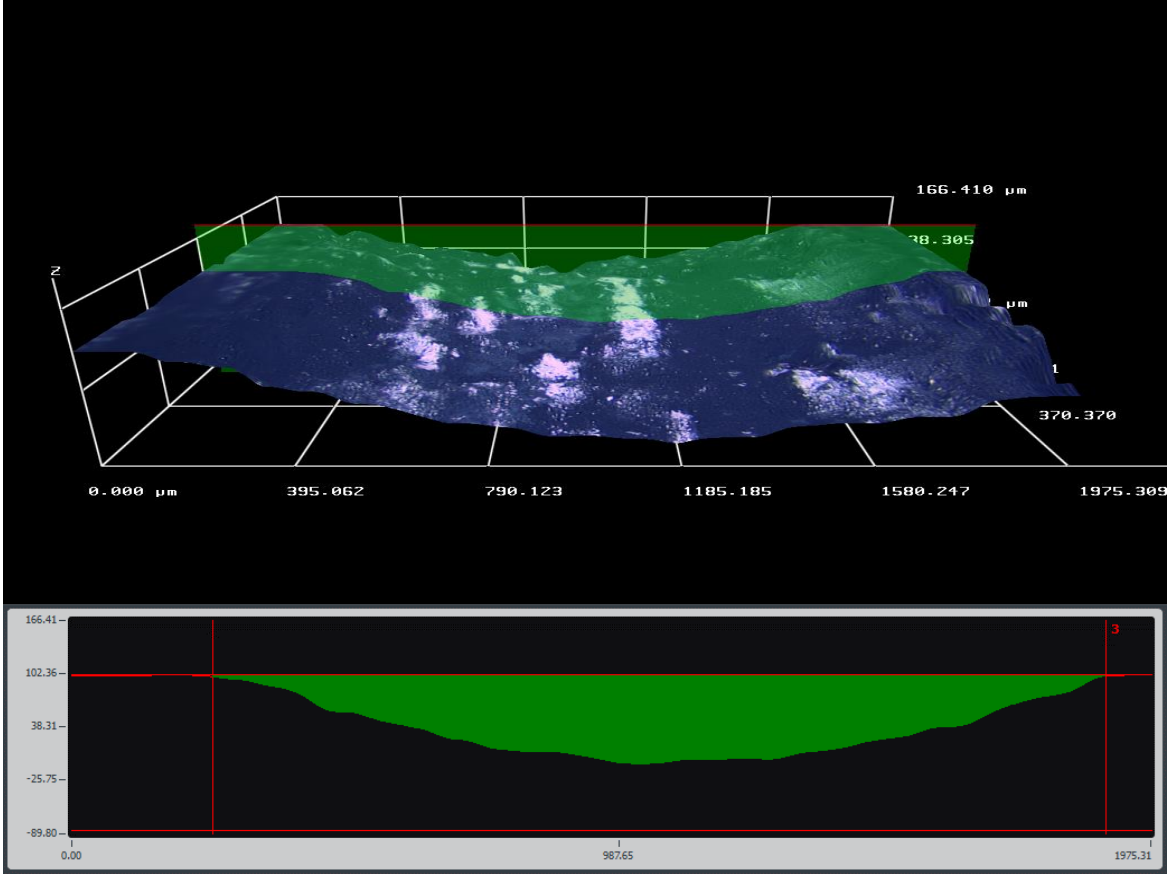
Bu numune üzerinde meydana gelen yüksek aşınma sebebini numune yüzeyinden alınan aşınma izleri ile yorumlamak gerekirse, Şekil 53 ve 54 incelmek faydalı olacaktır. Çünkü bu numunelerin yüzeyinde oluşan tribolojik katmanın kırılarak bir önceki numunelere göre daha büyük parçacıklar halinde yüzeyden ayrıldığı görülmektedir. Bu durum iki olumsuzluğa sebep olmaktadır. Birincisi kopan büyük boyutlu parçacıkların daha fazla kütle kaybına sebep olması diğeri ise, bu kırık yüzey içeren bölgelerin çatlakların oluşarak

yayılmaya sebebiyet vereceğinden numune yüzeyini zayıflatmış olacaktır. Ayrıca buradan kopan ve mekanik özellikleri yani sertlik derecesi daha yüksek olan bu sert tabakanın parçacıkların yüksek basınç altında numune yüzeyine daha fazla hasar verdiği de düşünülebilir.

