

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

**PVD (FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME) YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ HİDROLİK
POMPA ELEMANLARININ AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN
Mehmet Yavuz BALALI

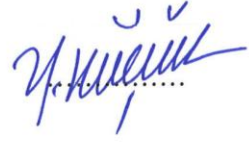
DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK

BARTIN-2014

KABUL VE ONAY

Mehmet Yavuz BALALI tarafından hazırlanan “PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) Yöntemi İle Kaplanmış Hidrolik Pompa Elemanlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” başlıklı bu çalışma 29/08/2014 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Yrd.Doç.Dr. Yılmaz KÜÇÜK (Danışman)



Üye : Doç.Dr.M. Sabri GÖK



Üye : Yrd.Doç.Dr. Mükremin YILMAZ



Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Doç.Dr. Selma ÇELİKAY
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Yrd.Doç.Dr. Yılmaz KÜÇÜK danışmanlığında hazırlamış olduğum " PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) Yöntemi İle Kaplanmış Hidrolik Pompa Elemanlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi " adlı Yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

23 / 08 / 2014

Mehmet Yavuz BALALI

ÖN SÖZ

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK'e ve hocam Sayın Doç.Dr.M. Sabri GÖK'e, deneysel çalışmalarında kullandığım numunelerin imalatında ve numune yüzey hazırlama işlemlerinde büyük emeği olan İsmail ALTINÇEKİÇ ve Ender KARAKAŞLI'ya, numunelerin ısıtım işlemlerini gerçekleştiren Er&mir Plazma A.Ş. Teknik Müdürü Makine Yüksek Mühendisi Dr. Ersin E. KORKMAZ'a, PVD kaplama işlemlerini gerçekleştiren Ionbond Tıncap A.Ş. Bursa Şubesi Müdürü değerli abim Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Özcan KARADAYI'ya, numune hazırlama sarf malzemelerinin temininde yardımlarını esirgemeyen Metkon Endüstriyel Cihaz San. ve Tic. A.Ş.'ye, deneysel çalışmalarında büyük emeği ve katkıları bulunan değerli arkadaşım Ar.Gör. Mecit ÖGE'ye, çalışmalarım boyunca manevi desteklerini hep arkamda hissettiğim Anneme, Babama ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu tez, Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2013.1.85 proje numarası ile desteklenmiştir.

Mehmet Yavuz BALALI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PVD (FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME) YÖNTEMİ İLE KAPLANMIŞ HİDROLİK POMPA ELEMANLARININ AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mehmet Yavuz BALALI

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr. Yılmaz KÜÇÜK

Bartın-2014, Sayfa:178

Bu çalışmada, dişli hidrolik pompa elemanlarının aşınma performanslarının ve kullanım ömürlerinin arttırılması amaçlanmaktadır. Bu maksatla dişli hidrolik pompa elemanlarının üretildiği 16MnCr5 semantasyon çeliği ve GGG55 sfero döküm malzemelerden yarı mamul numuneler imal edilmiştir. Yarı mamul numuneler ısıt işlemsiz, sementasyon ve plazma nitrürasyon ısıt işlemleri olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere, kaplamasız ve PVD Katodik Ark yöntemiyle TiN, CrN, TiAlN kaplamalar yapılarak mamul numuneler elde edilmiştir. Isıt işlemsiz/ısıt işlemleri, kaplamasız/kaplamalı numune kombinasyonları, bir deney düzeneği dahilinde laboratuvar ortamında tribolojik aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda numune kombinasyonlarının aşınma davranışları, aşınma miktarları ve aşınma tipleri değerlendirilerek, optimum aşınma ve ömür davranışlarını gösteren kombinasyonlar tespit edilmeye çalışılmıştır. Aşınma ve ömür davranışlarının arttırılmasına yönelik önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: PVD, Fiziksel Buhar Biriktirme, Hidrolik Pompa, Aşınma.

ABSTRACT

Master's Thesis

EFFECT OF PVD COATING METHOD ON WEAR PERFORMANCE OF HYDRAULIC PUMP COMPONENTS

Mehmet Yavuz BALALI

Bartın University

Institute of Science Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Asist.Prof.Dr. Yılmaz KÜÇÜK

Bartın-2014, Pp:178

The aim of this study was to increase the wear performance and lifetime of hydraulic gear pump components. For this purpose, semi-finished specimens were manufactured from 16MnCr5 case hardening steel and GGG55 nodular cast iron materials. Semi-finished specimens were prepared as a combination of heat treated (carburizing, plasma nitriding) and non-heat treated materials. Finished specimens comprised of TiN, CrN, TiAlN coated (via PVD Cathodic Arch Deposition method) and uncoated materials. Heat treated / non-heat treated, coated / uncoated combinations of specimens were subjected to in vitro tribological tests using a wear testing apparatus. After the tests wear behaviors, wear rates and wear types of specimen combinations were evaluated in an attempt to determine their optimum wear and lifetime behaviors. Suggestions were provided on how to increase the wear and lifetime behaviors.

Key Words: PVD, Physical Vapor Deposition, Hydraulic Pump, Wear.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
BEYANNAME.....	I
ÖN SÖZ.....	III
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
TABLolar LİSTESİ	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	XI
KISALTMALAR LİSTESİ.....	XV
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II LİTERARÜR TARAMASI.....	4
BÖLÜM III KAPLAMA YÖNTEMLERİ.....	6
3.1. PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) Yöntemi	9
3.1.1. Buharlaştırma İle PVD Kaplama Yöntemleri.....	13
3.1.1.1. Rezistansla Buharlaştırma	15
3.1.1.2. Endüktif Buharlaştırma	16
3.1.1.3. Elektron Demeti İle Ergitme Yöntemiyle Buharlaştırma	17
3.1.1.4. Lazer Yöntemiyle Buharlaştırma.....	18
3.1.1.5. Ark Yöntemi İle Buharlaştırma	19
3.1.2. Sıçratma İle PVD Kaplama Yöntemleri	23
3.1.2.1. Diyot Sıçratma	27
3.1.2.2. Triyot Sıçratma	29
3.1.2.3. Manyetik Sıçratma.....	30
3.2. PVD Tekniğinde Kullanılan Başlıca Kaplama Malzemeleri.....	32
3.2.1. TiN (Titanyum Nitrür) Kaplama	33
3.2.2. TiCN (Titanyum Karbo Nitrür) Kaplama.....	33
3.2.3. TiAlN (Titanyum Alüminyum Nitrür) Kaplama.....	34
3.2.4. CrN (Krom Nitrür) Kaplama	34
3.2.5. ZrN (Zirkonyum Nitrür) Kaplama.....	35
BÖLÜM IV İNCE FİLMLEİN ÇEKİRDEKLENME MEKANİZMALARI.....	36
BÖLÜM V SÜRTÜNME VE AŞINMA MEKANİZMALARI.....	42
5.1. Triboloji.....	42

5.2.	Sürtünme.....	46
5.3.	Aşınma ve Aşınma Mekanizmaları	55
5.3.1.	Abrazif Aşınma	59
5.3.2.	Erozif Aşınma.....	64
5.3.3.	Adezif Aşınma.....	67
5.3.4.	Yüzey Yorulması.....	70
5.3.5.	Korozyon	74
5.3.6.	Kazımalı Aşınma	75
5.4.	Aşınmanın Ölçülmesi	76
5.5.	Aşınma Ölçme Yöntemleri.....	77
5.5.1.	Ağırlık Farkı Metodu.....	77
5.5.2.	Kalınlık Farkı Metodu	79
5.5.3.	İz Değişim Metodu	80
5.5.4.	Radyoizotop Metodu	81
5.6.	Model Deney Yöntemleri ve Aşınma Test Deney Düzenekleri	81
5.6.1.	Pim-Disk Cihazı	84
5.6.2.	Levha-Kayış Cihazı	85
5.6.3.	Dört Bilye Cihazı.....	86
5.7.	Aşınma Testlerinin Değerlendirilmesi.....	87
BÖLÜM VI ISIL İŞLEMLER.....		90
6.1.	Sementasyon.....	90
6.1.1.	Katı Karbon Verici Ortamda Sementasyon İşlemi	91
6.1.2.	Sıvı Ortamda Sementasyon İşlemi	92
6.1.3.	Gaz Ortamda Sementasyon İşlemi	93
6.1.4.	Sementasyon Uygulanmış Parçalara Su Verilmesi	93
6.1.5.	Sementasyon Uygulanmış Parçaların Temperlenmesi	94
6.2.	Nitrürasyon (Nitrürleme).....	94
6.2.1.	Gaz Nitrürleme	95
6.2.2.	Banyo Nitrürleme	95
6.2.3.	Plazma Nitrürleme.....	96
BÖLÜM VII DENEYSEL ÇALIŞMA		98
7.1.	Numunelerin Hazırlanması.....	98
7.1.1.	Numunelerin İmalatı.....	98
7.1.2.	Numunelerin Kaplanması.....	102

7.2.	Deney Tasarımı.....	107
7.3.	Aşınma Deneyi	109
BÖLÜM VIII DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA		110
8.1.	Aşınma Sonuçları	110
8.1.1.	Nitrürasyon İşleminin Etkisi.....	110
8.1.2.	TiN Kaplamanın Aşınma Davranışı	125
8.1.3.	CrN Kaplamanın Aşınma Davranışı.....	139
8.1.4.	TiAlN Kaplamanın Aşınma Davranışı	153
8.2.	Varyans Analizi ve Doğrulama Deneyi.....	167
BÖLÜM IX SONUÇ ve ÖNERİLER		170
9.1.	Sonuçlar.....	170
9.2.	Öneriler.....	172
ÖZ GEÇMİŞ.....		174
KAYNAKLAR.....		175

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo	Sayfa
No	No
1. Bazı ince sert film kaplamaları ve özellikleri.....	32
2. Titanyum nitrür kaplamanın özellikleri.....	33
3. Titanyum karbo nitrür kaplamanın özellikleri.....	34
4. Titanyum alüminyum nitrür kaplamanın özellikleri.....	34
5. Krom nitrür kaplamanın özellikleri	35
6. Zirkonyum nitrür kaplamanın özellikleri	35
7. Sementasyon nüfuziyet derinlikleri.....	92
8. Sementasyon işlemi banyo bileşimleri, ağırlık oranları ve kullanılan sıcaklıklar	92
9. Siyanür banyolarında, sıcaklık ve zamanın sementasyon derinliğine etkisi.	93
10. Yarı mamul numunelerin kimyasal analizleri	98
11. Sementasyon parametreleri	100
12. Nitrürasyon parametreleri.....	100
13. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı özellikleri.....	101
14. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları.....	101
15. Sertlik ölçüm cihazı özellikleri.....	102
16. Numune sertlik ölçüm sonuçları.....	102
17. Numune yüzeyi iyon bombardımanı işlem parametreleri	103
18. Numune kaplama işlem parametreleri.....	104
19. Nanoindentasyon sertlik değerleri	106
20. Deney parametreleri ve düzeyleri.....	107
21. Deney tasarım matrisi.....	108
22. Kaplamasız ve nitrürsüz 7131 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı	110
23. Azalan devir sayısının kaplamasız ve nitrürsüz 7131 numunede kütle kaybına etkisi	113
24. Kaplamasız ve nitrürlü 7131 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı	115
25. Kaplamasız ve nitrürsüz GGG55 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı.....	118
26. Kaplamasız ve nitrürlü GGG55 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı.....	122
27. TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı.....	125
28. TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı.....	128
29. TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı.....	132
30. TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı	135
31. CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı	139

32. CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı	142
33. CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı.....	146
34. CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı.....	149
35. TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı.....	153
36. TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı.....	156
37. TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı	160
38. TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunesi deney parametreleri ve kütle kaybı	164
39. Varyans analiz sonuçları.....	168
40. Deneylerdeki ana parametrelerin sinyal gürültü (S/N) oranları	168

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil No	Sayfa No
1. Klasik dıştan düz dişli tip pompa ve çalışma prensibi.....	1
2. Gerçek çalışma şartlarında aşınmaya maruz kalan hidrolik dişli pompa gövdesi	2
3. Gerçek çalışma şartlarında aşınmaya maruz kalan hidrolik dişli pompa dişlisi.....	2
4. Kaplama malzemenin bulunduğu fiziksel hale göre kaplamaların sınıflandırılması	7
5. Farklı yüzey kaplama yöntemlerinin uygulama kalınlıkları.....	8
6. PVD laboratuvarı ve üretim tesisi	11
7. Fiziksel buhar biriktirme tekniklerinin sınıflandırılması.....	12
8. Buharlaştırma yönteminin şematik gösterilişi	13
9. Rezistanslı ısıtıcı sistemli PVD sistemi	16
10. Endüktif ile buharlaştırma yöntemi.	17
11. Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi.	18
12. Katodik ark PVD sistemi.....	19
13. Ark oluşum mekanizması.....	20
14. Sıçratma mekanizması.....	24
15. Sıçratma mekanizması.....	26
16. Sıçratma yönteminin şematik gösterimi	26
17. Diyot sıçratma sistemi	28
18. Triyot sıçratma sistemi.	29
19. Manyetik sıçratma işlemi.....	31
20. Üç temel çekirdeklenme modeli	38
21. Metal ve oksitler için elektron ışınli buharlaştırmada, taban malzemesi sıcaklığının bir fonksiyonu olarak kalın kaplama yapısı modeli	40
22. Tribolojik sistemin elemanları.....	42
23. Tribolojik sistemlerin kinematikleri	43
24. Şematik yüzey mikro yapısı	48
25. Sürtünme esnasındaki gerçek temas noktaları.....	49
26. Statik ve kinetik sürtünme katsayıları	49
27. Metal yüzeyindeki pürüzlerin birbirine teması.....	50
28. Statik ve kinetik sürtünme katsayısının farklılığı	51
29. Atomik boyutta sürtünme	52
30. Sürtünmenin çeşitleri.....	52

31. Sürtünme ölçümü için basit sistem.....	54
32. Aşınma safhaları.....	57
33. Aşınmanın sınıflandırılması	59
34. Abrasif aşınma mekanizması.....	60
35. Abrazif aşınma.....	60
36. İki elemanlı abrasyon.....	61
37. Üç elemanlı abrasyon	61
38. Abrazif aşınma mekanizmaları.....	62
39. Abrazif aşınma test cihazı modelleri	63
40. Erozif aşınma.....	64
41. Erozif aşınma mekanizmaları	64
42. Aşındırıcı parçacık çarpma hızının erozyona etkisi.	65
43. Malzeme karakteristikleri ve erozyon parametrelerinin erozyona etkisi.....	66
44. Erozif aşınma test cihazı modelleri	66
45. Adezif aşınma.....	68
46. Adezyon (yapışma) sırasındaki metal transferi	69
47. Malzeme yüzeyindeki adezyon çizikleri.	70
48. Sonsuz dişlideki yorulma aşınması	71
49. Yüzey yorulmasında çatlağın oluşumu ve ilerlemesi.....	71
50. Küçük temas yüzeyi sonucu oluşan hertz basınçları	72
51. Yorulma sonucu yüzeyde çatlak oluşumu ve büyümesi.....	73
52. Korozif aşınmanın gelişimi	75
53. Aşınmayı ölçmek için profilometre yöntemi.....	79
54. Aşınmayı ölçmede çukur teşkil etme yöntemi	80
55. Model deney sistemleri.....	84
56. Pim-disk cihazının şematik görünümü.	85
57. Levha-kayış cihazının şematik görünümü	86
58. Dört bilye cihazının şematik görünümü	86
59. Tribolojik sistem elemanları ve tribolojik sisteme ait giriş ve çıkış büyüklükleri	89
60. Sürtünme ve aşınma testleri için rapor örneği.....	89
61. Isıl işlem yöntemleri	90
62. TiN kaplamaya ait SEM mikrografı	104
63. CrN kaplamaya ait SEM mikrografı.....	105
64. TiAlN kaplamaya ait SEM mikrografı	105

65. CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numune üzerinde yapılan indentasyon işlemi	106
66. TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune üzerinde yapılan indentasyon işlemi.....	107
67. Pin on disk cihazına ait bir görünüm	109
68. Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K1).....	111
69. Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K1).....	112
70. Kaplamasız nitrürsüz 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K1).....	112
71. Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K2).....	114
72. Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K2).....	114
73. Kaplamasız nitrürsüz 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K2).....	115
74. Kaplamasız nitrürlü 7131 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K3).....	116
75. Kaplamasız nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K3).....	117
76. Kaplamasız nitrürlü 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K3)	118
77. Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K17).....	119
78. Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K17).....	120
79. Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K17)	121
80. Kaplamasız nitrürlü GGG55 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K20)	122
81. Kaplamasız nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K20)	124
82. Kaplamasız nitrürlü GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K20)	124
83. TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K7)	126
84. TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K7)	127
85. TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K7).....	128
86. TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K6).....	129
87. TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K6)	130
88. TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K6).....	131
89. TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K24).....	132
90. TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K24). 134	
91. TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K24).....	135
92. TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K22).....	136
93. TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K22)... 138	
94. TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K22)	138
95. CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K11).....	140
96. CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K11).....	141
97. CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K11)	142
98. CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K9).....	143

99. CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K9)	144
100. CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K9)	145
101. CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K27)	146
102. CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K27)	148
103. CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K27).....	149
104. CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K25)	150
105. CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K25) ..	152
106. CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K25).....	152
107. TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K16)	154
108. TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K16) .	155
109. TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K16).....	156
110. TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K13).....	157
111. TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D görüntüsü (K13) ...	159
112. TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K13).....	159
113. TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K31).....	161
114. TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune aşınma izinin 3D görüntüsü (K31)	163
115. TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K31) ..	163
116. TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait 2D aşınma izi profili (K29).....	164
117. TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune aşınma izinin 3D görüntüsü (K29).....	166
118. TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K29)	167

KISALTMALAR LİSTESİ

FBB	: fiziksel buhar biriktirme
PVD	: physical vapour deposition
CVD	: chemical vapour deposition
IBAD	: iyon demeti destekli biriktirme
DIN	: alman standart enstitüsü - alman çelik normu
BİAS	: hızlandırma voltajı
Ti	: titanyum
TiN	: titanyum nitrür
TiC	: titanyum karbür
TiB	: titanyum borür
TiB ₂	: titanyumdi borit
TiCN	: titanyum karbo nitrür
TiBN	: titanyum bor nitrür
TiAlCN	: titanyum alüminyum karbo nitrür
TiSiCN	: titanyum silisyum karbo nitrür
TiZrN	: titanyum zirkonyum nitrür
TiAlN	: titanyum alüminyum nitrür
CrN	: krom nitrür
CrCN	: krom karbo nitrür
Cr-AlN	: krom-alüminyum nitrür
MoV	: molipden volfram
MoS ₂	: molibden sülfür
MoS ₂ -Ti	: molibden sülfür - tiyanyum
ZrN	: zirkonyum nitrür
ZrB	: zirkonyum borür
ZrO ₂	: zirkonyum oksit
NbN	: niyobyum nitrür
WC/Co	: tungsten karbür-kobalt
BN	: bor nitrür
Al	: alüminyum
Cu	: bakır

Ag	: gümüş
Pb	: kurşun
Al ₂ O ₃	: alüminyum oksit
CO ₂	: karbondi oksit
CO	: karbon monoksit
NH ₃	: amonyak
NaCN	: sodyum siyanür
KCN	: potasyum siyanür
Fe ₂₋₃ N	: demir nitrür
SiC	: silisyum karbür
µm	: mikron metre (1µm=10 ⁻⁶ m)
µs	: statik sürtünme katsayısı
µk	: kinetik sürtünme katsayısı
τ _a	: kayma gerilmesi (N/mm ²)
a	: temas alanı (mm ²)
°C	: santigrat derece
Toor (1 mmHg)	: basınç (1,3332×10 ⁻³ bar)
V	: volt
kV	: kilo volt
eV	: elektron volt
A	: amper
>	: büyük
Å	: angstrom (1Å=10 ⁻¹⁰ m =10 ⁻⁴ µm)
N	: newton
mm	: milimetre
d.c.	: doğru akım
r.f.	: alternatif akım
Pa	: paskal
kΩ	: kilo ohm (10 ³ .kg.m ² .s ⁻³ .A ⁻² =10 ³ .V.A ⁻¹)
F	: kuvvet
F _s	: sürtünme kuvveti

F_N	: normal kuvvet
J	: joule ($\text{kg.m}^2.\text{s}^{-2}$)
KrF	: krypton floride
KGDD	: küresel grafitli dökme demir
HSS	: yüksek hız çeliği (high speed steel)
SEM	: taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope)
T	: taban malzemesi sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)
T_m	: buharlaşan malzemenin ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)
T_1	: birinci bölge
T_2	: ikinci bölge
T^+, T^{+2}, T^{+3}	: farklı yüklerde iyonlar
HV	: hardness vickers
HB	: hardness brinell
PH	: çözeltinin asitlik veya bazlık derecesini tarif eden ölçü birimi
E_a	: taban malzemesi adsorbsiyon enerjisi
E'_a	: biriktirilen atomların üst katmanındaki adsorbsiyon enerjisi
E_2	: adsorbe olan iki atom arasındaki bağ enerjisi
R	: çarpma hızı
r	: radyal mesafe
N_O	: taban malzemesi yüzeyindeki muhtemel bölge sayısı
D	: yüzey difüzyon katsayısı
W_a	: aşınma oranı ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)
W_r	: aşınma direnci ($\text{N.m} / \text{mm}^{-3}$)
V_s	: bir km aşınma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı (μm)
$\Delta G, G$	: ağırlık kaybı (mg)
M	: yükleme ağırlığı (N)
S	: aşınma yolu (m)
F	: aşınma yüzeyi (cm^3)
d	: malzeme yoğunluğu (g/cm^3)
R_a	: yüzey pürüzlülük parametresi (ortalama pürüzlülük, μm)

R_z	: yüzey pürüzlülük parametresi (ortalama pürüzlülük derinliği, μm)
R_q	: yüzey pürüzlülük parametresi (aritmetik ortalamanın karekökü, μm)
R_t	: yüzey pürüzlülük parametresi (en derin çukurdan en yüksek tepeye olan dik uzaklık, μm)
R_y	: yüzey pürüzlülük parametresi (μm)
CNC	: bilgisayarlı sayısal kontrol
h	: aşınma derinliği
h_{bef}	: izin ilk derinliği
h_{aft}	: izin aşınma sonrası derinliği
d_{bef}	: izin ilk çapı
d_{aft}	: izin aşınma sonrası çapı
θ	: izin yatayla yaptığı meyil açısı
α	: yüklü parçacık
$\varnothing$	: çap

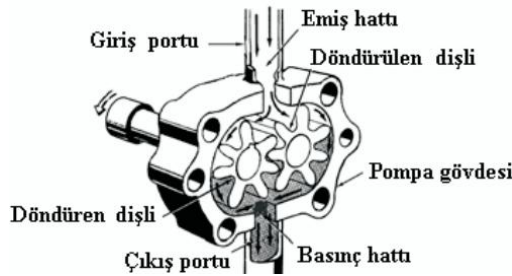
BÖLÜM I

GİRİŞ

Bilimsel çalışmalarda ve sanayi uygulamalarında kaplama yöntemlerinin önemi hızla artmaktadır (Kaya, 1998, 1). Tribolojik temas şartlarının iyileştirilmesi, aşınma ve korozyon kayıplarının azaltılması maksadıyla yüzeylerin çeşitli malzemeler ile kaplanması uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir. Yüzey kaplama yöntemlerindeki gelişmeler kaplamaların yapı, bileşim ve özelliklerinin ihtiyaçlar doğrultusunda değiştirilebilmesine ve yüksek kaliteli kaplamaların üretilmesine imkân sağlamıştır (Savaş, 2004, 20).

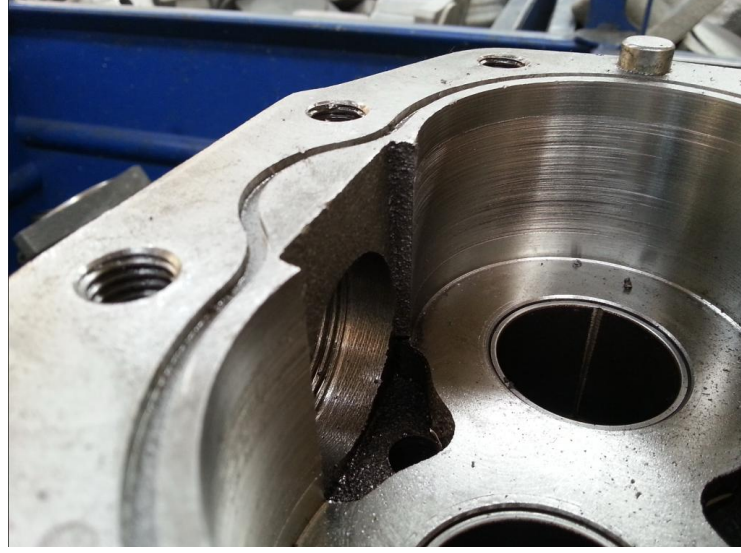
Bu çalışma ile; PVD yöntemi kullanılarak kaplanan hidrolik pompa elemanlarının aşınma dayanımlarının, dolayısıyla çalışma ömürlerinin artırması hedeflenmiştir. Çalışma konusunun belirlenmesi aşamasında, hidrolik dişli pompa üretimi yapan bazı firmalar ile yapılan görüşmelerde hidrolik dişli pompaların ağır yükleme şartlarında çalıştığı, buna bağlı olarak pompa elemanlarında aşınma problemlerinin olduğu, bu problemlerin pompa çalışma ömürlerini olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Söz konusu firmalarca yapılan konstrüksiyon iyileştirme çalışmalarının (malzeme, ısıtma işlemi, çalışma boşluğu vb.) mevcut aşınmayı giderme yolunda olumlu bir sonuç vermediği gözlemlenmiştir.

Hidrolik dişli pompalarda, pompa gövdesi içerisindeki büyük yüzey alanları, yüksek çalışma basıncıyla birlikte büyük eksenel ve radyal kuvvetlere sebep olmaktadır. Bu tip pompaların pozitif iletimli oluşu sebebiyle pompa gövdesi ve dişlileri aynı anda farklı hidrolik basınçlara ve buna bağlı kuvvetlere maruz kalmaktadır (Çelik, Uçar ve Cengiz, 2007,16). Klasik dıştan düz dişli pompanın şematik görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: Klasik dıştan düz dişli tip pompa ve çalışma prensibi (Çelik, Uçar ve Cengiz, 2007,16).

GGG55 Sfero döküm (küresel grafitli) malzemeden imal edilmiş ve gerçek çalışma şartlarına maruz bırakılmış dişli pompa gövdesindeki aşınmayı gösteren fotoğraf Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2: Gerçek çalışma şartlarında aşınmaya maruz kalan hidrolik dişli pompa gövdesi.

Şekil 2 incelendiğinde, pompa gövdesi iç yüzeyinde aşınma profilinin abrasif aşınma sonucu oluşmuş olabileceği, ayrıca aşınmada üç cisimli aşınmanın aşındırma mekanizmasını etkilemiş olabileceği değerlendirilmiştir. 7131 (16MnCr5) sementasyon çeliğinden imal edilmiş ve gerçek çalışma şartlarına maruz bırakılmış pompa dişlisindeki aşınmayı gösteren fotoğraf Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3: Gerçek çalışma şartlarında aşınmaya maruz kalan hidrolik dişli pompa dişlisi.

Şekil 3 incelendiğinde, dişli diş üstü yüzeyinde de aşınma mekanizmasının gövdeye benzer biçimde çalıştığı gözlemlenmiştir.

Söz konusu aşınma sorunlarını ortadan kaldırmak maksadıyla, gövde ve dişli malzemelerinden numuneler hazırlanmış, farklı ısıl işlem ve kaplama kombinasyonları uygulanan numuneler laboratuvar ortamında aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Hidrolik pompa elemanlarının servis şartlarında maruz kaldığı elastik ve dinamik zorlanmaların etkisinin basınç esaslı simülasyonu yapılarak ve literatürde yapılan çalışmalar dikkate alınarak, aşınma test parametreleri belirlenmiştir. Tahmin edilen aşınma mekanizmalarının simülasyonu, pin on disk aşınma test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Müteakiben optik profilometre yardımıyla 2D (2 boyutlu) ve 3D (3 boyutlu) aşınma izi profilleri çıkarılmış ve buna bağlı olarak volümerik aşınma miktarları hesaplanmıştır. PVD kaplama kalınlıkları nanoindentasyon yöntemiyle ölçülmüştür. Volümerik aşınma miktarları, 2D ve 3D aşınma izi profilleri ve aşınma izi SEM görüntülerinden yararlanılarak deney sonuçları değerlendirilmiştir.

BÖLÜM II

LİTERARÜR TARAMASI

Kaya (1998) yaptığı çalışmada PVD yöntemiyle hazırladığı TiN ince filmlerin temel karakteristiklerini incelemiştir. İzçiler ve Öcal (2001), çalışmalarında Taylor Hobson Talysurf sistemini ve Abbot eğrisini esas almışlar, yüzey topografyasına bağlı olarak aşınmanın ölçümüne ilişkin hesaplamalar yapmışlardır. Savaş (2004), yaptığı çalışmada PVD yöntemiyle kaplanmış S6-5-2 yüksek hız çeliğinin aşınma davranışlarını incelemiştir. Demiral ve Yasar (2006), bir pin-on-disk cihazı tasarlayarak imal etmişler, bu cihaz ile C95200 ve C95300 alüminyum bronzlarının aşınma özelliklerini incelemiştir. Okay (2006), yaptığı çalışmada PVD yöntemi ile TiN kaplı östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin adhesif aşınma davranışlarını incelemiştir. Türküz (2006), PVD yöntemiyle yapılan ZrN ince film kaplamanın kaplama parametrelerini inceleyerek optimize etmeye çalışmıştır. Belevi ve Eş (2007), 16MnCr5'ten yapılmış silindirlerin kaymalı yuvarlanma koşullarında aşınma karakteristiklerini incelemiştir. Çakan, Özkaner ve Yıldırım (2007), yaptıkları çalışmada TiCN kaplamalı AISI 1070 çeliği kesici takımlarda farklı kesme koşullarında oluşan kuvvet değişimlerini incelemiştir. Çelik, Uçar ve Cengiz (2007), bir dişli pompa gövdesini pompa karakteristiklerine bağlı parametreler ile 3 boyutlu modelleyerek, sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme-deformasyon analizlerini yapmışlar, böylece pompa gövdesi cidar kalınlığını optimize etmişlerdir. Çetin ve Gül (2007), kuru kayma şartlarında matris yapısının küresel grafitli dökme demirin sürtünme katsayısına ve pim sıcaklığına etkisini araştırmışlardır. İnçal (2007), yaptığı çalışmada PVD yöntemiyle kaplanan HSS takım çeliklerinin karakterizasyonunu ve aşınma davranışlarını incelemiştir. Büyükkelleci (2008), yeni bir aşınma test cihazı tasarlayarak, Ni, Cu ve Ti esaslı alaşımların aşınma davranışlarını incelemiştir. Düzcükoğlu ve Demirci (2008), yaptıkları çalışmada östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışlarını incelemiştir. Kalkan (2008), PVD yöntemi ile TiN, CrN ve CrN/TiN kaplanmış, plazma nitrürasyon yapılmış ve kaplanmamış DIN 1.2379 Soğuk İş Takım Çeliğinin aşınma performanslarını incelemiş, ayrıca gerçek üretim ortamında alüminyum ekstrüzyon erkek kalıbını PVD yöntemiyle kaplayarak, hali hazırda kullanılan sertleştirilmiş erkek kalıp ile aşınma ve üretim performanslarını kıyaslamıştır. Şafak (2008), yaptığı çalışmada bir pin on disk aşınma test cihazı tasarımı ve imalatının

yanısıra, PVD yöntemiyle kaplanan çeşitli numunelerin sürtünme-aşınma testlerini gerçekleştirerek, kaplamanın malzemenin yüzey karakteristiğine etkilerini araştırmıştır. Kara (2009), yüzeyi ince film kaplanmış 100Cr6 çeliğinin çeşitli ortamlardaki sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemiştir. İşler (2010), yaptığı çalışmada çeliğin yarı-katı halde şekillendirilmesinde kullanılacak kalıpları PVD yöntemiyle kaplayarak kaplama performanslarını incelemiştir. Öztürk (2010), kaplamasız ve PVD tekniği ile TiN ve CrN kaplamalı AISI 3343 kalıp zimbalarının aşınma davranışlarını incelemiştir. Ekinci ve Akdemir (2011), yaptıkları çalışmada nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğine uygulanan yükün aşınma hızına etkisini araştırmışlardır.

BÖLÜM III

KAPLAMA YÖNTEMLERİ

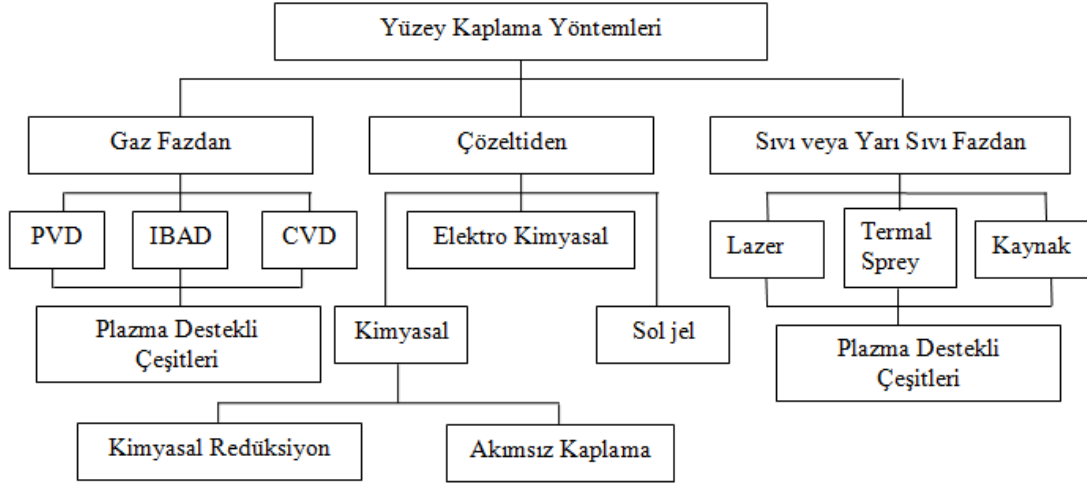
Günümüz teknolojisinde, tek bir malzemedan karşılanamayan özelliklerin kombinasyonuna sahip malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır (Türküz, 2006, 3). Bu amacı gerçekleştirebilmek maksadıyla kaplama tekniklerinden yararlanılmaktadır (Türküz, 2006, 3).

İlk ince film, 1838'de “elektroliz” yöntemi ile elde edilmiştir. Bunsen, 1852'de “kimyasal reaksiyon” yöntemiyle, Faraday “asal gaz içerisinde buharlaştırma” yöntemiyle, Nahrwold ve Kundt “Joule ısıtması” yöntemiyle yine ince film elde etmişlerdir. Vakum cihazlarının gelişimine kadar olan süreçte ince filmler üzerinde yapılan çalışmalar, laboratuvar çalışmaları düzeyinde kalmıştır. Vakum cihazları geliştirildikten sonra modern yöntemlerle üretilen ince filmlerin kristal yapıları, elektriksel ve optik özellikleri araştırılmaya başlanmıştır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 390).

Kaplama proseslerinin temelde iki amacı mevcuttur. Bunlardan birincisi malzeme yüzeyinin aşınma direncini arttırmak, ikincisi sürtünme davranışını azaltmaktır (Alsaran vd., 2002, 3).

Bir kaplama işleminin başarısı, kaplama ve altlık (taban) malzeme arasındaki yapışmaya bağlıdır. Yapışmanın iyi oluşu, kaplanmış parçanın aşınma ve korozyon dayanımını iyileştirir (Alsaran vd., 2002, 4).

Malzeme yüzeylerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesine olanak sağlayan kaplama yöntemleri, kaplama malzemesinin bulunduğu fiziksel hale göre, gaz halinden, çözeltiden, sıvı veya yarı sıvı halden yapılan kaplamalar olarak ana başlıklara ayrılır. Bu yöntemlerde kendi aralarında çeşitli alt gruplara ayrılmaktadır. Kaplama malzemesinin bulunduğu fiziksel hale göre kaplamaların sınıflandırılması Şekil 4'te verilmiştir (Doğan, 2001, 42).



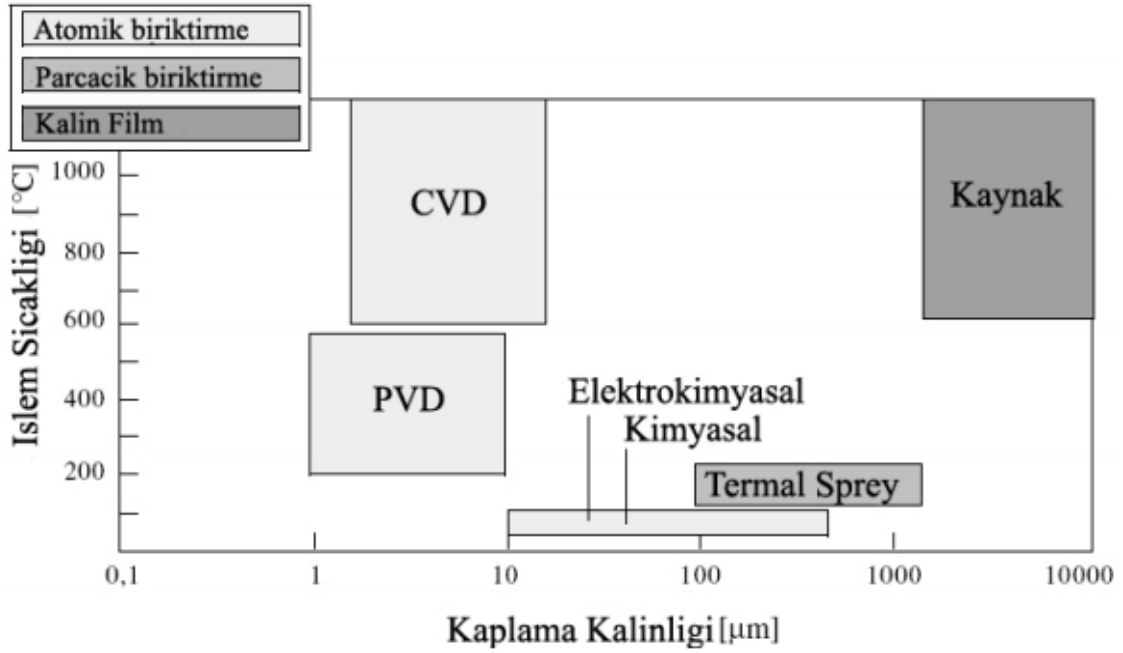
Şekil 4: Kaplanacak malzemenin bulunduğu fiziksel hale göre kaplamaların sınıflandırılması (Şafak, 2008, 46).

Buhar fazında yapılan kaplama teknikleri, altlık malzemesine veya kaplamaya herhangi bir sınırlama getirmeden yüksek kalitede kaplamalar elde etmeyi sağlamaktadır. Buhar fazında yapılan kaplama teknikleri; kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapour Deposition - CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapour Deposition - PVD) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 391).

Kaplama proseslerinden PVD ve CVD' yi kapsayan buhar proseslerinde, buharın kinetik enerjisinden yararlanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir (Alsaran vd., 2002,3).

Gaz halinden yapılan kaplama tekniklerinden olan PVD (fiziksel buhar biriktirme) ve CVD (kimyasal buhar biriktirme) teknikleri endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanlarına sahiptir. Diğer yöntemlere göre daha düşük işlem sıcaklıklarında yapılabilmesi ve geniş kaplama kalınlık aralıklarında kaplamaların elde edilebilmesi, PVD yöntemine daha geniş kullanım alanları sunmaktadır (Doğan, 2001, 42).

