



**T.C.**

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**OKSİT ÇERKİL SERAMİK KAPLAMALARIN YÜKSEK SICAKLIK  
AĞIRLAMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**HAZIRLAYAN**

**MECİT ÖGE**

**DANIŞMAN**

**DOÇ.DR.YILMAZ KÜÇÜK**

**BARTIN-2016**



**T.C.**

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI**

**OKSİT ÇERKİL SERAMİK KAPLAMALARIN YÜKSEK SICAKLIK ALINMA  
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZIRLAYAN**

**Mecit ÖGE**

**JÜRİ ÜYELERİ**

Danışman : Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK - Bartın Üniversitesi  
Üye : Doç. Dr. M. Sabri GÖK - Bartın Üniversitesi  
Üye : Yrd. Doç. Dr. Okan ÜNAL - Karabük Üniversitesi

**BARTIN-2016**

## KABUL VE ONAY

Mecit ÖGE tarafından hazırlanan “OKS T ÇER KL SERAM K KAPLAMALARIN YÜKSEK SICAKLIK A INMA DAVRANI ININ NCELENMES ” ba lıklı bu çalı ma, 29.06.2016 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birli i ile ba arılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmi tir.

Ba kan : Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK (Danı man) .....

Üye : Doç. Dr. Sabri GÖK .....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Okan ÜNAL .....

Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../.... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmı tır.

Doç. Dr. H. Selma ÇEL KYAY  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK danışmanlığında hazırladığım “OKSİT ÇERKİLETLERİN SERAMİK KAPLAMALARIN YÜKSEK SICAKLIK ALINMA DAVRANI İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışması olduğunu, aksi takdirde tespit edilmesinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

29.06.2016

Mecit ÖGE

## ÖNSÖZ

Bu tez çalı masının planlanmasından sonuca ulaşmasına kadar geçen sürede sabırla ve özveriyle her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK'e çok teşekkür ederim. Çalı mama yön veren ve destek olan Doç. Dr. Sabri GÖK'e, Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI'ya, Yrd. Doç. Dr. Adnan SALLAM'a, Yrd. Doç. Dr. Tuba ÖZDEMİR'e ve Arş. Gör. Kadir Mert DÖLEKER'e teşekkürü borç bilirim.

Bu çalı ma "Atık FeCr cüruf tozunun termal sprey yöntemi ile kaplanarak alevlenme ve oksidasyon davranışlarının oksit içerikli ticari kaplamalarla karşılaştırılması" başlıklı ve MAG-113M178 kod numaralı proje olarak TÜB TAK tarafından desteklenmiştir ve desteklerinden dolayı TÜB TAK'a teşekkür ederim.

Bu yolda yürümemde bana moral desteğini veren ve her zaman motive eden sevgili anneme, sevgili babama ve sevgili kardeşlerime de sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Mecit ÖGE

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## OKSİT İÇERİKLİ SERAMİK KAPLAMALARIN YÜKSEK SICAKLIKTA İNMA DAVRANI NIN İNCELENMESİ

Mecit ÖGE

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK

Bartın-2016, sayfa: XX + 127

Bu çalışmada, oksit içerikli seramik kaplama malzemesi olarak FeCr çürüf tozu AISI 420 paslanmaz çelik altlık üzerine APS yöntemi ile biriktirilmiş olup, elde edilen kaplamanın yüksek sıcaklık altında inma davranışları incelenmiştir ve benzer parametreler kullanılarak kaplanan oksit içerikli ticari seramik kaplamalarla yüksek sıcaklıkta inma davranışları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla yapılan inma deneyleri 600<sup>0</sup>C' ye kadar yüksek sıcaklıklarda pin-on-disk yöntemi kullanılarak kuru ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklıkta inma deneylerine tabi tutulan numunelerin SEM analizleri, mikrosertlik ölçümleri ve inma testi sonuçları kullanılarak kaplamaların yüksek sıcaklıkta inma davranışları literatürde yapılan diğer çalışmalar ile karşılaştırılabilir olarak değerlendirilmiştir.

### Anahtar Kelimeler

FeCr çürüfu; seramik kaplama; APS; HVOF; termal spreycaplama; inma; oksidasyon

### Bilim Kodu

625.02.05

## **ABSTRACT**

**Master's Thesis**

### **THE INVESTIGATION OF HIGH TEMPERATURE WEAR BEHAVIOR OF CERAMIC COATINGS WITH OXIDE CONTENT**

**Mecit ÖGE**

**Bartın University**

**Institute of Science and Technology**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor: Associate Prof. Dr. Yılmaz KÜÇÜK**

**Bartın-2015, pp: XX + 127**

In this study, FeCr slag powder was deposited as ceramic top coating on AISI 420 stainless steel substrates by atmospheric plasma spray (APS) method, the obtained coating's wear resistance was evaluated under high temperature conditions and compared with those of commercial ceramic coatings, which were deposited using similar thermal spray parameters. For this purpose high temperature wear tests were conducted on the coated specimens under temperatures up to 600<sup>0</sup> C using a pin-on-disk tribometer equipped with a high temperature chamber. High temperature wear behavior of the coated specimens, subjected to high temperature wear tests, were comparatively evaluated using the SEM-EDS analysis, microhardness measurement and high temperature wear test results with references to previously conducted studies on high temperature wear behavior of ceramic coatings with oxide content.

#### **Keywords**

FeCr slag; ceramic coating; APS; HVOF; thermal spray coating; wear; oxidation

#### **Science Code**

625.02.05

## Ç İNDEK İLER

KABUL VE ONAY .....	
BEYANNAME.....	
ÖNSÖZ.....	V
ÖZET .....	V
Ç İNDEK İLER.....	V
EK İLLER D İZ İN .....	X
TABLolar D İZ İN .....	XV
S İMGELER VE KISALTMALAR D İZ İN .....	XV
BÖLÜM 1 G İR .....	1
BÖLÜM 2 L İTERATÜR ÖZET .....	4
BÖLÜM 3 YÜZEY MÜHEND İSLER VE KAPLAMA TEKNOLOJ İLER .....	10
3.1 Yüzey Mühendisli ğ i.....	10
3.1.1 Kaplama Uygulamaları .....	11
3.1.2 Termal Sprey Kaplamalar .....	13
3.1.2.1 Yanma İle Gerçekle en Termal Sprey Yöntemleri.....	17
3.1.2.2. Elektrik De ğerji İle Gerçekle en Termal Sprey Yöntemleri .....	19
3.1.2.3 Gaz Genle mesi İle Gerçekle en Termal Sprey Yöntemleri (So ğuk Gaz Dinamik Sprey – CGDS).....	20
3.1.3. Plazma Sprey Kaplamalar .....	22
3.1.4. Atmosferik Plazma Sprey (APS) Yöntemi .....	24
3.2 Termal Bariyer Kaplamalar (TBC'ler) .....	27
3.2.1. Plazma Sprey Yöntemi İle Biriktirilen Termal Bariyer Kaplamalar.....	28
3.2.2. PS-TBC Proses Parametreleri .....	30
BÖLÜM 4 A İNMA VE A İNMA MEKAN ZMALARİ.....	31
4.1 Triboloji .....	32



4.2 Sürtünme.....	33
4.2.1 Sürtünmenin Temel Mekanizmaları.....	35
4.2.2 Temas Halindeki Yüzeyler.....	36
4.3 Aınma Mekanizmaları.....	39
4.4 Aınma Mekanizmalarının Sınıflandırılması.....	44
4.4.1 Adezif Aınma.....	47
4.4.1.1 Adezif aınma hacminin teorik hesabı.....	52
4.4.2 Abrazif Aınma.....	54
4.4.3 Yüzey Yorulması.....	57
4.4.4 Tribokimyasal Reaksiyon.....	59
4.5 Sürtünme ve Aınma Ölçüm Teknikleri.....	60
4.5.1 Kaymalı ve Yuvarlanmalı Temaslar için Aınma Ölçüm Düzenekleri.....	62
BÖLÜM 5 DENEYSEL ÇALIŞMA.....	65
5.1 Amaç.....	65
5.2 Kaplama Tozlarının Hazırlanması ve Karakterizasyonu.....	65
5.2.1 Metalik Bakır Kaplama Tozu.....	65
5.2.2 FeCr Curuf Tozu.....	67
5.2.3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%13 TiO <sub>2</sub> ) Ticari Seramik Kaplama Tozu.....	69
5.2.4 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Ticari Seramik Kaplama Tozu.....	71
5.3 Altlık Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu ve Hazırlanması.....	73
5.3.1 Altlık Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu.....	73
5.3.2 Altlık Malzemenin Hazırlanması.....	74
5.4 Yüksek Sıcaklık Aınma Testleri Öncesinde Termal Bariyer Kaplamanın Karakterizasyonu.....	76
5.5 TBC Kaplı Numunelerin Yüksek Sıcaklıkta Yapılan Kuru Kayma Adezyon (Aınma) Testleri.....	80
5.5.1 Yüksek Sıcaklık Hazneli Pin-On-Disc Aınma Testi Düzenekleri.....	80
5.5.2 Deney Parametreleri.....	82
5.5.3 Yüksek sıcaklık aınma testleri.....	83
5.5.4 Sürtünme kuvvetlerinin hesaplanması.....	86
5.5.5 Aınma hacimlerinin hesaplanması.....	87

BÖLÜM 6 DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTI MA.....	89
6.1 200 °C’de Yapılan Yüksek Sıcaklık Kuru Kayma Adezyon Test Sonuçları .....	89
6.2 400 °C’de Yapılan Yüksek Sıcaklık Kuru Kayma Adezyon Testi Sonuçları .....	96
6.3 600 °C’de Yapılan Yüksek Sıcaklık Kuru Kayma Adezyon Testi Sonuçları .....	102
BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNER LER .....	109
KAYNAKLAR.....	110
ÖZGEÇM .....	126

## EK LLER D Z N

ekil	Sayfa
No	No
1. Termal Sprey Kaplamaların Endüstriyel Kullanım Alanları .....	13
2. Altlık yüzeyi üzerinde olu an lamelli yapının ematik diyagramı.....	14
3. Termal sprej teknolojilerinin sınıflandırılması.....	16
4. Toz alev sprej kaplama yönteminin ematik diyagramı. 1: i letme gazları (yakıt ve oksijen), 2: toz beslemesi, 3: tabanca gövdesi, 4: biriktirilen kaplama, 5: tanecik akı 1, 6: alev.....	17
5. Tel/çubuk alev sprej kaplama yönteminin ematik diyagramı. 1: oksijen giri i, 2: yakıt gaz giri i, 3: sıkı tırlımı hava giri i, 4: tel/çubuk, 5: ergimi damlacık akı 1, 6: i letme gazları için nozül, 7: sıkı tırlımı hava ba lı 1, 8: alev, 9: tel/çubuk.....	17
6. HVOF Tabancasının ematik diyagramı.....	18
7. Tel ark sprej tabancasının ematik gösterimi .....	19
8. Plazma transfer ark (PTA) biriktirme yönteminin ematik diyagramı.....	20
9. CGDS düzene inin bölümleri. a: HT30017 gaz ısıtıcı, b: TF 4000-2 toz besleyici, c: nozül tertibatı. ....	22
10. Plazma sprej tabancasının ematik gösterimi.....	23
11. Plazma tabancasının bölümleri. 1: anot, 2: katot, 3: su çıkı ı ve katot ba lantısı, 4: su giri i ve anot ba lantısı, 5: letme gazları için giri , 6: Toz enjektörü, 7: elektrik izolatörü. ....	24
12. Uçak motorunda kullanılan TBC kaplamanın temsili resmi.....	27
13. Termal bariyer kaplama sisteminin SEM (taramalı elektron mikroskobu) kesit görüntüsü.....	28
14. PS ile biriktirilm zirkonya-yttria/MCrAIX TBC sisteminin seramik-ba kaplama arayüzünün SEM görüntüsü. ....	30
15. EB-PVD ile biriktirilm zirkonya-yttria/MCrAIX TBC sisteminin seramik-ba kaplama arayüzünün SEM görüntüsü. ....	30
16. Statik sürtünme katsayısının belirlenmesinde kullanılan e ik yüzey. a: kütlenin yüzeyden a a ı hareket etmesi için gerekli olan en küçük açı olan açısı ile e ik hale getirilm yüzey, b) sürtünme açısı ve uygulanan kuvvetler arasındaki ili ki.....	34

<b>ekil</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
17. Yüzey düzensizliklerinin ematik gösterimi.....	36
18. Bir Ti-Al ala ım yüzeyinden alınan profilometre ölçümü. a) elektrolitik parlatma ile parlatılmı yüzey, b) tornalanmı yüzey, c) frezelenmi yüzey (Zum Gahr,1987).....	37
19. Görünen ve gerçek temas alanı. ....	38
20. Tekrarlı temaslarda üç temsili a ınma e risi.....	40
21. Tekrarlı temaslarda ortaya çıkan üç tip yüzey pürüzlülü ünün temsili e rileri.....	40
22. Farklı ya lama ko ullarında kayan temasta metal malzemelerin özgül a ınma hızlarının da ılımı. ....	41
23. Seramiklerin kendileri arasında ya sız ko ulda özgül a ınma hızları ve sürtünme katsayılarının da ılımı.....	41
24. Farklı i letme ko ulları altındaki üç çe it serami in yüzey morfolojilerindeki çe itlilik. Oklar kar ı yüzlerin ba ıl kayma yönlerini göstermektedir (W: normal yük; v: kayma hızı; T: sıcaklık). ....	42
25. A ınma ile ilgili tanımlar ve birbirleri ile ili kileri. ....	43
26. Bir tribosistem elemanlarının ematik temsili.....	44
27. A ınma proseslerinin a ınma modları ile sınıflandırılması.....	45
28. 2 elemanlı ve 3 elemanlı a ınma. ....	45
29. Dört ana a ınma mekanizmasının ematik gösterimi .....	47
30. Adezif a ınmaya maruz kalan tribolojik sistemler.....	47
31. ba lantı noktalarının birbiri üzerinde sürtünen kütleler arasında kopma durumu. a: ba lantı noktalarının arayüz içinde birbirinden ayrılması, b: ba lantı noktalarının daha yumu ak malzeme (A) içinde kopması, c: ba lantı noktalarının büyük ölçüde daha yumu ak malzeme (A) içinde kopması, d: ba lantı noktalarının kar ı kütleler içinde kopması. ....	48
32. Metal sertli ine göre adezyon katsayısının de i imi. ....	50
33. Temel adezyon mekanizmaları. ....	51
34. Adezif a ınmada görülen adezif ta ınma prosesinin temsili resmi. a: pulumsu ince a ınma partikülünün adezif ta ınması, b: kama benzeri a ınma partikülü.. ....	53
35. Gevrek ve sünek malzemelerde abrazif a ınma. a: plastik deformasyonun etkili oldu u, sünek malzemelerin abrazif a ınması; b) gevrek çatlama. ....	54

<b>ekil</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
36. Abrazif a ınmaya maruz kalan tribolojik sistemler. ....	55
37. Abrazif partikül sertli inin a ınan partikül sertli ine oranına ba lı olarak abrazif a ınma seviyesinin de i imi.....	55
38. Abrazif mineraller ile elik yüzeyler arasındaki etkile imin SEM görüntüleri. a: mikro-iz olu umu, b: mikro-tala olu umu, c: mikro-çatlak olu umu. ....	56
39. Abrazif partiküller ile malzeme yüzeyleri arasındaki fiziksel etkile imler. ....	57
40. Yüzey yorulması sonucu a ınmaya maruz kalan tribolojik sistemler. ....	57
41. 60 HRC sertli inde semente edilmi elik yüzeyindeki çukur olu umları ....	58
42. Yüzey yorulmasında atla ın olu ması ve büyümesi. ....	59
43. Tribokimyasal reaksiyon sonucu a ınmaya maruz kalan tribolojik sistemler. ....	59
44. Tribokimyasal a ınma mekanizmaları. ....	60
45. Yaygın olarak kullanılan kayma a ınması test düzeneklerinin temsili resimleri. ....	63
46. Temas e itleri. a: uyumlu temas, b) uyumsuz temas. ....	64
47. NiCrCoAlY metalik ba ı kaplama tozunun SEM görüntüsü.....	66
48. Toz eleme i leminde kullanılan elek sallama makinesi. ....	67
49. 5-38 toz boyutu aralı ındaki FeCr curuf tozunun SEM görüntüsü.....	68
50. 5-38 toz boyutu aralı ındaki FeCr curuf tozunun toz boyutu analizi. ....	68
51. 5-38 toz boyutu aralı ındaki FeCr curuf tozunun TGA+DTA analizi.....	69
52. Metco 130SF kodlu Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%13 TiO <sub>2</sub> ) ticari seramik kaplama tozunun SEM görüntüsü.....	70
53. Metco 130SF ticari kodlu Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%13 TiO <sub>2</sub> ) seramik kaplama tozunun toz boyutu analizi. ....	71
54. Metco 6156 kodlu Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ticari seramik kaplama tozunun SEM görüntüsü. ....	72
55. Metco 6156 kodlu Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ticari seramik kaplama tozunun toz boyutu analizi. ....	72
56. Deneysel alı mada kullanılan AISI 420 altlık numune boyutları.....	74
57. Altlık numunelerin kaplama öncesi kumlanmasında kullanılan kumlama cihazı.....	74
58. APS termal spre y kaplama yönteminin şematik resmi ....	75
59. Üretilen TBC sisteminin kaplama katmanları.....	75
60. Metco marka APS kontrol nitesi ve toz besleme nitesi. ....	76
61. Zımparalama ve parlatma i leminde kullanılan otomatik zımparalama ve parlatma cihazı. ....	77

<b>ekil</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
62. TBC kaplı numunelerin seramik kaplama tabakasının mikro sertlik ölçümlerinde kullanılan mikrosertlik cihazı. ....	78
63. FeCr curuf kaplamanın 250x büyütmede alınmış SEM arakesit görüntüsü. ....	79
64. Metco 130SF ticari kodlu Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%13 TiO <sub>2</sub> ) seramik kaplama tozu ile kaplanmış numunenin 250x büyütmede alınmış SEM arakesit görüntüsü. ....	79
65. Metco 6156 ticari kodlu Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> seramik kaplama tozu ile kaplanmış numunenin 250x büyütmede alınmış SEM arakesit görüntüsü. ....	80
66. TBC kaplı numunelerin yüksek sıcaklık aınma testlerinde kullanılan yüksek sıcaklık pin-on-disk test düzeneği. ....	81
67. Aıtlık tutucu. ....	84
68. Numunenin aıtlık tutucuya bağlanması ve oluşan aınma izlerinin temsili resmi. ....	84
69. Aınma izi çapları. ....	84
70. Pin on disk cihazının hız ve zaman ayar kumandaları. a: zaman ayar kumandası (timer), b: hız ayar kumandası. ....	85
71. Pin-on-disk cihazı üzerinde sürtünme kuvveti değerlerini ölçen yük sensörü (load cell). ....	86
72. 10 N'luk normal yük altında çalıştırılan yüksek sıcaklık hazneli pin-on-disk aınma cihazı. ....	86
73. Aınma hacimlerinin hesaplanmasında kullanılan 3B optik profilometre. ....	87
74. Huvitz HDS 5800 3B optik profilometrenin kullanıcı arayüzü. a: aınma izinin 2 boyutlu görüntüsü, b: aınma izinin 3 boyutlu görüntüsü, c: aınma izinin kesit görüntüsü, d: kesit düzlemi üzerinde aınmanın cihaz tarafından ölçülen alanı (µm <sup>2</sup> ). ....	88
75. 200 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında FeCr curuf kaplamanın aınma izinin 3B profilometre sonuçları. ....	89
76. 200 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Metco 130SF) ticari seramik kaplamanın aınma izinin 3B profilometre sonuçları. ....	90
77. 200 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Metco 6156) ticari seramik kaplamanın aınma izinin 3B profilometre sonuçları. ....	90

<b>ekil</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
78. 200 °C sıcaklıkta farklı çevresel hız (0.08, 0.16, 0.26 m/sn) ve farklı (7, 10 ve 13 N) yükler altında uygulanan kuru-kayma deneyleri sonucunda elde edilen hacim kaybı de erleri.....	91
79. 200 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında FeCr curuf, Al-Ti ve Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kaplamaların sürtünme katsayısı-zaman grafi i.....	92
80. 200 °C sıcaklık 10 N yük ve 0,16 m/s kayma hızında FeCr curuf, Al-Ti ve Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kaplamaların sürtünme katsayısı-zaman grafi i.....	93
81. 13 N yük ve 0.26 m/sn kayma hızında a ındırılan Cr2O3 kaplı numuneden alınmı SEM yüzey görüntüleri. ....	94
82. 13 N yük ve 0.26 m/sn kayma hızında a ındırılan Al-Ti kaplı numuneden alınmı SEM yüzey görüntüleri. ....	95
83. 13 N yük ve 0.26 m/sn kayma hızında a ındırılan Fe-Cr kaplı numuneden alınmı SEM yüzey görüntüleri. ....	96
84. 400 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında FeCr Curuf kaplamanın a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.....	97
85. 400 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Al-Ti (Metco 130SF) ticari seramik kaplamanın a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.....	97
86. 400 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Metco 6156) ticari seramik kaplamanın a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.....	98
87. 400 °C sıcaklıkta farklı çevresel hız (0.08, 0.16, 0.26 m/sn) ve farklı (7, 10 ve 13 N) yükler altında uygulanan kuru-kayma deneyleri sonucunda elde edilen hacim kaybı de erleri.....	98
88. 400 °C sıcaklık 10 N yük ve 0,26 m/s kayma hızında FeCr curuf, Al-Ti ve Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kaplamaların sürtünme katsayısı-zaman grafi i.....	99
89. Yüksek sıcaklıklarda a ınmanın ematik gösterimi. ....	100
90. FeCr cüruf kaplama üzerinde yüksek sıcaklıkta a ınma sonrası biriken kaplama, oksit ve a ındırıcı kalıntıları. ....	101
91. 400 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında FeCr curuf kaplamanın a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.....	102

<b>ekil</b>	<b>Sayfa</b>
<b>No</b>	<b>No</b>
92.	600 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%13-TiO <sub>2</sub> ) (Metco 130SF) ticari seramik kaplamanın a rınma izinin 3B profilometre sonuçları..... 103
93.	600 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Metco 6156) ticari seramik kaplamanın a rınma izinin 3B profilometre sonuçları..... 103
94.	600 °C sıcaklıkta farklı çevresel hız (0.08, 0.16, 0.26 m/sn) ve farklı (7, 10 ve 13 N) yükler altında uygulanan kuru-kayma deneyleri sonucunda elde edilen hacim kaybı de erleri..... 104
95.	600 °C sıcaklık 10 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında FeCr curuf, Al-Ti ve Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kaplamaların sürtünme katsayısı-zaman grafi i..... 104
96.	600 °C sıcaklık 13 N yük ve 0,16 m/s kayma hızında FeCr curuf, Al-Ti ve Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kaplamaların sürtünme katsayısı-zaman grafi i..... 105
97.	13N luk yük ve 0.16 m/sn kayma hızında Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kaplı numuneden alınımı SEM yüzey görüntüleri. .... 105
98.	13N luk yük ve 0.16 m/sn kayma hızında a ndırılan Al-Ti kaplı numuneden alınımı SEM yüzey görüntüleri. .... 107
99.	13N luk yük ve 0.16 m/sn kayma hızında a ndırılan FeCr kaplı numuneden alınımı SEM yüzey görüntüleri. .... 108



## TABLolar D Z N

Tablo No	Sayfa No
1. Çe itli kaplama prosesleri ve tipik özellikleri.....	12
2. Termal bariyer kaplamalarda yaygın olarak kullanılan termal spre y kaplama yöntemlerine ait tanecik hızları ve sıcaklıklar. ....	14
3. Farklı kaplama parametrelerine göre termal spre y kaplamaların sınıflandırılması. ..	16
4. 2006 yılı itibariyle Avrupa ve Amerika'da termal spre y i lemleri için gerekli yakla ık yatırım maliyetleri.....	18
5. So uk Spre y Yönteminin Özellikleri, Malzemeleri ve Uygulamaları .....	21
6. PS proses parametreleri.....	31
7. Amdry 365-1 kodlu NiCoCrAl y metalik ba kaplama tozunun kimyasal kompozisyonu. ....	66
8. FeCr curufunun kimyasal içeri i.....	67
9. Metco 130SF kodlu Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%13 TiO <sub>2</sub> ) ticari seramik kaplama tozunun kimyasal analizi.....	70
10. Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> seramik kaplama tozunun kimyasal analizi.....	71
11. AISI 420 paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu. ....	73
12. AISI 420 paslanmaz çelik termal genle me katsayısı.....	73
13. Kaplamaların üretilmesinde kullanılan APS termal spre y kaplama parametreleri. ...	76
14. Zımparalama ve parlatma adımlarında kullanılan parametreler. ....	77
15. FeCr curuf kaplamanın ortalama sertlik de eri.....	78
16. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Metco 130SF) ticari seramik kaplamanın ortalama sertlik de eri.....	78
17. Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Metco 6156) ticari seramik kaplamanın ortalama sertlik de eri. ....	78
18. Yüksek sıcaklık kuru kayma a ınma testlerinde kullanılan deney parametreleri. ....	82
19. Yüksek sıcaklık kuru kayma a ınma testlerinde kullanılan deney deseni. ....	83

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	:	Santigrat derece
$\mu$	:	Sürtünme katsayısı
$\mu_d$	:	Dinamik sürtünme katsayısı
$\mu m$	:	Mikrometre
$\mu m/m/°C$	:	Isıl genleşme katsayısı (mikrometre/metre/santigrat derece)
$\mu_s$	:	Statik sürtünme katsayısı
€	:	Euro
3B	:	3 boyutlu
A	:	Amper
$A_i$	:	Birbirinden bağımsız temas alanları
Al	:	Alüminyum
$Al_2O_3$	:	Alüminyum oksit
Al-Ti	:	Alümina-titanya
Ar	:	Argon
$A_r$	:	Gerçek temas alanı
Bi	:	Bizmut
C	:	Karbon
CaO	:	Kalsiyum oksit
Co	:	Kobalt
$Cr_2O_3$	:	Krom oksit
Cu	:	Bakır
F	:	Kuvvet
$Fe_2O_3$	:	Demir oksit
FeCr	:	Ferrokrom
$F_n$	:	Normal kuvvet
$F_s$	:	Sürtünme kuvveti
g/dak	:	Gram / dakika
GPa	:	Gigapascal
H/E	:	Sertlik / elastisite modülü
$H_2$	:	Hidrojen
He	:	Helyum

K	:	Kelvin
kg/saat	:	Kilogram / saat
kW	:	Kilowatt
m/s	:	Metre / saniye
MgO	:	Magnezyum oksit
mm	:	Milimetre
mm/s	:	Milimetre / saniye
mm <sup>3</sup> N <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup>	:	Milimetreküp / newton metre
Mo	:	Molibden
MPa	:	Megapascal
N	:	Newton
N/mm	:	Newton / milimetre
N/mm <sup>2</sup>	:	Newton / milimetre kare
N <sub>2</sub>	:	Azot
NiCoCrAlY	:	Nikel kobalt krom alüminyum yitria
Ni-P/SiC	:	Nikel fosfat / silisyum karbür
Pb	:	Kur un
ppm	:	Milyonda bir (parts per million)
R <sub>a</sub>	:	Yüzey profilinin ortalama aritmetik sapma
R <sub>max</sub>	:	Yüzey profilinin maksimum tepe-vadi yüksekli i
Rpm	:	Devir / dakika (revolution per minute)
R <sub>q</sub>	:	Yüzey profilinin ortalama karekök pürüzlülük de eri
R <sub>t</sub>	:	Yüzey profilinin ortalama tepe-vadi yüksekli i
Scfh	:	Standart kübik fit / saat (standard cubic feet per hour)
SiC	:	Silisyum karbür
Slpm	:	Standart litre / dakika (standard liters per minute)
T	:	Sıcaklık (temperature)
Ti	:	Titanyum
TiB <sub>2</sub>	:	Titanyum di-borür
v	:	A ınma hızı
V	:	Vanadyum
W	:	Tungsten
W	:	Yük

W/mK	:	Watt / (metre x kelvin)
WC	:	Tungsten karbür
WL/H	:	Abrazif aşınma hızı (Yük x kayma uzunluğu / malzeme sertliği)
$W_s$	:	Özgül aşınma hızı
wt%	:	Ağırlıkça yüzde (weight percent)
Y	:	Yitriya
$Y_2O_3$	:	Yitriyum oksit
Zn	:	Çinko
$ZrO_2$	:	Zirkonyum oksit

### **KISALTMALAR**

AISI	:	Amerikan demir ve çelik enstitüsü
APS	:	Atmosferik plazma sprej (atmospheric plasma spray)
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
CGDS	:	Soğuk gaz dinamik sprej (cold gas dynamic spray)
CVD	:	Kimyasal buhar biriktirme (chemical vapor deposition)
D-Gun	:	Detonasyon püskürtme (detonation gun)
DIN	:	Alman norm enstitüsü (deutsches institut für normung)
EB-PVD	:	Elektron demeti fiziksel buhar biriktirme
GFAA	:	Grafit fırınlı atomik absorpsiyon
HMK	:	Hacim merkezli kübik
HPPS	:	Yüksek basınçlı plazma sprej (high pressure plasma spray)
HRC	:	Rockwell C sertliği
HSP	:	Hegzagonal sıkı paket
HVAF	:	Yüksek hızlı hava-yakıt (high velocity air-fuel)
HVOF	:	Yüksek hızlı oksijen-yakıt (high velocity oxy-fuel)
LPPS	:	Düşük basınçlı plazma sprej (low pressure plasma spray)
MMC	:	Metal matrisli kompozit
PS	:	Plazma sprej
PS-TBC	:	Plazma sprejlenmiş – termal bariyer kaplama
PTA	:	Plazma transfer ark (plasma transferred arc)
PVD	:	Fiziksel buhar biriktirme (physical vapor deposition)

RFA	:	Radyo-frekans ablasyonu (radio-frequency ablation)
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope)
TBC	:	Termal bariyer kaplama (thermal barrier coating)
TGA+DTA	:	Termogravimetrik analiz + diferansiyel termal analiz
TGO	:	Termal büyüyen oksit (thermally grown oxide)
VPS	:	Vakum plazma sprej (vacuum plasma spray)
XRD	:	X ışını kırınımı (x-ray diffraction)
YMK	:	Yüzey merkezli kübik
YSZ	:	Yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya

# BÖLÜM 1

## G R

Termal sprej kaplama prosesleri ba ta havacılık endüstrisi için geli tirilmesine kar ın hızla yaygınla arak birçok sektörde kullanım alanına sahip olmu tur. İlk olarak 70' li yıllarda demir çelik endüstrisinde kullanılmaya ba lanmı tır. Hızla geli en termal sprej uygulamalarında kompozisyon, teknoloji ve proses yetenekleri demir çelik endüstrisinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmi tir. Koruyucu yüzey kaplama uygulamaları ile kullanım ömrü artırılmı kaplamalar ile daha yüksek hız, sıcaklık ve a ır yüklerle maruz ko ullarda çalı ma kabiliyeti kazandırılmaktadır. Koruyucu kaplamalarda a ınma ve oksidasyon direncinin artırılması temel amaçtır ve bu kaplamaların altlık bile enler üzerine biriktirilmesi termal sprej kaplama yöntemleri ile gerçekte tirilmektedir. Sürekli döküm hadde silindirleri ve hat üzeri ta ıyıcı silindirlerin termal sprej yöntemi ile kaplanmasında kullanılan kaplama malzemeleri Cr ve WC esaslı kaplamalardır. Belirtilen alanlarda en çok uygulanan termal sprej yöntemleri olarak APS (atmospheric plasma spraying) ve HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) teknikleri öne çıkmaktadır. Literatürde FeCr tozunun kaplama malzemesi olarak kullanıldı ı çalı malar mevcuttur ancak FeCr cüruf tozunun kaplama malzemesi olarak kullanımı ile ilgili yeterli bilgi bulunmamaktadır.

Bu proje çalı masında, termal bariyer sistemi ile APS yöntemi kullanılarak AISI 420 paslanmaz çelik altlıklar üzerine biriktirilen FeCr cüruf, ticari  $Al_2O_3+TiO_2$  ve  $Cr_2O_3$  kaplamaların yüksek sıcaklık a ınma davranı larının incelenmesi ve literatürde yüksek sıcaklık a ınmasıyla ilgili yapılmı çalı malarla ba vurularak kar ıla tırmalı olarak yorumlanması amaçlanmı tır. Bu amaçla, literatür taraması sonucu ve uzman görü üne ba vurularak belirlenen kaplama parametreleri ile biriktirilen kapmalar  $600^{\circ}C$ 'ye varan yüksek sıcaklık artlarında pin-on-disk a ınma deneylerine tabi tutulmu , deneyler sonucunda elde edilen hacim kaybı ve sürtünme katsayısı verileri mikro-sertlik ve SEM, EDS analiz sonuçları ile birlikte kaplamaların yüksek sıcaklık a ınma davranı larının yorumlanmasında ve birbirleri ile kar ıla tırılmasında kullanılmı tır. Böylece atık FeCr cüruf kaplama ile bazı oksit içerikli ticari kaplamalar ( $Al_2O_3+TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ) için yüksek sıcaklık a ınma direnci bakımından kar ıla tırmalı bir de erlendirme yapmak mümkün olmu tur.

Literatür özeti bölümünde termal bariyer kaplama sistemi ile biriktirilmiş oksit içerikli seramik kaplamaların yüksek sıcaklık aşınma davranışı ile ilgili günümüze kadar yapılan çalışmaları özetlenmiştir.

Yüzey Mühendisliği ve Kaplama Teknolojileri bölümünde yüzey mühendisliği ve kaplamaların günümüze kadar gelişimi hakkında genel bilgi verilmiş, tez çalışmasında kullanılan Atmosferik Plazma Sprey (APS) yöntemi başta olmak üzere günümüzde yaygın olarak kullanılan termal sprey kaplama yöntemleri, plazma sprey yöntemi ile biriktirilmiş termal bariyer kaplamalar ve kullanılan proses parametreleri detaylı biçimde açıklanmıştır.

Aşınma ve Aşınma Mekanizmaları bölümünde triboloji bilimi ve tarihçesi hakkında genel bilgi verilmiş, sürtünme ve sürtünme mekanizmalarından bahsedilmiş, aşınma mekanizmaları, dört temel aşınma çeşidi ve aşınma miktarlarının teorik hesabı ile aşınmanın ölçülmesinde kullanılan düzenekler hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Deneysel Çalışma bölümünde kaplama tozlarının temini, hazırlanması ve karakterizasyonu, altlık malzemelerin kaplama öncesi hazırlanması, seramik üst ve baş kaplama tozlarının AISI 420 paslanmaz çelik malzeme üzerine APS yöntemi ile biriktirilmesi, kullanılan kaplama parametreleri, elde edilen kaplamaların SEM, EDS ve mikrosertlik analizleri, kullanılan yüksek sıcaklık aşınma testi düzenekleri, aşınma testine tabi tutulan kaplamaların hacim kaybı ve sürtünme katsayısı verilerinin elde edilmesinde izlenen yöntem ve kullanılan cihazlar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Deneysel Sonuçlar ve Tartışma bölümünde FeCr curuf,  $Al_2O_3-TiO_2$  ve  $Cr_2O_3$  kaplamaların 200, 400 ve 600 °C'lerde yüksek sıcaklık aşınma testi sonuçları, kaplama yüzeylerinden ve arakesitlerinden alınan SEM, EDS ve mikrosertlik ölçüm sonuçları ile birlikte oksit içerikli seramik kaplamaların yüksek sıcaklık aşınma davranışlarının yorumlanmasında kullanılmıştır.

Sonuçlar ve Öneriler bölümünde oksit içerikli seramik kaplamaların yüksek sıcaklık aşınma davranışlarının incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmanın sonuçları özetlenmiş, ferrokrom tesislerinde bol miktarda bulunan atık FeCr curuf tozunun yüksek sıcaklık uygulamalarında aşınmaya karşı ticari seramik kaplamalara alternatif olarak

kullanılabilece i belirtilmi , bu malzemededen daha iyi bir a ınma performansı elde edilebilmesi için öneride bulunulmu tur.

Seramik kaplamaların a ınma davranı ları konusunda literatürde yer alan çalı maların büyük bölümü oda sıcaklı ında yapılan a ınma deneyleri ile gerçekleştirilmi tir. Bu tez çalı ma konusu ile yüksek sıcaklık artlarında yürütülen çe itli uygulamalara yönelik de erlendirme sunularak literatüre katkı sa lanması amaçlanmı tir.



## BÖLÜM 2

### L TERATÜR ÖZET

Seramik kaplamaların yüksek sıcaklık aşınma davranışlarının incelenmesi pek çok araştırmacının ilgisini çeken bir konudur. Bu bölümde, seramik kaplamaların yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışlarını inceleyen literatürdeki bazı çalışmalar ve elde edilen bulgulara ilişkin bir özet sunulmuştur.

Franco vd. (2016) çalışmalarında belirli oranlarda SiC partikül katkılı kompozit Ni-P/SiC kaplamanın yüksek sıcaklık aşınma davranışını incelemiştir. Elde ettikleri sonuçlar SiC partikül destekli kaplamaların yüksek sıcaklıkta partikül destekli olmayan kaplamalara göre daha iyi aşınma performansına sahip olduğunu, ısı iletim destekleyici partiküllerin daha güçlü bağlanmasını sağlayarak aşınma dayanımını daha da arttırdığını, SiC partikül destekli olmayan (ısı iletsiz) kaplamaların üst yüzeyde uygulanan mekanik ve termal gerilmelerden dolayı mikroçatlak içerikli adeziv aşınma sergilediğini, partikül katkısının yük taşımaya katkı sağladığını ve aynı zamanda yüzey altı bölgelerde mikro-çatlak yayılmasını engellediğini, kompozit ve ısı iletmeli kaplamalarda abrazyon aşınma ve triboksidasyon mekanizmalarının gözlemlendiğini göstermiştir.

Ouyang vd. (2015) çalışmalarında mikro-ark oksidasyon seramik kaplamaların  $Ti_2AlNB$  alaımının mikroyapı ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Elde ettikleri bulgular mikro-ark oksidasyon seramik kaplamaların tribolojik özelliklerinin hem oda sıcaklığında hem  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $Ti_2AlNB$ 'nin tribolojik özelliklerinden daha iyi olduğunu, oda sıcaklığında seramik kaplamalarda baskın aşınma mekanizmasının mekanik parlatma (mechanical polishing) ve gevrek mikrokırılma (brittle microfracturing) olduğunu, ancak  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'de bunlara yüzey yorulması ve adeziv aşınmanın engel ettiği için, iki adımlı gerilim kontrollü teknolojiye sahip  $NaAlO_2$  elektrolitinde üretilen seramik kaplamaların yüksek miktarda  $Al_2TiO_5$ ,  $R-TiO_2$ ,  $-Al_2O_3$  ve düşük miktarda  $-Al_2O_3$  fazlarını içerdiği için, ve  $Si_3N_3$  indirici bilyaya karşı oda sıcaklığında ve  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'de nispeten daha yüksek bir aşınma dayanımı sergilediğini,  $Na_2SiO_3$  elektrolit içinde hazırlanan SiC katkılı seramik kaplamaların sinterlenmiş  $Si_3N_3$  bilyaya karşı kuru aşınmada oda sıcaklığında ve  $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'de daha düşük sürtünme katsayısı verdiği için göstermiştir.

Hou vd. (2015) yaptıkları çalışmada Ni-tabanlı alaımdan olu an sıcak parçaların 1000°C'ye varan yüksek sıcaklıklarda oksidasyon ve aınmadan ötürü hasara uğramasını engellemek için, Inconel 718 alaım altlık üzerine yüksek hızlı oksiyakıt (HVOF) yöntemi ile CoCrAlYTaCSi alaım kaplama ile CoCrAlYTaCSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit kaplamayı biriktirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre yıtma ve sinterleme teknolojisi ile elde edilen küresel CoCrAlTaCSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu MMC kaplamanın Ni-tabanlı alaım altlık üzerine HVOF yöntemi ile kaplanması için uygun olup kaplama sonrası i lem görmemi CoCrAlYTaCSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama yo un bir mikroyapıya sahiptir ve birkaç mikrometre büyüklükte homojen dağılımı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri içermektedir. Diğer taraftan CoCrAlYTaCSi ve CoCrAlYTaCSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaların her ikisi kayma yüzeyleri üzerinde olu an sızlı katmanlardan (glazed layers) ötürü aındırıcı Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> bilyaya karşı 1000°C'de 0.25'lik düşük bir sürtünme katsayısı sergilemiştir. Kaplama sonrası i lem görmemi CoCrAlYTaCSi-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama 1000°C'ye kadar olan sıcaklıklarda iyi bir oksidasyon ve aınma dayanımı sergileyerek Ni-tabanlı sıcak alaım parçaları için potensiyel bir koruyucu kaplama oldu unu ortaya koymuştur.

Zhang vd. (2014) yaptıkları çalışmada Ti-46-5Al-1Cr-1-5V malzemesinin yüksek sıcaklık aınma dayanımını geli tirmek için radyo frekans püskürtüm metodu ile bu altlık üzerine bir Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit seramik kaplama hazırlamış ve bu kompozit kaplamanın mikroyapısını, element dağılımını ve olu an fazları incelemi şlerdir. Çalışma sonucunda Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplama -TiAl altlık üzerine ba arılı bir şekilde biriktirilmiş, kompozit kaplama mikroyapısı incelendi inde bunun ço unlukla Al ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazından olu tu u ve kaplama kalınlığının 20 µm civarında oldu u görülmü ştür. Mekanik testler sonucunda kompozit kaplamanın altlıkla kıyaslandığında üstün sertlik, H/E, H<sup>3</sup>/E<sup>2</sup> değerlerine sahip oldu u görülmü ştür. Kompozit kaplama üzerinde olu an aınma izinin altlık üzerindeki izden çok daha dar oldu u, kompozit kaplamanın hacim kaybının ve spesifik aınma oranının sırasıyla altlık kalınlığının 1/2 ve 1/3'ü kadar oldu u gözlemlenmiştir. Sonuçlar aynı zamanda kompozit kaplamanın 300°C sıcaklıkta altlık a kıyasla çok daha iyi bir anti-sürtünme özelli i sergiledi ini göstermiştir. -TiAl altlık iddettli abrazif, adeziv ve oksidatif aınma karakteristikleri sergilerken Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit seramik kaplama 300°C kuru kayma şartları altında hafif adeziv ve oksidatif aınma karakteristikleri sergilemiştir.

Sachek vd. (2014) yaptıkları çalı mada yüksek sıcaklıklarda kayma hızının plazma spre y ile biriktirilm i seramik kaplamaların ( $Al_2O_3 - 13\% TiO_2, ZrO_2 - 8\% Y_2O_3, Al_2O_3$ ) sürtünme ve a nma karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemi tir. Elde ettikleri bulgulara göre  $250^\circ C$  ve  $0.0001 - 0.01$  m/s hız aralı nda incelenen kaplamaların çelik-bronz sürtünme çiftindeki sürtünme katsayılarının kayma hızına çok ba lı olmadı ı, plazma spre y yöntemi ile kaplanmı di er kaplamalarla kar ıla tırıldı nda  $Al_2O_3$  kaplamanın triboteknik özelliklere sahip oldu u, sürtünme yüzeyleri üzerinde REM ve optik mikroskop ile yapılan ölçümler sonucunda a nmanın dü ük kohezyon bölgelerindeki gevrek kırılma mekanizmasına ba lı olarak ortaya çıktı ı, plazma spre y yöntemi ile biriktirilm i oksit kaplamaların triboteknik özelliklerinin kohezif dayanım ve artık gerilim seviyesini belirleyen spre y kaplama teknolojisine ba lı oldu u, ve yüzey katmanlarının lazer ile ergitilmesi yönteminin plazma spre y ile biriktirilm i elektrik yalıtımı sa layan kaplamaların triboteknik özelliklerinin verimli bir ekilde iyile tirilmesi için uygun bir yöntem oldu unu ortaya koymu tur.

Lanzutti vd. (2013) yaptıkları çalı mada termal spre y kaplama yöntemi ile biriktirdikleri kaplamaların mikroyapılarını, mekanik özelliklerini ve a nma dayanımlarını laboratuvar ortamında mikro ve nano boyutlu seramik partiküller kullanarak biriktirdikleri Ni/SiC kompozit kaplamaların mikroyapı, mekanik özellik ve a nma dayanımları ile kar ıla tırmı lardır. Oda sıcaklı nda ve  $300^\circ C$ 'de ball-on-disk konfigürasyonuna sahip tribometre ile yapılan tribolojik analiz sonucunda sermet termal spre y kaplamaların yüksek a nma dayanımına sahip oldu u, Ni nano-kompozit kaplamaların ise termal spre y yöntemi ile biriktirilen ve daha sert olan seramik/sermet kaplamalara göre daha iyi anti-a nma özellikleri sergiledikleri gözlemlenmi tir.

Liang vd. (2012) yaptıkları çalı mada oda sıcaklı ndan  $800^\circ C$ 'ye kadar olan sıcaklıklarda bir yüksek sıcaklık sürtünme ve a nma test düzene i kullanarak  $BaCr_2O_4$  seramiklerin sinterlenmi alumina bilya kar ısındaki sürtünme ve a nma özelliklerini incelemi lerdir. Yaptıkları çalı ma sonucunda oda sıcaklı nda  $BaCr_2O_4$  seramiklerin sürtünme katsayısı ve a nma oranlarının oldukça yüksek oldu u,  $400^\circ - 600^\circ C$  aralı nda bu malzeme için dü ük sürtünme katsayısı ve a nma oranlarının elde edildi i, tribolojik özelliklerin belirlenmesinde oksidasyon reaksiyonunun önemli bir rol oynadı ı, oksidasyona u rayan  $BaCr_2O_4$  'nin oksidasyon ürünününün  $BaCrO_4$  oldu u ve bu ürünün a nma yüzeyi üzerinde

düzgün bir kendili inden-ya lama filmi olu turdu u ve bunun da sürtünme ve a ınmayı etkin bir biçimde dü ürdü ü, ancak 800°C sıcaklı a ıkıldı ında a ırı oksidasyonun sinterlenmi BaCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> seramik kaplamanın ba ıl yo unlu unun dü mesine sebep olarak malzeme kaldırma sürecini daha da hızlandırdı ı tespit edilmi tir.

Narulkar vd. yaptıkları çalı mada Inconel 601 altlık üzerine plazma sprey yöntemi ile biriktirilm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiO<sub>2</sub> kaplamanın a ınma davranı nı incelemi lerdir. Yapılan SEM analizlerinden elde edilen verilere göre 300°C üzerinde kaplama malzemesinin sertli inin dü mesinden dolayı sürtünme katsayısının da dü mü oldu u, artan sıcaklıkla birlikte a ınma oranının da arttı ı, kaplamanın yüksek sıcaklıkta gevrek kırılma mekanizması sergiledi i, de i en yük ve sıcaklık de erleri ile birlikte kaplama özelliklerinde önemli de i imlerin meydana geldi i tespit edilmi tir.

Heshmat vd. yaptıkları çalı mada folyolu rulmanlar için yüksek i letme hız ve sıcaklıklarında kullanıma uygun geli mi bir kaplama sistemini tanıtmı lardır. Kaplama performansının belirlenmesi ve uygulama için en iyi kaplama kombinasyonunun seçilebilmesi için testler bir yüksek sıcaklık-yüksek hız tribometresinde yapılmı , folyolu rulmanların belirli bölgelerinde kullanılan Inconel test altlıkları çok sayıda farklı Korolon™ ile kaplanmı , a ındırıcı diskler ise krom, PS304, sert krom ve Korolon™ ile kaplanmı tır. Yapılan tribolojik testler yüksek hız-yüksek sıcaklık folyolu rulman uygulamalarında Korolon™ kaplamaların mükemmel tribolojik özellik sergiledi ini, kaplamanın tribolojik davranı nı büyük ölçüde sıcaklı ın belirlenmesine ra men ba latma/durdurma süreçlerinin ço unda 0.1'in altında sürtünme katsayılarının elde edildi i bildirilm tir.

Miyoshi vd. (2005) gerçekle tirdikleri gidip-gelmeli (reciprocating) yüksek sıcaklık kuru kayma a ınma deneylerinde 296, 873 ve 1073 K sıcaklıklar altında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) seramik malzemeyi (pin) B4C üzerinde kaydırarak a ınma davranı larını incelemi lerdir. Elde edilen sonuçlara göre Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve ZrO<sub>2</sub> bakımından zengin olan bütün seramikler etkin a ınma dayanımı uygulamaları için yeter kriter olan 10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup> N<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> temel a ınma kriterini ya kar ılamı ya da altında kalmı tır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) bile imi ve mikroyapısı a ınma ve sürtünme özelliklerinin kontrol edilmesinde baskın role sahip olmu tur. Seramik a ınma, sürtünme ve sertlik davranı larını kontrol eden mekanizma

malzemeye özgü heterofaz bağlanmanın ve kohezif bağlanmanın (yapı manın) kesme kırılmasına karşı dayanımını ve seramiklerde farklı boyutlarda olan kenetlenme mikroyapılarını içermiştir.

Lin vd. (2004) yaptıkları çalışmada nano-yapılı ve konvansiyonel  $Al_2O_3 - 3 \text{ wt. \%TiO}_2$  kaplamaları atmosferik plazma sprey yöntemini kullanarak biriktirmiş ve her iki kaplamanın bir silikon nitrür bilya karışımındaki tribolojik özelliklerini oda sıcaklığından  $600^\circ C$ 'ye kadar olan sıcaklıklar altında test etmişlerdir. Elde edilen deneysel bulgulara göre kaplamalara ait sürtünme katsayıları birbirine yakın olup  $0.85 - 0.10$  arasında değişmiştir, her iki kaplamanın aşınma oranı artan sıcaklıkla birlikte artmıştır, oda sıcaklığında her iki kaplamanın aşınma yüzeyi üzerinde silikon oksit içerikli bir koruyucu tabaka oluşarak aşınma oranlarını düşürmüştür, yüksek sıcaklıkta her iki kaplamanın aşınma yüzeyi üzerinde artan sıcaklıkla birlikte ilerleyen gevrek kırılma gerçekleşmiştir, ancak oda sıcaklığı hariçinde nano yapılı kaplamanın aşınma dayanımının konvansiyonel kaplamaya kıyasla daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Berger vd. (2004) yaptıkları çalışmada polikristalin alumina ilaveli TiC-tabanlı kaplamaların teknolojik ve mühendislik potansiyelini incelemek amacıyla bu kaplamaları kuru kayma koşulları altında  $0.3-3 \text{ m/s}$  hız ve  $23^\circ C-800^\circ C$  sıcaklık aralıklarında teste tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar bu amaçla (Ti, Mo) (C,N) – Co kaplamaları yıkımlı ve sinterlenmiş bir sprey tozu kullanarak HVOF tekniği ile altlık üzerine biriktirmişler, ve aşınma davranışlarını  $Cr_3C_2-NiCr$  kaplamalarla karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre  $Cr_3C_2-NiCr$  kaplamalarla karşılaştırıldığında (Ti, Mo) (C,N) – Co çok daha düşük toplam aşınma oranları ve sürtünme katsayıları vermiştir, yapılan bu karşılaştırma sonucunda TiC-tabanlı kaplamaların kayma aşınması uygulamaları için iyi bir potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir.