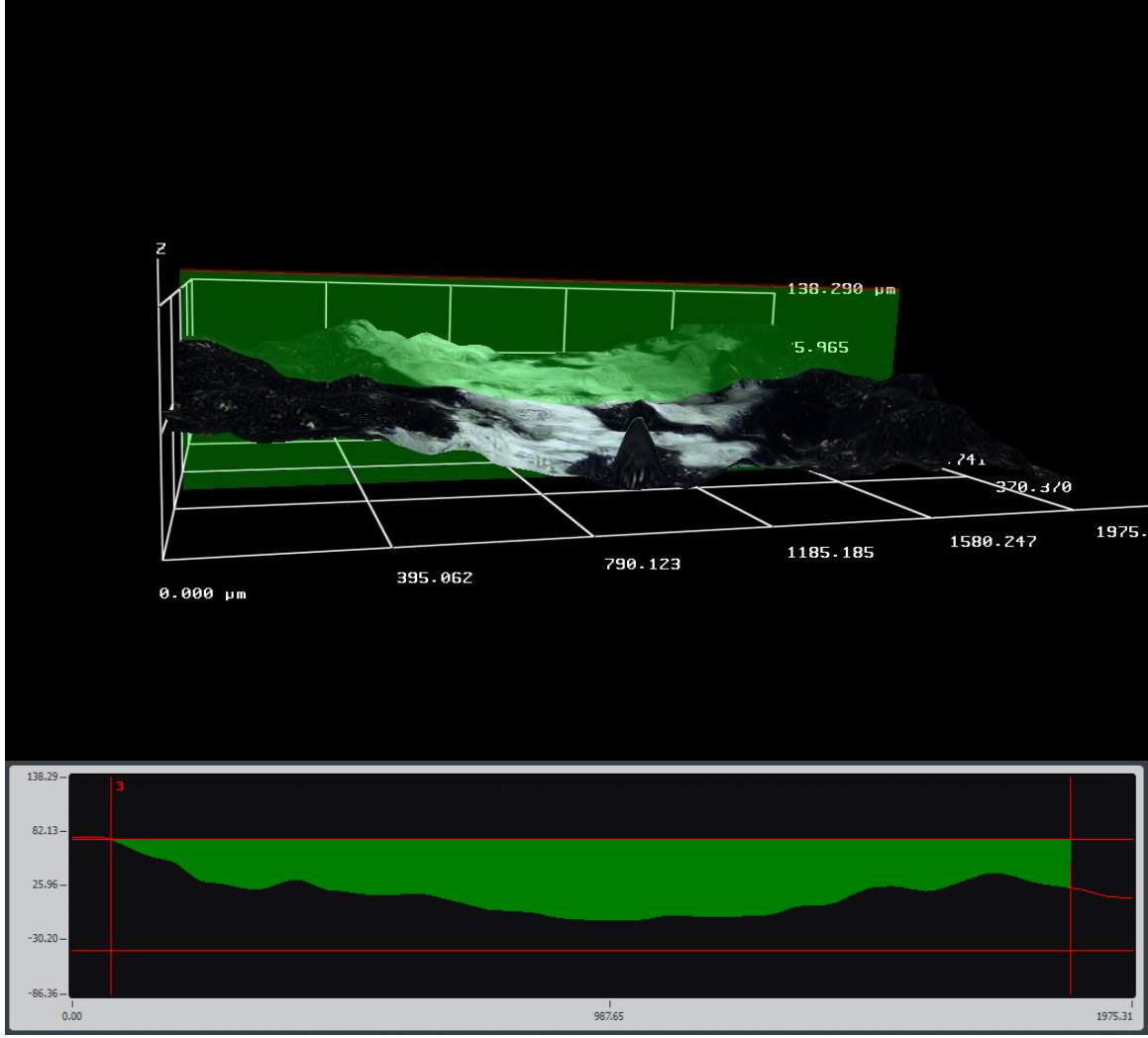
Numunelerin aşınma hacim kayıplarının belirlenmesinde kullanılan 3D optik görüntü fotoğrafları Şekil 55, 56 ve 57’de sırası ile verilmiştir. Deneysel bölümde de anlatıldığı üzere aşağıda aşınma yüzey kesit alanı verilen fotoğrafın altındaki iki boyutlu görüntü üzerinden hacim kayıpları otomatik olarak hesaplatılmıştır. Her bir aşınma oluşu üzerinden 90° lik açılarla toplamda 4 bölgeden ölçüm alınmıştır.