Çeşitli kaplama yöntemlerinin uygulama alanlarını belirleyen iki parametreden birincisi kaplama işleminin yapıldığı sıcaklık, ikincisi kaplama işlemi sonrası elde edilebilecek kaplama kalınlık aralığıdır (Doğan, 2001, 42-43). Çeşitli kaplama teknikleri için işlem sıcaklıkları ve elde edilebilecek kaplama kalınlıkları Şekil 5'te ayrıntılı olarak verilmektedir.



Şekil 5: Farklı yüzey kaplama yöntemlerinin uygulama kalınlıkları (Şafak, 2008, 46).

Yüzeye uygulanan kaplamalar, kaplamanın kalınlığına göre, ince film kaplamalar ve kalın film kaplamalar olarak ikiye ayrılır. İnce film kaplamalar, kalınlıkları 1-10 μm arasında olan kaplamalardır. Bu kaplamaların birikmesi atomal düzeyde gerçekleşmektedir. Kalın film kaplamalarda ise birikme büyük kütlelerin transferi ile gerçekleşmektedir (Şafak, 2008, 47).

CVD (kimyasal buhar biriktirme) prosesinde, sıcak taban malzemesi yüzeyi üzerinde atomistik olarak kaplama oluşturabilmek için, termal olarak ayrışabilen veya diğer gaz ya da buharlarla kimyasal olarak reaksiyona girebilen, buharlaşabilen bir kaplama malzemesi bileşeni kullanılmaktadır. Genellikle kimyasal reaksiyonlar, 150-2200 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında ve yaklaşık olarak 0,5 torr'dan atmosfer basıncına kadar değişebilen bir basınç aralığında meydana gelmektedir. CVD kaplamalar nispeten iyi yapışma göstermektedirler. İşlem sırasında yüksek taban malzemesi sıcaklıklarının (1000-1200 $^{\circ}\text{C}$) gerekmesi, bu tekniğin uygulamalarını yüksek sıcaklıklara dayanabilen taban malzemeleri ile sınırlandırmaktadır. Ayrıca bu yüksek sıcaklıklar, taban (altlık) malzemenin özellikleri ve yapısında değişimlere sebep olabilmektedir. Hâlbuki PVD prosesinde, taban malzemesi daha düşük sıcaklıklara (200-600 $^{\circ}\text{C}$) maruz kalmaktadır (Sert vd., 2002, 48-58).

3.1. PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) Yöntemi

PVD kaplama teknolojisi 19'uncu yüzyılın başlarından beri bilinmesine rağmen, ancak son yıllarda kendisine endüstride bir yer bulabilmiştir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 391). II. Dünya savaşı yıllarında vakum teknolojisinde elde edilen gelişmeler neticesinde PVD tekniği, endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır (Doğan, 2001, 44).

1850 yılında Faraday'ın metalleri vakum altında buharlaştırarak ürettiği kaplamalar, PVD yönteminin ilk uygulaması olarak kabul edilebilir. 1988 yılında Kundt bu yöntem ile üretilmiş ince filmlerin yansıtma özellikleri üzerine bir takım çalışmalar yapmıştır. Bunu takip eden yıllarda ise ince metal film tabakaların kinetiği, gazların difüzyonu ve gaz-metal reaksiyonları üzerine bir takım akademik çalışmalar yapılmıştır. (Doğan, 2001, 43-44).

PVD yönteminin keşfi ile taban malzemenin mukavemeti değiştirilmeksizin genellikle takım çelikleri üzerine kaplama yapma imkânı elde edilmiştir. (Alsaran vd., 2002, 1). 1979 yılında Balzers tarafından ticari amaçlı ilk PVD takım kaplama uygulaması gerçekleştirilmiştir. İlk olarak bir HSS matkap ve kılavuz takımı kaplanmış, yöntemin uygulanışı daha sonra diğer takımlara da yaygınlaştırılmıştır (Kıyak vd., 2003, 117).

PVD yöntemiyle, hemen hemen her metal, alaşım, seramik, metaller arası ve bazı polimerik malzemeler ile bunların karışımları, vakumdaki çalışma sıcaklıklarında kararlı olan hemen hemen her malzemedan (metaller, seramikler, plastikler ve kağıt gibi) üretilmiş taban malzemeleri üzerine kolaylıkla kaplanabilmektedir (Savaş, 2004, 22). PVD kaplamalar düşük sıcaklıklarda (50-500 °C) yapıldığı için altlık (taban) malzemesinin mekanik özellikleri ve mikro yapısı etkilenmez (Alsaran vd., 2002, 3).

Bu tekniğin mekanizması,

- a. Vakumlu ortamda, bir ısıtıcı ile buharlaştırılan kaplama malzemesinin kaplanacak olan malzeme üzerinde ince bir film katmanı halinde biriktirilmesi,
- b. Katı haldeki ham maddenin yüksek enerji ile iyonlaştırılmış ve reaktif gazlarla oluşturulmuş plazma haline getirilerek ve kontrollü olarak kaplanacak malzemenin üzerine yapıştırılması işlemi olarak özetlenebilir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 391).

PVD tekniğinin avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- a. Hemen hemen her kaplama, her taban malzemesi üzerine biriktirilebilir. Teorik olarak her çeşit metal, alaşım, seramik ve polimer kaplamaları elde etmek mümkündür.
- b. Kaplamalar mükemmel yapışma özelliğine sahiptir.
- c. Oldukça geniş biriktirme hız aralığına sahiptir ve yüksek hızda üretim yapılabilir.
- ç. Kaplama işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğü, altlık malzemesi yüzey pürüzlülüğü ile hemen hemen aynı olduğundan, kaplama sonrası zımparalama ve parlatma gibi herhangi bir yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulmaz.
- d. Hiçbir PVD prosesi, çevreye zararlı zehirli atıklar üretmez.
- e. Kontrollü vakum ortamı ve saf kaynak kaplama malzemelerinin kullanımı, yüksek saflıkta birikimlerin elde edilmesine olanak sağlar.
- f. Prosesin nispeten düşük sıcaklıklarda yapılabilmesi, ısıl işlem görmüş takım çeliklerinin sertlik kaybını önler.
- g. Kompleks geometrilere sahip parçaların, döner mekanizmalarda homojen olarak kaplanabilmesi mümkündür ve kaplama kalınlığının düşük olması sebebiyle (1-5µm) parça toleranslarının muhafaza edilmesine olanak sağlar.
- ğ. Kesici takımlar, keskin köşe ve uçlarının özellikleri bozulmadan kaplanabilirler. Ayrıca takımlar ve kalıplar bilendikten sonra tekrar kaplanabilirler.
- h. PVD kaplamaların sökülerek tekrar kaplama yapılabilmesi imkânı mevcuttur (Savaş, 2004, 22-23).

PVD tekniğinin uygulama alanları şu şekilde sıralanabilir:

- a. Tribolojik uygulamalar: Kesici takımlarda, kalıplarda, kayma veya dönme hareketi yapan ve yüksek aşınma direnci gerektiren makine parçalarında (Savaş, 2004, 23),
- b. Elektrik - elektronik amaçlı: yarı iletkenlerde, hibrit devrelerde, kapasitörlerde, dirençlerde, süper iletken kaplama yapımında, piezzo elektrik sürücülerde (Şafak, 2008, 44),
- c. Optik amaçlı: yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan camlarda, gözlük camlarında, büyük projektörlerde, kamera lenslerinde, optik disklerde (Şafak, 2008, 44),
- ç. Kimyasal uygulamalar: Gaz türbin motorlarında, denizcilik uygulamalarında, korozyona karşı dirençli olması istenilen parçalarda (Savaş, 2004, 23),

d. Dekoratif amaçlı: oyuncak endüstrisinde, otomobil endüstrisinde, beyaz eşya üretiminde, saat ve gözlük çerçevelerinde kullanılmaktadır (Şafak, 2008, 45).



Şekil 6: PVD laboratuvarı ve üretim tesisi (URL-1, 2012).

PVD tekniği, katı bir kaynağın (kaplama malzemesinin) vakum altında buharlaştırılması veya atomsal hale dönüştürülmesi ve altlık malzeme üzerine biriktirilmesi ile gerçekleştirilir (Şafak, 2008, 53). Bu teknik ile kaplama malzemesi, kaplanacak yüzeye atomik, moleküler ve iyonik biçimde taşınır (Alsaran vd., 2002,3).

PVD kaplama proseslerinde; kaplama malzemesinin türü, kaplama malzemesinin kaynağı, altlık malzemesinin türü, kaplama malzemesinin atomlarının kinetik enerjisi, kaplama sıcaklığı, kaplama kalınlığı ve kaplama hızı etkin parametreler olarak sıralanabilir. Bu parametreler içerisinde en önemlisi kaplama kalınlığıdır. Kaplama kalınlığı arttıkça yapışmanın azaldığı ve kohezif bozulmanın ortaya çıktığı görülmüştür (Alsaran vd., 2002, 3).

PVD tekniğinin fabrikasyon parametrelerinde yapılacak değişiklikler sonucunda fiziksel özelliklerdeki değişimler incelenebilir. Değişiklik yapılabilecek fabrikasyon parametreleri, bias voltajı, katot akımı, çalışma basıncı, kaplama sıcaklığı ve kaplama süresi olarak sıralanabilir. Değiştirilen bu parametreler neticesinde sertlik, film oluşumu, adezyon ve kalıcı gerilmeler gibi özellikler incelenebilir (Kaya, 1998, 1).

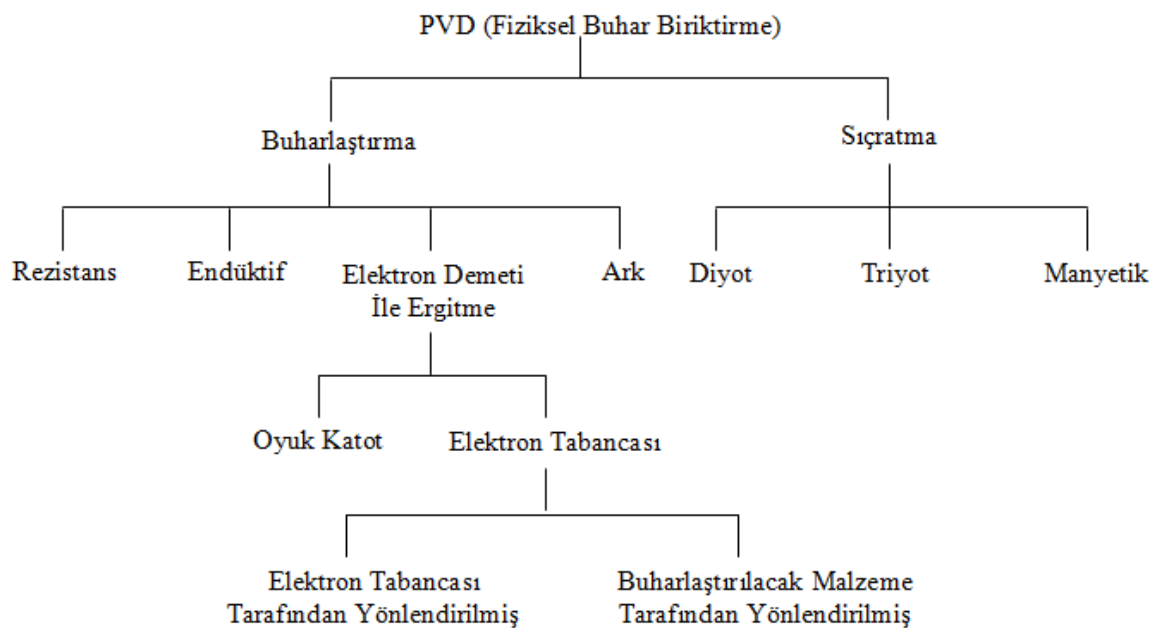
PVD tekniği kullanılarak seramik nitelikli sert, aşınmaya dayanıklı nitrürler (TiN, CrN, ZrN, TiAlN gibi), karbonitrürler (TiCN gibi), oksitler (Al_2O_3 gibi), borürler (ZrB, TiB_2 gibi), karbürler (TiC gibi), elmas benzeri karbon kaplamalar, sürtünme özelliğini

geliştirmeye yönelik MoS_2 , hidrojenli elmas benzeri karbon kaplamalar üretilebilmektedir (Şafak, 2008, 53).

Vakum ortamında katı veya sıvı halde bulunan kaplama malzemelerinin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomlarının yüzeyden koparılması ve kaplanacak olan altlık malzemesi yüzeyine atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi esasına dayanan PVD kaplama tekniği, Buharlaştırma ve Sıçratma olmak üzere iki grupta incelenmektedir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 391). Bu iki kategori de, substart (altlık) - kaynak kullanımı ve uygulama şartlarının farklılığı nedeniyle birkaç farklı tekniği içerir (Kaya, 1998, 2). PVD teknikleri Şekil 7'de verilmiştir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 391).

Her iki yöntem ile elde edilen gaz fazının, ortama verilen diğer bir reaktif gaz ile reaksiyona geçirilmesi durumunda, yukarıda sayılan yöntemler reaktif buharlaştırma veya sıçratma olarak tanımlanır (Doğan, 2001, 44).

Elde edilen gaz atomları, kaplanacak olan malzemeye uygulanan 0,2-5 kV'luk yüksek negatif potansiyelin varlığı ile oluşan şerare etkisine maruz kalarak iyonize olurlar. Elde edilen bu iyonların alt malzeme üzerine biriktirilmesi neticesinde oluşan kaplamaya iyon kaplama adı verilir (Doğan, 2001, 44).



Şekil 7: Fiziksel buhar biriktirme tekniklerinin sınıflandırılması (Şafak, 2008, 54).

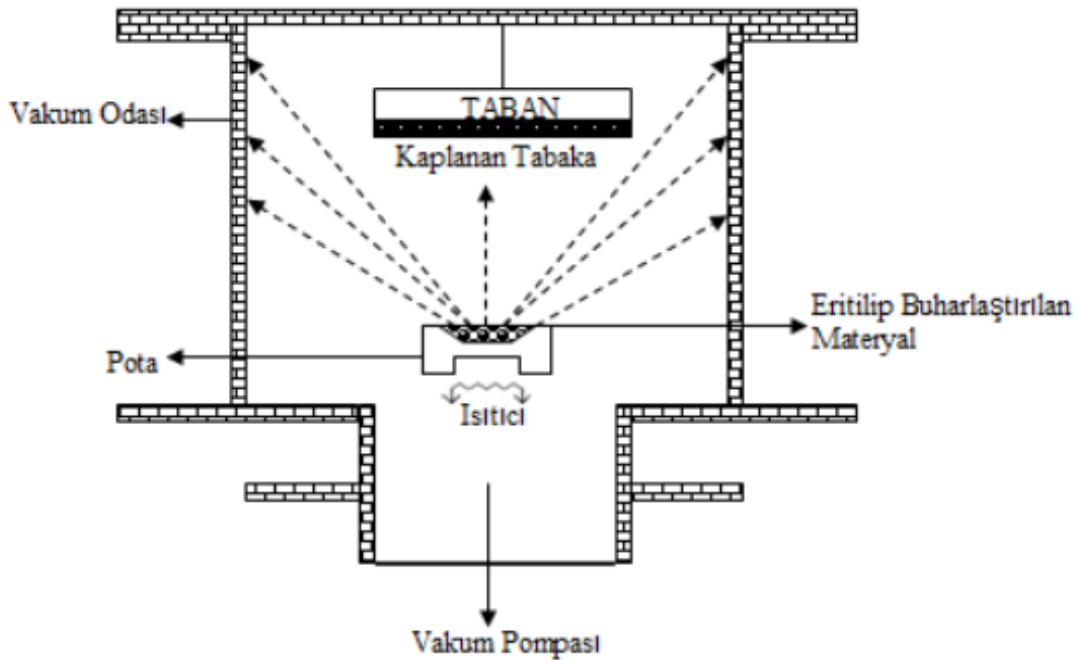
3.1.1. Buharlaştırma İle PVD Kaplama Yöntemleri

Buharlaştırma tekniği, en eski ve en yaygın olarak kullanılan vakum biriktirme tekniklerindendir (Savaş, 2004, 24).

Şekil 8'de görülen bu teknikte, ince bir film halinde kaplama yapmak istediğimiz malzeme, öncelikle buharlaşması için gereken sıcaklığa kadar ısıtılır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 392).

Buharlaştırma prosesinde kaplama malzemesi, kaynak malzemesini (katotu) belirli bir sıcaklığa ($1000-2000\text{ }^{\circ}\text{C}$), vakumda ($10^{-8} - 10^{-2}$ torr) ısıtmakla meydana getirilir. Bu şekilde buhar basıncı ($>10^{-2}$ torr), çevreleyen oda basıncını geçer ve yoğunlaşma için yeterli buharı üretebilir (Savaş, 2004, 24).

Isıtılarak buharlaştırılan malzemenin daha soğuk sıcaklık bölgesindeki alttaşlar üzerine taşınarak yoğunlaştırılması işlemi ile buharlaştırma gerçekleşir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 392).



Şekil 8: Buharlaştırma yönteminin şematik gösterilişi.

Buharlaştırma yönteminde malzeme çeşitli şekillerde ısıtılarak buhar fazı oluşturulabilir. Oluşturulan buhar, düşük sıcaklık bölgesine doğru taşınır ve burada bulunan taşıyıcılar üzerinde yoğunlaşır. Bu işlem yüksek vakum ortamında yapılabildiği gibi asal bir gaz ortamında da gerçekleştirilebilir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 392).

Vakum işlemi, üretilen buhar fazı atomlarının, kaplanacak yüzeye ulaşması sırasında diğer atomlar veya moleküller ile çarpışarak enerjilerini kaybetmelerini ve yüzeyde istenilmeyen bileşiklerin oluşmasını önlemek amacıyla uygulanır (Şafak, 2008, 54-55). Altlık malzemesine genellikle bias voltajı uygulanmaz (Türküz, 2006, 5).

Kaplama malzemesi, elektriksel olarak nötr durumdadır ve kaynağın yüzeyinden 0,1-0,3 eV arasındaki termal enerjilerde çıkar. Kaynak-altlık malzemesi arası açıklık, 150-450 mm arasında değişir. Birçok malzeme (metaller, alaşımlar, metallar arası bileşikler ve refrakter bileşikler) hemen hemen her taban malzemesi üzerine (polimer dahil) uygun bir teknik kullanılarak kaplanabilir. Taban malzemesi; havada asılı, topraklanmış veya elektriksel olarak polarize edilmiş olabilir. Yoğun ve eş eksenli tane morfolojisine sahip metal ve refrakter bileşiklerin kaplamaları için yüksek bir sıcaklığa kadar (200-1600°C) ön ısıtılmalıdır. Yüksek taban malzemesi sıcaklıklarında biriktirilmiş birçok refrakter bileşiğin kaplamaları; daha iyi yapışma, daha yüksek sertlik ve aşınma direnci gösterirler (Savaş, 2004, 24).

Buharlaştırma ile yapılan PVD kaplamalarında reaktif gaz kullanılması durumunda tekniğin adı reaktif buharlaştırma adını alır. Reaktif gaz ile kaplanacak malzeme arasındaki reaksiyon malzeme yüzeyinde gerçekleşir. Reaktif buharlaştırmada parçaya yakın bölgeye konulan bir elektrot ile plazma oluşumu sağlanır. Böylece reaktif gaz ile kaplanacak malzeme atomları arasındaki reaksiyon altlık malzeme yüzeyine ulaşmadan gerçekleşir. Bu yöntemde eğer kaplanacak parçaya da negatif potansiyel (Bias) uygulanırsa, plazmadaki pozitif yüklü iyonların yüzeye doğru ilerlemeleri hızlandırılmış olur. Bu yöntem de reaktif iyon kaplama olarak anılmaktadır (Şafak, 2008, 55).

PVD yöntemleriyle biriktirilen filmler tek bir tabaka halinde oluşarak, kalınlaşmaya ve büyümeye başlamazlar. İlk olarak taban malzemesi yüzeyinde üç boyutlu çekirdekler oluşur, sonra bu çekirdekler yanal olarak ve kalınlık yönünde büyümeye başlarlar ve son olarak temas haline gelen çekirdekler birbirleriyle kaynaşarak sürekli bir film oluştururlar.

Sürekli filmin meydana geldiği andaki ortalama film kalınlığı, biriktirme sıcaklığı ve biriktirme hızına bağlıdır ve 10-1000 Å arasında değişir. Sürekli film oluştuktan sonra, kalınlaşmaya devam eder (Savaş, 2004, 24).

Buharlaştırma işleminde, tipik kaplama kalınlıkları 0,1-100 µm arasında değişir. Kaynak malzemeleri normal olarak; toz, tel veya çubuk şeklinde olur ve buharlaştırılmaları için çeşitli yöntemler kullanılır (Savaş, 2004, 24).

Diğer vakum biriktirme prosesleriyle karşılaştırıldığında buharlaştırmanın başlıca avantajı, daha basit, ucuz ve yüksek biriktirme hızlarına sahip olmasıdır. Buhar türlerinin düşük kinetik enerjileri nedeniyle buharlaştırma prosesi, genelde düşük kaplama yapışmasıyla sonuçlanır. Ayrıca, yüksek taban malzemesi sıcaklıkları, ince taban malzemelerinin eğrilip çarpılmasına neden olabilir ve metalik taban malzemelerinin ısı işlemini değişikliğe uğratabilir. Bu nedenle, diğer biriktirme proseslerine göre tribolojikel uygulamalar açısından daha az tercih edilir. Ancak, tekniğin basit oluşu, düşük maliyeti ve yüksek biriktirme hızları, bu tekniği birçok uygulama için ilgi çekici hale getirir (Savaş, 2004, 28-29).

Buharlaştırma tekniği kullanılarak elde edilen PVD kaplamalar rezistans, indüksiyon, ark, elektron bombardımanı ve lazer ile buharlaştırma olarak gruplandırılmaktadır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 392).

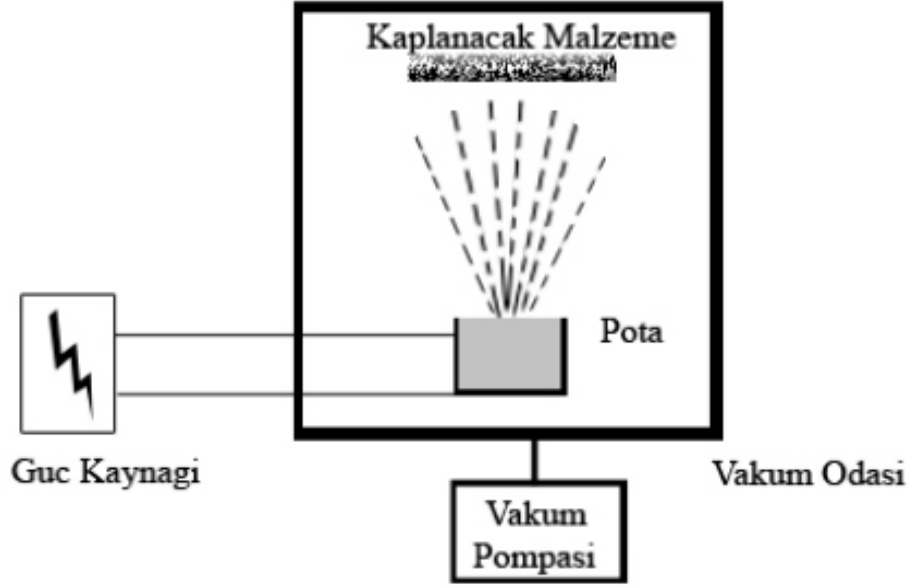
3.1.1.1. Rezistansla Buharlaştırma

Rezistansla buharlaştırma sisteminde, buhar fazının elde edileceği kaplama malzemesi, yüksek sıcaklıklara dayanıklı refrakter potalar içine yerleştirilir. Sistemde ısıtma işlemi, pota etrafına sarılmış rezistanslı teller ile sağlanır. Pota malzemesi olarak genellikle molibden (Mo) veya tungsten (W) gibi refrakter malzemeler ya da TiB₂-BN gibi bir metaller arası bileşik kullanılır. Bu yöntem Al, Cu, Ag ve Pb gibi düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelerin buharlaştırılmasında kullanılmaktadır (Türküz, 2006, 5)

Rezistans ile buharlaştırma işlemi, yüksek akım ve düşük potansiyel veren enerji sistemlerinin kullanıldığı, düşük maliyetli ve hızlı bir PVD işlemidir. Rezistans ile buharlaştırma yönteminde iyonlaşmanın çok az olması nedeniyle kaplamanın yüzeye

bağlanabilirliği düşük, gözenekliliği ise yüksektir. Elde edilen kaplamalar çoğunlukla optik ve dekoratif amaçlı uygulamalar için kullanılmaktadır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 392).

Buharlaştırmanın rezistanslı ısıtıcılar aracılığı ile sağlandığı PVD sisteminin yapısı Şekil 9'da verilmiştir.

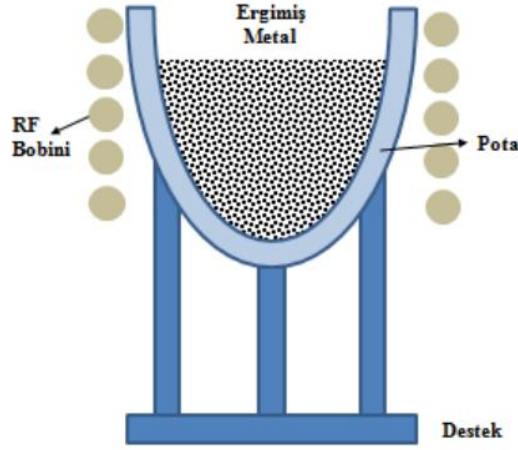


Şekil 9: Rezistanslı ısıtıcı sistemli PVD sistemi (Şafak, 2008, 56).

Bu yöntem günümüzde popülerliğini yitirmiştir. Bunun sebepleri arasında yüzey geometrisinin kaplamada önemli role sahip olması, sadece düşük buharlaşma sıcaklığına sahip malzemeler için kullanılabilmesi, malzemeyle birlikte potanın da buharlaşıp kaplamaya karışma riski ve bileşik elementlerinin eşit oranda buharlaştırılmamaları gibi dezavantajlar büyük rol oynar (Şafak, 2008, 56).

3.1.1.2. Endüktif Buharlaştırma

Endüktif ile yapılan ısıtmalarda, pota etrafına su soğutmalı olarak sarılmış bakır tellere uygulanan indüksiyon akımı (RF akımı) sonucunda üretilen ısı neticesinde buharlaştırma işlemi gerçekleşmektedir. Bu yöntem ergime sıcaklığı 2100°C'ye kadar olan tüm malzemelere uygulanabilir. Yüksek maliyetlerin söz konusu olması ise bu yöntemin önemli bir dezavantajıdır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 392-393).



Şekil 10: Endüktif ile buharlaştırma yöntemi (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 392-393).

Elektron ışınlamıyla buharlaştırmada olduğu gibi indüksiyonla ısıtmada da, meydana gelen ısı potaya değil, direkt olarak buharlaştırılacak malzemeye yönelir. Bu nedenle pota malzemesinin buharlaşmasının ve istenmeyen pota reaksiyonlarının oluşumunun önüne geçilmiş olur. Bu yöntem özellikle Al, Ti gibi malzemelerin buharlaştırılması için uygundur (Türküz, 2006, 6).

3.1.1.3. Elektron Demeti İle Ergitme Yöntemiyle Buharlaştırma

Yüksek erime noktasına sahip kaynak malzemelerinin basit rezistiv ısıtıcılarla buharlaştırılamaması nedeniyle ısıya dayanıklı metaller, elektron demeti katmanlamayla buharlaştırılır (Kaya, 1998, 3).

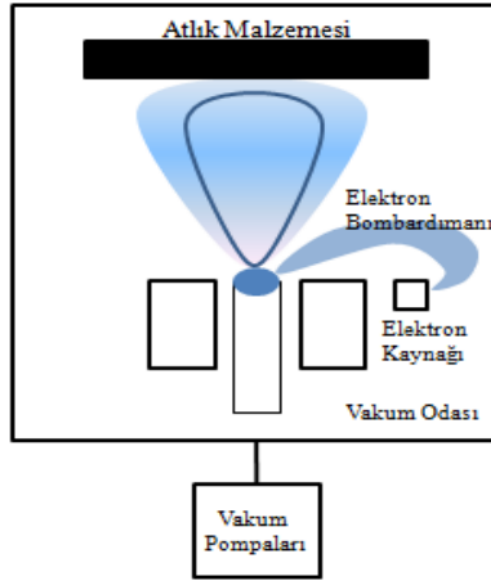
Yöntem, bir elektron kaynağı tarafından sağlanan elektronların, kaplama malzemesi üzerine bombardıman edilmesi yardımıyla buharlaşmanın sağlanması esasına dayanır (Şafak, 2008, 56). Yüksek ergime sıcaklıklarına sahip (4000°C 'ye kadar) malzemelerin buharlaştırılabilmesine imkân veren bu yöntemde elektronların yönlendirilebilmesinin getirdiği avantajla düzenli buharlaştırma oluşturabilen bir bombardıman söz konusudur (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 393).

Elektron bombardımanı ile buharlaşmanın sağlandığı PVD sistemleri için gerekli elektronlar;

- a. Elektron tabancası,
- b. Oyuk katot yöntemleri ile üretilirler (Doğan, 2001, 46).

Elektron tabancası ile elektronların üretimi, bir flamanın akım geçirilmesi neticesinde, flamanın ısınarak elektron yayması esasına dayanmaktadır. Üretilen elektronlar, oluşturulan manyetik alan yardımıyla hızlandırılır ve yönlendirilirler. Elektronların yönlendirilmesinin kolaylığı ile yüzey taranarak buharlaştırma yapılabilir. Böylelikle farklı kalınlıkta kaplama oluşumu engellenmiş olur (Doğan, 2001, 46-47).

Oyuk katot yönteminde, oyuk bir silindir içinde inert gazların kullanımı ile oluşturulan plazma sayesinde buharlaşma meydana gelmiş olur (Şafak, 2008, 57).



Şekil 11: Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 394).

3.1.1.4. Lazer Yöntemiyle Buharlaştırma

Lazer katmanlama yöntemi, kontrol edilebilen kimyasal karışımlarla bileşik ya da alaşımların katmanlanmasında kullanılır (Kaya, 1998, 3). Bu yöntemde kaplanacak hedef malzeme vakum odasından lazer kaynağı kullanılarak buharlaştırılır ve altlık (taban) malzemesi üzerine biriktirilir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 393). Yüksek güçte pulslanan KrF lazeri gibi lazerler (1J/şut) kuartz cama doğru ışınlanır. Hedef kaynak üzerindeki lazer gücünün enerji yoğunluğunu arttırmak için kuartz bir lens kullanılır (Kaya, 1998, 3). Buharlaştırılacak malzemenin ısıtım soğurma karakteristiği, kullanılacak lazerin dalga boyunu belirlemektedir. Bu yöntem ile lazer ışınını soğurabilen yüksek ergime sıcaklığına sahip metaller buharlaştırılabilmektedir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın,

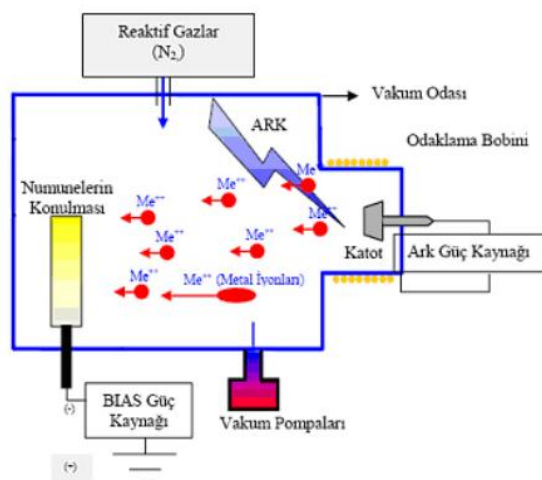
2012, 393). Yüzeyden buharlaştırılan atomlar, numune yüzeyinde ince film oluşturacak şekilde toplanırlar (Kaya, 1998, 3).

3.1.1.5. Ark Yöntemi İle Buharlaştırma

Katodik Ark PVD tekniği, diğer tekniklere göre daha yeni olan, ancak kullanımı hızla yaygınlaşan bir kaplama tekniğidir (şafak, 2008, 57). Bu yöntemde hedef malzemenin buharlaştırılması ve iyonize olması amacıyla "ark" kullanılmaktadır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 392).

Katodik ark tekniğinde; buharlaştırılacak olan malzeme vakum odasında katot, kaplanacak olan taban (altlık) malzeme ise anot olarak yerleştirilir (Okay, 2006, 44).

İşlem esnasında uygulanan düşük voltaj (10-40 V) ve yüksek akım ile (30-300 A) katot üzerinde “ark” meydana getirilir. Katot yüzeyinde arkın meydana geldiği ark izi ya da katot izi olarak adlandırılan noktalarda, sıcaklığın çok yüksek değerlere (yaklaşık 2500°C) ulaşması, bu noktalarda ergime ve buharlaşmalara neden olur (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 392). Katot üzerinde arkın olduğu noktalar (ark izi noktaları) sabit değildir ve hızla yer değiştirirler. Böylece katotun homojen olarak buharlaşması sağlanır. Oluşan buhar fazı, katotun önündeki yüksek elektron yoğunluğuna sahip bölgede ($\sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$) çarpışmalar sonucu iyonize olurlar ve oluşan iyonlar hızla taşınırlar. Katodik ark buharlaştırma sisteminin şematik resmi Şekil 12'de verilmiştir (Okay, 2006, 44-45).



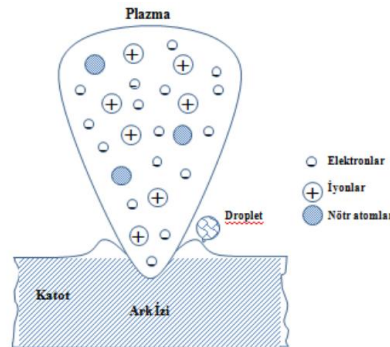
Şekil 12: Katodik ark PVD sistemi (Şafak, 2008, 58).

Katodik ark tekniği, diğer buharlaştırma tekniklerinin aksine intermetalik fazların oluşması için kaplama işleminden sonra her hangi bir ısı işleme ihtiyaç duymamaktadır. Dolayısıyla, teknolojik uygulamalara adaptasyonu oldukça kolaydır. Bu teknikte, taban malzemeye sırasıyla düşük ve yüksek bias voltajları uygulandığında yüzeyin yapısı değişmektedir. Hedef malzemeye ait enerji iyon bombardımanı sırasında taban malzemesinin yüzeyinin ısınması ve iyon-taban malzeme etkileşimlerinin difüzyon üzerindeki kuvvetlendirici etkileri sistemde sırasıyla, yüzeyde spinodal ayrışmalara ve intermetalik fazların oluşumuna sebep olmaktadır. Katodik ark ile fiziksel buhar biriktirme yöntemi, iyonizasyon miktarının yüksek olması, istenilen bileşimde kaplama yapılabilmesi, kaplama biriktirme hızının yüksek olması ve düşük altlık (taban) malzeme sıcaklıklarında dahi iyi yapışma sağlaması gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 392).

Katodik Ark PVD sisteminde işlem kademesi şu şekildedir:

- a. Vakum işlemi,
- b. Taban malzemenin; radyasyon, taban malzeme tutucularından ısı iletimi ve sistemde bulunan hızlandırılmış partiküller aracılığı ile ısıtılması,
- c. Taban malzeme yüzeyine çarpan elektronlar neticesinde, taban malzeme yüzeyinden atomların koparılması ve bu sayede yüzeyin temizlenmesi,
- . Film biriktirme işlemi,
- d. Soğutma işlemi (şafak, 2008, 59).

Katodik ark buharlaştırma prosesinde, katot üzerinde ark oluşumu şekil 13'te gösterilmiştir.



şekil 13: Ark oluşum mekanizması (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 393).

Katodik ark yönteminin karakteristik özellikleri şu şekildedir:

- a. Plazma bir ark spotu ile oluşturulur.
- b. Katot yüzeyinde buharlaşan malzemenin % 30 ilâ % 80'i iyonize olur.
- c. Plazmada farklı yüklerde iyonlar mevcuttur (T^+ , T^{+2} , T^{+3}).
- ç. İyonlar 40-100 eV arası kinetik enerjiye sahiptir (Okay, 2006, 44).
- d. Yüksek buharlaştırma verimine sahiptir.
- e. Katodik ark yöntemiyle üretilen filmler uygun mikroyapıya ve yüksek yapışma özelliğine sahiptirler.
- f. Bu yöntemle yapılan kaplamalarda, kritik yükler 100 N'a ulaşabilir; yani filmin taban malzemeye adezyonu çok iyidir (Türküz, 2006, 7).
- g. Ark kaplamalar çok sayıda droplet (damlacık) içerir (Okay, 2006, 44).

Bu yöntemin en önemli dezavantajı, film yapısında makropartiküllerin oluşmasıdır. Makropartiküllerin oluşma sebebi, katot üzerinde arkın olduğu ark izi noktalarında aşırı ısınmanın meydana gelmesi sonucunda "droplet" adı verilen büyük sıvı kütlelerin de iyonlarla beraber taban malzeme yüzeyine taşınmasıdır (Türküz, 2006, 8). Dropletler, kaplama sırasında perdeleme etkisi yaratarak, altlarında kaplanmamış bölgelerin oluşmasına neden olurlar. Bunun sonucu olarak da kaplama kalitesini birçok açıdan olumsuz yönde etkilerler (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 393). Optik ve mikro elektronik kaplamalar, damlacıkların olumsuz etkilerinin görüldüğü uygulamalardır. Optik kaplamalarda damlacıklar saçılma merkezleri olarak davranır ve optik kaybı artırır (Okay, 2006, 45). Ayrıca buharlaştırma esnasında oluşan damlacıklar kaplanacak malzeme yüzeyine yapışarak yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olurlar.

Ark akımı, biriktirme süresi, kaynak-taban malzemesi arası mesafe, azot kısmî basıncı ve taban malzemenin bias voltajının, makropartikül sayısını etkileyen en önemli biriktirme parametreleri olduğu, ayrıca kaplama sonrası yüzey pürüzlülüğündeki artışın miktarı ile yapıdaki makropartikül sayısı arasında doğru orantılı bir ilişkinin bulunduğu belirlenmiştir (Türküz, 2006, 8).

Ana malzemeye negatif temel gerilim uygulanırsa, buharlaşan malzeme ana malzeme üzerinde yoğunlaşır. Plazma içinde hareket eden iyonların kinetik enerjileri 10-100 eV

arasındadır. Ve bunun sonucu olarak çok yüksek biriktirme hızlarına ulaşılmaktadır. Üretilen kaplamalarda damlacık sayısı azaldıkça, kaplamanın yapışma (bonding) ve aşınma özelliklerinde gelişme gözlenmektedir (Okay, 2006, 45).

Kaplamaların damlacık içeriğini azaltmada iki yaklaşım mevcuttur. Bunlardan birincisi damlacık üretimini azaltma, ikincisi plazmadan damlacıkları ayırma yöntemleridir. Katot sıcaklığını azaltma, arkın reaktif gaz ortamında çalıştırılması ve yönlendirilmiş ark tekniğinin kullanılması katot erozyon hızını ve damlacık saçılma hızını büyük oranlarda azaltmaktadır. Damlacık kontrolünde diğer bir yaklaşım plazmadan damlacıkları ayırmadır. Damlacıklar katot çevresine konulmuş damlacık toplayıcıları ile en aza indirilmektedir. Ana malzemeye uygulanan temel (negatif) gerilimi, makro partikül sayısında büyük oranda azalmalara neden olmaktadır (Okay 2006, 45-46).