Yang vd. (2004) yaptıkları çalışmada oda sıcaklığı,  $500^\circ C$  ve  $1000^\circ C$ 'de gerçekleştirdikleri kayma, sürtünme ve aşınma testlerinde sinterlenmiş mullit, alumina, silikon karbür ve titanyum diborür ( $TiB_2$ ) seramiklerini teste tabi tutmuşlardır. Yapılan testler sonucunda oda sıcaklığında ve  $500^\circ C$ 'de yüksek spesifik aşınma oranları elde edilmiştir,  $1000^\circ C$ 'de yapılan testlerde ise daha düşük aşınma oranları gözlemlenmiştir. SEM analizlerinde tüm test koşullarında aşınma yüzeylerinde tribofilm oluşumu

gözlemlenmi , 500°C'deki yüksek a ınma oranına ba lı olarak a ınma partiküllerinin birbirine yapı masıyla bu sıcaklıkta poroziteli bir tribofilm olu umu ortaya çıkmı , 1000 °C'deki dü ük a ınma oranına ba lı olarak ve bu sıcaklıkta a ınma partiküllerinin sinterlenmesi sonucu nispeten yo un ve düzgün yüzeyli bir tribofilm olu umu bildirilmi tir.

## BÖLÜM 3

### YÜZEY MÜHENDİSLİĞİ VE KAPLAMA TEKNOLOJİLERİ

#### 3.1 Yüzey Mühendisliği

Günümüz endüstrisinin önemli bir bölümünü oluşturan makine ve imalat sektöründe gerekli yarı mamül ve/veya nihai ürün üretimi gerekse makine ve takım imalatında birbiri ile etkileşim halindeki parça yüzeylerinin zamanla aşınmaya maruz kalması kaçınılmazdır. Bu durum bakım maliyetlerini ve bu esnada üretimde meydana gelebilecek aksaklık ve gecikmelerin maliyetlerini doğrudan etkileyen ve minimize edilmesinin gerekliliği açık bir şekilde ortaya çıkarılmaktadır. Rekabetçi piyasa ortamında ayakta kalabilmek için aşınma, korozyon ve kararmaya dayanıklı, ısı, optik ve elektriksel özelliklerini uzun süre koruyabilen yüzeylerin üretilmesi gerekir. Ayrıca daha esnek ve daha az bakım gerektiren teknolojilere sahip olmak rekabet gücünü arttıracaktır. Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlama kavramlarını etkileşimli olarak inceleyen bir bilim dalıdır. Böylece triboloji, gerek akademik araştırmalar gerekse işletmelerin gerçek birimlerinde yeni yüzey teknolojilerinin uygulanmasına öncülük etmektedir. Bu alanda öne çıkan yüzey mühendisliği bir bilim dalının yüzeyinin yukarıda belirtilen özelliklerinin doğru malzemeden bağımsız olarak iyileştirilmesini kapsar (Fauchais vd, 2014; Davis, 2004). Yüzey mühendisliğinin çalışma alanı, istenen özellikleri elde etmek ve mevcut ürünün iyileştirilmesi için bir malzeme ya da elemanın yüzey özelliklerini metalürjik, mekanik, kimyasal, fiziksel, manyetik ve elektriksel olarak ya da bir kaplama ilavesi sağlanarak iyileştirmektir (Uslu vd., 2013). Yüzey mühendisliğinde pek çok teknik kullanılmaktadır (Cartier, 2003; Davis, 2004; Chattopadhyay, 2001). Bunlardan en önemlileri üç gruba ayrılabilir.

Birinci grup mevcut yüzeyin iyileştirilmesi sırasında malzeme bileşiminin etkilenmediği pekle tirme ve yüzey sertleştirme gibi yöntemleri içerir. Pekle tirme (deformasyon sertleştirme) işleminde malzemeler uygulama öncesinde haddeleme, darbe yükü, veya sertleştirme (bilyalı veya su jeti) ile plastik deformasyona uğratılır veya servis sırasında pekle tirilirler. Sertleştirme derinliği haddeleme için 1 mm'nin altındadır ancak darbe yükü ile bu derinlik 20 mm'ye çıkabilir. Bilyalı sertleirmede ise 0.5 mm civarındayken su jeti ile sertleirmede derinlik 0.1 mm'nin altındadır (Davis, 2002). Isıl işlem ile yüzey

sertle tirmede sertle tirilebilir kalite çelik malzemeler östenit sıcaklığına ısıtılır ve çeli in kritik so uma hızından daha yüksek hızla so utulurlar. Bu da alev, endüksiyon, yüksek frekanslı rezistans, plazma, lazer ve elektron demeti ile gerçekleştirilir. Sertle tirme derinliği 0.5 ile 5 mm arasındadır (Davis, 2002).

İkinci gruptaki yöntemler mevcut yüzeyin derinleştirilmesi sırasında kimyasal işleme maruz kalan bölgede kimyasal yapının derinleştirilmesi termokimyasal işlemleri içerir. Termokimyasal işlemlerden sementasyon işleminde düşük karbonlu çelik yüzeyine karbon verici ortamda (erimi siyanür banyosu veya CO, CH<sub>4</sub> veya C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> gibi gazlar kullanılarak) ortalama 900-950 °C civarındaki sıcaklıklarda karbon difüzyonu ile karbonca zengin sert bir yüzey katmanı elde edilirken, nitrürasyon işleminde ise yine düşük karbonlu ve nitrür olu turmaya uygun kimyasal kompozisyona sahip çeliklere (krom, molibden, alüminyum içeren ) 500-540 °C civarındaki bir sıcaklıkta azot verici bir ortamda (KCN, veya NaCN banyosu) azot difüzyonu gerçekleştirilmektedir. Termokimyasal işlemler sementasyon, karbonitrürasyon, nitrürleme, nitrokarbürleme ve borlamayı içerir (Fauchais vd, 2014).

Üçüncü grup yöntemler ise kaplama uygulamalarını içerir.

### 3.1.1 Kaplama Uygulamaları

Özel uygulamalara yönelik sıradışı işlevsel performans sunan özel çelikler ve süper alaşımlar gibi pek çok malzeme geliştirilmektedir. Ancak yüksek sıcaklıklara, korozyon ortamlara ve abrazyon dayanımına dayanım gibi birden fazla özelliğin bir arada istendiği durumlar, bazı özel alaşımların son eklenmesinde ortaya çıkan zorluklar ve tek bir parçanın bu özelliklere sahip bir malzemeden oluşmasının getirdiği yüksek maliyetler kaplamalara olan ihtiyacın her geçen gün artmasına sebep olmaktadır. (Davis, 2001)

İşlevsel performansı artırarak yüksek servis sıcaklıklarında çalışmaya izin vermesi (termal bariyer kaplama yoluyla); abrazyon, erozyon ve korozyon dayanımını sağlayarak bile en ömrünü arttırması; mil ve aks gibi bileşenlerde tüm bileşenin derinleştirilmesi yerine aşınma kısmının yeniden işlenerek bileşen ömrünün uzatılmasına imkân sağlaması ve düşük maliyetli bir malzemenin pahalı bir kaplama kullanılarak işlevselliğinin arttırılmasına izin vermesi gibi sebepler kaplama teknolojilerinin gelişmesine yol açmıştır (Davis, 2001).



Yüzey i lemleri ile kar ıla tırıldı ında i lemin parça malzemesine uyarlanması yerine kaplamalarda parça malzemesinden farklı, hatta neredeyse ba ımsız malzemelerin parça yüzeyi üzerine biriktirilmesine olanak sa lanır (Cartier, 2003; Davis, 2004; Chattopadhyay, 2001).

Yüzey kaplama teknolojileri kabaca ince filmlerin ve kalın filmlerin kaplanması ekinde ikiye ayrılır. 20  $\mu\text{m}$ 'nin altındaki ince filmler yüzey özelliklerinde mükemmel iyile tirmesalar. Kimyasal buhar biriktirme (CVD) veya fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemleri ile e siz sertlik ve korozyon direncine sahip kaplamalar üretilebilmektedir. Ancak ince film teknolojilerinin pek ço u dü ük basınçlı ve kontrollü bir ortam gerektirir ve bu yüzden daha pahalıdır. Ayrıca ince film kaplamalarda altlık boyut ve ekinin belirli sınırlar arasında olması gerekir. (Fauchais vd, 2014)

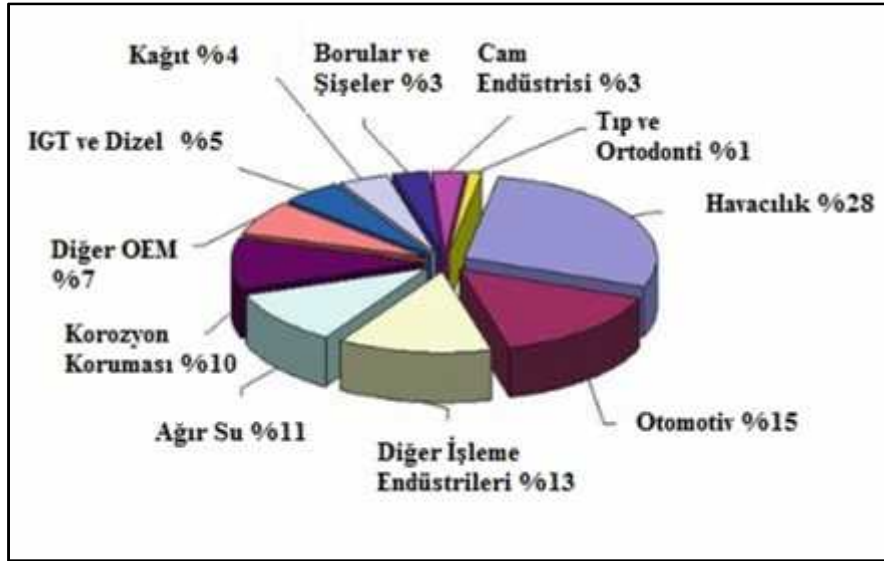
Kalın filmlerde kalınlık 30  $\mu\text{m}$ 'den birkaç mm'ye kadar çıkmaktadır. Bu tip kaplamalar termal bariyer kaplamalar gibi i levsel performansın kaplama kalınlı ına ba lı oldu u durumlarda kullanılır. Kalın film kaplama teknikleri kimyasal/elektromekanik kaplama, sert lehimleme, kaynaklı kaplama ve termal spreycaplama tekniklerini içerir (Fauchais vd, 2014). Kaplama prosesleri ve tipik özellikleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1: Çe itli kaplama prosesleri ve tipik özellikleri (Schneider vd., 2006).

<i>Kaplama Prosesi</i>	<i>Tipik Kaplama Kalınlı ı (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Kaplama Malzemesi</i>	<i>Özellikler</i>	<i>Örnekler</i>
PVD	1..5	Ti (C,N)	A ınma dayanımı	Aletler
CVD	1..50	SiC	A ınma dayanımı	Fiber Kaplama
Boya	1..10	Polimer	Korozyon dayanımı, estetik	Otomotiv
Termal Sprey	40..3000	Seramik ve metal ala ımlar	A ınma dayanımı, Korozyon dayanımı, ısı koruma	Rulman türbin kanatları

### 3.1.2 Termal Sprey Kaplamalar

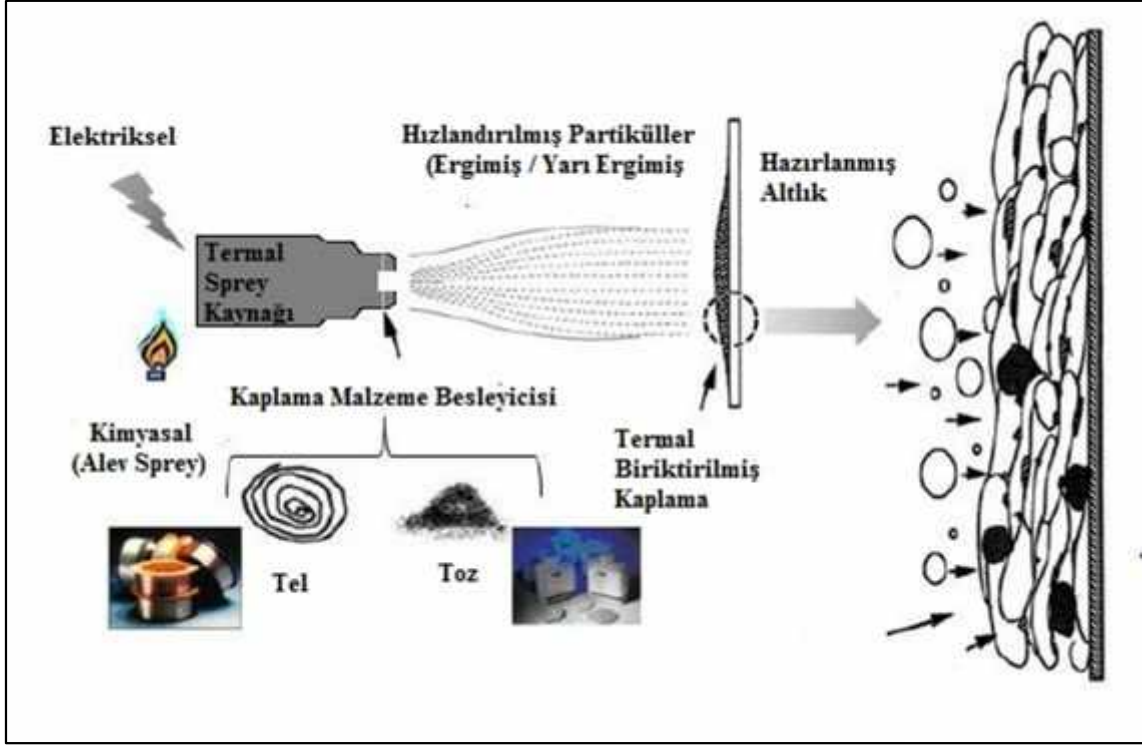
Termal sprej kaplama i lemi ince i lenmi metalik veya metalik olmayan yüzey kaplama malzemelerinin ergimi veya yarı-ergimi bir ortamda önceden hazırlanmış bir altlık malzeme üzerine biriktirilmesi i lemidir. Yüzey kaplama malzemesi toz, çubuk veya tel ekinde olabilir. Termal sprej tabancası gerekli ısıyı yanıcı gazları veya bir elektrik arkını kullanarak üretir. Malzemeler ısıtıldıklarında plastik veya ergimi bir faza geçerler ve sıkı tırlmış gaz vasıtasıyla hızlandırılırlar. Hapsedilmiş partiküller bu ekinde altlık yüzeyine iletilirler. Yüzeye çarpan partiküller düzle erek ince levhacıkları (splatlar) olu turur ve bu levhacıklar hazırlanmış yüzey üzerindeki düzensizliklere uyum sa layarak yüzeye ve birbirlerine yapı ırlar. Püskürtülen partiküller altlık yüzeyine çarptıktan sonra so uyarak lamelli bir yapı olu turur ve böylelikle kaplama katmanı ortaya çıkar (AWS Committee on Thermal Spraying, 1985). Termal sprej kaplamaların endüstriyel kullanım alanları ekin 1'de verilmiştir.



ekil 1: Termal Sprej Kaplamaların Endüstriyel Kullanım Alanları.

Tüm termal sprej yöntemlerinin ortak noktası tozların veya tellerin deformasyona uğrayabilen (ergimi veya yarı-ergimi) partiküllere dönüşürülebilmesi için bir ısı kaynağına ihtiyaç duyulmasıdır. Partiküller genellikle gazlar tarafından hızlandırılarak yüksek hızlarla altlık yüzeyi üzerine yönlendirilirler. Partiküllerin yüksek enerji ile altlık yüzeyine çarpması sonucu hızlı soğuma gerçekleşir ve oluşan ince yapı katmanlar lamelli kaplama yapısını meydana getirir (Bergmann ve Vicenzi, 2011). Altlık yüzeyi

üzerinde olu an lamelli yapının ematik diyagramı ekil 2’de, TBC kaplamaların biriktirilmesinde yaygın olarak kullanılan termal sprej yöntemlerine ait tanecik hız ve sıcaklıkları ise Tablo 2’de verilmi tir.



ekil 2: Altık yüzeyi üzerinde olu an lamelli yapının ematik diyagramı (Bergmann ve Vicenzi, 2011).

Tablo 2: Termal bariyer kaplamalarda yaygın olarak kullanılan termal sprej kaplama yöntemlerine ait tanecik hızları ve sıcaklıklar (Döleker, 2015).

Yöntem	Tanecik hızı (m/s)	Tem Sıcaklı ı (°C)
APS	200-300	15000
VPS	200-300	15000
HVOF	700-800	2500-3000
CGDS	800-900	800-900

Termal sprej kaplama tekni inin kullanımına ili kin ilk kayıtlar 1900'lere uzanmaktadır. sviçreli bir mühendis olan M. U. Schoop kur un ve kalayın asetilen/oksijen alevinden aldığı enerji ile bir kaynak torcu içinde ergitildi i bir sisteme ait ilk patentleri almı tir. Schoop düzene i toz haline getirilmi malzemeleri püskürtebilecek hale getirmi ve 1908 yılında ark-sprej yöntemi için patent almı tir. 1970'li yıllarda plazma sistemlerindeki

gelişmeler kullanılan termal sprej yöntemlerinde artı a yol açmı tır. Bu teknikler termal bariyer ve a ınmaya dayanıklı kaplama sistemlerine olan talebi kar ılayacak düzeye ula mı tır (Schoop, 1910;1911;1915; Brossard, 2010; Bunshah, 2001; Fauchais vd., 2014; Berndt, 2001; Knight, 2005).

Bu icatlar prensip olarak alev ve ark sprej yöntemlerinin ortaya çıkı mını temsil eder. Termal sprej kaplamaların geli im sürecinin ba langıcında kullanılan alev sprej yönteminin nispeten dü ük proses sıcaklıklarında gerçekte tirilmesi i lenebilen malzeme çe idinin ve sonuç olarak üretilebilen kaplama çe idinin sınırlı kalmasına sebep olmu tur. Sonraki yıllarda termal sprej kaplama yöntemi hem kullanılan teknoloji hem de kullanılan malzemelerin çe itlili i açısından büyük geli im göstermi tir (Fauchais vd., 2014).

Yüzey özelliklerinin de i tirilmesinde kullanılan termal sprej kaplamalarda yalnızca yüzey kaplamalarının pahalı malzemelerden olu ması ekonomik açıdan bu teknolojinin geli mesindeki itici güç olmu tur. Termal sprej kaplamaların geli mesine sebep olan di er bir üstünlü ü ise çok sayıda malzemenin kaplama malzemesi olarak kullanılabilmesidir. Kimyasal yapısı bozulmadan ergiyebilen malzemelerin büyük bölümü termal sprej kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Ayrıca kaplama i leminin yapılması için altlı ın yüksek sıcaklıklara ısıtılmasına gerek duyulmaz. Böylece yüksek ergime sıcaklı ına sahip malzemeler yüzeyi i lenmi ve ısıl i lem görmü parçalar üzerine bu parçaların özelliklerini de i tirmeden biriktirilebilmektedir. Termal sprej kaplama yönteminin ba ka bir üstünlü ü ise a ınmı ve hasar görmü kaplamaların soyularak yeniden kaplanmasına imkan sa lamasıdır. Termal sprej kaplamaların en büyük dezavantajlarından biri ise bu biriktirme yöntemlerinde yalnızca sprej tabancasının görebildi i bölgelerin kaplanmasına olanak sa lamasıdır, bu da boyut sınırlamalarına ve tabancanın eri emeyece i çukur bölgelerin kaplanamamasına yol açar (Tucker, 1994; Bergmann ve Vicenzi, 2011).

Son yıllarda yapılan çalı malar tanecik hızlarının arttırılarak püskürtülen partikül sıcaklıklarının dü ürülmesi, yüksek yapı ma mukavemeti ve yo unluk de erleri ile dü ük oksit içeriklerinin elde edilmesi yönündedir. Bu da so uk-sprej kaplama yöntemi gibi parçacıkların katı halde ve çok yüksek hızlarda püskürtüldü ü yöntemlerin geli mesine yol açmı tır (Hermann vd., 2000).

Termal sprej yöntemleri malzemenin ergitilmesi veya kaplama olu umuna izin verecek

derecede plastisite kazandırılması için enerji veya ısının verilme ekline göre sınıflandırılmaktadır. Bu enerji veya ısı yanma, plazma olu turan elektrik enerjisinin da ılımı, veya cold sprey yönteminde yüksek basınçlı gazlar yoluyla sa lanır. Termal sprey yöntemleri ayrıca kaplama malzemesinin nasıl sa landı ına göre de sınıflandırılır. Bu toz, tel veya çubuk ekinde olabilir. Di er bir sınıflandırma yöntemi ise hızlandırılmı nozüldeki akı yönüne göre dir. Yüksek ve çok yüksek basınçlar nozül içinde yukarı yönde, veya hazne içindeki dü ürülmü veya kontrollü hava nozül içinde a a ı yönde dir. Yöntemler ayrıca güç tüketimine ve biriktirme hızına göre de sınıflandırılır (Fauchais vd., 2014; Schneider vd., 2006). ekil 3'te enerji veya ısının verilme ekline göre, Tablo 3'te farklı kaplama parametrelerine göre termal sprey yöntemleri ematik olarak gösterilmektedir.



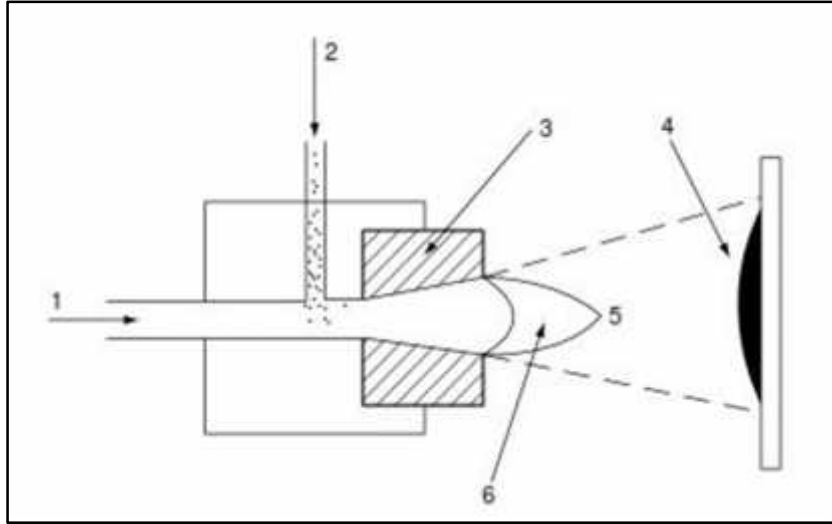
ekil 3: Termal sprey teknolojilerinin sınıflandırılması (Dorfman, 2012).

Tablo 3: Farklı kaplama parametrelerine göre termal sprey kaplamaların sınıflandırılması (Schneider vd., 2006).

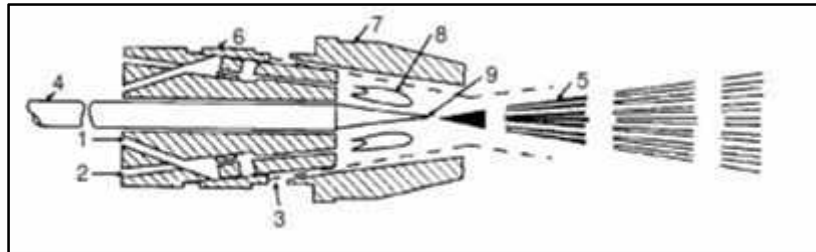
	Alev	HVOF	D-Gun	Elektrik Ark	APS	VPS
Gaz Sıcaklığı [°C]	3000	3000	4000	4000	12,000-16,000	12,000-16,000
Tanecik Hızı [m/s]	40	800	600-1000	100	200 - 400	300 - 600
Püskürtme mesafesi [mm]	100-200	150-350	50-400	80-200	80-350	300-500
Ba kuvveti [N/mm]	8	>70	>70	12	60-80	>70
Oksijen içeriği [%]	10...15	1...5	1...5	10...20	2...3	ppm aralı 1
Porozite [%]	10...15	1...2	1...2	10	2...5	<0,5
Püskürtme Kapasitesi [kg/saat]	2...6	1...9	1	10...25	2...10	3...15

### 3.1.2.1 Yanma ile Gerçekleşen Termal Sprey Yöntemleri

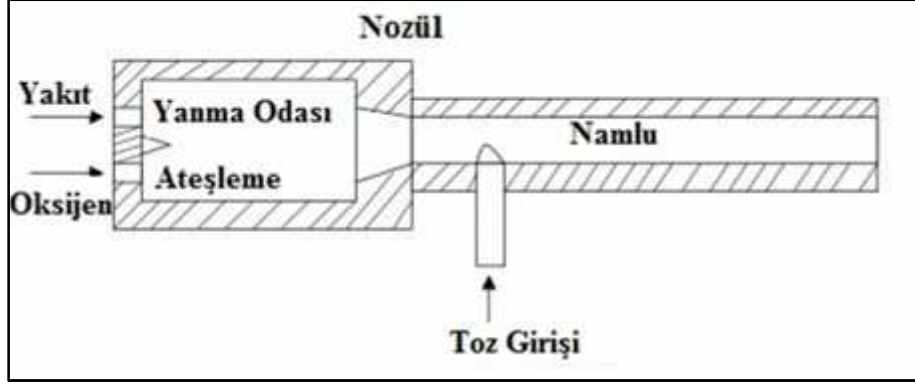
Yanma ile gerçekleştirilen termal sprej yöntemleri tozların, tellerin veya çubukların alev ile püskürtüldüğü alev sprej yöntemleri; besleme malzemesi olarak çok miktarda tozların kullanıldığı, yüksek yukarı akış basınçları ile gerçekleştirilen ve süpersonik hızların korunmasını sağlayan Laval nozüllerin kullanıldığı yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) veya yüksek hızlı hava-yakıt (HVAF) yöntemleri; ve tozların ısıtılarak hızlandırılması için laval nozülü içinde yüksek sıcaklık ve basınçta yukarı yönlü bir patlama için patlayıcı bir karışımın kullanıldığı detonasyon sprej (D-gun) yöntemlerinden oluşmaktadır. Toz ve tel beslemeli alev sprej tabancalarınınematik diyagramı ekil 4 ve ekil 5'te, HVOF tabancasının ematik diyagramı ekil 6'da verilmiştir.



ekil 4: Toz alev sprej kaplama yönteminin ematik diyagramı. 1: işletme gazları (yakıt ve oksijen), 2: toz beslemesi, 3: tabanca gövdesi, 4: biriktirilen kaplama, 5: tanecik akışı, 6: alev (Pawlowski, 2008).



ekil 5: Tel/çubuk alev sprej kaplama yönteminin ematik diyagramı. 1: oksijen girişi, 2: yakıt gaz girişi, 3: sıkıştırılmış hava girişi, 4: tel/çubuk, 5: erimiş damlacık akışı, 6: işletme gazları için nozül, 7: sıkıştırılmış hava başlığı, 8: alev, 9: tel/çubuk.



ekil 6: HVOF Tabancasınınematik diyagramı (Pawlowski, 2008).

Yanma ile gerçekleştirilen sprey yöntemlerinin ortak dezavantajı püskürtülen malzemenin ergitilmesi için en yüksek gaz sıcaklığının yanıcı gaz karışımının adyabatik alev sıcaklığı tarafından belirleniyor olması ve bunun da yüksek sıcaklıklı seramiklerin püskürtülmesinde sınırlayıcı rol oynamasıdır. Öte yandan yanma reaksiyonunda açığa çıkan ürünler püskürtülen malzemenin bu gazlarla reaksiyona girmesine yol açabilmektedir. Bütün olumsuz yönlerine rağmen yanma ile gerçekleştirilen termal sprey yöntemleri düşük maliyetlerinden ötürü halen en çok kullanılan termal sprey yöntemleridir. (Fauchais vd., 2014; Ducos, 2006). Avrupa ve Amerika’da 2006 yılında termal sprey işletimi için gerekli yatırım maliyetleri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4: 2006 yılı itibarıyla Avrupa ve Amerika’da termal sprey yöntemleri için gerekli yaklaşık yatırım maliyetleri.

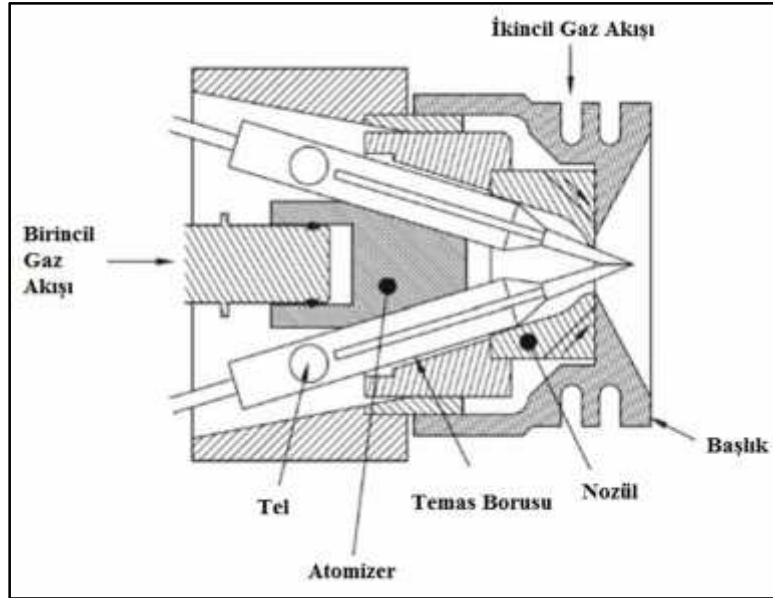
Yöntem	Euro (€) cinsinden değer
Manuel Toz veya Tel Alev	5,000 civarı
Otomatik Toz veya Tel Alev	5,000 – 10,000
HVOF-HVAF	50,000 – 100,000
Ark Sprey	9,000 – 22,500
APS	75,000 – 185,000
VPS	600,000 – 2,000,000
PTA	50,000 – 75,000

Diğer termal sprey yöntemleri ile karşılaştırıldığında HVOF sprey yöntemi 3000 K altında ergime sıcaklığına sahip malzemelerin kullanılması bakımından avantaj sağlamaktadır. HVOF kaplamalar diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek yoğunluk ve bağ dayanımı

sa olarak a ınma ve korozyona kar ı koruma uygulamalarında tercih edilmektedir (Karaolanlı vd., 2015). HVOF yönteminin yüksek kaplama kalitesi Mann ve Arya'ya göre (2001) termal sprej için sıcak alevden güç alan yüksek hızlı gaz jetinin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Diğer kimyasal/elektrokimyasal yöntemlerle oluşturulmuş kaplamalarla kıyaslandığında bu kaplamaların çevresel üstünlükleri de bulunmaktadır (Bergmann ve Vicenzi, 2011). HVOF ve plazma sprej yöntemi arasındaki farklılıklardan biri püskürtme esnasında altlı a iletilen ısıdır. Plazma sıcaklığı HVOF'takinden yüksek olduğu halde HVOF yönteminde altlı a iletilen sıcaklık genellikle plazma sprej yöntemine göre daha fazladır (Joshi, 1992).

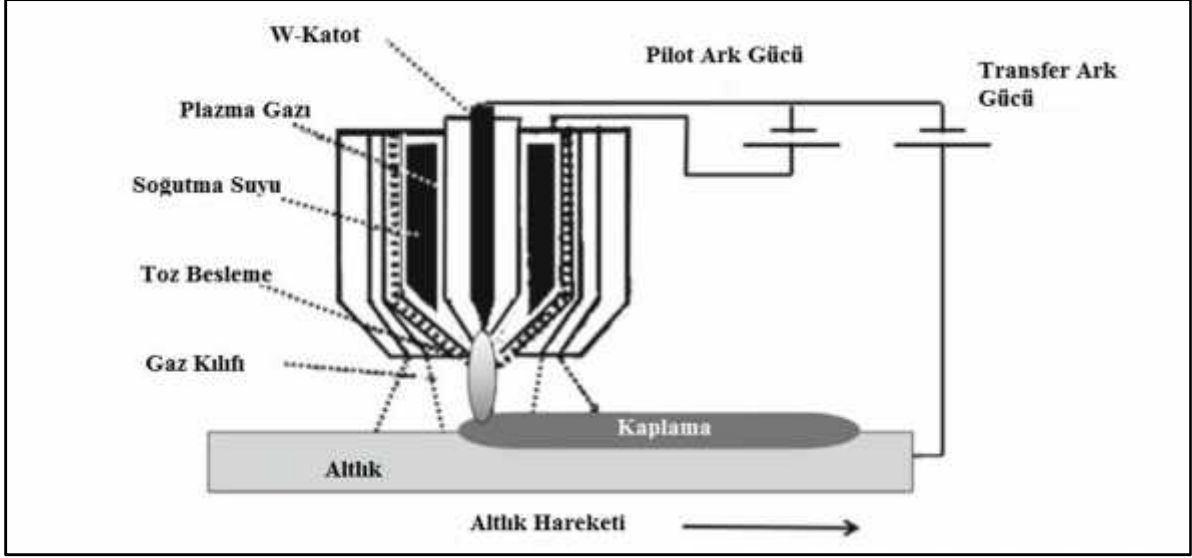
### 3.1.2.2. Elektrik De arjı ile Gerçekle en Termal Sprej Yöntemleri

Elektrik de arjı ile gerçekleştirilen proseslerde gaz, ark bo alması veya radyo frekans bo alması ekindeki bir elektriksel bo alma ile ısıtılır. Bu yöntemler plazma sprej, tel ark sprej ve plazma transfer ark (PTA) yöntemleridir. Tel ark sprej ve plazma transfer ark biriktirme yöntemlerininematik diyagramları ekil 7 ve ekil 8'de verilmiştir.



ekil 7: Tel ark sprej tabancasının ematik gösterimi (Bolot vd., 2008)





ekil 8: Plazma transfer ark (PTA) biriktirme yöntemininematik diyagramı (Wilden vd., 2006).

Tel ark spre y yönteminde iki tel arasında olu an bir ark tel uçlarını ı erğitir ve yüksek hızlı bir gaz akı damlacıkları altlık üzerine gönderir. Bu yöntem toz yerine tel kullanıldı ı için daha ekonomiktir ancak tellerin iletken ve sünek olması gerekti inden malzeme seçimi sınırlıdır. Kaplama porozitesi di er plazma-temelli yöntemlere göre daha fazladır. PTA termal spre y yöntemi di er termal spre y yöntemlerinden farklıdır çünkü altlık gazları ve spre y malzemesini ısıtan ark için bir elektrot vazifesi görür (genellikle anot). Bu özellik altlık ve kaplama arasında son derece güçlü bir ba olu umunu ve kaplama yapısının yo un olmasını sa lar. (Hallen, Lugscheider ve Ait-Mekideche, 1991; Dumola ve Heath, 1997; Hermanek, 2001; Hussary ve Heberlain, 2001; Gatto, Bassoli ve Fornari 2004). Kaplama özelliklerini kaplama malzemesi ve kaplama malzemesinin sa landı ı form ile birlikte çok sayıdaki i lem parametresi belirler. Altlık durumunu karakterize eden parametrelerin yanında kaplama özelliklerini en fazla etkileyen parametreler çarpma anındaki partikül/damlacık sıcaklık ve hızlarını etkileyen parametrelerdir. Bu partikül özellikleri öncelikli olarak gaz sıcaklık ve hızlarına ba lıdır (Fauchais vd., 2014).

### 3.1.2.3 Gaz Genle mesi ile Gerçekle en Termal Spre y Yöntemleri (So uk Gaz Dinamik Spre y – CGDS)

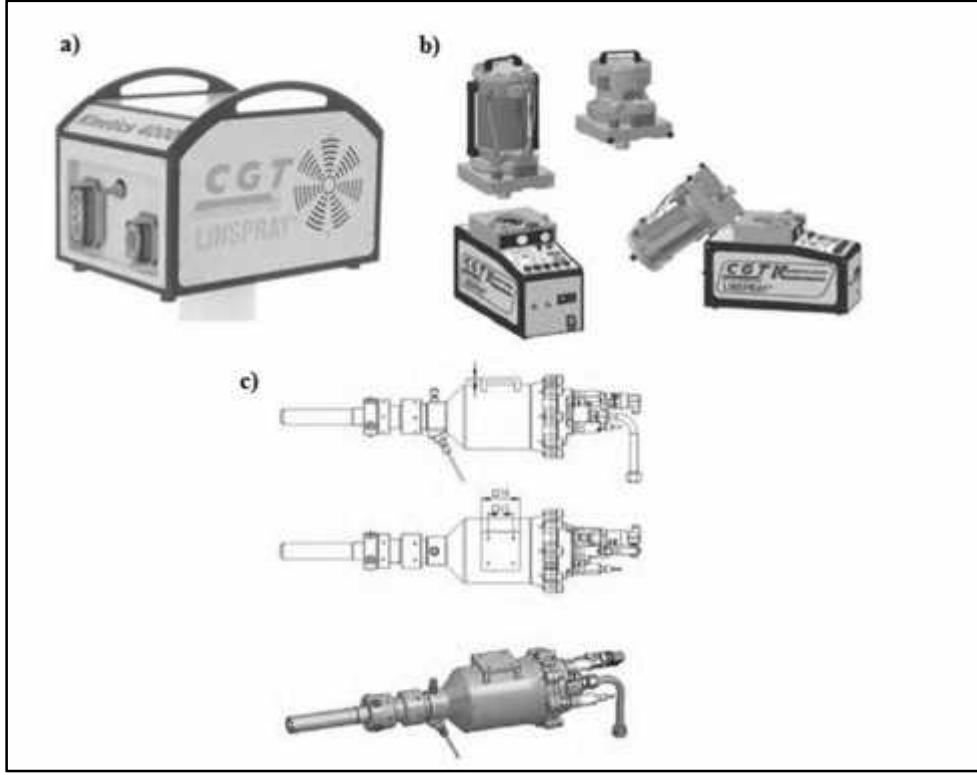
So uk spre y yöntemi metal toz partiküllerinin uygun bir altlık üzerine balistik çarpı ması sonucu kaplamanın elde edildi i bir kaplama yöntemidir (Yandouzi vd., 2007;

Champagne, 2007; Papyrin, 2001; Van Steenkiste, 1999; Stoltenhocff, 2002). Metal toz tanecik boyutları 5 ila 100 µm arasında de i ir ve yüksek hızlı bir gaz akı ının içinde enjekte edilirler. Yüksek hızlı gaz akı ı basınçlandırılmı ve önceden ısıtılmı bir gazın daralan-genileyen bir nozül içinde genleşmesi sonucu olur. Basınçlı gaz basınç ve sıcaklıktaki düşüşle birlikte süpersonik hıza ulaşır (Champagne, 2007; Dykhuisen ve Smith, 1998; Kosarev vd. 2003; Grujicic vd., 2004). İlk başta ayrı bir gaz akı ı ile toz toz tanecikleri boz az öncesinde veya boz az sonrasında nozül içine enjekte edilir. Partiküller daha sonra ana nozül gaz akı ı ile hızlandırılarak nozül çıkışında bir altlık üzerine çarparlar. Çarpma sonucu katı partiküller deforme olur ve altlık ile aralarında bir boşluk oluşur (Champagne, 2007; Dykhuisen vd., 1999; Grujicic vd., 2003). Proses devam ettikçe partiküller altlığa çarpmaya devam eder ve biriktirilmemiş malzeme ile arasında boşluk oluşur, bu da porozite içeriğini son derece düşük ve boşluk dayanımı yüksek üniform kaplamaların biriktirilmesine imkansı sağlar. ‘‘Soğuk spre’’ terimi bu nispeten düşük çalınma sıcaklıklarını (800-900 °C) ifade etmek için kullanılır.

Soğuk Sprey yöntemi ilk olarak 1980’lerin ortalarında Novosibirsk’teki Rus Bilim Akademisi’nin Sibirya birimi olan Teorik ve Uygulamalı Mekanik Enstitüsünde geliştirilmiştir (Champagne, 2007; Alkhimov, 1994). Günümüzde pek çok soğuk spre yaygınlaşması dünyanın çeşitli bölgelerinde yürütülmektedir (Champagne, 2007). Soğuk gaz spre yönteminin özellikleri, malzemeleri ve uygulamaları Tablo 5’te, soğuk gaz spre sisteminin bölümleri Şekil 9’da verilmiştir.

Tablo 5: Soğuk Sprey Yönteminin Özellikleri, Malzemeleri ve Uygulamaları (Marx vd., 2006)

Soğuk spre uygulaması/amacı	Tipik malzemeler	Soğuk spre yönteminin avantajları
Korozyon dayanımı	Zn, Ni, pirinç	Düşük porozite
iletken, termal yönetim	Cu, Al, Çelik, Ni	Düşük porozite, düşük oksijen içeriği
Onarım, yapısal kaplamalar	Alaşımlar, Lehimleme/sert lehimleme	Düşük porozite, faz değişimi yok.
Lehim/sert lehim biriktirme	Alaşımlar	Güçlü boşluk, faz değişimi yok, düşük oksijen içeriği
Lehimlenebilirliği artırma	Cu	Düşük oksijen içeriği



ekil 9: CGDS düzeneğinin bölümleri. a: HT30017 gaz ısıtıcı, b: TF 4000-2 toz besleyici, c: nozul tertibatı (Champagne, 2007).

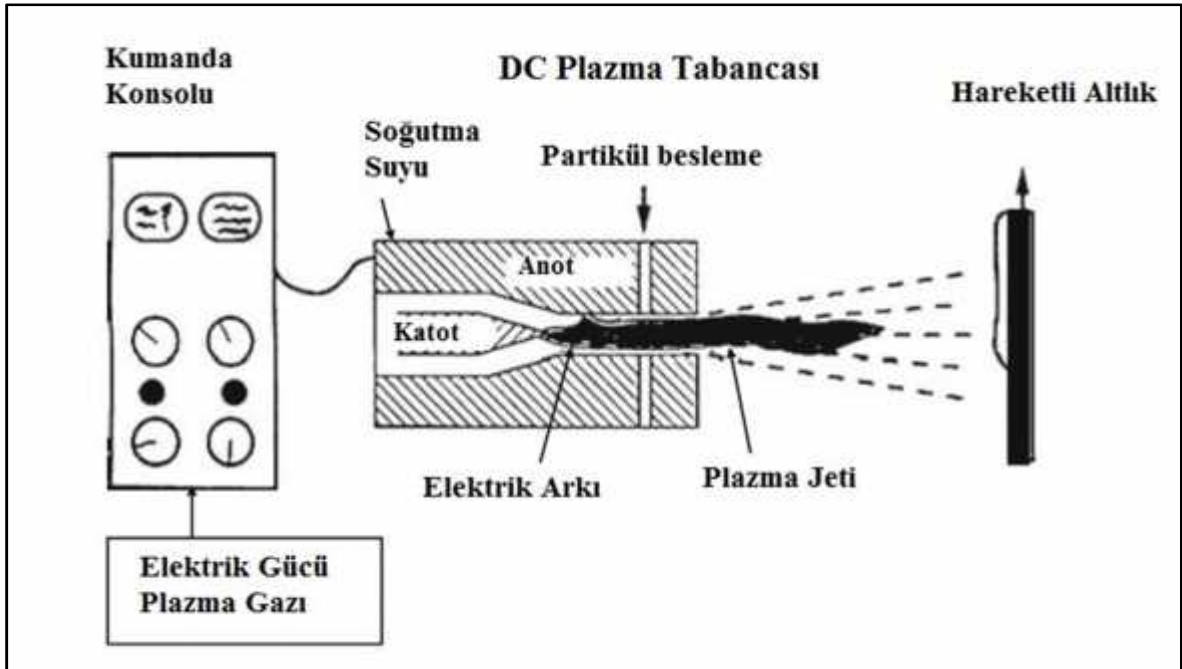
### 3.1.3. Plazma Sprey Kaplamalar

Plazma sprej yöntemleri püskürtülebilen ve kaplanabilen malzemelerin çeşitliliğinden ötürü tüm termal sprej yöntemleri arasında en esnek olanıdır. Kaplama kalitesi ise genellikle yanma ile gerçekleştirilen sprej yöntemlerine göre daha iyidir. Yaygın olarak kullanılan iki tür plazma sprej kaplama yöntemi bulunmaktadır. Bunlar atmosferik plazma sprej yöntemi (APS) ve düşük basınçlı plazma sprej yöntemi yani LPPS veya diğer adıyla vakum plazma sprej yöntemi, yani VPS'dir. Plazma sprej yöntemlerinin büyük bölümünde plazma jeti açık atmosfere verilirken (atmosferik plazma sprej yönteminde olduğu gibi), kontrollü bir atmosfer haznesinin veya düşük basınçlı bir ortamın kullanıldığı plazma sprej yöntemlerinde (LPPS veya VPS'de olduğu gibi) kaplama kalitesi (yoğunluk, homojenlik, üretilebilirlik) artarken maliyet de artmaktadır (Mauer vd., 2010, Scrivani A. vd., 2003; Greuner H. vd., 2004; Siegmann S. vd., 2004; Renouart-Vallet G. vd., 2004).

Plazma sprej prosesinde ergitilmiş veya ısı ile yumu atılmış malzeme bir altlık yüzeyi üzerine kaplama olu turmak için püskürtülür. Partiküllerin hızlandırılmasından sorumlu mekanizma plazmadır. Plazma (atom-altı partiküllere sahip bir iyonize gaz kümesi) gazın yüksek yo unluklu bir elektrik alanından geçmesi sonucu olu ur. Büyük miktarda enerji ço unlukla ultraviyole radyasyon ile açığa çıkar. Bu proste partiküller enerji sa layan ekipmana ba lı olarak 300 m/s hıza ve 13,000 ila 30,000 K'e kadar çıkan sıcaklıklara ula ır (Bergmann ve Vicenzi, 2011).

Plazma sprej prosesinde birkaç mikrometreden birkaç milimetreyi bulan kalınlıklara kadar kaplamalar üretilebilmektedir. Plazma sprej yönteminde kullanılan ham malzemeler metalleri, seramikleri ve bu ikisinin karı ımı olan sermetleri içerir. Pek çok ko ul altında gerçekleştirilebilen plazma sprej prosesi uyarlanması kolay bir prostedir (Küçük vd. 2015a; 2015b; 2016a; 2016b; 2016c).

Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen plazma sprej yönteminde spesifik enerji yo unlu u malzemeleri eritmeye yetecek düzeydedir ve bu da kararlı bir ergimi faz olu umuna olanak sa lar (Zatorski ve Herman, 1991). Isıtılan ve hızlandırılan partiküllerin sıcaklıkları partikül enjeksiyon hızından etkilenmektedir (Joshi, 1992; Bergmann ve Vicenzi, 2011).

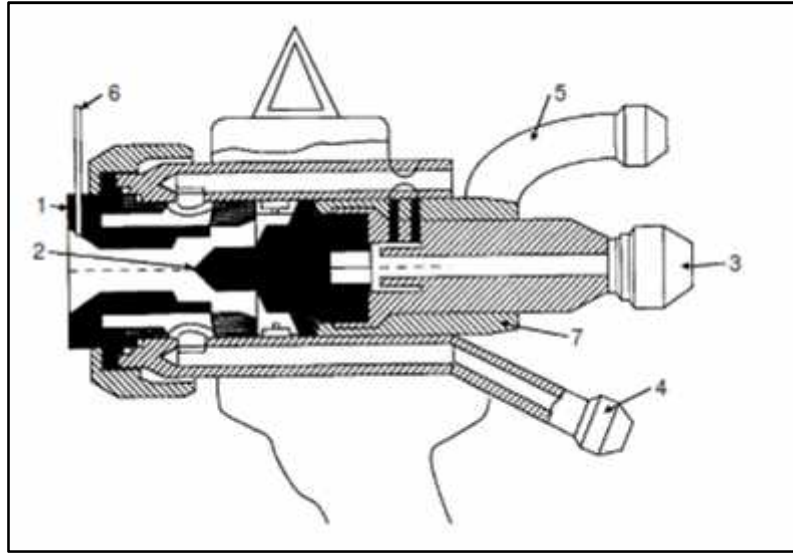


ekil 10: Plazma sprej tabancasınınematik gösterimi (Fauchais vd., 2014).

ekil 10'da plazma sprej tabancasının ematik resmi verilmi tir. Toz çok yüksek sıcaklıktaki plazma alevinin içine püskürtülür ve burada hızla ısınarak yüksek sıcaklı a ula ır. Hızlandırılmı partiküller altlık yüzeyine çarparak hızla so ur ve kaplama yapısını olu turur. Altlık sıcaklı ı i lem sırasında dü ük tutulabilir. Buradaki amaç altlık malzemesinde hasarları, metalürjik de i imleri ve çarpılmaları en aza indirmektir. (Bergmann ve Vicenzi, 2011).

### 3.1.4. Atmosferik Plazma Sprey (APS) Yöntemi

APS yönteminde kullanılan tabanca Gerdien-tipi plazma jeneratörüne dayanmaktadır (Pawlowski, 2008; Gerdien ve Lotz, 1922). Plazma kullanarak spreyle kaplama yönteminin patentini Gage vd. (1972) ile Giannini ve Ducati (1960) almı tır (Pawlowski, 2008).



ekil 11: Plazma tabancasının bölümleri. 1: anot, 2: katot, 3: su çıkışı ve katot bağlantısı, 4: su girişi ve anot bağlantısı, 5: letme gazları için girişi, 6: Toz enjektörü, 7: elektrik izolatörü (Pawlowski, 2008).

letme gazları genellikle Ar veya Ar-He, Ar-H<sub>2</sub>, Ar-N<sub>2</sub> karışımları olmakla birlikte bazı durumlarda N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> karışımı kullanılabilir. Akı hızı genellikle 40 ila 50 slpm civarında olmakla birlikte bazı tertibatlarda 80 slpm'ye çıkabilmektedir. Yüksek enerjili tabancalarda bu hız 500 slpm'yi bulabilir (Pawlowski, 2008; Jungklaus vd., 1996). Plazma jetinin oluşumunda her bir gazın ayrı bir rolü vardır (Pawlowski, 2008; Janisson vd., 1999). Ar gazı nozul içindeki arkı stabilize ederken He, N<sub>2</sub> veya H<sub>2</sub> gazları yüksek ısı

iletkenlikleri sayesinde partiküllere ısı transferini hızlandırır. Su stabilizeli tabancalarda su buharı bir plazma gazı olu turur. Hidrokarbonlar ve karbondioksit gazı gibi plazma olu turucu gazlar da bu amaç için kullanılabilir. Ancak bu eklede reaktif plazma olu turan tabancalarda grafitten yapılmı bir katot bulunması gerekir (Pawlowski, 2008; Fridlyand, 1995). APS yönteminde olu an ark birkaç yüz amperlik bir elektrik akımı ve a a ıdaki iki temel parametre tarafından belirlenen bir gerilim ile karakterize edilir (Pawlowski, 2008):

- Katot ve anot arası mesafe (artıkça gerilim artar)
- kincil gaz seçimi (hidrojen gibi iki atomlu gazlar ark gerilimini arttırır).