Şekil 55: 3D optik mikroskop aşınma oluşu görüntüsü WC +12 Co.



Şekil 56: 3D optik mikroskop aşınma oluğu görüntüsü ZrO +5 Co.



Şekil 57: 3D optik mikroskop aşınma oluğu görüntüsü  $\text{TiO}_2 + 45 \text{Cr}_2\text{O}_3$ .

## BÖLÜM 8

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 8.1 Genel Sonuçlar

Bu çalışmada WC +12 Co, ZrO +5 Co, TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ticari tozları ve ferrokrom tozları AISI 316L tipi paslanmaz çelik alt yüzey üzerine APS (Atmosferik Plazma Yöntemi) kullanılarak kaplanmıştır. Kaplama işlemi, alt yüzey üzerine NiCoCRAIY bağ tabakası, ferrokrom cürufu ve cüruf yüzeyi üzerine yukarıda belirtilen ticari tozlar kaplanarak sandviç tipi katmanlı bir yapı oluşturulmuştur. Kaplama işlemine tabi tutulan numuneler farklı yükler altında kuru-kayma aşınma testlerine tabi tutularak, kaplama işleminde kullanılan ticari tozların ve ferrokrom cürufu numunenin aşınma direnci üzerine olan etkisi araştırılarak aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

1. Kaplama işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
2. En iyi aşınma direnci WC +12 Co ile üst yüzeyi kaplı numunelerde görülürken bunu, ZrO +5 Co ve TiO<sub>2</sub> +45 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplı numuneler izlemiştir.
3. Yükün artması ile numunelerin hacim kayıplarında artış görülmüştür.
4. Kuru-kayma işlemine tabi tutulan numunelerin yüzeylerinde tribolojik katman oluşmuştur.
5. Kaplama tozunun değişmesi aşınma mekanizmasının değişmesine sebep olmuştur.
6. Tüm numunelerde üst yüzey aşınarak ferrokrom cürufu kaplı bölgeye ulaşılmış, ancak bu bölgenin altına inilmemiştir.
7. Aşınma mekanizmaları olarak plastik deformasyon, delaminasyon ve yorulma aşınmaları tespit edilmiştir.

## 8.2 Öneriler

Bu tez kapsamında elde edilen verilere göre gelecek çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

1. Kaplama işleminde ara tabaka olarak yüzeye atılan ferrokrom cürufu farklı boyutlarda elenerek yüzeye uygulanabilir.
2. Plazma parametreleri değiştirilerek parametrelerin kaplama üzerine etkileri araştırılabilir.
3. Bu tip ince kaplamaların aşınma performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan mikro abrasyon yöntemi ile testler uygulanabilir.

## KAYNAKLAR

- Ageorges, H. ve Ctibor, P. (2008). Comparison of the structure and wear resistance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13wt.% TiO<sub>2</sub> coatings made by GSP and WSP plasma process with two different powders. *Surface & Coatings Technology*, 202: 4362-4368.
- Archard, J. F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24: 981-988.
- Archard, J. F. ve Hirst, W. (1956). The wear of metals under unlubricated conditions. *Proceedings the Royal Society London A*, 236: 397-410.
- Betancourt-Dougherty, L.C. ve Smith, R.W. (1998). Effects of load and sliding speed on the wear behaviour of plasma sprayed TiC-NiCrBSi coatings. *Wear*, 217: 147-154.
- Bhushan, B. (2000). Wear Mechanisms, Chapter 7. In *Modern Tribology Handbook*, CRC Press, United States of America, pp. 273-299.
- Choudhury, T.A., Berndt, C.C. ve Zhihong, M. (2015). Modular implementation of artificial neural network in predicting in-flight particle characteristics of an atmospheric plasma spray process. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 45: 57-70.
- Czerwinski, F. (2012). Thermochemical treatment of metals, Chapter 11. In *Heat Treatment Conventional and Novel Applications*, Intech, Rijeka, Croatia, pp. 247-286.
- Daavittila, J., Honkaniemi, M. ve Jokinen, P. (2004). The transformation of ferrochromium smelting technologies during the last decades. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104 (9): 541-549.
- Dai, W.W., Ding, C.X., Li, J.F., Zhang, Y.F. ve Zhang, P.Y. (1996). Wear mechanism of plasma-sprayed TiO<sub>2</sub> coating against stainless steel. *Wear*, 196: 238-242.
- Davis, J.R. (2001). Surface engineering for corrosion and wear resistance, Chapter 1. In *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*, American Technical Publishers Ltd., United States of America, pp. 3.
- Davis, J.R. (2004). Introduction to thermal spray processing, Chapter 1. In *Handbook of Thermal Spray Technology*, American Technical Publishers Ltd., United States of America, pp. 3.
- De Garmo, E.P., Black, J.T. ve Kohser, R.A. (2011). *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing*. Wiley, New Jersey, NJ, United States of America.
- Farjadi, M.H. ve Azari, J. (2004). *Effect of Chrome Ore Quality on Ferrochrome Production Efficiency*. Faryab Mining Company, Tehran, Iran, 103-107 pp.