Manyetik filtreleme sistemlerinde plazma demetini sınırlamak veya yönlendirmek için bir manyetik alan kullanılır (Okay 2006, 45-46). Böylece yüklü iyonlar tercihli olarak katoda yönelmekte, yüksüz makropartiküller ise oluşan manyetik alandan etkilenmemektedir (Türküz, 2006, 8). Bu sayede damlacıklar etkisiz hale getirilebilir (Okay, 2006, 46).

Katodik ark kaplamaların çok sayıda droplet içermesi, ark davranışını geliştirmede yeni teknolojilerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Son yıllarda üzerinde çalışılan teknolojilerden birisi de yönlendirilmiş ark tekniğidir. Yönlendirilmiş ark tekniği damlacık boyutunu azaltarak daha pürüzsüz bir kaplama yüzeyi elde etmenin yanı sıra, farklı parçacıklardan oluşan katotları kullanma imkânı da sağlamaktadır. Aynı kaynaktan farklı ve çok katlı kaplama yapılabilmesi bu tekniğin endüstride önemli bir yer edineceğini göstermektedir. Rastgele (random) ark tekniğinde karşılaşılan TiAlN filminin son bileşiminde alüminyum kaybı bu teknikte görülmemektedir (Okay, 2006, 46).

Katodik ark kaplama yöntemi çok geniş bir aralıkta değişiklik ve üretim yapmaya imkân sağlar. TiN, ZrN ve CrN gibi çift katlı kaplamaların elde edilmesi mümkündür. Gelişen teknoloji sayesinde TiAlN ve TiZrN gibi üç katlı kaplamaların elde edilmeside mümkün olmaktadır. Üçlü kaplamaların üretimi, istenilen özelliklere uygun kaplama elde etme açısından son derece esneklik sağlamaktadır. Kaplama kompozisyonunun ana malzeme üzerine tesir edebilmesi, katodik ark işleminin hangi şartlarda yapıldığına bağlıdır. Özel kullanım amaçları için, kaplamanın özelliklerine göre optimizasyon gerekebilir. Özel

kullanım amaçlı katodik ark kaplamalarda mekanik karakteristikler ve mikroyapı incelemeleri, uygun kaplamayı yapabilmek için çok önemlidir. Genelde, katodik ark kaplamalar yoğun mikroyapılarına ve atık vermesine karşın elektron sıçratma yöntemine göre daha az gerilime neden olan bir işlemdir (Okay, 2006, 47).

Katodik ark tekniğinin avantajları şu şekilde sıralanabilir (Türküz 2006, 6):

- a. Kaplama elemanları yüksek oranda iyonize edilebilir,
- b. Karmaşık şekilli parçalar üzerine yeterli homojenlikte kaplama yapılabilir,
- c. Sistemde ergimiş bir banyo oluşmadığı için, buharlaştırma kabini herhangi bir doğrultuda, hatta baş aşağı bile konumlandırılabilir,
- ç. Basit konstrüksiyon ve basit güç kaynak üniteleri yeterlidir,
- d. Katot uzun süre kullanılabilir.

Yöntemin temel dezavantajı ise, kaynaktan çıkan dropletlerin, kaplamaların kalitesini düşüren makropartiküller oluşturmalarıdır (Türküz, 2006, 6).

Katodik ark yönteminin diğer PVD yöntemlerine göre üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir:

- a. Metaller, alaşımlar ve bileşikler yüksek kaplama hızlarında biriktirilebilirler.
- b. Ana malzeme yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmak zorunda değildir.
- c. İstenilen bileşimde alaşımlar biriktirilebilir.
- ç. Bileşik filmler kolaylıkla üretilebilir (TiAlN vb.).
- d. Geniş kaplama parametrelerinde iyi kalitede filmler elde edilebilir.
- e. Karmaşık geometriye sahip parçalar üniform olarak kaplanabilir (Okay, 2006, 44).

3.1.2. Sıçratma İle PVD Kaplama Yöntemleri

Sıçratma yöntemi, genellikle plazma veya iyon tabancası aracılığı ile hızlandırılmış atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarıyla hedef malzeme yüzeyinin bombardıman edilerek, atomların yüzeyden sıçratılması ve hedef malzeme yüzeyinden koparılan bu atomların buhar fazına geçirilerek altlık malzemesi üzerine biriktirilmesi esasına dayanır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 393).

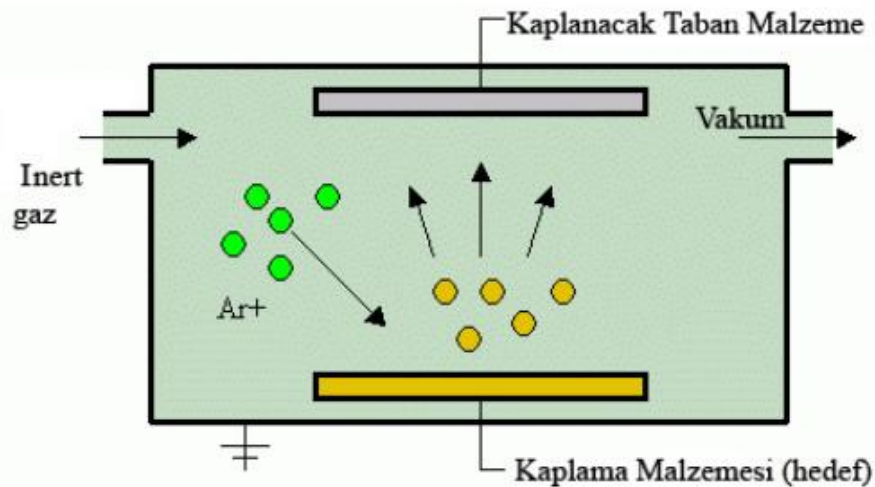
Sıçratma prosesi evrenseldir ve kaplama bileşimi yüksek bir hassasiyetle kontrol edilebilir. Kaplama malzemesi, buhar fazına mekaniksel bir prosesle (momentum değişimi) geçtiğinden dolayı, hemen hemen her malzemenin kaplanması için aday olabilir (Savaş, 2004, 31).

Fakat bugün sıçratma, yaygın olarak yüzey temizlemede, yüzey aşındırmada, ince film biriktirmede ve yüzey analizinde kullanılmaktadır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 393).

Sıçratma tekniği ile birçok malzeme başarılı bir şekilde kaplanmasına rağmen, birikme hızının ve plazma içindeki iyonlaşma etkisinin düşük olması ve altta sıcaklığının yükselmesi sistemin kullanımını sınırlamıştır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 394).

Sıçratma, enerjik partiküller tarafından yüzeyin bombardıman edilmesiyle, momentum değişimine bağlı olarak, kaplama malzemesinin katı yüzeyinden çıkartılıp fırlatıldığı bir prosestir. Yüksek enerjili partiküller, genellikle ağır bir inert veya reaktif gazın (argon, en yaygın kullanılan asal gazdır) ya da kaplama malzemesi türlerinin pozitif iyonlarıdır. Taban malzemesi, sıçratılmış atomların akışını kesmesi için hedefin önüne yerleştirilir (Savaş, 2004, 30).

Şekil 14'te yer alan sıçratma yönteminde kullanılan inert gaz iyonları, hedef malzeme yüzeyine çarparak sahip oldukları enerjiyi malzemeye verirler ve böylece malzeme yüzeyinden atomları sıçratırlar (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 393-394).



Şekil 14: Sıçratma mekanizması (Şafak, 2008, 60).

Kopartılan bu atomlar oluşan plazma içerisinde buhar fazına geçer ve altlık malzemesi yüzeyinde biriktirilir. Böylece sert seramik filmler veya bileşik malzemelerden üretilen kaplamalar yapılabilir (Şafak, 2008, 59). Sıçratma momentum değişimi, yüzeyin sadece 1 nm altını kapsayan bir bölgede meydana gelir (Savaş, 2004, 30). Farklı buharlaşma hızlarına sahip alaşımlar da bileşimleri değişmeden biriktirilebilir, ayrıca kaplama yapısına makropartikül girme olasılığı da oldukça azdır (Savaş, 2004, 31).

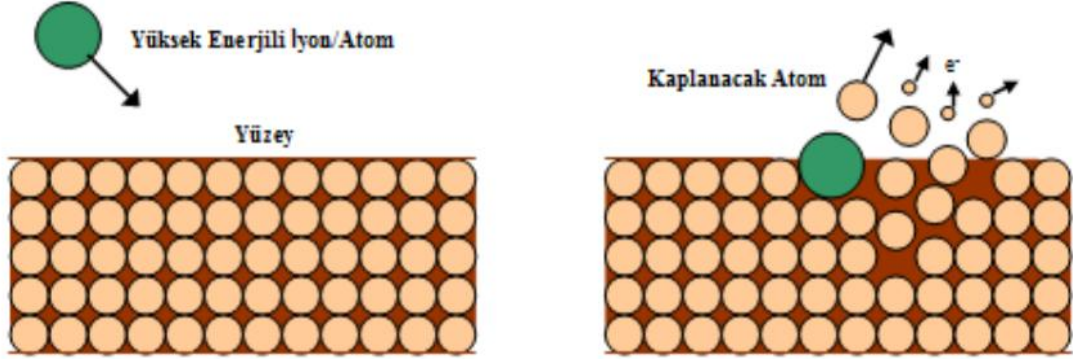
Sıçratma sistemi, negatif d.c. veya r.f. potansiyel uygulanan kaplama malzemesi ile kaplanacak altlık malzemenin bulunduğu bir vakum odasından oluşur. Kaplanacak altlık malzemesi, kaplama malzemesi ile karşılıklı yerleştirilir ve topraklama, negatif potansiyel uygulama veya kendi halinde bırakma işlemlerinden birisi uygulanır. Sıçratma işleminde plazma oluşumunu başlatabilmek için diğer malzemeler ile reaksiyona girmeyecek inert gaz iyonları kullanılır. Bunun için en yaygın kullanılan gaz Argon'dur (Şafak, 2008, 60). Argon gazı iyon halinde bulunan inert gazdır. İntert gaz iyonları hedef malzeme yüzeyine çarparak ilerler ve sahip oldukları enerjiyi de malzemeye aktarırlar. Bu durumda yüzeyden bir atom dışarı fırlar. Süreç düşük basınçta inert gazlı ortamda gerçekleşmektedir (Okay, 2006, 49).

Sıçratma mekanizmasında verimi koruyabilmek için iyonların kinetik enerjilerinin uygun bir değerde tutulması önem arz etmektedir. Fotoelektrik olayda elektronların metal yüzeyden ayrılışı, metalin cinsine bağlı olarak değişen ve eşik enerjisi adı verilen kritik bir kinetik enerji değerine bağlıdır. Sıçratma yönteminde kullanılan inert gazın ağırlığına göre verilmesi gereken kinetik enerjide de böyle bir benzerlik mevcuttur (Okay, 2006, 49).

Hedef adı verilen kaplama malzemesine 2-3 kV'luk negatif potansiyel uygulanır ve oluşturulan plazmadaki pozitif iyonların hedef yüzeyine çarpmaları sağlanır (Şafak, 2008, 60). İntert gaz iyonlarının saçınımları durumunda bıraktıkları enerji, yüzeyde ısı olarak belirecektir (Okay, 2006, 50). Momentum değişim mekanizması ile çarpan iyonlar hedef malzemeden atom kopartırlar. Hedef malzemesinin atomlarının bu şekilde malzemeden uzaklaştırılmasına sıçratma adı verilir (Şafak, 2008, 60).

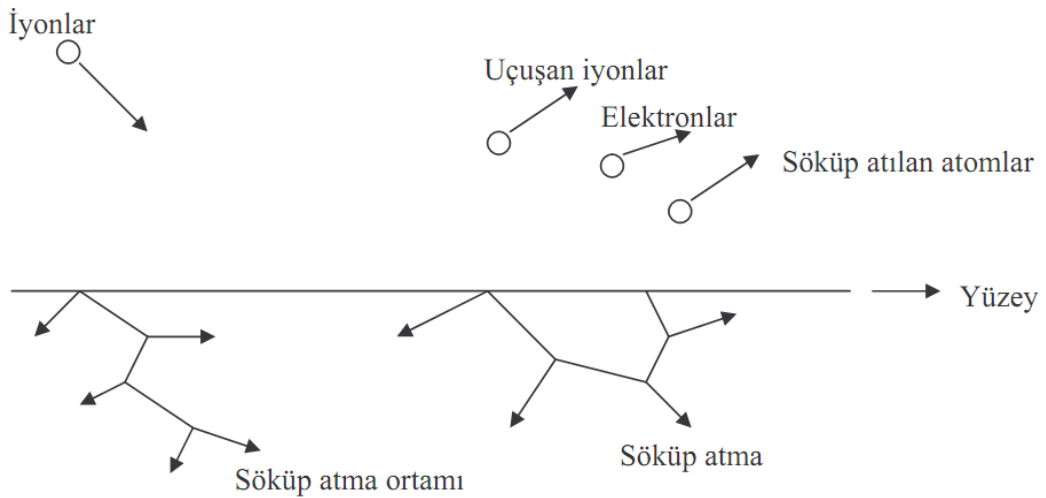
İyonların yüzeyden atom koparabilmeleri için kütlelerinin oldukça büyük olması gerekmektedir. Helyum ve argon ile yapılan sıçratmanın daha verimli olduğu görülür. Sıçratma veriminin, iyonların sahip oldukları kinetik enerji ve geliş açısı ile de çok

yakından ilişkisi mevcuttur. İyonlar malzeme yüzeyine dik olarak çarpıyorlarsa iyonların malzemenin derinliklerine dik olarak ilerlemeleri daha kolay olacağından verim düşecektir. Geliş açısının artması durumunda ise iyonların geri saçılma imkânı artmaktadır (Okay, 2006, 50).



Şekil 15: Sıçratma mekanizması (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 394).

Sıçratılan iyonların bazıları kapanacak taban metal yüzeyine giderek orada birikir ve bir film oluşturur. Sıçratma sırasında hedef yüzeyine pozitif yüklü iyonların çarpması ile başka ara etkimeler de meydana gelebilir. Hedef yüzeye çarpan atomlardan bazıları malzeme içine gömülebilir veya enerjilerini malzemeye bırakarak geri saçınabilirler. Atomların geri saçınmaları durumunda bıraktıkları enerji malzeme yüzeyinde ısı olarak açığa çıkacaktır. Başka bir durum ise çarpmanın etkisi ile çıkan ikincil elektronların, nötr haldeki sıçratma gazı atomlarının ilave iyonizasyonuna neden olabilmesidir (Şafak, 2008, 61).



Şekil 16: Sıçratma yönteminin şematik gösterimi (Okay, 2006, 50).

Sıçratma teknolojisindeki gelişmelerin çoğu, manyetik alanda gerçekleşmiştir. Bunun nedeni, manyetik alanda sıçratma yöntemi ile yapılan kaplamaların, mikroelektronik, optik, türbin bıçakları, manyetik ve optik diskler ve kesici takımlar gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmasıdır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 394).

Sıçratma yönteminin en önemli avantajı farklı buhar basınçlarında farklı buharlaşma hızlarına sahip alaşımların, bileşimleri değişmeksizin başarıyla biriktirilebilmesidir. Ayrıca bu teknikte film yapısına makro partiküllerin girme olasılığı çok düşüktür. Elde edilen kaplamaların taban malzemeye yapışması oldukça iyidir ve taban malzemenin sıçratma ile temizlenmesi sonucunda yapışma özelliği daha da iyi hale getirilebilir. Sonuç olarak sıçratma ile elde edilen filmin kalitesi ve yapısı mükemmeldir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 394).

Yöntemin dezavantajları olarak limitli kaplama kalınlığı ve yüksek maliyet sayılabilir. Çünkü sıçratma yöntemindeki elektrik tüketimi, buharlaştırmaya nazaran çok daha fazladır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 394).

Sıçratma yöntemi ile yapılan kaplamalarda iyon kaynağı olarak, iyon tabancası ve plazma kullanılmaktadır. Sıçratma ile kaplama tekniği temel olarak kendi içinde üçe ayrılmaktadır. Bunlar:

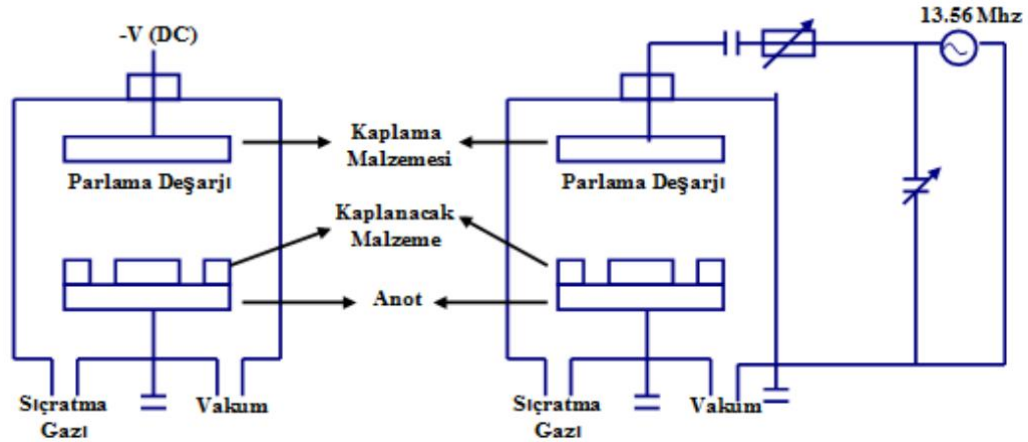
- a. Diyot Sıçratma,
- b. Triyot Sıçratma,
- c. Manyetik Sıçratmadır (Şafak, 2008, 61).

Bununla birlikte sıçratmanın proses maliyeti, buharlaştırma yöntemine göre 3-10 kat daha yüksektir (Savaş, 2004, 31).

3.1.2.1. Diyot Sıçratma

Diyot sıçratma sistemi, biri anot diğeri katot olmak üzere karşılıklı yerleştirilmiş bir çift düzlemsel elektrottan oluşmaktadır. Katodun plazma ile temas halinde olan üst yüzeyinde kaplama malzemesi, katodun altında ise su soğutmalı hazne bulunmaktadır. Kaplanacak

malzeme anota yerleştirilmektedir. Diyet sıçratma sisteminin şematik resmi Şekil 17'de verilmiştir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 394-395).



Şekil 17: Diyet sıçratma sistemi (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 395).

Eğer bu ortama yüksek basınçta (4-15 Pa) inert gaz verilir ise yoğun atom çarpışmaları gerçekleşir (Şafak, 2008, 61).

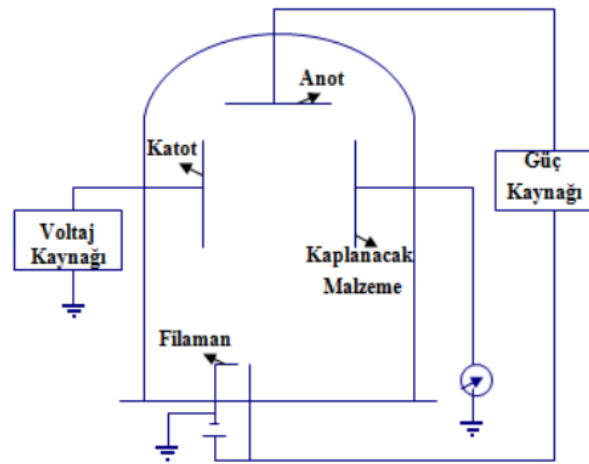
Sıçratma haznesi vakum altına alındıktan sonra basınç 13.3 Pa (10^{-1} torr) olacak şekilde argon gazı gibi soy bir gaz hazneye verilip, elektrotların arasına bir kaç kV'luk gerilim ve 1-10 k Ω 'luk direnç uygulandığında, parlama deşarjı (glow discharge) oluşmaktadır. Parlama deşarjındaki pozitif iyonlar katot yüzeyine çarpmakta ve buradan kaplama malzemesini sıçratarak kaplanacak yüzey üzerinde ince bir film oluşturmaktadır. Kaplama malzemesi iletken ise parlama deşarjı oluşturmak için doğru akım (dc, direkt current) uygulanmaktadır. DC diyet sıçratma denilen bu sistemde kaplama malzemesi yalıtkan olması durumunda parlama deşarjını oluşturabilmek için doğru akımdaki voltaj yerine radyo frekans (RF, radio frequency) voltaj kullanılmaktadır. Bu sistem ise RF diyet sıçratma olarak isimlendirilmektedir. Diyet sıçratma yöntemi kolaylığı nedeniyle yaygın şekilde kullanılmasına rağmen ikincil elektronların kullanılmaması, düşük biriktirme hızı, yüksek enerjili partiküllerin bombardımanına bağlı olarak taban malzemenin fazla ısınması ve oldukça sınırlı biriktirme yüzey alanı gibi birçok dezavantaja sahiptir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 395).

Diyet sıçratma tekniği, sıçratma etkisinin zayıf olması sebebiyle çok fazla kullanılmamaktadır (Şafak, 2008, 61-62).

3.1.2.2. Triyot Sıçratma

Triyot sıçratma tekniğinde, düşük basınçlarda iyonlaşmayı arttırmak ve parlama deşarjını sürdürmek için diyot sistemine ilave olarak ısıtıcı ve pozitif potansiyelli bir elektrot yer almaktadır. Isıtıcı ve elektrot, gaz iyonizasyon derecesini arttırarak sıçratma verimini yükseltmektedir. Katodun karşısına yerleştirilen birincil anot, plazmanın oluşmasını sağlayan gaz iyonizasyonu potansiyeline yakın bir potansiyele sahiptir. Bu şartlar altında düşük basınç değerlerinde dahi homojen bir plazma elde etme imkânı sağlamaktadır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 395).

En çok kullanılan triyot sistemi Şekil 18'de görülen sıcak katot triyot sistemidir. Sıcak katot termoiyonik emisyon süresince elektron yaymaktadır ve bu elektronlar parlama deşarjı sisteminin içine atılmaktadır. Bu durumda iyonizasyon etkinliği artmaktadır. Böylece parlama deşarjı daha düşük basınçlarda ($6,6 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}$ torr) ve daha düşük voltaj (50-100V) uygulanarak oluşmaktadır. Bu nedenle triyot sıçratma ile biriktirme hızı diyot sıçratma ile biriktirme hızına göre daha yüksektir. Triyot sıçratma yöntemin temel dezavantajı reaktif gaz varlığında flamanların ömrünün kısılmasıdır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 395).



Şekil 18: Triyot sıçratma sistemi (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 395).

3.1.2.3. Manyetik Sıçratma

Manyetik sıçratma tekniği, son yıllarda geliştirilmiş bir tekniktir (Türküz, 2006, 9). Bu teknikte hedef malzeme, su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşan tutucunun üzerine yerleştirilmiştir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 396).

Temel sıçratma işleminde, bir hedef (ya da katot) plakanın önünde bulunan bir plazma içerisinde oluşturulan enerjik iyonlar, bu hedefi (ya da katotu) bombardıman etmektedir. Böylece, bombardıman işlemi ile hedef atomlar kopartılmakta veya sıçratılmaktadır. Daha sonra bu atomlar ince bir film olarak bir altlık (taban) malzeme üzerinde birirmektedirler. İyon bombardımanının sonucu olarak ikincil elektronlar hedef yüzeyinden yayılmakta ve bu elektronlar, plazmanın sürdürülmesinde önemli rol oynamaktadır (Çalışkan, Kurbanoglu ve Çolak, 2010, 58).

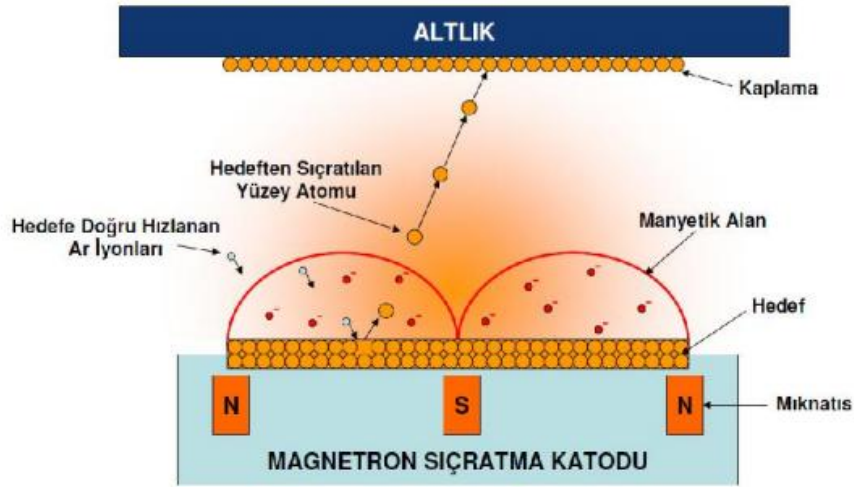
Mıknatısın bir kutbu kaplama malzemesinin merkez eksenine, ikinci kutbu kaplama malzemesinin kenarlarına yerleştirilmiştir. Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesi, elektrik ve manyetik alanların kaplama malzemesinin üzerinde birbirine dik olmasını sağlamaktadır (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 396).

Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesi sonucunda oluşan manyetik alan, iyon bombardımanı ile katot yüzeyinden yayınan ikincil elektronların, özellikle bu bölgede tutularak iyonizasyonun artmasına ve plazmanın daha yoğun olmasına neden olur (Şafak, 2008, 63).

Böylece, daha yüksek sıçratma oranları ile hedefin iyon bombardımanı artmakta ve bu nedenle taban malzeme üzerinde daha yüksek biriktirme oranlarının elde edilmesi sağlanabilmektedir (Çalışkan, Kurbanoglu ve Çolak 2010, 59).

Kaplama malzemesi yüzeyinde aşınma, manyetik alan çizgileri boyunca oluşmaktadır. Manyetik sıçratma yöntemi ile elektronlar yönlendirilerek çarpışmaların çoğunlukla katot yüzeyine yakın yerlerde meydana gelmesi sağlanmaktadır. Çarpışmaların katot yüzeyine yakın yerlerde meydana gelmesi, iyonizasyonun artmasına ve plazmanın daha yoğun olmasına neden olmaktadır. İyonizasyon etkisinin artmasıyla ana sıçratma

sistemlerinden daha düşük çalışma basınçlarında plazma oluşturabilen manyetik alanlar meydana getirilebilir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 396).



Şekil 19: Manyetik sıçratma işlemi (Çalışkan, Kurbanoglu ve Çolak 2010, 58).

İyonizasyon etkisinin artması, daha düşük çalışma basınçlarında plazma oluşturabilen manyetik alanlar meydana getirir (Şafak, 2008, 64). Çalışma basıncının düşürülmesi ile, sıçratılan hedef atomlarının gaz fazındaki saçılması daha az olacağından taban malzemeye ulaşan tanecik sayısı artar ve böylece birikme hızları nispeten daha yüksek olur (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 396).

Pratikte birikme hızını kontrol eden faktörler, hedef malzemesi, altmetal-hedef mesafesi, hedef bölgesindeki güç yoğunluğu, hedef alanı ve basınçtır (Şafak, 2008, 64). Sonuçta elektronların etkin kullanılması ile düşük basınçta ($0,13-0,39 \text{ Pa}/1 \times 10^{-3}-3 \times 10^{-3} \text{ torr}$) ve düşük voltajda (300-700 Volt) kaplama yapılabilir (Sönmezoğlu, Koç ve Akın, 2012, 396).

Bu yöntem ile hem biriktirme hızında artış sağlanmış, hem de metre karelerce büyüklükteki taban malzeme yüzeylerine homojen biriktirme yapılması mümkün hale gelmiştir. Ayrıca manyetik ve triyot sıçratma yöntemleriyle, taban malzeme içermeyen, sadece kaplama malzemesinden oluşan şekiller üretmek de mümkün olmaktadır (Türküz, 2006, 9).

3.2. PVD Tekniğinde Kullanılan Başlıca Kaplama Malzemeleri

Mevcut bilimsel çalışmalar incelendiğinde PVD yöntemiyle genellikle Ti, TiN, TiC, TiCN, TiAlN, TiAlCN, TiB, TiSiCN, AlTiN, TiZrN, TiBN, CrN, CrCN, CrN/TiN, Cr-AlN, MoV, MoS₂, MoS₂-Ti, Al₂O₃, ZrN, NbN, WC/Co kaplamalar yapılarak aşınma davranışlarının incelendiği gözlemlenmiştir.

Yapılan firma araştırmaları sonucunda Türkiye şartlarında PVD yöntemi ile yapılan kaplama türleri; TiN (Titanyumnitrür), CrN (Kromnitrür), CrCN (Kromkarbonitrür), TiAlN (Titanyumalüminyumnitrür), ZrN (Zirkonyumnitrür) kaplamalar olarak sıralanabilir (URL-3, URL-4, URL-5, URL-6, URL-7, URL-8).

Yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde, katot temin edildiği takdirde NbN (Niyobyumnitrür), MoS₂-Ti (MolibdendiSülfür-Titanyum), WC/Co (Tungstenkarbür-Kobalt), TiSiCN (Titanyumsilisyumkarbonitrür), Cr-AlN (Krom-Alüminyumnitrür), TiZrN (Titanyumzirkonyumnitrür), TiBN (Titanyum bornitrür) kaplamalar katodik ark tekniği ile yapılabilmektedir. Katot temin edildiği takdirde kaplama firmaları yukarıda belirtilen kaplamaları yapabileceklerini beyan etmişlerdir (URL-3, URL-4, URL-5, URL-6, URL-7, URL-8).

Tablo 1: Bazı ince sert film kaplamaları ve özellikleri (Gündüz, Oktar ve Salman, 2005, 50).

Kaplama Özellikleri	Kaplamalar					Özel Kaplamalar			
Kaplama Malzemesi	TiN	TiCN	TiCN-MP	TiAlN	AlTiN	ZrN	CrN	CBC	TiAlCN
Kaplama Yapısı	Tekli	Çoklu	Çoklu	Tekli	Tekli	Tekli	Tekli	Çoklu	Çoklu
Sertlik (GPa)	24	37	32	35	38	28	18	20	28
Sürtünme Katsayısı	0,55	0,2	0,2	0,5	0,7	0,55	0,3	0,15	0,25
Kaplama Kalınlığı (µm)	1-5	1-4	1-4	1-4	1-3	1-4	1-4	0,5-2	1-4
Sıcaklık (°C)	600	400	400	800	800	600	700	400	500
Kaplama Rengi	Altın Sarısı	Mavi-Gri	Parlak Kırmızı	Menekşe	Mavi-Siyah	Açık Sarı	Gümüş	Kömür Grisi	Kırmızımsı Bakır

3.2.1. TiN (Titanyum Nitrür) Kaplama

Titanyum nitrür kaplama, tüm PVD kaplamalar içinde en eski ve en yaygın olarak bilinen kaplama türüdür. Demir, çelik vb. metaller, metal işleme, kesme kalıpları, aşınmaya maruz parçalar, tıbbi ve dekoratif parçalar için genel amaçlı bir kaplamadır. Uygulamada çoğunlukla matkap uçları, frezeler, bıçaklar, broşlar, kesme-bükme kalıpları, zımbalar, azdırma çakıları gibi birçok takım ve kalıpta kullanılmakta, performans yönünden kaplanan parçaların ömründe 3 ilâ 30 kat arasında bir artış sağlamaktadır (URL-4, 2003).

Yüksek sertliğe ve düşük sürtünme katsayısına sahip olan TiN, metalin metale sürtünmesinden dolayı oluşan aşınmaları önler, kayganlığı artırır, yapışma-sarma gibi problemleri en aza indirir. Kaplama yüzeyinin sürtünme katsayısı oldukça düşüktür, bu sebeple sürtünme kuvvetleri azaldığından plastik deformasyonu geciktirir. Kimyasal reaksiyonlara girmedikinden dolayı oksidasyonu ve korozyonu önler. Kaplama yüzeyi mükemmel yapıştığından yüzeyde kaplama dökülmesi meydana gelmez (URL-4, 2003).

Tablo 2: Titanyum nitrür kaplamanın özellikleri (URL-4, 2003).

Kimyasal Bileşimi	TiN
Sertlik	2900 $\pm$ 200
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	550
Sürtünme Katsayısı	0,65
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra μ m)	0,2
Kalınlık (μ m)	2-3
Renk	Altın Sarısı

3.2.2. TiCN (Titanyum Karbo Nitrür) Kaplama

Titanyum karbo nitrür kaplama, karbon içeren reaktif gazlar ile elde edilir. Karbon oranı artırıldığından sertliği çok yüksektir. TiCN kaplama, TiN kaplamaya kıyasla daha düşük yüzey pürüzlülüğü, daha yüksek kaplama yapışma kuvveti ve daha düşük sürtünme katsayısı gibi avantajlara sahiptir. Isıl iletkenliğinin yüksek olması, TiCN kaplamanın dezavantajıdır (Şafak, 2008, 72).

TiCN kaplama, zımbalar, yüksek hızda çalışarak talaş kaldıran takımlar gibi yüksek sertlik gerektiren uygulamalarda iyi performans sağlamaktadır. TiCN kaplama, sağlamlığı, iyi yapışma özelliği, yüksek sertliği ve düşük sürtünme katsayısı ile çatlamalara karşı yüksek direnç sağlar (Şafak, 2008, 72).

Tablo 3: Titanyum karbo nitrür kaplamanın özellikleri (Şafak, 2008, 72).

Kimyasal Bileşimi	TiCN
Sertlik (HV 0,05)	4000 $\pm$ 400
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	400
Sürtünme Katsayısı	0,45
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra μ m)	0,18
Kalınlık (μ m)	2-5
Renk	Violet

3.2.3. TiAlN (Titanyum Alüminyum Nitrür) Kaplama

TiN kaplamaya alüminyum eklenmesi ile TiAlN kaplamalar elde edilir. Bu sayede hem sertlik hem de kaplamanın oksitlenmeye karşı direncinde artış sağlanır. Elde edilen kaplama tabakasının özellikleri alüminyum miktarına göre değişkenlik gösterir. TiAlN kaplama, yüzeyinde oluşan Al_2O_3 tabakası nedeniyle düşük ısı iletkenliği özelliğine sahiptir. Bu sayede özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan kalıp ve takımlar için idealdir (Şafak, 2008, 73).

Tablo 4: Titanyum alüminyum nitrür kaplamanın özellikleri (Şafak, 2008, 73).

Kimyasal Bileşimi	TiAlN ve AlTiN
Sertlik (HV 0,05)	3600 $\pm$ 400
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	800
Sürtünme Katsayısı	0,42
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra μ m)	0,2
Kalınlık (μ m)	2-5
Renk	Siyah / Füme

3.2.4. CrN (Krom Nitrür) Kaplama

CrN kaplama, metal şekillendirmede çok aranan bir kaplamadır. Özellikle sıvama kalıpları, metal ve plastik enjeksiyon kalıpları ve plastik kalıplarında çok iyi sonuçlar alınmaktadır. Kaplamanın düşük sıcaklıklarda yapılması nedeniyle kalıplarda çarpılmalar olmaz. Derin çekme ve sıvama kalıplarında kaplamanın yüksek sertliği ve düşük yüzey pürüzlülüğünden dolayı sarma yapmaz, parçalarda ve kalıplarda çizilmeleri asgariye indirir. Keskin köşelerin formu klasik sert krom kaplamada olanın aksine bozulmaz (Şafak, 2008, 74).

İç gerilmelerinin düşük olması nedeniyle, 10 μ m kalınlığa kadar CrN kaplama yapılabilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü TiN kaplamadan daha azdır. Yüksek mukavemet

göstermesinden ve kalın kaplanabilmesinden dolayı TiN'e göre daha iyi korozyon direnci gösterir. CrN kaplama, geleneksel sert krom kaplamadan 2-3 kat daha serttir. Bu kaplamanın diğer özellikleri olan, düşük sürtünme katsayısı ve düşük kalıcı gerilme seviyeleri bir araya gelince, yüzeylerde her türlü aşındırıcı etkiye karşı koruma sağlanmış olur (Şafak, 2008, 74).

Tablo 5: Krom nitrür kaplamanın özellikleri (Şafak, 2008, 73).

Kimyasal Bileşimi	CrN
Sertlik (HV 0,05)	2800 $\pm$ 400
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	700
Sürtünme Katsayısı	0,55
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra μ m)	0,2
Kalınlık (μ m)	3-5
Renk	Gümüş Grisi

3.2.5. ZrN (Zirkonyum Nitrür) Kaplama

Zirkonyum nitrür kaplama, TiN kaplama ile benzer özelliklere sahip bir kaplama çeşididir (Şafak, 2008, 75). ZrN kaplamanın en önemli özelliği insan vücuduna biyolojik olarak en uygun kaplama çeşidi oluşudur. Bu sebeple tıbbi implantlarda özellikle tercih sebebidir (Şafak, 2008, 75).

Tablo 6: Zirkonyum nitrür kaplamanın özellikleri (Şafak, 2008, 75).

Kimyasal Bileşimi	ZrN
Sertlik (HV 0,05)	2800 $\pm$ 200
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	600
Sürtünme Katsayısı	0,61
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra μ m)	0,2
Kalınlık (μ m)	2-3
Renk	Açık Sarı

BÖLÜM IV

İNCE FİLMLERİN ÇEKİRDEKLENME MEKANİZMALARI

Buhar biriktirme yöntemleriyle elde edilen bütün filmlerin yapıları, temel olarak çekirdeklenme prosesiyle kontrol edilir (Savaş, 2004, 24). Film oluşumunun ilk aşamalarında, yeterli sayıda buhar atomu veya molekülü yüzeye yoğunlaşır ve taban malzeme üzerinde kalıcı olarak bulunabileceği bölgeler oluştururlar. Buna "çekirdeklenme" adı verilir (Türküz, 2006, 24). Gaz fazındaki atomlar yüzeye belirli bir hızla çarparlar ve yüzeye adsorbe olurlar veya yüzeyden yansır. Atomlar enerji kaybederek ve diğer atomlara bağlanarak yüzeye adsorbe olurlar (Türküz, 2006, 26-27). Yüzeye adsorbe olan atomlar yüzeyde belirli bir mesafeye kadar difüze olabilir veya yeniden buharlaşabilir (Savaş, 2004, 25). Yüzey difüzyonu, yüzeye adsorbe olan atomların birbirlerini ve en aktif yüzey merkezlerini bulmalarını sağladığından, film yapısı için son derece önemli bir etkidir (Türküz, 2006, 21). Adsorbsiyon süresi ve difüzyon mesafesi, difüzyon ve desorbsiyon (yüzeyden ayrılma) aktivasyon enerjilerine bağlıdır. Çekirdeklenme ve film oluşumu çok düşük çarpma hızlarında meydana gelmez. Yüksek çarpma hızlarında kararlı ve yarı kararlı atom demetleri oluşabilir ve difüze olan atomların bağlanması ile büyüyebilir. Yüksek çarpma hızlarında oluşan kritik çekirdek çok küçüktür ve sadece 2-3 atomdan meydana gelir. Çekirdeklenme hızı terimi, kararlı çekirdeğin oluşma hızı olarak tanımlanır. Çekirdeğin büyümesi, çekirdekçiklerin karşılıklı teması, kaynaşması ve sıkı bir film oluşturması sonucu meydana gelir. Çekirdeklenmenin atomik teorisinde, difüzyon aktivasyon enerjileri ile film-film ve film-taban malzemesi atomları arasındaki bağlanma enerjileri büyük öneme sahiptir. Yüzeye biriktirilen atomlar için üç tip bağ enerjisi göz önüne alınmalıdır (Savaş, 2004, 25).

- a. Taban malzemesi adsorbsiyon enerjisi : E_a
- b. Biriktirilen atomların üst katmanındaki adsorbsiyon enerjisi : E'_a
- c. Adsorbe olan iki atom arasındaki bağ enerjisi : E_2

Bu model yardımıyla, farklı biriktirme koşulları için çekirdeklenme ve büyüme modları elde edilebilir. Düşük taban malzemesi sıcaklığı ve yüksek çarpma hızları için ($R/N_0^2 \cdot D \geq 1$; R çarpma hızı, N_0 taban malzemesi yüzeyindeki muhtemel bölge sayısı, D

yüzey difüzyon katsayısı), çarpan atomlar yoğunlaşma bölgesine bağlanır ve oldukça düzensiz bir film yapısı meydana gelir (Savaş, 2004, 25).