Tipik bir plazma tabancası içindeki plazma sıcaklı ı 14,000 K civarındadır ve hızı da nozülde 800 m/s'ye ula abilmektedir. Su-stabilizeli bir tabancada bu sıcaklık 28,000 K'e, hız ise 2900 m/s'ye çıkabilmektedir (Pawlowski, 2008; Plazjet, 1995). letme gazları genellikle püskürtülen partiküllerin ergime derecelerini etkileyebilmektedir. Su buharı (su-stabilizeli tabancada oldu u gibi) veya hidrojen (tipik plazma tabancasında oldu u gibi) kullanıldı ında partiküllerin ergitilmesi bu gazların yüksek ısıl iletkenliklerinden ötürü tek atomlu gazlara kıyasla daha kolay olmaktadır. Di er taraftan tek atomlu gazların avantajı yüksek hızlara ula abilmeleridir. Bu yüzden partiküllerin ergitilmesi ve hızlandırılması için tek atomlu gazlarla moleküler gazlar genellikle karı ım ekinde bir arada kullanılmaktadır. Tek atomlu He gazı yüksek ısıl iletkenli i ve dar bir sprej jeti olu turabilme kabiliyetinden ötürü ikincil gaz olarak kullanılmaktadır (Pawlowski, 2008; Ingham ve Fabel, 1975). Tipik plazma tabancalarında elektrik gücü 80 kW'a kadar olmakta, ancak su stabilizeli tabancalarda 200 hatta 250 kW'a çıkabilmektedir (WSP 500, 1997; Pawlowski, 2008).

Farklı i letme gazları için katot ucunun farklı geometrilerde olması gerekmektedir. Anot geometrisi (profil, çap) plazma akı yolunu, sıcaklık ve hızı etkiler. Buna örnek olarak daralan-geñi leyen bir anot nozülünün ark gerilimi dalgalanmalarını azalttı ı Schwenk vd. (2003) tarafından belirtilmi tir (Pawlowski, 2008). Elektrik arkı anot ve katot ile bir veya daha fazla bölgede temas ederek a ınmaya yol açar (Fisher 1972; Pawlowski, 2008).

Plazma genellikle bir kılıf veya i letme gaz vorteksi kullanılarak stabilize edilir. Toz enjeksiyonu radyal veya aksiyal do rultudur. Toz besleyiciler genellikle döner plaka tipinde olup toz besleme hızı 50 ila 100 g/dak arasında de i ebilmekte, ancak HPPS veya

aksiyal enjeksiyon tabancalarında 200 g/dak'ya ulaşabilmektedir. Su stabilizeli tabancalarda 1650 g/dak ya ulaşan hızlar rapor edilmiştir (WSP 500, 1997; Pawlowski, 2008).

Temel proses parametrelerinden sprej mesafesi 60 ila 130 mm arasında değişmektedir. Sprej ortamı havadır. Tabancanın altlığına göre hızı 50 ila 2000 mm/s'dir. Seramiklerin metallere üzerine biriktirilmesi sırasında kalıntı gerilmelerinin oluşmasından ötürü altlık sıcaklığı önemli bir parametre olmaktadır. Bu gibi durumlarda altlık sıcaklığı 373 ila 473 K arasında tutulmalıdır. Kaplama yoğunluğunun ve diğer özelliklerin geliştirilmesi açısından sprej-sonrası işlemler uygulanabilmektedir. Bu işlemler arasında tavlama fırınında işlemler ve lazer işlemleri bulunmaktadır (Pawlowski, 2008).

Plazma sprej yöntemi ile metal altlıklar üzerine biriktirilen seramik kaplamaların bağımsız dayanımı 15 ila 25 MPa arasında değişmektedir. Plazma sprejle biriktirilen kaplamalar (NiAl veya NiCrAl, Mo) ile bağımsız dayanımı 70 MPa ve üzerine çıkabilmektedir. APS kaplamaların porozite içeriği genellikle %1 ila %7 arasında değişmektedir. Bu kaplamaların kalınlıkları 300 ila 1500 µm arasındadır (Mash, vd., 1961; Okada ve Maruo, 1968; Zverina ve Vesely, 1976; Thornton, 1982; Tucker, 1982; Vuoristo vd., 1992; Keller vd., 1995; Pawlowski, 2008).

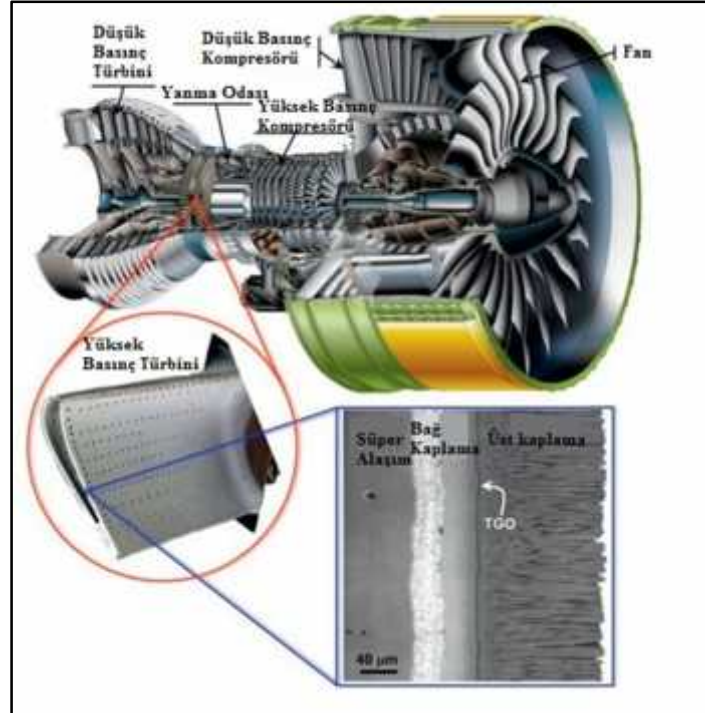
Plazma sprej yöntemi besleme tozu olarak kullanılan hammadde çeşitliliği ve elde edilen kaplama karakteristikleri açısından oldukça esnek bir yöntemdir. Bu yöntemin genel avantajları:

- Çok yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin püskürtülmesinde kullanılabilmesi (örneğin tungsten ve zirkonya gibi refrakter malzemeler).
- Elde edilen kaplamaların diğer konvansiyonel termal sprej kaplamalara göre (HVOF ve D-gun haricindeki) daha yoğun, güçlü ve temiz olması.
- Elde edilen mikro yapıların pek çok uygulama için uygun olması (havacılık, otomotiv, tıbbi cihazlar, tarım, iletişim, vs. gibi).

Plazma sprej yönteminin dezavantajları ise nispeten yüksek maliyeti ve kompleks bir proses olmasıdır (Bergmann ve Vicenzi, 2011).

### 3.2 Termal Bariyer Kaplamalar (TBC'ler)

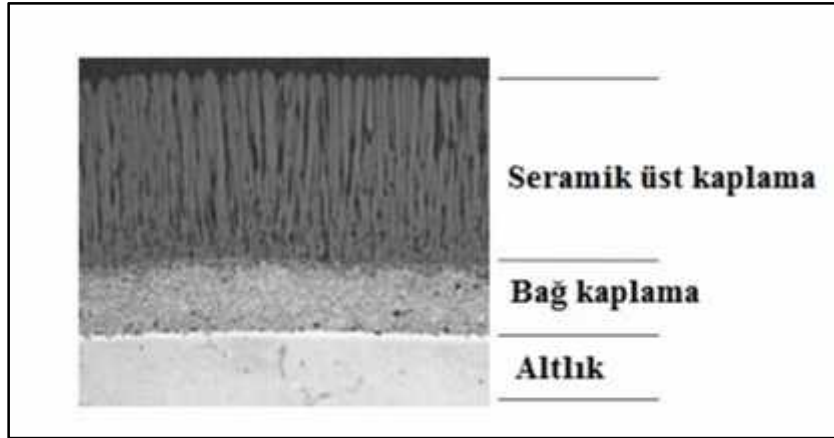
Yüksek sıcaklık koşullarında çalışan endüstriyel bileşen sıcaklıklarının düşürülmesi ve servis ömürlerinin artırılması doğrultusunda yapılan çalışmalar sonucu termal spray kaplama yöntemleri ile üretilen termal bariyer kaplama teknolojisi ortaya çıkmıştır. Termal bariyer kaplama sistemleri bu amaçla en çok gaz türbin motorlarında, güç üretiminde, denizcilik ve havacılık uygulamalarında, yanma odası ve türbin bölümlerinde metal yüzeylerin sıcaklıklarının düşürülmesinde kullanılır. TBC uygulamaları yüksek gaz sıcaklıklarına ve düşük soğutucu hava akımına izin vererek ve türbin kanatları için daha uzun işletme ömürleri sağlayarak özellikle bu sektörlerde kullanılan motorların performans ve iletme gücünün artırılmasına imkan sağlar. TBC sistemi her biri farklı işleve sahip üç katmanlı kompleks yapısı sayesinde gaz türbin bileşenlerini zorlu termal artlardan koruyarak verimliliği artırır ve istenmeyen gaz emisyonlarına engel olur. 200 K üzerinde sıcaklık düşürülmesini sağlayan TBC'ler sayesinde 1,500 K'i geçen türbin giriş gazı sıcaklıklarına erişilebilmektedir. TBC'ler ilk kez 1970'li yılların ortalarında ara tırmalarda kullanılan bir gaz türbin motoru üzerinde başarıyla test edilmiştir (Miller, 1997; Golosnoy vd., 2009; Gupta, 2015). Uçak motorunda kullanılan TBC kaplamanın temsili resmi ekil 12'de verilmiştir.



ekil 12: Uçak motorunda kullanılan TBC kaplamanın temsili resmi. (Clarke vd., 2012).



TBC'ler her biri farklı bir fonksiyon ve gereksinime sahip üç katmandan oluşmaktadır (Şekil 13). Isıl izolasyon sağlayan ve düşük ısıl iletkenliğe sahip bir seramikten oluşan en üst katmanda en çok kullanılan malzeme zirkonya adı verilen  $ZrO_2$ 'dir. Yalıtkan seramik kaplama altlık üzerinde oksidasyona dayanıklı bir metalik katman olan "bağ kaplama" üzerine biriktirilir. Bu kaplama platinum alüminit gibi bir difüzyon alüminidi, veya altlığın alaşımlarına uyum sağlayan NiCoCrAlY gibi bir kaplama olabilir. Seramik kaplamanın biriktirilmesi sırasında genel olarak  $Al_2O_3$ 'ten oluşan termal büyüyen oksit tabaka (TGO) bağ tabaka üzerinde seramik-bağ kaplama ara yüzünde oluşmaktadır. Oluşan bu TGO tabakası seramik üst katman ile metalik bağ kaplaması arasında adezyonu artırıcı işlev görür. TBC sistemleri bu şekilde 3 katmandan oluşmaktadır: seramik üst kaplama, TGO ve metalik bağ kaplama. Her bir katmanın yaklaşık kalınlık aralığı şu şekildedir: seramik 125 ila 1000  $\mu m$ , bağ kaplama 50 ila 125  $\mu m$ , ve TGO 0.5 ila 10  $\mu m$ . TGO tabakasının kalınlığı TBC tabakasının kaplama prosesinde ve işletme altında yüksek sıcaklık ortamında kalma süresine bağlıdır (Chagnon ve Fauchais, 1984; McPherson, 1984; Eaton vd., 1994; Bose ve DeMasi-Marcin, 1997; Klemens ve Gell, 1998; Shillington ve Clarke, 1999; Clarke, 2003; Levi, 2004; Karaoğlu vd., 2011; Karaoğlu vd., 2012).



Şekil 13: Termal bariyer kaplama sisteminin SEM (taramalı elektron mikroskobu) kesit görüntüsü (Bose, 2007).

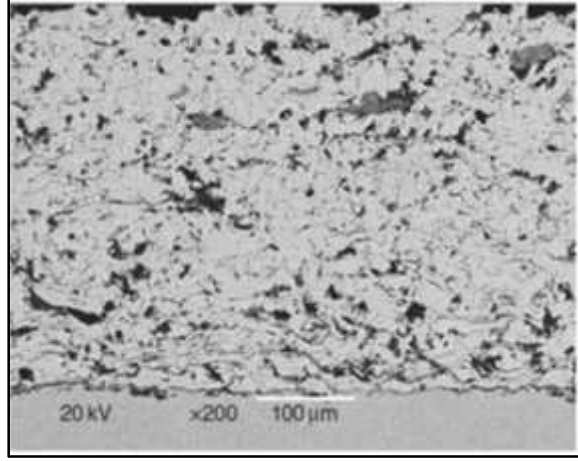
### 3.2.1. Plazma Sprey Yöntemi ile Biriktirilen Termal Bariyer Kaplamalar (PS-TBC)

Plazma sprej yöntemi ile biriktirilmiş termal bariyer kaplamalar 1960'lı yıllarda bile en sıcaklıklarını 100-200°C kadar aşarak çalışmak için geliştirilmiştir. O zamandan beri PS-TBC

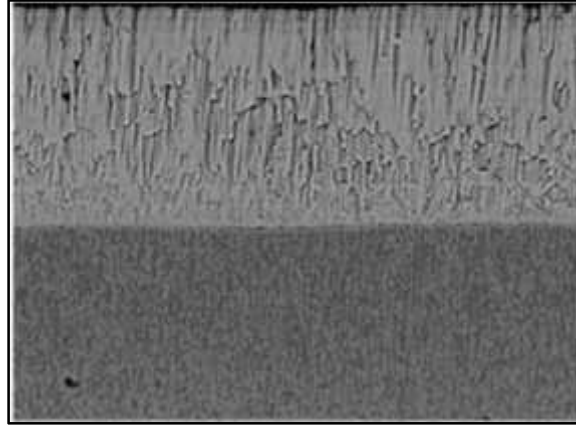
kaplamalar dizel, havacılık alanlarında, gaz türbinleri ve jet motorlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Hodge vd., 1980; Bennet vd., 1987; Huibin ve Hongbo, 2011).

TBC'leri üstün kılan yönleri termodinamik özellikleridir. Plazma sprej kaplamaların özellikle poroziteli ve katmanlı mikroyapıları yttria ile stabilize edilmiş zirkonyanın (YSZ) halihazırda düşük olan ısı iletkenli ini (plazma sprej ile biriktirilmiş YSZ'nin tipik ısı iletkenlik katsayısı, ısı iletkenlik katsayısı 2,5 W/mK olan yığın YSZ'ye kıyasla 1 W/mK'dır) %60 oranında düşürmektedir (Clarke ve Levi, 2003; Cao vd., 2004; Huibin ve Hongbo, 2011). Aynı zamanda kaplama mikroyapısındaki porozite ve çatlaklar sistemdeki mekanik uyumluluğu artırarak oda sıcaklığından 1000 °C üzerindeki sıcaklıklara kadar değişen iletme sıcaklıklarında gerçekleşen termal çevrimler sırasında termo-mekanik uyumluluk sağlamaktadır (Huibin ve Hongbo, 2011).

1990'larda PS-TBC kaplamalara ek olarak elektron demeti ile fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) yöntemi kullanılarak biriktirilmiş kaplamalar sanayide kullanılmaya başlanmıştır. EB-PVD yöntemi ile biriktirilen TBC'ler PS yöntemi ile biriktirilen kaplamalara kıyasla daha yüksek gerilim toleransına sahiptir ve biriktirilen seramik kaplama mikro-yapılarının kontrolünü kolaylaştırır. Ancak maliyetinin nispeten düşük olması, yüksek üretim verimliliği, ayarlanabilir-geniş kaplama kalınlığı ve içeriğinin kolay kontrol edilebilmesi gibi sebeplerden dolayı PS-TBC havacılık ve enerji üretimi alanlarında halen en çok kullanılan yöntemdir (Miller, 1997; Huibin ve Hongbo, 2011). PS yöntemi ile biriktirilmiş TBC mikroyapısı Şekil 14'te, EB-PVD yöntemi ile biriktirilmiş TBC kaplamanın mikroyapısı Şekil 15'te verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi PS yöntemi ile biriktirilmiş TBC sisteminde seramik kaplama nispeten yoğun metalik bağ kaplama üzerinde porozite ve çatlaklı bir mikroyapıya sahipken, EB-PVD yöntemi ile biriktirilmiş TBC sisteminde yoğun bağ kaplama üzerindeki seramik katmanın kolonsal yapısı dikkat çekmektedir (Leyens vd., 2000; Peters vd., 2001; Sohn vd., 2001; Tomimatsu vd., 2003; Zhang vd., 2003; Anderson vd., 2004; Chen vd., 2006; Peng vd., 2007; Huibin ve Hongbo, 2011).



ekil 14: PS ile biriktirilmiş zirkonya-yttria/MCrAlx TBC sisteminin seramik-ba kaplama arayüzünün SEM görüntüsü (Huibin ve Hongbo, 2011).



ekil 15: EB-PVD ile biriktirilmiş zirkonya-yttria/MCrAlx TBC sisteminin seramik-ba kaplama arayüzünün SEM görüntüsü (Huibin ve Hongbo, 2011).

### 3.2.2. PS-TBC Proses Parametreleri

Plazma sprej teknolojisi ile hazırlanmış TBC sistemlerinin özellikleri, kullanılan malzeme ve onun mikro-yapısal özellikler yanında aynı zamanda kullanılan proses yöntemine ve parametrelerine bağlıdır. Plazma sprej kaplama mikro-yapısını ve özelliklerini etkileyen pek çok proses parametresi bulunmaktadır (bunlar Tablo 6'da özetlenmiştir). Bu parametreler dört grupta toplanabilir: (i) plazma gücü, plazma gazı debisi, plazma gaz türü ve elektrot geometrisi gibi plazma karakteristikleri; (ii) toz boyutu ve şekli, toz ve taşıyıcı gaz debisi, toz püskürtme alanı gibi toz besleme parametreleri; (iii) jet hızı ve sıcaklığı, partikül hızı ve sıcaklığı, partikül yolu gibi plazma jeti parametreleri; (iv) çarpma an partikül hızı, açısı, çarpma an partikülün ergime durumu, altlık türü, pürüzlülüğü ve sıcaklığı gibi

çarpı an partikül parametreleri. Bu parametreler birbirlerinden bağımsız değildir ve birbirleri ile etkileşim halindedir. Yapılan çalışmalar güç beslemesinin, altlık sıcaklığının, kaplama kalınlığının ve sprey mesafesinin kaplama mikro-yapısı ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan partikül sıcaklığı ve hız da ılımlı kaplamanın yapıma mukavemetini, porozitesini ve oksit içeriğini belirler. Yüksek partikül hızlarının daha yüksek partikül/damlacık çarpıma enerjisi sağladığı kabul edilir. Bu yüksek kinetik enerji partikül deformasyonunu arttırarak daha iyi yapıma mukavemetinin ve kaplama yoğunluğunun elde edilmesini sağlar. Partikül sıcaklığı, hızı ve partiküllerin çevresel etkileşimleri özellikle plazma jet hızı ve sıcaklığını belirlemekte, bu da oluşan kaplamanın mikro-yapısını ve özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Plazma jeti içindeki ergimi partikül oranı partikül yollarına bağlı olarak değişmektedir. Plazma jeti içinde sıcaklık ve hızlar, jet merkezi ve nispeten soğuk ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkına bağlı olarak önemli değişiklikler gösterebilmektedir. Jet merkezinden jet sınırına doğru sıcaklık değişimi birkaç milimetre içinde birkaç bin dereceye kadar olabilmektedir. Bu sıcaklık düşüşü taşıyıcı gaz hızının düşmesine ve doğrudan taşıyıcı gaz viskozitesinin artmasına sebep olur. Plazma jetinin nozülünden çıkmasıyla da sıcaklık ve hızda düşer. Bu yüzden gaz sıcaklığı, hızı ve viskozitesi hem aksiyal hem radyal doğrultularda değişim göstermektedir. Plazma jeti içinde yol alan partikül hızları gaz-sıcaklık ve hızı gradyanlarına bağlı olarak değişiminden, partiküllerin sıcaklık ve hızları izledikleri yollara bağlı olmaktadır. Jet merkezine püskürtülen partiküller ergiyerek altlıca çarpıp kaplamayı oluşturacak olan damlacıkları (splatlar) oluştururken jet merkezine ulaşamayan ergiyen partiküller ergimez veya kısmen ergir. Bu ergimemi veya kısmi ergimi partiküller biriktirilen kaplama yapısına dahil olarak kaplama yoğunluğunun düşmesine sebep olur (Leger vd., 1988; Herman, 1988; McPherson, 1989; Chraska ve King, 2001; Paul vd., 2007; Huibin ve Hongbo, 2011).

Tablo 6: PS proses parametreleri (Lugscheider vd., 1996; Huibin ve Hongbo, 2011).

<b>PS Proses Parametreleri</b>			
<b>Plazma özellikleri</b>	<b>Toz beslemesi</b>	<b>Plazma Jeti</b>	<b>Partikül çarpıması</b>
Güç beslemesi	Toz geometrisi	Jet hızı, sıcaklığı	Çarpı an partikül hızı
Plazma gazı	Tozun termal özellikleri	Partikül hızı ve sıcaklığı	Partikül çarpıma açısı
Plazma gazı debisi	Taşıyıcı gaz debisi	Partikül yolu	Çarpı an partikülün ergime durumu

## BÖLÜM 4

### A İNMA VE A İNMA MEKAN ZMALARİ

#### 4.1 Triboloji

“Birbirine göre ba ıl hareket halindeki etkile imli yüzeyleri inceleyen bilim ve teknoloji” ekinde tanımlanan triboloji terimi ilk kez Jost (1966) tarafından kullanılmı tır (Zum Gahr, 1987). “Triboloji” kelimesi sürtme, ovalama anlamına gelen Yunan “tribos” kelimesinden türemi tir. Triboloji bilimi sürtünme, ya lama ve a ınma ile ilgili her türlü bilimsel ara tırmayı ve triboloji bilgisinin teknik uygulamasını kapsar. Özellikle 1950’li yıllardan itibaren geli mi sanayiye sahip ülkelerde konunun ekonomik boyutu ile ilgili yürütülen çalı malarla tribolojinin ekonomik açıdan ne kadar önemli ve teorik bilgilerin sanayiye aktarılmasının ne kadar gerekli oldu unun farkına varılmı tır. Bu ara tırmalara göre a ınma ve sürtünmeden ötürü geli mi ülkelerin (ABD ve Almanya) u radı ı maddi kayıplar ülkelerin gayrisafi milli hasıllarının (GSMH) %1’i ile %2,5’i arasında de i mektedir (Jost, 1966; BMFT Raporu, 1976; ASME Raporu, 1977; Jost ve Schofield, 1981; BMFT Raporu, 1984; Zum Gahr, 1987). Farklı ülkelerde yürütülen ara tırma faaliyetleri de tribolojinin önemini vurgulamaktadır (Jost, 1981; Czichos, 1984; Sakurai, 1984; Sasada, 1984; Zum Gahr, 1987).

Sürtünme ve a ınma malzemeye ait özellikler olmayıp mühendislik sistemlerinin (tribosistemler) karakteristik özelliklerini ifade eder. Sürtünme ve a ınma sırasıyla önemli enerji ve malzeme kayıplarına yol açar. Sürtünme üzerine çalı an OECD ara tırma grubu a ınmayı “bir parçanın çalı an yüzeyindeki ba ıl hareket sonucu bu yüzeyde kademeli olarak gerçekte en malzeme kaybı” olarak tanımlamı tır (OECD Research Group on Wear of Engineering Materials, 1969; Zum Gahr, 1987). DIN 50320’de a ınma “mekanik hareket sonucu, yani katı, sıvı veya gaz halindeki kar ı kütle ile temas ve ba ıl hareket sonucu, katı malzeme yüzeyinden malzemenin kademeli olarak a ınması” ekinde tanımlanmı tır (DIN 50320, 1979; Zum Gahr, 1987). Barwell’e (1979) göre ise a ınma malzeme yüzeyindeki a ırı gerilmelerden ötürü etkile im halindeki makine bile enlerinde kütle kaybı ekinde ortaya çıkmaktadır. A ınma nadiren ciddi maddi zararlara neden olsa da i letme verimlili ini dü ürür. Bile enlerde sebep oldu u boyutsal de i iklikler ve yüzey

hasarları titreşimlere ve diğer dolaylı problemlere yol açar. Gerilimli yüzeyin üzerinde veya yakınında bulunan çatlakların yayılması ağırlı durumlarda bile enin çatlamasına neden olur. Özellikle küçük boşluk ve toleranslarla çalışılan tribosistemlerde biriken aşınma kalıntıları bile enlerde meydana gelen boyutsal değişimlerden daha ciddi sorunlara yol açabilir (Zum Gahr, 1987).

## 4.2 Sürtünme

Sürtünme, temas halindeki iki kütlelerin birbirlerine göre bağıl harekete zorlanması sonucu harekete karşı gösterdikleri dirençtir. Bu, mevcut durumdaki herhangi aşınma mekanizmasıyla, yağlayıcı veya yüzey filmiyle ve yüzey topografileri ile yakından bağlantılıdır. Sürtünme ile açığa çıkan ısı yağlayıcı performansını etkileyebilir gibi temas halindeki malzemelerin ve/veya yüzey filmlerinin/kaplamalarının özelliklerinde değişikliklere yol açabilir, bazı durumlarda da ısıyı gören malzemenin özelliklerini değiştirebilir. Sürtünme sonucu açığa çıkan ısı gerekli önlemler alınmadığında, bile enlerde mekanik hasarlara, yapısal zayıflamalara, aşırı kütle kaybına ve hatta yangın ve patlamalara neden olabilecek seviyelere ulaşabilmektedir (Archard, 1980; Davis, 2001).

Hareket eden makine bile enlerinde enerji kaybının büyük bölümünden sürtünme sorumludur. Bu yüzden sürtünme ile ilgili çalışmaların temelinde sürtünmeyi kontrol altına alma ihtiyacı yatmaktadır. Genellikle sürtünmenin düşük olması istendiği gibi (yataklar, dişliler, malzeme proses işlemleri) bazı durumlarda yüksek sürtünme değerleri de istenebilmektedir (fren, debriyaj mekanizmaları, vida dişleri, yol yüzeyleri). Ancak bu durumların hepsinde bile en ve makine tasarımlarında sabit, kontrol edilebilir ve tahmin edilebilir sürtünme değerlerinin elde edilmesi makine ve bile enlerinin verimli ve güvenilir biçimde çalışabilmesi açısından son derece önemlidir (Davis, 2001).

Sürtünme ile ilgili önemli kavram ve terimler ‘‘sürtünme kuvveti’’, ‘‘sürtünme katsayısı’’, ‘‘sürtünme enerjisi’’ ve ‘‘sürtünme ısısı’’ şeklinde sıralanabilir. Bu kavram ve terimler ‘‘bir katı kütlelerin diğeri üzerinde harekete karşı gösterdiği direnç’’ şeklinde tanımlanan katı sürtünmesi bağlamında tanımlanmaktadır. Söz konusu hareket kayma veya yuvarlanma şeklinde olabilmektedir (Davis, 2001).

Sürtünme kuvveti, temas halindeki iki kütle arasında birinin diğeri üzerinde kayabilmesi için yenmesi gereken temas kuvveti ekleminde tanımlanır. Bu kuvvet yüzeylerin temas düzlemi üzerinde çalışır ve Etkilik 1’de gösterildiği gibi genellikle yüzeylere normal doğrultudaki kuvvetle, yani  $N$  ile doğru orantılıdır.

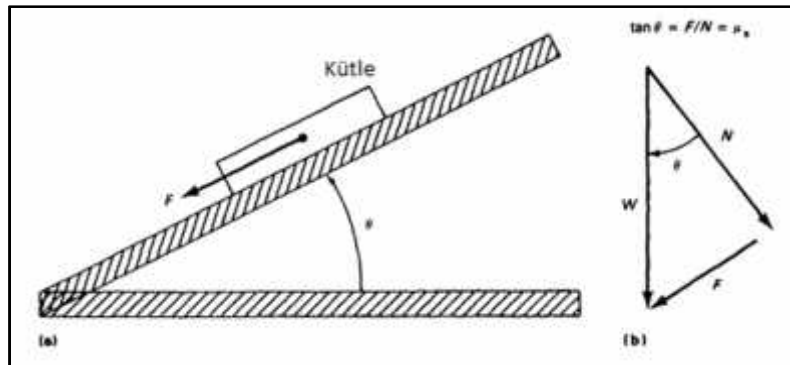
$$F = \mu N \quad (1)$$

Orantı sabiti Etkilik 2’de gösterildiği gibi  $F$  kuvveti ile normal kuvvet  $N$  arasındaki orandır, genellikle  $\mu$  veya  $f$  ile gösterilir ve sürtünme katsayısı olarak adlandırılır.

$$\mu = F/N \quad (2)$$

Sürtünme katsayısı kuru kayma için tipik olarak çok iyi yalın yataklardaki 0.03 değerinden 0.5 ila 0.7’ye kadar değişmekte, hatta vakum ortamındaki temiz metal yüzeylerde  $\geq 0.05$  olabilmektedir. 0.2 ila 0.3 sürtünme katsayısı yolda rahat bir şekilde yürümeye izin verirken ayakkabı/buz arasındaki  $\mu$  değeri  $< 0.05$ ’e kadar düştüğünden buzda yürümek son derece zordur. Yaklaşık 0.02 sürtünme katsayısı ile diz eklemi son derece verimli çalışmaktadır (Davis, 2001).

Hareketli bir kütle hareketi genellikle aynı kütle hareketini aynı yüzeyde devam ettirmek için gerekli olanı daha yüksek bir kuvvet gerektirir. Başka bir ifadeyle statik sürtünme katsayısı  $\mu_s$  genellikle dinamik veya kinetik sürtünme katsayısı olarak adlandırılan  $\mu_k$ ’den daha büyüktür (Davis, 2001).



ekil 16: Statik sürtünme katsayısının belirlenmesinde kullanılan eğik yüzey. a: kütle yüzeyden aşağıya hareket etmesi için gerekli olan en küçük açı olan  $\theta$  açısı ile eğik hale getirilmiş yüzey, b) sürtünme açısı ve uygulanan kuvvetler arasındaki ilişki.

ekil 16'da gösterildiği gibi düzgün bir yüzey üzerindeki  $W$  ağırlıklı yüzeyin sürtünme açısı adı verilen ve  $\theta$  ile gösterilen belirli bir açı ile eik hale getirilmesi sonucu harekete geçer. Buradaki statik sürtünme katsayısı Eitlik 3 ile ifade edilir:

$$\mu_s = \tan \theta \quad (3)$$

Bu,  $\mu_s$  de erinin ölçülmesinde son derece basit bir yöntemdir, ancak kuvvet ölçümleri genellikle hem statik hem de dinamik veya kinetik sürtünme katsayılarının ölçülmesinde kullanılır. Bu ölçümlerden elde edilen de erler yüzeylerin durumuna ve temizli ine ba lıdır. Ayrıca ölçüm sisteminin özellikleri de elde edilen sonuçları etkileyebilmektedir. Bu faktörler bir arada de erlendirildi inde sürtünme katsayısının malzemeye özgü de imeyen bir özellik olmadığı anlaşılmaktadır (Bowden ve Tabor, 1986; Davis, 2001).

#### 4.2.1 Sürtünmenin Temel Mekanizmaları

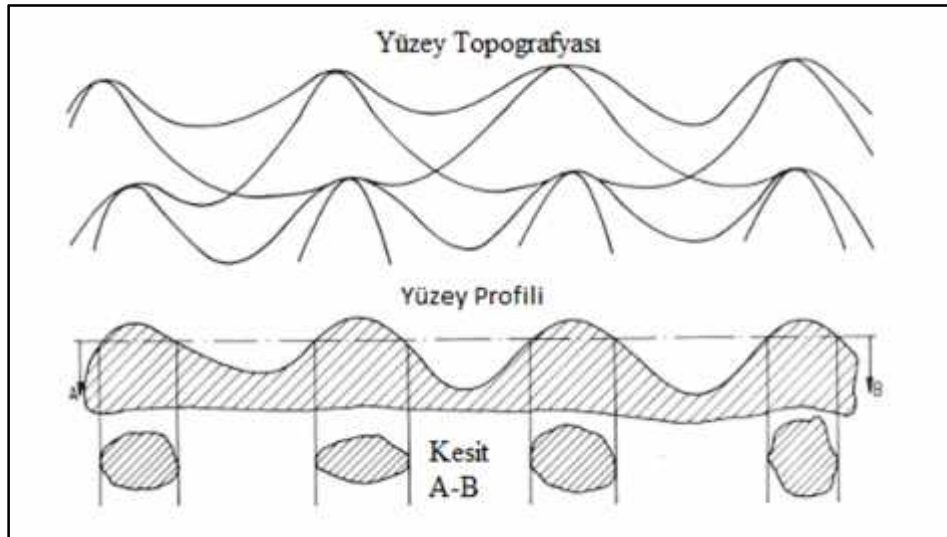
Mikroskobik düzeyde yüzeyler tamamen düz de ildir. Yüksek büyütme ile incelendi inde en iyi cilalanmış yüzeyde dahi çıkıntıların, pürüzlerin, vadi ve çöküntülerin olduğu görülür. ki yüzey bir araya getirildi inde yalnızca çok az sayıdaki pürüzlerde birbirlerine temas ederler. Bu noktalarda temas basıncı daha yumuşak olan malzemenin sertlik de erine yakın olabilir; plastik deformasyon çok küçük ölçekte ortaya çıkar. ki malzeme arasında so uk kaynama sonucu güçlü ba lara sahip birleşme noktaları oluşabilir. Kayma ba ladı nda bu birleşme noktalarının sürtünme kuvveti ile kırılması gerekir ve bu da sürtünmenin adezif bile enini oluşturur. Bazı pürüzler kar şı malzeme yüzeyini yüzey boyunca kazıyabilir ve oluşan plastik deformasyon veya histerezis sürtünme kuvvetine katkıda bulunur. Kayan yüzeyler arasında sıkı an kalıntı partikülleri de oluşan sürtünme kuvvetini arttırabilmektedir. Sürtünme kuvvetinin oluşmasında çok sayıda mekanizma etkili olduğundan, sürtünme malzemenin karakteristik özelli i olmaktan çok belirli bir yere kadar ölçüm ko ullarına yüzey pürüzlülü üne, oksitlerin veya yüzeye tutunmuş filmlerin vs. varlığına ba lı olan bir özelliktir. Bu karma şık duruma rağmen farklı laboratuvarlarda farklı yöntemler ile elde edilen  $\mu$  de erleri makul derecedeki benzer ko ullarda söz konusu malzeme çiftini temsil eden de er aralıklarına denk gelmektedir (Blau ve Devore, 1990; Davis, 2001).



#### 4.2.2 Temas Halindeki Yüzeyler

A inma, malzemenin mekanik teması sonucu yüzeyde olu an hasar prosesi ekinde tanımlanmaktadır. Hangi a inma modunda olursa olsun mekanik temas a inma kayıplarının belirlenmesinde son derece önemlidir (Zum Gahr1987).

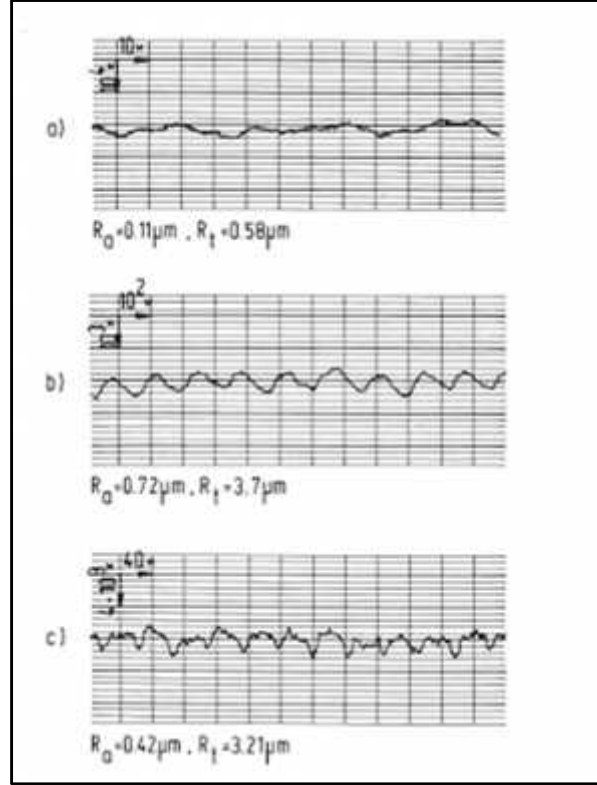
Mühendislik yüzeyleri hiçbir zaman ideal düzgünlükte de ildir ve az ya da çok pürüzlülük gösterir. Yüzeylerin doku karakteristikleri pürüzlerin (mikroskobik düzeydeki tepe ve vadiler) dizilimi, ekli ve büyüklü ü ile tanımlanır. ekil 17'de bir yüzeyin topografyası ematik olarak gösterilmektedir. Yüzey profilleri yüzeyi paralel kesen A-B kesiti ile elde edilmi tir. ki katı arasındaki temas yüzey pürüzlülü ünden ötürü genellikle kesintilidir, yani farklı temas noktalarında olu maktadır (Zum Gahr, 1987).



ekil 17: Yüzey düzensizliklerinin ematik gösterimi (Zum Gahr, 1987).

Yüzeylerin mikroskobik ve makroskobik geometrik özelliklerinin ölçülmesinde farklı optik ve mekanik yöntemler uygulanmaktadır. Profilometride yüzey profillerinin elde edilmesinde i neli (stylus) cihazlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Hassas islenmi elmas bir i ne yüzey boyunca hareket eder ve i nenin dü ey hareketleri kaydedilir. Rastgele bir üç boyutlu yüzeyde do rusal harekette elde edilen profiller yalnızca bir pasoyu (geçi i) temsil eder. Yüzey dokusu üzerinde elde edilen çok sayıdaki pasonun birle tirilmesinden kontur grafikleri çizilebilmektedir (Moore, 1975; Halling, 1978; Williamson, 1978; Whitehouse, 1980; Tsukada ve Sasajina, 1981; Mignot ve Gorecki, 1983; Zum Gahr,

1987). Kontur grafikleri doku karakteristiklerinin üç boyutlu temsilini göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğünün üç boyutlu karakteristiklerini açıklayan ölçüm sistemleri Tsukada ve Sasajina tarafından (1978) açıklanmıştır. Ekil 18'de Ti-Al alaım yüzeyinden alınan (stylus) bir cihaz yardımıyla elde edilen profilogram bölümleri verilmiştir. Yüzeyler parlatma, tormalama veya frezeleme ile hassasleştirilmiştir.

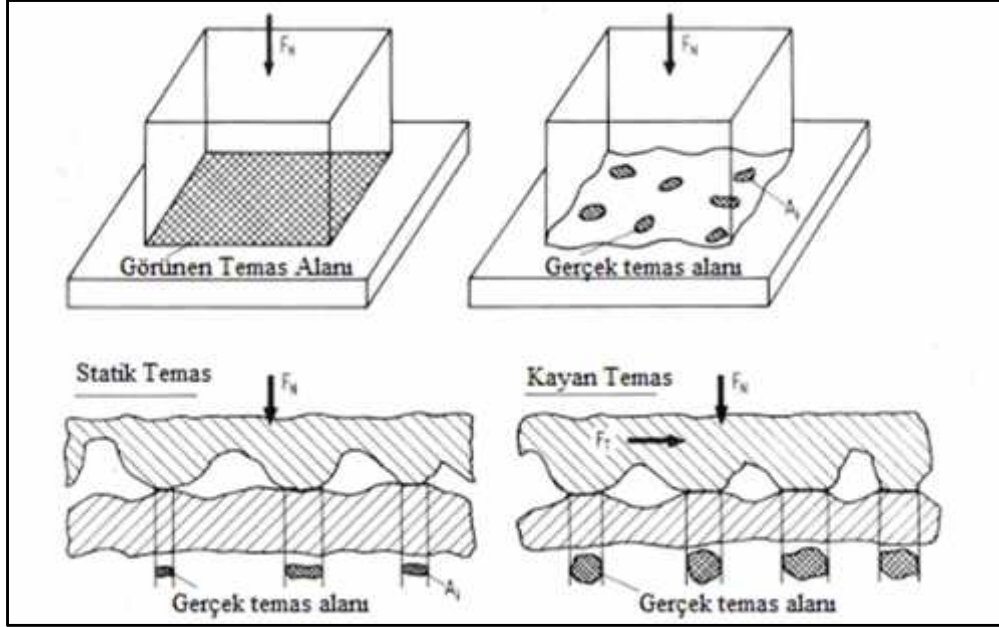


Ekil 18: Bir Ti-Al alaım yüzeyinden alınan profilometre ölçümü. a) elektrolitik parlatma ile parlatılmış yüzey, b) tormalanmış yüzey, c) frezelenmiş yüzey (Zum Gahr, 1987).

Yüzey dokusunun karakterize edilmesinde sıkça kullanılan değerler profilin ortalama aritmetik sapması şeklinde tanımlanan  $R_a$ , ortalama karekök pürüzlülük değeri  $R_q$ , ortalama tepe-vadi yüksekliği  $R_t$ , veya maksimum tepe-vadi yüksekliği  $R_{max}$ 'tır (Zum Gahr, 1987).

Yüzey profilometreleri yüzeylerin üzerindeki düzensizlikleri dikey ve yatay doğrultularda farklı büyütme oranları kullanarak verir (Ekil 17). Büyütme oranlarındaki bu farktan ötürü kaydedilen profiller yüzey düzensizliklerinin gerçek şeklini temsil etmezler. Gerçek yüzey resimlerinde keskin tepe noktaları yerine taban çizgisine göre 15 dereceden daha az eğime

sahip olan geni tabanlı tepeler bulunur (Williamson, 1978; Zum Gahr, 1987). Bu yüzden aınma modelleri de erlendirilirken kaydedilen yüzey resimleri ile gerçek resimler arasındaki farklar göz önünde bulundurulmalıdır.



ekil 19: Görünen ve gerçek temas alanı (Zum Gahr, 1987).

Yapılan farklı türdeki deneylerle birbirine bastırılmış iki düz katı yüzey arasındaki görünür ve gerçek temas alanları arasında ekil 19'da gösterildi i gibi büyük farklılıklar olabilece ini göstermektedir (Bowden ve Taybor, 1939; Dyson ve Hirst, 1954; Zum Gahr, 1987).

Gerçek temas alanının görünür temas alanına oranı  $10^{-4}$ 'e kadar dü ebilmektedir ve yüzey düzensizliklerinin da ılımına, temas kuvvetine ve daha yumu ak olan malzemenin akma gerilmesine ba lıdır. Gerçek temas alanı kaymada statik durumdaki temas alanından daha fazladır. ekil 19'da verilen statik duruma göre gerçek temas alanı E itlik 4 ile hesaplanır (Zum Gahr, 1987):

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_i \quad (4)$$

Burada  $A_r$  gerçek temas alanı,  $A_i$  birbirinden ba ımsız temas alanlarıdır.

### 4.3 A ınma Mekanizmaları

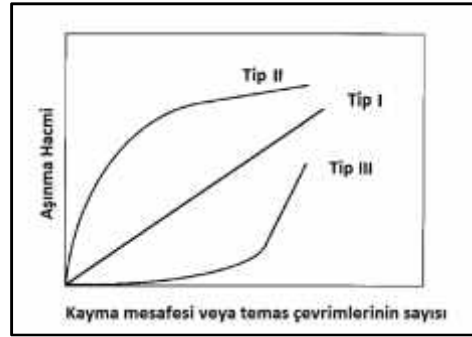
A ınma, bir kar ı yüzey ile etkile im sonucu yüzeyden malzemenin kalkması olarak tanımlanmaktadır. A ınma sonucu hemen hemen tüm makineler ve makine bile enleri dayanıklılıklarını ve güvenilirliklerini yitirirler, ve yeni geli mi makinelerin ortaya çıkma olasılı ı dü er. Bu yüzden gelece in geli mi ve güvenilir teknolojisine ula abilmek için a ınmanın kontrol edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Kato ve Adachi, 2001).

İşletme ko ullarına ve malzeme seçimine ba lı olarak a ınma hızı  $10^{-15}$  -  $10^{-1}$   $\frac{mm^3}{Nm}$  arasında büyük oranlarda de i ebilmektedir (Holm, 1946; Archard, 1953; Hirst, 1957; Lancaster, 1978; Bhansali, 1980; Rabinowicz, 1980 Hokkirigawa, 1997; Kato ve Adachi, 2001). Bu sonuçlara göre, işletme ko ulları ve malzeme seçimi a ınmanın kontrol edilmesinde kilit faktörlerdir. Bu gereksinimlerin kar ılanmasında kullanılan önemli yöntemlerden biri, a ınma modlarının ve a ınma hızlarının tahmininde önemli bir yöntem olarak kullanılan a ınma haritalarıdır (Lim ve Ashby, 1987; Hokkirigawa ve Kato, 1988; Kato ve Adachi, 2001). A ınma haritaları tribolojik ko ulların açıklanmasında kullanılan en iyi yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir ve geni işletme ko ulları aralıklarında malzeme seçimi için son derece kullanı lıdır (Kato ve Adachi, 2001).

A ınma haritaları ile tribosistemlerin tasarlanmasında ve malzeme seçiminde a ınma hızı, a ınma modlarının çe itlili i ve a ınma mekanizmaları önemli unsurlardır (Kato ve Adachi, 2001).

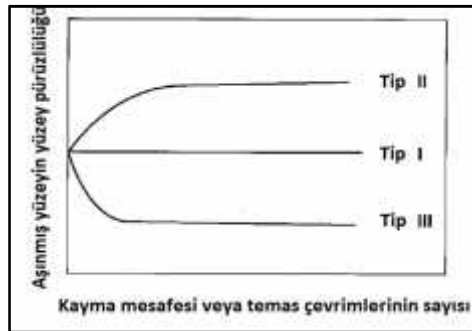
A ınma temas arayüzündeki kimyasal çözülme veya erimeden ötürü olu an mikrokırılmalar sonucu malzemenin fiziksel ayrılması ile ortaya çıkar. Bunun yanında birden fazla a ınma türü bulunmaktadır. Bunlar, adezif, abrazif a ınma, yüzey yorulması ve korozif a ınmadır. Baskın a ınma modu yüzey malzeme özelliklerinden, sürtünme ısısı, kimyasal film olumu ve a ınma sonucu olu an dinamik yüzey tepkilerine kadar de i en çok sayıda faktöre ba lı olarak de i ebilmektedir. A ınma mekanizmaları sürtünme sırasındaki kompleks de i imler dikkate alınarak açıklanır. Genel olarak a ınma tek bir a ınma mekanizması ile ortaya çıkmamaktadır, her a ınma modundaki a ınma mekanizmasının anlaşılması bu yüzden önemlidir (Kato ve Adachi, 2001).

Aınma hacmi, aınan yüzey pürüzlülüğü ve aınma partikülü eekli aınmanın karakterize edilmesinde önemli bilgiler vermektedir. Üç temsili aınma hacim e risi ekil 20’de ematik olarak verilmektedir. Tip I aınma e risi tüm süreç boyunca sabit bir aınma hızını temsil etmektedir. Bu tip aınma genellikle metallerde görülmektedir (Chiou vd., 1985; Kato ve Adachi, 2001). Tip II aınma e risi, yorumla kırılmasında olduğu gibi, yüksek aınma hızından düşük ve sabit aınma hızını temsil etmektedir. Bu aınma tipi genellikle seramiklerde görülmektedir (Cho vd., 1989). Yıkımsal (katastrofik) aınma için gerekli olan kayma miktarı kırılma ba langıcının ortaya çıktığı süreç ile ba lar ve ilk yüzey pürüzlülüğü, malzeme özellikleri ve sürtünme artlarına ba lıdır (Kato ve Adachi, 2001).



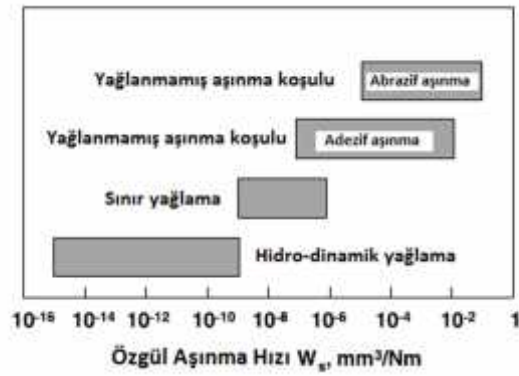
ekil 20: Tekrarlı temaslarda üç temsili aınma e risi (Kato ve Adachi, 2001).

Aınma yüzeyleri üzerinde oluşan üç temsili pürüzlülük e risi ekil 21’de verilmiştir. Tip I yüzey pürüzlülüğünün ilk de ere göre de i medi i sabit aınmayı temsil etmektedir. Tip II, yüzey pürüzlülüğünün belli bir de ere çıkıp orada sabit kaldığı sabit aınmayı temsil etmektedir. Tip III alı tırma sürecinde yüzey pürüzlülüğünün önemli miktarda dü tütü ü ilk alı tırma ve sabit aınmayı temsil etmektedir. Bu aınma tipi genellikle yüzey bitirme için uygulanan lepleme ve parlatma i lemlerinde görülmektedir (Kato ve Adachi, 2001).



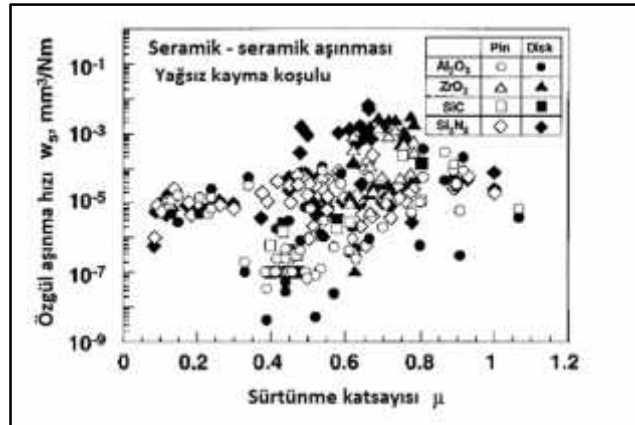
ekil 21: Tekrarlı temaslarda ortaya çıkan üç tip yüzey pürüzlülüğünün temsili e rileri (Kato ve Adachi, 2001).