- Fernandez, J.E., Rodriguez, R., Wang, Y., Vijande, R. ve Rincon A. (1995). Sliding wear of a plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating. *Wear*, 181-183: 417-425.
- Fernandez, E., Cuetos J.M., Vijande R. ve Rincht A. (1996). Comparison of wear behaviour of plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings with and without laser treatment. *Tribology International*, 29 (6): 477-485.
- Garnham, J.E. (1995). The Wear of Bainitic and Pearlitic Steels. Doctor Thesis, Department of Engineering, University of Leicester Chapter 4., 4.1-4.54 pp.
- Gericke, W.A. (1995). Environmental aspects of ferrochrome production. *The Seventh International Congress on Ferroalloys*, The Norwegian Ferroalloy Research Organization, Trondheim, Norway, 131-140 pp.
- Ghazali, M.J., Forghani S.M., Hassanuddin, N., Muchtar, A. ve Daud, A.R. (2015). Comparative wear study of plasma sprayed TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> on mild steels. *Tribology International*, 93: 681-686
- He, F., Wong, P.L. ve Zhou, X. (2010). Wear properties of DLC-coated steel rollers running with highly contaminated lubrication. *Tribology International*, 43: 990-996.
- Hwang, D.H., Kim, D.E. ve Lee, S.J. (1999). Influence of wear particle interaction in the sliding interface on friction of metals. *Wear*, 225/229: 427-439.
- Kang, J., Xu, B., Wang, H. ve Wang, C. (2014). Competing failure mechanism and life prediction of plasma sprayed composite ceramic coating in rolling-sliding contact condition. *Tribology International*, 73: 128-137.
- Meyer, E. (2002). Atomic-scale friction and wear. In *Integrating Friction and Wear Research*, IAVF Antriebstechnik AG, TU Ilmenau, Ilmenau, Ed.; Scherge M., pp. 39.
- Mining Watch Canada (2012). *Living Near a Chromite Mine or Ferrochrome Facility*. Report by Mining Watch Canada, Chromite Series Fact Sheet # 03, Ottawa, Canada.
- Mori, T., Noborisaka, M., Watanabe, T. ve Suzuki, T. (2012). Oxidation resistance and hardness of TiAlSiN/CrAlYN multilayer films deposited by the arc ion plating method. *Surface Coating Technology*, 213: 216-220.
- Morks, M.F., Kobayashi, A. ve Fahim, N.F. (2007). Abrasive wear behavior of sprayed hydroxyapatite coatings by gas tunnel type plasma spraying. *Wear*, 262: 204-209.
- Movahedi, B. (2013). Fracture toughness and wear behavior of NiAl-based nanocomposite HVOF coatings. *Surface Coating Technology*, 235: 212-219.
- Musil, J. (2012). Hard nanocomposite coatings: Thermal stability, oxidation resistance and toughness. *Surface Coating Technology*, 207: 50-65.