Frank-van der Merve Modeli: Daha yüksek sıcaklık ve düşük biriktirme hızlarında ($R/N_0^2 \cdot D < 1$) ve taban malzemesi üzerinde yüksek bir adsorbsiyon enerjisi mevcut olması durumunda ($E_a > E'_a$) atomik katmanlar oluşur. İkinci katmandaki atomlar desorbsiyon eğilimindedirler. Ayrıca tabaka sayısı arttıkça E'_a azalır. Bu model, kuvvetli atom-taban malzemesi bağına gösterir (Savaş, 2004, 25).

En küçük kararlı çekirdeğin büyümesi, taban malzeme boyunca iki boyutlu olarak gerçekleşir ve sonuçta film tüm taban (altlık) malzeme yüzeyini düzlemsel olarak sarar. Bu büyüme modelinde, atomların taban malzemeyle yaptığı bağlar, birbirleriyle yaptıkları bağlardan daha kuvvetlidir. Oldukça kuvvetli bağlanmış ilk katmanın üzerini, daha zayıf bağlı olan ikinci katman kapatır. Yarı iletken filmlerin, tek kristal eş eksenli büyümesi, bu büyüme modelinin en önemli örneğidir (Türküz, 2006, 29).

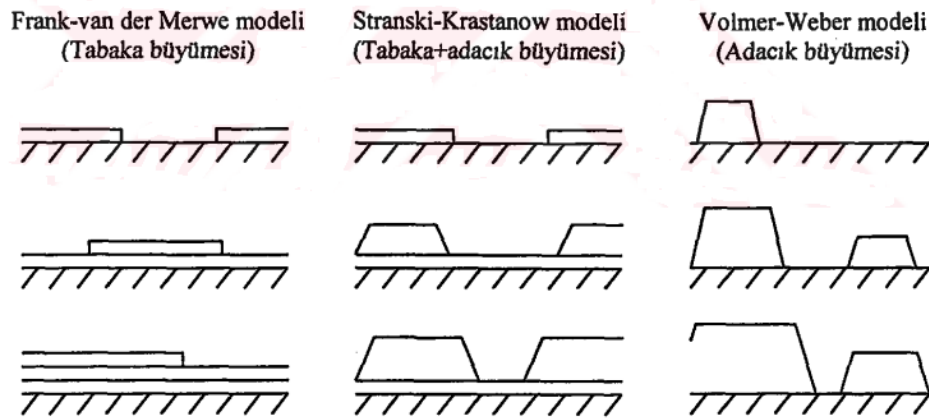
Stranski-Krastanow Modeli: Atomların bağ enerjilerinin, adsorbsiyon enerjisinden daha yüksek olması durumunda ($E_2 > E'_a$), ilk tabakanın üzerinde adacıklar meydana gelir. Atomlar, üst katmanlardan hızla desorbe olurlar. Bundan dolayı film kalınlığı çok düşük bir seviyede kalır ve bir kristal kütlesi oluşmaz. Bu filmler kararlı bir mikroyapıya sahip değildirler (Savaş, 2004, 25).

Stranski-Krastanov veya Tabaka + Ada büyüme mekanizması, önceki iki modelin birleşimidir. Bu modelde bir veya birkaç tabakanın oluşumundan sonra, ada büyümesi meydana gelir. Bu büyüme modeli, metal-metal ve metal-yarı iletken sistemlerinde oldukça yaygındır. Stranski-Krastanov mekanizması özellikle, düşük sıcaklıkta yüzey hareketliliğinin düşük olduğu durumlarda metal üzerine metal biriktirmede yaygın olarak gözlenir. Bu büyüme tipleri için koşullar genel olarak termodinamik ve yüzey enerjisi bulgularına göre açıklanır (Türküz, 2006, 29-30).

Volmer-Weber Modeli: Atomlar arasındaki bağ enerjisi, taban malzemesi üzerine adsorbsiyon enerjisinden daha yüksek ise ($E_2 > E'_a$), başlangıç itibarıyla üç boyutlu

çekirdek oluşur. Film oluşumu, adacığın bütünüyle büyümesi şeklinde gerçekleşir. Bu durum genel olarak, yalıtkan taban malzemeleri üzerine metalik filmlerin biriktirilmesi sırasında meydana gelir. Film yüzeyinden atomların desorbe olup olmamasına bağlı olarak tam ya da kısmî yoğunlaşma meydana gelir. E_2 bağ enerjisi yükseldikçe çekirdeğin kritik boyutu azalır ve çok yüksek değerlerde kritik boyut tek atom bile olabilir (Savaş, 2004, 26). Bu büyüme modeli, biriktirilen atom ya da moleküllerin birbirleriyle yaptığı bağların, taban malzeme ile yaptıkları bağlardan daha kuvvetli olması durumunda meydana gelir. Özellikle oksit taban malzemeler üzerine biriktirilen metal ve yarı iletken filmlerde bu büyüme modeli gözlenir (Türküz, 2006, 29).

E_a ve E_2 değerlerinin çok düşük olması durumunda ise adsorbsiyon meydana gelmez ve bunun sonucunda çok düzgün bir yüzeyde çekirdeklenme de oluşmaz. Yüzeyde hatalı bölgeler mevcutsa, bu bölgeler daha yüksek adsorbsiyon enerjisine sahip oldukları için çekirdeklenme merkezleri olarak davranırlar. Üç temel çekirdeklenme modeli Şekil 20'de gösterilmektedir (Savaş, 2004, 26).



Şekil 20: Üç temel çekirdeklenme modeli (Savaş, 2004, 26).

Film büyütme işlemi çekirdeklenme aşaması tamamlandığı zaman pratik olarak durdurulur. Bu nedenle, çekirdeklenme aşaması birkaç nanometre kalınlıklı ultra ince filmler için özel bir öneme sahiptir (Savaş, 2004, 26).

Filmlerin büyümesi ile ilgili ise üç model mevcuttur. Bunlar; difüzyon modeli, yapışma modeli ve göç modelidir. Difüzyon modeline göre, taban malzemesi yüzeyinde gelişigüzel oluşan kararlı çekirdekler, atomların bu çekirdeklerle difüzyonuyla büyürler. Özellikle

yüzeye çarpan atomların tamamen yüzeyden desorbe olmaması durumunda bu model geçerlidir (Savaş, 2004, 26-27).

Yapışma modeline göre büyüme, oluşan çekirdeklerin üzerine çarpan atomların yapışmasıyla gerçekleşir. Bu model, kısmî yoğunlaşma durumunda etkin hale gelir. Göç modeline göre ise atomlar küçük çekirdeklerden büyük çekirdeklere difüze olurlar ve kararlı çekirdeklerin komple göçü gözlemlenir (Savaş, 2004, 27).

Çekirdeklenme sırasında, çekirdek sayısı bir maksimum değere yükselir, daha sonra çekirdeklerin kaynaşmasına bağlı olarak bu sayı tekrar azalır. Çekirdeklenme hızı ise, atomların yüzeye çarpma hızı ve taban malzemesi sıcaklığına bağlıdır. Çekirdeklenme hızı, taban malzemesi sıcaklığının artmasıyla azalır, çarpma hızının artmasıyla artar (Savaş, 2004, 27).

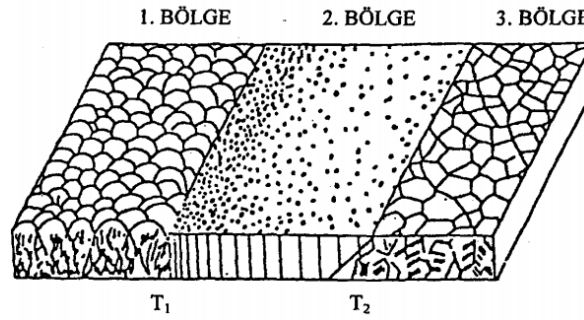
İyon kaplama ve sıçratmada ise partiküller buharlaştırmaya göre daha yüksek enerjiye sahip oldukları için, taban malzemesi yüzeyine adsorbsiyon olasılığı artar ve yüzeyde tek atomlu kararlı çekirdekler meydana getiren hatalı bölgeler oluşabilir. Bu nedenle, çekirdeklenme hızı ve çekirdek yoğunluğu artar. Çekirdeklerin büyümesi ise, buharlaştırma ile aynı mekanizmaya sahiptir (Savaş, 2004, 27).

Tek fazlı kalın kaplamaların mikroyapısı ve morfolojisi, geniş bir çeşitlilikteki metaller, alaşımlar ve refrakter bileşikler için incelenmiştir. Movchan ve Demchishin, yüksek hızlarda (1,2-1,8 $\mu\text{m}/\text{dak}$) elektron ışın tabancası kullanarak buharlaştırma ile biriktirilmiş, kalın (25-2000 μm) tek fazlı saf metal ve oksit (Ni, Ti, W, Al_2O_3 ve ZrO_2) kaplamaların yapısı üzerinde taban malzemesi sıcaklığı T 'nin etkisini incelemişlerdir. T/T_m 'ye bağlı olarak (T_m : Kelvin cinsinden buharlaşan malzemenin ergime sıcaklığı), yapının genel özellikleri ve şeklini üç bölgeye ayırmışlardır. Şekil 21'de, yatay eksen ergime sıcaklığı (T_m) skalasını göstermektedir. Skalanın %25'lik ($T_1 = 0,25T_m$) ve %45'lik ($T_2 = 0,45T_m$) değerleri yapıyı üç bölgeye ayırır (Savaş, 2004, 27).

Düşük sıcaklıklarda (1. Bölge), kaplama atomları sınırlı bir hareketliliğe sahiptir ve yapı, gittikçe incelen dış bölgedeki büyümelere sahip kolonsal bir biçimdedir. Yapı, tam olarak

yoğun değildir ve uzunlamasına porozite içerir. Ayrıca, yüksek dislokasyon yoğunluğu ve yüksek seviyedeki kalıntı gerilmelere de sahiptir (Savaş, 2004, 27).

Taban malzemesi sıcaklığı yükseldikçe, yüzey hareketliliği artar ve yaklaşık $0,3T_m$ 'nin üzerine çıktığı zaman, yapı (2. Bölge) kolonsal olarak kalır. Taban malzemesi yüzeyine dik, paralel sınırlara sahip kolonlar daha ince olma eğilimindedirler. Bu sınırlar, 1. Bölge yapısından daha güçlüdürler ve porozite içermezler (Savaş, 2004, 27).



Taban Malzemesi Sıcaklığı			
	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge
Metaller	$<0,3T_m$	$(0,3-0,45)T_m$	$>0,45T_m$
Oksitler	$<0,25T_m$	$(0,26-0,45)T_m$	$>0,45T_m$

Şekil 21: Metal ve oksitler için elektron ışınli buharlaştırmada, taban malzemesi sıcaklığının bir fonksiyonu olarak kalın kaplama yapısı modeli (T taban malzemesi sıcaklığı, T_m kaplama malzemesi ergime noktası) (Savaş, 2004, 28).

Daha yüksek sıcaklıklardaki yapıyı (3. Bölge), eş eksenli tane morfolojisi gösterir ve çok düşük iç gerilmelere sahiptir. 2. Bölge yapısı yüzey difüzyonuyla, 3. Bölge yapısı ise hacim difüzyonuyla ilgilidir. Movchan ve Demchishin'in modeline dayanılarak, metal ve seramik kaplamaların yoğun ve eş eksenli tane morfolojisi için, taban malzemesi kaplama malzemesinin ergime sıcaklığının yaklaşık yarısı kadar bir sıcaklığa ön ısıtmaya tabi tutulmalıdır. Örneğin Al_2O_3 durumunda (ergime sıcaklığı $2300\text{ }^{\circ}C$), iyi yapışma ve yoğun mikroyapı için taban malzemesi $1170\text{ }^{\circ}C$ 'ye kadar ön ısıtılmalıdır (Savaş, 2004, 28).

İnce filmlerin biriktirilmesi altı alt adımda gerçekleşir:

- a. Birinci adımda, yüzeye ulaşan atom ve moleküller yüzeye bağlanır (Adsorpsiyon).
- b. İkinci adımda, film yapısına girmeden önce yüzey üzerinde belli bir mesafe yayılır.
- c. Üçüncü adımda, yüzeye adsorbe olan atomlar birbirleriyle ve yüzeyle reaksiyona girerler ve bunun sonucunda yüzeyle ve birbirleriyle bağ oluştururlar.
- ç. Dördüncü adımda, film malzemesi yüzeyle kaynaşır. Bu ilk kaynaşmaya çekirdeklenme adı verilir.
- d. Beşinci adımda, film büyümesi meydana gelir.
- e. Altıncı adımda, film ile taban malzeme arasında difüzyona bağlı bir etkileşim meydana gelir. Böylelikle film tabakası ile taban malzeme arasında kuvvetli yapışma (adezyon) elde edilir. Bu adımların tümü enerjiye gereksinim duymaktadır. Kaplama işlemine enerji verilmesi çekirdeklenme reaksiyonlarını kolaylaştırmakta ve daha iyi bir film yapısının oluşmasını sağlamaktadır (Türküz, 2006, 14-15).

Fiziksel buhar biriktirme prosesiyle üretilen filmin özellikleri dört etkene bağlıdır. Bu etkenler film büyümesini ve özelliklerini etkiler (Türküz, 2006, 14).

- a. Taban malzeme yüzey koşulları; örneğin yüzey morfolojisi (pürüzlülük, inklüzyonlar, istenmeyen partiküller vb.), yüzey kimyası (yüzey bileşimi, yüzey temizliği), yüzeydeki kılcal çatlaklar, gaz salma, tercihli çekirdeklenme merkezleri ve yüzey kararlılığı,
- b. Biriktirme işleminin detayları ve sistem geometrisi; örneğin hareketli atomların geliş açısı, taban malzeme sıcaklığı, biriktirme hızı, kirletici gazlar ve iyon bombardımanı,
- c. Taban malzeme yüzeyinde film büyüme detayları; örneğin hareketli atomların yüzeydeki hareketliliği, çekirdeklenme, arayüzey oluşumu, arayüzey çatlağı oluşumu, büyüyen filme enerji girişi, iyon bombardımanı, filmin büyüme yapısı, biriktirme ortamıyla reaksiyon, biriktirme sırasında film ve arayüzey özelliklerindeki değişimler,
- ç. Biriktirme işlemi sonrası meydana gelen reaksiyonlar; ortamla film yüzeyinin reaksiyonu, ısı ve mekanik çevrimler, korozyon, ara yüzeyin bozulması, yumuşak yüzeylerin deformasyonu, kaplama üzerine kaplama (Türküz, 2006, 14).

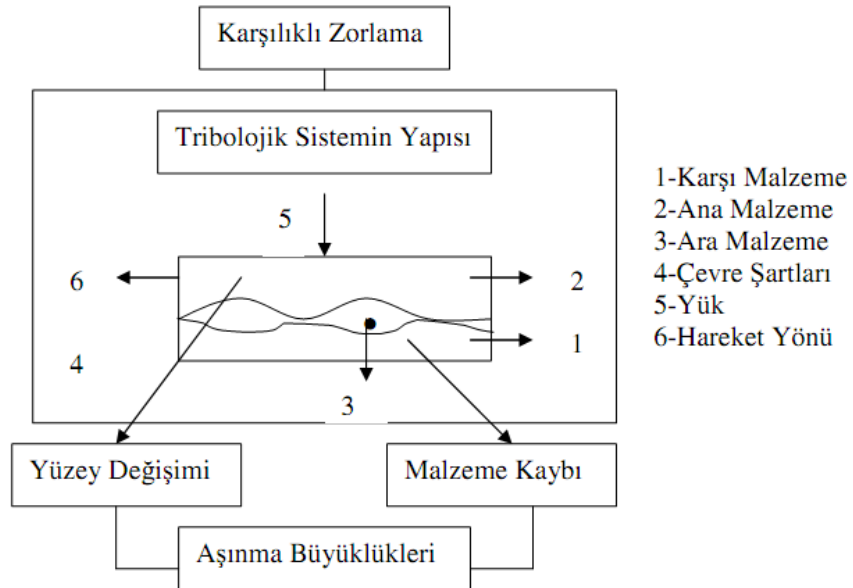
BÖLÜM V

SÜRTÜNME VE AŞINMA MEKANİZMALARI

5.1. Triboloji

Triboloji sözcüğü Yunan dilinde sürtünme veya kayma anlamına gelen “tribos” kelimesinden türetilmiştir. Triboloji biliminin ana konusu, bağlı hareket halindeki iki yüzeyin etkileşimi esnasında ortaya çıkan sürtünme, aşınma ve bunların etkilerinin azaltılmasına yardımcı olan yağlama ve mühendislik malzemeleridir (Kara, 2009, 2).

Triboloji, sürtünme, aşınma ve yağlamanın bilimsel incelenmesini ve tribolojik bilgilerin teknik uygulamasını içermektedir (Koç, 2010, 130). Bünyesinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği teknik sistemlere tribolojik sistem adı verilmektedir. Mühendislik malzemelerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının araştırılmasında, mekanik sistemleri bir tribolojik sistem olarak değerlendirmek gerekir. Yani aşınma olayı bir sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır (Koç, 2010, 130). Şekil 22’de bir tribolojik sistemin elemanları görülmektedir (Koç, 2010, 130).

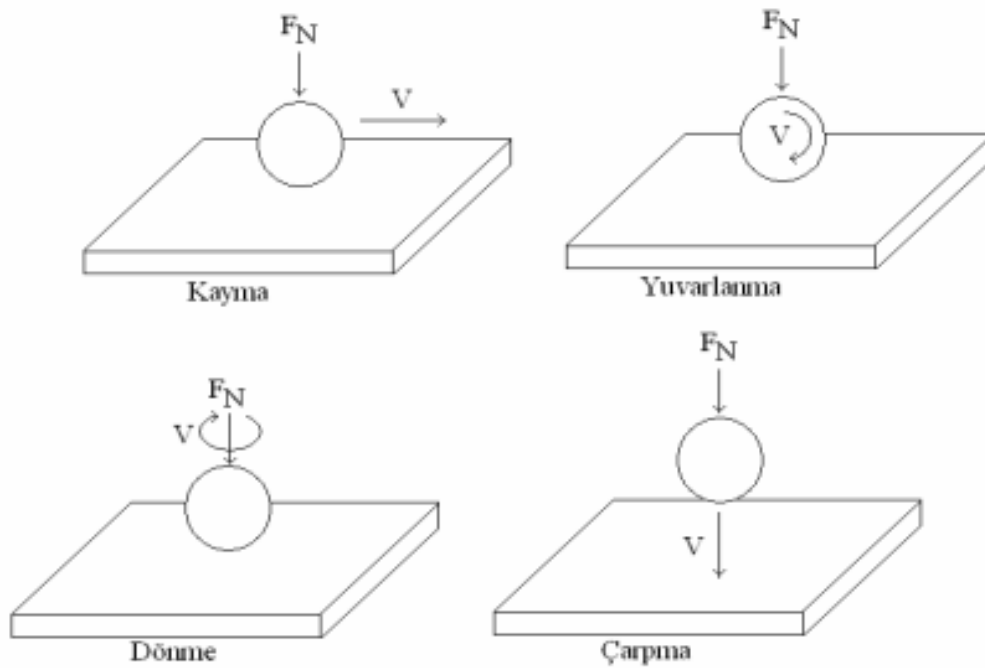


Şekil 22: Tribolojik sistemin elemanları (Koç, 2010, 131).

Tribolojik sistemin unsurları, ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, hareket ve çevreden oluşmaktadır (Büyükkelleci, 2008, 1).

- a. Ana malzeme : Gerçek anlamda aşınma ve sürtünme özelliklerinin özel ilgiyle incelendiği ana malzemedir.
- b. Karşı malzeme: Temel sürtünme elemanının çalışma anında temas ettiği düşünülen malzemedir.
- c. Ara malzeme: Temel ve karşı sürtünme elemanları arasında bulunabilecek katı, sıvı, gaz veya bunların birkaçının bir arada bulunduğu maddelerden oluşur.
- ç. Yük: Yükleme büyüklüğü ve şekli tribolojik sistemin önemli parametrelerindendir.
- d. Hareket: Sürtünme sistemlerinde hareket kayma, yuvarlanma veya kaymalı yuvarlanma şeklinde olabilir. Şekil 23'te şematik olarak tribolojik sistemlerin kinematikleri gösterilmiştir (Urun, 2008, 2).
- e. Çevre: Deneyin yapıldığı ortam çevreyi oluşturur. Sürtünme sırasındaki ortamın sıcaklığı, nemi veya ortamın vakumlu olup olmayışı tribolojik sonuçları etkileyecektir.

Bir tribolojik sistem bu unsurların birçoğunu içinde ihtiva eder. Aşınma çiftini oluşturan ana malzeme ve karşı malzeme, aralarında belirli bir ara malzeme varken az veya çok yük altında hareket ettiklerinde aşınma başlar. Yükleme darbeli, darbesiz, sabit, değişken, artan, azalan vb. şeklinde veya bunların birden fazlasının bir arada bulunması halinde olabilmektedir. Hareket ise kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe gibi biçimlerde olabilir (Koç, 2010, 130-131).



Şekil 23: Tribolojik sistemlerin kinematikleri (Karaoğlu, 2006, 3).

Vakumsuz bir ortamda gerçekleşen olayda sıcaklık, nem ve atmosfer aşınma üzerinde etkisi olan çevre etkenleridir (Büyükkelleci, 2008, 6).

Aşınma olayında, olaya katılan ve etkileyen pek çok faktör mevcuttur. Bu faktörler, tribolojik sistemin elemanlarına bağlı faktörler ve işletmeye bağlı faktörler olarak iki ana grupta sıralanmıştır.

1. Tribolojik Sistemin Elemanlarına Bağlı Faktörler;

a. Esas sürtünme elemanına bağlı faktörler:

- 1) Malzemenin cinsi,
- 2) Malzemenin mikro yapısı,
- 3) Malzemenin hacimsel ve yüzeysel sertliği,
- 4) Elastiklik modülü,
- 5) Deformasyon özelliği,
- 6) Malzemenin gördüğü ısı işlemi,
- 7) Yüzey pürüzlülüğü,
- 8) Malzemenin şekli ve boyutları.

b. Karşı malzemeye bağlı faktörler:

- 1) Aşındırıcı tane büyüklüğü,
- 2) Tane şekli,
- 3) Tane dağılımı,

c. Ortama bağlı faktörler:

- 1) Sıcaklık,
- 2) Nem,
- 3) Atmosfer,

2. İşletmeye bağlı faktörler;

a. Yük (basınç),

b. Hız,

c. Kayma ve kayma mesafesi (Büyükkelleci, 2008, 9-10).

Aşınma, fiziksel olarak birbirine temas eden ve izafi hareketi bulunan iki cisim arasında doğan bir enerji transferi mekanizması olan sürtünme sonucunda doğar. İlk bakışta genel olarak bu tanım doğru olsa bile doğruların tam bir ifadesi sayılmaz. Çünkü temas eden ve

harekete başlayan iki cisim arasında sürtünme ile aşınma aynı anda olmakta ve aşınma parçacıkları sürtünme hadisesine doğrudan etki etmeye başlamaktadır. Bu olayı önlemek için ise bilinen en etkin yöntem müsaade edildiği yerde yağlamadır (Özmen, 2004, 31).

Herhangi bir makinede birbirleriyle sürtünerek iş gören birçok parça vardır. Dişliler, rulmanlar, kamlar, miller, pistonlar, teker lastikleri, fren balataları bunlara örnek gösterilebilir. Tüm bu örneklerde iki yüzey birbirleriyle etkileşim halinde ve birbirine göre bağlı hareket etmektedir (Şafak, 2008, 8).

Makine elemanlarının ortalama %70'inin hurdaya ayrılma nedeni aşınmadır. Meydana gelen malzeme kayıpları, aşınan parçaların yenileriyle değiştirilmesi zorunluluğu, makinelerin bakım-onarım faaliyetleri için harcanan zaman, emek, bu faaliyetler için istihdam edilen teknik personel, sürtünme sonucu oluşan enerji kayıpları göz önüne alındığında tribolojinin önemi anlaşılmaktadır (Şafak, 2008, 8).

Triboloji alanında yapılan araştırmalar genellikle malzemelerin sürtünme katsayısının ve aşınma mekanizmalarının belirlenmesi, sürtünme ve aşınmaya sebep olan yüzeylerin birbirleriyle temaslarını kesecek ince film malzemelerin veya endüstriyel yağlarının bulunması gibi konuları içerir. Ancak her zaman sürtünmenin ve aşınmanın azaltılması istenmeyebilir. Örneğin fren balatalarında sürtünme katsayısının yüksek olması istenirken, silgilerde aşınmanın yüksek tutulması istenmektedir (Şafak, 2008, 9).

Tribologlar, bu problemlere çözüm getirmeye en yatkın kişilerdir. Fakat tribologlarında sahip olması gereken bazı ilave özelliklerinin zorunluluğu söz konusudur. Aşınma ve sürtünme birbiriyle ortak çalışan bir malzeme çiftinin kendi özelliğinden ziyade, mekanik sistemin özelliklerinin toplamına büyük oranda bağlıdır. Fizikçiler, kimyacılar, malzemeciler tribolog olabilir hatta tribolojik problemleri iyi analiz edip değerlendirmeler yapabilirler. Fakat makine tasarımı bilgisi eksikliği onların aşınma problemlerine getirecekleri çözümleri çok sınırlı kılar. Bu nedenle makine tasarım bilgisi bir tribologda olmazsa olmaz şartlardan birisidir. Makine tasarımcısı da kendisinin tasarım bilgilerine güvenerek tribolojiyi küçümsediğinde o da problemi çözmede yetersiz kalacaktır. Öyle ise tribolojik problemlere çözümler üretecek olan tribologların çok iyi tasarım, kimya, fizik ve malzeme bilgisine sahip olmanın yanı sıra ve bunlara ilaveten çok iyi bir sentez kabiliyetine sahip olması zorunluluğu söz konusudur (Özmen, 2004, 32).

Tribologların ortaya koydukları çözümlerden en etkin olanı aşınma haritaları yöntemidir. Fakat bu yöntemde aşınma problemine tam olarak çözüm demek değildir. Bu yöntem sadece farklı malzemeler arasında kıyas yapabilme imkânı veya malzeme değişmediği halde çalışma şartları değişince malzemenin nasıl davranacağına ait bir fikir vermektedir (Özmen, 2004, 32).

5.2. Sürtünme

Sürtünme, DIN 50281'e göre "Birbiri üzerinde kayan, yuvarlanan veya kaymalı yuvarlanan elemanların izafi hareketlerini yavaşlatan (dinamik sürtünme) veya engelleyen (statik sürtünme) mekanik direnç" olarak tanımlanmaktadır (Kalkan, 2008, 50).

Sürtünme kuvveti, cisimler hareket ederken temas ettikleri yüzeylerin sürtünmesinden kaynaklanan ve yer değiştirmeye zıt yönde ortaya çıkan kuvvete denir (Şafak, 2008, 9).

Sürtünmenin sayısal değeri bazı durumlarda hesaba katılmayacak kadar küçük olsa dahi pratik olarak daima mevcuttur. Amontons'a göre sürtünme katsayısı her bir birim yükteki sürtünme direncidir (İzciler ve Bilgiç, 2001, 837).

Sürtünme direncini oluşturan parametreler oldukça fazladır ve bunların etkileri büyük farklılıklar göstermektedir. Bağlı hareketin türü, elemanların fiziksel durumları, aralarında üçüncü maddenin bulunup bulunmadığı ve ortam şartları gibi parametreler olayı daha karmaşık bir hale getirmektedir (Karaoğlu, 2006, 3).

Sürtünme katsayısı ile ilgili ilk çalışmalar kuru sürtünme ve mekanik teori ile ilgilenen Leonardo Da Vinci'nin öncü çalışmaları ile başlamıştır. Da Vinci ilk defa malzeme ağırlığı ve sürtünme katsayısı arasındaki ilişkiyi 0,25 olarak belirlemiştir (Demiral ve Yasar 2006, 18).

İlk mekanik sürtünme teorisini kuran Amontons ve Coulomb'un buldukları temel sürtünme kanunları şunlardır (Kalkan, 2008, 51):

- a. Katı cisimler arasındaki sürtünme, görünen temas alanından bağımsızdır.
- b. Kinetik sürtünme kayma hızından bağımsızdır.

- c. Sürtünme kuvveti malzeme çiftine bağlıdır.
- ç. Sürtünme kuvveti F_s ile normal kuvvet F_N doğru orantılıdır.

Amontons'a göre sürtünme kuvveti, cisimler arasındaki normal yük ile doğru orantılıdır. Yani bir cisim diğeri üzerinde kayarken normal yük iki katına çıkarılırsa, sürtünme kuvveti de iki katına çıkar (Karaoğlu, 2006, 6).

Coulomb tarafından açıklanan diğeri teoriye göre, sürtünme kuvveti kayma hızına bağlı değildir. Ayrıca Coulomb'a göre bir cismi harekete geçirmek için gerekli olan kuvvet, hareketi devam ettirmek için gerekli olan kuvvetten daha büyüktür ve Coulomb bu olayı statik ve kinetik sürtünme katsayısı ile tarif etmiştir (Karaoğlu, 2006, 6).

Tabor'a göre katı cisimler arasındaki kuru sürtünmede üç ana faktör rol oynamaktadır (Kalkan, 2008, 51):

- a. Gerçek temas alanı,
- b. Temas noktalarında meydana gelen adezyon bağları,
- c. Temas bölgesindeki malzeme hareketi ve bağların kopma şekli.

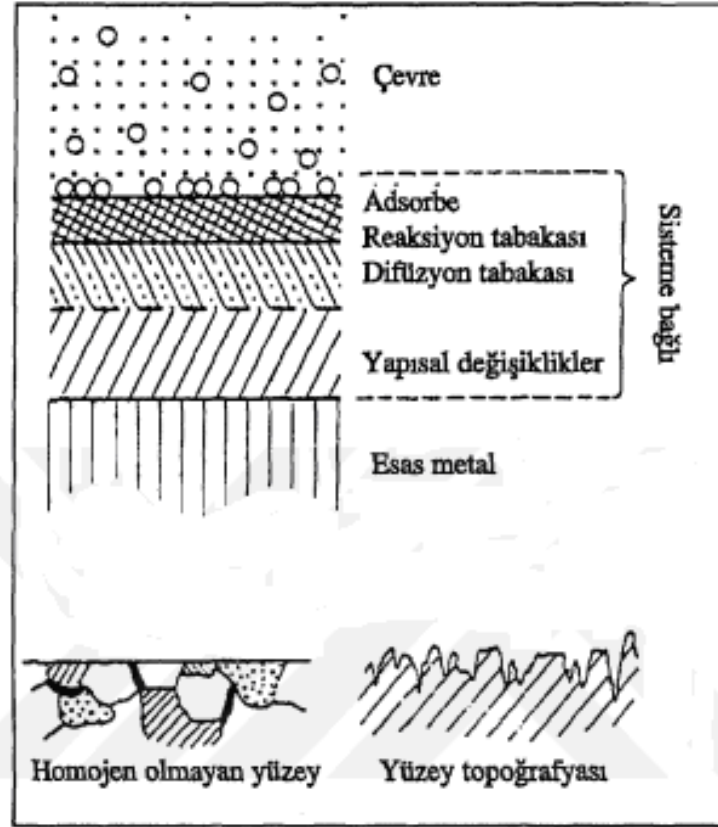
Sürtünme konusunda yapılan araştırmalar, Tabor'un ortaya koyduğu bu bilgilerin ışığında pürüzlülük ve bunların temas mekanizmasındaki rolleri üzerinde yoğunlaşmıştır. En yaygın kullanılan temas modelleri, Greenwood-Williamson ve White-Archard mikro temas modelleridir. Bu modellerde de katı cisimler arasındaki temasın pürüzlü noktalarda, aşırı gerilme yığılması altında plastik deformasyon sonucu meydana geldiği kabul edilmektedir (Kalkan, 2008, 51).

Sürtünme katsayısının, kayma mesafesine ve süresine, sertliğe, temas yüzeyinin ortalama tane büyüklüğüne ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu çeşitli deneylerle gösterilmiştir. Bu katsayı, artan kayma mesafesi ve süresi, yüzey tabakasının artan tane büyüklüğü ile belirli bir değere kadar artar ve daha sonra yaklaşık sabit bir değerde devam eder (Demiral ve Yasar, 2006, 18).

Sürtünme ve aşınma hareketli parçaların yüzeylerinde meydana gelmektedir. Dolayısıyla yüzeyler bütün etkileşimlerin ana bölgesi şeklinde önemli bir rol oynamaktadırlar (Doğan,

2001, 25). Yüzeyler ne kadar düz görünürse görünsün, mikroskobik boyutta girinti ve çıkıntılara sahiptir (Şafak, 2008, 9).

Yüzeyin enine kesitinde ise, farklı fazlar ve/veya farklı tane yönleri şeklinde heterojen bir yapı ve pürüzlü veya dalgalı biçimde yüzey topografyası görülmektedir (Doğan, 2001, 25).



Şekil 24: Şematik yüzey mikro yapısı (Doğan, 2001, 26).

Metalik bir malzemenin yüzeyi çok hassas işlense ya da parlatılsa dahi, yüzeydeki girinti ve çıkıntılar, yani pürüzler tamamen giderilemez (Kalkan, 2008, 52). İki yüzey birbirine yaklaştırıldığında temas, başlangıçta sadece birkaç noktada meydana gelmektedir (Doğan, 2001, 25). Böylelikle gerçek temas alanı görüldüğünden çok daha küçük olur (Şafak, 2008, 9).

Bu durumda yüzeye etki eden yük, sadece pürüzlerin birbirlerine temas ettiği noktalardan desteklenir ve yüzey alanının çok küçük bir kısmı yükü taşır (Kalkan, 2008, 52). Bu küçük temas noktalarına uygulanan yükten dolayı bu noktalarda yapışma ve bölgesel kaynaklar oluşur. Cisimler birbiri üzerinde hareket ettirilmeye çalışıldığında önce bu bölgesel

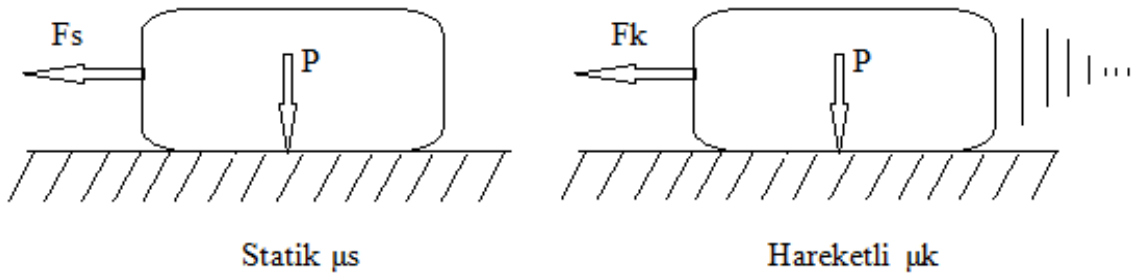
kaynakları koparmak gerekecektir. Bu nedenle cisimlerin yüzeyleri ne kadar pürüzlü ise sürtünme kuvveti de o kadar fazla olacaktır (Şafak, 2008, 9-10).

Aynı şekilde cismin ağırlığı arttığında cismin ve yüzeyin girinti çıkıntıları daha fazla birbirine içine gireceğinden sürtünme de artar. Yani cismin hareketini engelleyen kuvvetin büyüklüğü de artar. Cismin hareket etmesini engelleyen bu kuvveti yenmek için, bu kuvvetten daha büyük bir kuvveti cisme uygulamak gerekir (Şafak, 2008, 10).



Şekil 25: Sürtünme esnasındaki gerçek temas noktaları (Şafak, 2008, 10).

Sürtünme genel olarak statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayrılır. Birbirlerine temas eden yüzeyler arasında bağıl hareket yoksa statik sürtünmeden söz edilir (Şafak, 2008, 10). Eğer temas eden yüzeyler arasında bağıl hareket mevcutsa bu durumdaki sürtünmeye dinamik veya kinetik sürtünme denir (Şafak, 2008, 10-11).



Şekil 26: Statik ve kinetik sürtünme katsayıları (Türküz, 2006, 97).

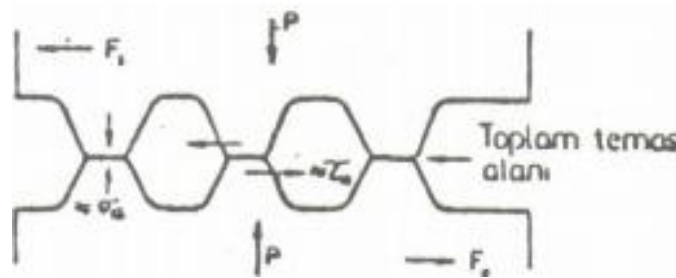
Kaymayı başlatan kuvvet (F_s) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (F_N) arasında aşağıdaki bağıntı mevcuttur (Türküz, 2006, 96-97).

$$F_s = \mu_s \cdot F_N \quad (5.1)$$

Burada μ_s statik sürtünme katsayısıdır. Kayma başladıktan sonra sürtünme kuvvetinde bir azalma olur ve bu durumda aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

$$F_k = \mu_k \cdot F_N \quad (5.2)$$

Burada μ_k kinetik sürtünme katsayısı olup değeri μ_s 'den daha düşüktür (Türküz, 2006, 97). Bu durum Şekil 27’de gösterilmiştir.

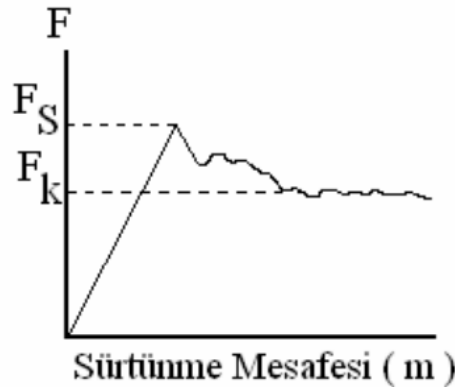


Şekil 27: Metal yüzeyindeki pürüzlerin birbirine teması (Türküz, 2006, 97).

Kinetik sürtünme katsayısı μ_k 'nın daha düşük değerde olması şu şekilde açıklanabilir. Yüzeyler birbiri üzerinde kaymaya başladığı zaman, çıkıntılar statik temasta olduğu gibi atom atoma bağ kuracak zamanı bulamazlar. Oysa statik temas durumunda temas bölgelerinde oluşan plastik deformasyonlar pürüz uçlarını birbirlerine çok iyi bastırarak, temas alanı boyunca atom atoma bağlar meydana getirir; yani soğuk basınç kaynağı oluşur. Statik sürtünme durumunda oluşan atom bağları sebebiyle birbiriyle sürtünen bu iki malzemenin kayması için, malzemenin kayma akma gerilmesi (τ_a) seviyesinde bir gerilmeye ihtiyaç vardır. Bu nedenle kaymaya sebep olan sürtünme kuvveti (F_s) :

$$F_s = a \cdot \tau_a \quad (5.3)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir. Yani temas alanı (a) azaldığında, kaymanın gerçekleşmesi için gerekli kuvvet de buna bağlı olarak azalacaktır. Kinetik temas durumunda, temas alanında atomlar arası bağlar oluşmadığı için temas alanı önemli ölçüde azalır; bunun sonucunda sürtünme kuvveti ve dolayısıyla da sürtünme katsayısı azalır. Kayma durunca, atomlar arası bağlar oluşur ve sonuçta sürtünme katsayısı μ_s değerine yükselir (Türküz, 2006, 97-98).