Aınma genellikle kaybedilen hacim miktarı ve aınma yüzeyin durumu üzerinden de erlendirilir. Aınmanın derecesi aınma hızı, özgül aınma hızı veya aınma katsayısı ile açıklanır. Aınma hızı ekil 20'deki aınma hacmi e risinin e imine denk gelen, birim kayma mesafesi baına aınma hacmi ekinde tanımlanmaktadır. Özgül aınma hızı ise birim mesafe ve birim yük baına aınma hacmi ekinde tanımlanır. Aınma katsayısı özgül aınma hız ile aınan malzemenin sertlik de erinin çarpımıdır. Farklı ya lama ko ullarında kayan temasta metal malzemelerin özgül aınma hızlarının da ılımı ekil 22'de özetlenmi tir (Kato ve Adachi, 2001).



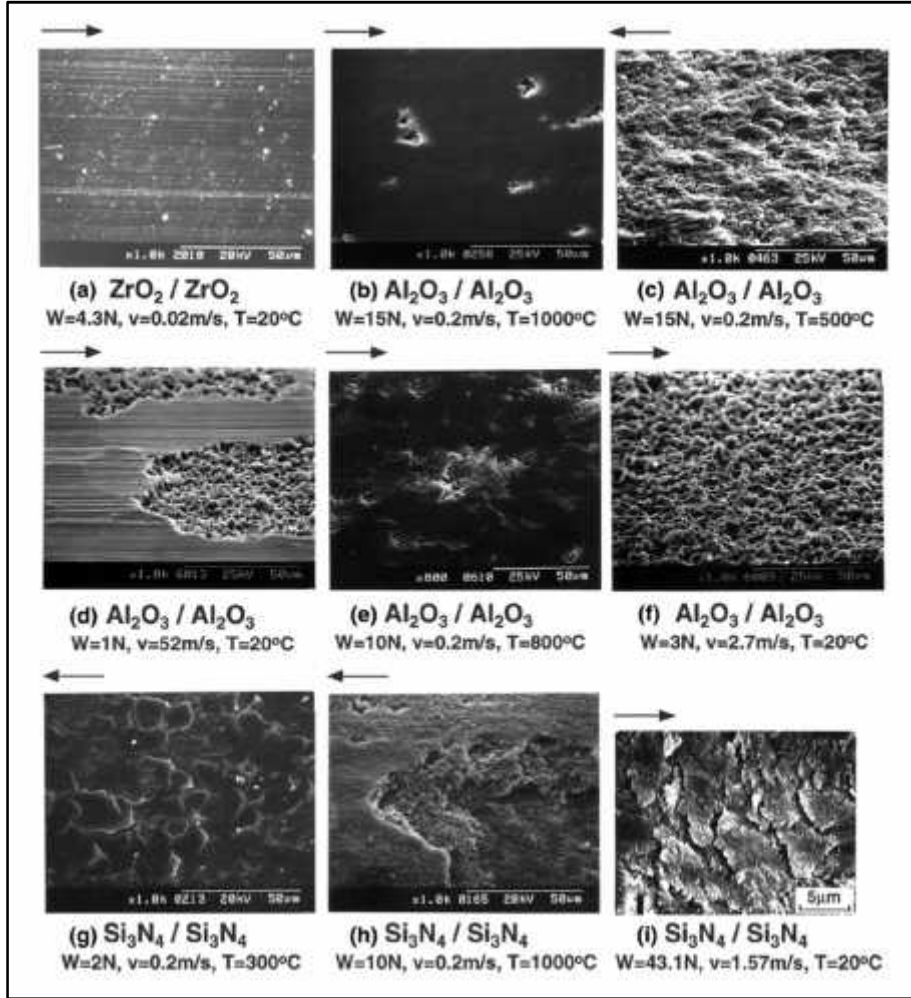
ekil 22: Farklı yağlama ko ullarında kayan temasta metal malzemelerin özgül aınma hızlarının da ılımı (Holm, 1946; Archard, 1953; Hirst, 1957; Bhansali, 1980; Rabinowicz, 1980; Hokkirigawa, 1997; Kato ve Adachi, 2001).

Yağlama koşullarındaki de i ikliklere ba lı olarak gözlemlenen aınma hızları  $10^{-15}$  -  $10^{-1} \frac{mm^3}{Nm}$  aralığı nda de i mektedir.



ekil 23: Seramiklerin kendileri arasında yağsız ko ulda özgül aınma hızları ve sürtünme katsayılarının da ılımı (Kato ve Adachi, 2001).

ekil 23'te dört çe it serami in kendi aralarında ya sız kayma ko ullarında farklı normal yükler, kayma hızları ve sıcaklıklar altında özgül a ınma hızları ve sürtünme katsayılarının da ılımları gösterilmektedir. Özgül a ınma hızları malzeme ve sürtünme artlarına ba ğlı olarak birbirine benzer malzemelerin birbirlerini a ındırması durumunda dahi  $10^{-9} - 10^{-2} \frac{mm^3}{Nm}$  gibi geni bir aralıkta de i ebilmektedir (Kato ve Adachi, 2001).



ekil 24: Farklı i letme ko ulları altındaki üç çe it serami in yüzey morfolojilerindeki çe itlilik (Kato ve Adachi, 2001). Oklar kar ı yüzlerin ba ıl kayma yönlerini göstermektedir (W: normal yük; v: kayma hızı; T: sıcaklık).

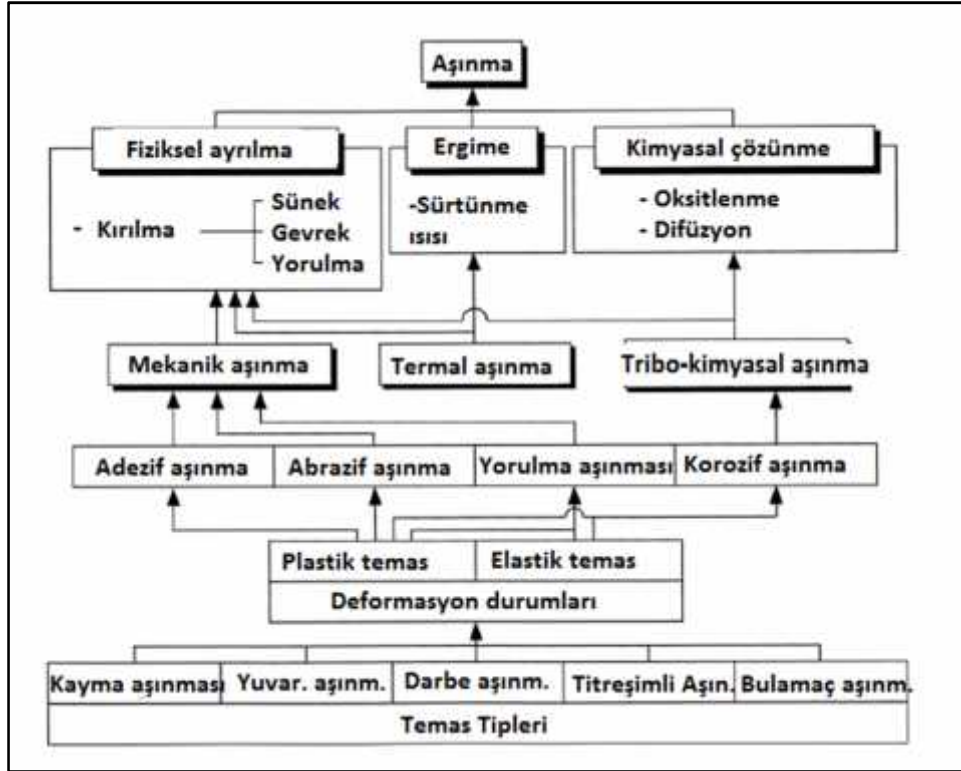
ekil 24'te farklı temas ko ulları altında seramiklerin farklı a ınma yüzeyleri gösterilmektedir. Burada tribosistemdeki temas ko ullarındaki küçük de i ikliklerin a ınmayı büyük ölçüde etkiledi i anla ılmaktadır. ekiller 22, 23 ve 24'te gösterilen sonuçlar a ınma hakkındaki a ıdaki de erlendirmenin yapılmasına yol açmı tır (Bayer, 1994; Kato ve Adachi, 2001).



“Aşınma bir malzeme özelliği de ildir. Bir sistem yanıtıdır” (Kato ve Adachi, 2001).

Aşınma, dinamik parametreleri, çevresel parametreleri ve malzeme parametrelerini içeren tribosistemdeki çok küçük de i ikliklerde dahi büyük oranlarda de i ebilmektedir (Kato ve Adachi, 2001).

Aşınma bazı durumlarda katı yüzeylerin temas etkile im tipleri üzerinden de erlendirilmektedir. Uygulamada çok sayıda farklı temas konfigürasyonu bulunur. Aşınma ile ilgili tanımlar ve bunların birbirleri ile ili kileri ekil 25’te verilmi tir. Normal veya e imli basınç veya ayrılma, tek yönlü kayma, tek yönlü yuvarlanma, resiprokal (iki yönlü) kayma, resiprokal yuvarlanma ve kaymalı yuvarlanma temas eden kütlelerin hareketi ile tanımlanan farklı temas konfigürasyonlarını temsil eder. Bazı durumlarda ise serbest katı parçacıklar etkile en yüzeylere çarpan e siz maddeler haline gelir. Bu da bir temas konfigürasyonudur (Kato ve Adachi, 2001).

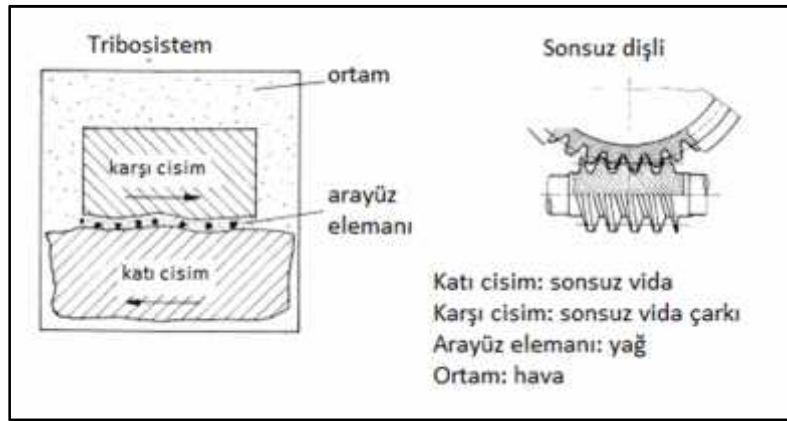


ekil 25: Aşınma ile ilgili tanımlar ve birbirleri ile ili kileri (Kato ve Adachi, 2001).



#### 4.4 A ınma Mekanizmalarının Sınıflandırılması

Bir tribosistemin yapısı genellikle sürtünme ve a ınma etkisiyle zamanla de i ir. Bu, sistemin i levsel davranı nda da istenen (alı tırma) veya istenmeyen (hasar) de i imlere yol açar. ekil 26'da DIN 50320'ye göre (1979) genel bir tribosistemin basitle tirilmi formu gösterilmektedir. Sistemin yapısı elemanları, bunların özellikleri ve aralarındaki etkile im ile belirlenir (Zum Gahr, 1987).



ekil 26: Bir tribosistem elemanlarının ematik temsili (Zum Gahr, 1987)

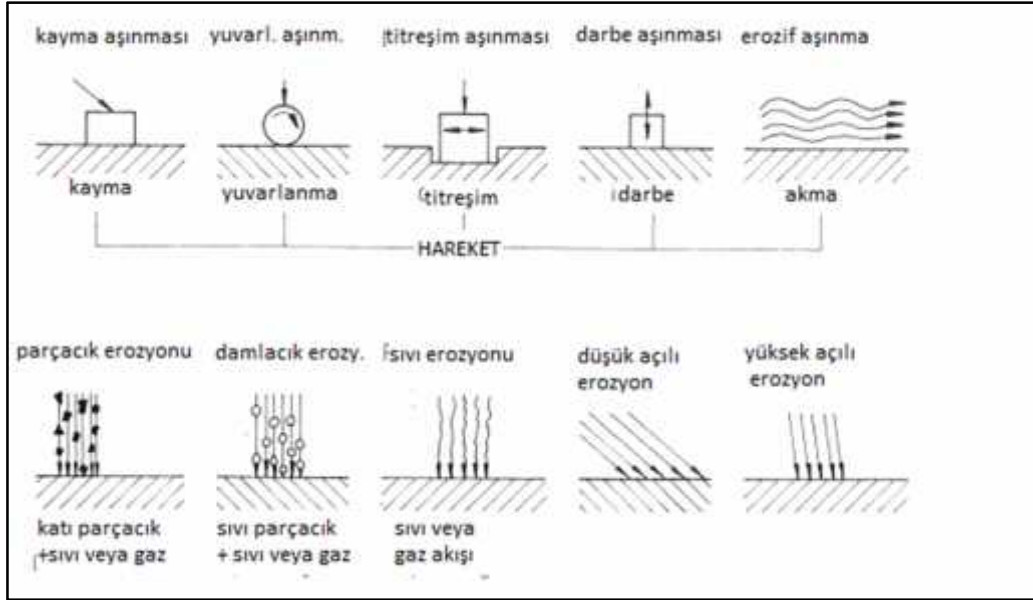
Bir tribosistem genellikle u dört elemandan olu ur (Zum Gahr, 1987):

- Katı kütle
- Kar ı kütle
- Arayüz elemanı
- Ortam

Kar ı kütle bir katı, sıvı, gaz veya bunların bir karı ımı olabilir. Ya layıcılar, tutunmu tabakalar, kir vs teknolojik sistemlerde arayüz elemanı olarak görülürler. Özel bir durum olarak arayüz elemanı bulunmayabilir (Zum Gahr, 1987).

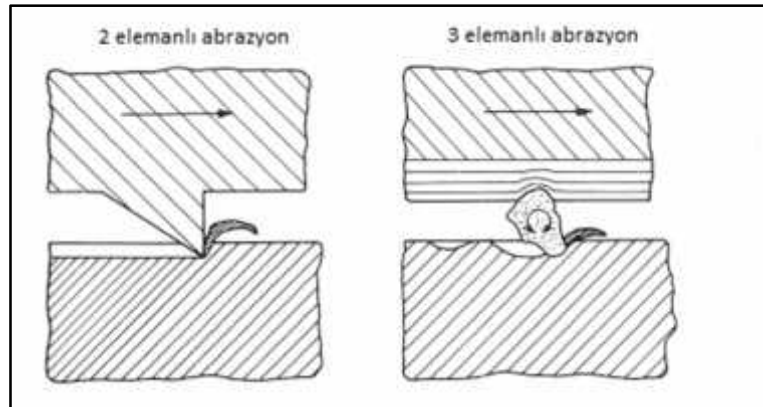
Tribosistem elemanları veya aralarındaki etkile im geni ölçüde farklılıklar gösterebilir. ekil 27'de bir katı kütle yüzeyinde gerçekleş en farklı olaylar ematik olarak gösterilmektedir. Harekete göre bu olaylar kayma, yuvarlanma, titre im, darbe ve akma ekinde sınıflandırılır. A ınma prosesleri sistem kinemati ine ba lı olarak kayma

ayınması, yuvarlanma ayınması, titreşim ayınması, darbe ayınması ve erozif ayınma ekinde sınıflandırılabilir. Ayınma prosesleri ile ilgili diğer tanımlar karışık kütleinin fiziksel halini (örn. katı veya sıvı, veya hareket açısı) kapsar (Zum Gahr, 1987).



ekil 27: Ayınma proseslerinin ayınma modları ile sınıflandırılması (Zum Gahr, 1987).

Arayüz elemanın durumuna bağlı olarak ayınma prosesleri kuru veya yağlı ayınma (örn. yağlı yuvarlanma ayınması, veya 2-elemanlı ve 3-elemanlı abrazyon) ekinde tanımlanabilir (Zum Gahr, 1987). ekil 28'de 3 elemanlı ayınmada ayınan katı parçacıkların iki yatak yüzeyi arasında sıkıştığı görülmektedir.



ekil 28: 2 elemanlı ve 3 elemanlı ayınma (Zum Gahr, 1987).

Tribosistemin yapısına ba lı olarak elemanlar arasında, malzemenin kar ı kütle ve/veya katı kütle yüzeyinden ayrılması ile sonuçlanan fiziksel ve kimyasal etkile imler gerçekte ir. A ınma kalıntısının olu umu a ınma mekanizmaları ile açıklanmaktadır (Zum Gahr, 1987).

A ınma, malzeme kaybı ve/veya yüzey hasarı ekinde ortaya çıkabilir. A ınma proseslerini açıklayan çok sayıda terim bulunması genellikle a ınma problemlerinin açıklanmasını zorla tırmaktadır (Ludema, 1981). A ınma yüzeylerin özellikleri, a ınma modları ( ekil 27) veya a ınma mekanizmaları ile ilgili terimler a ınma problemlerinin açıklanmasını daha kolay hale getirmektedir (Zum Gahr, 1987).

A ınma mekanizmalarına göre a ınma prosesleri farklı ekillerde sınıflandırılmı tır:

Burwell ve Strang (1952), Burwell (1957) a ınma proseslerini abrazyon a ınma, adeziv a ınma, korozif a ınma, yüzey yorulması a ınması, titreimli a ınma, erozyon ve kaviteasyon ekinde sınıflandırmı tır.

Jahanmir (1980) a ınma proseslerini adezyon, delaminasyon, titreimli a ınma, abrazyon, erozyon, darbeli a ınma, yüzey yorulması, korozif a ınma, difüzyon a ınma ve elektrikli kontak a ınması ekinde sınıflandırmı tır.

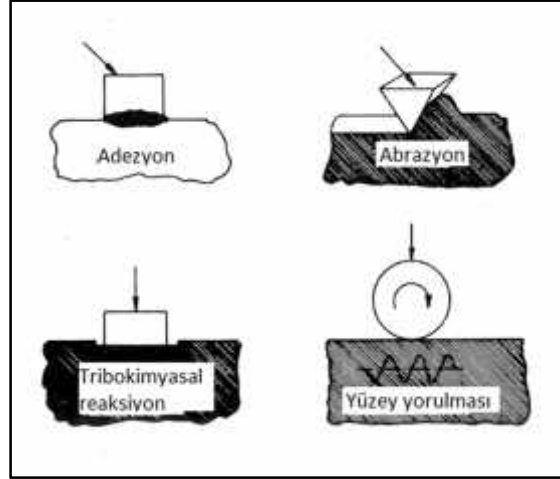
Godfrey (1980) a ınma proseslerini yumu ak adeziv, sert adeziv, abrazyon, erozyon, yorulma, delaminasyon, korozif, elektrokorozyon, titreimli korozif, kaviteasyon hasarı, elektriksel bo alma ve parlatma.

Rice (1984) a ınma proseslerini adezyon, abrazyon, yorulma, korozyon veya oksidasyon, elektriksel.

DIN 50320 (1978)'e göre a ınma prosesleri adezyon, abrazyon, yüzey yorulması ve tribokimyasal reaksiyon ekinde sınıflandırılmaktadır.

Bu sınıflandırmaların ortak özelli i a ınma proseslerinin ayırt edilmesinde a ınma mekanizmalarının kullanılmı olmasıdır. Bazı durumlarda a ınma sınıflarının sayısının

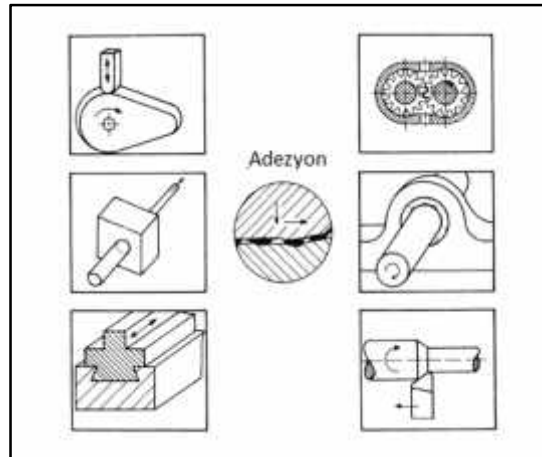
azaltılabildiği görülmektedir. Bu sınıflandırmalarda temel mekanizma göz önüne alındığında fazla mekanizmaların çıkarılmasının ardından geriye kalan dört ana aşınma mekanizması Şekil 29'da gösterilmektedir (Zum Gahr, 1987).



Şekil 29: Dört ana aşınma mekanizmasınınematik gösterimi (Zum Gahr, 1987).

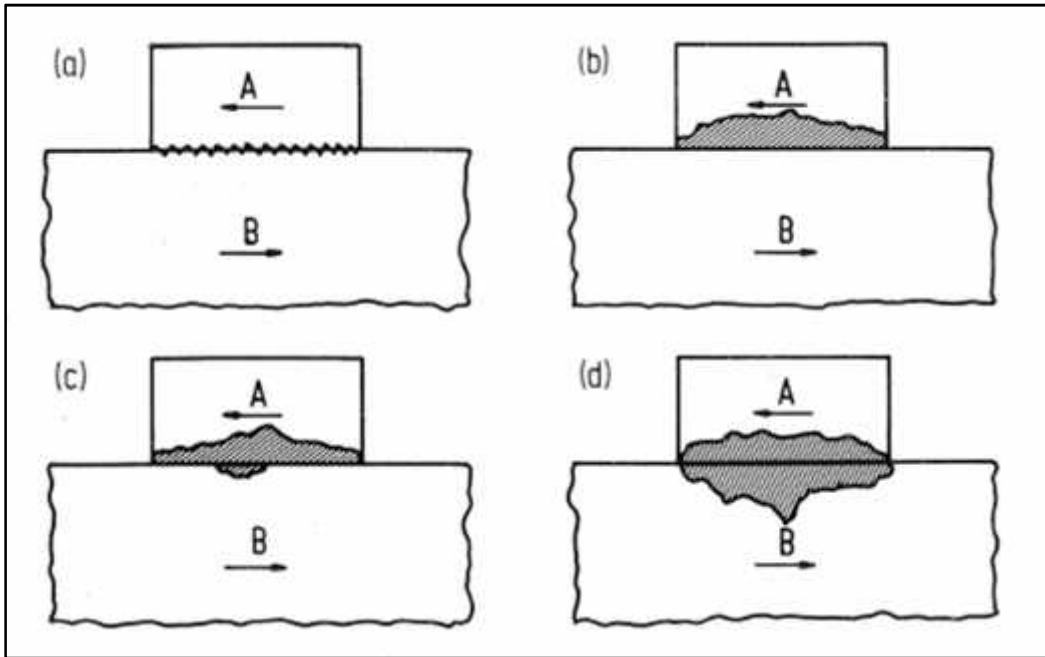
#### 4.4.1. Aşınma

Aşınmadan dolayı aşınmaya maruz kalan bilemler arasında takım tezgahlarındaki kızaklar, tel çekme makinesindeki tel çekme kalıpları, kamlar ve pistonlar, dişliler, kuru veya yağlı lamalı mil yatakları ve kesici takımlar bulunmaktadır. Şekil 30'da aşınmaya maruz kalan makine bilemlerinden bazıları gösterilmiştir. (Zum Gahr, 1987).



Şekil 30: Aşınmaya maruz kalan tribolojik sistemler (Zum Gahr, 1987).

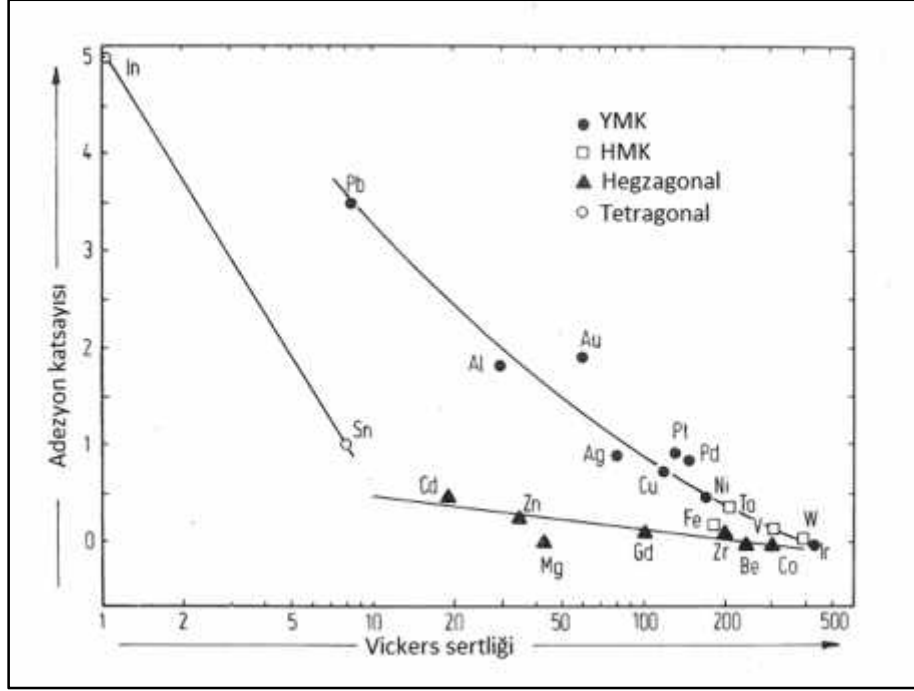
Adeziyon, yüzeylerin birbiri üzerinde kayması sonucu ortaya çıkabilir. Birbirine temas eden pürüzler arasındaki yüksek lokal basınç plastik deformasyona, adezyona ve bunların sonucunda lokal bağlanma noktalarının ortaya çıkmasına neden olur. Temas eden yüzeylerin birbirleri üzerinde bağıl hareketle kayması bu bağlanma noktalarının kopmasına ve sık aralıklarla malzemelerin bir yüzeyden diğere taşınmasına yol açar. Kayan malzeme çiftleri arasındaki gerilmeler, hız ve sıcaklık sonucu artan hasar ve aşırı yükler ayak sürtme adeziyonunu beraberinde getirir. Bu, sürtünme katsayısındaki ve aşınmadaki artış ile yakından ilişkilidir. Aşırı durumlarda temas eden yüzeyler birbirleri üzerinde daha fazla hareket edemez duruma gelir. Yüzeyler arasındaki lokal temas noktalarında “bağlanma noktaları”nın oluşumu adezyon veya kohezyona bağlı olabilir. Genel olarak kohezyon ekleme veya benzer malzemelerin birbirine kaynaştırıldığı durumlarda etkili olur, bu da orijinal yüzeyler arasındaki ara yüzün kaybolmasına sebep olur. Diğer taraftan, lokal bağlanma noktalarında orijinal ara yüz varlığını koruması için adezyon etkili olmaktadır (Zum Gahr, 1987). Şekil 31’de birbirine kaynayan yüzeylerin farklı ekillerde birbirinden ayrılması gösterilmektedir.



Şekil 31: bağlanma noktalarının birbiri üzerinde sürtünen kütleler arasında kopma durumu. a: bağlanma noktalarının arayüzünde birbirinden ayrılması, b: bağlanma noktalarının daha yumuşak malzeme (A) içinde kopması, c: bağlanma noktalarının büyük ölçüde daha yumuşak malzeme (A) içinde kopması, d: bağlanma noktalarının karışık kütleler içinde kopması (Zum Gahr, 1987).

Ba lantı noktasının kayma dayanımı her iki malzemenin dayanımından daha dü ükse ba lantı noktaları ara yüz içinde birbirinden ayrılır. Bu genellikle ilk yüzeyler adezyon dü ürücü oksitlerle kaplı oldu unda gerçekleşir. Daha yumu ak olan A malzemesinin dayanımı ba lantı noktalarının veya B malzemesinin dayanımından çok daha dü ük oldu unda kopma yalnızca A malzemesi içerisinde gerçekleşir. Birbirine benzer veya e it malzemeler söz konusu oldu unda ilk ara yüzün her iki tarafındaki malzeme kopma birbirine yakın oranda gerçekleşir (Zum Gahr, 1987).

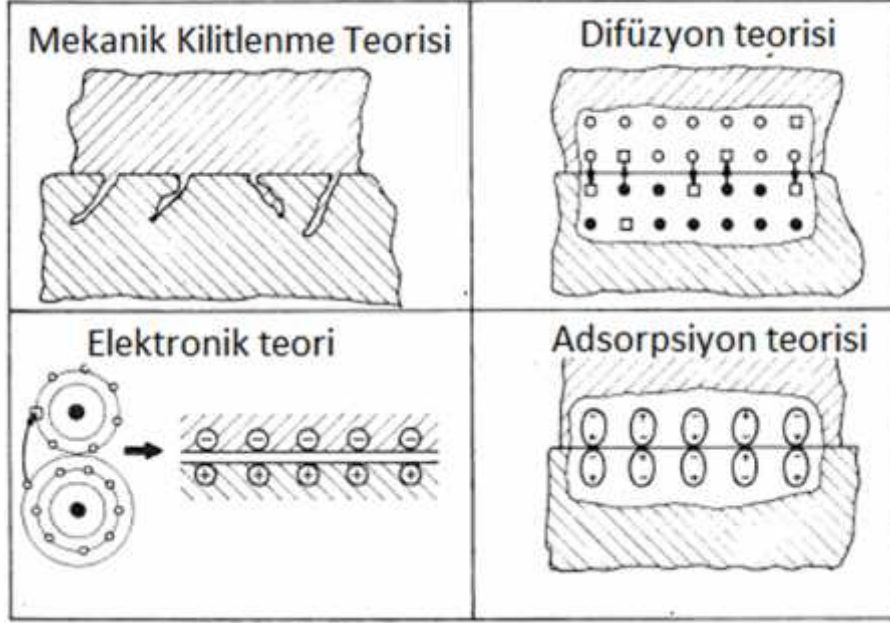
Adezyon ba lantılarının oluşma e ilimi temas halindeki malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine (Keller, 1963; Sikorski, 1964; Czichos, 1972; Gane vd., 1974; Sergent, 1978; Hartweck ve Grabke, 1979; Buckley, 1981; Frisch, 1981), temas eden yüzeylerin yük de erlerine ve özelliklerine (Oudar, 1978; Hartweck ve Grabke, 1979; Buckley, 1981) veya yüzey pürüzlülü üne ba lıdır. Yüzeyleri tutunma katmanlarla veya havada oksit tabakası ile kaplı oldu undan metaller arasındaki temaslar genellikle metalik de ildir. Metalik olmayan temas durumundaki metallerin adezyonu genellikle zayıf van der Waals kuvvetleri sonucu ortaya çıkar. Temas eden yüzeylerdeki tutunma katmanlar ve oksit filmler pürüzlerin elastik ve plastik deformasyonu sonucu kırılabilirler. Bu durumda adezyon metalik veya kovalent ba ile oluşurken iyonik ba oluşumu ihmal edilebilir düzeydedir. Adezyon kuvveti gerçek temas alanına ba lı oldu undan malzemenin plastik deformasyon direncinden, ve katıların kristal yapısından veya kayma sistemlerinin sayısından etkilenebilmektedir. Sikorski'ye göre (1964) adezyon yatınlılı ı metal kafeslerde hegzagonal sıkı paket (HSP), hacim merkezli kübik (HMK), yüzey merkezli kübik (YMK) ekinde sıralanmaktadır. ekin 32'de kristal yapısının, adezyon katsayısının metal sertli ine ba ımlılı ını nasıl etkiledi i gösterilmektedir. Adezyon katsayısı, adezyon ba lantılarını kırmak için gerekli olan kuvvetin numuneleri birbirine bastıran normal kuvvete oranı ekinde tanımlanır (Zum Gahr , 1987). Genel olarak adezyon katsayısının dü mesiyle birlikte sertlik de erlerinin dü tü ü görülmektedir.



ekil 32: Metal sertliğine göre adezyon katsayısının değeri (Sikorski, 1964; Zum Gahr , 1987).

Goodzeit vd. (1956) ve Roach vd. (1956) farklı metal çiftlerinin ayak sürtmeye karşı direncini çalışmıştır. Bu araştırmacılara göre adezyon temas halindeki metallere ait atomların ortak çözünürlüğü ile artmaktadır. Diğer taraftan, Habig (1970), Buckley (1971), Feller ve Matschat (1971), Frey vd. (1976), Landheer vd. (1980) birlikte çözünemeyen metallerin de birbirine güçlü biçimde bağlanabildiğini göstermiştir. Böylece kayan malzeme çiftlerinin atomlarının birlikte çözünürlüğünün güçlü adezyon için önkoşul olmayacağı ortaya çıkmıştır. Bu aynı zamanda atomların arayüzden difüzyonunun metallere arasındaki adezyon için çok önemli olmadığını da göstermektedir (Zum Gahr , 1987).

Literatürde adezyon ile ilgili çok sayıda teori bulunmaktadır (Houwink ve Salomon, 1965; Wake 1976; Buckley, 1981; Bely vd., 1982; Zum Gahr , 1987). Kinloch (1980) dört temel adezyon mekanizması sunmuştur: a) mekanik kilitleme, b) difüzyon teorisi, c) elektronik teori ve d) adsorpsiyon (tutunma) teorisi. Bu mekanizmalarematik olarak ekil 33'te gösterilmektedir (Zum Gahr , 1987).



ekil 33: Temel adezyon mekanizmaları (Zum Gahr , 1987).

Mekanik kilitlenme teorisi adezyonu yüzey düzensizliklerinin birbirlerine kilitlenmesine ba lamaktadır. Bu mekanizmanın adezyona etkisi polimerlerin tekstil ile adezyonuna katkıda bulunabilir (Borroff ve Wake, 1949). Mekanik kilitlenme ile ilgili yapılan çalı malar altlı n yüzey topografyasının (pürüzlülük) ara yüzün kesme dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir (Packham vd. 1974; Evans ve Packham 1979).

Difüzyon teorisine göre atomlar ve moleküller temas halindeki kütleler arasındaki arayüz içinden difüze olurlar. Makromolekül difüzyon ile ilgili deneysel çalı malar Bueche vd. (1952) ile Flom ve Porile (1955) tarafından yapılmı tır (Zum Gahr , 1987).

Elektronik teori temas eden farklı elektronik bant yapılarına sahip kütlelerin arayüzü boyunca bir elektron transferinin oldu unu öne sürmektedir (Derjaguin, 1969). Bu elektron transferi arayüzde bir çift elektrik yük katmanının oluşması ile sonuçlanır. Adezyonun elektriksel tabaka boyunca etkili olan elektrostatik kuvvetler ile oluştu u dü ünülmektedir. Bir polimer ile temas halinde olan bir metal elektron vericisi olarak davranır ve bile ik ayrıldı nda polimer negatif yüklenmi olur (Bely vd. 1982). Yapılan bazı deneyler (Schnabel, 1969; Derjaguin, 1972; Krupp, 1972; Zum Gahr , 1987).

Adsorpsiyon teorisi moleküller arası temasta bulunan yüzeyler arasındaki adezyonu van der Waals gibi ikincil ba lara ba lamaktadır. kincil ba lar birincil ba lara göre son derece zayıftır (Zum Gahr , 1987).



Farklı malzeme gruplarında etkili olan bağlar aşağıda verilmiştir:

Metaller: Birincil bağlar, yani metalik ve kovalent bağlar ile van der Waals gibi ikincil bağlar.

Polimerler: van der Waals bağları, elektrostatik bağlar ve polar moleküllerde hidrojen bağları.

Seramikler: birincil bağlar, van der Waals ve elektrostatik bağlar (Zum Gahr, 1987).

#### 4.4.1.1 Adeziv aınma hacminin teorik hesabı

Adeziv aınma hacmi hesabında gerçek temasın birbirine eşit büyüklükte  $n$  adet temas noktasından oluştuğu ve bir temas noktasının yok olmasının ardından yeni bir tanesi oluşuyorsa toplam temas sayısının sabit kaldığı kabul edilir. Dairesel temas alanının yarı çapının  $a$  olduğu kabul edildiğinde  $2a$  uzunluğundaki kayma mesafesi sonrası aınma partiküllerinin olası hacmi yarı küre hacmi olan  $2\pi a^3/3$  olarak kabul edilir. Bu varsayıma göre  $L$  kayma mesafesi sonrası  $n$  adet temas noktası için olası aınma hacmi  $V$  aşağıdaki eşitlik ile bulunur (Kato ve Adachi, 2001):

$$V = n \cdot \frac{2}{3} \pi a^3 \frac{L}{2a} \quad (5)$$

Normal temas basıncı plastik deformasyonda aınan malzemenin  $H$  sertlik değerine neredeyse eşit olduğundan  $n$  adet temas noktası için toplam temas alanı  $n\pi a^2$  şu şekilde hesaplanır (Kato ve Adachi, 2001).

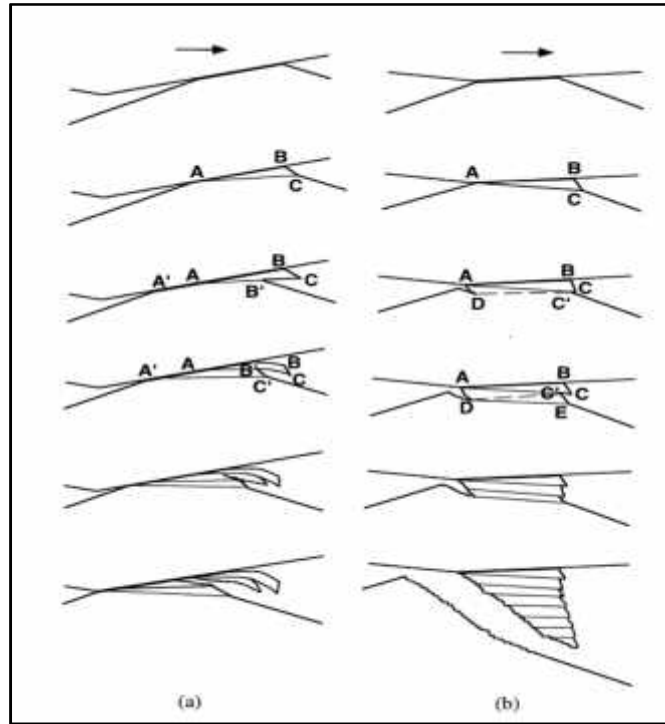
$$n\pi a^2 = \frac{W}{H} \quad (6)$$

Eşitlik 5'i Eşitlik 6'daki yerine koyduğumuzda normal  $W$  kuvveti altında  $L$  kayma mesafesi sonrası olası aınma hacmi  $V$  aşağıdaki gibi bulunur (Kato ve Adachi, 2001):

$$V = \frac{1}{3} \frac{WL}{H} \quad (7)$$

E itlik 7'ye göre adezif a ınma hacmi normal yük ve kayma mesafesi ile do ru, a ınan malzeme sertli i ile ters orantılıdır. E itlik 6'daki ili ki göz önüne alındı ında a ınma hacminin kayma esnasındaki toplam gerçek temas alanına e it oldu u görülür (Kato ve Adachi, 2001).

Ancak, uygulamada ekil 34'te gösterildi i (Kayaba ve Kato, 1981; Kato ve Adachi, 2001) gibi adezif a ınma farklı modlarda görülebilmektedir, ve a ınma partiküllerinin boyutu her zaman temas boyutuna denk gelmemektedir. Bunların yanında bir a ınma partikülü her zaman yalnızca nispeten daha yumu ak olan malzemedan gelmez ve her iki malzemedan gelebilmektedir. Ayrıca her bir temas noktasında a ınma partikülü olu ma olasılı ı aynı de ildir (Kato ve Adachi, 2001).

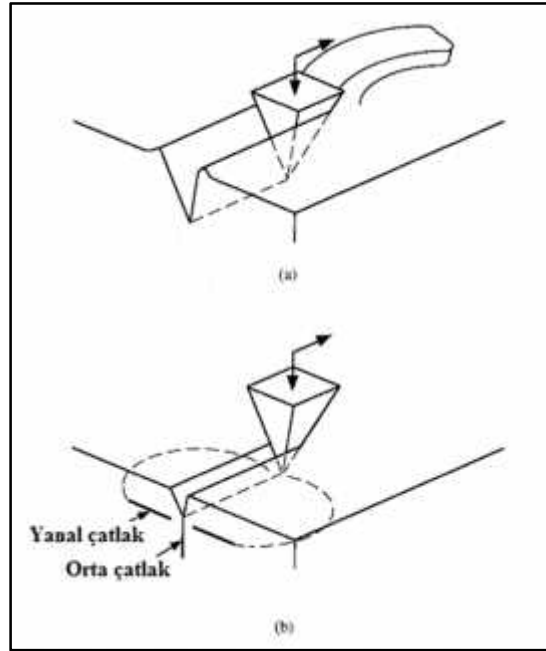


ekil 34: Adezif a ınmada görülen adezif ta ınma prosesinin temsili resmi. a: pulumsu ince a ınma partikülünün adezif ta ınması, b: kama benzeri a ınma partikülü. (Kayaba ve Kato, 1981; Kato ve Adachi, 2001).

#### 4.4.2 Abrazif Aınma

ki yüzey arasındaki temas ara yüzünün eimli veya kavisli olması durumu temas yüzeyleri arasında kilitleme olur ve kayma sırasında kazıma (iz oluşumu) gerçekleşir. Kazıma sonucu yüzeyden belirli bir hacimde malzeme kalkar ve daha zayıf yüzey üzerinde abrazif bir oyuk oluşur. Bu tür aınmaya abrazif aınma adı verilir (Kato ve Adachi, 2001).

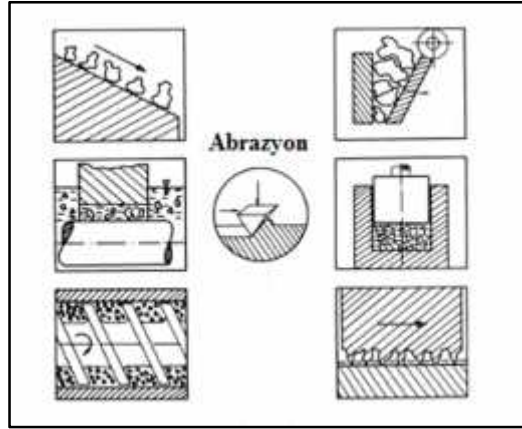
Abrazif aınmada sert ve keskin bir abrazifin düz bir yüzeye daldığı ve kazıma yoluyla bir oyuk oluştuğu tekil bir temas noktası söz konusudur. Aınan malzeme sünek bir karaktere sahipse mikro-kesme mekanizması ile erit ekinde uzun bir aınma partikülü oluşur. Gevrek malzemenin aındırılması sırasında ise aınma partikülü çatlak büyümesi yolu ile ortaya çıkar (Evans ve Marshall, 1981). Bu farklılıklar ekil 35’te özetlenmiştir.



ekil 35: Gevrek ve sünek malzemelerde abrazif aınma. a: plastik deformasyonun etkili olduğu, sünek malzemelerin abrazif aınması; b) gevrek çatlama (Evans ve Marshall, 1981; Kato ve Adachi, 2001).

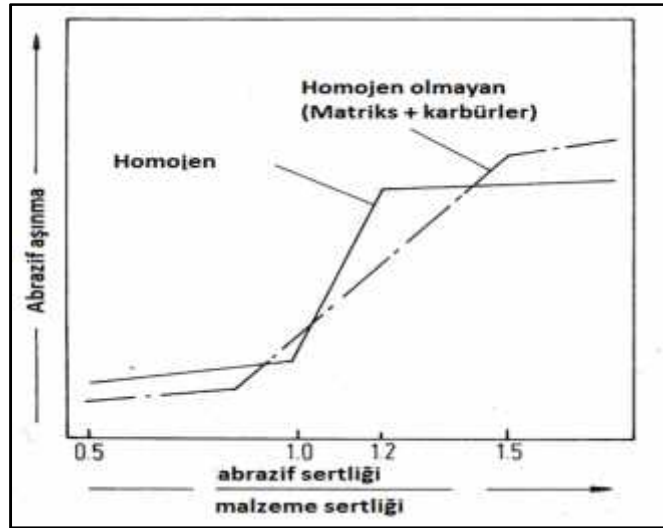
ekil 36’da abrazif aınmanın baskın aınma mekanizması olduğu tribo-sistemler verilmiştir. Kızaklar, toz ve kir içeren hidrolik sistemler, ekstrüzyon tertibatları, kaya kırıcılar, toz metalürjisinde kullanılan kalıplar, abrazyondan ötürü aınmaya maruz kalan makine bileenleri arasındadır. Aınan malzeme çeşidine ve işletme şartlarına bağlı olarak

abrazif partikül çedi ve atak açısı gibi farklı fiziksel faktörler abrazyonun hızına dahil olabilmektedir (Zum Gahr, 1987).



ekil 36: Abrazyonun hızına maruz kalan tribolojik sistemler (Zum Gahr, 1987).

Wahl (1951), Wellinger ve Uetz (1955) ve Uetz ve Föhl'e (1969) göre abrazyon hızının abradan yüzey sertliğine oranına bağımlı olarak abrazyon hızı düşük veya yüksek seviyelerde gerçekleşmektedir. ekil 37'de ekleme sertliklerine sahip homojen ve homojen olmayan malzemelerde düşük abrazyon hızından yüksek abrazyon hızına geçiş gösterilmektedir.



ekil 37: Abrazyon hızının abradan partikül sertliğine oranına bağımlı olarak abrazyon hızının değişimi (Zum Gahr, 1987).

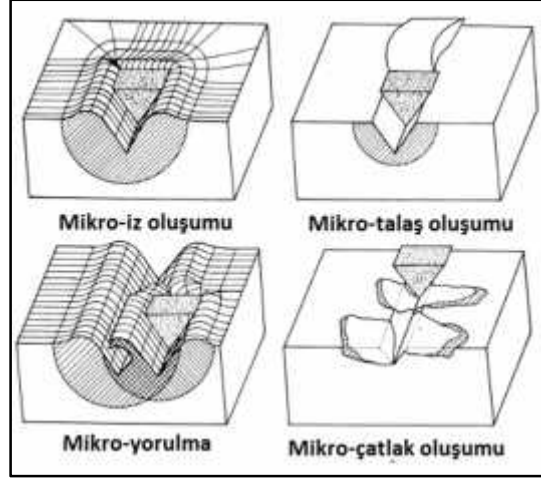
Abrazyonun hızına iki elemanlı veya üç elemanlı abrazyon türlerinde sınıflandırılabilir. İki elemanlı abrazyonda abrazyon hızı bir oluktan abradan kum veya taranan kum

veya çakıl gibi abrazif partiküller serbest biçimde hareket eder. Üç elemanlı abrazif aınmada abraif partiküller katı kütle ve karı kütle arasında arayüz elemanı gibi davranırlar. Plastik i lemede kullanılan ekstruderlerin helezonları ve çeneli kırıcılar üç elemanlı abrazif aınmaya maruz kalan bile enler arasındadır (Zum Gahr , 1987).



ekil 38: Abrazif mineraller ile çelik yüzeyler arasındaki etkileimin SEM görüntüleri. a: mikro-izolu mu, b: mikro-tala olu mu, c: mikro-çatlak olu mu (Zum Gahr, 1987).

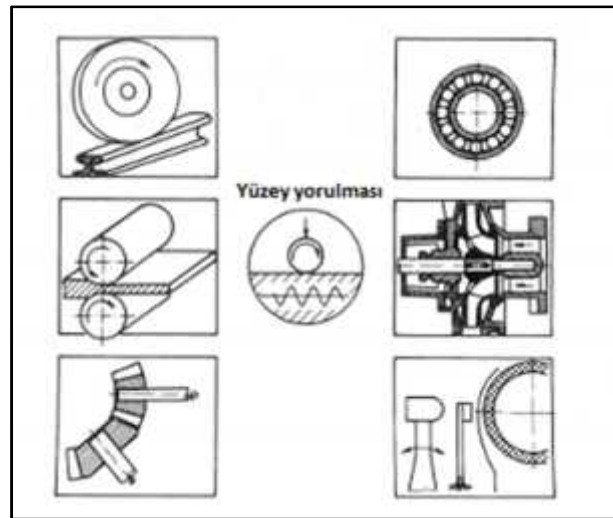
ekil 38’de sert abrazif minerallerle aındırılmı çelik yüzeyleri üzerinde mikro-iz, mikro-tala ve mikro-çatlak olu umları gösterilmektedir. deal durumda tek bir abrazif parçacı ın tek geçi i ile olu an mikro-iz a ınan yüzey üzerinden malzemenin kalkmasına yol açmaz. Bu durumda malzeme olu an oyu un hemen kenarında her iki tarafta sırt olu turacak ekilde yer de i tirir (Buttery ve Archard, 1970; Moore, 1979; Murray vd. 1979). Ancak mikro-iz olu mu sırasında aynı anda veya birbiri ardına hareket eden partiküllerden dolayı malzeme kaybı gerçekleşebilir. Geçen partiküller tarafından malzeme tekrarlı olarak kenara kazınabilir ve düük çevrimli yorulma ile bu parçalar kopabilir. Bu durum ekil 39’da ematik olarak gösterilmiştir.



ekil 39: Abrazif partiküller ile malzeme yüzeyleri arasındaki fiziksel etkileşimler (Zum Gahr, 1987).

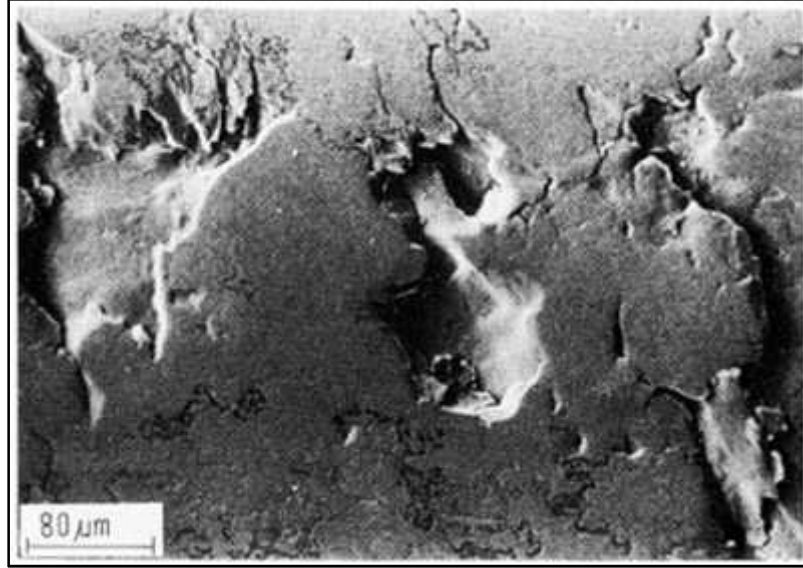
#### 4.4.3 Yüzey Yorulması

Yüzey yorulmasının yol açtığı aşınma katı yüzeyin tekrarlı deşim yüküyle yüklenmesi sonucu çatlak oluşumu ve malzemenin pullanması şeklinde ortaya çıkar. Katıların yuvarlanan ve/veya kayan teması veya katı ve/veya sıvıların birbirlerine darbeli teması sonucu çevrimsel yüzey gerilmeleri açığa çıkar. Bölgesel yorulma başlı hareketle hareket eden katı yüzeyleri üzerindeki çıkıntılarının tekrarlı kayan teması sonucu mikroskobik seviyede ortaya çıkar (Zum Gahr 1987).



ekil 40: Yüzey yorulması sonucu aşınmaya maruz kalan tribolojik sistemler (Zum Gahr, 1987).