- Nkohla, M.A. (2006). Characterization of Ferrochrome Smelter Slag and Its Implications in Metal Accounting. Mater thesis, Department of Chemical Engineering, Cape Peninsula University of Technology. Cape Town, South Africa, pp. 2.
- Ontario Air Standards (2011). *Ontario Air Standards for Hexavalent Chromium Compounds and Chromium & Chromium Compounds (Metallic, Trivalent and Divalent)*. Standards Development Branch Ontario Ministry of the Environment, Toronto, Ontario, Canada.
- Palanivelu, R. ve Ruban Kumar A. (2014). Scratch and wear behaviour of plasma sprayed nano ceramics bilayer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13wt% $\text{TiO}_2$ /hydroxyapatite coated on medical grade titanium substrates in SBF environment. *Applied Surface Science*, 315: 372–379.
- Rabinowicz, E. (1965). *Friction and Wear of Materials*. Wiley, New York.
- Radek, N. ve Bartkowiak, K. (2010). Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia*, 5: 417–423.
- Research Group on Wear of Engineering Materials (1969). *Glossary of Terms and Definitions in the Field Of Friction*. Report by Research Group on Wear of Engineering Materials, Wear and Lubrication (Tribology), OECD, Paris.
- Rico, A., Garrido, M.A., Otero, E., Rodríguez, J. (2010). An energetic approach to the wear behaviour of plasma-sprayed alumina–13% titania coatings. *Acta Materialia*, 58: 5858–5870.
- Ronkainen, H., Varjus, S., Koskinen, J. ve Holmberg, K. (1999). Friction and wear performance of a-C:H films in a wide normal load and sliding velocity range. *Tribologia - Finnish Journal of Tribology*, 18: 3-12.
- Scherge, M., Shakhvorostov, D. ve Pöhlmann, K. (2003). Fundamental wear mechanism of metals. *Wear*, 255: 395–400.
- Sedlaček, M., Podgornik, B. ve Vižintin, J. (2008). Tribological properties of DLC coatings and comparison with test results: Development of a database. *Material Characteristics*, 59: 151–161.
- Suh, N. P. (1973). The delamination theory of wear. *Wear*, 25: 111-124.
- Tao, S., Yin, Z., Zhou, X. ve Ding, C. (2010). Sliding wear characteristics of plasma-sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coatings against copper alloy under severe conditions. *Tribology International*, 43: 69–75.
- Tucker, Jr., R.C. (1994). *ASM Handbook Volume 5. Surface Engineering*, Eds.; Cotell, C.M., Sprague, J.A. ve Smidt, F.A., Ohio, United States of America, pp. 497-509.
- Singh, V.P., Sil, A. ve Jayaganthan, R. (2011). Tribological behavior of plasma sprayed  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ –3%  $\text{TiO}_2$  coatings. *Wear*, 272: 149-158.

- Voevodin, A.A., Zabinski, J.S. ve Muratore, C. (2005). Recent advances in hard, tough, and low friction nanocomposite coatings. *Tsinghua Science & Technology*, 10 (6): 665–679.
- Wen, D.C. (2010). Erosion and wear behavior of nitrocarburized DC53 tool steel. *Wear*, 268: 629-636.
- Wiklund, U., Gunnars, J. ve Hogmark, S. (1999). Influence of residual stresses on fracture and delamination of thin hard coatings. *Wear*, 232: 262-269.
- Yin, Z., Tao, S., Zhoua, X. ve Ding, C. (2007). Tribological properties of plasma sprayed Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings. *Wear*, 263: 1430–1437.
- Zhang, J., Sun, K., Wang, J., Tian, B., Wang, H. ve Yin, Y. (2008). Sliding wear behavior of plasma sprayed Fe<sub>3</sub>Al– Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> graded coatings. *Thin Solid Films*, 516: 5681–5685.
- Zygmunt, R. (1989). Special Tribological Coatings. In *Tribology Series, Volume 13*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 269–301.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Hakan BAYRAK  
Doğum Yeri ve Tarihi : Karataş / 20.06.1990

### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Makine Mühendisliği  
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce, Farsça

### İş Deneyimi

Stajlar : 06/2012 – 08/2012  
Teknik Üniversitesi Tekstil Fabrikası / Lodz, Polonya  
Pozisyon: İş planlama ve kontrol departmanında işletme stajı.

Stajlar : 07/2011 – 09/2011  
Türkiye Vagon Sanayi (TÜVESAS) / Sakarya, Türkiye  
Pozisyon: Isıl işlem, kaynak ve kalite kontrol bölümlerinde üretim ve imalat stajı.  
Nikon H600L Microscope

Projeler ve Kurs Belgeleri : (KARFO Endüstriyel, 11/2014)  
OXFORD FOUNDRY MASTER Xline spectrometers  
(REPAMET Ltd. Sti., 10/2014)  
SolidWorks  
(ABK Teknik, 02/2014)  
Ehliyet B/A2  
(Turkey, 2009)

07/2013 – 02/2015  
Çalıştığı Kurumlar : Güney Çelik Hasır ve Demir Mamulleri San. Tic. A.Ş  
Adana, Turkey  
Pozisyon: Metalurji ve Malzeme Mühendisi

### İletişim

E-Posta Adresi : bayrakhakan01@gmail.com

Tarih : 15/01/2016 (Tez sınav tarihi)