Şekil 28: Statik ve kinetik sürtünme katsayısının farklılığı (Urun, 2008, 11).

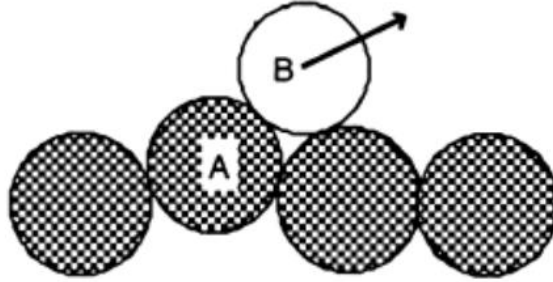
Dinamik sürtünmede, yüzeyler öteleme hareketi yapıyor ve birbiri üstünde kayıyor ise kayma sürtünmesinden, birbirleriyle nokta ya da çizgisel temaslı olup birbirleri üzerinde yuvarlanıyor ise yuvarlanma sürtünmesinden bahsedilir. Eğer yüzeyler birbiri üzerinde aynı zamanda hem dönme hem de kayma hareketi yapıyor ise bu da kayma ve yuvarlanmanın kombinasyonudur. Yuvarlanma sırasında iç içe giren kısımların ayrılması daha kolay olacağından, sürtünme katsayısı genellikle yuvarlanma halinde, kayma halindekiinden daha küçüktür. Bunun bir sonucu olarak da yüzeyi iyi temizlenmiş metal yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti, iyi temizlenmemiş yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinden fazladır (Şafak, 2008, 11).

Sürtünme kuvveti, tamamen malzemelerin özelliklerine bağlı değildir. Nem, sıcaklık, kayma hızı, temas basıncı gibi etkenlerle değişmektedir. Farklı yağlayıcılar, farklı temas bölgeleri ve farklı yüzey pürüzlülükleri için sürtünme katsayısı farklılık gösterir (Şafak, 2008, 11).

Sıcaklığın artmasıyla birlikte malzemede oluşan kayıplar da artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin mikroyapısı ve sertliği değişime uğrayacağından oluşacak aşınma da değişime uğrayacaktır (Çetin ve Gül 2007, 273).

Sürtünme, Şekil 29’da atomik boyutta incelenmiştir. B atomu hareket ettiğinde kendisine yapışmış haldeki A atomu da onu takip etmek isteyecektir. B atomu hareketine devam ettikçe, birlikte yapılan bu hareket, A atomunun komşuları tarafından A’ya uygulanan ve onu eski pozisyonuna doğru çeken kuvvetler, B atomunun uyguladığı kuvveti aşana kadar devam edecektir. Bu noktada A ve B atomu ayrılacaklardır. A atomu aniden yerine doğru

dönecek ve bu esnada çarpıştığı komşu atomlarının titreşimine sebep olacaktır. Bu titreşim de sürtünme sırasında oluşan ısıyı meydana getirmektedir (Şafak, 2008, 11).



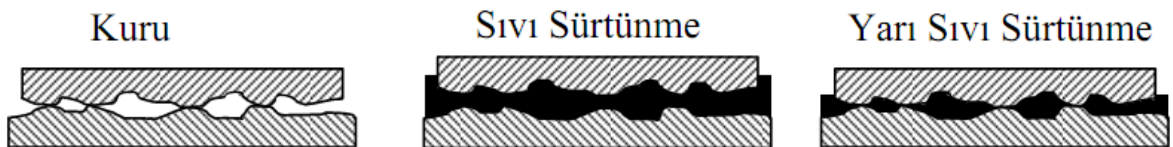
Şekil 29: Atomik boyutta sürtünme (Şafak, 2008, 11).

Sünek malzemelerde atomlar plastik akış sebebiyle orijinal pozisyonundan çok daha uzağa çekilebilirler. Bunun sonucu olarak da sünek malzemelerin sürtünme katsayılarının, kırılğan malzemelere oranla daha fazla olduğu söylenebilir (Şafak, 2008, 12).

Sürtünme, yüzeyler arasındaki temas noktalarıyla ilişkili olduğundan yüzeyler arasındaki teması kesmek ya da azaltmak için yağlayıcı kullanmak sürtünmenin azaltılmasında kullanılan en yaygın yöntemdir (Şafak, 2008, 12).

Sürtünme katsayısı kuru, sınır ve sıvı sürtünme koşullarında tayin edilebilir (Demiral ve Yasar, 2006, 18). Sürtünme kavramı birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasına yağlayıcı madde konulup konulmaması bakımından temas yüzeylerinin durumuna göre, kuru sürtünme, sıvı sürtünme (film sürtünmesi) ve yarı sıvı sürtünme (sınır sürtünmesi) olarak üç halde incelenebilir (Karaoğlu, 2006, 4).

Birbirlerine göre bağıl hareketli olan yüzeyler doğrudan doğruya temasta iseler kuru, yüzeyler bir yağlayıcı tarafından ayrılıyorsa sıvı, yağlayıcı yüzeyleri birbirinden tam olarak ayırmıyorsa yarı sıvı sürtünme meydana gelir (Demiral ve Yasar, 2006, 18).



Şekil 30: Sürtünmenin çeşitleri (Şafak, 2008, 12).

Genel olarak yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme hali kuru sürtünme olarak kabul edilmektedir (Karaoğlu, 2006, 4). En hassas işlemede bile yüzeyde pürüzlülük olacağından, yüzeyler arasındaki temas noktalarında oluşan yüksek basınç, kaynak bağlantısı oluşmasına sebep olacak ve bu sebeple ortaya çıkan sürtünme kuvveti oldukça fazla olacaktır (Şafak, 2008, 13). Mevcut sistemlerin büyük çoğunluğu normal atmosfer şartlarında çalışmaktadır. Atmosfer şartlarındaki sürtünme durumlarında, yüzeyler çok iyi bir şekilde temizlenmiş olsalar dahi, sürtünme sonucunda sıcaklığı yükselen yüzeylerde çok ince oksit tabakaları oluşmaktadır. Bu oluşum, yüzeylerin sürtünme ve aşınma davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir (Karaoğlu, 2006, 4).

Sürtünen yüzeylerin arasına yağlayıcı olarak tanımlanan maddelerin girmesi veya gönderilmesi durumunda yüzeyler artık kuru olmayacaktır. Bu durumda sürtünme, yağlanmış yüzeyler arasında meydana gelecektir (Karaoğlu, 2006, 4). Yüzeyler arasındaki yağ filmi yeterli kalınlıkta oluşmadıysa bazı pürüz tepelikleri birbirlerine temas edebilir. Bu durum yarı sıvı sürtünmedir (Şafak, 2008, 13). Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme kat sayısı genel olarak 0,02 ile 0,1 arasında değişmektedir (Soydaş, 2006, 8).

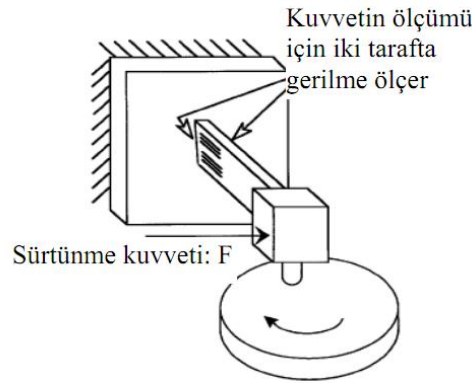
Bu durumda sürtünme direncinin üç temel bileşeni olacaktır. Bu bileşenler, adeziv bileşen, deformasyon bileşeni ve yağ filminin kayma direncidir. Yüzeylerin iyi işlenmesiyle deformasyon direnci, kayma hızının artırılması ve yağlayıcı maddelere değişik türlerde katkı maddelerinin ilave edilmesiyle de adezyon direnci büyük bir azalma gösterecektir. Böylece hem sürtünme direnci hem de aşınma miktarı azalacaktır (Karaoğlu, 2006, 4-5).

Sınır ve kuru sürtünme durumlarında, sürtünme katsayısının kayma hızı ile değişimi, tutma-bırakma denilen olayı meydana getirir. Aşınmış debriyaj ve fren balatalarında, özellikle küçük kayma hızı bölgelerinde bu olay sonucunda meydana gelen sarsıntı ve ses, yine ıslak parmak ucunun bir cam bardak kenarına sürtünmesi sonucunda çıkan yüksek frekanstaki ses titreşimleri tutma-bırakma olayının sonucudur. Pratikte tutma-bırakma titreşimleri, küçük kayma hızları bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Bu olayı engellemek için sistemin yaylanma rijitliğini arttırmak veya sürtünme katsayısının, kayma hızı ile değişim eğilimini azaltmak en uygun çözümlerdir (Karaoğlu, 2006, 5).

Pratikte kuru sürtünmede olduğu gibi sınır sürtünmesi bölgesinde çalışan sistemlerin sürtünme katsayıları deney ile tayin edilir (Soydaş, 2006, 9).

En ideal tribolojik ortam, iç sürtünme direnci çok düşük olan kesintisiz bir ara tabakanın oluşumu ile ortaya çıkar (Karaoğlu, 2006, 5). Sıvı sürtünmede, iki yüzey arasındaki yüzey pürüzlülükleri karşılıklı temas etmeyecek şekilde yüzeyler arasında yağ filmi oluşturulmuştur (Şafak, 2008, 13). Sıvı sürtünmenin oluşmasında rol oynayan esas etken yağ tabakasında meydana gelen basınçtır (Urun, 2008, 7). Böylece bağlı hareket yapan yüzeyler arasında oluşabilecek adeziv ve deformasyon dirençleri ortadan kalkar (Karaoğlu, 2006, 5). Bu durumda sürtünmeyi oluşturan faktör yağın viskozitesidir. (Şafak, 2008, 13). Uygun ara tabaka yani yağlayıcı seçimi ile kontrol altında tutulabilecek bir sürtünme ve aşınma durumu elde edilir (Karaoğlu, 2006, 5).

Sürtünme katsayısını bulmak için basit yaylı kuvvet ölçerlerden, uygulanan yükle orantılı elektriksel sinyal üreten cihazlara kadar geniş kapsamda kuvvet ölçerler kullanılmaktadır. Kuvvetin uygulandığı parçadaki şekil değişimi, gerilme ölçerler, kapasitans sensörler, indüktans sensörler, piezoelektrik malzemeler, optik girişim gibi kuvvet ölçerler yardımıyla ölçülür. Bunlardan en yaygın olanı ise güvenilirliği, basitliği ve kolay kalibre edilmesi sebebiyle gerilme ölçer (strain gauge) lerdir (Şafak, 2008, 14).



Şekil 31: Sürtünme ölçümü için basit sistem (Şafak, 2008, 15).

Birçok kuvvet ölçer bulunduğu gibi farklı dizaynlarda sürtünme kuvveti ölçme cihazlarında mevcuttur. Bu çalışmada kullanılacak olan Şekil 31'deki pim-disk tipi sistem akademik ve endüstriyel laboratuvarlarda kullanılan en yaygın sistemdir (Şafak, 2008, 15).

5.3. Aşınma ve Aşınma Mekanizmaları

Bir metal çifti, kayma esnasında yük altında kaldığı sürece plastik deformasyona uğrayacaktır. Kaymanın ilk etkisi, yüzey topografyasında değişiklik olarak ortaya çıkacaktır (İzciler ve Bilgiç, 2001, 837).

En genel anlamı ile aşınma, birbiriyle temas halinde olan elemanlar arasında, mekanik, fiziksel ve kimyasal etkenler sonucunda mikroskobik parçacıkların kopmasıyla oluşan malzeme kaybı ve istenmeyen yüzey değişikliğidir (Karaoğlu, 2006, 9). Diğer bir ifade ile eş çalışan iki yüzey arasında izafi kayma sonucu zamanla meydana gelen malzeme ve kütle kaybıdır (Arı ve Parlar 2013, 320).

DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarına göre aşınma; "kullanılan malzemelerinin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması" şeklinde tanımlanmaktadır (Şafak, 2008, 16). Bir aşınma sisteminde;

- a. Ana malzeme (aşınan),
- b. Karşı malzeme (aşındıran) temel unsurlar olarak sayılabilir (Soydaş, 2006, 18).

Sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında kaçınılmaz olan ve kompleks bir sistem özelliği gösteren aşınma, sanayide bir çok tribolojik sistemlerde görülen korozyonun ve yorulmanın yanında üçüncü büyük problemdir (Demiral ve Yasar, 2006, 19). Yapılan araştırmalar, makine elemanlarında oluşan hasarın %75'inin sürtünen yüzeylerin aşınması sonucu meydana geldiğini göstermektedir (Demiral ve Yasar, 2006, 18). Bu açıdan üzerinde araştırmalar yapılması ve en aza indirme çalışmalarının yoğunlaşması, teşvik ve desteklenmesi gerekmektedir (Kalkan, 2008, 57).

Aşınma, mikro kırılmalardan dolayı fiziksel ayrışma ile malzeme taşınımının bir sonucudur. Kimyasal olarak ise temas eden yüzeylerdeki erimeler veya çözünmeler ile meydana gelmektedir (Büyükkelleci, 2008, 4).

Mühendislik malzemelerinde meydana gelen yıpranma olayının aşınma sayılabilmesi için gerekli şartlar; Mekanik bir etkinin olması, sürtünmenin olması (izafi hareket), yavaş ancak

devamlı olması, malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi, istenmediği halde meydana gelmesidir (Koç, 2010, 130).

Birbiriyle temas halinde olan malzeme yüzeyleri, oksit filmleri veya yağlayıcılar ile korunsa bile, mekanik yüklemeler altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması, iki yüzeyin birbiriyle doğrudan temasına sebebiyet verebilir. Bu temas, malzemenin çalışma koşullarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya neden olur (Kalkan, 2008, 54). Bunun sonucu olarak makine elemanları giderek aşınır ve fonksiyonlarını sağlıklı olarak yerine getiremez hale gelir (Şafak, 2008, 16). Hemen hemen tüm makineler aşınma sonucunda mukavemet ve emniyetlerini kaybederler (Belevi ve Eş 2007, 46).

Malzeme geometrisi, malzeme sertliği ve aşınmanın meydana geldiği ortam koşulları, aşınma hızı üzerinde önemli etkiye sahiptir (Türküz, 2006, 98). Bu nedenle aşınmanın etkin olduğu yerlerde malzeme seçimi önemli olmakla birlikte hepsi demek değildir (Özmen, 2004, 31). Aşınma, oluşma hızı ve biçimi açısından zamanla gelişen ve aniden meydana gelen aşınma olmak üzere ikiye ayrılır (Şafak, 2008, 16).

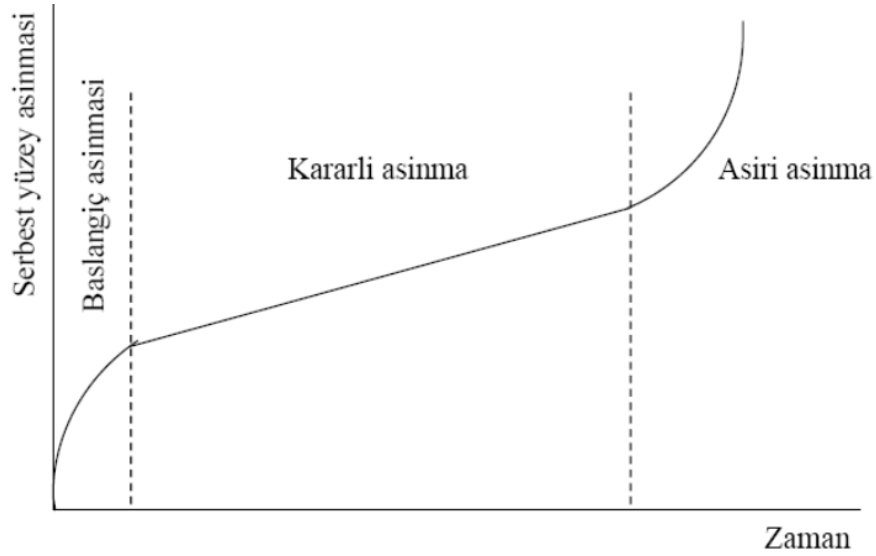
Zamanla gelişen aşınmada makine elemanı üç aşamada aşınır ve normal çalışma ömrünü tamamlar. Zamanla gelişen aşınmanın kademeleri şu şekilde sıralanabilir:

Başlangıç (rodaj) aşınması: zamanla gelişen aşınmanın ilk safhası makine elemanlarının alışma safhasıdır. Bu safhada hızlı ve şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu ilk aşınmaya rodaj aşınması denir. Makine elemanlarının ömürlerinin uzun olması için rodaj aşınması mümkün olan en kısa zamanda, en az yükte ve normal hızdan daha düşük hızlarda tamamlanmalıdır. Bunu sağlamak için makine elemanları rodaj için özel üretilmiş özel katkılı yağlayıcılarla yağlanırlar (Şafak, 2008, 16).

Asıl (kararlı) aşınma safhası: Rodajdan sonraki aşama, makine elemanının ömrünü belirleyen asıl aşınma safhasıdır. Bu safhada aşınma hızı çok azdır. Rodaj ne kadar uygun yapılmışsa bu aşama, dolayısıyla makine elemanı ömrü o kadar uzun olur. (Şafak, 2008, 16-17).

Aşırı (şiddetli) aşınma safhası: makine elemanı önceden belirlenen bir aşınma sınırına kadar aşındığı zaman normal çalışma ömrünü tamamlamış demektir. Bu aşınma safhasında aşınma hızı oldukça artmıştır ve makine elemanı değiştirilmelidir (Şafak, 2008, 17).

Aniden meydana gelen aşınma, parçalar üzerinde olaydan önce herhangi bir aşınma yokken; yanlış malzeme seçimi, yağlamanın uygun yapılamaması, sürtünme dolayısıyla meydana çıkan ısı enerjisinin dış ortama aktarılamaması gibi sebeplerden dolayı aşınmanın aniden ortaya çıkmasıdır. Birbiriyle eş çalışan makine elemanları bu durumda kilitlenebilirler ve çalışamaz duruma gelirler. Yatak sarması bu olaya örnek gösterilebilir (Şafak, 2008, 17).



Şekil 32: Aşınma safhaları (Şafak, 2008, 17).

Aşınmanın azaltılması için tasarım esnasında dikkat edilmesi gereken bazı kriterler şu şekilde sıralanabilir:

- a. Temas basıncının düşük tutulması,
- b. Kayma hızının düşük tutulması,
- c. Az pürüzlü yataklama yüzeylerinin seçilmesi ,
- ç. Yüksek sıcaklıklardan kaçınılması,
- d. Sert malzemelerin kullanılması,
- e. Düşük sürtünme katsayılı malzemelerin kullanılması,
- f. Yağlayıcı kullanılması (Şafak, 2008, 18).

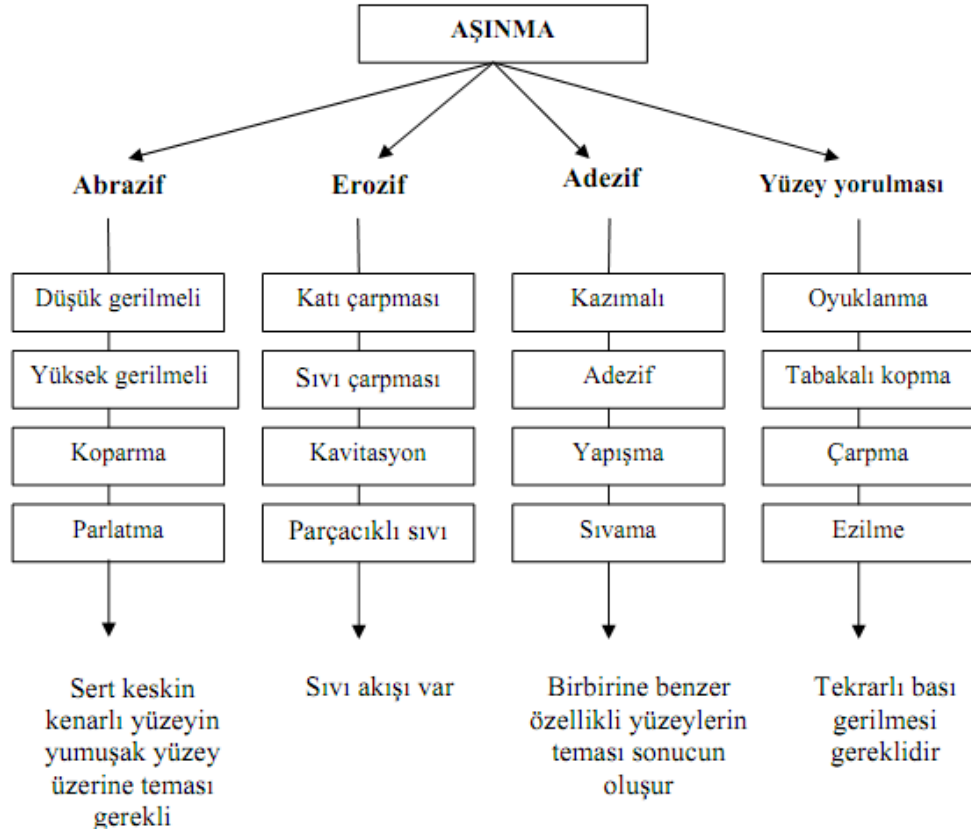
Bununla birlikte, ince kaplamalarda aşınma direnci, çalışma esnasında kaplama ile taban malzeme arasında bütünlüğünü koruyabildiği sürece (iyi yapışma) sağlandığı için taban malzemenin elastik davranışı da kaplama/tabana malzeme bileşiminin yapışma davranışında önemli etkiye sahiptir (Alsın vd. 2002, 2).

Aşınma, dış etkiler altında oluşan fiziksel ve kimyasal değişikliklerin sonucu olarak ortaya çıktığından, pratikte bir aşınma hali değil, birçok aşınma halleri veya başka bir ifadeyle aşınma mekanizmaları mevcuttur (Şafak, 2008, 18).

Genel bir sınıflandırma yaparak bunlara fiziksel ve kimyasal olaylar ve bunların karışımı denebilir. Çoğu zaman ise olayı daha da karmaşık hale getiren bu mekanizmaların iki ya da daha fazlasının aynı anda etkin olarak bir birlerini teşvik etme ve hızlandırmaları da söz konusudur. Bu yüzden toplam aşınmanın hangi nedenden kaynaklandığını ortaya koymak çok daha detaylı analizleri gerektirecek, zahmetli ve masraflı bir hal alacaktır. Bunun yanı sıra çözüm aşamasına gelindiğinde bir türe uygun olan çözüm diğer tür için zararlı ve tehlikeli olabilmektedir. Örnek olarak sistemde abrasyon, yorulma ve adezyon aşınmalarının aynı oranlarda etkin olduğunu varsayalım. Abrasyon aşınmasının en etkin çözümü malzemenin sertliğini artırmaktır. Bu durumda malzeme gevrekleşecek ve yorulma açısından riskli hale gelecektir. Ayrıca sert malzeme karşı yüzeyde adezyon aşınmasını hızlandıracaktır. Kabaca verilmeye çalışılan bu örnekte görüldüğü üzere bir mekanizmanın çözümü diğer mekanizmanın azmasını doğuracaktır. Öyle ise tribolog orta yolu bulmakla vazifelidir (Özmen, 2004, 33).

Malzeme kaybına neden olan başlıca dört tip aşınma mevcuttur. Bunlar; adeziv aşınma, abrazif aşınma, korozyon aşınması ve yüzey yorulmasıdır (Kalkan, 2008, 54). Mekanik etkilerin yanında çevresel etkiler nedeniyle meydana gelen korozyon olayı da çoğu zaman aşınmayı artırıcı yönde etkide bulunur (Ezirmik, 2008, 7).

Bu mekanizmalar, aşınan yüzeylere uygulanan yük, aşındırıcı parçacığın boyutu ve türü, temas şekli ve temas geometrisi gibi etkenler dikkate alınarak sınıflandırılmıştır (Şafak, 2008, 18).



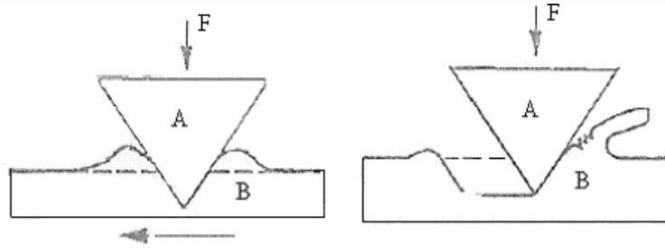
Şekil 33: Aşınmanın sınıflandırılması (Ezirmik, 2008, 8).

Sürtünme ve aşınma mekanizmalarını anlamak için yüzey pürüzlülüğünün mikroskopik olarak ölçülmesi önemlidir (İzciler ve Öcal, 2001, 829).

Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte optik, elektronik aletler gelişmiş ve ölçümler bu aletlerle yapılmaya başlamıştır (İzciler ve Öcal, 2001, 831).

5.3.1. Abrazif Aşınma

Abrasyon aşınması, karşılıklı hareket eden parçalarda iki yüzey arasındaki sert parçacıkların veya sert olan malzemenin yüzey pürüzlülüklerinin neden olduğu aşınma türüdür (Özmen, 2004, 33). Abrazif aşınma, sert partiküllerin veya sert çıkıntıların katı bir yüzey boyunca hareket etmesi ve önüne çıkan engellere karşı koyması neticesinde oluşur (Koç, 2010, 130).

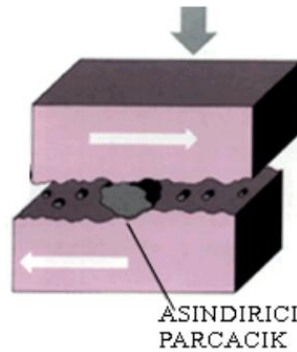


Şekil 34: Abrazif aşınma mekanizması (Karaoğlu, 2006, 12).

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrazif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür (Kalkan, 2008, 55). Abrazif aşınma tüm aşınma maliyetinin yaklaşık % 63'ünü oluşturur (Koç, 2010, 130). Bu aşınma modelinin bir diğer belirleyicisi de kesme veya hasar olayını gerçekleştirecek aşındırıcıların genelde keskin kenarlara sahip olmasıdır (Ezirmik, 2008, 8).

Abrazif aşınma mekanizmasında etkili olan temel faktörler, sertlik, aşındırıcı, tane veya pürüzün boyutu ve şekli, uygulanan normal yük ve kayma hızı olarak sayılabilir (Karaoğlu, 2006, 12).

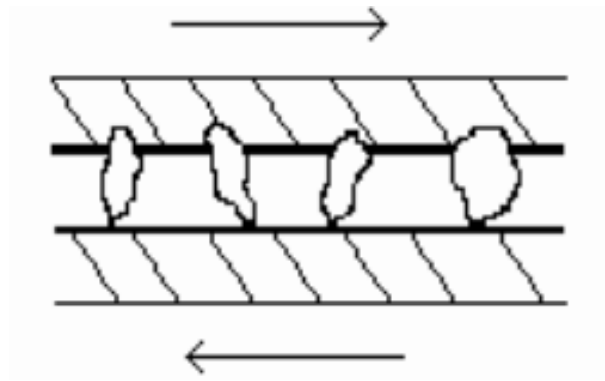
Abrazif aşınmada yüzey hasarı, birbirine göre bağıl hareket yapan iki cismin temas yüzeyleri arasına giren toz, talaş ya da malzeme yüzeylerindeki oksidasyon gibi etkenler sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi sonucunda oluşur. Bu sert parçacıklar, yüzeyler arasında kazıma etkisi yaparak taşlamaya benzer malzeme kaybının oluşmasına neden olurlar. Aşınma zamanla artar ve makine elemanlarının yüzeyinde hareket yönünde malzeme kaybindan ötürü büyük çizikler ve oyuklar meydana gelir. Aşınma sonucunda kopan parçalar da bu mekanizmaya dahil olurlar ve aşınma artarak devam eder (Şafak, 2008, 22).



Şekil 35: Abrazif aşınma (Şafak, 2008, 22).

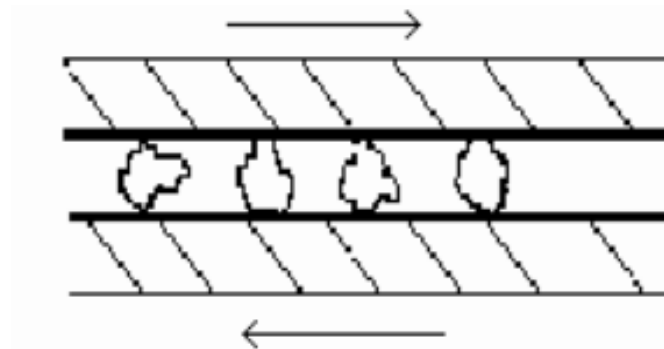
Aşınma sistemi, araya giren aşındırıcı malzemenin yüzeylerden birine gömülü olup olmamasına göre iki yüzeyli ve üç yüzeyli abrazif aşınma olmak üzere ikiye ayrılır (Şafak, 2008, 23).

İlk olarak Şekil 36'da görüldüğü gibi bir malzeme üzerinde bulunan sert partikülün, diğer malzemeyi çizmesi ile meydana gelen abrazif aşınma, iki elemanlı abrazif aşınma olarak adlandırılır (İnçal, 2007, 37). Aşındırıcı malzemenin yüzeye gömülü olması, bir yüzeyi zımparalama işlemine benzer ve yüzeyden aynen bir kesme takımıyla talaş kaldırılması şeklinde aşınma işlemi gerçekleşir (Şafak, 2008, 23-24).



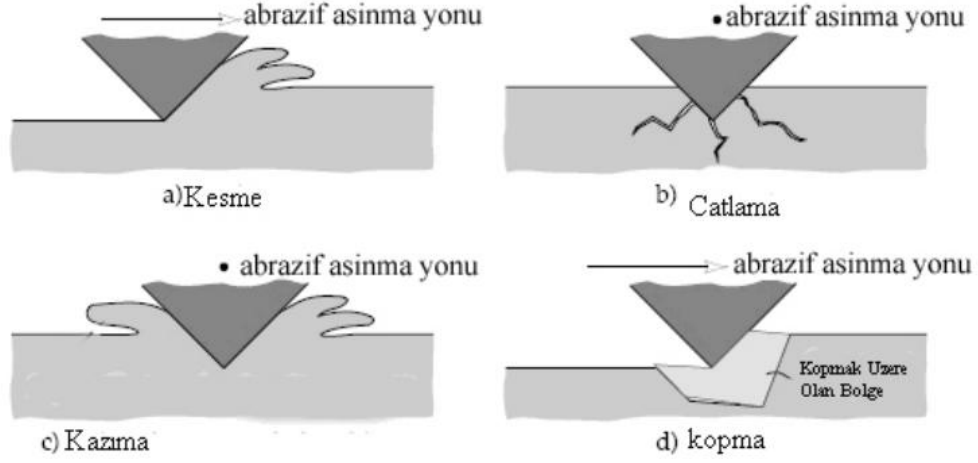
Şekil 36: İki elemanlı abrasyon (Karaoğlu, 2006, 12).

Üç elemanlı olarak meydana gelen abrazif aşınma ise iki malzeme yüzeyi arasında serbest olarak hareket edebilen sert partiküller tarafından meydana getirilir (İnçal, 2007, 37). İki yüzeyli abrazif aşınma, adezyon aşınması ile birlikte meydana gelmektedir. Bu sebeple üç yüzeyli abrazif aşınmaya göre kat kat daha fazla aşınma meydana gelmektedir (Şafak, 2008, 24).



Şekil 37: Üç elemanlı abrasyon (Karaoğlu, 2006, 12).

Abrazif aşınma mekanizmaları genel olarak malzemenin cinsine ve yüzey yapısına bağlı olarak dört başlıkta toplanabilir. Bunlar; kesme, çatlama, kazıma (sürtme), kopma olarak sınıflandırılır (Şafak, 2008, 24).



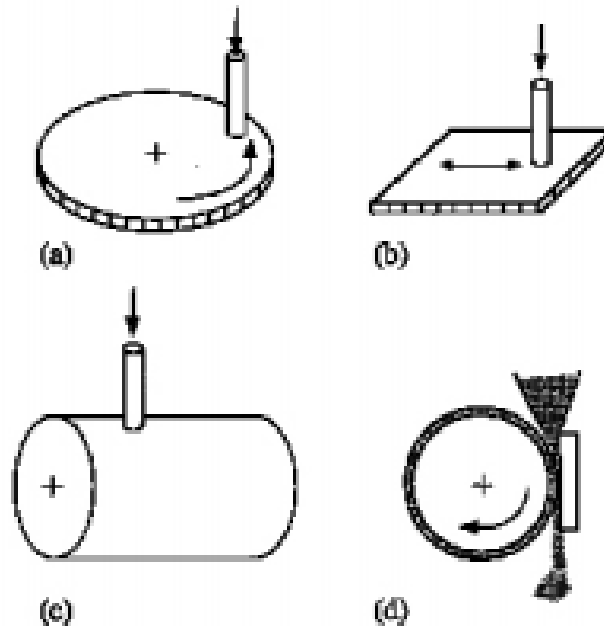
Şekil 38: Abrazif aşınma mekanizmaları (Şafak, 2008, 24).

Kesme aşınmasında keskin köşe profilili veya yüksek sertliğe sahip abrasif uç veya parçacıklar, kendine göre daha yumuşak olan yüzeyden talaş şeklinde malzeme kaldırır. Aşınan malzemenin kırılğan yapıda olması durumunda ise çatlama meydana getirir. Eğer aşındırılan malzeme yumuşak bir malzeme ise ve keskin köşeli olmayan aşındırıcılarla aşındırılıyorsa, kesme olayı gerçekleşmez ve aşınma yüzeyinde deformasyon meydana gelir. Bu durum kazıma ya da sürtme olarak adlandırılır ve bu durumda aşınma atığı metal yorulması sonucunda oluşur (Şafak, 2008, 24-25).

Malzeme yüzeyine etki eden yük azaltılarak, abrasif aşınma hızı düşürülebilir. Böylece sert parçacıklar metal içerisine daha az dalar ve daha az malzeme kaybı meydana gelir (Kalkan, 2008, 56). Abrazif aşınmanın azaltılması için aşınmayı oluşturan taneciklerin ve partiküllerin sistem içine girmesini önleyecek biçimde sızdırmazlığın sağlanması ve yüzeylerin sıklıkla temizlenmesi gerekmektedir (Şafak, 2008, 25). Abrazif aşınma dayanımı sertlik ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu nedenle abrasif aşınma dayanımını arttırmanın en etkili ve ekonomik yolu, uygun yüzey sertleştirme tekniklerinin kullanılmasıdır (Karaoğlu, 2006, 13). Gelişen teknoloji, aşınma kayıplarını en aza indirmek amacıyla çeşitli yüzey modifikasyon işlemlerini de beraberinde getirmiştir (Ezirmik, 2008, 7). Günümüzde, malzemenin tümüyle değiştirilmesi yerine sert yüzey kaplamalarının uygulanması gittikçe yaygınlaşmaktadır. Aşınmaya karşı dirençli ancak pahalı

malzemelerin kullanımı yerine, yüzey üzerine ince kaplama tabakalarının uygulanması ekonomik bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle abrazif aşınmayı önlemeye yönelik olarak sert malzemeler kullanılmalı veya yüzeylerin sertliği ısıtılma işlemi, elektro-kaplama, alev püskürtme, nitrürasyon, plazma sprey, borlama, CVD ve PVD gibi yüzey kaplama yöntemleriyle artırılmalıdır (Şafak, 2008, 25).

Abrazif aşınmayı simüle eden testlerde, taşlama kağıtları ve taşlama tekerleri gibi iki yüzeyli aşınma sistemleri ile aşındırıcı parçaların dönen disk veya teker şeklindeki aşındırılacak yüzey ve karşı yüzey arasında döküldüğü üç yüzeyli aşınma sistemleri kullanılmaktadır. Abrasif aşınma, büyük oranda aşınma taneciklerinin şekline büyüklüğüne, sertliğine ve gevrekliğine bağlı olduğundan, aşındırma elemanının seçimi büyük önem arz eder (Şafak, 2008, 40).



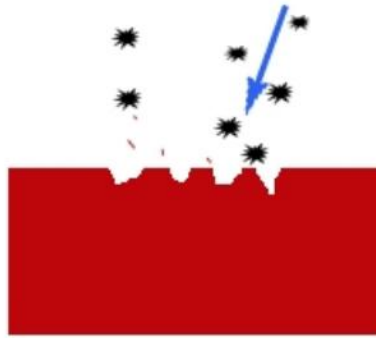
Şekil 39: Abrasif aşınma test cihazı modelleri (Şafak, 2008, 40).

Pratikte en çok kullanılan abrazif aşınma testleri ASTM G99 ile tanımlanan pim-disk (Şekil 39a), DIN 53516 ile tanımlanan ve çoğunlukla polimerlerin testlerinde kullanılan pim-silindir (Şekil 39c), pimin doğrusal kayma hareketi yapan yüzeye uygulandığı pim-levha ve pim-bant (Şekil 39b) ve ASTM G65 ile tanımlanan ve test numunesi ile kenarı kauçuk ile kaplı tekerin arasına abrazif aşındırıcı dökülmesi esasına dayanan kauçuk teker (Şekil 39d) Şekil 39’da gösterilmiştir (Şafak, 2008, 40).

5.3.2. Erozif Aşınma

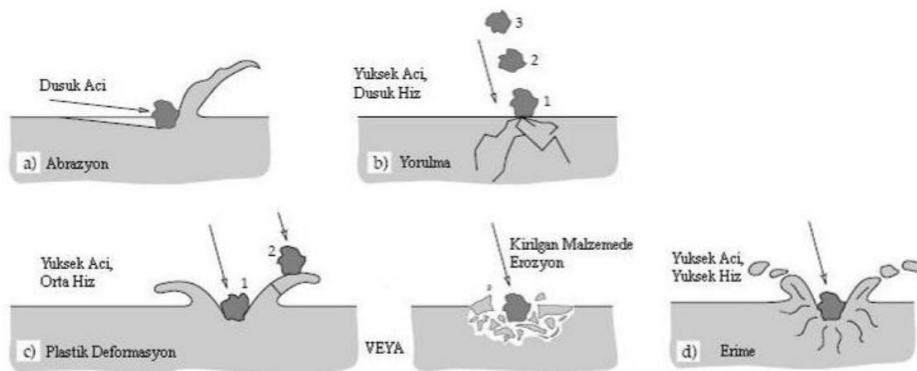
Erozif aşınma, katı bir yüzeyin bir sıvı veya katı parçacığı içeren sıvı ile teması sonucu oluşan mekanik etkileşim sonucunda meydana gelen malzeme kaybıdır (Ezirmik, 2008, 8).

Erozif aşınmanın abrazyif aşınmadan temel farkı, aşınmanın, sert partiküllerin yüzeyi kazımasından ziyade yüzeye çarpması sonucunda oluşmasıdır (Karaoğlu, 2006, 13). Erozyon, bir yüzeye hızla püskürtülen katı parçacıklarının, sıvı veya gaz jetlerinin o yüzeyi aşındırarak malzeme yüzeyinden küçük parçaların ayrılması sonucunda kütle kaybetmesine yol açmasıdır (Şafak, 2008, 26). Bu tür aşınma sistemindeki sıvı, katı yüzey ile kimyasal olarak da reaksiyona giriyorsa bu durumda malzemenin aşınmasına mekanik etkilerin dışında korozyon olayı da katkıda bulunur (Ezirmik, 2008, 8).



Şekil 40: Erozif aşınma (Şafak, 2008, 26).

Erozif aşınma; malzeme türü, çarpma açısı, çarpma hızı ve parçacık büyüklüğüne bağlı olarak farklı mekanizmalarla ortaya çıkar (Şafak, 2008, 27).