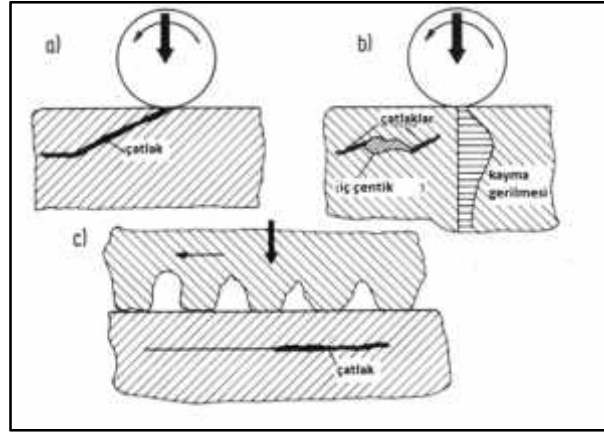
ekil 40'ta yüzey yorulması sonucu a nmaya maruz kalan sistemler gösterilmektedir. Ray ve tekerlek sistemlerinde, bilyalı yataklarda ve rulmanlarda, di lilerde, sıcak ve so uk hadde merdanelerinde, çarpı an parçacıkları içeren sıvı ortamlarda ve baskı cihazlarında a ırı hasarlar meydana gelebilmektedir. Yüzey yorulması aynı zamanda düz yataklar, kamlar ve izleyicilerini içeren hidrodinamik ya lı temaslarda hasarlara sebep olabilmektedir. Malzeme yorulmasında sırasıyla geli en olaylar elastik deformasyon, plastik deformasyon, pekle me ve/veya yumu ama, çatlak ba langıcı ve çatlak büyümesidir. Çatlaklar katı yüzeyde veya katı yüzeyin altında ortaya çıkabilir. Yuvarlanmalı temasta tekrar eden yüklerden ötürü çatlakların ortaya çıkması ve yayılması sonucunda çukurlar olu ur. ekil 41'de yuvarlanma/kayma teması sonucu olu an sı çukurlar gösterilmektedir (Zum Gahr 1987).



ekil 41: 60 HRC sertli inde semente edilmi çelik yüzeyindeki çukur olu umları (Zum Gahr, 1987).

Yuvarlanmalı temas yorulması için gerilmelere maruz kalmı yüzey üzerinde olu an çukurların olu umunu açıklayan iki temel model öne sürülmü tür. Bunlardan birinde çatlakların temas alanında basma ve çekme gerilmeleri sonucu ortaya çıktı ılıeri sürülür. Katı yüzeydeki çatla ın merkezine yüzey kalıntıları, üretim prosesleri sonucu olu an çentikler, a nma partiküllerinin kazıma i lemi sonucunda olu an çentikler veya yüzeyde gerilmeleri arttıran di er her türlü faktör katkıda bulunur. Katı temasta a nma partikülleri yüzey pürüzlerinin düzle mesi, saçılması veya çatlamaı sonucu olu abilir. Yüzeyde olu an çatlaklar ekil 42'de gösterildi i gibi malzeme içine do ru yüzey ile e imli bir

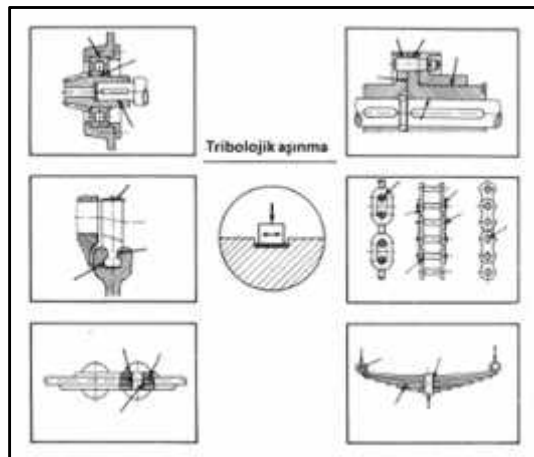
do rultuda büyür (Kloos ve Broszeit, 1976; Widner ve Wolfe, 1978; Beagley, 1979; Fushita ve Yoshida, 1979; Scott, 1979; Rowson ve Wu, 1981; Zum Gahr 1987).



ekil 42: Yüzey yorulmasında çatlakın oluşması ve büyümesi (Zum Gahr, 1987).

#### 4.4.4 Tribokimyasal Reaksiyon

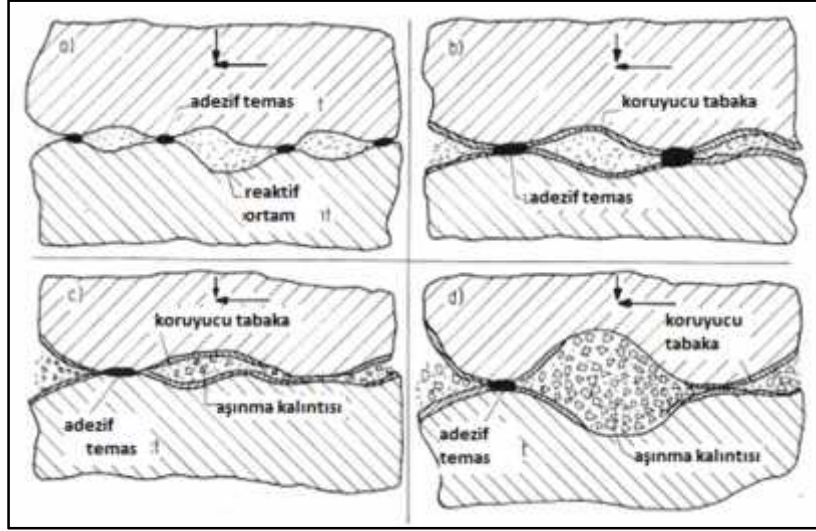
Tribokimyasal aşınma ortamla reaksiyona giren iki katı yüzey arasındaki sürtme teması ekinde karakterize edilebilir. Burada korozif ortam gaz veya sıvı olabilir. Aşınma süreci reaksiyon katmanlarının temas eden yüzeyler üzerinde sürekli uzaklaşması ve yeniden oluşması ekinde ilerler. Atmosferik oksijen ortamında aşınma kalıntıları büyük ölçüde yüzeyde oluşur ve sürtünme ile uzaklaşmaz oksitlerden oluşur. ekil 43'te tribo-kimyasal reaksiyon sonucu aşınmaya maruz kalan tribolojik sistemlerden bazıları gösterilmiştir (Zum Gahr 1987).



ekil 43: Tribokimyasal reaksiyon sonucu aşınmaya maruz kalan tribolojik sistemler (Zum Gahr, 1987).



Tribokimyasal aınma temas halindeki yüzeylerden metallerin ve kimyasal reaksiyon ürünlerinin uzakla ması uzakla ması sonucu meydana gelir. ekil 44'e göre tribokimyasal aınma mekanizmaları dört kategoriye ayrılmaktadır (Zum Gahr 1987).



ekil 44: Tribokimyasal aınma mekanizmaları (Zum Gahr, 1987).

ekil 44'teki aınma mekanizmaları aşağıda açıklanmıştır:

- Adezyona bağlı metal uzakla masına sebep olan, yüzey pürüzleri arasındaki metalik temas. Olu an az miktardaki metalik aınma kalıntıları oksitlenebilir.
- Metallerin ortamla kimyasal reaksiyona girmesi sonucu metalik teması azaltan koruyucu yüzey tabakaları oluşabilir.
- Bölgesel yüksek basınç veya mikro-yorulmalardan kaynaklanan koruyucu yüzey tabakasındaki çatlama metal olmayan aınma kalıntılarının oluşmasına yol açar.
- Metalik veya metalik olmayan aınma kalıntıları bir abrazyon ilevi görererek temas yüzeylerinde pürüzlülü ün artmasına sebep olabilir. Yeni koruyucu yüzey tabakalarının oluşması sonucu tekrar düzgün yüzeyler oluşur.

#### 4.5 Sürtünme ve Aınma Ölçüm Teknikleri

Sürtünme ve aınma mekanik temas halinde olan ve birbiri üzerinde ba lı hareket ile kayan yüzeyler arasında kompleks mikroskobik etkile imler sonucu ortaya çıkar. Bu etkile imler malzeme çedine, yüzeylerin geometrik ve topografik özelliklerine, yüzeylerin birbirlerine

göre ba ıl hareketle temas ettikleri ortam ko ullarına, (yük, sıcaklık, atmosfer, temas türü, vs.) ba lıdır. Yüzey temasının ve ortamın tüm mekanik, fiziksel, kimyasal ve geometrik özellikleri yüzey etkile imlerini ve dolayısıyla sistemin tribolojik özelliklerini etkiler. Bu yüzden sürtünme ve a ınma kitaplarda mevcut olan birer malzeme parametresi olmayıp, içinde ölçüldükleri tribolojik sistemin e siz özelliklerini temsil ederler (Niklas vd., 2001).

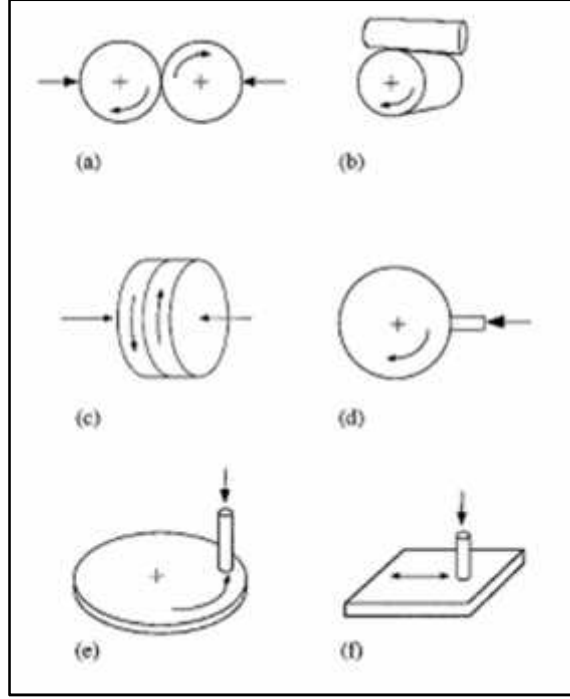
Ba ıl kayma veya yuvarlanma teması altındaki tüm yüzeyler için gerçek temas alanı nominal temas alanından çok daha küçüktür. Uygulanan yük gerçek temas alanını olu turan az sayıdaki küçük çıkıntı ve pürüzler vasıtasıyla ta ınır ve sonuç olarak sürtünme ve a ınma davranı ları bu bölgesel ve noktasal temas çıkıntıları arasındaki etkile imler sonucu ortaya çıkar. Bu gölgesel temas bölgelerinde ko ullar genellikle malzemelerin akma gerilmesinden yüksek olan çok yüksek basıçlar, kayma gerilmeleri, kısa süreli yüksek bölgesel sıcaklıklar ve bazı durumlarda yüksek derecedeki plastik deformasyon ve kayma hızları ile karakterize edilir. Bu artlar altında malzemelerin lokal mekanik özellikleri normal çekme deneylerinde bulunanlardan çok farklı olabilir. Oksit tabakalarının, küçük miktarlardaki kirlerin, bölgesel faz de i imlerinin vs. önemi de büyük ölçekli mekanik testlerde oldu undan daha önemli bir hal alır. Sonuç olarak gerçek temas alanlarında malzeme özellikleri normal mekanik test prosedürlerinde elde edilenlerden çok farklı olabilir (Zum Gahr , 1987; Hutchings, 1991; Niklas vd., 2001).

A ınma ve sürtünme sistem özellikleri açısından ele alındı ında da bu iki olayın modellenmesinin ne kadar zor oldu u anla ılmaktadır. A ınma ve sürtünme proseslerini açıklayan güvenilir ve kapsamlı modellerin sayısı çok azdır. yi modellerin sayısının bu kadar az olması ölçülmü a ınma ve sürtünme verilerinin yorumlanmasını da zorla tırmaktadır. Örne in dü ük sürtünme her zaman dü ük a ınma oranlarını beraberinde getirmemektedir (Czichos, 1987; Niklas vd., 2001). Tüm bunlara ra men sistem parametrelerinin tribolojik özellikler üzerindeki etkisinin abartılmaması gerekir. Uygulamada ço u malzeme dü ük sürtünme ve yüksek a ınma dayanımı de erleri vermekte ve bu yüzden dü ük sürtünmeli veya a ınmaya dayanıklı malzemeler ekinde adlandırılmaktadır. Sinterlenmi karbürler bazı istisnalar dı ında a ınmaya dayanıklı malzemelerdir, ancak koroziif ortamlarda son derece hızlı a ınırlar (Niklas vd., 2001).

Tribolojik parametrelerin karmaık sistem özelliklerinden ötürü malzemelerin sürtünme ve aınma de erleri yalnızca test ko ulları iyi biçimde belgelendi inde anlam ta ır. Sonuç olarak tribolojik özellikler malzeme parametresi de il de birer sistem parametresi oldu undan, tribolojik testlerin hem tribomalzeme geli tirme süreçlerinin, hem de sürtünme ve aınma içeren uygulamalar için malzeme seçim süreçlerinin ayrılmaz birer parçası olmaları gerekir (Niklas vd., 2001).

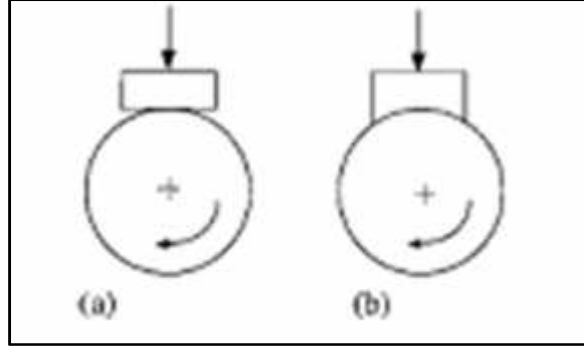
#### **4.5.1 Kaymalı ve Yuvarlanmalı Temaslar için A ınma Ölçüm Düzenekleri**

Kayma ve yuvarlanma a ınması herhangi bir a ınma mekanizması ile ilgili olmayıp birbirine göre ba ıl harket eden iki yüzey arasındaki temas türünü ifade eder. Bu temas türlerinde çok sayıda malzeme kaldırma mekanizması görülebilir. Bu tür temaslarda genellikle adeyon veya yüzey yorulmasına ba lı a ınma etkili olmakla birlikte yüzey pürüzlerinden ötürü abrazyon, tribokimyasal a ınma türleri ve di er a ınma mekanizmaları da görülebilmektedir. Makine elemanlarının ço unda görölmelerinden ötürü kayan ve yuvarlanan temaslarda ortaya çıkan a ınma ve sürtünme genellikle büyük ilgi görmektedir. Bu yüzden kayma ve yuvarlanma a ınması ile ilgili pek çok test tasarlanmaktadır. Kaymalı temaslarda ortaya çıkabilecek yüzey etkile imlerinin ve yüzey hasar türlerinin çe itlili inden ötürü test ko ullarında görünürde küçük olan de i imler baskın a ınma mekanizmalarında ve bunlarla ba lantılı a ınma ve sürtünme de erlerinde köklü ve keskin de i ikliklere sebep olabilmektedir. Bu yüzden malzeme aralıkları için model testleri seçilirken uygulama ko ullarının ayrıntılı biçimde simüle edilmesi büyük önem ta ır. Temas gerilmesi, termal artlar, kayma hızı ve kimyasal ortam kayma ve yuvarlanma a ınmasında önemli test parametreleridir. Kayma a ınması testleri çok sayıda geometrik konfigürasyon ile yapılabilmektedir ( ekil 45). Test numunelerinin simetrik veya asimetrik düzeni test yöntemlerinin ayırt edilmesinde önemli bir faktördür. ekil 45a ve 45b'de verilen simetrik versiyonlarda e malzemeler birbirine çok yakın ölçüm de erleri verirler. Model testlerinde simetrik düzenekler genellikle kullanılmaz, ancak ekil 45c'de gösterilen düzenek aksiyal contaların simetrik ve uyumlu temasına örnek gösterilebilir. (Niklas vd., 2001).



ekil 45: Yaygın olarak kullanılan kayma a ınması test düzeneklerinin temsili resimleri (Niklas vd., 2001).

ekil 45d'den 45f'e kadar gösterilen asimetric düzenekler a ınma ölçümlerinde daha yaygın kullanılmaktadır. Bu tür düzeneklerde temasın süreksizli inden dolayı test numunesinin konumlandırılmasına ba lı olarak farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Test ko ulları ve numune ekli açısından basit ve esnek yapısından ötürü asimetric pin-on-disk konfigürasyonları ( ekil 45e) kayma a ınmasının de erlendirilmesinde kullanılan en popüler yöntemlerden biri haline gelmi tir. Kontrollü atmosfer ko ulları altında testlere izin veren ısı hazneli ve muhafazalı pin-on-disk test düzenekleri piyasada bulunabilmektedir. Silindir üzeri pim veya blok konfigürasyonları da ( ekil 45d) sıkça kullanılmaktadır. Kayan bir blok üzerine yük veren sabit bir pim, veya bunun tersi, tek geçi li testlerde sürtünme ölçümlerinde kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin ayırt edilmesinde sistemin uyumlu (konformal) veya uyumsuz oldu unun bilinmesi de önemlidir. Temas ba langıçta bir nokta veya çizgi ekinde olabilir ve a ınma ilerledikçe gittikçe büyüyebilir; ya da temas ekil 46'da gösterildi i gibi a ınmanın ba langıcından sonuna kadar büyük bir alana yayılı biçimde sabit olabilir (Niklas vd., 2001).



ekil 46: Temas çe itleri. a: uyumlu temas, b) uyumsuz temas (Niklas vd., 2001).

Ulusal standartlarda çok sayıda kayma a nması test konfigürasyonu verilmektedir. Block-on-ring temelli testler (ASTM G77), çapraz silindirler (ASTM G83), pin-on-disk (ASTM-G99) ve sphere-on-disk (DIN 50 324) ABD ve Almanya'daki endüstriyel standartlardan bazılarıdır.

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALI MA

#### 5.1 Amaç

113M178 proje kodlu Tübitak deste i ile gerçekleştirilen bu deneysel tez çalı masında AISI 420 paslanmaz çelik üzerine APS yöntemi ile ba kaplama olarak 100 µm kalınlı ında NiCoCrAlY bile imli Amdry 365-1 (Sulzer Metco), seramik üst kaplama olarak ise yine APS yöntemi ile 350 µm kalınlı ında 5-38 µm toz boyutu aralı ındaki FeCr curuf tozu, Metco 130SF ticari kodlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>) ve Metco 6156 ticari kodlu Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları biriktirilmis , böylece TBC teknolojisine sahip üç çe it oksit içerikli seramik kaplama elde edilmiştir. SEM analizleri ve mikro sertlik ölçümleri yapılan TBC kaplamalar yüksek sıcaklık hazneli pin on disk cihazında 200, 400 ve 600 °C sıcaklıklarda kuru kayma a ınma deneylerine tabi tutulmu , pin on disk cihazından elde edilen sürtünme katsayısı verileri, a ınma izlerinin 3B optik profilometre ölçümlerinden elde edilen a ınma hacmi kayıpları ve a ınma izlerinin SEM görüntüleri kullanılarak FeCr curuf, Metco 130SF ticari kodlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>), ve Metco 6156 ticari kodlu Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaların farklı deney parametrelerindeki yüksek sıcaklık a ınma davranı ları kar ıla tırmalı olarak incelenmiştir.

#### 5.2 Kaplama Tozlarının Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Termal bariyer kaplama katmanlarının biriktirilmesinde kullanılan ba kaplama, FeCr cüruf kaplama ve ticari kaplama tozlarının hazırlanması, temin edilmesi ve karakterizasyonu ile ilgili bilgiler a a ıda verilmiştir.

##### 5.2.1 Metalik Ba Kaplama Tozu

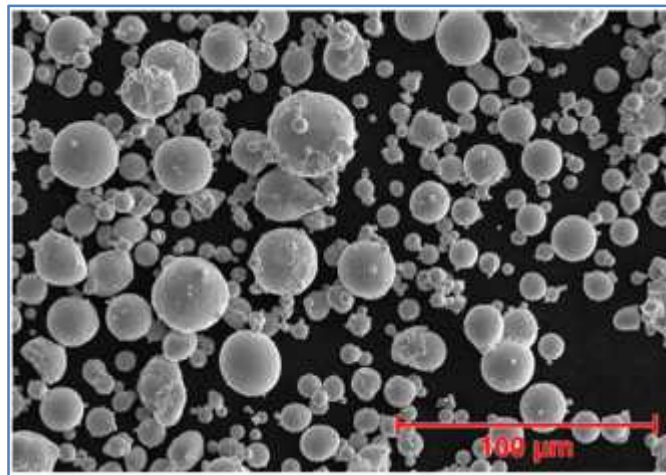
Oksit içerikli sert seramik kaplamaların yüksek sıcaklık a ınma davranı larının incelenmesi için yapılan deneysel çalı mada metalik ba kaplama malzemesi olarak seçilen NiCoCrAlY içeri ine sahip kaplama tozu Amdry 361-1 ticari kodu ile Sulzer Metco firmasından tedarik edilmiştir. Temin edilen Ni-esaslı gaz atomizasyonu yöntemi ile

üretildiği, küresel morfolojiye sahip NiCoCrAlY metalik baki kaplama tozunun kimyasal içeriği Tablo 7.'de, toza ait SEM görüntüsü ekil 47'de verilmiştir.

Tablo 7: Amdry 365-1 kodlu NiCoCrAlY metalik baki kaplama tozunun kimyasal kompozisyonu.

Malzeme özellikleri	nceleme Yöntemi	Değer	Birim
<b>Kimyasal Analiz</b>			
Al	ICP Gen. Prosedürü	12,32	WT%
Bi	GFAA	<1,0	ppm
C	Yanma	0,01	WT%
Co	ICP Gen. Prosedürü	22,53	WT%
Cr	ICP Gen. Prosedürü	17	WT%
Ni	Denge	47,29	WT%
Pb	GFAA	<10	ppm
Y	ICP Gen. Prosedürü	0,63	WT%
T.A.O.	ICP Gen. Prosedürü	<0,20	WT%
<b>Partikül Boyutu</b>			
20 µm	ASTM B822-10	35	WT%
5 µm	ASTM B822-10	0	WT%

Tablo 7'de gösterilen nikel esaslı, Co ve Cr içerikli kimyasal kompozisyonu ile endüstride yüksek sıcaklık uygulamalarında en çok kullanılan baki kaplama malzemelerinden biri olan NiCoCrAlY, 600°C'ye varan yüksek sıcaklık artlarında baki tabaka-üst seramik tabaka arasındaki adezyonun korunması açısından bu deneysel çalışmada baki kaplama malzemesi olarak tercih edilmiştir.



ekil 47: NiCrCoAlY metalik baki kaplama tozunun SEM görüntüsü (URL-1).

ekil 47’de NiCoCrAlY metalik ba kaplama tozunun üretici firma tarafından verilen SEM görüntüsü incelendi inde taneciklerin küresel yapıda oldu u görülebilmektedir.

### 5.2.2 FeCr Curuf Tozu

Elazı Ferrokrom letmesinden elde edilen FeCr curufu Sanko Bartın Çimento Fabrikası’nda ö ütülenerek toz haline getirildikten sonra hız ve zaman ayarlı eleme cihazında 5-38 µm göz açıklı ma sahip elek kullanılarak üç kez eleme i lemine tabi tutulmu tur. FeCr curufunun kimyasal içeri i Tablo 8’de, eleme i leminde kullanılan elek sallama makinesinin görüntüsü ekil 48’de verilmi tir. Elde edilen 5-38 µm toz boyutu aralı ndaki FeCr curuf tozunun FEI QUANTA FEG 450 SEM cihazında elde edilen 1000x büyütmedeki SEM görüntüsü ekil 49’da, Malvern Mastersizer 2000 partikül boyutu analiz cihazından elde edilen toz boyutu verileri ekil 50’de, Setaram Labsys termogravimetrik analiz ve diferansiyel termal analiz (TGA+DTA) sisteminden elde edilen veriler ekil 51’de verilmi tir. Yapılan analizlerden edilen veriler di er ticari kaplamalara ait verilerle kar ıla tırılarak bu toz boyutu aralı ndaki FeCr curuf tozunun termal sprey kaplama uygulamalarında kullanımı için herhangi bir engel bulunmadı ı tespit edilmi tir.

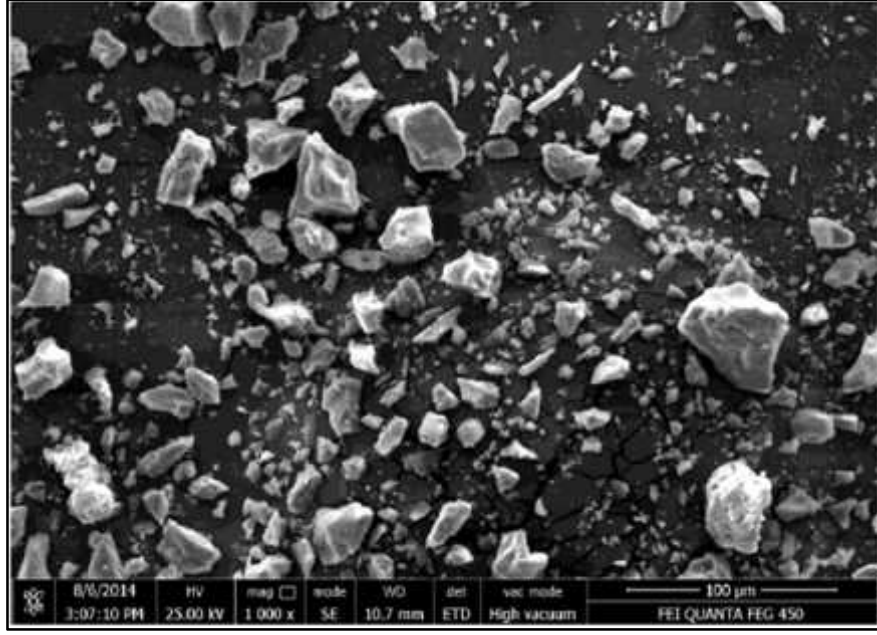
Tablo 8: FeCr curufunun kimyasal içeri i.

Oksit içerik dağılımı (%)							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
23,47	29,38	1,55	38,5	0,93	0,06	0,15	5,17



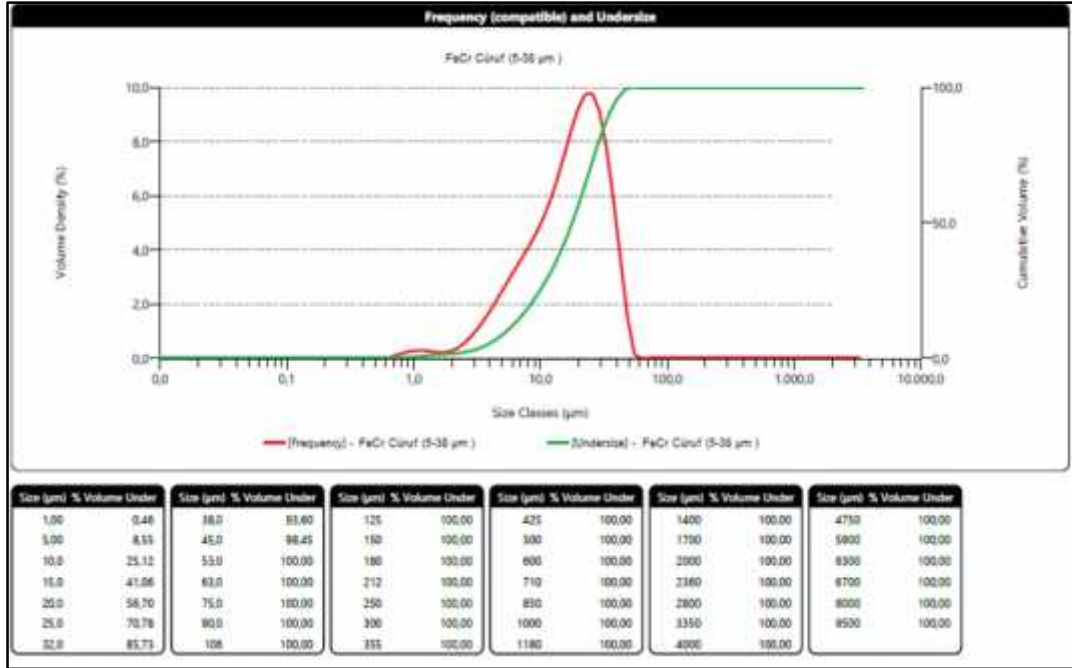
ekil 48: Toz eleme i leminde kullanılan elek sallama makinesi (URL-2).





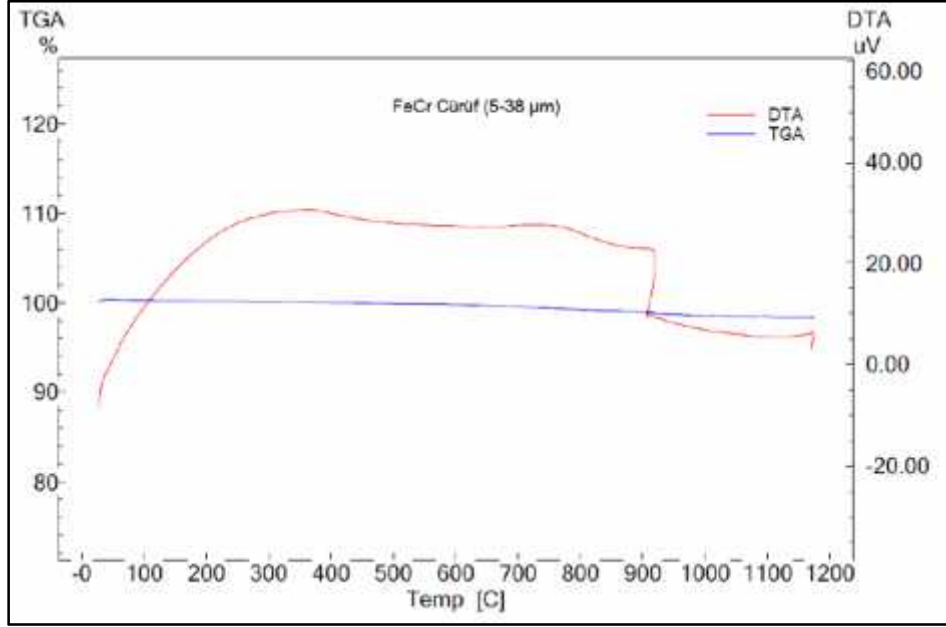
ekil 49: 5-38 toz boyutu aralı ındaki FeCr curuf tozunun SEM görüntüsü.

ekil 49’da FeCr curuf tozunun 1000x büyütmede SEM görüntüsü incelendi inde küresel yapıdaki NiCrCoAlY tozlarından farklı olarak bu malzemenin düz ve keskin bir morfolojiye sahip oldu u görülmektedir.



ekil 50: 5-38 toz boyutu aralı ındaki FeCr curuf tozunun toz boyutu analizi.

FeCr curuf tozunun ekil 50'de verilen toz boyutu analizi incelendi inde FeCr curuf tozunun a ırlıklı olarak 5-38  $\mu\text{m}$  toz boyutu aralı nda oldu u görülmektedir. De erlendirmede 5  $\mu\text{m}$  altı ve 38-45  $\mu\text{m}$  aralı ndaki toz % hacim oranları önemli bir büyüklü e sahip olmadı ndan de erlendirmeye alınmamı tır.



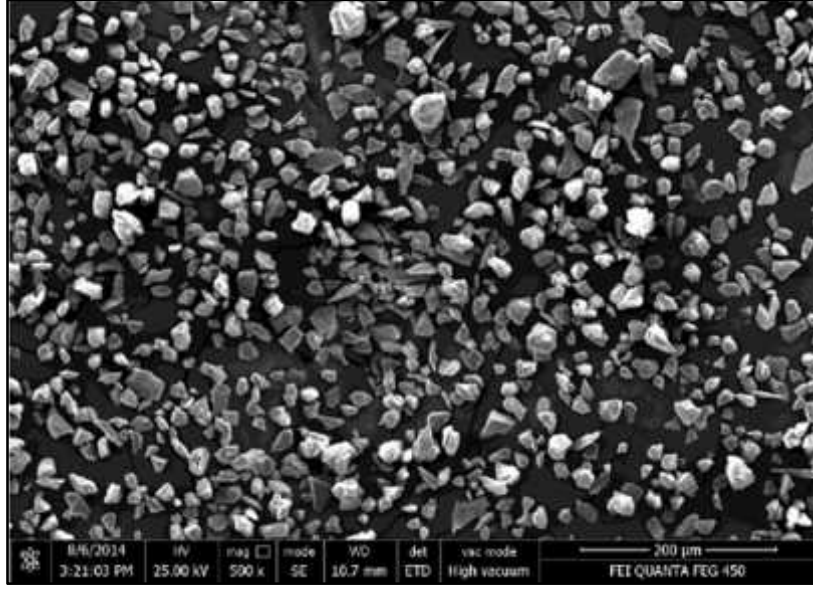
ekil 51: 5-38 toz boyutu aralı ndaki FeCr curuf tozunun TGA+DTA analizi.

FeCr curuf tozunun ekil 51'de verilen TGA+DTA analizi incelendi inde 1200°C sıcaklı a kadar kayda de er bir kütle kaybının gerçekleşmedi i görülebilmektedir.

NiCrCoAlY ve FeCr curuf tozları kaplama i leminden önce 50° C'lik fırında 6 saat bekletilerek nemden arındırılmı ve akıcılıkları arttırılmı tır.

### 5.2.3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>) Ticari Seramik Kaplama Tozu

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>) seramik kaplama tozu Metco 130SF ticari kodu ile Sulzer Metco firmasından tedarik edilmi tir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>) seramik kaplama tozunun SEM görüntüsü ekil 52'de, kimyasal analizi Tablo 9'da verilmi tir.

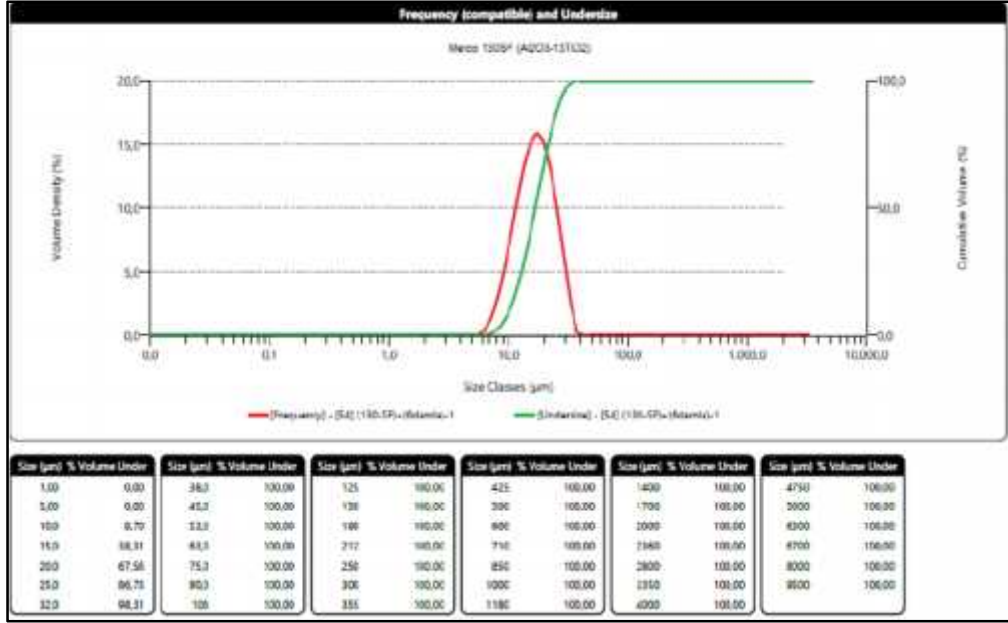


ekil 52: Metco 130SF kodlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>) ticari seramik kaplama tozunun SEM görüntüsü.

Tablo 9: Metco 130SF kodlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>) ticari seramik kaplama tozunun kimyasal analizi.

Malzeme özellikleri	nceleme Yöntemi	De er	Birim
<b>Kimyasal Analiz</b>			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	XRF	83,9	wt %
TiO <sub>2</sub>	XRF	12	wt %
T.A.O.	XRF	2,9	wt %
Organik katılar	Gravimetrik	1,1	wt %

Metco 130SF ticari kodlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>) seramik kaplama tozunun toz boyutu analizi ekil 53'te verilmi tir. Yapılan analize göre Metco 130SF tozunun yaklaşık %8'inin 10 µm altında %90'ının ise 10-38 µm aralı ında oldu u anlaşılmaktadır.



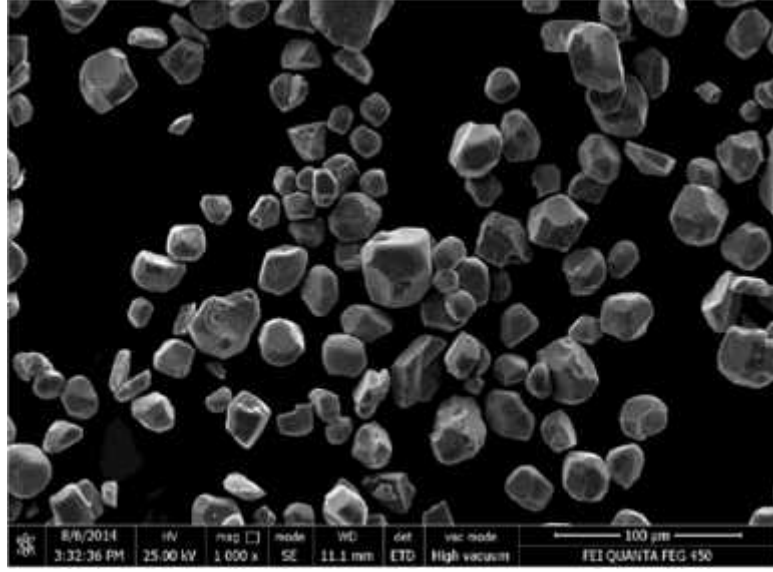
ekil 53: Metco 130SF ticari kodlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>) seramik kaplama tozunun toz boyutu analizi.

#### 5.2.4 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ticari Seramik Kaplama Tozu

Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramik kaplama tozu Metco 130SF ticari kodu ile Sulzer Metco firmasından tedarik edilmi tir. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramik kaplama tozunun kimyasal analizi Tablo 10'da, SEM görüntüsü ekil 54'te verilmi tir.

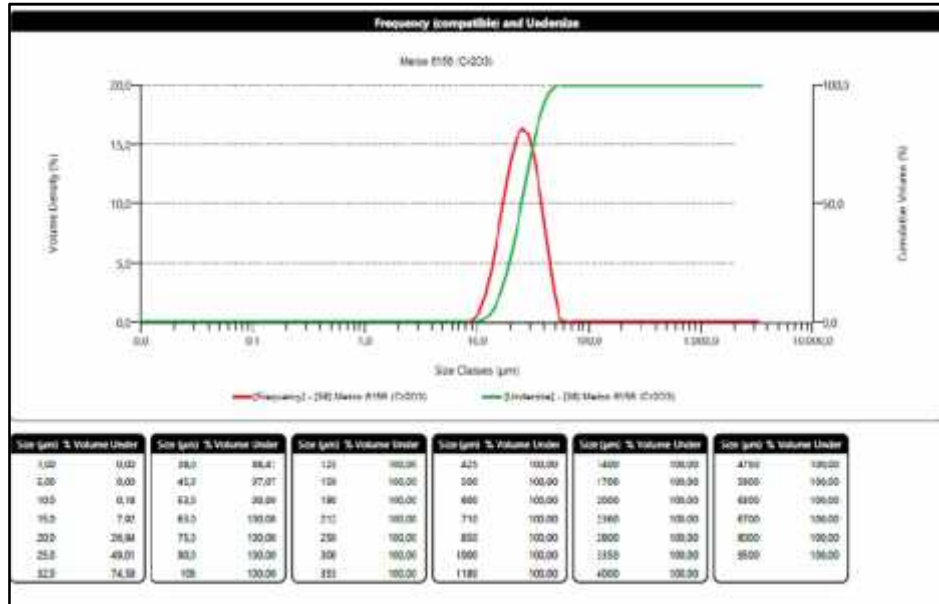
Tablo 10: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> seramik kaplama tozunun kimyasal analizi.

Malzeme özellikleri	nceleme Yöntemi	De er	Birim
<b>Kimyasal Analiz</b>			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RFA	0,03	wt %
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Balance	99,77	wt %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RFA	0,02	wt %
MgO	RFA	0,04	wt %
SiO <sub>2</sub>	RFA	0,03	wt %
TiO <sub>2</sub>	RFA	0,03	wt %
CaO	RFA	0,03	wt %



ekil 54: Metco 6156 kodlu Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ticari seramik kaplama tozunun SEM görüntüsü.

ekil 55'teki veri analiz tablosu incelendi inde Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozunun yakla ık %8'inin 15 µm altında %89'unun ise 15-45 µm aralı nda oldu u anla ılmaktadır. De erlendirmede 15 µm altı ile 45-53 µm aralı ndaki toz % hacim oranlarının önemli büyüklükte bir % hacim de erine sahip olmamasından dolayı dikkate alınmamı tır.



ekil 55: Metco 6156 kodlu Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ticari seramik kaplama tozunun toz boyutu analizi.

### 5.3 Altlık Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu ve Hazırlanması

#### 5.3.1 Altlık Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu

Yapılan deneysel çalı mada NiCrCoAlY ba kaplama FeCr curuf seramik üst kaplamadan olu an TBC sisteminde altlık malzeme olarak kimyasal içeri i Tablo 11’de verilen AISI 420 paslanmaz çelik kullanılmı tır.

Tablo 11: AISI 420 paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu (URL-3).

<b>AISI 420</b>	
% C	1,345
% Cr	13,1
% Ni	5,3
% Mn	0,786
% Si	0,4049
% Mo	0,1338
% P	0.0014

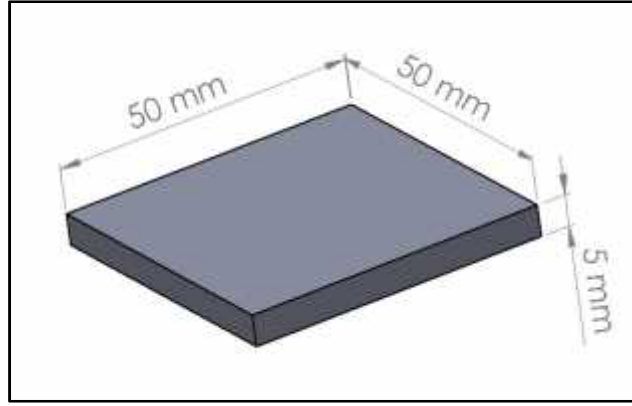
Deneysel çalı malarda altlık malzeme olarak AISI 420 paslanmaz çelik seçilmesinin sebebi Tablo 11’de da görülen yüksek Cr içeri i sayesinde paslanmaz çelik malzemelerin yüksek sıcaklıklarda iyi oksidasyon ve korozyon direnci sa laması ve 1090 °C’ye kadar olan sıcaklarda havadaki ısıya dayanıklı olmalarıdır. Bunların yanında altlık malzeme olarak dü ük termal genle me katsayısına sahip AISI 420’nin kullanılmasıyla yüksek sıcaklıklarda altlık ve kaplama sistemi arasındaki termal genle me uyumsuzlu undan ötürü kaplamanın atması ekinde ortaya çıkabilecek kaplama hasarlarının önüne geçilmesi amaçlanmı tır. AISI 420 paslanmaz çeli in termal genle me katsayısına ait bilgiler Tablo 12’de verilmi tir.

Tablo 12: AISI 420 paslanmaz çelik termal genle me katsayısı (URL-4).

<b>Isıl Genle me Katsayısı (<math>\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}</math>)</b>		
0-100°C	0-315°C	0-538°C
10,3	10,8	11,7

### 5.3.2 Altık Malzemenin Hazırlanması

50x50x2000 mm ebatlarında dolu kare profil ekinde tedarik edilen AISI 420 paslanmaz çelik Metacut 250 metalografik numune kesme cihazında yeterli uzunlukta parçalara ayrıldıktan sonra tala lı imalat yöntemi ile 50x50x5 mm'lik prizmatik numune boyutlarına i lenmi ve yüzey paralelli i elde edilmi tir. Altık malzeme boyutlarını gösteren teknik çizim ekil 56'da verilmi tir.



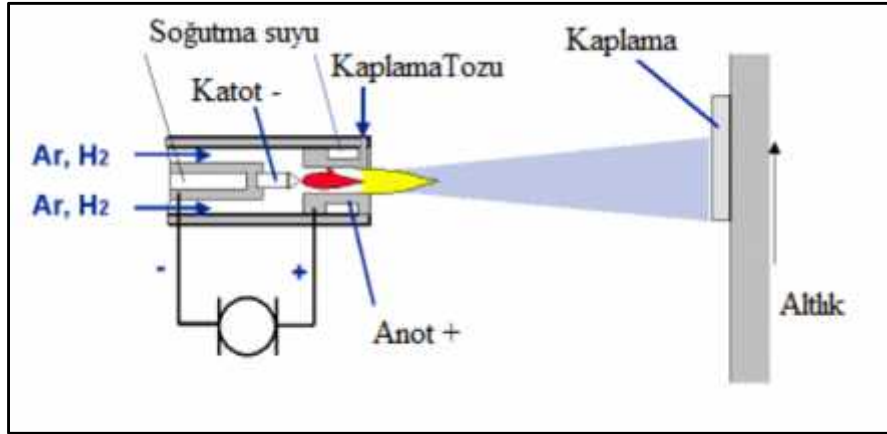
ekil 56: Deneysel çalı mada kullanılan AISI 420 altık numune boyutları.

Hazırlanan prizmatik altık malzeme yüzeylerine kaplama adezyonunu artırıcı yüzey pürüzlülü ü sa lamak amacıyla 35-40 grit'lik  $Al_2O_3$  parçacıklarıyla kumlama yapılarak altık yüzeyi kaplamaya hazır hale getirilmi tir. Numunelerin kumlama i leminde kullanılan kumlama cihazı ekil 57'de verilmi tir.

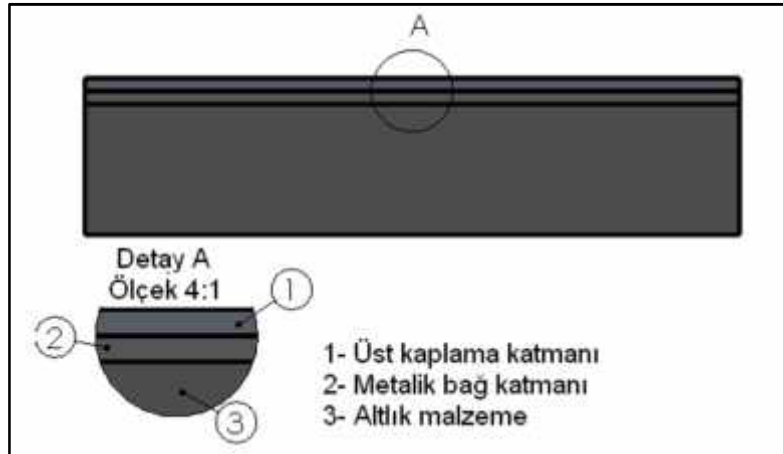


ekil 57: Altık numunelerin kaplama öncesi kumlanmasında kullanılan kumlama cihazı.

AISI 420 prizmatik numune yüzeylerine NiCrCoAlY metalik bağ, FeCr curuf ve ticari seramik tozlarının kaplanması için lemleri hizmet alımı yoluyla APS termal sprej kaplama yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem seçilerek NiCrCoAlY ve FeCr curuf ve ticari seramik kaplama tozlarının yüksek plazma sıcaklıklarında taşıyıcı-koruyucu gaz basıncı desteğiyle altlık yüzeyine yapı arak hızla ısı kaybedip katılmasını sağlamıştır. Deneysel çalışmada kullanılan APS termal sprej kaplama yöntemininematik resmi ekil 58’de, üretilen TBC sisteminin kaplama katmanları ekil 59’da verilmiştir.



ekil 58. APS termal sprej kaplama yöntemininematik resmi



ekil 59: Üretilen TBC sisteminin kaplama katmanları.

Belirtilen kaplama malzemeleri için toz üretici firmanın verdiği üretim spesifikasyon parametreleri, literatür araştırmasından elde edilen veriler, kullanılan cihaz ve ekipmanlara bağlı olarak operatör deneyimi ile belirlenen parametreler dikkate alınarak her bir kaplama tozu malzemesi için optimum termal sprej parametreleri belirlenmiştir. Kaplamaların APS



yöntemi ile kaplanmasında kullanılan termal spreylere kaplama parametreleri Tablo 13'te verilmiştir. Kaplamaların biriktirilmesinde kullanılan Metco MCN kontrol ünitesi ve Metco MPN toz besleme ünitesinden oluşan APS kaplama ünitesi ekil 60'da verilmiştir.

Tablo 13: Kaplamaların üretilmesinde kullanılan APS termal spreylere kaplama parametreleri.

Kaplama Tozu	Ark Akımı (A)	Ortalama Kaplama Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Toz Boyutu	Ar (Birincil Akı - S <sub>1</sub> pm)	H <sub>2</sub> (Kincil Akı - S <sub>2</sub> pm)	Disk (rpm)	Flow (Scfh)	Püskürtme mesafesi (mm)
NiCoCrAlY	600	100	(5-45)	150	7	4	20	150
FeCr Curuf Tozu	600	350	(5-38)	80	15	13	9	120
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +13TiO <sub>2</sub>	600	350	(5-45)	80	15	13	22	67
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	600	350	(10-53)	80	15	11	17	80



ekil 60: Metco marka APS kontrol ünitesi ve toz besleme ünitesi.

#### 5.4 Yüksek Sıcaklık Aınma Testleri Öncesinde Termal Bariyer Kaplamanın Karakterizasyonu

APS yöntemi ile hazırlanan TBC kaplı prizmatik numunelerin bir bölümü tribometre'de yüksek sıcaklık artlarında aınma deneylerine başlanmadan önce sertlik ölçümü ve arakesit SEM analizleri için önce Metacut 250 metalografik kesme cihazında uygun

ölçülerde parçalara bölünmüş sonrasında bu numuneler kaplama arakesit yüzeyi dışarıda kalacak şekilde soğuk bakalite alınmıştır.