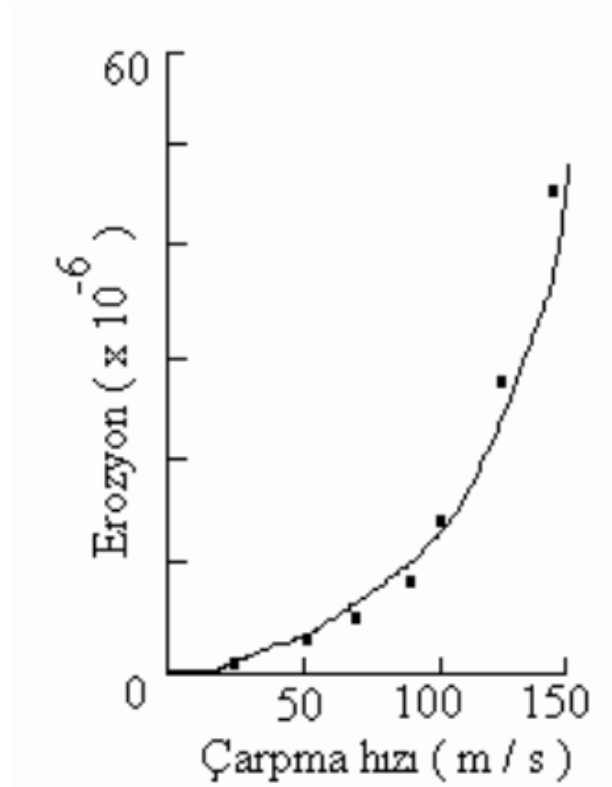


Şekil 41: Erozif aşınma mekanizmaları (Şafak, 2008, 27).

Sert partiküllerin bağıl hareketleri katı yüzeye paralel olduğunda aşınma, abrazif erozyon, dik olduğunda çarpma erozyonu olarak adlandırılır (Karaoğlu, 2006, 13).

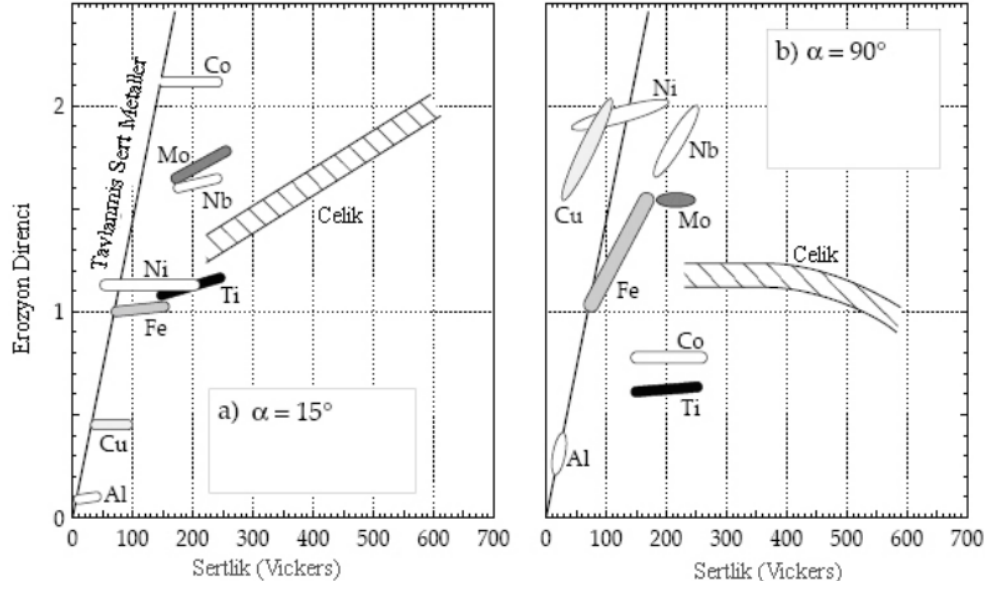
Aşındırıcı parçacıkların hızı da erozyon üzerinde çok büyük bir etkiye sahiptir. Eğer hız çok düşükse çarpma anındaki gerilmeler plastik deformasyon için yetersiz kalır ve aşınma yüzey yorulması şeklinde oluşur (Şafak, 2008, 27).

Hız yükseldiğinde ise plastik deformasyon meydana gelir. Eğer aşındırıcı parçacıklar küresel veya yuvarlak geometriliyse yüksek hızlarda aşırı plastik deformasyon oluşur. Parçacıklar köşeli geometriye sahip ise kesme veya kırılma meydana gelir (Şafak, 2008, 28).



Şekil 42: Aşındırıcı parçacık çarpma hızının erozyona etkisi (Karaoğlu, 2006, 13).

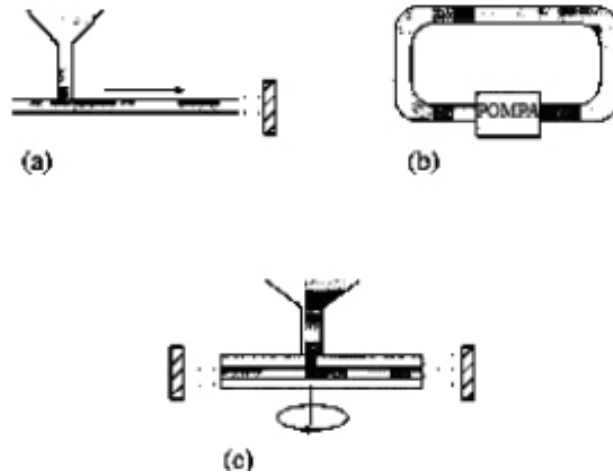
Abrazif aşınmanın aksine malzemenin mekanik özelliklerinin güçlendirilmesi, her zaman malzemenin erozyona karşı direncini arttırmaz. Örneğin aşındırıcı parçacıkların yüzeye dar açılı geldiği durumda sertleştirilmiş çelikte, yumuşak çeliğe göre daha az aşınma meydana gelir. Açı yaklaşık 90° olduğunda ise bu durumun tam tersi geçerlidir (Şafak, 2008, 28).



Şekil 43: Malzeme karakteristikleri ve erozyon parametrelerinin erozyona etkisi (Şafak, 2008, 28).

Şekil 43 incelendiğinde, erozyon açısı 15° olduğunda Kobalt en yüksek erozyon direncine sahip iken, erozyon açısı 90° olduğunda çok düşük bir dirence sahiptir. Bu örnekten de anlaşılacağı üzere erozyon aşınması direncini arttırmak için yapılacak uygulamalarda erozyon parametreleri oldukça önemli bir yere sahiptir (Şafak, 2008, 29).

Aşındırıcı parçacıklar, erozyon aşınmasını simüle etmek için kullanılan test cihazlarında aşındırılacak yüzeye püskürtülür. Parçacıklar yüzeye çarptıkça bozunacağından, bunun istenmediği durumlarda, aşındırıcılar geri dönüşümlü kullanılmaz. Erozyon oranı, aşındırıcı parçacıkların hızı, kütlesi, çarpma açısı gibi etkenlerle değişir (Şafak 2008, 41).



Şekil 44: Eroziyon aşınma test cihazı modelleri (Şafak, 2008, 42).

Aşındırıcı parçacıklar genellikle yüzeye, gaz, su buharı veya döner disk ya da pervane yardımıyla püskürtülürler. Şekil 44a'da gaz tahrikli açık bir sistem, Şekil 44b'de çevrim sistemi gösterilmiştir. Bu test cihazları genellikle boru sistemlerinde kullanılan hidrolik ve pnömatik bileşenlerin aşınma testlerinin simülasyonunda kullanılmaktadır (Şafak, 2008, 42).

Parça hızlarının doğru bir şekilde hesaplanabildiği santrifüj sistem Şekil 44c'de gösterilmiştir. Bu teknik aynı zamanda fazla sayıda yapılacak olan numune testlerini de kolaylaştırmaktadır (Şafak, 2008, 42).

5.3.3. Adezif Aşınma

Yapışma aşınması olarak da isimlendirilen adezif aşınma, bir metal yüzeyinin bir başka metalin yüzeyinde bağıl hareketi sırasında, birbirlerine kaynaklanmış (yapışmış) yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar (Türküz, 2006, 98). Diğer bir ifade ile, eş çalışan parçaların temas yüzeylerinde lokal olarak meydana gelen soğuk kaynakların, hareket sonucunda kopması ve karşı yüzeye transferi şeklinde anlaşılabilir (Özmen, 2004, 33).

Sürtünme sırasında malzeme yüzeyinde meydana gelen kaynak bağlarının kırılması, temas yüzeyinde meydana gelirse malzeme kaybı olmaz. Ancak, kırılmanın temas yüzeyinin uzağında herhangi birinin içinde olması durumunda, kırılan parçacıklar bir yüzeyden diğerine geçerek malzeme transferi meydana gelir. Metallerin birinin diğerine göre daha yumuşak olması durumunda meydana gelen kaynak bağı vasıtasıyla kırılma, yumuşak malzemede olur ve malzeme transferi sert olan malzemeye doğru oluşur. Fakat yüzeyde bulunan nitrür ve oksit tabakaları koparak ve yumuşak malzemeye gömülerek sert olan malzemeyi aşındırabilir (Büyükkelleci, 2008, 19).

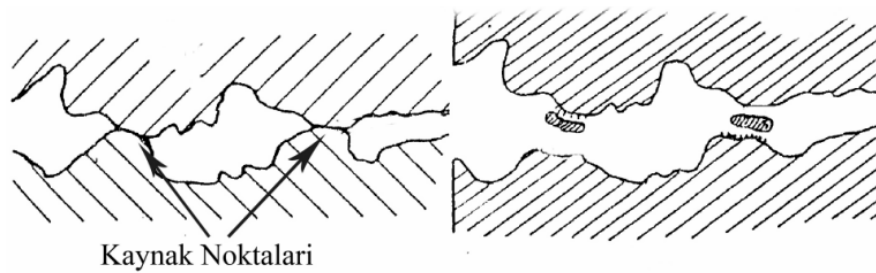
Adezif aşınmanın söz konusu olduğu durumlarda, sökölüp takılması ve tamir olması kolay olan parçaların diğerlerine göre yumuşak olması tercih edilmelidir. Örneğin, ana dişliye göre pinyon dişlinin yumuşak olması tercih sebebi olmalıdır (Büyükkelleci, 2008, 19).

Makroskobik olarak yapılan incelemelerde düzgün görünen malzeme yüzeylerinin, mikroskobik olarak yapılan incelemelerinde önemli derecede yüzey pürüzlülüğü içerdiği gözlenir (İnçal, 2007, 36). Bu bakımdan temas halinde olan iki yüzey, bu çıkıntılar

vasıtasıyla birbirine temas eder. Bu çıkıntılar arasındaki girintiler ise temas alanının dışında kalır (Karaoğlu, 2006, 10). Birbirine temas eden yüzeylerdeki temas alanları çok küçük olduğundan bu noktalarda çok yüksek basınçlar oluşmaktadır (Şafak, 2008, 19). Düşük temas alanına etki eden basıncın gerçekte çok yüksek olması, metal yüzeyler arasında mikro kaynakların oluşmasına yol açar (Urun, 2008, 13). Bu basınç, yani bu noktalardaki gerilme pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyona, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynaklaşmalarına neden olurlar (Demiral ve Yasar, 2006, 19). Bu şekilde meydana gelen bağlar, soğuk kaynak olarak adlandırılır (İnçal, 2007, 36). Birbirleriyle kolayca alaşım haline gelebilen demir, krom ve nikel gibi sert malzemeler arasında kuvvetli kaynak bağlantısı oluşmaktadır (Soydaş, 2006, 7).

Kayma halinde yüksek basınçlara ilaveten, temas noktalarında aşırı sıcaklık artışlarının da olması, kaynak bağlarının oluşumunu kolaylaştırır. Malzeme yüzeyleri ne kadar temiz ise, oluşan bağ o oranda kuvvetli olmaktadır. Rutubet, absorbe gazlar ve yağlayıcı maddelerin varlığı bağ kuvvetini ve dolayısıyla aşınmayı azaltır (Karaoğlu, 2006, 10).

Adezif aşınma en çok, benzer kristal kafes yapılı malzemelerde görülür. Benzer kristal kafes yapısına sahip metallerin hareket ve sürtünmeleri nedeniyle sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzeylerinde kaynak bağlarının oluşumu daha kolay gerçekleşir. Şekil 45'te adezif aşınmadaki kaynak bağının oluşumu görülmektedir (Büyükkelleci, 2008, 18).

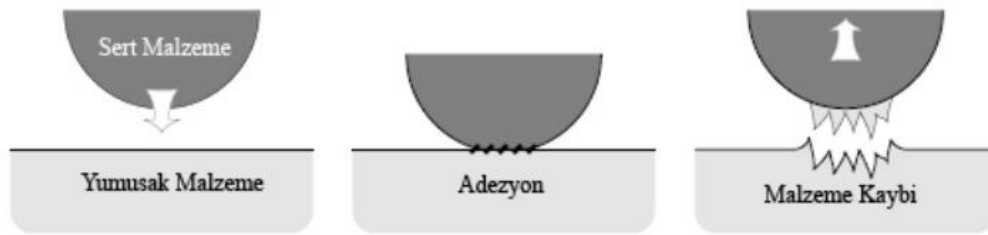


Şekil 45: Adezif aşınma (Şafak, 2008, 19).

Sistemdeki hareketin sürekliliği neticesinde, oluşan kaynak bağları kopar. Kopmanın, bağın oluştuğu kaynama noktasının haricindeki bir noktadan meydana gelmesi ile bir yüzeyden diğerine malzeme transferi söz konusu olur. Bu mekanizmanın bir çok kereler tekrarlanması neticesinde, malzeme yüzeylerinden önemli miktarlarda malzeme kayıpları olabilmektedir. Bu türde bir mekanizma ile meydana gelen aşınma, adezif (yapışma)

aşınması olarak adlandırılır. Bir yüzeyden diğerine malzeme transferi Şekil 46'da görülmektedir (İnçal, 2007, 36).

Adezif aşınma, uygulamada özellikle metaller arasındaki kayma sürtünmesi nedeniyle meydana gelir ve aşınma parçaları yumuşak olan metalden kopar (Türküz, 2006, 99). Çeşitli metal kombinasyonlarında yapılan aşınma testleri sonucunda adezif aşınmanın, malzeme çiftindeki yumuşak malzemeden sert malzemeye kaynak noktasında transfer olduğunu göstermektedir. Bu transfer sonucunda yumuşak malzemeden kopan parçaların bir kısmı sert malzemeye transfer olmakta, bir kısmı ise sürtünme yüzeyleri arasında kalmakta ve yüzeyleri aşındırmaya devam etmektedir (Şafak, 2008, 19-20). Başka bir ifadeyle sertliği yüksek olan malzemeler sertliği düşük olan malzemelere göre daha az aşınır (Çetin ve Gül, 2007, 276). Eğer iki metal aynı sertlikte ise, aşınma her iki yüzeyde de oluşur (Kalkan, 2008, 55).

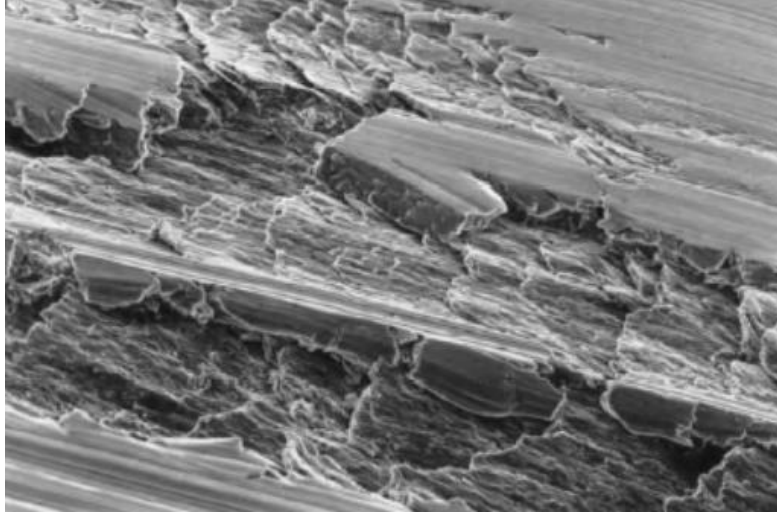


Şekil 46: Adezyon (yapışma) sırasındaki metal transferi (Şafak, 2008, 20).

Rabinowicz, Tabor ve Skorski' nin yaptığı çalışmalar adezif aşınmanın bazı genel özelliklerinin ortaya konulmasında faydalı olmuştur. Bu çalışmalar neticesinde aşınma miktarının, normal yük, kayma mesafesi ve aşınan yüzeyin sertliği ile orantılı olduğu tespit edilmiştir. Çalışmalar söz konusu parametrelerin değiştirilmesine bağlı olarak, bir çok aşınma probleminin çözülebileceğini göstermektedir (Soydaş, 2006, 23).

Adezif aşınma en yaygın aşınma çeşididir ve yüksek aşınma oranları ile sürtünme katsayısında kararsızlıklar doğurur. Özellikle kayan mekanizmalarda adezyon aşınması sonucu çok hızlı bir şekilde hasar meydana gelir (Şafak, 2008, 19).

Adezif aşınma, Şekil 47'de verilen SEM görüntüsünde olduğu gibi yüzeylerde birtakım çizikler şeklinde veya tam tersine yüzeyleri parlatmış gibi görülmektedir (Şafak, 2008, 20).



Şekil 47: Malzeme yüzeyindeki adezyon çizikleri (Şafak, 2008, 20).

Adezif aşınmada temas eden iki yüzey, bir başlangıç periyodundan sonra oluşan aşınma ürünleri (aşındırıcı partiküller) nedeniyle birbirini ile temas edemez hale gelir ve adezyon olayı ortadan kalkar. Artık yeni oluşan aşınma modeli genelde abrazif aşınmadır (Ezirmik, 2008, 9).

Adezif aşınmayı önlemek için; malzemenin diğer mühendislik özelliklerini bozmayacak şekilde mümkün olduğunca sert olması gerekmektedir. Genellikle sert metaller çok zor plastik davranış gösterirler ve daha düşük sürtünme katsayısına sahiptirler. Ayrıca, adezif aşınma benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir. Bu sebeple, malzeme çiftlerinden birisi sert ise, diğeri yumuşak olacak şekilde seçilmelidir. Bunun yanında yüzey topografyasının iyileştirilmesi, temas yüzeyinin arttırılarak yüzey basınçlarının düşürülmesi ve yüzeyin güçlendirilmesi adezif aşınmayı azaltmaktadır. Adezif aşınmayı önlemek için alınabilecek bir diğer tedbir ise yağlamadır. Yüzeylere yapışmış yağ tabakası adezyonu büyük ölçüde önlemektedir (Şafak, 2008, 21).

5.3.4. Yüzey Yorulması

Birbiri üzerinde yuvarlanan parçalarda yüzey yorulması gözlenir (Türküz, 2006, 100). Çok tekrarlı yüklemeler sonucunda, özellikle rulmanlar, dişli çarklar, kam mekanizmaları gibi makine elemanlarında ortaya çıkan ve temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösteren aşınma türüdür (Şafak, 2008, 29). Çatlak oluşumu aşaması olarak da adlandırılan yüzey yorulması, yüzeyin koşullara hassasiyeti ile ilgilidir

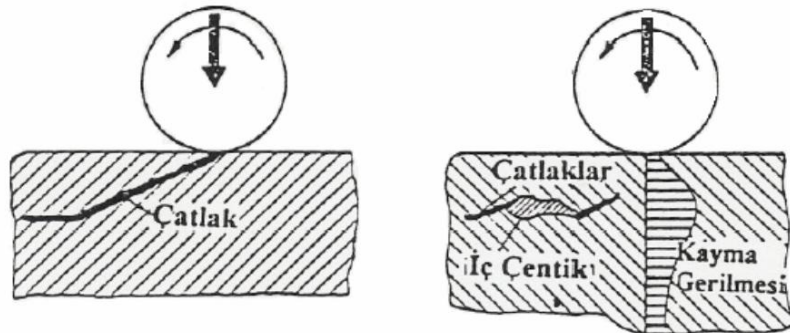
(Doğan, 2001, 27). Sonsuz dişlide meydana gelen yüzey yorulması çukurcukları Şekil 48'te görülmektedir.



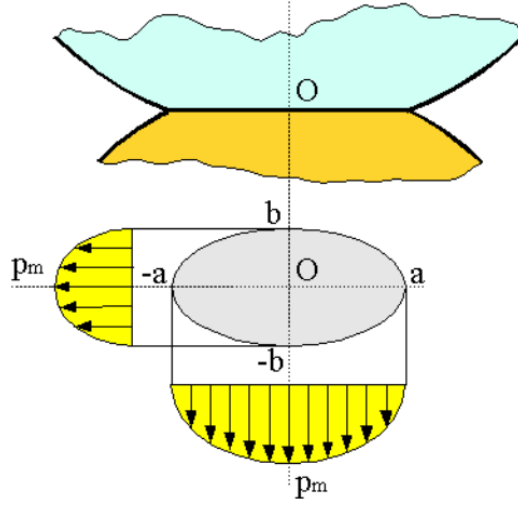
Şekil 48: Sonsuz dişlideki yorulma aşınması (URL-9, 2014).

Sert yüzeydeki pürüzlerin yumuşak yüzeyle teması esnasında pürüzler, mikro kaynak bağları oluşurken, diğer yandan yüzeye bir miktar nüfuz ederek kayma hareketi esnasında bir aşınma izi oluşturmaya çalışırlar (Kalkan, 2008, 57).

Bu elemanlarda yüzeylerin birbirlerine temas alanları küçük olduğundan, yüzeylerde Hertz yüzey basınçları meydana gelir. Bu basınçlar yüzeyin hemen altında kayma gerilmelerine sebebiyet verir (Şafak, 2008, 30). Bu tip aşınmada malzeme kaybı yüzey altı çatlakları nedeniyle meydana gelir (Ezirmik, 2008, 10). Metallerde bu çatlama yüzeyden 0,2-0,3 mm derinlikte başlar (Türküz, 2006, 100). Değişken zorlanmalara maruz bu elemanlarda yorulma olayı başlamış olur (Şafak, 2008, 30).



Şekil 49: Yüzey yorulmasında çatlakın oluşumu ve ilerlemesi (Karaoğlu, 2006, 15).



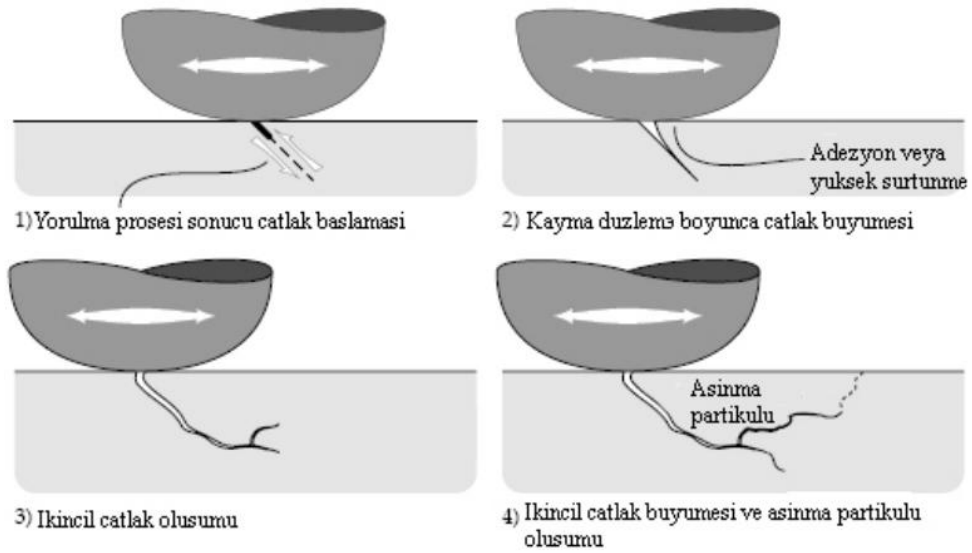
Şekil 50: Küçük temas yüzeyi sonucu oluşan hertz basınçları (URL-9, 2014).

Abrazif aşınma, sert taneciklerin veya daha sert olan malzemenin yüzey pürüzlerinin yumuşak malzeme yüzeyine bir miktar nüfuz ederek aşındırılmasıyla oluşur. Abrazif aşınmanın teorik esası, aşındırıcı tane ile malzeme yüzeyi arasında meydana geldiği ileri sürülen dört temel fiziksel olaya dayandırılmıştır:

- a. Mikro aşınma izi oluşması,
- b. Mikro yorulma,
- c. Mikro talaş oluşması,
- ç. Mikro çatlak oluşması (Kalkan, 2008, 57).

Mikro aşınma izi oluşmasında aşındırıcı tane malzeme yüzeyine belli bir derinliğe kadar nüfuz ederek, kayma hareketinin de etkisiyle malzemede yer değiştirir ve arkasında bir aşınma izi oluşturur. Kayma hareketinin aynı temas noktalarında tekrarlanması durumunda mikro yorulma çatlakları meydana gelir. Mikro talaş oluşumunda ise aşındırıcı taneler bir kesici takım gibi davranarak yüzeyden talaş kaldırır. Meydana gelen aşınma kaybı aşınma izi hacmine eşit olur. Şayet malzemeler gevrek ve üzerine gelen yük de yüksek ise mikro çatlakların oluşması kaçınılmazdır. Sünek malzemelerde mikro aşınma izi teşekkülü mikro çatlak oluşumu ile birlikte, aşındırıcı tanelerin temas açısı ve sürtünme katsayısına bağlı olarak meydana gelir (Kalkan, 2008, 57-58).

Birçok aşınma türünde, aşınmış yüzeyin mikro yapısı incelendiğinde çatlak ve yarıklarla sıkça karşılaşılır (Şafak, 2008, 30).



Şekil 51: Yorulma sonucu yüzeyde çatlak oluşumu ve büyümesi (Şafak, 2008, 31).

Temas halindeki yüzeylerde plastik şekil değiştirme sonucunda pekleşme meydana gelir ve malzeme gevrekleşir. Gevrekleşen malzeme, üzerinden geçen tekrarlı kuvvet etkisiyle çatlaklar (Türküz, 2006, 100). Genelde yorulma kırılmaları, çatlak çekirdeklenmesi (yüzeyin hassas olduğu durum) ve çatlağın ilerlediği durum (hacim malzemenin özellikleri ile ilgili) olmak üzere iki aşamayla karakterize edilir (Doğan, 2001, 26).

Burada birincil çatlak, yüzeyde zayıf bir noktada ortaya çıkmaktadır. Ardından kayma düzlemi veya dislokasyon hücre sınırı boyunca büyümektedir. İkincil çatlaklar, birincil çatlaktan gelişebilir veya mevcut diğer çatlaklarla birincil çatlağı bağlayabilir. Çatlak büyümesi, tekrar yüzeye ulaşana kadar devam eder ve yüzeye ulaştıktan sonra aşınma parçacığı kopar (Şafak, 2008, 31). Bu çatlaklar zamanla yayılır ve yüzeyden pul şeklinde malzeme kopar (Kalkan, 2008, 57).

Etkileşen yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısının azaltılması, yorulma esaslı aşınmayı önlemenin en temel yoludur. Aynı zamanda yüzeyler arasındaki yağın etkisine de dikkat etmek gerekmektedir. Yüksek basınç altında, yağın yüzey çatlaklarına girmesi, bunların büyümesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca yüksek kayma ve basma mukavemetine sahip malzemeler tercih edilmelidir. Pitting adı verilen yorulma çukurcuklarının oluşumunda sertlik oldukça önemlidir (Şafak, 2008, 31). Bu tür yüzey yorulmasını önlemek için yüzeylerin sertleştirilmesi gerekir (Türküz, 2006, 100).

5.3.5. Korozyon

Özellikle metallerde etkili olan, kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan bir aşınma türüdür (Karaoğlu, 2006, 14). Metallerde önem arz eden olan bu olay oldukça karışıktır (Doğan, 2001, 27). Koroziif aşınmada mekanik etkenlerin yanında çevrenin kimyasal etkisi de olaya karışır (Türküz, 2006, 100). Diğer aşınma mekanizmalarından farklı olarak korozyon, kimyasal korozyon, elektrokimyasal korozyon ve sürtünme oksidasyonu gibi farklı şekillerde karşımıza çıkmaktadır (Karaoğlu, 2006, 14).

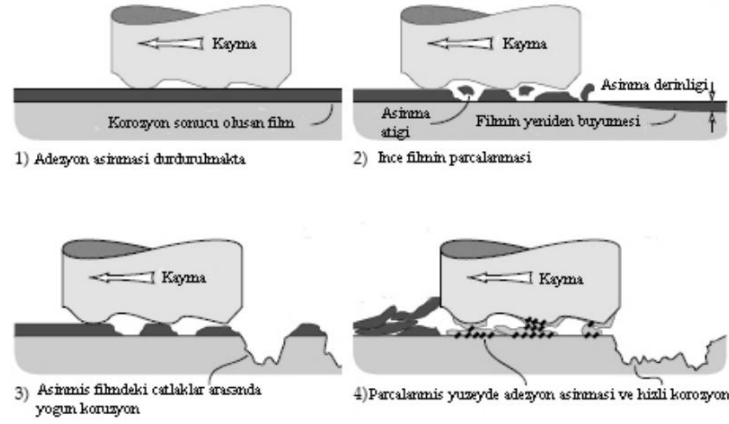
Metal ve alaşımların kararlı hallerine yani bileşik haline dönme eğilimleri yüksektir. Bunun sonucu olarak metaller içinde bulundukları ortamın elemanları ile tepkimeye girerek, önce iyonik hale ve oradan da ortamdaki başka elementlerle birleşerek bileşik haline dönmeye çalışırlar; yani kimyasal değişime uğrarlar ve bozunurlar. Sonuçta metal veya alaşımın fiziksel, kimyasal, mekanik veya elektriksel özelliği istenmeyen değişikliklere uğrar. Korozyon, metalik malzemelerin içinde bulundukları ortamla reaksiyona girmeleri sonucu, dışarıdan enerji vermeye gerek olmadan, doğal olarak meydana gelen bir olaydır (URL-10, 2014). Koroziif aşınma genellikle aşınmanın hafif bir şeklidir, fakat yüksek sıcaklıklarda ve nemli ortam içersinde aşırı bir hal alabilir (Karaoğlu, 2006, 15).

Korozyon iki türde incelenebilir. Birincisi oksitlenme ve kimyasal eriyiklerin (asit vb.) doğurduğu doğrudan korozyon türüdür. İkincisi ise dış ortamın elektro kimyasal etkisi ile yavaş fakat sürekli oluşan elektro kimyasal korozyondur. Uygulamada en sık karşılaşılan ve en çok zarar veren bu ikinci tür korozyondur (Doğan, 2001, 27).

Özellikle koroziif sıvı ve gazlarla temas halinde bulunan malzeme yüzeylerinde kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda reaksiyon ürünleri oluşur. Eğer bu reaksiyon ürünleri yüzeye güçlü bir şekilde bağlanırsa yüzey üzerinde ince ancak sert bir tabaka meydana getirir. Böylece esas malzemenin aşınma mekanizmasında birtakım değişiklikler meydana gelir (Şafak, 2008, 32).

Değişken yük altında bu sert tabaka parçalanır. Oluşan sert parçacıklar kırılarak aşınma parçacıklarını meydana getirir. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu tekrar

bir sert tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder (Şafak, 2008, 32).



Şekil 52: Koroziif aşınmanın gelişimi (Şafak, 2008, 33).

Şekil 52a'da dayanıklı bir korozyon filmi görülmektedir. Pratikte çok az korozyon filmi dayanıklı yapı göstermektedir. Korozyon filmlerinin pek çoğu Şekil 52b'deki gibi kayma temasları sonucunda çok çabuk kırılabilen oksit veya diğer kırılabilir bileşikler içermektedir. Bunun sonucu olarak da korozyon tabakası parçalanmaktadır. Korozyon tabakasının parçalanması neticesinde oluşan aşınma atıklarının etkisiyle esas malzeme yüzeyinde abrazyon aşınma meydana gelir. Son safhada ise korozyon tabakası tamamen yüzeyden ayrılır (Şafak, 2008, 33). Sürtünen yüzeylerde oluşan korozyon ürünü sert parçacıklar halinde koparsa, şiddetli aşınma görülür (Türküz, 2006, 100).

Korozyon nedeni ile oluşan oksit filmi, çift oluşturan pürüzler arasında güçlü yapışmayı önleyorsa ve eğer korozyon filmi sert ve kuvvetli ise istenir, ancak gevrek ise aşırı aşınmaya neden olabilir (Doğan, 2001, 27).

Koroziif aşınmayı önleyebilmek için malzeme yüzeylerine ısıtma işlemi uygulanır ve oksidasyonu önleyici özel yağlayıcı maddeler kullanılır (Şafak, 2008, 33).

5.3.6. Kazımalı Aşınma

Fretting, iki katı yüzey arasında meydana gelen düşük genlikli titreşim olarak tarif edilir. Genelde birbirine göre izafi hareket yaptığı tam olarak anlaşılmayan parçalar arasında meydana gelir. Fretting hareketi, fretting aşınmasına veya fretting korozyonuna neden olur.

Fretting aşınması eşleşmiş yüzeylerdeki lokal yapışmalardan başlar. Adezyon mikroskobik boyutta bağlanmalar şeklinde oluşur. Yüzey hasarı malzemelerden birinde meydana gelen kopma sonucunda başlar. Malzeme kaybı hızı genelde düşüktür ve çoğu sistemde ihmal edilebilecek seviyededir. Fretting hasarları, yüzey hasarlarının oluşturduğu çukurcukların gerilme yığılmalarına neden olduğu durumlarda önemli hale gelirler. Bu yığılmalar genelde yorulma hasarlarına yol açarlar (Ezirmik, 2008, 9).

Korozyonun da etkili olduğu ortamda meydana gelen hasar modeli fretting korozyonu olarak isimlendirilir. Bu tip hasar mekanizması endüstriyel olarak oldukça önemlidir. Hareket eden yüzeyler arasında meydana gelen oksitler veya korozyon ürünleri aşınma hızını önemli derecede arttırır (Ezirmik, 2008, 9).

5.4. Aşınmanın Ölçülmesi

Malzemelerdeki aşınmanın ölçülmesi ve anlaşılması çok kompleks ve zor bir görevdir (Özmen, 2004, 33). Aşınma miktarının ölçülmesi sırasında her ölçme sisteminde olduğu gibi yeterli hassasiyette, kolay ve seri biçimde uygulanabilen, ekonomik ve standartlaştırılmış bir ölçmenin yapılması istenir (Büyükkelleci, 2008, 27).

Genel olarak malzemenin aşınması yüke, hıza, sıcaklığa, zamana, geometriye, yüzey pürüzlülüğüne, ortamın oksijen miktarına, yağlayıcı kimyasına ve malzemenin yüzey kompozisyonuna bağlıdır (Özmen, 2004, 33).

Aşınma direncinin değeri, diğer bazı standart testlerle bulunan özellikler (sertlik, young modülü, yoğunluk vb.) gibi ölçülemez. Bu nedenle her bir tribolojik sistem için aşınma direnci ve aşınma değerleri kendine özgüdür ve farklı parametrelerle yapılan testlerle ölçülür (Şafak, 2008, 34).

Deneylerde gerçek çalışma şartlarının kullanımı, en güvenilir yöntemdir. Bununla birlikte araştırmanın amaçları için, sadece bir veya birkaç faktörün göz önüne alındığı koşullarda tasarlanan test makineleri ile laboratuvar araştırmalarının yapılması daha uygundur. Laboratuvar aşınma testleri, aşınmayı ortaya çıkaran mekanizmaların denenmesi ya da pratik uygulamaların benzetilmesi maksadıyla uygulanır ve aşınma oranları üzerine yararlı tasarım verileri elde edilebilir (Şafak, 2008, 35).

5.5. Aşınma Ölçme Yöntemleri

5.5.1. Ağırlık Farkı Metodu

Ağırlık farkı metodunda en çok kullanılan ölçme yöntemi tartı yöntemidir. Aşındırılan malzeme tartılarak tek bir sayı şeklinde aşınma miktarı bulunur. Tartma işlemi bir kimyasal terazide gerçekleştirilir. Bu yöntemde malzemenin devamlı temiz olmasına ve üzerinde tortu kalmamasına dikkat edilmelidir (Karaoğlu, 2006, 22). Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} gram hassasiyetinde oldukça duyarlı bir teraziyle yapılır (Karaoğlu, 2006, 21). Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınmaması, bu yöntemin dezavantajıdır (Soydaş, 2006, 29).

Ağırlık farkı metoduna göre, ağırlık kaybı miktarı; aşınma miktarı gram veya miligram olarak ifade edildiğinde, metre veya km olarak tespit edilen birim sürtünme yoluna karşılık olarak (g/km) veya (mg/m) cinsinden, birim alan için hesap edilecekse, (g/cm^2) cinsinden ifade edilir. Hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde ise malzemenin yoğunluğu ve numune üzerine düşen yük hesaba katılarak, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından yola çıkılarak ağırlık kaybı hesaplanır. Ağırlık farkı ölçümünde en çok aşağıda yer alan bağıntı kullanılmaktadır (Karaoğlu, 2006, 21).

$$W_a = \frac{G}{d.M.S} \quad (5.4)$$

Bu bağıntıda;

W_a = Aşınma oranı (mm^3/Nm)

G = Ağırlık kaybı (mg)

M = Yükleme ağırlığı (N)

S = Aşınma yolu (m)

d = Malzeme yoğunluğu (g/cm^3) olarak verilmiştir. Aşınma oranının ters değeri de aşınma direnci (W_r) olarak kabul edilmiştir (Karaoğlu, 2006, 21).

$$W_r = \frac{1}{W_a} \quad (\text{N.m} / \text{mm}^{-3}) \quad (5.5)$$

Başka bir bağıntı da, bir kilometre kayma yoluna kabul eden yükseklik kaybı bağıntısıdır ki, genellikle iki elemanlı abrazif aşınmanın hesaplanmasında kullanılır (Urun 2008, Soydaş 2006).

$$W_s = \frac{10^4 G}{F.d.s} \quad (\mu\text{m} / \text{km}) \quad (5.6)$$

Burada;

V_s = Bir km aşınma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı (μm),

ΔG = Ağırlık kaybı (mg),

F = Aşınma yüzeyi (cm^2),

d = Yoğunluk (gr/cm^3),

s = Kayma yolu (km) olarak alınır. Deney malzemesi yükseklik kaybının, mukayese malzemesinin (örneğin Fe 37 çeliği) yükseklik kaybına oranı, aşınma orantı sayısını (W_s) verir (Urun, 2008, 24).

$$W_s = V_g(\text{deney numunesi}) / V_s(\text{Fe 37 çeliği}) \quad (5.7)$$

Bu orantı sayısının ters değeride bağıl aşınma direnci R , olarak kullanılır (Urun, 2008, 24).

$$R = \frac{1}{V_s} \quad (5.8)$$

Üç elemanlı abraziv aşınmada ise, genellikle DIN 50320 standardında verilen boyutsuz aşınma oranı formülü yaygın olarak kullanılır (Soydaş, 2006, 32).

Tartı yönteminin yanı sıra aşınma miktarını radyoaktif izleyiciler kullanarak ölçmek mümkündür. Bu ölçümde aşınma öncesinde veya sonrasında değil, doğrudan aşınmanın meydana geldiği sırada ölçüm yapmak mümkün olmaktadır (Karaoğlu, 2006, 22).

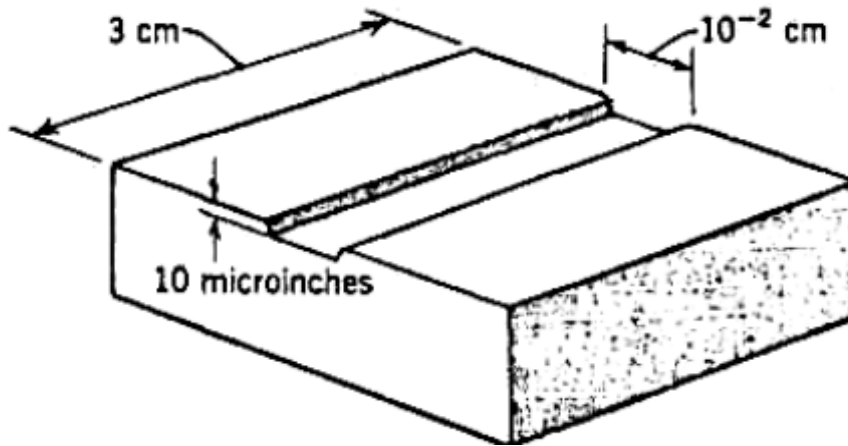
Bazı durumlarda aşınma, yüzeye eşit olmayan bir şekilde dağılmış olacağından, bölgesel aşınma hasarlarının ölçümü toplam kütle kaybından daha anlamlı olacaktır (Şafak, 2008, 38).

5.5.2. Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma sırasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi ve başlangıç değeriyle karşılaştırılması suretiyle aşınma miktarı ölçülmektedir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden yola çıkılarak hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık hassas ölçü aletleri kullanılarak $\pm 1 \mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülmelidir (Urun, 2008, 24). Kalınlık farkı esasına dayanan ölçümler, çoğu zaman aşınmanın hangi elemanda, ne oranda, düz mü yoksa eğik mi olduğu hakkında net bir bilgi veremediği için daha çok hacimce meydana gelen değişimler dikkate alınmaktadır (Karaoğlu, 2006, 22).

Genellikle mekanik ölçüm büyük boyutlu kayar komponentlere (örneğin otomobil motoru silindirlerine) uygulanır ve saptanabilen minimum aşınma miktarı çok daha büyük olur (Oğuz, 1993, 6).

Aşınmayı ölçmenin bir alternatif yöntemi, özellikle aşınmanın dar bir şeride inhisar etmesi halinde bir profilmetre ile şeridin bir profilini çıkarmak ve kazınmış malzeme miktarını tahmin etmekten ibarettir (Oğuz, 1993, 6). Örneğin 3 cm uzunluk, 10^{-2} cm genişlik ve 10 mikroiç (0,254 mm) derinlikte bir şeritte 10^{-5} gr'lık bir ağırlık kaybı saptanabilir (Oğuz, 1993, 6).

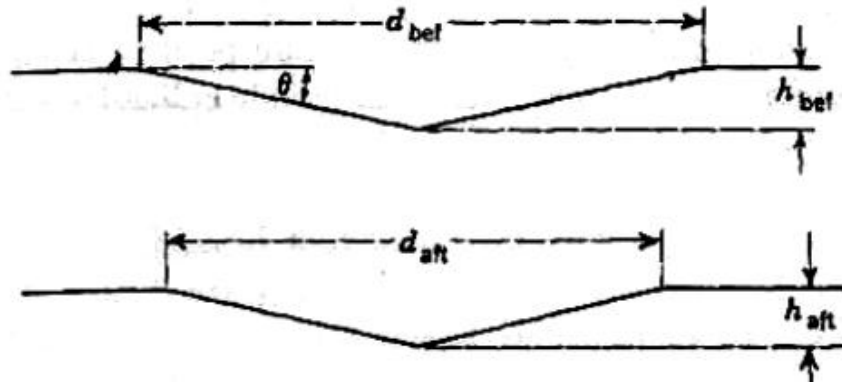


Şekil 53: Aşınmayı ölçmek için profilometre yöntemi (Oğuz, 1993, 6).

5.5.3. İz Değişim Metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (örneğin çapının) değişimi izlenir. Bu metotta iz bırakıcı olarak çoğunlukla Brinell veya Vickers sertlik ölçme uçları kullanılır. Bu uçların (bilye veya elmas piramit) bıraktığı izlerin boyutlarında meydana gelen değişim mikroskop vasıtasıyla ölçülerek değerlendirilir (Soydaş, 2006, 32).

Bu yöntem yüzey üzerine küçük bir mikro sertlik çukuru teşkil edip, kayma sırasında bunun boyutunun nasıl azaldığını incelemekten ibarettir. Yöntemin yatay saptanabilirlik sınırı 10^{-4} cm civarında olup bu, 1/5 meylinde bir çukur (iz) için 10^{-5} cm'lik bir derinlik sınırı olur. Böylece de yukarda sözü edilmiş profilmetre yönteminin sınırlamalarıyla aynı sınırlamalarda aşınma ölçümü yapılabilir (Oğuz, 1993, 7).



Şekil 54: Aşınmayı ölçmede çukur teşkil etme yöntemi (Oğuz, 1993, 7).

$$h = h_{bef} - h_{aft} = (d_{bef} - d_{aft}) \times \tan \theta / 2 \quad (5.9)$$

h = Aşınma derinliği,

h_{bef} = İzın aşınma öncesi derinliği,

h_{aft} = İzın aşınma sonrası derinliği

d_{bef} = İzın aşınma öncesi genişliği,

d_{aft} = İzın aşınma sonrası genişliği,

θ = İzın yatayla yaptığı meyil açısı.

5.5.4. Radyoizotop Metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içersinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçüm yapılabilmesi metodun avantajları olarak sıralanabilir. Fakat ekonomik olmaması nedeniyle ancak özel amaçlarla kullanılır (Karaoğlu, 2006, 23).

Bu yöntem aşınmanın, önce ya da sonra ölçümü değil, doğruca aşınmanın vaki olduğu anda ölçümü olanağını sağlar. 10^{-9} ilâ 10^{-12} gram mertebesinde saptanabilirlik sınırı verir (Oğuz, 1993, 7).

5.6. Model Deney Yöntemleri ve Aşınma Test Deney Düzenekleri

Sürtünme ve aşınmanın azaltılması ya da kontrol edilebilmesi için sistematik bir araştırmaya gerek vardır (Büyükkelleci, 2008, 25). Aşınma deneyinin amacı, birbirleri ile sürtünen malzeme çiftinin cinsine, sürtünen yüzeylerin biçimine, sürtünme koşullarına ve çevrenin kimyasal etkilerine bağlı olarak sürtünen yüzeyden malzeme kaybını öğrenebilmektir (Koç, 2010, 134).

Sürtünme ve aşınma özelliklerinin incelenmesi için iki tip deney yöntemi uygulanır. Bunlar;

- a. İşletme deney yöntemi,
- b. Model deney yöntemidir (Büyükkelleci, 2008, 25).

Aşınmanın önemli olduğu ve dikkate alındığı makine sistemlerinde endüstrinin şu andaki tipik uygulaması; gerçek parçayı belirli bir malzemeden imal edip yerine taktıktan sonra sistem bir müddet çalıştırılarak alınan veriler ile, parçanın başka bir malzemeden imal edilip aynı işlemlerin sonucunda elde edilen verileri karşılaştırma şeklindedir ki gerçeğe en uygun sonucu bu yöntem verir. Ancak maliyet ve zaman kavramları dikkate alındığında bu yöntem ile çok az malzeme türü denenebilir. Bu durumda aranacak çözüm, ucuz, kolay, zaman bakımından uygun ve pek çok malzeme alternatifini değerlendirebilecek bir yöntem olmalıdır (Özmen, 2004, 32).

Deney şartlarının kontrolü, istenilen belli bir aşınma mekanizmasının çalışılabilmesi, test süresi, test maliyeti gibi etkenlerden ötürü test edilecek sistemin belli kademedeki simülasyonu yapılabilir (Şafak, 2008, 35).

Gerçek sistemin özelliklerine ne derece yaklaşırsa, laboratuvar ortamında elde edilen deney sonuçlarının teknik sistemlere aktarılması sorunu o kadar azaltılmış olur. İlişki geometrisi (nokta, çizgi veya yüzey temasları), hareket şekli ve sıcaklık gibi unsurlar doğru bir simülasyon için gerçek sistemle aynı şekil ve büyüklükte olmalıdır. Hız, sürtünme süresi ve yükleme miktarı gibi unsurların belirli oranlarda küçültülerek deney cihazlarında uygulanması, sonuçların gerçek sistemlere aktarılmasında ek sorunlar doğurmadığı gibi ayrıca uygulama kolaylığı sağlayacaktır (Urun, 2008, 20).

Bilinen uygulama, aynı şartlar altında malzemelere simülasyon aşınma deneyleri uygulanarak bir sıralamaya tabi tutup en uygun olanını tercih etmek şeklindedir. Eğer çalışma şartları (yük, hız) ve aşınma arasında lineer bir ilişki varsa bu işe yarar. Ancak malzeme, mühendislik uygulamalarının hemen hepsinde olduğu gibi kimyasal ve çevre etkileri altında ise, aşınma modunda değişiklikler meydana gelir ve lineer bir bağıntı tesis etmek mümkün olmaz (Özmen, 2004, 31).

Gerçek sistemlerde, etkenlerin analiz edilebilmesinin zorluğu ve ölçümlerin uzun sürelerde ve güçlüklerle yapılabilmesi model sistemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Araştırmacılar genellikle inceledikleri sistemi dikkate alarak, çalışmalarında kullanacakları aşınma test cihazlarını tasarlarlar veya seçerler. Bu tasarım veya seçimlerde, gerçek sistemi oluşturan tribolojik unsurları sağlayabilen ve sonuçları büyük oranda tekrarlayabilen cihazların tercih edilmesi önem arz eder (Koç, 2010, 131). Test yöntemlerinin tasarımını etkileyen diğer bir faktör de, testlerin gerçek işletme koşulları yerine laboratuvar koşullarına indirgenerek yapılmasıdır (Şafak, 2008, 35).

Model deney yöntemlerinin fazla sayıda olmasının nedeni, sürtünme ve aşınma mekanizmaları ile tribolojik sistemlerin fazla sayıda olmasındandır (Karaoğlu, 2006, 16). Malzeme ve malzeme çiftinin özelliklerinin de test sonuçları üzerinde son derece etkili olduğu düşünüldüğünde, aşınma test yöntemlerinin çeşitliliği daha iyi anlaşılabilir (Şafak, 2008, 35).

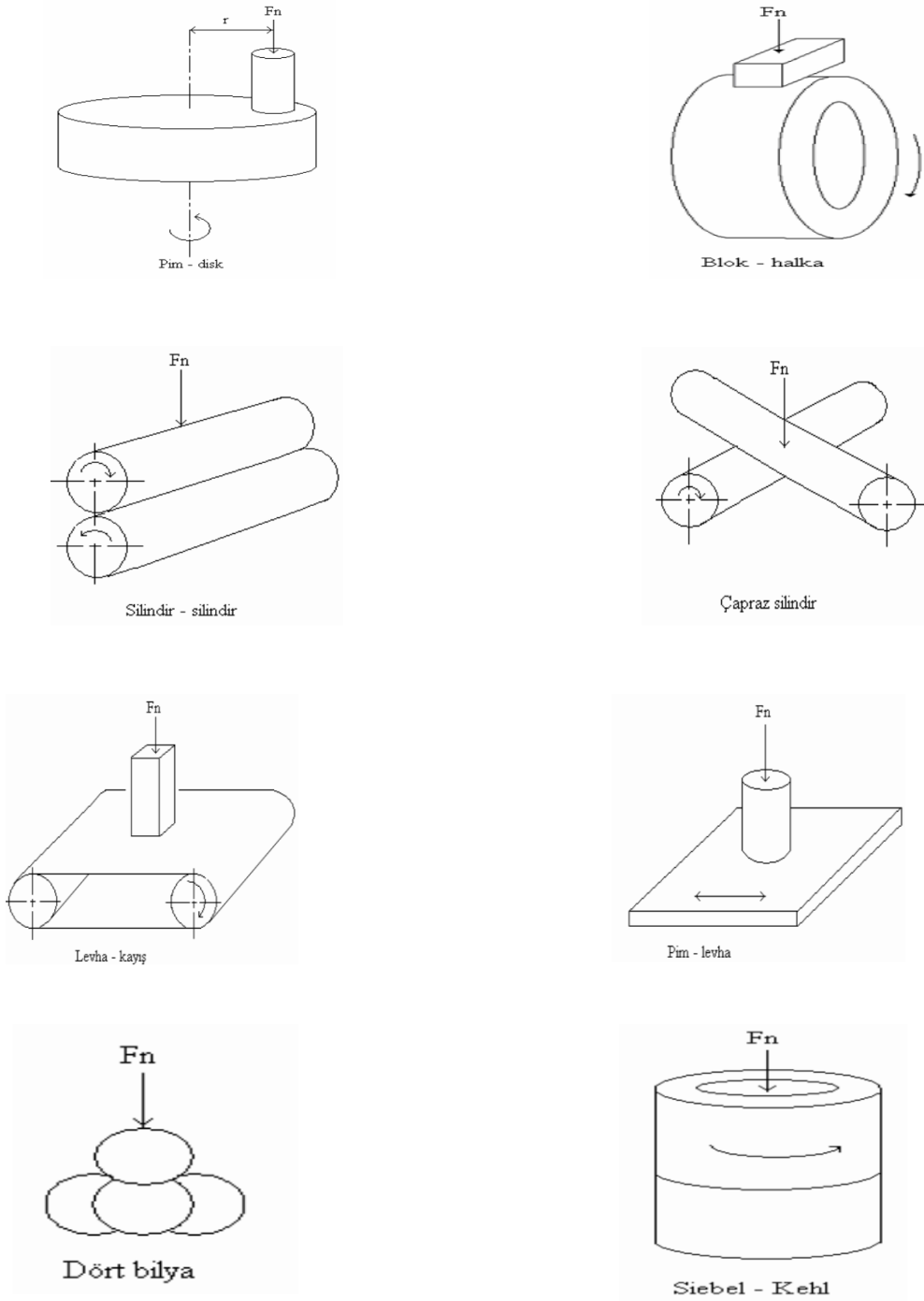
Birbirleri ile çalışan malzeme çiftleri arasında sürtünme ve aşınmalarını en aza indirecek malzeme seçimini yapabilmek her zaman araştırma konusu olmuştur. Bu araştırma çalışmalarında kullanılacak iyi bir aşınma test cihazı sürtünme malzeme çiftlerinin seçimine yön verecektir (Koç, 2010, 130).

Model aşınma deneylerinin düzenlenmesinde şu basamaklar yerine getirilmelidir. Öncelikle pratik uygulamada kullanılan malzeme çiftlerinden deney numuneleri hazırlanarak malzemelerin özellikleri ve yüzey karakteristikleri belirlenmelidir. Bunun yanı sıra çevre durumu, ara madde malzemelerinin kompozisyonu, fiziksel ve kimyasal özellikleri tanımlanmalıdır. İşletme koşullarına yakın hız, hareket, yük, sıcaklık ve deney süresine uygun bir deney sistemi seçilmelidir (Büyükkelleci, 2008, 25-26).

Model aşınma test cihazlarıyla yapılan testlerin amaçları; sistem elemanlarının verimini, ömrünü, güvenilirliğini, fonksiyonunu, bakım yapılıp yapılmaması gerektiğini belirlemek, kalite kontrolünü yapmak, malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarını belirlemek, malzeme kayıplarını araştırmak, yeni malzeme veya sürtünme ve aşınmayı azaltıcı yöntemleri geliştirmek şeklinde sıralanabilir (Koç, 2010, 132-133).

Günümüzde, sürtünme ve aşınma üzerine yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmı uluslararası standartlarla belirlenmiş test teknikleri ve parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Karaoğlu, 2006, 16). ASLE (American society of lubrication erigir years 1976) tarafından yüz kadar deney sistemi belirtilmiştir (Soydaş, 2006, 29).

Sürtünme ve aşınma testleri genellikle aynı sistemler üzerinde yapılmakla birlikte, buradaki en önemli parametre ölçüm yöntemlerindeki farklılıklardır. Bunun yanında test süresi de önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Sürtünme testleri çoğunlukla kısa sürerken, aşınma testleri bazen çok uzun süreler alabilmektedir. Sürtünme ve aşınma testleri için geliştirilen model deney sistemlerinin temel prensipleri şekil 55'te yer almaktadır (Karaoğlu, 2006, 17).



Şekil 55: Model deney sistemleri (Karaoğlu, 2006, 17).

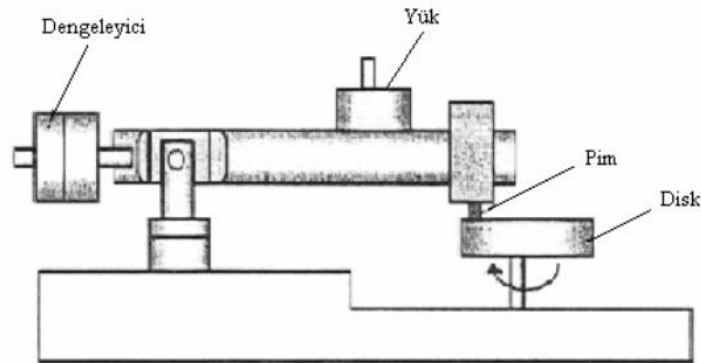
5.6.1. Pim-Disk Cihazı

Pim-disk yöntemi, model test yöntemlerinin en basit ve en yaygın olarak kullanılanlarından birisidir. Deneyde kullanılan döner disk, genellikle metal bileşenlerden oluşmaktadır. Deneyde aşınma durumu incelenecek olan numune koni, küre veya silindir şekline sahip bir pimdir (Karaoğlu, 2006, 18). Pim, üzerine asılan yükle veya herhangi bir mekanizma

ile diske basınçla temas ettirilir. Temas, çizgisel sayılabilir (Şafak, 2008, 41). Pim üzerinden diske uygulanacak normal yük, mekanik, pnömatik veya bir hidrolik silindir vasıtasıyla sağlanabilir. İzafi kayma hızı, diskin merkezi ile pimin temas noktası arasındaki radyal “r” mesafesi değiştirilmek suretiyle ayarlanabilir (Karaoğlu, 2006, 18). Diskin aşınma profili dairesel olur (Şafak, 2008, 41).

Aşınma, belirli bir kuvvet (basınç) ve kayma hızında, kayma yoluna göre malzeme kaybı yanında pim-disk üzerinde oluşan aşınma izinin analizi ile değerlendirilmektedir. Ayrıca sisteme ilave edilen strain-gage, loadcell ve termokupl düzenekleri ile sürtünme katsayısı ve sıcaklık değişimi ve dağılımı tespit edilmektedir (Şafak, 2008, 41).

Bu test tekniği kullanılarak, kuru ortamda kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları incelenebilmektedir. Şekil 56’da pim-disk cihazının şematik görünümü yer almaktadır (Karaoğlu, 2006, 18).

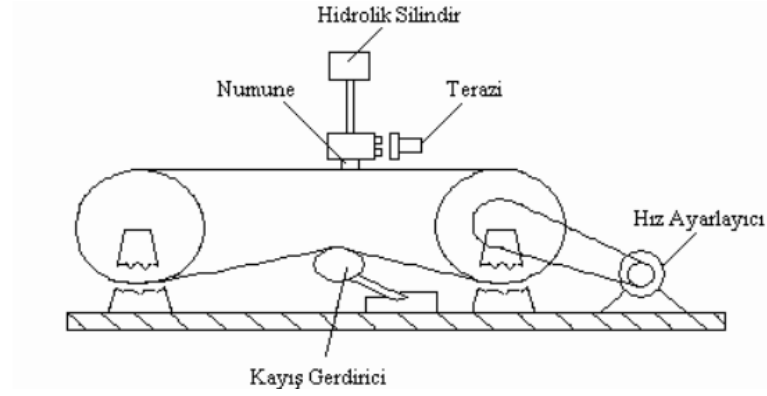


Şekil 56: Pim-disk cihazının şematik görünümü (Karaoğlu, 2006, 18).

5.6.2. Levha-Kayış Cihazı

Levha-kayış sistemi, iki geniş silindir ile bu silindirlerin üzerinden geçen eğilebilme özelliğine sahip bir kayıştan meydana gelmektedir. Silindirlerden birinin hızı ayarlanabilir olup, silindir devri değiştirilmek suretiyle kayış hızı ayarlanabilmektedir. Kayış, lastik, çelik şerit veya takviyeli kompozit malzemelerden yapılmış olabilir. Deneyde kayışın bir yüzeyine zımpara kağıdı yapıştırılarak veya bir aşındırıcı örtülülerek, aşındırmayı sağlayacak yüzey oluşturulur. Deneyde kullanılacak olan test numunesi, bir hidrolik silindir vasıtasıyla kayışın aşındırıcı yüzeyine dik olarak bastırılır. Böylece bir normal yük meydana getirilir. Kayış ve numunenin arasında oluşan sürtünme kuvvetinin tesiriyle

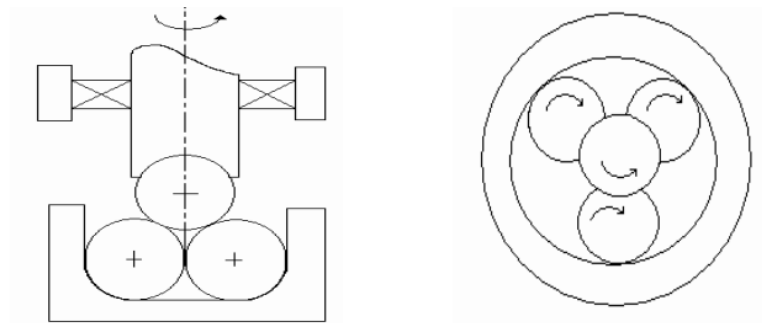
numune deformasyona uğrar. Numuneyi tutmakta olan numune tutma kafası sağ ve sol tarafından yataklanmıştır. Kayışın hareket yönü tarafında bulunan yatağa sürtünme kuvvetinin ölçülmesi amacıyla bir terazi yerleştirilmiştir. Şekil 57’de levha-kayış cihazının şematik görünümü yer almaktadır (Karaoğlu, 2006, 19-20).



Şekil 57: Levha-kayış cihazının şematik görünümü (Karaoğlu, 2006, 20).

5.6.3. Dört Bilye Cihazı

Bu deney düzeneğinde numune olarak, aynı çapta dört adet bilye kullanılmaktadır. Üç adet bilye, deney esnasında rahatça hareket edebilecekleri bir kabın içersine yerleştirilmişlerdir. Dördüncü bilye ise, uç kısmına yarım küre şeklinde oyuk açılmış bir milin içerisinde olup, diğer üç bilyenin üzerine aynı anda temas edebilecek şekilde yerleştirilmiştir. Mil kendi eksenini etrafında döndürülmeye başladığında üstteki bilyenin etkisiyle altta bulunan bilyeler zıt yönde dönmeye başlarlar. Dönen bilyelerdeki radyal yükün çok az miktardaki artışı yorulma ömründe çok büyük düşüşleri meydana getirecektir. Bunun sebebi de temas alanlarındaki gerilmelerin artmasıdır. Şekil 58’de dört bilye cihazının şematik görünümü yer almaktadır (Karaoğlu, 2006, 20).



Şekil 58: Dört bilye cihazının şematik görünümü (Karaoğlu, 2006, 21).

5.7. Aşınma Testlerinin Değerlendirilmesi

Genellikle aşınma araştırmaları, tribolojik uygulamanın verimliliğinin, ömrünün, performansının, bakım yapılabilirliğinin değerlendirilmesi, yeni uygulamalar için malzeme seçimi, malzemelerin aşınma ve sürtünme özelliklerinin belirlenmesi, seçilen uygulamadaki aşınma mekanizmalarının tespiti, malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarının karakterize edilmesi, aşınmanın neden olduğu malzeme kayıplarının araştırılması amaçlarıyla yapılır (Şafak, 2008, 34).

Malzemelere uygulanan tribolojik testler, malzemenin tribolojik özellikleri hakkında değil tüm tribolojik sistem hakkında bilgi verir. Tribolojik testin değerlendirilmesi için sistem karakteristiği ve test amacı da öncelikli olarak değerlendirilmelidir (Şafak, 2008, 34).

Aşınma haritaları, aşınma mekanizmalarını sınıflandırmak amacıyla kullanılabilir. Burada bağımlı değişken aşınma, bağımsız değişken ise, sürekli değişkenler (hız, yük, sıcaklık ve zaman) ve süreksiz değişkenler (kuru, reaktif olan yağlayıcı, reaktif olmayan yağlayıcı, çevre) olarak ikiye ayrılabilir. Bir malzeme çifti için sabit süreksiz değişken altında üç boyutlu 5 farklı aşınma haritası elde edilebilir. Bunlar;

- a. Aşınma, hız, yük,
- b. Aşınma, hız, sıcaklık,
- c. Aşınma, hız, zaman,
- ç. Aşınma, yük, sıcaklık,
- d. Aşınma, yük, zaman şeklinde sıralanabilir.

Süreksiz değişkenlerinde değiştiği göz önüne alındığında 20 farklı aşınma haritası ortaya çıkacaktır. Yani kuru aşınmada 5, reaktif yağlayıcı altında 5, reaktif olmayan yağlayıcı altında 5 ve 5 tanede aynı çevre ve kontaminasyon şartları altında oluşacaktır. Çoğu zaman bir malzeme çiftinin aşınma davranışını anlamak üzere bunların hepsine gerek olmayabilir. Aralarından çalışma şartlarını en tipik temsil edenler seçilerek yaklaşık olarak sonuca gitmek tercih edilir (Özmen, 2004, 36).

Aşınma süresince, sürtünme kuvveti veya katsayısı, aşınma atıklarının şekli, aşınan yüzey sıcaklığı ve yüzey oksidasyonu ile yüzey sertlik değişimleri de testlerin

değerlendirilmesinde değişken olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple aşınma ölçümleri sırasında yüzey mikroskopisi ve topografisi teknikleri sıkça kullanılmaktadır (Şafak, 2008, 38).

Aşınma testlerinin değerlendirilmesi esnasında, yüzey hasarının ve ömür limitinin belirlenebilmesi için aşınma tipinin bilinmesi önemlidir. Hasarın, yüzey üzerindeki yeri, yavaş yavaş mı yoksa aniden mi gerçekleştiği, aşınmadan önceki ve sonraki yüzeyin karşılaştırılması, aşınmış yüzeyden kesit alınıp derin hasar olup olmadığının araştırılması, karşı yüzeye herhangi bir madde transferi olup olmadığının tespit edilmesi, aşınma atıklarının şeklinin ve kimyasal bileşiminin belirlenmesi, değerlendirme prosesinin uygulanması gereken adımlarıdır (Şafak, 2008, 38).

Aşınma testlerinin en önemli problemlerinden biri, sürtünme ve aşınmanın etkisi, bunların doğal dalgalanması ve zamana bağlı değişimi sonucunda “dağınık veri” elde edilmesidir. Bu sistematik ve rastgele sapmaların doğacak etkileri de hesaba katılmalıdır. Verilerin bu dağınıklığından dolayı bir tribolojik sistem için tek bir numuneyle test yapılması pek güven vermemektedir. Çok sayıda numunenin kullanılması ve bu numunelerin aynı koşullarda test edilmesi de oldukça zor olduğundan; aşınmanın sürekli denetlenmesi ve sonuçlarının hızlı bir biçimde ve az sayıda test numuneleri ile değerlendirilebilmesi için elektronik kontrollü ve bilgisayar destekli test ve kontrol yöntemleri geliştirilmiştir (Şafak, 2008, 38-39).

Sürtünme veya aşınma testi yapılırken, test parametrelerinin çok dikkatli ve özenli bir biçimde değerlendirilmesi, elde edilen bilgilerin düzgün ve anlaşılır bir biçimde kaydedilmesi gerekir. Şekil 59'da tribolojik bir raporun hazırlanmasında sürekli olarak göz önünde tutulması gereken sisteme ait giriş ve çıkış büyüklükleri verilmiştir. Şekil 60'ta bu bilgilerin toplu olarak kaydedileceği bir rapor örneği sunulmuştur. Raporda sürtünme ve aşınma parametrelerinin analizleri ve değerlendirilmesi yapılarak, test sonuçları genel bir doküman halinde oluşturulabilir (Karaoğlu, 2006, 23).

Giriş Büyüklükleri

Hareket şekli

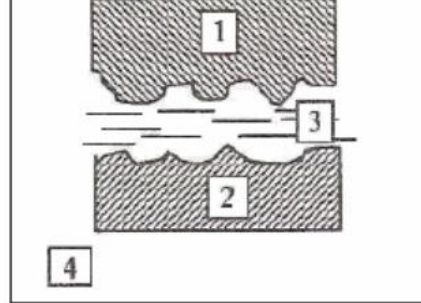
Normak kuvvet

Hız

Sıcaklık

Süre

1. triboeleman (ana malzeme)
2. triboeleman (karşı malzeme)
3. triboeleman (ara eleman)
4. triboeleman (ortam)

**Çıkış Büyüklükleri**

Sürtünme kuvveti

Sürtünme katsayısı

Sıcaklık

Aşınma

Temas şartları

Şekil 59: Tribolojik sistem elemanları ve tribolojik sisteme ait giriş ve çıkış büyüklükleri (Karaoğlu, 2006, 23).

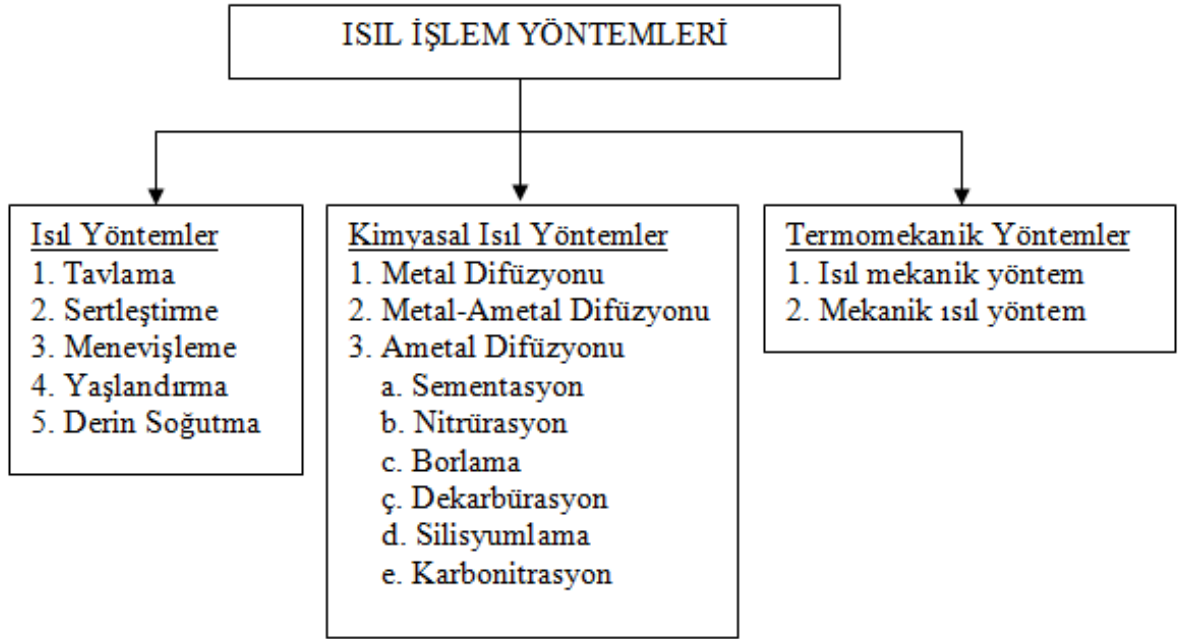
Tribolojik Sistemin Tanımlanması					
Özellik :	Bileşim	Yoğunluk	Hacim	Şekil	Boyut
1. Triboeleman					
2. Triboeleman					
Yağlayıcı					
Ortam					
Giriş Büyüklükleri	Normal kuvvet	Temas alanı	Temas basıncı	Sıcaklık	Süre
1. Triboeleman					
2. Triboeleman					
Çıkış Büyüklükleri	Sürtünme katsayısı	Aşınma yolu	Aşınma alanı	Aşınma hacmi	Aşınma katsayısı
1. Triboeleman					
2. Triboeleman					

Şekil 60: Sürtünme ve aşınma testleri için rapor örneği (Karaoğlu, 2006, 24).

BÖLÜM VI

ISIL İŞLEMLER

Isıl işlem; metal ile malzemelerde katı halde sıcaklık değişimleri ile bir ya da birbirlerine bağlı birkaç işlemle, amaca uygun olarak malzeme özelliklerini değiştirme işlemi olarak tanımlanabilir. Teknolojik gelişmelerin sağladığı imkânlar doğrultusunda, ihtiyaçlara yönelik olarak çok farklı ısıtım işlem yöntemleri ortaya çıkmıştır. Şekil 61'de ısıtım işlem yöntemleri ve çeşitleri gösterilmiştir (Urun, 2008, 26).



Şekil 61: Isıl işlem yöntemleri (Urun, 2008, 27).

6.1. Sementasyon

Sementasyon işleminde, karbon miktarı en fazla % 0,22 olan ve normal şartlarda yeterli düzeyde sertleşmeyen çeliklere, yüzeyden difüzyonla belirli bir derinliğe kadar karbon nüfuz ettirilir. Bu işlem, çelik yüzeyinden karbon atomları difüzyonuyla karbon içeriğinin artırılması olan sementasyon ve ardından sertleştirme olarak iki aşamada gerçekleştirilir (Urun, 2008, 27).

Sementasyon işlemi endüstride aşınma, temas ve eğilme yorulmasına karşı yüzey direncinin gerekli olduğu dişliler, yataklar, şaftlar vb. makine parçaları ile iyi kırılma tokluğunun gerekli olduğu ağır iş dişlilerine de uygulanır (Urun, 2008, 27).

Sementasyon işlemi katı, sıvı ve gaz halindeki karbon verici ortamlarda yapılabilir. Her üç durumda da, karbon moleküller değil, atom olarak demir kafesine nüfuz eder. Sementasyon işlemi karbon verici ortama göre isimlendirilir (Urun, 2008, 27).

6.1.1. Katı Karbon Verici Ortamda Sementasyon İşlemi

Katı karbon verici madde olarak çoğunlukla odun kömürü, aktiviteyi artırıcı maddelerle birlikte kullanılır. Herhangi bir aktifleştirici bulunmadığında, odun kömürü ile yapılan kutu sementasyonda reaksiyon, kutu içerisinde mevcut oksijenin yardımıyla meydana gelir ve ısıtma sırasında CO₂'ce zengin bir karışım oluşur. Bu karışım kömürle aşağıdaki reaksiyona göre etkileşime devam eder (Urun, 2008, 28).



Sıcaklık arttıkça, reaksiyonun dengesi yukarıdaki bağıntıda sağa doğru kayar ve yavaş yavaş gaz karışımı CO'ce zenginleşir. Çeliğin yüzeyindeki CO, aşağıdaki reaksiyona göre ayrışır:



İkinci reaksiyon sonucu atomal karbon, çeliğin östenit fazında kolayca çözünür ve çeliğin bünyesine girer. İkinci belirtilen reaksiyonda meydana gelen CO₂, ilk bağıntıda belirtildiği gibi kömürle tekrar reaksiyona girer ve bu olay işlem süresince devam eder (Urun, 2008, 28).

Nüfuziyet derinliğinin zamanın karesi oranında hesaplanması genel kuraldır. Çok kullanılan 930 °C sementasyon sıcaklığında 1 mm sementasyon derinliği için 4 saat işlem süresi gerektiğine göre, diğer derinlikler için süreler şu şekilde hesaplanabilir (Urun, 2008, 29).

Tablo 7: Sementasyon nüfuziyet derinlikleri (Urun, 2008, 29).

Sementasyon süresi (saat)	:	4	9	16
$\sqrt{\text{Sementasyon süresi}}$	:	2	3	4
Nüfuziyet derinliği (mm)	:	1	1,5	2

Sementasyon sıcaklığının yükselmesi semantasyon derinliğinin artmasına yardımcı olmaktadır (Urun, 2008, 29).

6.1.2. Sıvı Ortamda Sementasyon İşlemi

Karbonun difüzyonu için yüksek sıcaklıklar gerekli olduğundan, sıvı sementasyon ortamı olarak ergiyik tuzlar kullanılır. Daha çok sodyum siyanürlü (NaCN), pek az da potasyum siyanürlü (KCN) tuz banyoları tercih edilir. Banyolar bundan başka, ayrıca klorürler ve toprak alkali metaller içerirler. Aktifleştirilmiş banyolarda, aktifleştirici madde olarak baryum klorür ya da stronsiyum klorür veya her ikisi birlikte kullanılır. Sıcaklığın ve zamanın sementasyon derinliğine etkisi Tablo 8 ve Tablo 9’da verilmiştir (Urun, 2008, 29).

Tablo 8: Sementasyon işleminde kullanılan banyolar için, banyo bileşimleri, ağırlık oranları ve kullanılan sıcaklıklar (Urun, 2008, 30).

Sementasyon İçin Kullanılan Tuzların Ağırlık Oranları	Kullanım Sıcaklığı (°C)
A) 0,5.....1mm sementasyon derinliği için:	
Potasyum klorür - Sodyum klorür - Sodyum siyanür(1:1:8)	850...1000
Potasyum klorür - Sodyum klorür - Sodyum siyanür - Baryum klorür (3:2:16:6)	800...980
Sodyum klorür - Sodyum siyanür (1:3)	825...950
B) 2 mm' ye kadar sementasyon derinliği için:	
Potasyum klorür - Sodyum klorür - Sodyum siyanür - Potasyum siyanür -	
Kalsiyum klorür (17:3:3:1:9)	850...1000
Sodyum klorür - Baryum klorür - Sodyum siyanür - Baryum karbonat (1:2:6:4)	800...950

Tablo 9: Siyanür banyolarında, sıcaklık ve zamanın, sementasyon derinliğine etkisi (Urun, 2008, 30).

Sıcaklık (°C)	Zaman (Saat)	Sementasyon Derinliği (mm)
840	1	0,25
	2	0,35
	4	0,46
	6	0,52
880	1	0,29
	2	0,4
	4	0,7
930	1	0,35
	2	0,67
	4	0,9

6.1.3. Gaz Ortamda Sementasyon İşlemi

Gaz sementasyonunda çelik, karbon içeren hidrokarbonlar, metan, etan ve propan gibi gazlarla temas halinde ısıtılır. Sementasyon gazları, küçük miktarda karbondioksit (CO_2), hidrojen (H) ve su (H_2O) ile beraber başlıca azot (N) ve karbon monoksitten meydana gelen taşıyıcı gaz endotermik seyreltilerdir. Bu gazlardan azot (N) asaldır ve sadece seyreltici olarak davranır. Taşıyıcı gaz çelik yüzeyine karbon difüze etmek için kullanılır ve is kalıntısı oluşumunu önler. Sementasyon sırasında karbon potansiyelinin kontrolü taşıyıcı gazın sabit akışının korunması ve hidrokarbonca zengin gaz akışını değiştirmekle mümkün olur. Gaz sementasyonunun diğer sementasyon işlemlerine göre üstünlüğü, işlem kontrolünün sağlanabilmesidir (Urun, 2008, 30-31).

6.1.4. Sementasyon Uygulanmış Parçalara Su Verilmesi

Sementasyon uygulanmış çeliklere, sertleştirilmiş bir yüzey katmanı oluşturmak için genellikle östenitik şartlarda su verilir. Maliyeti azaltmak için çoğunlukla gaz sementasyonu uygulanmış çeliklere oda sıcaklığına soğutulmaksızın yaklaşık sementasyon sıcaklıklarında (925°C veya 845°C 'de) direkt olarak su verilir (Urun, 2008, 31).

6.1.5. Sementasyon Uygulanmış Parçaların Temperlenmesi

Yüzeyi sertleştirilen çeliklerin pek çoğunda martenzitik yapı bulunmaktadır. Martenzitik yapı, sertlik ve dayanım için avantaj iken tokluk için dezavantajdır. Parçanın kullanım yerine göre temperleme yapılıp yapılmayacağına karar verilir. Eğer parçada çatlama ve kırılma riski mevcut ise 150-190°C’de temperleme yapılır. Söz konusu sıcaklıklarda, sertlikte düşüş pek fazla görülmez ve tokluk yükselir (Urun, 2008, 31).