Bakalite alınan numunelerin arakesit yüzeyleri 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 2000 mesh SiC zımpara diskleri kullanılarak, her kademedede belirli sürede zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler zımparalama işleminin ardından 1 µm'lik elmas aındırıcı içeren solüsyon kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama ve parlatma işleminde kullanılan Metkon Forcipol 1V otomatik zımparalama ve parlatma cihazının resmi ekil 61'de, zımparalama ve parlatma adımlarında kullanılan parametreler Tablo 14'te verilmiştir.



ekil 61: Zımparalama ve parlatma işleminde kullanılan otomatik zımparalama ve parlatma cihazı (URL-5).

Tablo 14: Zımparalama ve parlatma adımlarında kullanılan parametreler.

<b>Zımparalama</b>				
Zımpara (mesh)	Hız (rpm)	Basınç (N/mm <sup>2</sup> )	Su Kullanımı	Süre (s)
120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 2000	300	20	var	500
<b>Parlatma</b>				
Kuma Türü	Elmas Boyutu	Basınç (N/mm <sup>2</sup> )	Su kullanımı	Hız (rpm)
Nap	1 µm	20	yok	200

Zımparala ve parlatma i lemlerinin ardından bakalite alınan numunelerin seramik üst kaplama ara kesitinden QNESS Q10M mikrosertlik cihazı kullanılarak sertlik ölçümleri alınmıştır. Mikrosertlik ölçümünde kullanılan cihazın resmi ekil 62’de, FeCr curuf ve ticari seramik kaplamaların ara kesitten alınan ortalama sertlik değerleri Tablo 15, 16 ve 17’de verilmiştir.



ekil 62: TBC kaplı numunelerin seramik kaplama tabakasının mikro sertlik ölçümlerinde kullanılan mikrosertlik cihazı (URL-6).

Tablo 15: FeCr curuf kaplamanın ortalama sertlik değeri.

Ortalama Sertlik (HRC)
FeCr Cüruf (5-38 $\mu\text{m}$ ) 51

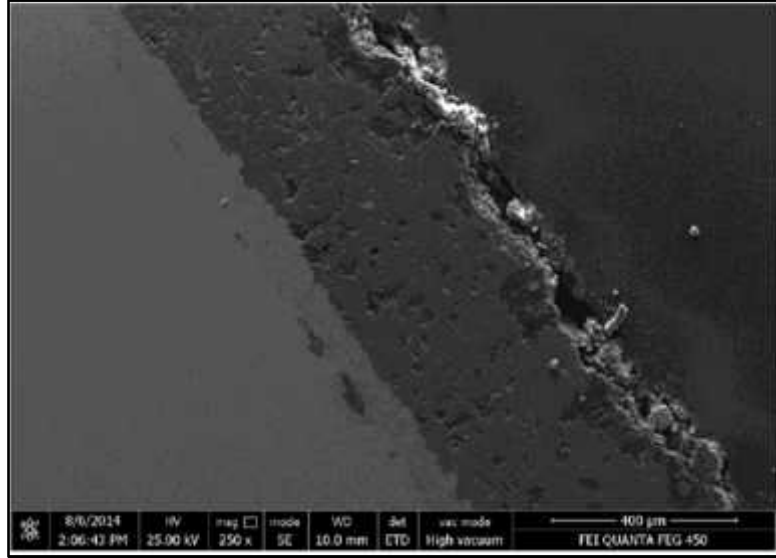
Tablo 16: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 130SF) ticari seramik kaplamanın ortalama sertlik değeri.

Ortalama Sertlik (HRC)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Cüruf (5-45 $\mu\text{m}$ ) 51

Tablo 17: Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 6156) ticari seramik kaplamanın ortalama sertlik değeri.

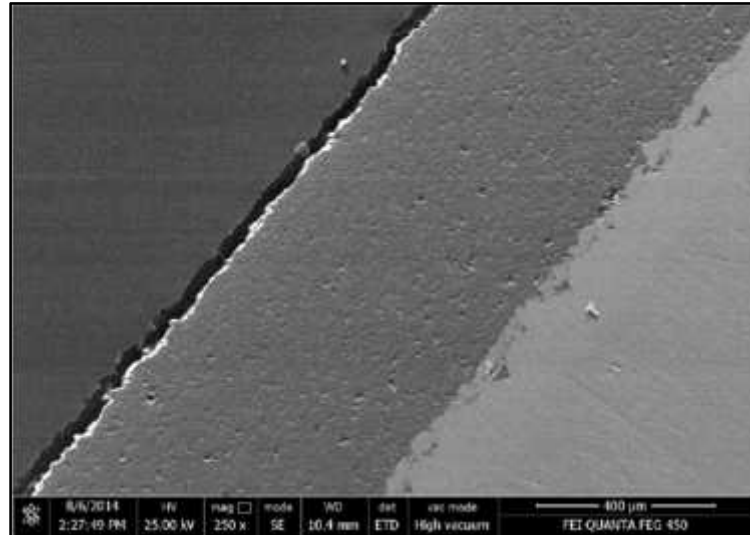
Ortalama Sertlik (HRC)
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (10-53 $\mu\text{m}$ ) 59

Mikrosertlik ölçümlerinin ardından numunelerin SEM analizi FEI Quanta Feg 450 SEM cihazında yapılmı tır. Kaplama arakesitine ait SEM görüntüleri ekiler 63-65'te verilmi tir.



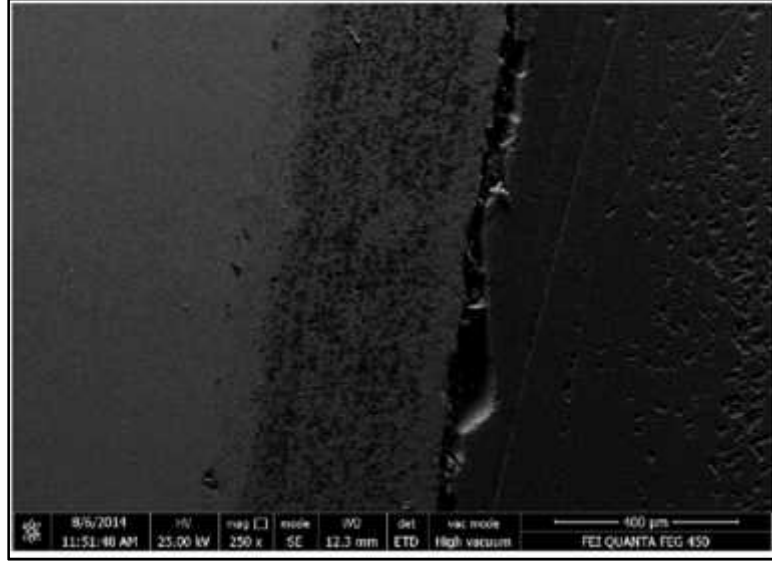
ekil 63: FeCr curuf kaplamasının 250x büyütmede alınımı SEM arakesit görüntüsü.

ekil 63 incelendi inde 5-38 µm toz boyutundan elde edilen kaplama kesitinin az gözenekli ve küçük gözenek boyutuna sahip oldu u gözlenmektedir. Ayrıca kaplama kesiti ara yüzeylerinde çatlak, ayrılma, bo luk vb. olumsuzlukların bulunmadı ı görölmektedir.



ekil 64: Metco 130SF ticari kodlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>) seramik kaplama tozu ile kaplanımı numunenin 250x büyütmede alınımı SEM arakesit görüntüsü.

ekil 64 incelendi inde di er kullanılan tozlar içinde en küçük toz boyutuna sahip  $Al_2O_3-13 TiO_2$  tozu ile yapılan kaplama kesitinin gözenek ve homojenlik kriterlerine göre daha üstün oldu u, ekil 65 incelendi inde onu  $Cr_2O_3$  tozu ile kaplanmı numunenin izledi i görülmektedir. Bu durumun Tablo 14'te verilen ortalama sertlik de erlerindeki artı üzerine de etkisi oldu u dü ünülmektedir.



ekil 65: Metco 6156 ticari kodlu  $Cr_2O_3$  seramik kaplama tozu ile kaplanmı numunenin 250x büyütmede alınmı SEM arakesit görüntüsü.

## 5.5 TBC Kaplı Numunelerin Yüksek Sıcaklıkta Yapılan Kuru Kayma Adezyon (A nma) Testleri

### 5.5.1 Yüksek Sıcaklık Hazneli Pin-On-Disc A nma Testi Düzene i

Hizmet alımı yoluyla NiCrCoAlY ve FeCr curufu kaplanan AISI 420 paslanmaz çelik numunelerin yüksek sıcaklık kuru kayma adezyon testleri proje kapsamında tedarik edilen TURKYUS marka yüksek sıcaklık hazneli tribometre düzene inde gerçekleştirilmi tir ( ekil 66).



ekil 66: TBC kaplı numunelerin yüksek sıcaklık a ınma testlerinde kullanılan yüksek sıcaklık pin-on-disk test düzene i.

ekil 66'da resmi verilen yüksek sıcaklık ball-on-disk test sistemi:

- Yüksek sıcaklıklara dayanıklı gövde ve yataklamalara sahip, üzerinde sürtünme kuvvetini ölçen ve anlık olarak bilgisayara aktaran bir adet load cell bulunan, hız kontrollü ve zaman ayarlı, 80 mm çapında numunelerin ba lanmasına izin veren ve 300 devir/dakika dönme hızına çıkabilen pin-on-disc test cihazından ( ekil 66-1);
- Cihaz üzerine yerle tirilen 850° C sıcaklı a çıkabilen atmosfere açık paslanmaz gövdeli yüksek sıcaklık haznesinden ( ekil 66-2);
- Atmosfere açık yüksek sıcaklık haznesinin sıcaklık kontrolüne izin veren bir güç kayna ı ve kontrol panelinden ( ekil 66-3);
- Test düzene inden aldı ı verileri anlık olarak cihazla birlikte gelen yazılım arayüzüne yansıtan ve bunları bir log dosyasına kaydeden bir ki isel bilgisayardan olu maktadır ( ekil 66-4).

Yüksek sıcaklık a ınma deneylerinde kullanılan 6 mm çapındaki WC (tungsten karbür) a ındırıcı bilyaların üretici üretici Redhill firması tarafından verilen sertlik de eri 19 GPa'dır.

## 5.5.2 Deney Parametreleri

Yüksek sıcaklık pin-on-disk testlerinde kullanılan deney parametreleri şunlardır:

- Sıcaklık (°C)
- Yük (N)
- Kayma hızı (m/s)

Deney sel çalı malarda kullanılan bu parametreler konuyla ilgili literatür ara tırmalarından elde edilen bilgiler ışığında cihaza ba lanabilecek numune boyutları ve cihazın hız kapasitesi de dikkate alınarak belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık a nma testlerinde kullanılan deney parametreleri Tablo 18’de verilmiştir. Kayma hızı ve kayma mesafesi parametreleri birbirlerine ba lı oldu undan bu iki parametre Tablo 18’de birlikte verilmiştir.

Tablo 18: Yüksek sıcaklık kuru kayma a nma testlerinde kullanılan deney parametreleri.

A ındırıcı Top	Sıcaklık (°C)	Yük (N)	Kayma hızı (m/s) (kayma mesafesi (m))
WC (Ø 6mm)	200	7	0,08 (538)
	400	10	0,16 (768)
	600	13	0,26 (985)

Pin on disk cihazında yapılan yüksek sıcaklık kuru kayma a nma testlerinde 3 parametre ve her parametreye ba lı 3’er sıcaklık, yük ve çevresel hız de eri için toplam 27 (3<sup>3</sup>) deney gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık testlerinde kullanılan deney deseni Tablo 19’da verilmiştir.

Tablo 19: Yüksek sıcaklık kuru kayma aınma testlerinde kullanılan deney deseni.

Deney No	Yük (N)	Hız (m/sn)	Sıcaklık (°C)
1	7	0.08	200
2	7	0.08	400
3	7	0.08	600
4	7	0.16	200
5	7	0.16	400
6	7	0.16	600
7	7	0.26	200
8	7	0.26	400
9	7	0.26	600
10	10	0.08	200
11	10	0.08	400
12	10	0.08	600
13	10	0.16	200
14	10	0.16	400
15	10	0.16	600
16	10	0.26	200
17	10	0.26	400
18	10	0.26	600
19	13	0.08	200
20	13	0.08	400
21	13	0.08	600
22	13	0.16	200
23	13	0.16	400
24	13	0.16	600
25	13	0.26	200
26	13	0.26	400
27	13	0.26	600

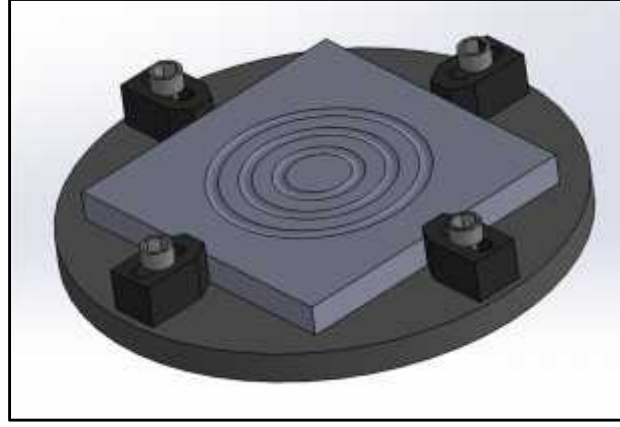
### 5.5.3 Yüksek sıcaklık aınma testleri

Yüksek sıcaklık aınma testlerinde gerçekleştirilen 27 deney için toplam 9 numune kullanılmıştır. Numuneler cihaz üzerinde bulunan ve ekil 67'de gösterilen 80 mm çaplı altlık tutucu üzerine ekil 68'de gösterildiği gibi cihazla birlikte gelen yüksek sıcaklık aınma dayanıklı paslanmaz çelikten aparat ve alüminyum civatalar yardımıyla sabitlenmiştir.

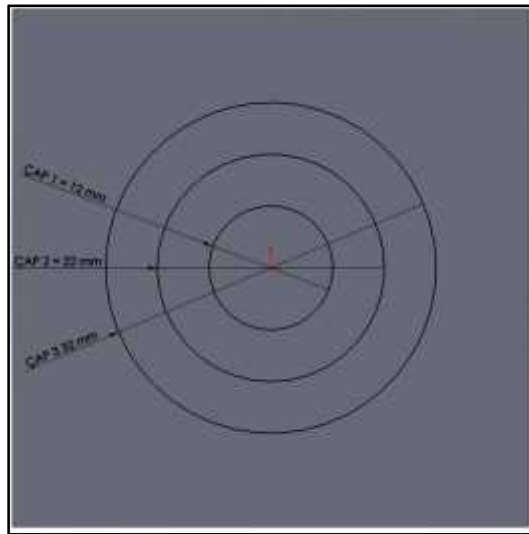




ekil 67: Altık tutucu.



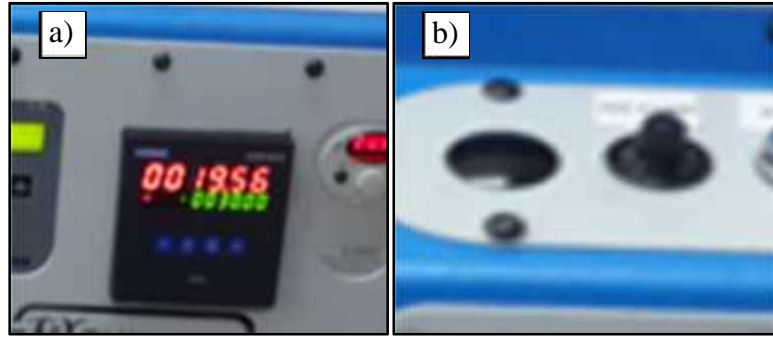
ekil 68: Numunenin altık tutucuya ba lanması ve olu an a ınma izlerinin temsili resmi



ekil 69: A ınma izi çapları

Aynı numune üzerinde sıcaklık parametresi sabit, diğer parametreleri de iken 3 farklı deney 12, 22, 32 mm olacak şekilde üç farklı aınma izi çapında gerçekleştirilmiştir ( ekil 69).

Deneyler gerçekleştirilmeden önce her üç çaptaki kayma hızları (kayma mesafeleri) için gerekli olan deney süreleri ve cihaz devir hızları hesaplanarak cihaz üzerinde bulunan zaman ( ekil 70a) ve hız ayar kumandaları ( ekil 70b) yardımıyla bu değerler girilmiştir.



ekil 70. Pin on disk cihazının hız ve zaman ayar kumandaları. a: zaman ayar kumandası (timer), b: hız ayar kumandası.

Aynı numune üzerinde gerçekleştirilen deneyler arasında aınma izlerinin e merkezliliğinin bozulmaması açısından numune yerinden sökülmemiştir. Her deneyin başlangıcında yüksek sıcaklık aparatını kontrol eden sıcaklık kontrol ünitesi çalıştırılarak açık atmosfer altında sıcaklığın istenen değere gelmesi beklenmiştir, sıcaklık bu değere ulaştıktan sonra pin-on-disk cihazı ile aynı anda bilgisayara yüklü yazılım başlatılarak yük sensöründen (load cell) gelen sürtünme kuvveti değerlerinin, yazılımın çalıştırılmasıyla otomatik olarak açılan ve deney süresi sonunda yazılımın durdurulmasıyla otomatik olarak masaüstüne gönderilen “log” dosyalarına kaydedilmeleri sağlanmıştır. Her deneyin sonunda diğer çaptaki deneye geçmeden, veya tüm çaplardaki deneyler bitmiş ise diğer numuneye geçmeden önce sıcaklık ayar kumandasına giderek güç kapatılarak numune ve hazne sıcaklığının oda sıcaklığına düşmesi beklenmiştir. Her bir deney sonunda WC bilyalar gevşetilip yuvası içinde döndürülerek başka bir ize denk gelmeyecek şekilde tekrar sabitlenmiştir, aınma izi olmayan yer kalmamıştır ve yeniden gerçekleştirilmiştir.

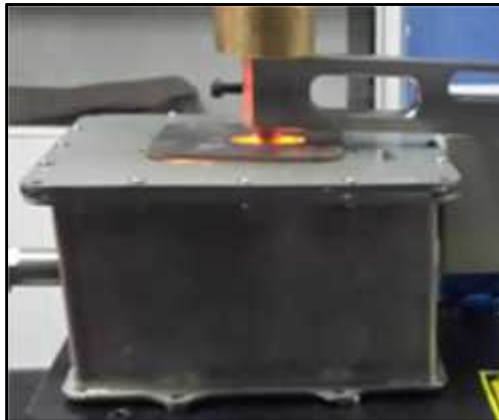
#### 5.5.4 Sürtünme kuvvetlerinin hesaplanması

Yüksek sıcaklık kuru kayma aınma testlerinin yapıldığı pin-on-disk cihazı kendisi için geliştirilen yazılım sayesinde ekil 71'de gösterilen yük sensörünün okuduğu gram cinsinden sürtünme kuvveti değerlerini saniye bazında bir log dosyasında toplama kabiliyetine sahiptir. Deneyler sonucunda elde edilen bu sürtünme kuvveti verilerinden Etkilik 1 yardımıyla anlık sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Burada cihazın ölçtüğü anlık sürtünme kuvvetinin Newton cinsinden değeri  $F_s$ 'yi, tertibat üzerine koyulan, ekil 72'de gösterilen normal yükün Newton cinsinden değeri  $F_n$ 'yi,  $k$  ise sürtünme katsayısını ifade etmektedir.

$$F_s = k F_n \quad (1)$$



ekil 71: Pin-on-disk cihazı üzerinde sürtünme kuvveti değerlerini ölçen yük sensörü (load cell).



ekil 72: 10 N'luk normal yük altında çalışırken yüksek sıcaklık hazneli pin-on-disk aınma cihazı.

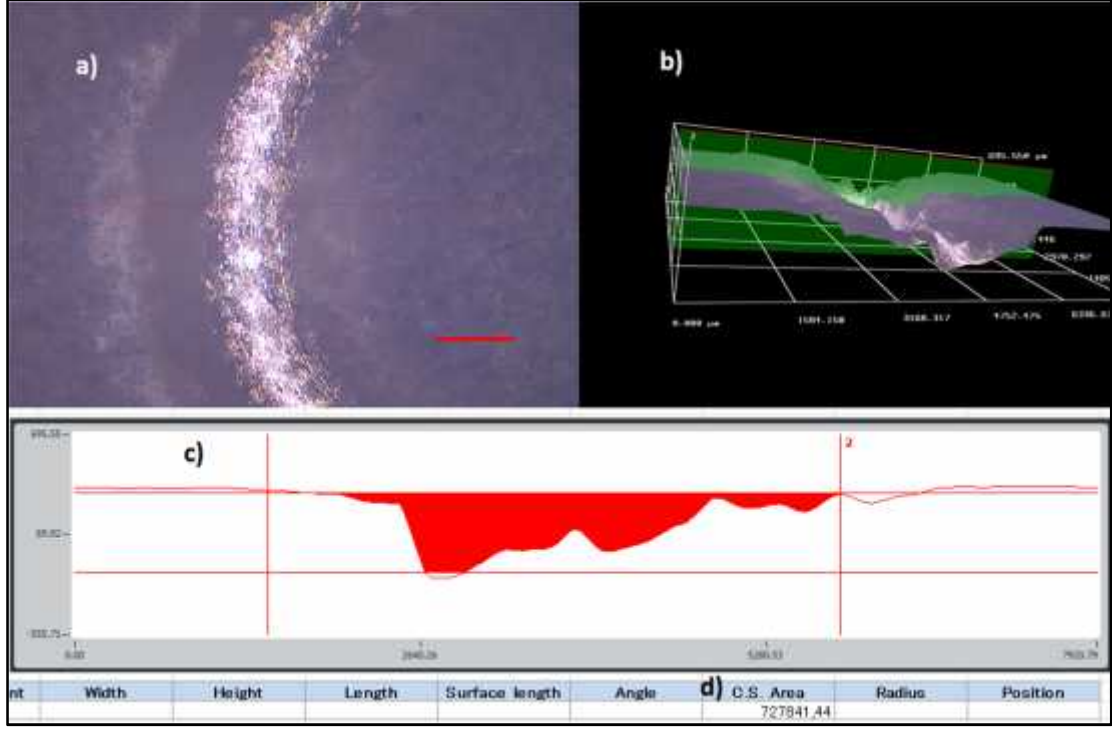
### 5.5.5 A ınma hacimlerinin hesaplanması

Yüksek sıcaklık hazneli pin-on-disk cihazında yüksek sıcaklık a ınma testlerine tabi tutulan TBC kaplı AISI 420 numuneler üzerinde olu an a ınma izleri Huvitz HDS-5800 3B optik profilometrede ( ekil 73) ölçülerek yüksek sıcaklık a ınma testinde kaybolan hacimler hesaplanmı tır.



ekil 73: A ınma hacimlerinin hesaplanmasında kullanılan 3B optik profilometre.

Huvitz HDS 5800 3B optik profilometre cihazındaki a ınma izi ölçümleri a ınma izinin tamamının görünmesi açısından en uygun büyütme olan 25x büyütmede gerçekleştirilmiştir. Bu büyütmede cihazın maksimum hassasiyet ayarı olan 500 adımlık hassasiyet ayarı kullanılarak, 2 boyutlu görüntü üzerinde ( ekil 74a) belirlenen alanın tamamen bulanıklıkla tı ı alt ve üst optik sınırlar arasında merce in dikey do rultuda hareket etmesi suretiyle, her adımda bir görüntü olmak üzere 500 adet görüntü çeken cihaz bu 2 boyutlu görüntüleri içerd i yazılım bünyesinde birleştirilmiştir ve a ınma yüzeyin 3 boyutlu topografisini çıkarmıştır ( ekil 74b).



ekil 74: Huvitz HDS 5800 3B optik profilometrenin kullanıcı arayüzü. a: a ınma izinin 2 boyutlu görüntüsü, b: a ınma izinin 3 boyutlu görüntüsü, c: a ınma izinin kesit görüntüsü, d: kesit düzlemi üzerinde a ınan kısmın cihaz tarafından ölçülen alanı ( $\mu\text{m}^2$ ).

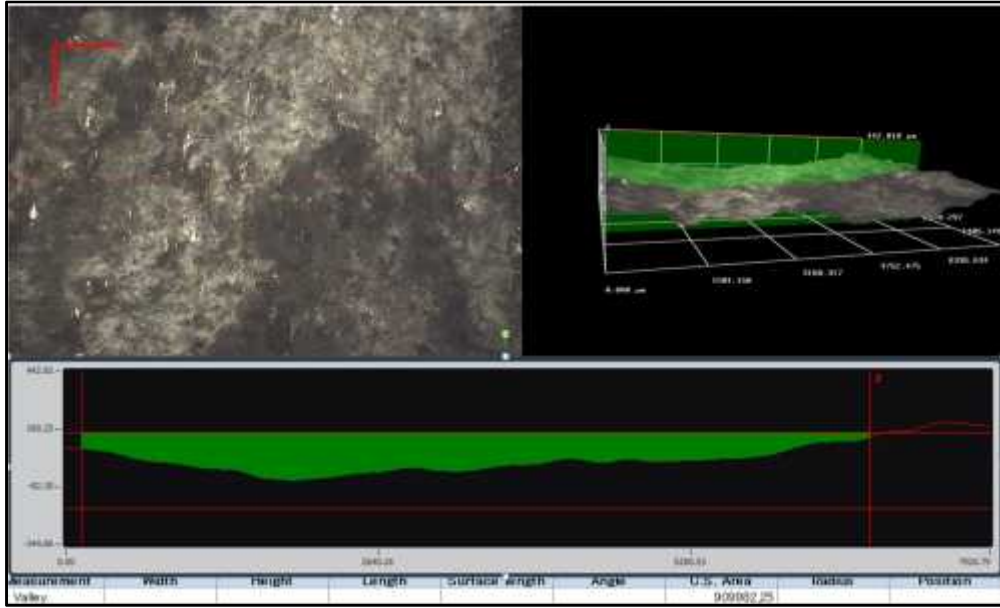
3 boyutlu profilometre görüntüsünde a ınma izine dik olacak şekilde belirlenen kesit düzlemi üzerinde a ınan kısmın ( ekil 74c'deki kırmızı bölge)  $\mu\text{m}^2$  cinsinden alanı cihaz tarafından ekil 74d' de gösterildi i gibi verilmi tir. Yüksek sıcaklık a ınma deneyine tabi tutulmu FeCr curuf kaplı numuneler üzerindeki her bir a ınma izi için bu i lem birbirine e it mesafedeki 4 farklı noktada tekrarlanmı , bu ölçümlerin ortalaması alınarak ortalama a ınma alanı bulunmu tur. Daha sonra her a ınma izi için ölçülen ortalama a ınma alanları a ınma izlerinin çaplarıyla çarpılarak ortalama a ınma hacimleri hesaplanmı tur.

## BÖLÜM 6

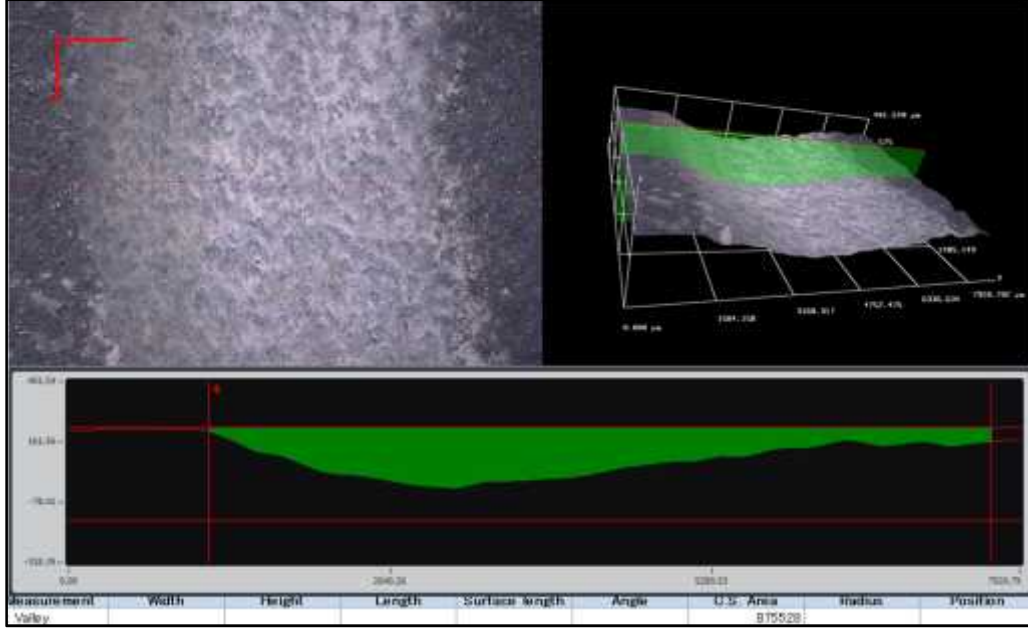
### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTI MA

#### 6.1 200 °C'de Yapılan Yüksek Sıcaklık Kuru Kayma Adezyon (A ınma) Test Sonuçları

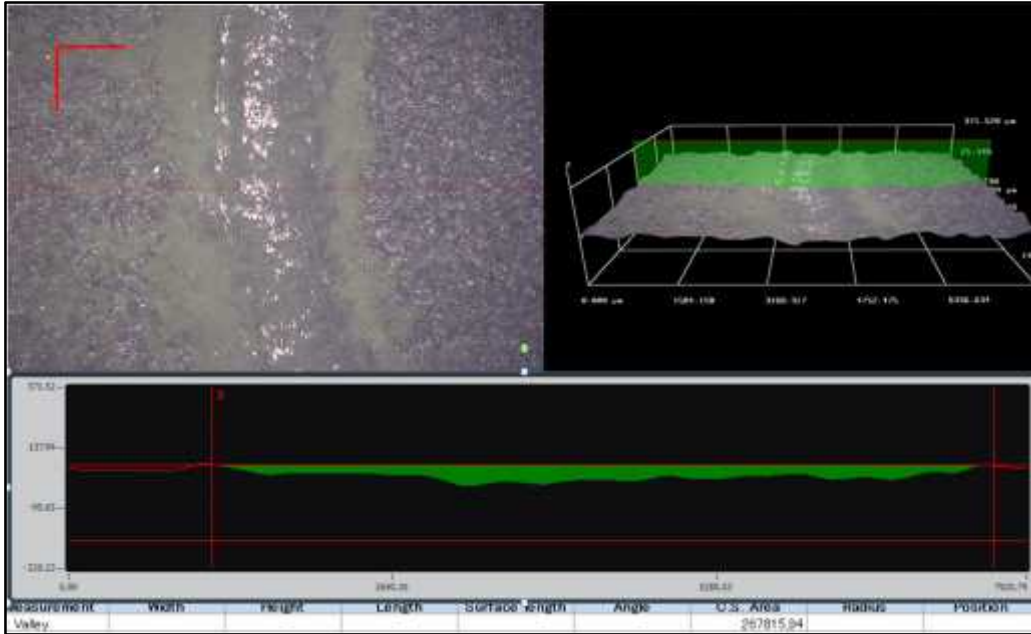
APS kaplama yöntemi ile AISI 420 altlık üzerine biriktirilen FeCr curuf, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 130SF) ve Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 6156) kaplamaların 200 °C'de 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızı ile gerçekleştirilen yüksek sıcaklık a ınma testi sonucunda elde edilen a ınma izlerinin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri ile a ınma alanının  $\mu\text{m}^2$  cinsinden de erleri ekiller 75-77'de sırasıyla verilmiştir.



ekil 75: 200 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında FeCr curuf kaplamasının a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.



ekil 76: 200 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 130SF) ticari seramik kaplamanın a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.



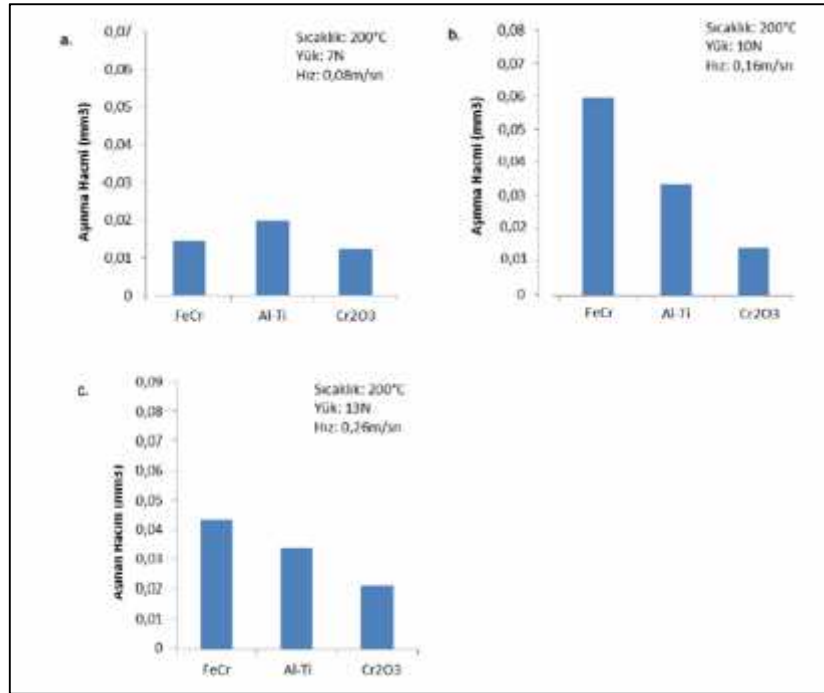
ekil 77: 200 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 6156) ticari seramik kaplamanın a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.

ekil 78’de numunelere 200 °C sıcaklıkta farklı çevresel hız (0.08, 0.16, 0.26 m/sn) ve farklı (7, 10 ve 13 N) yükler altında uygulanan kuru-kayma deneyleri sonucunda elde edilen hacim kaybı de erleri verilmi tir. ekiller 75-78’e bakıldı ında tüm deney artlarında numuneler içerisinde en az a ınmanın Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplı numunede oldu u görülürken



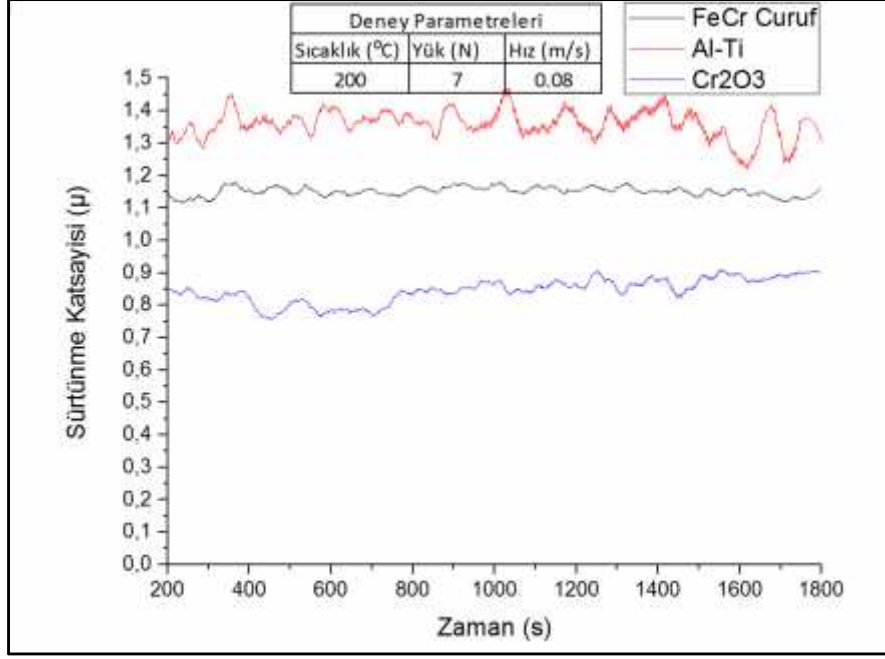
bunu sırasıyla  $Al_2O_3$  (%13  $TiO_2$ ) ve FeCr curuf kaplı numuneler takip etmi tir.  $Cr_2O_3$  kaplı numunenin yüksek aınma direncini sahip oldu u dü ük sürtünme katsayısı de eri ile açıklamak mümkündür ( ekil 79).

ekiller 78 ve 79 incelendi inde  $Al_2O_3$  (%13  $TiO_2$ ) kaplamanın aınma hacmi FeCr curuf kaplamadan dü ük oldu u halde sürtünme katsayısının daha yüksek oldu u görülmektedir. FeCr curuf kaplamanın Al-Ti (alumina-titany -  $Al_2O_3$  (%13  $TiO_2$ )) kaplamaya göre daha dü ük sürtünme katsayısına sahip olması, bu seramik kaplamada katı ya layıcı gibi etki göstererek sürtünme kuvvetlerini azaltan oksit tabakaları olu ma oranının daha yüksek olmasına ba lanabilir. Yüksek sıcaklıklarda aındırılan seramik kaplı numunelerin yüzeyinde meydana gelen ve ya layıcı etki gösteren bu oksit fazına Magnéli fazıda denmektedir. Bu fazın olu masında olası elementler W, Mo, Ti ve V olarak verilmektedir (Fischer ve Tomizawa, 1985; Woydt ve Habig, 1989; Skopp vd., 1995; Cox ve Gee, 1997; Metselaar vd., 2001; Kato ve Adachi, 2002).



ekil 78: 200 °C sıcaklıkta farklı çevresel hız (0.08, 0.16, 0.26 m/sn) ve farklı (7, 10 ve 13 N) yükler altında uygulanan kuru-kayma deneyleri sonucunda elde edilen hacim kaybı de erleri.



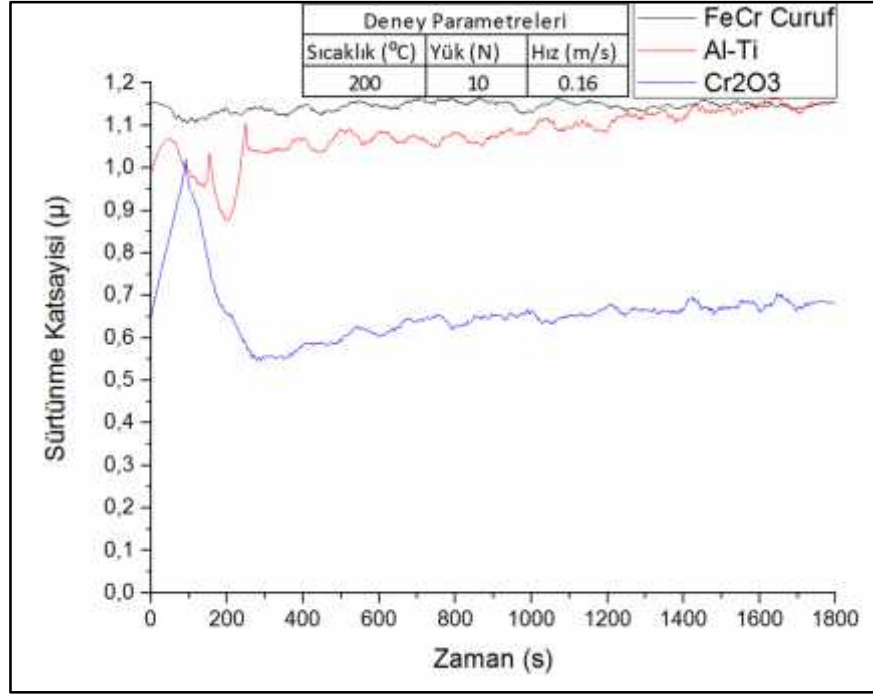


ekil 79: 200 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında FeCr curuf, Al-Ti ve Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaların sürtünme katsayısı-zaman grafi i.

200°C de kuru-kayma i lemine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısı de i imini gösteren grafik ekil 79'da verilmi tir. Grafikten de görüldü ü gibi Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> di er numuneler ile kıyaslandı nda en dü ük sürtünme katsayısı de erine sahiptir. Sürtünme katsayısının dü üklü ü öncelikle numunenin hacimsel sertli i ile ili kilendirilebilir. Çünkü numuneler üzerinden alınan hacim sertlik de erleri incelenecek olursa en yüksek sertlik de eri Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplı numunede elde edilmi tir. Yüksek sertlik dü ük plastik deformasyona sebep olaca ndan a ndırıcı WC bilya ile malzeme arasındaki etkile im yüzey alanı dü ük kalarak deformasyon etkisi azalacaktır. Bu durum ise dü ük sürtünme katsayısına sebep oldu undan numunenin a nma oranı dü ük olacaktır.

ekiller 78 ve 79 birlikte incelendi inde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>) kaplamanın a nma hacmi FeCr curuf kaplamadan dü ük oldu u halde sürtünme katsayısının daha yüksek oldu u görülmektedir. FeCr curuf kaplamanın Al-Ti (alumina-titanya - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13 TiO<sub>2</sub>)) kaplamaya göre daha dü ük sürtünme katsayısına sahip olması, bu seramik kaplamada katı ya layıcı gibi etki göstererek sürtünme kuvvetlerini azaltan oksit tabakaları olu ma oranının daha yüksek olmasına ba lanabilir. Yüksek sıcaklıklarda a ndırılan seramik kaplı numunelerin yüzeyinde meydana gelen ve ya layıcı etki gösteren bu oksit fazına Magnéli fazı da denmektedir. Bu fazın olu masında olası elementler W, Mo, Ti ve V olarak

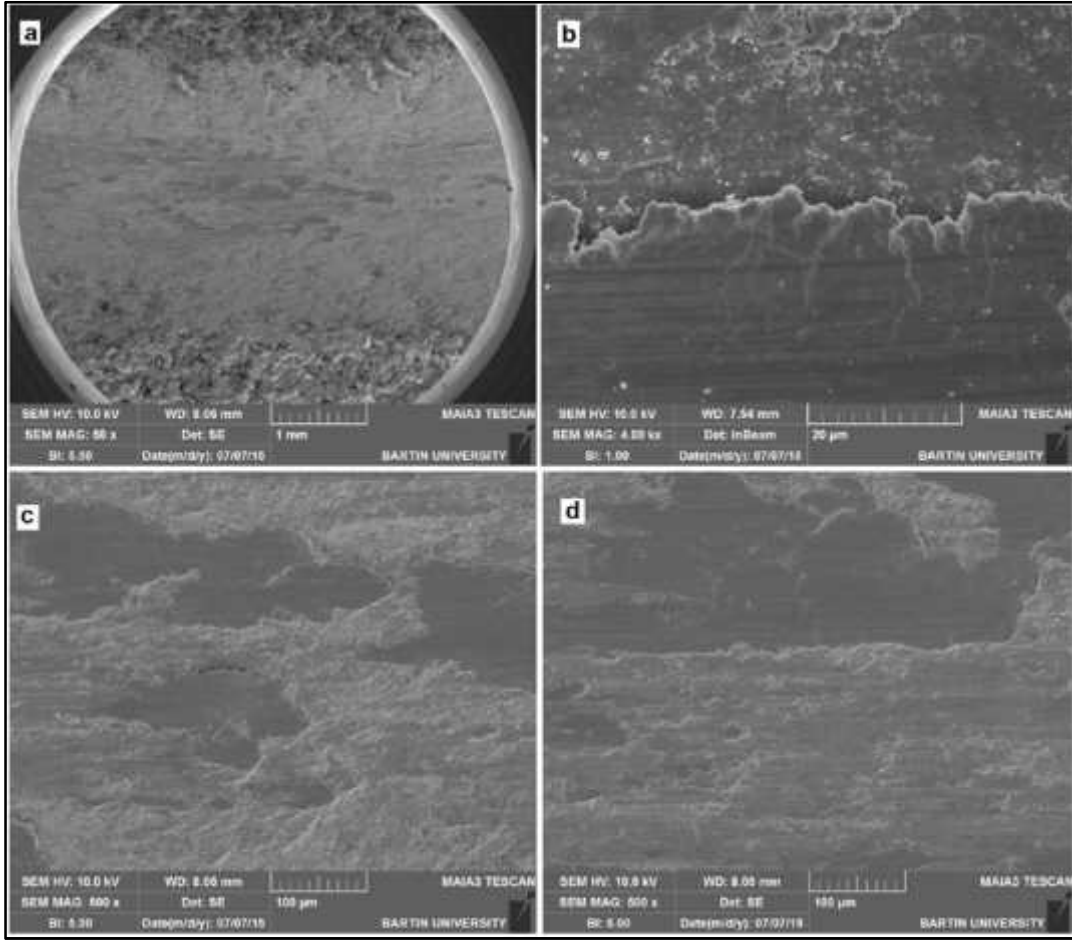
verilmektedir (Fischer ve Tomizawa, 1985; Woydt ve Habig, 1989; Skopp vd., 1995; Cox ve Gee, 1997; Metselaar vd., 2001; Kato ve Adachi, 2002).  $Al_2O_3+13TiO_2$  ticari kaplamasının sertli inin ve sürtünme katsayısı de erinin cüruf kaplı numunelerden yüksek olmasının di er bir sebebi ise FeCr kaplı numunelerin yüzeyinde olu an ve katı ya layıcı etkisi gösteren ‘glazed layer’ adı verilen katmanın yüzeyde daha kararlı bir ekilde olu masıdır (Stott vd., 1973; Inman vd., 2003; Inman vd., 2005; Wood vd., 2011).



ekil 80: 200 °C sıcaklık 10 N yük ve 0,16 m/s kayma hızında FeCr curuf, Al-Ti ve  $Cr_2O_3$  kaplamaların sürtünme katsayısı-zaman grafi i.

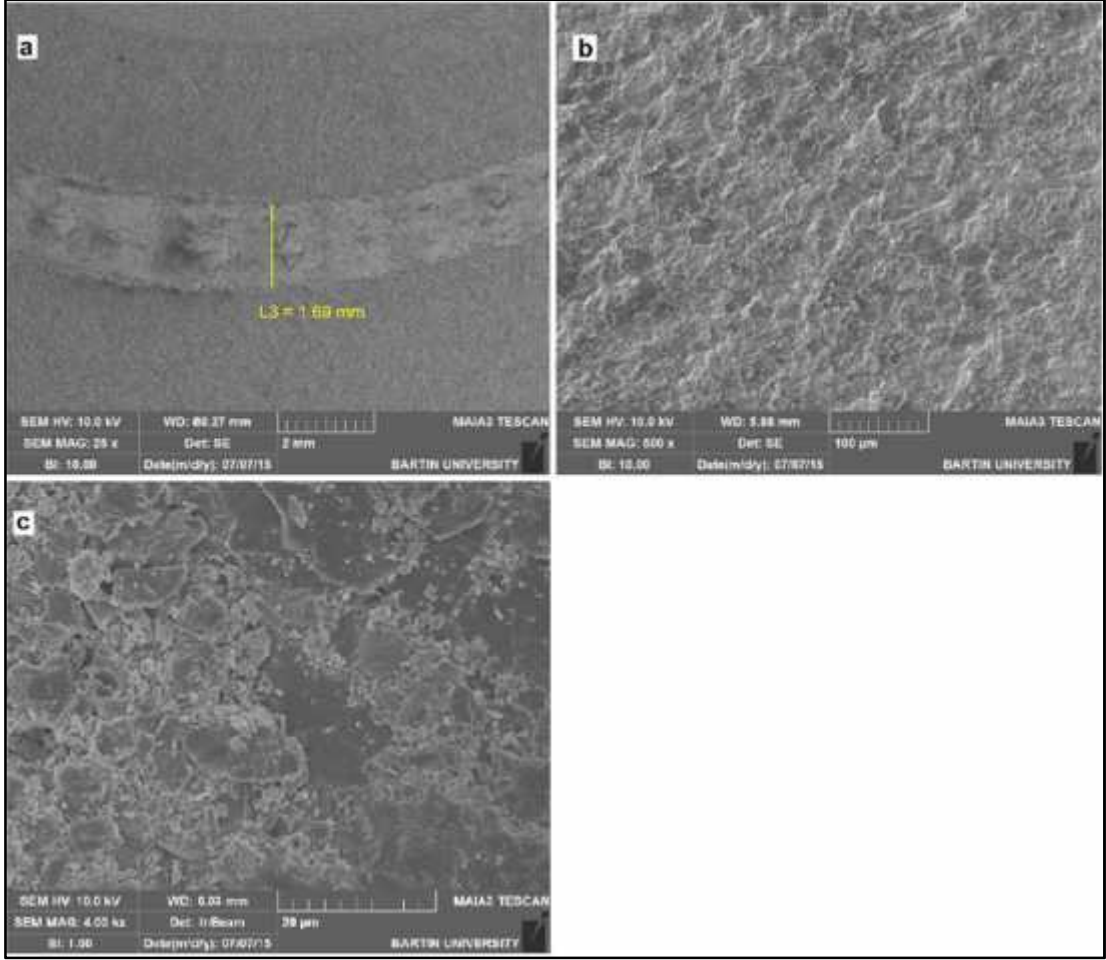
Aynı sıcaklık de erinde (200 °C) 10 N luk yük altında 0.16m/sn lik kayma hızında gerçekte tirilen kuru-kayma testlerinde elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri ekil 80’de verilmi tir. Bir önceki grafi e benzer bir etki görüldü ü söylenebilir. Sadece grafikte FeCr curuf ve Al-Ti kaplı numunelerin sürtünme katsayılarının de i im gösterdi i görülmektedir. 200 °C de 13 N luk yük ve 0.26 m/sn kayma hızında kuru-kayma deneyine tabi tutulan  $Cr_2O_3$  kaplı numuneye ait farklı büyötmelerde SEM a nınma yüzey mikro rafları ekil 81 a-d de sırası ile verilmi tir. ekil 81a’da a ndırıcı bilyanın a ndırılan malzeme üzerindeki a nınma izi yolunu göstermektedir. Yine bu görünüü içerisinde azda olsa küçük siyah adacıklar (bölgeler) görülmektedir. Literatürde ‘glazed layer’ olarak tanımlanan bu tabakaya sır tabakası da denebilir (Rynio vd., 2014). ekil 81c-d de ise bu sır tabakası 500x büyötmeli bir görünüü içerisinde verilmi tir. ekil 81b ise sır

tabakası ile sır tabakası henüz oluşmayan veya kırılmış bölgenin ara kesitini göstermektedir.



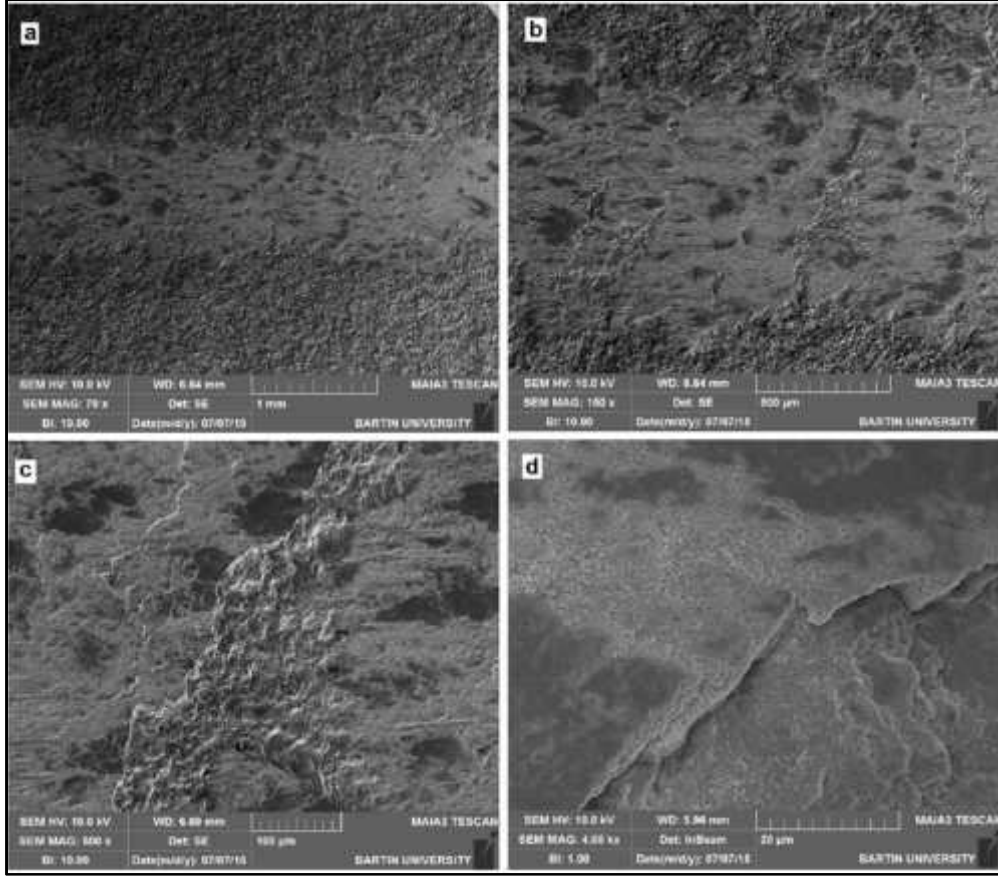
ekil 81: 13 N yük ve 0.26 m/sn kayma hızında indirilen Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplı numuneden alınan SEM yüzey görüntüleri.

200 °C de 13 N luk yük ve 0.26 m/sn kayma hızında kuru-kayma deneyine tabi tutulan Al-Ti kaplı numuneye ait farklı büyütmelerde SEM aınma yüzey mikro rafları ekil 82 a-c'de sırası ile verilmiştir. ekil 82a aındırıcı bilyanın aındırılan malzeme üzerindeki aınma izi yolunu göstermektedir. ekil 81'de olduğu gibi aınma yolu üzerinde 'glazed layer' sır tabakası açıkça görülememektedir ( ekil 82b). ekil 82c incelenecek olursa numunenin yorulmaya başlı olarak mikro çatlaklar oluşumu ile sert kırılmaya maruz kaldığı anlaşılmaktadır.



ekil 82: 13 N yük ve 0.26 m/sn kayma hızında a ındırılan Al-Ti kaplı numuneden alınmış SEM yüzey görüntüleri.

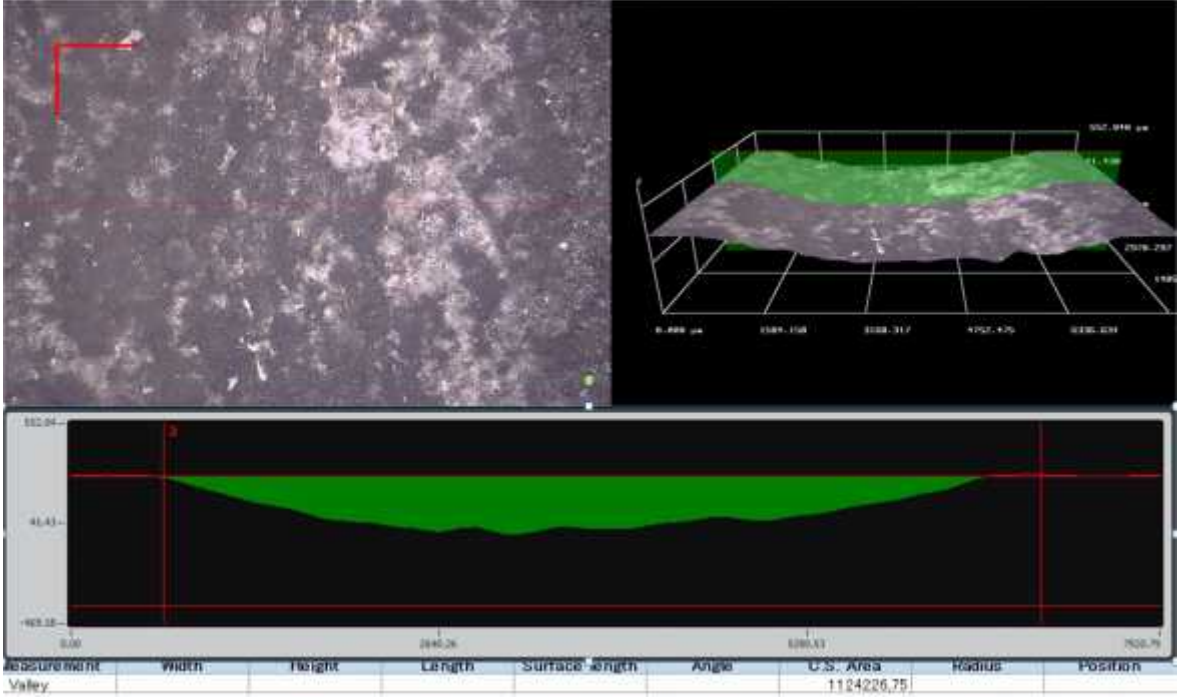
ekil 83'de aynı artlarda a ınma deneyine tabi tutulan FeCr curuf kaplı numunenin SEM a ınma yüzey mikro rafları verilmiştir. Özellikle ekil 83c'de numune üzerindeki sır tabakasının olumu açık bir ekilde görülmektedir. ekil 83d'de ise kırılğan bir ekilde dökülen yüzeyin altındaki yeni yüzey yapısı görülmektedir.



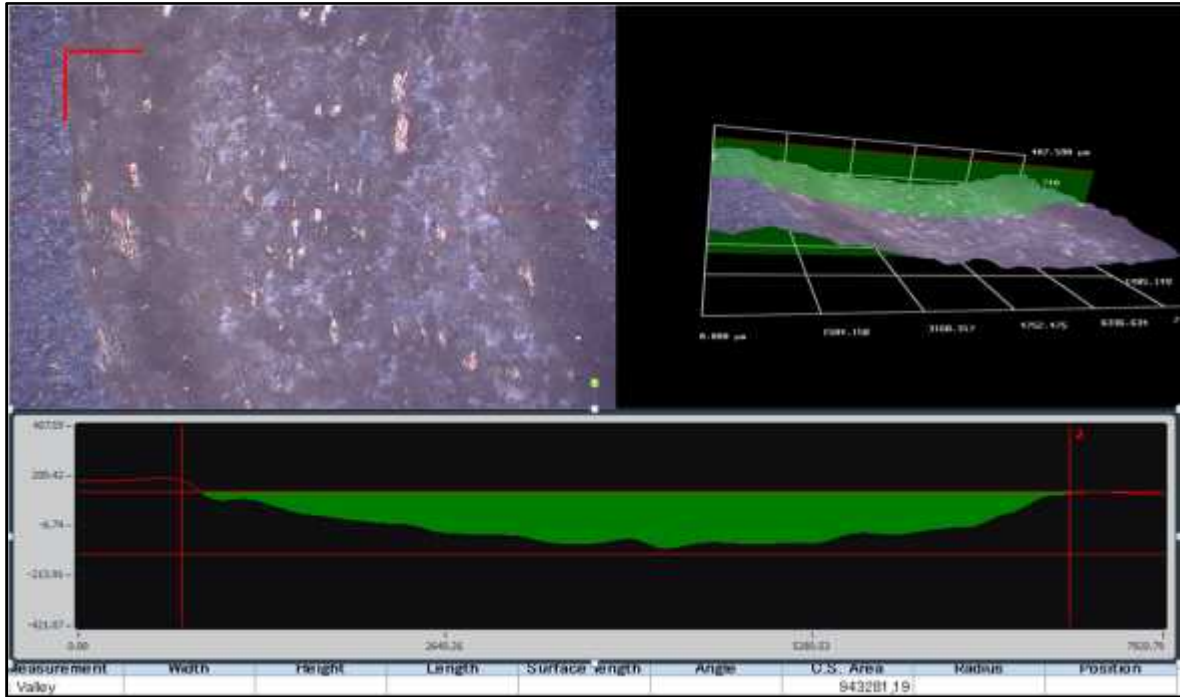
ekil 83: 13 N yük ve 0.26 m/sn kayma hızında a ındırılan Fe-Cr kaplı numuneden alınmış SEM yüzey görüntüleri.

## 6.2 400 °C'de Yapılan Yüksek Sıcaklık Kuru Kayma Adezyon (A nma) Testi Sonuçları

APS kaplama yöntemi ile AISI 420 altlık üzerine biriktirilen FeCr curuf, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 130SF) ve Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 6156) kaplamaların 400 °C'de 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızı ile gerçekleştirilen yüksek sıcaklık aşınma testi sonucunda elde edilen aşınma izlerinin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri ile aşınma alanının µm<sup>2</sup> cinsinden değerleri şekiller 84-86'da sırasıyla verilmiştir. Şekil 87a-c'de ise 400 °C'de numunelere farklı çevresel hız (0.08, 0.16, 0.26 m/sn) ve farklı (7, 10 ve 13 N) yükler altında uygulanan kuru-kayma deneyleri sonucunda elde edilen hacim kaybı değerleri verilmiştir. Şekiller 84-87'ye bakıldığında bir önceki deney şartlarında olduğu gibi (200 °C) tüm deney şartlarında numuneler içerisinde en iyi aşınma Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplı numunede görülürken bunu 4 nolu numune takip etmiştir.

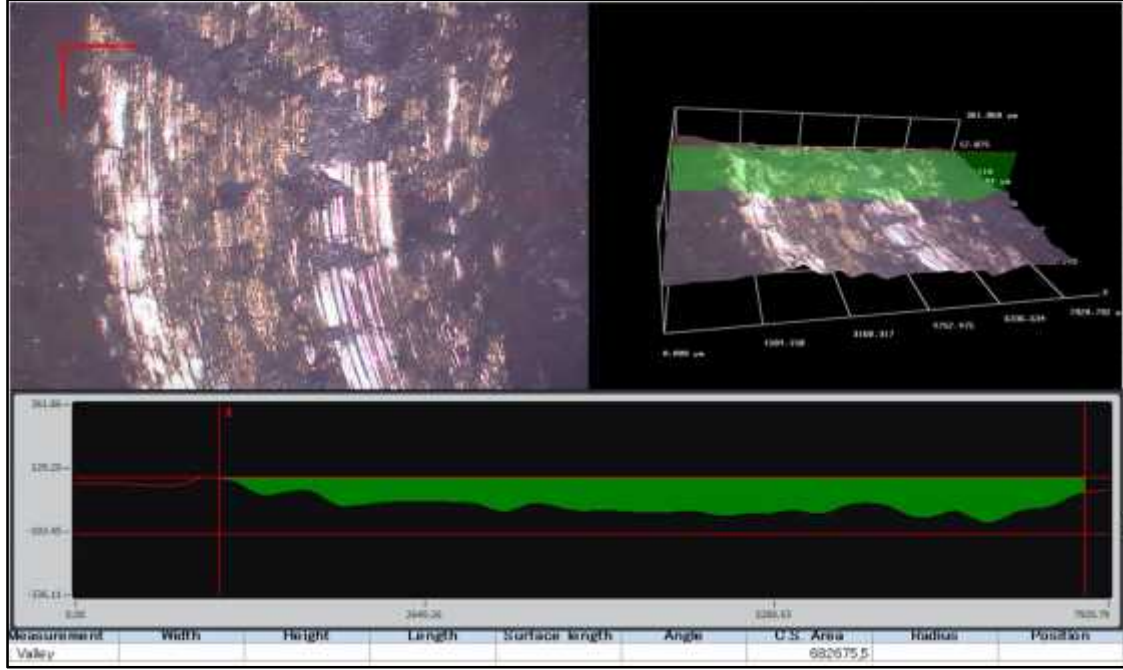


ekil 84: 400 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında FeCr Curuf kaplamının a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.

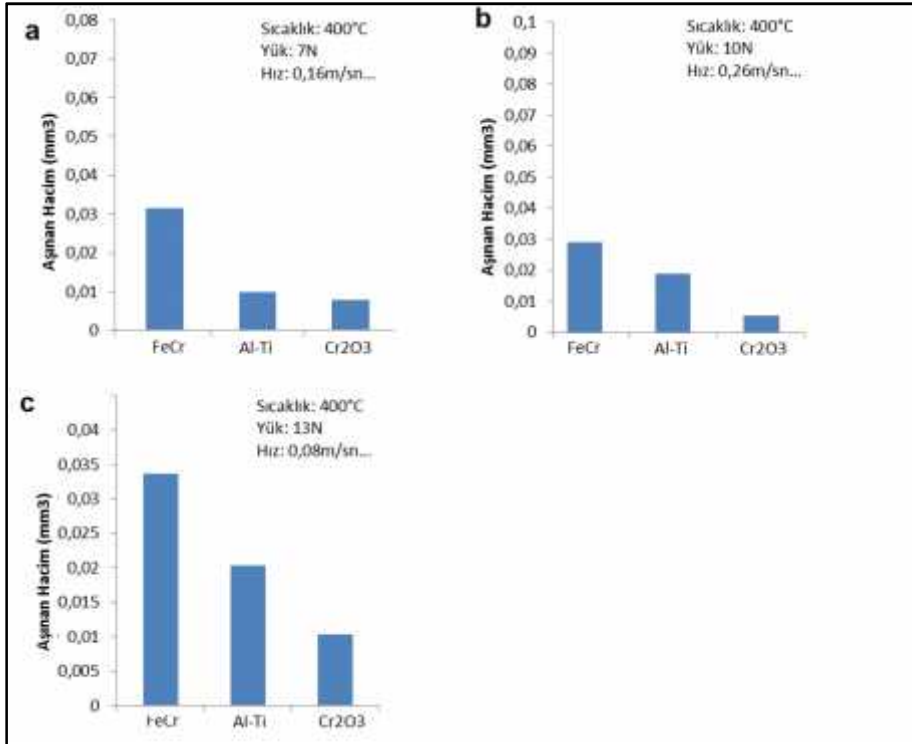


ekil 85: 400 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Al-Ti (Metco 130SF) ticari seramik kaplamının a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.



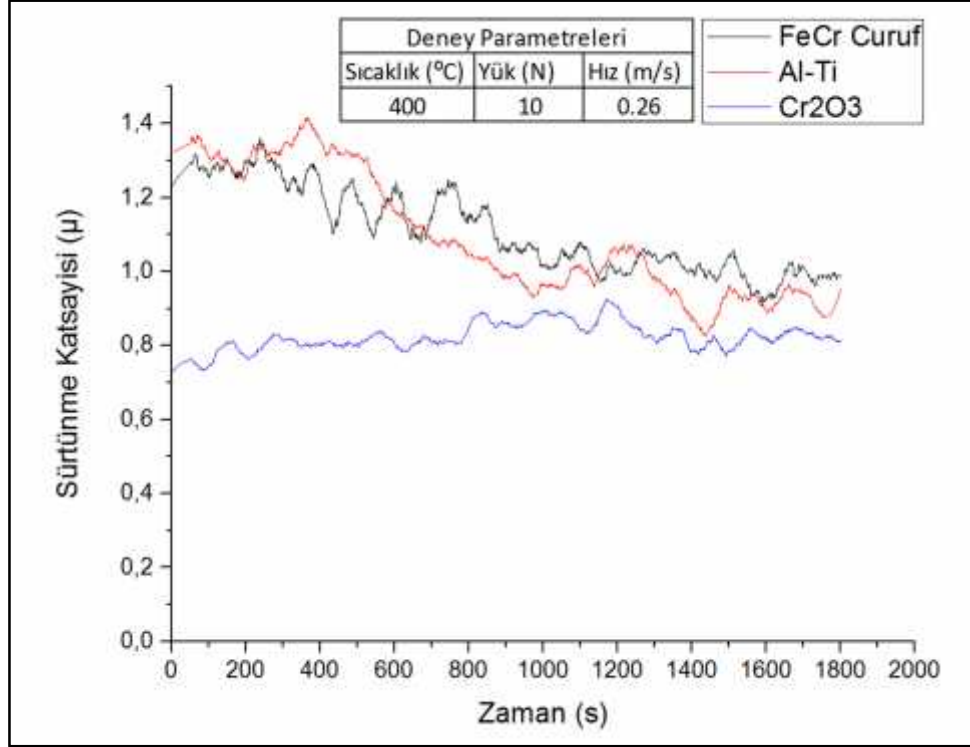


ekil 86: 400 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 6156) ticari seramik kaplamanın aınma izinin 3B profilometre sonuçları.



ekil 87: 400 °C sıcaklıkta farklı çevresel hız (0.08, 0.16, 0.26 m/sn) ve farklı (7, 10 ve 13 N) yükler altında uygulanan kuru-kayma deneyleri sonucunda elde edilen hacim kaybı değerleri.

200 °C de gerçekle tirilen deneyler ile 400 °C de gerçekle tirilen deney sonuçları kar ıla tırılacak olursa artan sıcaklık ile birlikte numunelerin kütle kayıplarında azalma oldu u görülmektedir.



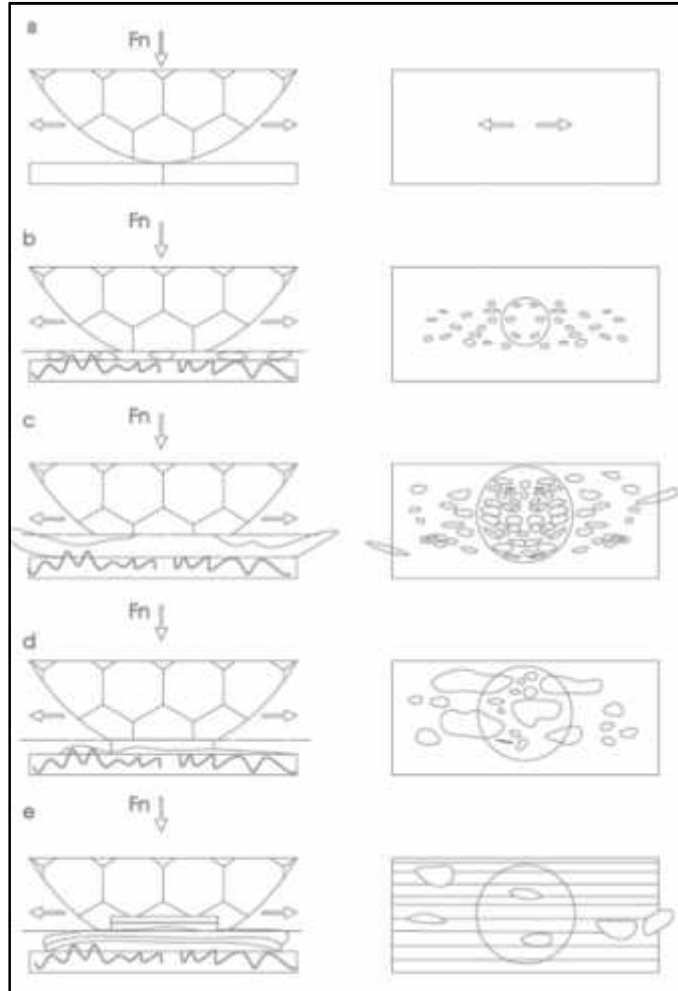
ekil 88: 400 °C sıcaklık 10 N yük ve 0,26 m/s kayma hızında FeCr curuf, Al-Ti ve Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaların sürtünme katsayısı-zaman grafi i.

400°C de kuru-kayma i lemine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısı de i imini gösteren grafik ekil 88’de verilmi tir. Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplı numune grafikte stabil bir durum gösterirken di er numunelerde belli bir zaman aralı ından sonra sürtünme katsayısı de erleri d mektedir. Bunun sebebi artan yük ve çevresel hız ile birlikte temas bölgesinde olu an sürtünme ısısının artması, böylece artan plastik deformasyon kaynaklı pekle medeki ykseli in etkisiyle temas yüzeyinde yo un bir tribolojik katmanın olu masıdır. Bunun neticesinde de adeziv etki azalarak sürtünme kuvvetinde d ü e yol açmaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda malzemelerin kuru-kayma a nması alanında çalı ma yapan birçok ara tırmacı ise sürtünme katsayısı d ü ünü u ekilde ortaya koymu tur (Peterson vd., 1959; Peterson vd., 1994; Inman vd., 2003; Inman vd., 2005; Wood vd., 2011). A ındırma i leminin ba lamasıyla oksitlenerek yüzeyden kopan a nma partiküllerinin oranı belli bir de ere ula ınca bu oksitlenmi partiküller numune yüzeyinde sır tabakasını olu turmaya



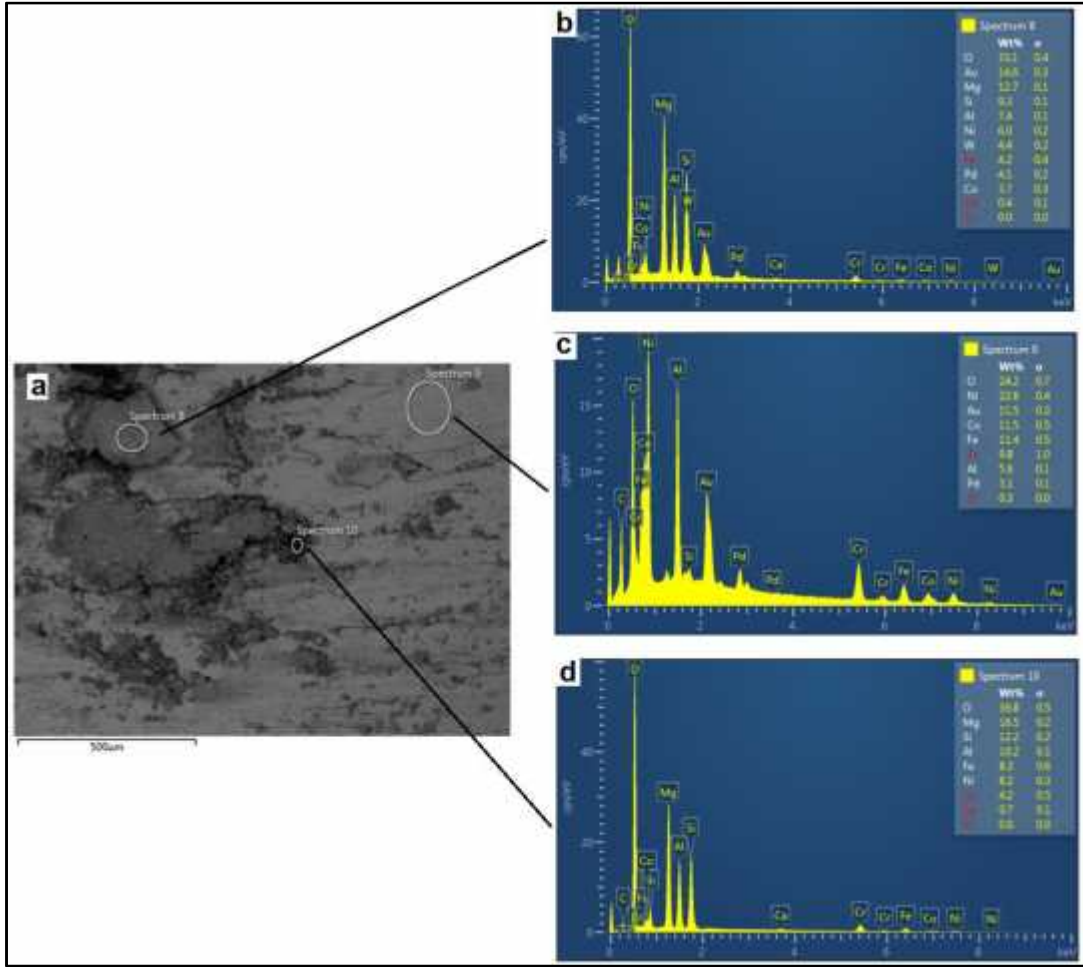
ba lamaktadır. Bu olu um mikron seviyesinde kırılarak yüzeyde toplanan a ınma partiküllerinin tekrar eden yük ve nominal baskıların altında bir sinterleme reaksiyonuna maruz kalmasıyla meydana gelmektedir. A ınma yüzeyinde meydana gelen bu sır tabakası yüksek sıcaklıklarda katı ya layıcı etkisi olu turmaktadır. Katı ya layıcı etkisi ise numunenin a ınmasında önemli etkiye sahip olan kesme kuvvetlerinin azalmasında önemli bir etki olu turmaktadır. Bu durumu görsel olarak anlatan sunum a a ıda verilmi tir (Inman vd., 2006; Wood vd., 2010; Rynio vd., 2014).



ekil 89: Yüksek sıcaklıklarda a ınmanın ematik gösterimi (Rynio vd., 2014).

ekil 89a'da a ındırıcı top ve numune arasındaki ilk temas gösterilmektedir. Burada ba langıç etkile imi küçük temas noktalarında (pürüzler üzerinde) yüksek temas basınçları meydana getirecektir. Etkile imli çiftler arasında ba ıl hareketin ba laması ile temas yüzeylerinde olu an basma ve kayma kuvvetleri etkisiyle sert ve gevrek yapıya sahip pürüzler kırılmaya ba lamaktadır ( ekil 89b).

Kırılan bu pürüzlerin bir kısmı aınma atığı olarak sistemden uzaklaştırılırken bir kısmı ise işlem parametrelerine (yük, sıcaklık, kayma hızı) bağlı olarak numune yüzeyine basma kuvvetlerinin etkisiyle gömülmektedir (ekil 89c, ekil 90a ve d). Benzer durum WC bilyadan kopan atık partiküllerin yüzey üzerinde biriktiğini gösteren aınma yüzey SEM ve EDS analiz görüntülerince de desteklenmektedir (ekil 90b).



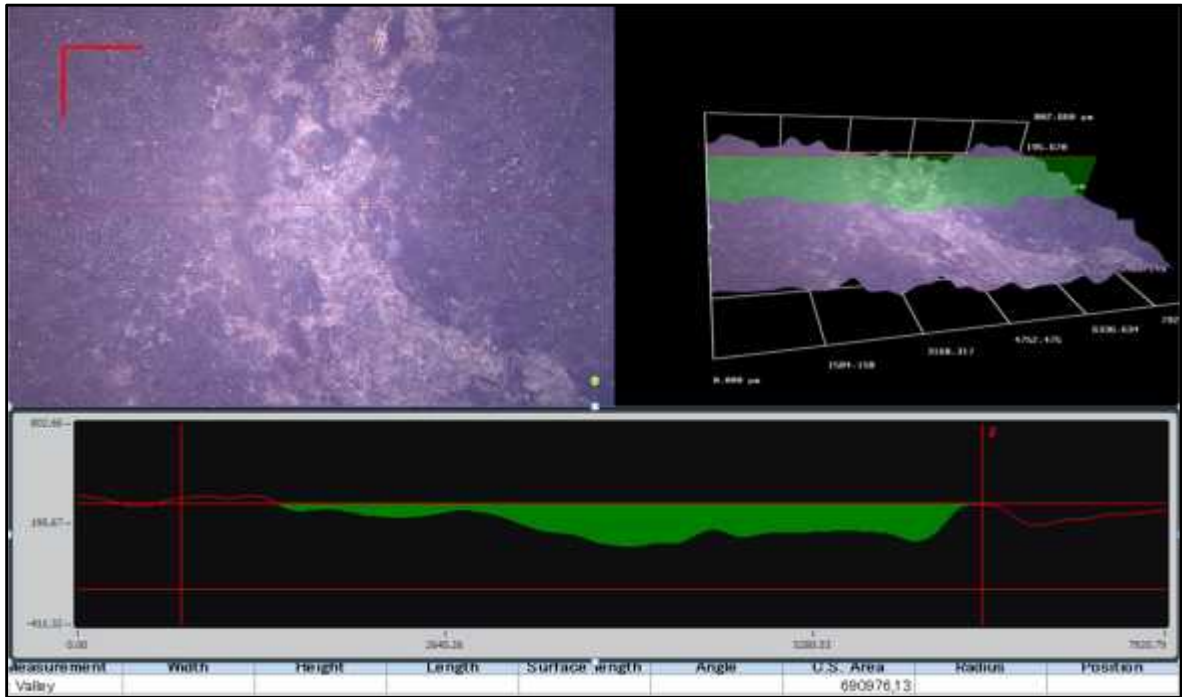
ekil 90: FeCr cüruf kaplama üzerinde yüksek sıcaklıkta aınma sonrası biriken kaplama, oksit ve aındırıcı kalıntıları.

Tekrarlı basma kuvvetlerinin etkisiyle plastik deformasyona uğrayan bu aınma atıkları tribolojik katman veya sır tabakası olarak numune yüzeyine katkı sağlamaktadır. Katı yağlayıcı görevi gören bu katmanlar sürtünme kuvvetini ve dolayısıyla kesme kuvvetini azaltarak toplam aınma yüzdesini düşürmeye yardımcı olmaktadır. Numune yüzeyinde oluşan sır tabakasının zamanla dökülerek sistemden atılmasını iki şekilde açıklamak mümkündür. Birincisi tekrarlı basma ve kayma yükleri ile aınma çiftleri temas yüzeyinde sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle zamanla artan sıcaklığın etkisiyle aındırıcı top ile sır tabakası

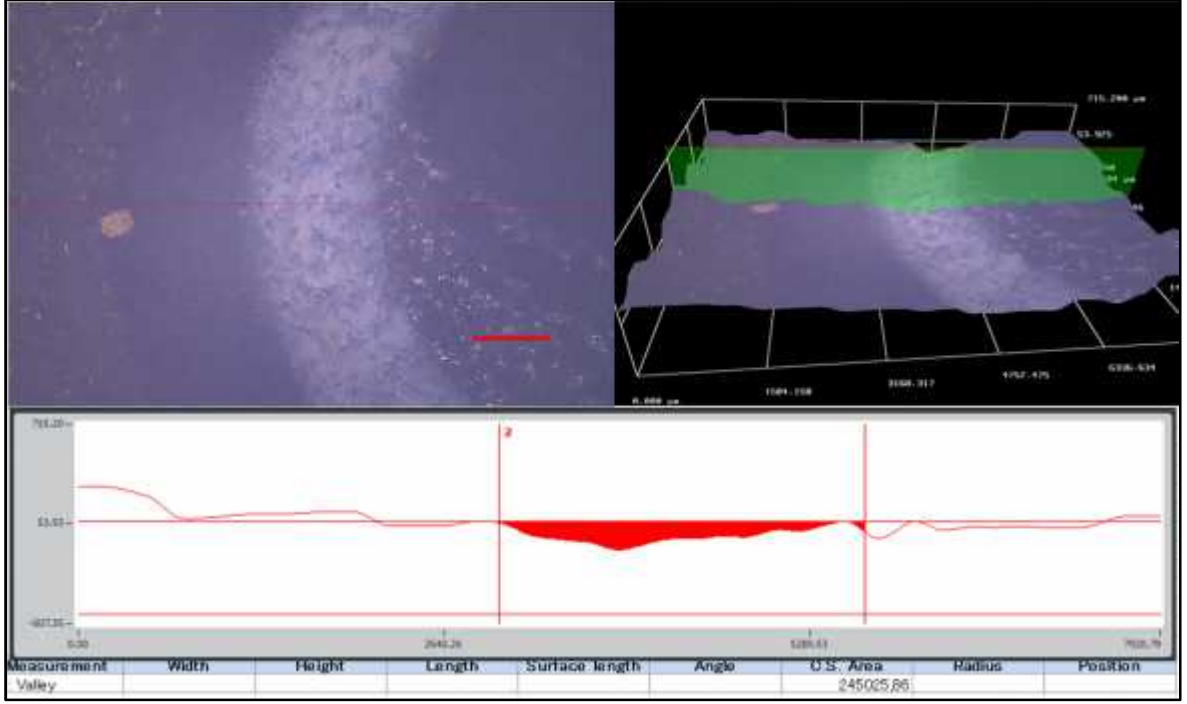
arasındaki adezyonun artımı ve numune yüzeyinden bölgesel kopmalara yol açmıştır. İkinci ise tekrarlı basma-kayma gerilmelerinin numune üst yüzeyine yakın paralel alt kesitinde yorulma etkisiyle splatlar arasında çatlak çekirdeklenmesi olacaktır. İtem parametrelerine bağlı olarak belirtilen çatlak ilerlemesi yüzeye yakın alt paralel düzlemden bir süre sonra kayma düzlemlerinin yönünde i tirip yüzeye ulaşmasıyla yerel tabaka ayrılmasına neden olacaktır ( ekil 89d). Bu tabaka ayrılmaları zamanla temas izi alanına yayılmaktadır ( ekil 89e).

### 6.3 600 °C'de Yapılan Yüksek Sıcaklık Kuru Kayma Adezyon (A ınma) Testi Sonuçları

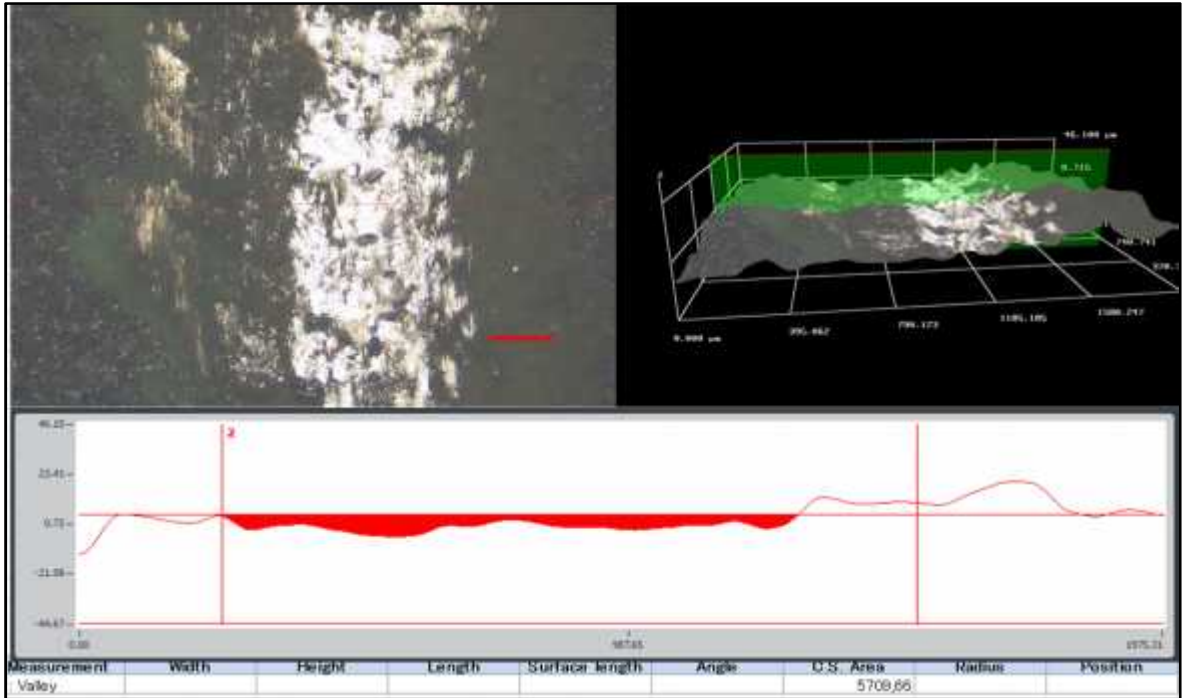
APS kaplama yöntemi ile AISI 420 altlık üzerine biriktirilen FeCr curuf, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 130SF) ve Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 6156) kaplamaların 400 °C'de 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızı ile gerçekleştirilen yüksek sıcaklık a ınma testi sonucunda elde edilen a ınma izlerinin 2 ve 3 boyutlu görüntüleri ile a ınan alanın µm<sup>2</sup> cinsinden değerleri ekiller 91-93'te sırasıyla verilmiştir.



ekil 91: 400 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında FeCr curuf kaplamanın a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.



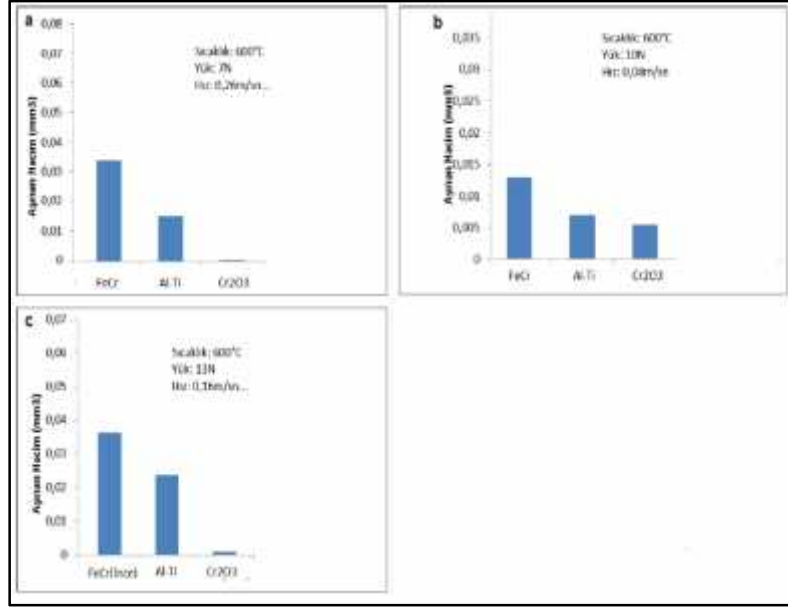
ekil 92: 600 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%13-TiO<sub>2</sub>) (Metco 130SF) ticari seramik kaplamanın a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.



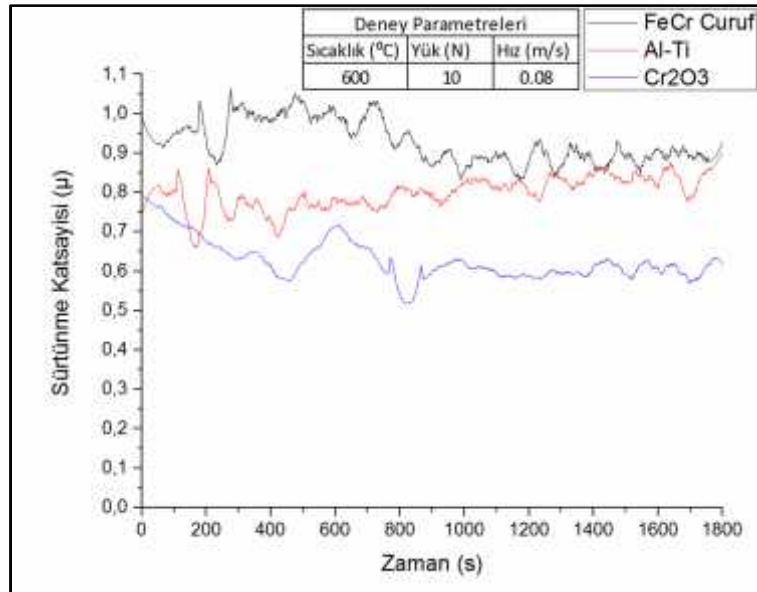
ekil 93: 600 °C sıcaklık 7 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Metco 6156) ticari seramik kaplamanın a ınma izinin 3B profilometre sonuçları.

ekiller 91-93'e bakıldı ında bu sıcaklık de erinde de a ınma hacim kayıplarındaki sıralamanın de i medi i ve di er sıcaklıklarla aynı oldu u görülmektedir. ekil 94 a-c'de

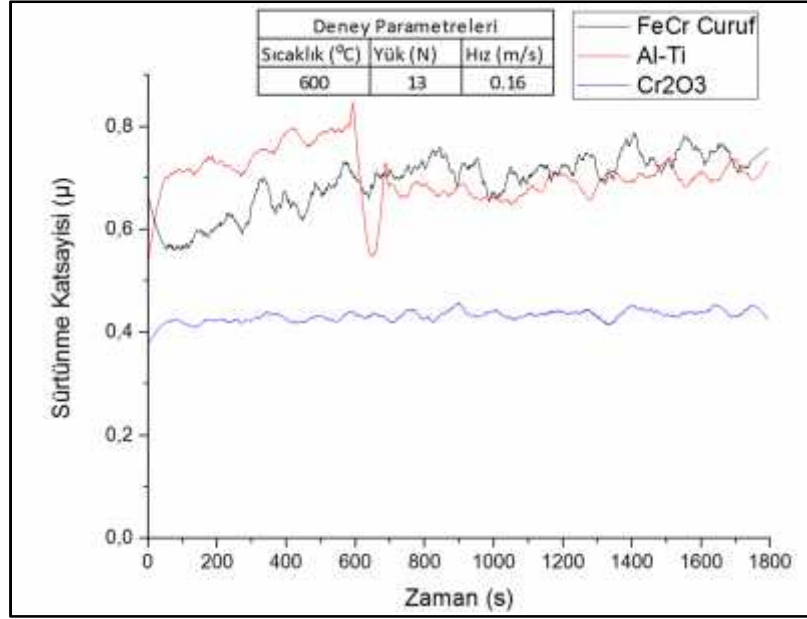
600 °C sıcaklıkta ve sırasıyla 7N, 10N, 13N yüklerde 0.08 m/sn, 0.16 m/sn ve 0.26 m/sn kayma hızlarında gerçekleştirilen testlere ait hacimsel aşınma kaybı grafikleri de bu şekilde sunulmaktadır. 600 °C sıcaklık, 10 N ve 13 N yükler 0.08 ve 0.16 m/sn kayma hızlarında kaplamaların sürtünme katsayıları sırasıyla ekil 95 ve ekil 96’da verilmiştir. Bu grafiklerde de en düşük ve stabil sürtünme katsayısı Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplı numunelere aittir.



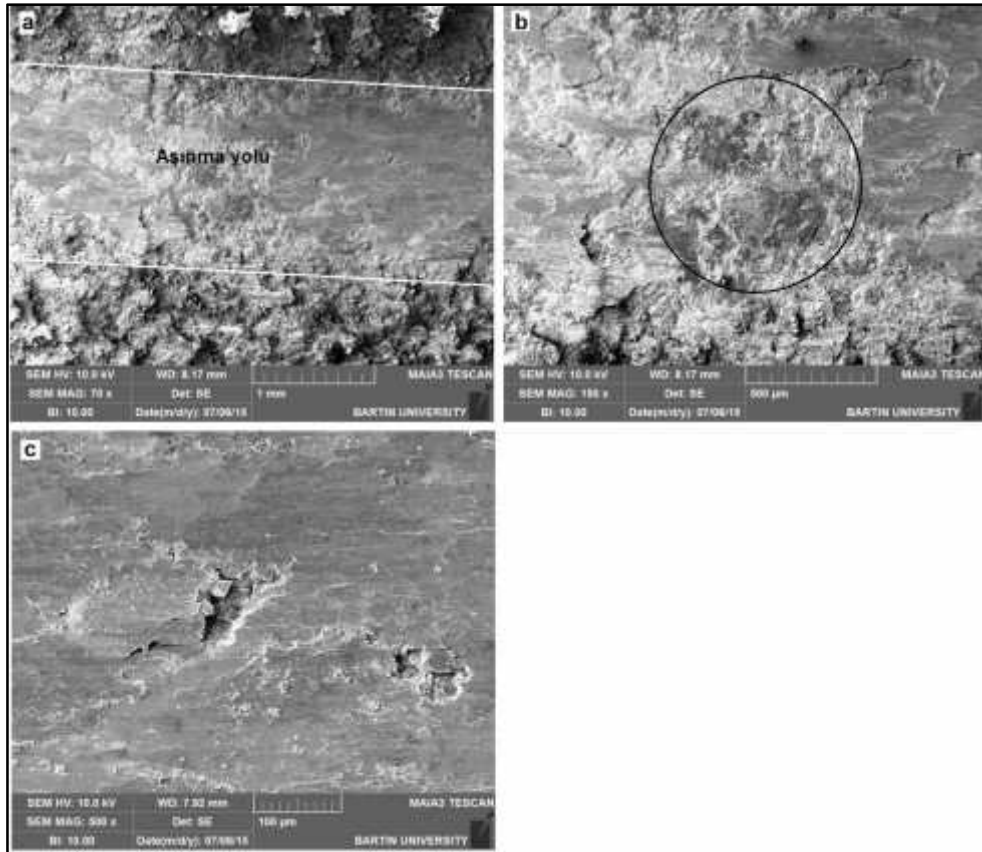
ekil 94: 600 °C sıcaklıkta farklı çevresel hız (0.08, 0.16, 0.26 m/sn) ve farklı (7, 10 ve 13 N) yükler altında uygulanan kuru-kayma deneyleri sonucunda elde edilen hacim kaybı değerleri.



ekil 95: 600 °C sıcaklık 10 N yük ve 0,08 m/s kayma hızında FeCr curuf, Al-Ti ve Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaların sürtünme katsayısı-zaman grafiği.



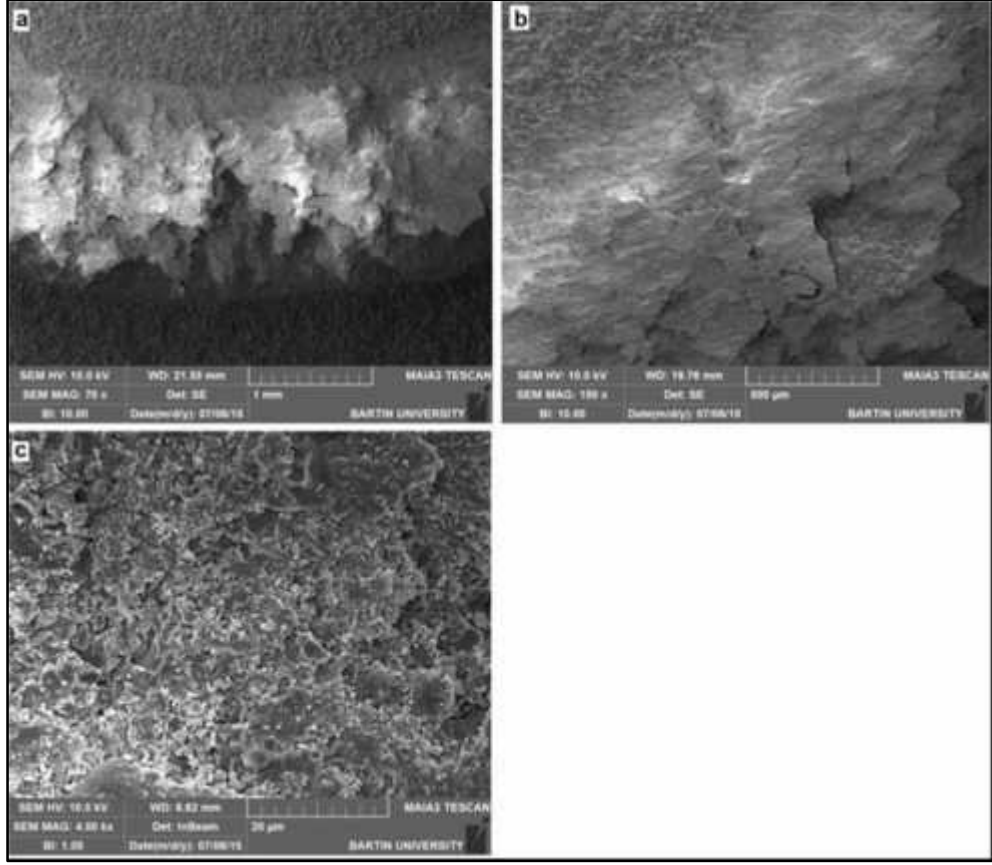
ekil 96: 600 °C sıcaklık 13 N yük ve 0,16 m/s kayma hızında FeCr curuf, Al-Ti ve Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaların sürtünme katsayısı-zaman grafi i.



ekil 97: 13N luk yük ve 0.16 m/sn kayma hızında Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplı numuneden alınmış SEM yüzey görüntüleri.

ekil 97 a-c de sırası ile küçük büyütmeden daha yüksek büyütme  $Cr_2O_3$  kaplı numunenin aınma yüzeyinden alınmış SEM görüntüleri verilmiştir. Daha öncede inildiği üzere yüksek sıcaklık deneylerinde en iyi aınma performansı bu numunede görülmüştür. ekil 97a'da aınma yol izi görülmektedir. ekil 97b'de verilen 150x büyütmedeki mikro raf incelenecek olursa, yüzeyden dökülen bir tabaka (çember içerisindeki) ile bu tabakanın sağ yanında daha önce anlatılan sır tabakasının varlığı görülmektedir. Numune yüzeyindeki sır tabakasının sıcaklıkla başlı olarak nasıl oluştuğu daha önce anlatılmıştı. Ancak sır tabakasının oluşmasında sıcaklıkla birlikte yük ve kayma hızı gibi parametrelerin de etkili olduğu görülmektedir. Çünkü artan yüklerle birlikte numune yüzeyinde maksimum basma kuvvetleri oluşacaktır. Basma kuvvetlerinin oluştuğu gerilme kaplama bölgesinin plastik deformasyonu kolaylaştıracaktır. Ayrıca artan yüke başlı olarak adeziv aınma mekanizmasının temelini oluşturan sürtünme kayma mekanizması daha aktif hale gelecek ve sır tabakasının oluşumuna katkı sağlayacaktır. ekil 97b'de çember içerisindeki alanın büyütülmüş görüntüsü ekil 97c'de verilmiştir. Burada sır tabakasında yerel dökülmelerin başlılığı görülmektedir. Numune üzerindeki tekrarlı yüklere başlı olarak basma gerilmeleri artacak bu ise yüzey bölgesinde çatlak çekirdeklenmelerine sebep olacaktır. Termal kaplamalar plastik deformasyon olarak üst üste yığılmış küçük splatlardan oluşmaktadır. Ancak çeyrekli sebeplere başlı olarak bu splatlar arasında boşluk, gözenek veya ergimemiş partiküllere sıkça rastlanmaktadır. Bu bölgeler çatlakların çekirdeklenip büyümesi için uygun yerlerdir. Malzemenin tamamen hatasız olduğu düşünülse bile malzeme yüzeyindeki gerilmeler zamanla splatlar arasında boşluk oluşarak hasara sebebiyet verecektir. Bu durum ise ekil 97c'de gösterildiği gibi kaplamanın kırılarak dökülmesine sebebiyet verecektir. Kaplama yüzeyinden aınma etkisi ile kopan partiküller abraziv aşındırıcı gibi görev yapmakta böylece daha fazla oranda aınma etkisi oluşmaktadır (Rynio vd., 2014).

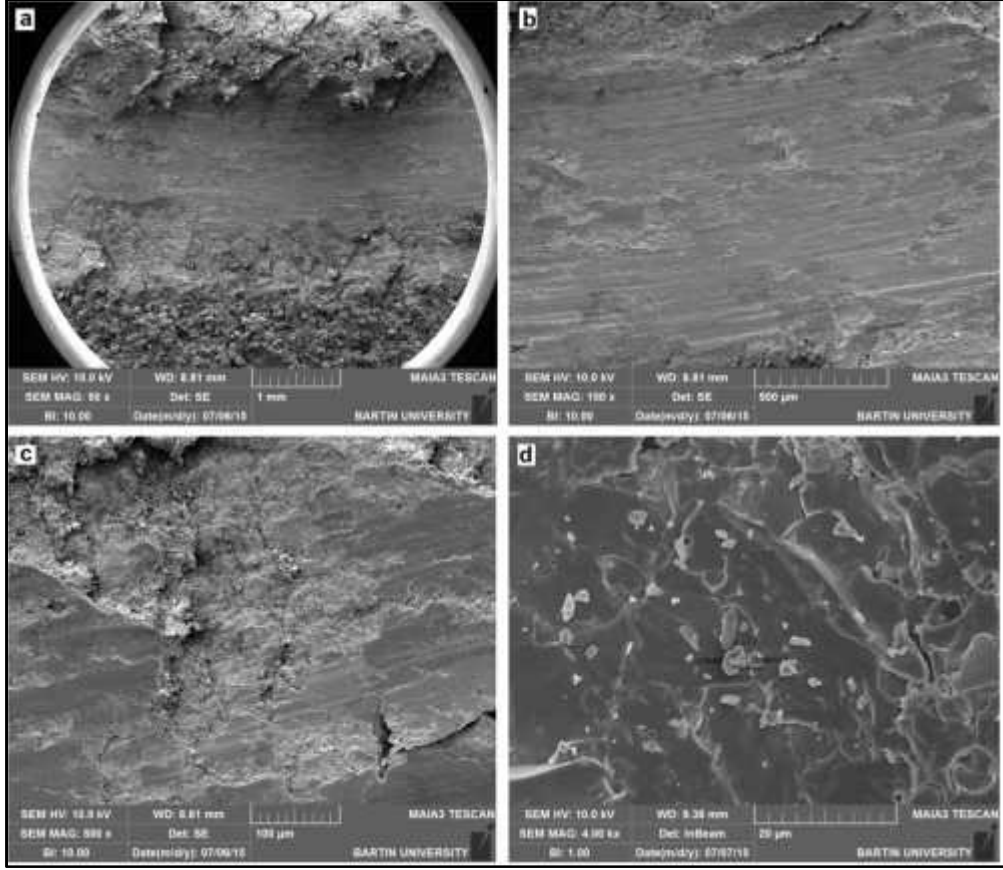




ekil 98: 13N luk yük ve 0.16 m/sn kayma hızında a indirılan Al-Ti kaplı numuneden alınmış SEM yüzey görüntüleri.

ekil 98'de Al-Ti kaplı numunenin a inma yüzeyinden alınmış SEM görüntüleri verilmiştir. Bu numune en iyi ikinci a inma performansını sergilemiştir. ekil 98 a ve b de a inma izi yolu görülmektedir. Al-Ti kaplı numune ile  $Cr_2O_3$  kaplı numunenin mikroyapısal ve mikromekanik özellikleri göz önüne alınırsa yapısı gereği 3 nolu en ince tane boyutundaki FeCr kaplama tozları daha düşük sertliğe sahiptir. Bu durum a inma esnasında olumsuz etki yapacaktır. Çünkü düşük ergime sıcaklığına sahip FeCr çuruf kaplı numunenin splatları yüksek sıcaklık ile birlikte daha fazla ayrılma eğilimine girecektir. ekil 98b'de a inma yolu üzerindeki mikro çatlamlar ve kısmi dökülmeler dikkat çekmektedir. ekil 98c'de ise 4kx büyütmede bu dökülmelerin mikro taneciklerin koparak yüzeyden ayrılması sonucu olduğu görülmektedir.





ekil 99: 13N luk yük ve 0.16 m/sn kayma hızında a ındırılan FeCr kaplı numuneden alınmı SEM yüzey görüntüleri.

ekil 99 a-d de 3 nolu numunenin a ınma yüzeyinden alınmı SEM görüntüleri verilmi tir. ekil 99a'da a ınma izi yolunun genel bir görüntüsü verilmekte, ekil 99b'de ise yeni yeni olu maya ba layan sır tabakasının varlı ı dikkati çekmektedir. ekil 99c'de tekrarlı yükler altında numune yüzeyinden ayrılan sır tabakası makro boyutta görülürken ekil 99d'de ise mikro çatlaklara ba lı olarak dökülen yüzeyin mikro rafı görülmektedir. En küçük toz boyutundaki FeCr cürufu ile kaplanmı 3 nolu numune, di er daha büyük toz boyutlarındaki FeCr cüruf kaplamalara göre daha iyi a ınma direnci göstermi tir.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- 1- Yüksek sıcaklık deneyleri öncesinde en yüksek sertlik değerleri büyükten küçüğe sırasıyla  $Cr_2O_3$ ,  $Al_2O_3+13TiO_2$  ve FeCr cüruf kaplamalar olduğu tespit edilmiştir.
- 2- 200°C - 600°C ler arasında yüksek sıcaklıklarda kuru-kayma aınma tabii tutulan numuneler arasında en düşük sürtünme katsayısı değeri  $Cr_2O_3$  kaplamada elde edilmiştir.  $Al_2O_3+13TiO_2$  kaplamanın sürtünme katsayısı değerleri çoğu deney artlarında FeCr cüruf kaplamadan daha yüksek çıkmıştır.
- 3- Yüksek sıcaklık kuru-kayma aınma deneylerinde artan sıcaklıkla beraber olarak numunelerin hacimsel kayıplarında artış olmuştur ancak bu artışın yük ve kayma hızına beraber olarak deşitimi görülmüştür. En iyi yüksek sıcaklık aınma direncine  $Cr_2O_3$  kaplamanın sahip olduğu bunu  $Al_2O_3+13TiO_2$  kaplamanın takip ettiği saptanmıştır. FeCr cüruf kaplı numuneler sıralamada üçüncü sırayı almıştır.
- 4- Tüm sıcaklık değerlerinde numunelerin yüzeylerinde sır tabakası (glazed-layer) oluşmuştur. Ancak sıcaklığın artması FeCr cüruf kaplamalarda sır tabakasının daha homojen şekilde oluşmasına katkıda bulunmuştur. Bu ise numunelerin hem aınma dirençlerinin artmasında hem de sürtünme katsayılarının düşmesinde etkili olmuştur.
- 5- 5-38 mikrometre tane boyutuna sahip FeCr cüruf tozundan üretilen FeCr cüruf kaplamaların yüksek sıcaklık adezyon aınma direnci özellikle 400°C'ye kadar sıcaklıklarda diğer ticari kaplama tozlarına alternatif olabileceği görülmüştür.
- 6- Daha yüksek sıcaklıklarda ise FeCr cürufunun yüksek sıcaklık dayanımı bilinen bir metal tozu ile (örneğin Molibden) mekanik alaşımlaması yapılarak kaplama ileminin gerçekleştirilmesi halinde elde edilecek kompozit toz kaplamanın daha iyi yüksek sıcaklık aınma performansı sergileyebileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Alkhimov A.P., Papyrin A.N., Kosarev V.F., Nesterovich N.I. ve Shushpanov M.M. (1994). *Gas Dynamic Spraying Method for Applying a Coating*. A.B.D. patent no: 5,302,414.
- Anderson P.S., Wang X. ve Xiao P. (2004). Impedance spectroscopy study of plasma sprayed and EB-PVD thermal barrier coatings. *Surface & Coatings Technology*. 185(1): 106-119.
- Archard J.F. (1980). Wear theory and mechanisms. In *Wear Control Handbook*. Ed: Peterson M.B. ve Winer W.O. ASME: pp. 38.
- Archard J.F. (1953). Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *J. Appl. Phys.* 24: 981-988.
- Asme Raporu (1977). *Strategy for Energy Conservation through Tribology*. ASME Publications Dep.: New York.
- AWS Committee on Thermal Spraying, *Thermal Spraying Practice Theory and Application*. American Welding Society INC: Miami.
- Barwell F.T. (1979) Theories of wear and their significance for engineering practice, in *Treatise Mater. Sci Technol.* Vol 13. Ed: Scott D., New York, pp. 2-83.
- Bayer, R.G. (1994). *Mechanical Wear Prediction and Prevention*, Marcel Dekker, Newyork.
- Beagley T.M. (1976). Severe wear of Rolling/sliding contacts. *Wear*. 36:317-335.
- Bely V.A, Sviridenok A.I., Petrokovets M.I. ve Savkin V.G. (1982). *Friction and Wear in Polymer-Based Materials*. Pergamon Press, Oxford.
- Bennet A., Toriz F.C. ve Thakleer A.B. (1987). A Philosophy for thermal barrier coating design and its corrobation by 10000h service experience on RB211 nozzle guide vanes. *Surf. Coat. Technol.* 32: 359-375.
- Berger L.M., Woydt M., Zimmermann S., Keller H. Schwier G. ve Enzl R. (2004). Tribological behavior of HVOF-sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr and TiC-based coatings under high temperature dry sliding conditions. In *International Thermal Spray Conference & Exposition Conference proceedings: Lectures and posters: Thermal Spray Solutions – Advances in Technology and Application*. Japan.
- Bergmann C.P. ve Vicenzi J. (2011). *Protection Against Erosive Wear Using Using Thermal Sprayed Cermet: A Review*. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg.
- Berndt C.C. (2001). The origin of thermal spray literature. In: *Proceedings of the international thermal spray conference*, Eds: Berndt C.C. Knor K.A., ve Lugscheider E.F, Singapur, ASM International, Materials Park, OH, 1351-1360.

- Bhansali K.J. (1980). Wear Coefficients of Hard Surfacing Materials. In: *Wear Control Handbook*. Eds: Peterson M.B. ve Winer W.O. , ASME, pp. 373-383.
- Blau P.J. ve DeVore (1990) Sliding Friction and Wear Behaviour of Several Nickel Aluminide Alloys Under Dry and Lubricated Conditions. *Tribol. Int.* 23(4): 226.
- BMFT Raporu (1976). *Tribologie, Reinebung-Verschleiß-Schmierung*. BMFT-Forschungsbericht T76-38: Bonn.
- BMFT Raporu (1984). *Damit Rost und Verschleiß nicht Milliarden fressen*. BMFT: Bonn.
- Bolot R., Planche M-P., Liao H., ve Coddet C. (2008). A three-dimensional model of the wire arc spray process and its experimental validation. *J Mater Process Technol.*, 200: 94-105.
- Borroff B.M. ve Wake W.C. (1949). Factors influencing the load required to strip rubber from fabric and foil surfaces. *Trans.Inst.Rubber Industry*. 25: 190-198.
- Bose S. (2007). *High Temperature Coatings*. Butterworth-Heinemann: Elsevier Burlington.
- Bose, S. ve DeMasi-Marcin J. (1997). Thermal barrier coatings experience in gas turbine engines at Pratt & Whitney. *J.Therm. Spray Technol.* (6)1: 99-104.
- Bowden F.P. ve Tabor D. (1939). The area of contact between stationary and moving surfaces. *Proc.R.Soc. N 938*: 391-413.
- Bowden F.P. ve Tabor d. (1954). *The Friction and Lubrication of Solids*. Clarendon Press, Oxford.
- Bowden F.P. ve Tabor D. (1966). Friction, lubrication and wear: a survey of work during the last decade. *Brit. J. Appl. Phys. Brit. J. Appl. Phys.* 17:1521-1544.
- Bowden F.P. ve Tabor D. (1986) *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford Press.
- Brossard S. (2010). *Microstructural Analysis of Thermal Spray Coatings by Electron Microscopy*. Doktora tezi. New South Wales Üniversitesi, Mekanik Anabilim Dalı, Kensington, Avustralya.
- Buckley D.H. (1971). *Friction, wear and lubrication in vacuum*. NASA SP-277 LC-72-174581, Washington.
- Buckley D.H. (1981) *Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication*. Elsevier, Amsterdam.
- Buckley D.H. (1981) *Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication*. Elsevier, Amsterdam.

- Bueche F., Cashin W.M. ve Debye P. (1952). The measurement of self-diffusion in solid polymers. *J.Chem.Phys.* 20: 1956-1958.
- Bunshah R.F. (2001). *Handbook of Hard Coatings. Deposition Technologies, Properties and Applications.* Noyes Publications: New Jersey.
- Burwell J.T. ve Strang C.D. (1952). On the empirical law of adhesive wear. *J. Appl. Phys.* 23: 18-28.
- Burwell, J.T. (1957). Survey of possible wear mechanisms. *Wear.* 58(1): 119-141.
- Buttery T.C. ve Archard J.F. (1970) Grinding and abrasive wear. *Proc. Inst. Ech. Eng.* 185: 537-551.
- Cao X.G., Vassen R. ve Stover D. (2004) New double-ceramic-layer thermal barrier coatings based on zirconia-rare earth composite oxides. *J Eur. Ceram. Soc.* 24(1): 1-10.
- Cartier M. (2003) *Handbook of Surface Treatments and Coatings.* Asme Press: New York.
- Chagnon P. Ve Fauchais P. (1984) Thermal Spraying of ceramics. *Ceram. Int.* 10(4): 119-131.
- Champagne V.K. (2007). *The Cold Spray Materials Deposition Process Fundamentals and Applications.* Woodhead Publishing Limited: Cambridge.
- Chattopadhyay R. (2001) *Surface Wear.* ASM International, Materials Park: OH.
- Chen C., vd. (2006) Failure of EB-PVD thermal barrier coatings subjected to thermo-mechanical loading. *Chinese Journal of Aeronautis.* 19: 82-85.
- Chraska T., ve King A.H. (2001). Transmission electron microscopy study of rapid solidification of plasma sprayed zirconia: part II Interfaces and subsequent splat solidification. *Thin Solid Films.* 397: 40-48.
- Clarke D.R. (2003). Materials selection guidelines for low thermal conductivity thermal barrier coatings. *Surf. Coat. Technol.* 163-164: 67-74.
- Clarke D.R. ve Levi C.G. (2003) Materials design for the next generation thermal barrier coatings. *Annu. Rev. Mater. Res.* 33: 383-417.
- Clarke D.R., Oechsner M. ve Padture N.P. (2012). Thermal Barrier Coatings for More Efficient Gas Turbines. *MRS Bulletin.* 37(10): 891-898.
- Cox, J.M., Gee ve M.G. (1997). *Hot friction testing of ceramics.* 203-204: 404-417.
- Czichos H. (1972). The mechanisms of the metallic adhesion bond. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 5: 1890-1897.
- Czichos H. (1984). Review on wear research activities in the F.R.G. *Wear.* 100: 579-589.

- Czichos, H. (1987). Tribology-A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear, Elsevier, Amsterdam.
- Davis J.R. (2001). Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. ASM International, Materials Park: OH.
- Davis J.R. (2002). Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics, ASM International, Materials Park: OH.
- Davis J.R. (2004) Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, Materials Park: OH.
- De Gee A.W.J. (1965). The friction of gold-silver alloys against steel. Wear. 8: 121-132.
- Derjaguin B.V. ve Smilga V. (1969). Electronic theory of adhesion. In Adhesion, Fundamentals and Practice. Eds: McLaren ve Son. Londra, pp.152-163.
- Derjaguin. B.V. (1972). Investigation on the adhesion of polymer particles to the surface of a semiconductor. J.Adhesion, 4: 65-71.
- DIN 50320 (1979). Verschleiß – Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth Verlag: Berlin.
- Dorfman M.R. (2012). Handbook of Environmental Degradation of Materials. Elsevier: New York.
- Döleker K.M. (2015). Bilyalı Dövme İleminin Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışını Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın.
- Ducos M, Durand J.P. (2001). Thermal coatings in Europe: a business perspective. In: Proceedings of international thermal spray conference, Eds: Berndt C.C., Khor, K.A., Lugscheider E.F., Singapur, ASM International, Materials Park, OH, 1267-1271.
- Ducos M. (2006). Evaluating the cost of thermal spraying, ALIDERTE Course, Limoges.
- Dumola R.J. ve Heath G.R. (1997) New Developments in the plasma transferred arc process. In: Proceedings of the united thermal spray conference, Ed: Berndt C.C. Indianapolis, ASM International, Materials Park, OH, 427-434.
- Dykhuisen R. ve Smith M. (1998) Gas Dynamic Principles of Cold Spray. Journal of Spray Technology. 7(2): 205-212.
- Dykhuisen R., Smith M.F., Gilmore D.L. vd. (1999). Impact of High Velocity Cold Spray Particles. Journal of Thermal Spray Technology. 8(4): 559-564.
- Dyson J. ve Hirst W. (1954). The true contact area between solids. Proc.Phys.Soc.Ser.B. 67(412): 309-312.

- Eaton H. E., Linsey J.R. ve Dinwiddie R.B. (1994). The effect of thermal aging on thermal conductivity of plasma sprayed fully stabilized zirconia, *Thermal Conductivity*. 22: 289-300.
- Evans A.G. ve Marshall D.B. (1981). Wear mechanism in ceramics. In *Fundamentals of Friction and Wear of Materials*. Ed: Rignev D.A. ASM. p. 439.
- Evans J.R.G. ve Packham D.E. (1979). Adhesion of polyethylene to metals: the role of surface topography. *J. Adhesion*. 10: 177-191.
- Fauchais P. (2004) Understanding Plasma Spraying, *J Phys D*, 37: 86–108.
- Fauchais P., Fukumoto M., Vardelle A. and Vardelle M. (2004). Knowledge concerning splat formation: an invited review, *Therm. Spray Technol.*, 13 (3): 337-360.
- Fauchais P.L., Heberlein J.V.R. ve Boulos M.I. (2014) *Thermal Spray Fundamentals\_From Powder to Part*. Springer: New York.
- Feller H.G. ve Matschat E. (1971). Verschleissuntersuchungen mit der Mikrosonde. *Prakt.Metallogr*. 8: 335-344.
- Fischer T.E. ve Tomizawa H. (1985). Interaction of tribochemistry and microfracture in the friction and wear of silicon nitride. *Wear*. 105(1-2): 29-45.
- Fisher I.A. (1972). Variables influencing the characteristics of plasma sprayed coatings. *Int. Metal. Rev*. 17: 117-129.
- Flom D.G. ve Porile N.T. (1955). Effect of temperature and high speed sliding on the friction of teflon on teflon. *Nature* 175 :682.
- Franco M., Sha W., Aldic G., Malinov S. ve Çimeno lu H. (2016). Effect of reinforcement and heat treatment on elevated temperature sliding of electroless Ni—P/SiC composite coatings. *Tribology International*. 97: 265-271.
- Frey H., Frey E. ve Feller H.G. (1976). Einfluss einiger physikalisch-chemischer Eigenschaften auf das tribologische Verhalten metallischer. *Werkstoffe.Z.Metallkde*. 67: 177-185.
- Fridlyand M.G. (1995). Effect of reactive plasma-forming gases on plasma spray operating conditions: a technical note, *J. Therm. Spray Technol.*, 4: 137-142.
- Frisch B. (1981). Adhesive wear. In *Metallurgical Aspects of Wear*. Eds: Hornbogen E. ve Zum Ghar K.H. DMG Verlag, Oberursel, pp. 51-72.
- Fujita K. ve Yoshida A. Surface fatigue failure of nitride-hardened aluminium-chromium-molybdenum steel rollers under pure Rolling and sliding-rolling contacts. *Wear*. 53:61-68.
- Gage R.M., Nestor D.M. ve Yenni Y.M. (1962). *Collimated electric arc powder deposition process*. ABD Patent no: 3.016.447.

- Gane N., Pfaelzer P.F. ve Tabor D. (1974). Adhesion between clean surfaces atr light loads. *Proc.R.Soc.London.A340*. 495-517.
- Gatto A., Bassoli E. ve Fornari M. (2004) Plasma transferred arc deposition of powdered high performance alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration. *Surf Coat Technol*, 187: 265-271.
- Gerdien, H. and Lotz, A. (1922). Wissen. Veröffen. *Siemens Werken*, 2, 489–496.
- Giannini G. Ve Ducati A. (1960). *Plasma stream apparatus ve method*. ABD Patent no: 2.922.869.
- Godfrey D. (1980) Diagnosis of wear mechanisms. In *Wear Control Handbook*. Eds: Peterson M.B. ve Winer W.O. *ASME*, New York. pp.283-311.
- Golosnoy I.O., Cipitria A. ve Clyne TW. (2009) Heat transfer through plasma-sprayed thermal barrier coatings in gas turbines: a review of recent work. *J Therm Spray Technol*. 18(5-6): 809-821.
- Goodzeit C.L., Hunnicutt R.P. ve Roach A.E. (1956). Frictional characteristics and surface damage of thirty-nine different elemental metals in sliding contact with iron. *Trans.ASME*, 78: 1669-1676.
- Greuner H, Balden M. vd., (2004) Evaluation of vacuum plasma-sprayed boron carbide protection fort he stainless steel first wall. *J Nucl Mater* 329-333:849-854.
- Grujicic M., Saylor J.R., Beasley D.E., Derosset W.S. ve Helfritch D. (2003). Computational Analysis of the Interfacial Bonding between Feed-Powder Particles and the Substrate in the Cold-Gas Dynamic-Spray Process. *Applied Surface Science*. 219: 211-227.
- Grujicic M., Zhao C.L., Tong C., Derosset W.S. ve Helfritch D. (2004) Analysis of the impact velocity of powder particles in the cold-gas dynamic-spray process. *Materials Science and Engineering*. 368: 222-230.
- Gupta M. 2015. *Design of Thermal Barrier Coatings: A Modeling Approach*. *SpringerBriefs in Materials*, New York.
- Habig, K.H. (1970) Der Einfluss der gegenseitigen Löslichkeit von Metallen auf einige ihrer tribologischen. *Eigenschaften.Metalloberflasche*, 24: 375-379.
- Hallen H., Lugscheider E., Ait-Mekideche A. (1991) Plasma transferred arc surfacing with high deposition rates. In: *Proceedings of the fourth national thermal spray conference*. Ed: Bernecki T. ASM International, Materials Park, OH, 537-539.
- Halling J. (1978). *Principles of Tribology*. Maximillan Press, Londra.
- Hartweck W. Ve Grabke H.J. (1979). Effect of adsorbed atoms on the adhesion of iron surfaces. *Surf.Sci*. 89: 174-181.



- Herman H. (1988). Plasma sprayed coatings. *Scientific American*. 259(3): 112-117.
- Herman H., Sampath S., McCune R.C. (2000). Thermal spray: current status and future trends. *MRS Bulletin*. 25: 17-25.
- Hermanek F.J. (2001) Thermal spray terminology and company origins. ASM International, Materials Park, OH.
- Heshmat H., Hryniewicz P., Walton J.F., Willis J.P., Jahanmir S., ve DellaCorte C. (2005). Low-friction wear resistant coatings for high temperature foil bearings. *Tribology International*. 38: 1059-1075.
- Hirst W. (1957). *In Proceedings of the Conference on Friction and Wear*. IMechE, Londra, 674.
- Hodge P.E., Miller R.A. ve Gedwill M.A. (1980). Evaluation of the hot corrosion behavior of thermal barrier coatings, *Thin Solid Films*. 73: 447-453.
- Hokkirigawa K. (1997). Wear maps of ceramics. *Bulletin of the Ceramics Society of Japan*. 1:19-24.
- Hokkirigawa K. ve Kato K. (1988). An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. *Tribology Int*. 21(1): 51-57.
- Holm R. (1946). *Electric Contact. Almquist and Wiksells*. Stockholm: Bölüm 40.
- Hou G., An Y., Zhao X., Zhou H. ve Chen J. (2015). Effect of alumina dispersion on oxidation behaviour as well as friction and wear behaviour of HVOF-sprayed CoCrAlYTaCSi coating at elevated temperature up to 1000 °C. *Acta Materialia*. 95:164-175.
- Houwink R. Ve Salomon G. (1965). *Adhesion and Adhesives. Vol I*. Elsevier, Amsterdam.
- Huibin Xu ve Hongbo Guo. (2011). *Thermal Barrier Coatings*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- Hussary N.A. ve Heberlain V.J.R. (2001). Atomization and particle jet interactions in the wire-arc spraying process, *J Therm Spray Technol* 10(4): 604-610.
- Hutchings I.M. (1992). *Tribology-Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, Londra.
- Ingham H.S. Jr., ve Fabel A.J. (1975). Comparison of plasma spray gases, *Weld. J*. 54: 101-105.
- Inman I.A., Datta P.K. Du, H.L. Burnell-Gray J.S., Pierzgalski S. ve Luo Q. (2005). Studies of high temperature sliding wear of metallic dissimilar interfaces. *Tribol. Int*. 38: 812-823.

- Inman I.A., Datta S., Du H.L., Burnell-Gray J.S. ve Luo Q. (2003). Microscopy of glazed layers formed during high temperature sliding wear at 750°C. *Wear*. 254: 461-467.
- Inman I.A., Rose S.R. ve Datta P.K. (2006). Studies of high temperature sliding wear of metallic dissimilar interfaces II: Incoloy MA956 versus Stellite 6. *Tribol. Int.* 39:1361-1375.
- Jahanmir S. (1980). On the wear mechanisms and the wear equations. In *Fundamentals of Tribology*. Eds: Suh N.P. ve Saka N. MIT Press, Cambridge, pp. 455-467.
- Janisson S., Vardelle A, Coudert J.F., Meillot E., Pateyron B. Ve Fauchais P. (1999). Plasma spraying using Ar-He-He<sub>2</sub> gas mixtures, *J. Therm. Spray Technol.*, 8: 545-552.
- Joshi S.V. (1992). A Prediction Model to Assist Plasma and HVOF Spraying. *Materials Letters*, 14(1): 31-36.
- Jost H.P. (1966). *A Report of the Present Position and Industry's Needs*. H.M. Stationary Office: Londra.
- Jost H.P. (1981). The economic importance of tribology in the conservation of energy, in *Tribologie Vol. 1*, ed: Bunk W.u.a., Berlin, pp. 9-38.
- Jost H.P. ve Schofield J. (1981). Energy saving through tribology: a techno-economic study. *James Clayton Lectur.* 16: 195.
- Jugklaus H., Lugscheider E., Schwier G., Heinrich P., ve Mathesius H. (1996). Ceramic coatings by high power plasma spraying (HPPS) in *Thermische Spritzkon-ferenz TS 96*, Düsseldorf, 44-48.
- Karao lanlı A.C., Dikici H. ve Küçük Y. (2012). Effects of Heat Treatment on Adhesion Strength of Thermal Barrier Coating Systems, *Engineering Failure Analysis*. 32: 16-22.
- Karao lanlı A.C., Erdo an G., Türk A., Özdemir I. ve Üstel F. (2011). Structure and Durability Evaluation of YSZ+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite TBCs with APS and HVOF Bond Coats Under Thermal Cycling Conditions. *Surface and Coatings Technology*. 205: 369-373.
- Karao lanli A.C., Çalı kan H., Öge M., Döleker K.M. ve Hotamı M. Comparison of Tribological Properties of HVOF Sprayed Coatings with Different Composition. *7th Rencontres Internationales sur la Projection Thermique*, Limoges.
- Kato K. ve Adachi K. (2001). Wear Mechanisms Chapter 7. In *Modern Tribology Handbook*. Ed. Bhushan B. Florida, pp. 273-299.
- Kato K. ve Adachi K. (2002). Wear of advanced ceramics. *Wear*. 253 (11-12): 1097-1104.

- Kayaba T. ve Kato K. (1981). The adhesive transfer of the slip-tongue and the wedge, *ASLE Trans.* 24(2): 164-174.
- Keller D.V. (1963). Adhesion between solid metals. *Wear.* 6: 353-365.
- Keller S., Tommer P., Clarke R. ve Nicoll A.R. (1995). Key factors in the development of plasma spray systems and the spray process, in *Thermal Spraying – Current Status and Future Trends*, Ed: Ohmori A., High Temperature Society of Japan, Osaka. pp. 275-281.
- Kinloch A.J. (1980) The science of adhesion. *J.Mater.Sci.*, 15: 2141,2166.
- Klemens P.G., ve Gell M. (1998) Thermal conductivity of thermal barrier coatings. *Mater. Sci. Eng. A245*: 143-149.
- Kloos K.H. ve Broszeit E. (1976). Grundsatzliche Betrachtungen zur Oberflächen-Ermüdung. *Z.Werkstofftech.* 7:85-96.
- Knight R. (2005) Thermal spray: past, present and future. In: *Proceedings of the international symposium on plasma chemistry*, Eds: Mostaghimi J. Toronto.
- Kosarev V.F., Klinkov S.V., Alkhimov A.P. Ve Papyrin A.N. (2003). On some aspects of gas Dynamics of the cold spray process. *Journal of Thermal Spray Technology.* 12(2); 265-281.
- Krupp H. (1972). Recent results in particle adhesion. UHV measurements, light modulatted adhesion and the effect of adsorbates. *J.Adhesion.* 4: 83-86.
- Küçük Y., Gök M.S., ve Öge M. (2016a). APS Yöntemi ile Biriktirilmiş Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> Kaplamanın Yüksek Sıcaklık Aınma Davranı ı. *Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı Kapadokya (IMSTEC'16)*, Nevşehir.
- Küçük Y., Gök M.S., ve Öge M. (2016b). APS Yöntemi ile Biriktirilmiş Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kaplamanın Yüksek Sıcaklık Aınma Davranı ı. *Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı Kapadokya (IMSTEC'16)*, Nevşehir.
- Küçük Y., Gök M.S., ve Öge M. (2016c). Toz Boyutunun Oksit çerikli Seramik Kaplamanın Toz Boyutuna Etkisi. *Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı Kapadokya (IMSTEC'16)*, Nevşehir.
- Küçük Y., Karaoğlu A.C., Gök M.S. ve Öge M (2015b). An Alternative Ceramic coating material for APS applications Part II: Comparative Analysis of Dry sliding wear performance of FeCr slag coating with commercial Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13TiO<sub>2</sub> coatings, *7th Rencontres Internationales sur la Projection Thermique*, Limoges.
- Küçük Y., Karaoğlu A.C., Gök M.S. ve Öge M (2015a). An Alternative Ceramic Coating Material for APS Applications Part I: Characterization and Oxidation Behavior, *7th Rencontres Internationales sur la Projection Thermique*, Limoges.
- Lancaster J.K. (1978). *Trans Inst Metal Finish.* 56 (4): 145.

- Landheer D., Dackus A.J.G. ve Klostermann J.A. (1980). *Fundamental aspects and technological implications of the solubility concept for prediction of running properties*. DGM-Hauptver, Berlin.
- Lanzutti A., Lekka M., Marin E. ve Fedrizzi L. (2013). Tribological Behaviour of Thermal Spray Coatings, Deposited by HVOF and APS Techniques, and Composite Electrodeposits Ni/SiC at Both Room Temperature and 300°C. *Tribology in Industry*. 35(2): 113-122.
- Leger A.C., Wigren J. Ve Hansson M.O. (1998). Development of a process window for a NiCoCrAlY plasma-sprayed coating. *Surf. Coat. Technol.* 108-109: 86-92.
- Levi C.G. (2004) Emerging materials and processes for thermal barrier systems. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 8: 79-91.
- Leyens, C., Wright I.G., Pint B.A. (2000). Hot corrosion of an EB-PVD thermal-barrier coating system at 950°C. *Oxid. Met.* 54(5-6): 401-424.
- Liang X.S., Ouyang J.H. ve Liu Z.G. (2012) Friction and Wear Characteristics of BaCr2O4 Ceramics at Elevated Temperatures in Sliding Against Sintered Alumina Ball. *Tribology Letters*. 47: 203-209.
- Lim S.C. ve Ashby M.F. (1987). Wear-mechanism maps, *Acta Metallurgica*. 35(1): 1-24.
- Lin X., Zeng Y., Ding C. ve Zhang P. (2004) Effects of temperature on tribological properties of nanostructured and conventional Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3 wt. %TiO<sub>2</sub> coatings. *Wear*. 256-: 1018-1025.
- Ludema K.C. (1981). Selecting material for wear resistance, in *Wear of Materials*. Eds: Rhee S.K. vd. ASME, New York, pp. 1-6.
- Lugscheider E., Barimani C., Eckert P., ve Eritt U. (1996). Modeling of the APS plasma spray process. *Comput. Mater. Sci.* 7(1-2): 109-114.
- Mann B.S. ve Arya V. (2001). Abrasive and erosive wear characteristics of plasma nitriding and HVOF coatings: their application in hydro turbines. *Wear* 249(5-6): 354-360.
- Marx S., Paul A., Köhler A. ve Hüttl G. (2006). Cold spraying: innovative layers for new applications. *J Therm Spray Techno.* 15(2): 177-183.
- Mash D.R., Weare N.E. ve Walker D.L. (1961). Process variables in plasma jet spraying. *J. Met.* 4: 473-478.
- Mauer G., Vaßen R., Stoßner D. (2010) Thin and dense ceramic coatings by plasma spraying at very low pressure. *J Therm Spray Technol* 19(1–2):495–501.
- McPherson R. (1984). A model for the thermal conductivity of plasma sprayed ceramics. *The Solid Films*. 112: 89-94.

- McPherson R. (1989). A review of microstructure and properties of plasma sprayed ceramic coatings. *Surf Coat Technol* 39: 173-181.
- Metselaar, H.S.C., Kerkwijk, B., Mulder, E.J., Verweij, H. ve Schipper, D.J. (2001). Wear of ceramics due to thermal stress: a thermal severity parameter. *Wear*. 249(10-11): 962-970.
- Mignot J. Ve Gorecki C. (1983). Measurement of surface roughness: comparison between a defect-of-focus optical technique and the classical stylus technique. *Wear*. 87: 39-49.
- Miller R.A. (1997). Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions *J Therm Spray Technol* 6(1): 35-42.
- Miller R.A. (1997). Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions. *J. Therm. Spray Technol.* 6:35-42.
- Miyoshi K., Farmer S.C. ve Sayir A. (2005). Wear properties of two-phase Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ceramics at temperatures from 296 to 1073K. *Tribology International*. 38: 974-986.
- Moore D.F. (1975) *Principles and Applications of Tribology*. Pergamon Press, Oxford.
- Moore M.A. (1979). Abrasive wear. In *Treatise Mater.Sci.Technol.* Vol. 13. Ed: Scott D. New York, pp.217-257.
- Murray M.J., Mutton P.J. ve Watson J.D. (1979). Abrasive wear mechanisms in steels. *Wear of Materials*. Eds: Ludema K.C. vd. ASME, Newyork, pp.257-265.
- Narulkar V.V., Prakash S. ve Chandra K. (2008). Effects of Temperature on Tribological Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> Coating. *Defense Science Journal*. 58(4): 582-587.
- Niklas A. Sture H., Staffan J. (2001). Friction and wear measurement techniques. In *Modern Tribology Handbook*. Ed. Bhushan B. Florida, pp.493-508.
- OECD Research Group on Wear of Engineering Materials: Friction, Wear and Lubrication (1969). *Tribology – Glossary of Terms and Definitions*. OECD, Paris.
- Okada M., ve Maruo H. (1968). New plasma spraying and its applications. *Br. Weld. J.* 15: 371-386.
- Oudar J. (1978). Metral surfaces: structure and initial stages of reactivity. *Intern. Metals Rev.* 2: 57-73.
- Ouyang J.H., Wang Y.H., Liu Z.G., Wang Y.M. ve Wang Y.J., (2015) Preparation and high temperature tribological properties of microarc oxidation ceramik coatings formed on Ti<sub>2</sub>AlNb alloy. *Wear*. 330-331:239-249.
- Packham D.E., Bright K. ve Malpass B.W. (1974). Mechanical factors in the adhesion of polyethylene to aluminum. *J.Appl.Polym.Sci.* 18: 3237-3247.

- Papyrin A. (2001). Cold Spray Technology. *Advanced Materials & Processes.*, 160(3): 49-51.
- Paul S., Cipitria A. Golosnoy I.O., Xie L., Dorfman M.R. ve Clyne T.W. (2007). Effects of impurity content on the sintering characteristics of plasma sprayed zirconia. *J. Therm. Spray Technol.* 16(5-6): 798-803.
- Pawlowski L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. John Wiley & Sons Ltd: West Sussex.
- Peng H. vd. (2007) Numerical Analysis of EB-PVD Thermal barrier coatings under thermal-mechanical coupled environment. *Materials Science Forum.* 546-549: 1795-1799.
- Peters M., Leyens C., Schulz U. ve Kaysser W.A. (2001). EB-PVD TBCs for aeroengines and gas turbines. *Adv Eng Mater.* 3:193-204.
- Peterson M.B. (1980) Classification of wear processes. In *Wear Control Handbook*. Eds: Peterson M.B. ve Winer W.O. ASME, New York, pp. 9-15.
- Peterson M.B., Calabrese S.J., Li S.Z. ve Jiang S.Z. (1994). Friction of alloys at high temperature. *J. Mater. Sci. Technol.* 10: 313-320.
- Peterson M.B., Murray S.F. ve Florek J.J. (1959). Consideration of lubricants for temperature above 1000 F. *ASLE Trans.* 2: 225-234.
- Plazjet (1995). *Tafa Katalo u*, Concord, CA, ABD.
- Rabinowicz E. (1980). Wear coefficients of metals. In: *Wear Control Handbook*. Eds: Peterson M.B ve Winer W.O. ASME. pp. 475.
- Renouard-Vallet G., Bianchi L. Sauvet, A.L., Fauchais P., Vardelle M., Boulos M. ve Gitzhofer F. (2004) Elaboration of SOFCs electrolyte by air plasma spraying and vacuum plasma spraying: comparison of electrolyte properties. *Proceedings of international thermal spray conference, Osaka*. Ed: Ohmori A., ASM International, Materials Park, OH, 132-137.
- Rice S.L. (1984). A review of wear mechanisms and related topics. In *Ibid.* ,pp. 469-476.
- Roach A.E., Goodzeit C.L. ve Hunnicut R.P. (1956). Scoring characteristics of thirty-eight different elemental metals in high-speed sliding contact with steel. *Trans.ASME.* 78: 1659-1667.
- Rowson D.M. ve Wu Y.L. (1981) The sequential observation of the pitting process in discs. *Wear.* 70: 383-393.
- Rynio C., Hattendorf H., Klöwer J. Ve Eggeler G. (2014). The evolution of tribolayers during high temperature sliding wear. *Wear.* 315: 1-10.

- Sachek B.Y., Mezrin A.M. ve Zaytzev A.N. (2014). Experimental Study of the Speed-Dependence Tribotechnical Characteristics of Some Plasma-Sprayed Oxide Coatings at Elevated Temperatures. *Trenie i Iznos*, 35(3): 267-275.
- Sakurai T. (1984) Recent research on tribology in Japan. *Wear*. 100: 543-560.
- Sasada T. (1984). Wear research in Japan: trends and future directions. *Wear*, 100: 561-577.
- Schnabel E. (1969). *Lichtmodulierte elektrostatische Doppelschicht - haftung*. Diss. Karlsruhe.
- Schneider K.E., Belaschenko V., Dratwinski M, Siegmann S., Zagorski A. (2006). *Thermal Spraying for Power Generating Components*. Wiley-VCH: Weinheim.
- Schoop M.U. (1910) *Improvements in or connected with the coating of surfaces with metal, applicable also for soldering or uniting metals and other materials*. BK Patent no: 5,712.
- Schoop M.U. (1911) *An Improved Process of applying deposits of metal or metallic compounds to surfaces*, BK Patent no: 21,066.
- Schoop M.U. (1915). *Apparatus for spraying molten metal and other fusible substances*. ABD Patent no: 1,133,507.
- Scott D. (1979). Rolling contact fatigue. In *Treatise Mater.Sci.Technol.* Vol. 13. Ed. Scott D. Academic Press, New York. pp.321-361.
- Scrivani A., Bardi U., Carrafiello L., Lavacchi A., Niccolai F. ve Rizzi G. (2003) A comparative study of high velocity oxygen fuel, vacuum plasma spray, and axial plasma spray for the deposition of CoNiCrAlY bond coat alloy. *J Therm Spray Technol.* 12(4): 504-507.
- Sergent L.B.Jr. (1978). On the fundamental nature of metal-metal adhesion. *ASLE Trans.* 21: 285-290.
- Shillington E.A.G. ve Clarke D.R. (1999) Spalling Failure of a thermal barrier coating associated with aluminum depletion in the bond coat. *Acta Mater* 47(4): 1297-1305.
- Siegmann S., Brandt O., Dvorak M. (2004) Thermally sprayed wear resistant coatings with nanostructured hard phases, *J Therm Spray Technol.* 31(1): 37-43.
- Sikorski M.E. (1964). The adhesion of metals and factors that influence it. *Wear*. 7: 114-162.
- Skopp, A., Woydt, M. ve Habig, K.H. (1995). Tribological behavior of silicon nitride materials under unlubricated sliding between 22°C and 1000°C. *Wear.*: 181-183.

- Sohn Y.H., Kim E.H., Jordan M., ve Gell M. (2001). Thermal cycling of EB-PVD/MCrAlY thermal barrier coatings: Microstructural development and spallation mechanisms. *Surf. Coat. Technol.* 146-147: 70-78.
- Stontenhoff T., Kreye H., ve Richter H. (2002) An Analysis of the cold spray process. *Journal of Thermal Spray Technology.* 11(4): 542-550.
- Stott F.H., Lin D.S. ve Wood G.C. (1973). Glazes produced on nickel-base alloys during high temperature wear. *Nature Physical Science.* 242: 75-77.
- Tabor D. (1970) Hardness of solids. *Rev. Phys. Tech.*, 1: 145-179.
- Thornton J.A. (1982). Plasma in deposition processes, in *Deposition Technologies for Films and Coatings*, Ed: Bunshah R.F. New Jersey. pp. 19-62.
- Tomimatsu T., Zhu S. ve Kagawa Y. (2003). Effect of thermal exposure on stress distribution in TGO layer of EB-PVD TBC. *Acta Mater.* 51: 2397-2405.
- Tsukada T. ve Sasajina K.(1981). A three-dimensional measuring technique for surface asperities. *Wear.* 71: 1-14.
- Tucker R.C. (2004). *ASM Handbook Volume 5 Surface Engineering.* ASM International: Ohio.
- Tucker R.C. Jr (1982). Plasma and detonation gun deposition techniques and coating properties, in *Deposition Technologies for Films and Coatings*, Ed: Bunshah R.F., New Jersey, pp. 454-489.
- Uetz H. ve Föhl J. (1969). Gleitverschleissuntersuchungen an Metallen un nichtmetallischen Hartstoffen unter Wirkund körniger Stoffe. *Warme und Energie*, 21: 10-18.
- URL-1 (2014). <https://www.oerlikon.com/> Material Product Data Sheet Nickel Cobalt Chromium Aluminum Yttrium (NiCoCrAlY) Thermal Spray Powders, 05 Haziran 2016.
- URL-2 (2015). <http://www.akyol.net/>, ESM-200 Elek Sallama Makinesi, 01 Haziran 2016.
- URL-3 (2011). <http://www.scielo.org.ve/>, Influence of cutting parameters and material properties on cutting temperature when turning stainless steel, 01 Haziran 2016.
- URL-4 (2016). <http://www.teknikgroup.com/ai420.htm>, AISI 420 Fiziksel Özellikleri, 06 Haziran 2016.
- Uslu ., Aytimur A., Koçyi it S., Özcan F., Öztürk M.K. ve Çolak Ü. (2013) Sythesis and characterization of erbia and ceria doped calcia stabilized nanocrystalline zirconia based ceramics. *Journal of sol-gel science and technology.* 65(2): 112-120.
- Van Steenkiste T.H., Smith J.R. Teets R.E. vd. (1999) Kinetic Spray Coatings. *Spray Coatings Technology.* 111: 62-71.



- Vuoristo, P.M.J., Niemi K.J. ve Mantyla T.A. (1992). On the properties of detonation gun and plasma sprayed ceramic coatings, in *Proceedings of the 13th International Thermal Spray Conference*, Ed: Berndt C.C., OH, pp. 171-175.
- Wahl H. (1951). Verschleissprobleme im Braunkohlenbergbau. *Braunkohle, Wärme und Energie*, 5/6:75-87.
- Wake W.C. (1976). Adhesion and the Formulation of Adhesives. *Applied Science Publ.* Londra.
- Wellinger K. ve Uetz H. (1955). Gleitverschleiss, Spülverschleiss, Strahlverschleiss unter der Wirkund von körnigen Stoffen. *VDI-Forschungsheft* 449: 21.
- Whitehouse D.J. (1980). Surface topography and quality and its relevance to wear. In *Fundamentals of Tribology*. Ed. Suh N.P. ve Saka N. MIT Press, Cambridge, pp. 17-50.
- Widner R.L. ve Wolfe J.O. (1978). Valuable results from bearing damage analysis. In *Source Book on Wear Control Technology*. Source Book on Wear Control Technology. Ed. Rigney D.A. ve Wu Y.L. ASM Ohio. pp. 193-200.
- Wilden J, Bergman J.P. ve Frank H (2006). Plasma transferred arc welding-modeling and experimental optimization. *J Therm Spray Technol*, 15(4): 779-784.
- Williamson J.B.P. (1978). Topography of solid surfaces – an interdisciplinary approach to friction and wear. *NASA SP-181*: 85-142.
- Wood P.D., Evans H.E. ve Ponton C.B. (2011). Investigation into the wear behaviour of stellite 6 during rotation as an unlubricated bearing at 600 °C. *Tribol.Int.* 44: 1589-1597.
- Wood, P.D., Evans, H.E., Ponton, C.B. 2010. Investigation into the wear behavior of Triboloy 400 during rotation as an unlubricated bearing at 600 °C. *Wear*. 269:763-769.
- Woydt M. ve Habig K.H. (1989). High temperature tribology of ceramics. *Tribology International*. 22(2): 75-88.
- WSP 500 (1997). *Catalogue of Hardface Alloys*, Santa Fe Springs, CA, ABD.
- Yandouzi M., Sansoucy E., Ajdelsztajn L. ve Jodoin B. (2007). WC-based cermet coatings produced by cold spray dynamic and pulsed gas dynamic spraying processes. *Surf Coat Technol* 202: 382-390.
- Yang Q., Senda T., Kotani N ve Hirose A. (2004). Sliding wear behavior and tribofilm formation of ceramics at high temperatures. *Surface and Coatings Technology*. 184: 270-277.
- Zatorski R.A. ve Herman. H., (1991). *High Performance Ceramic Films and Coatings*. Elsevier, Amsterdam.

- Zhang D.B., vd. (2003) Measurements of the thermal gradient over EB-PVD thermal barrier coatings. *Vacuum* 70(1): 11-16.
- Zhang Z.G., Mia Q., Liang W.P., Yu X.S., Xu Y. ve Ren B.L. (2014). High temperature tribological behaviour of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coating on -TiAl. *Surface Engineering*. 30-11: 828-835.
- Zum Gahr K. H. (1987). *Microstructure and Wear of Materials*. Elsevier Science Ltd: New York.
- Zverina K. ve Vesely V. (1976). Materials used for Technologies of plasmatic spraying on the base of water stabilized plasma burners in *Proceedings of the 8th International Thermal Spray Conference*, American Welding Society, Florida, pp. 252-258.

## ÖZGEÇM

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Mecit Öge  
Doğum Yeri ve Tarihi : 17/04/1980 / SAKARYA

### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

- Bilimsel Faaliyet/Yayımlar : 1) Günen, A., Küçük, Y., Er, Y., Çay, V.V., Öge, M., Gök, M.S. (2015). Effect of the powder particle size on the wear behavior of boronized AISI 304 stainless steel. *Materials Testing* (57) 5: 468-473.
- 2) Küçük, Y., Karaoğlu, A.C., Gök, M.S., Öge, M., “7<sup>th</sup> Rencontres Internationales sur la Projection Thermique” konferansında, “An Alternative Ceramic coating material for APS applications Part I: Characterization and Oxidation behaviors”, Limoges, Fransa. Aralık, 2015.
- 3) Küçük, Y., Karaoğlu, A.C., Gök, M.S., Öge, M., “7<sup>th</sup> Rencontres Internationales sur la Projection Thermique” konferansında, “An Alternative Ceramic coating material for APS applications Part II Comparative Analysis of Dry sliding wear performance of FeCr slag coating with commercial Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13TiO<sub>2</sub> coatings”. Limoges, Fransa. Aralık, 2015.
- 4) Karaoğlu, A.C., Caliskan H., Öge, M., Doleker K.M, Hotamis M. “7<sup>th</sup> Rencontres Internationales sur la Projection Thermique” konferansında, “Comparison of tribological properties of HVOF sprayed coatings with different composition”. Limoges, Fransa. Aralık 2015.

- 5) Küçük Y., Gök M.S., Öge M. “APS yöntemi ile Biriktirilmiş  $Al_2O_3+13TiO_2$  Kaplamanın Yüksek Sıcaklık Aınma Davranışı”. Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı Kapadokya (IMSTEC’16), Nevşehir, Türkiye. 6-8 Nisan 2016,
- 6) Küçük Y., Gök M.S., Öge M. “APS yöntemi ile Biriktirilmiş  $Cr_2O_3$  Kaplamanın Yüksek Sıcaklık Aınma Davranışı”. Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı Kapadokya (IMSTEC’16), 6-8 Nisan 2016, Nevşehir, Türkiye.
- 7) Küçük Y., Gök M.S., Öge M. “Toz Boyutunun Oksit çerikli Seramik Kaplamanın Adeziv Aınma Davranışına Etkisi”. Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı Kapadokya (IMSTEC’16), 6-8 Nisan 2016, Nevşehir, Türkiye.

### **Deneyimi**

- Stajlar : Dursunolu Makine, 2007  
Kametsan, 2007
- Çalıştığı Kurumlar : Dursunolu Makine, Bursa, 2006-2008  
Federal Elektrik A.Ş., Adapazarı, Sakarya, 2010-2011  
Artinoks A.Ş. Bursa, 2011- 2012  
Binoks A.Ş. Bursa, 2012-2013  
Bartın Üniversitesi, Bartın, 2013-

### **İletişim**

E-Posta Adresi : mecitoge@bartin.edu.tr

**Tarih** : 29/06/2016 (Tez sınav tarihi)