6.2. Nitrürasyon (Nitrürleme)

Termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinin en önemli ve en eski metodu yüzey katmanının kimyasını değiştiren çeliğin nitrürasyonudur (Ekinci ve Akdemir 2011, 39). Sementasyona benzer biçimde çeliğin yüzeyine azot difüzyonu yapılır. Çeliğe nüfuz eden azot sert ve kararlı nitrür bileşikleri oluşturur. Nitrürasyon işlemi, çeliğin yüzey sertliğini, pullanma ve aşınma dayanımını, yorulma dayanımını, korozyon dayanımını artırmak ve yüksek sıcaklıklarda sertlik kaybını azaltmak için uygulanır (Urun, 2008, 31).

Bir kaplama/tabak malzeme birleşimi için, tabak malzeme aşırı yüklemelere maruz kaldığında altlığın plastik deformasyona uğramadan, kaplamaya destek verecek sertliğe ve akma mukavemetine sahip olması gerekir. Tabak malzemesinin plastik deformasyona uğraması, kaplamanın zamanından önce hasara uğramasına neden olacak ve bu da uygun tabak malzemesi seçimine sınırlama getirecektir (Alsarı vd., 2002, 2).

Nitrürasyon işlemi yapıldıktan sonra hızlı soğutma gerekmediğinden parçanın çarpılması söz konusu olmaz (Urun, 2008, 31).

Yüzeye, uygun sıcaklıktaki nitrojen barındıran bir yüzeyle temas kurdurularak nitrojen eklenebilir. Bu yöntemle çeşitli nitrürleme işlemleri geliştirilmiştir. Örnek olarak; gaz nitrürleme, tuz banyosunda nitrürleme, plazma nitrürleme, lazer biriktirme işlemi, reaktif magnetron püskürtme, nitrojen implantasyonu ve plazma daldırma iyon implantasyonu işlemlerinden bahsedilmektedir (Ekinci ve Akdemir, 2011, 39).

Bu yöntem dökme demir, düşük alaşımlı, yüksek alaşımlı ve paslanmaz çelikler gibi birçok malzemeye uygulanabilir (Alsarı vd., 2002, 2).

Alüminyum, krom, vanadyum, volfram ve molibden elementleri, nitrürleme sıcaklığında nitrür bileşikleri oluşturdıkları için bu alaşım elementlerini içeren alaşımlı çelikler nitrülemeye elverişlidir (Urun, 2008, 31-32).

Nitrürasyon işlemi dişli çark, krank mili, kalıp ve kalıp takımları gibi yorulmaya maruz kalan makine parçalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Ekinci ve Akdemir 2011, 39). Periyodik yükler altında çalışan bu parçalar yorulmadan kaynaklanan ciddi hatalarla karşı karşıyadır (Ekinci ve Akdemir 2011, 39). Nitrürleme ortamları müteakip maddelerde sunulmuştur (Urun, 2008, 31-32).

6.2.1. Gaz Nitrürleme

Gaz nitrürlemede, azot içeren gaz olarak genellikle amonyak (NH_3) kullanılır. Parçalar, kontrol atmosferli gaz sızdırmaz fırın içerisinde (amonyak akımlı) 500-520 °C'ye kadar yavaş olarak ısıtılırlar. Nitrürlemeden önce, yüzey tabakasında oksitlenmiş, karbonu azalmış ve yağlı durum olmamalıdır. Eğer parçalarda, yüksek gerilmeler varsa nitrürasyondan önce gerilim giderme tavlama yapılmalıdır. Gaz nitrürlemede çok sert nitrür tabakasına ulaşmak mümkündür. Çok sert nitrürler alüminyum, titan, molibden, vanadyum ve kromla, çok yüksek olmayan sıcaklıklarda elde edilir. Bu durum için en uygun sıcaklık sahası 500 ± 10 °C'dir (Urun, 2008, 32).

6.2.2. Banyo Nitrürleme

Banyo nitrürleme, yüksek miktarda siyanat içeren siyanürlü tuz banyolarında yapılır. Burada, yüksek sıcaklıklarda siyanürden (CN) karbon ayrışmasına benzer olarak, düşük sıcaklıkta azot ayrıştırılarak çeliğe verilir. Sıvı nitrürlemede, gaz nitrürlemeye göre sertleşme derinliği daha fazladır. Fakat hızlı ısınmadan dolayı parçalarda çarpılma riski mevcuttur. Banyo nitrürleme, yüzeyde yüksek aşınma dayanımı veya değişken eğilme gibi zorlamalarda yüksek dayanım elde etmek için tercih edilir. Banyo nitrürleme, %25-50 siyanür ve %50 siyanat içeren siyanür banyolarında yapılır. Parçaların işlem öncesinde ıslah edilmesi fayda sağlar. Banyo sıcaklığı genellikle 500 ile 580 °C arasındadır. Nitrürleme süresi, normal olarak 2 saattir (Urun, 2008, 32).

6.2.3. Plazma Nitrürleme

Plazma nitrürleme işleminde, metal yüzeyinde ve yüzeye çok yakın bölgelerde azot difüzyonu, termo-kimyasal reaksiyonlarla gerçekleşir. Plazma nitrürlemede gaz olarak genellikle, azot ya da amonyak kullanılmaktadır. Nitrür partiküllerinin oluşması için gerekli olan aktifleştirme enerjisi ise, fırın cidarı ile parça arasında oluşturulan yüksek gerilim ile azot verilecek parçaya doğru ivmelendirilen iyonların parça yüzeyini bombardımanı sonucunda açığa çıkmaktadır. Birçok ülkede yaygın kullanılan bu nitrürasyon yöntemi, pompalar, hidrolik makine parçaları, hadde ve kuvvet taşıma dişlileri, motor, otomotiv endüstrisi, sıcak ve soğuk iş takım endüstrisi gibi alanlarda uygulanmaktadır (Urun, 2008, 33).

Nitrürleme işlemi esnasında ortama verilen N_2 miktarının ve işlem süresinin, doğrudan beyaz tabaka kalınlığını etkilediği görülmüştür. Azot miktarı arttıkça beyaz tabaka kalınlığı artmıştır. Ortama yeterli seviyede N_2 gazı (% 4-10 N_2) verildiğinde çok düşük kalınlıkta beyaz tabaka oluştuğu, işlem süresi arttıkça beyaz tabaka kalınlığının da arttığı, belirli bir sıcaklık ve işlem süresi sonrası azaldığı görülmüştür (Alsaran vd., 2002, 2).

Oluşan beyaz tabakanın, kaplamadan taban malzemeye elementlerin difüzyonuna karşı etkili bir bariyer olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, kaplama işlemine geçmeden önce nitrürasyon işlemi esnasında ve sonrasında $Fe_{2-3}N$ yapısını ortadan kaldırmak veya kontrol altına almak gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Alsaran vd., 2002, 2).

Beyaz tabanın olumsuz etkisini ortadan kaldırmak için nitrürasyon sonrası saçılma, parlatma, zımparalama, gaz karışımında azot miktarının azaltılması işlemleri uygulanabilir (Alsaran vd., 2002, 6).

Nitrürleme işleminin sıcaklık, zaman, gaz oranı gibi bir çok parametre ile değişmesi bu olayı oldukça karmaşık hale getirmektedir (Alsaran vd., 2002, 3).

Bununla birlikte N_2 gazı miktarının az ve işlem süresinin kısa olduğu durumlarda yüzey sertliği ve difüzyon tabakası derinliğinin düşmesi önemli bir problem olarak karşımıza çıkar (Alsaran vd., 2002, 2).

Plazma ile nitrüleme işlemi de PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) kaplama işlemi gibi 400-600  C sıcaklıklarda gerçekleştirildiği için malzemenin yüzeyi bir ön işlem gibi setleştirildikten sonra yüzeye aşınma dirençli kaplamalar uygulanabilir (Alsaran vd., 2002, 3).

BÖLÜM VII

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmanın amacı, hidrolik dişli pompalarda dişli malzemesi olarak kullanılan 16MnCr5 (7131) sementasyon çeliğinden imal edilen numuneler ile, gövde malzemesi olarak kullanılan GGG55 sfero döküm malzemedan imal edilen numunelerin ısıtıl işlemli/ısıtıl işlemsiz, kaplamalı/kaplamasız kombinasyonlarının kayma temasında ve kuru çalışma ortamında; farklı yükler, mesafeler ve çalışma sürelerinde test edilerek aşınma davranışlarının incelenmesidir.

7.1. Numunelerin Hazırlanması

7.1.1. Numunelerin İmalatı

Hidrolik dişli pompa dişli malzemesi olan 7131 (16MnCr5) sementasyon çeliğinden ve gövde malzemesi olan GGG55 sfero döküm malzemedan Ø50x500 mm edatlarında 1'er adet silindirik mil, kum kalıpta döküm yoluyla elde edilmiştir. Numunelerin kimyasal analiz sonuçları Tablo 10'da yer almaktadır.

Tablo 10: Yarı mamul numunelerin kimyasal analizleri.

KİMYASAL KOMPOZİSYON %			
7131 (16MnCr5)		GGG55	
C	: 0,14-0,019	C	: 7,15
Si	: 0,4	Si	: 1,39
Mn	: 1-1,3	Mn	: 0,251
P	: 0,035	P	: 0,025
S	: 0,035	S	: 0,007
Cr	: 0,8-1,1	Cr	: <0,001
Ni	: -	Ni	: <0,001
Mo	: -	Mo	: <0,001
V	: -	V	: 0,005
-	: -	Mg	: 0,056
-	: -	Cu	: 0,355
-	: -	Al	: 0,005
-	: -	Ti	: 0,01
-	: -	Nb	: <0,001
-	: -	B	: <0,0001
-	: -	W	: <0,003
-	: -	Co	: 0,006
-	: -	Sn	: 0,001
-	: -	Pb	: <0,001

Kum kalıpta döküm yoluyla elde edilen miller, Spinner TC77 marka CNC Torna Tezgahında Ø40x480 mm ebatlarına tornalanmıştır. Tornalama işlemi sonrasında, Uzay marka hidrolik testere tezgahında Ø40x15 mm ebatlarında diskler şeklinde 64 adet dilimlenmiştir.

Dilimlenen her bir numune CNC Torna Tezgahında Ø40x11 mm ebatlarında alın tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Alın tornalama işlemi sonrasında numuneler Blohm Simplex marka düzlem yüzey taşlama tezgahı manyetik tablasına 32'şerli iki grup şeklinde yerleştirilmiş, numunelerin her iki alın yüzeylerinden 1'er mm taşlanarak, Ø40x10 mm ebatlarına getirilmiştir. Tornalama, hidrolik testere ile kesme ve düzlem yüzey taşlama işlemleri, soğutma sıvısı kullanılarak yapılmıştır.

Düzlem yüzey taşlama işlemi sonrasında yarı mamul numune alın yüzeyleri sırasıyla 320, 800 ve 1200 mesh SiC zımparalar ile zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işlemine tabi tutulan numuneler, numune parlatma cihazında 3 µm elmas süspansiyon, 3 µm kadife keçe ve su bazlı kaydırıcı kullanılarak ıslak ortamda yüzey parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama ve parlatma işlemlerinin tüm aşamalarında numune yüzeyleri etil alkol ile yıkanarak temizlenmiştir.

Parlatma işlemi sonrasında 7131 (16MnCr5) numunelere sementasyon işlemi uygulanmıştır. Sementasyon işlemi sonrası numune alın yüzeyleri tekrar sırasıyla 320, 800 ve 1200 mesh SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. Zımparalama işlemini müteakip numuneler, numune parlatma cihazında 3 µm elmas süspansiyon, 3 µm kadife keçe ve su bazlı kaydırıcı kullanılarak ıslak ortamda tekrar yüzey parlatma işlemine tabi tutulmuştur.

Zımparalama ve parlatma işlemlerinin tüm aşamalarında numune yüzeyleri etil alkol ile yıkanarak temizlenmiştir. Sementasyon işleminde uygulanan parametreler Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11: Sementasyon parametreleri.

SEMENTASYON PARAMETRELERİ	7131 (16MnCr5)
SEMENTASYON ORTAMI	Gaz
ÖN ISITMA SICAKLIĞI	400-450 °C
ÖN ISITMA SÜRESİ	1,5 saat
TAVLAMA SICAKLIĞI	880- 900 °C civarında malzemeler fırına girer tavlama süresi içerisinde 960 °C sıcaklığa ulaştırılır.
TAVLAMA SÜRESİ	2 saat
SEMENTASYON İŞLEM SICAKLIĞI	950-960 °C
SEMENTASYON İŞLEM SÜRESİ	6 saat
MENEVİŞLEME SICAKLIĞI	200 °C
MENEVİŞLEME SÜRESİ	180 dk.
İŞLEM SONRASI PARÇA TEMİZLİĞİ	Kumlama
SEMENTASYON KALINLIĞI	Asgari 1mm

Bu işlem sonrasında 16 adet 16MnCr5 (7131) ve 16 adet GGG55 numuneye plazma nitrürleme (plazma nitrürasyon) işlemi uygulanmıştır. Diğer numunelere ise karşılaştırma yapabilmek için plazma nitrürasyon uygulanmamıştır. Nitrürasyon işlemi sonucunda oluşan beyaz nitrür tabakasının kaldırılması maksadıyla numuneler, numune parlatma cihazında 3 µm elmas süspansiyon, 3 µm kadife keçe ve su bazlı kaydırıcı kullanılarak ıslak ortamda 3'er dakika süre ile yüzey parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatma işlemi sonrasında numune yüzeyleri etil alkol ile yıkanarak temizlenmiştir. Nitrürasyon işleminde uygulanan parametreler Tablo 12'de yer almaktadır.

Tablo 12: Nitrürasyon parametreleri.

NİTRÜRASYON PARAMETRELERİ	
İŞLEM TÜRÜ	PLAZMA NİTRÜRASYON
İŞLEM SICAKLIĞI	480°C
İŞLEM SÜRESİ	10 SAAT
GAZ ORTAMI	AZOT/ HİDROJEN ORANI 3/1
İŞLEM BASINCI	2,5 MİLİBAR (VAKUM ORTAMI)

Kaplama yapılmadan önce yüzeyin temizliği ve pürüzlülüğünün en aza indirilmesinin kaplamanın sıhhati açısından son derece önemli bir yeri vardır. Çok temiz ve pürüzsüz bir ana malzemenin hazırlanmasıyla kaplamanın verimi artırılabilir (Okay vd., 2010, 788). Bu nedenle nitrürasyon işlemi sonrası yapılan yüzey parlatma işleminin, kaplamanın yapışma davranışını olumlu yönde etkileyeceği değerlendirilmiştir.

Hazırlanan numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri MITUTOYO SJ.201 Profilometre kullanılarak yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının özellikleri ve ölçüm parametreleri Tablo 13'te yer almaktadır.

Tablo 13: Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının özellikleri ve ölçüm parametreleri.

CİHAZ ADI	MITUTOYO SJ.201 PROFİLOMETRE
ÖLÇME UZUNLUĞU	2,5 mm x5mm=12,5mm
ODA SICAKLIĞI	30°C
NEM	45%
ÖLÇME TARİHİ	01.07.2013 PAZARTESİ
ÖLÇME SAATİ	14.20

Hazırlanan her bir numune tipi için 3'er ölçüm yapılmıştır. Ölçüm değerleri Tablo 14'te yer almaktadır.

Tablo 14: Numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları.

	ÖLÇÜM	Ra	Ry	Rz	Rq	Rt
7131 (16MnCr5)	1	0,02	0,70	0,25	0,03	0,72
	2	0,02	0,21	0,14	0,02	0,22
	3	0,02	0,36	0,17	0,02	0,36
	ORTALAMA	0,02	0,42	0,19	0,02	0,43
7131 (16MnCr5) NİTRÜRASYONLU	1	0,02	0,17	0,14	0,03	0,17
	2	0,02	0,12	0,10	0,02	0,12
	3	0,02	0,18	0,13	0,03	0,20
	ORTALAMA	0,02	0,16	0,12	0,03	0,16
GGG55	1	0,12	2,67	1,97	0,20	2,74
	2	0,12	3,25	2,02	0,22	3,25
	3	0,12	2,95	2,53	0,26	2,98
	ORTALAMA	0,12	2,96	2,17	0,23	2,99
GGG55 NİTRÜRASYONLU	1	0,24	3,36	2,79	0,39	3,46
	2	0,23	3,67	2,91	0,39	3,67
	3	0,22	3,50	2,91	0,36	3,50
	ORTALAMA	0,23	3,51	2,87	0,38	3,54

GGG55 numunelerin yüzey pürüzlülüğünün 7131 (16MnCr5) numunelere göre daha fazla olmasının sebebi, numune hazırlama işlemi esnasında zımparalama ve parlatma aşamalarında grafit küreciklerinin yüzeyden dökülerek çukurcukların meydana gelmesi olarak ifade edilebilir. Tablo 14 incelendiğinde GGG55 numunelerin 7131 numunelere göre daha fazla yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü Ra 0,02µm alınarak yapılan kaplama işlemlerinde iyi yapışma elde edilmiştir (Alsaran vd., 2002, 3).

Hazırlanan numunelerin yüzey sertlikleri Heckert Vickers-Brinell Sertlik Ölçme Cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Sertlik ölçüm cihazı özellikleri ve ölçüm parametreleri Tablo 15'te yer almaktadır.

Tablo 15: Sertlik ölçüm cihazının özellikleri ve ölçüm parametreleri.

CİHAZ ADI	HECKERT VICKERS-BRINELL SERTLİK ÖLÇME CİHAZI
UÇ	2,5 mm ÇAPLI ÇELİK BİLYE
YÜK	187,5 kg
ÖLÇME SICAKLIĞI	30°C
NEM	45%

Hazırlanan her bir numune tipi için 3'er ölçüm yapılmıştır. Ölçüm değerleri Tablo 16' da yer almaktadır:

Tablo 16: Numune sertlik ölçüm sonuçları.

ALTLIK MALZEMESİ	ÖLÇÜM NU.	BIRINELL SERTLİK DEĞERİ (HB)
7131 (16MnCr5)	1	167
	2	167
	3	167
	ORTALAMA	167
GGG55	1	239
	2	239
	3	239
	ORTALAMA	239

Tablo 12'de belirtilen şartlarda uygulanan nitrürasyon işlemi neticesinde numune yüzeyleri üzerinde ince bir nitrür tabakası ($\leq 300 \mu\text{m}$) elde edileceği değerlendirilmektedir.

7.1.2. Numunelerin Kaplanması

Kaplama öncesi numune yıkama işlemi, FİSMET marka ultrasonik yıkama makinesinde iki kademeli olarak ultrasonik alkali deterjan kullanılarak yapılmıştır. Ultrasonik alkali deterjan olarak NGL firmasının ürünleri kullanılmıştır. Birinci banyo işleminde 12,5 PH

değerinde Rodaweg Extra deterjan kullanılarak numuneler 60 °C sıcaklıkta 4 dakika süreyle ultrasonik yıkama işlemine tabi tutulmuş, ikinci banyo işleminde 9,5 PH değerinde Galvex 17:30 sup deterjan kullanılarak 60 °C sıcaklıkta 7 dakika süreyle ultrasonik yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Her iki yağ alma adımından sonra 30'ar saniye süreyle musluk suyu ile durulama yapılmıştır. Bu işlemler sonrasında 3 ayrı haznede arı su ile (30 saniye x 3 kez) durulama yapılmış, azot ile suyun yüzeylerden süpürülmesi işlemini müteakiben en son olarak nemi alınmış sıcak hava ile kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.

7131 (16MnCr5) çelik ve GGG55 dökme demir malzemeden hazırlanan numunelerin üzerine katodik ark buhar biriktirme yöntemi kullanılarak yapılan kaplamalar; IONBOND TİNKAP Ltd. Şirketi'nde TiN, TiAlN ve CrN kaplama şeklinde, üç farklı bileşimde gerçekleştirilmiştir.

Biriktirme odası yüksek saflıkta azot gazı kullanılarak temizlendikten sonra ana malzemenin yüzeyi, ana malzeme ile yüksek ticari saflıktaki katotlar arasında oluşturulan, ark iyon buharının bombardımanı ile kaplanmıştır.

Kaplama işlemleri Hauzer marka RTC 850 Kaplama sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her tip kaplama öncesi ön ısıtma ve numune yüzey temizliği maksadıyla numune yüzeylerine iyon bombardımanı uygulanmış, daha sonra kaplama işlemine geçilmiştir. İyon bombardımanı işlem parametreleri Tablo 17'de, kaplama işlem parametreleri ise Tablo 18'de sunulmuştur.

Tablo 17: Numune yüzeyi iyon bombardımanı işlem parametreleri.

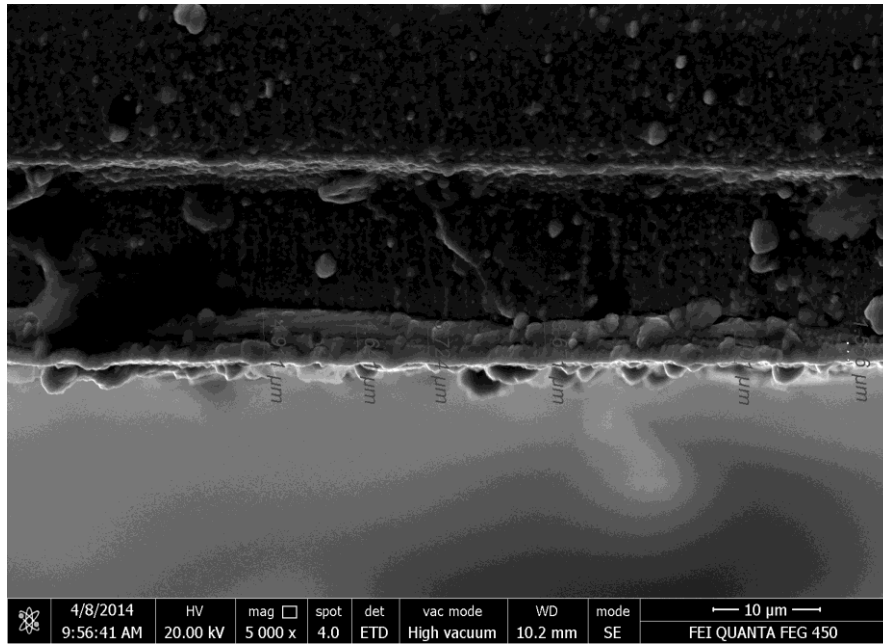
Kaplama Öncesi Ön Isıtma ve Yüzey Temizliği Maksadıyla Numune Yüzeylerine Uygulanan İyon Bombardımanı İşlem Parametreleri			
	TiN Kaplama	CrN Kaplama	TiAlN Kaplama
Kısmi Gaz Basıncı	$1,2 \times 10^{-2}$ mbar	$2,0 \times 10^{-2}$ mbar	$2,0 \times 10^{-2}$ mbar
Gaz Ortamı	N ₂	N ₂	N ₂
Buharlaştırıcı Katot Akımları	60 A	60 A	60 A
Bias Voltajı	700 ve 800 Volt DC	700 ve 800 Volt DC	700 ve 800 Volt DC
Süre	15 dakika	16 dakika	16 dakika

Tablo 18: Numune kaplama işlem parametreleri.

Numune Yüzeylerine Uygulanan Kaplama İşlem Parametreleri			
	TiN Kaplama	CrN Kaplama	TiAlN Kaplama
Katot Akımları	70 A	70 A	60 A
Bias Voltajı	50-60 Volt DC	50-60 Volt DC	50-60 Volt DC
Katot Sayısı	6	6	8
Süre	1 saat	1,5 saat	1 saat 10 dakika

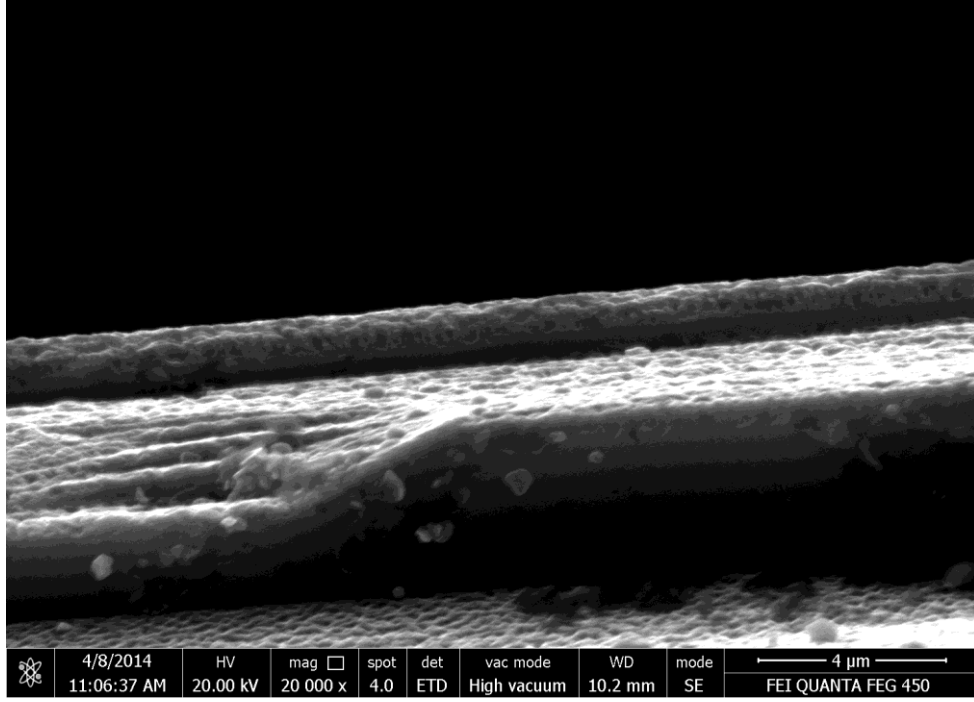
Kaplama kalınlıklarını tespit edebilmek maksadıyla, her kaplama işleminde numuneler ile birlikte aynı anda silicon wafer'ler de kaplanmıştır. Silicon wafer, üzerindeki kaplamaya zarar vermeden gevrek şekilde kırılabilir yapıda olması sebebiyle tercih edilmiştir. Kaplanan silicon wafer'ler, kırılarak kesitleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)' nda incelenmiştir.

TiN kaplanmış numune kesitine ait SEM mikrografi Şekil 62'de verilmiştir. Şekil 62'de verilen mikrograf incelendiğinde TiN kaplama katmanı kalınlığının ortalama 3 µm olarak elde edildiği görülmektedir.



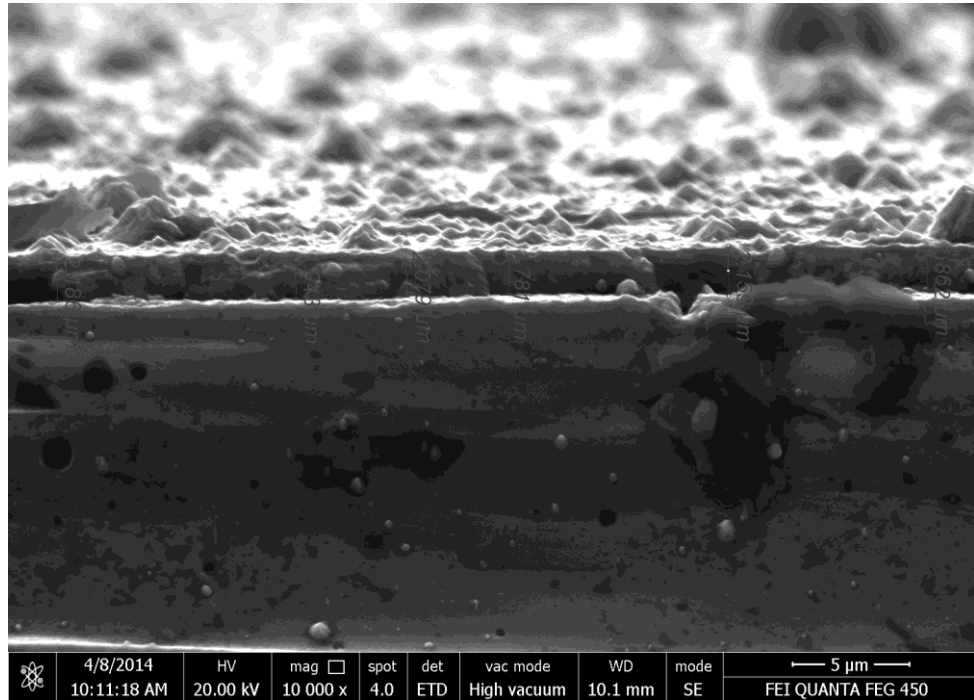
Şekil 62: TiN kaplamaya ait SEM mikrografi.

CrN kaplanmış numune kesitine ait SEM mikrografi Şekil 63'te verilmiştir. Şekil 63'te verilen mikrograf incelendiğinde CrN kaplama katmanı kalınlığının ortalama 3 µm olarak elde edildiği görülmektedir.



Şekil 63: CrN kaplamaya ait SEM mikrografi.

TiAlN kaplanmış numune kesitine ait SEM mikrografi Şekil 64’te verilmiştir. Şekil 64’te verilen mikrograf incelendiğinde TiAlN kaplama katmanı kalınlığının ortalama 3 μm olarak elde edildiği görülmektedir.



Şekil 64: TiAlN kaplamaya ait SEM mikrografi.

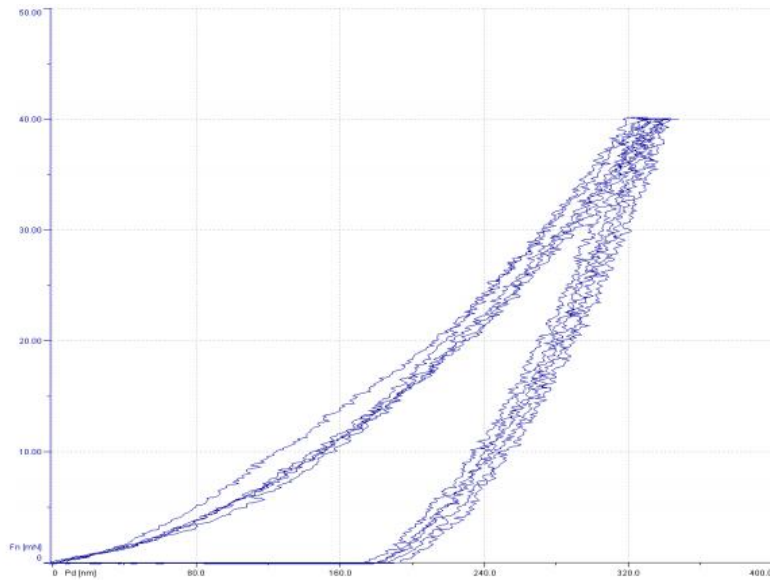
Kaplama kalınlıklarının ortalama 3 μm olması nedeniyle, kaplama sertlik ölçümü nanoindentasyon yöntemi ile kaplama yüzeyleri üzerinden tekrarlı ölçümler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Tekrarlı ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak ortalama sertlik değerleri tespit edilmiştir. Nanoindentasyon işlemine ait ölçüm sonuçları Tablo 19'da verilmiştir. Tablo 1 ve Tablo 19 incelendiğinde, ölçülen kaplama sertlik değerlerinin literatür kaplama sertlik değerleri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 19: Nanoindentasyon sertlik değerleri.

Sıra Nu.	Numune Türü	Yüzey Sertliği (MPa)
1	CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numune	18201
2	TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune	23294

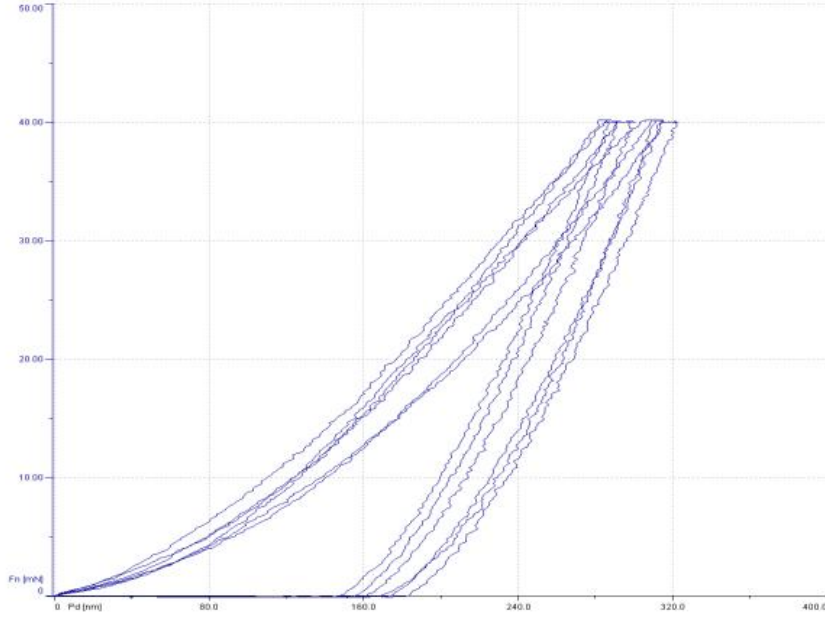
Tablo 1'de sunulan literatür kaplama sertlik değerleri ile Tablo 19'da sunulan nanoindentasyon kaplama sertlik ölçümü değerleri arasındaki küçük farkların, numunelerin yüzey pürüzlülüğünün etkisiyle gerçekleşmiş olabileceği değerlendirilmektedir.

Şekil 65 incelendiğinde CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numune üzerinde yapılan 5 (beş) tekrarlı indentasyon işleminde aynı mN (miliNewton) yükleme değerlerinde ve aynı nm (nanometre) ölçüm aralıklarında yaklaşık aynı sertlik değerlerinin elde edildiği gözlenmektedir.



Şekil 65: CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numune üzerinde yapılan 5 (beş) tekrarlı indentasyon işlemi.

Şekil 66 incelendiğinde TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune üzerinde yapılan 6 (altı) tekrarlı indentasyon işleminde aynı mN (miliNewton) yükleme değerlerinde ve aynı nm (nanometre) ölçüm aralıklarında yaklaşık aynı sertlik değerlerinin elde edildiği gözlenmektedir.



Şekil 66 : TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune üzerinde yapılan 6 (altı) tekrarlı indentasyon işlemi.

7.2. Deney Tasarımı

Bu çalışmada, hidrolik dişli pompalardaki mevcut aşınma sorunlarının giderilmesi ve aşınma performanslarının iyileştirilmesi amacıyla Taguchi metodu kullanılmıştır.

Deneyisel tasarım parametreleri; uygulanan yük, altlık malzemesinin yüzey durumu, kaplama türü ve yükün uygulandığı mesafe şeklinde belirlenmiştir. Belirlenen deney parametreleri ve düzeyleri Tablo 20'de verilmiştir.

Tablo 20: Deney parametreleri ve düzeyleri.

FAKTÖR					
DÜZEY	Mesafe		Yük	Kaplama	Altlık
	1	1000	7	TiN	7131 Nitrürlü
	2	1500	10	CrN	7131 Nitrürsüz
	3		13	TiAlN	GGG55 Nitrürlü
	4		16	Kaplamasız	GGG55 Nitrürsüz

Deney tasarımı için L32 (2**1 4**3) deney tasarım matrisi kullanılmıştır. Yapılacak olan deneylerde kullanılacak olan parametreler Minitab 16 programı yardımıyla oluşturulmuş olan tasarım matrisine yerleştirilmiştir. Tasarım matrisi Tablo 21'de sunulmuştur.

Tablo 21: Deney tasarım matrisi.

DENEY NU.	MESAFE	YÜK	KAPLAMA	ALTLIK
K1	1500	13	Kaplamasız	7131 Nitrürlü
K2	1500	16	Kaplamasız	7131 Nitrürlü
K3	1500	7	Kaplamasız	7131 Nitrürlü
K4	1500	10	Kaplamasız	7131 Nitrürlü
K5	1000	7	TiN	7131 Nitrürlü
K6	1000	10	TiN	7131 Nitrürlü
K7	1000	13	TiN	7131 Nitrürlü
K8	1000	16	TiN	7131 Nitrürlü
K9	1000	13	CrN	7131 Nitrürlü
K10	1000	16	CrN	7131 Nitrürlü
K11	1000	7	CrN	7131 Nitrürlü
K12	1000	10	CrN	7131 Nitrürlü
K13	1500	13	TiAlN	7131 Nitrürlü
K14	1500	16	TiAlN	7131 Nitrürlü
K15	1500	7	TiAlN	7131 Nitrürlü
K16	1500	10	TiAlN	7131 Nitrürlü
K17	1000	7	Kaplamasız	GGG55 Nitrürlü
K18	1000	10	Kaplamasız	GGG55 Nitrürlü
K19	1000	13	Kaplamasız	GGG55 Nitrürlü
K20	1000	16	Kaplamasız	GGG55 Nitrürlü
K21	1500	13	TiN	GGG55 Nitrürlü
K22	1500	16	TiN	GGG55 Nitrürlü
K23	1500	7	TiN	GGG55 Nitrürlü
K24	1500	10	TiN	GGG55 Nitrürlü
K25	1500	7	CrN	GGG55 Nitrürlü
K26	1500	10	CrN	GGG55 Nitrürlü
K27	1500	13	CrN	GGG55 Nitrürlü
K28	1500	16	CrN	GGG55 Nitrürlü
K29	1000	7	TiAlN	GGG55 Nitrürlü
K30	1000	10	TiAlN	GGG55 Nitrürlü
K31	1000	13	TiAlN	GGG55 Nitrürlü
K32	1000	16	TiAlN	GGG55 Nitrürlü

7.3. Aşınma Deneyi

Numunelerin aşınma testleri, TURKYUS marka pin on disk test cihazında gerçekleştirilmiştir. Pin on disk cihazının görüntüsü Şekil 67'de verilmiştir.



Şekil 67: Pin on disk cihazına ait bir görünüm.

Deneyler, 6 mm çapında Tungsten karbür (WC) aşındırıcı sert bilyalar kullanılarak, kuru sürtünme şartlarında, 0,18 m/s sabit kayma hızında 7, 10, 13 ve 16 N yükler altında 1000 m ve 1500 m kayma mesafesinde, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Aşınma izleri optik profilometre ile taranarak 2D (2 boyutlu) ve 3D (3 boyutlu) aşınma iz profilleri çıkarılmıştır. 2D (2 boyutlu) aşınma iz profilleri SolidWork 2012 programına aktararak 3D (3 boyutlu) olarak modellenmiş ve volümerik aşınma miktarları hesaplanmıştır.

BÖLÜM VIII

DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

8.1. Aşınma Sonuçları

Pin on disk deney parametrelerinin belirlenmesinde literatürde yapılan çalışmalar dikkate alınmıştır. Yük faktörünün belirlenmesinde ise tez konusu hidrolik pompa elemanlarının servis şartlarında maruz kaldığı elastik ve dinamik zorlanmaların etkisinin basınç esaslı simülasyonu sonucu bulunan <18 N değeri gözetilmekle birlikte kaplama kalınlığının birkaç mikron mertebelerinde oluşu da uygulanacak yük aralığının tespitinde etkili olmuştur. Aşınma sonuçlarına ait değerlendirmeler Nitrürasyon işleminin etkisi, TiN kaplamanın aşınma davranışı, CrN kaplamanın aşınma davranışı ve TiAlN kaplamanın aşınma davranışı olmak üzere ayrı ayrı alt başlıklar olarak ele alınmıştır. Yapılan pin on disk deneyi sonucunda kaplamalar üzerinden yüzey profilometresi ile alınan aşınma izi profilleri yardımıyla hesaplanan hacimsel kütle kaybı değerleri bu başlıklar altında sunulmuştur.

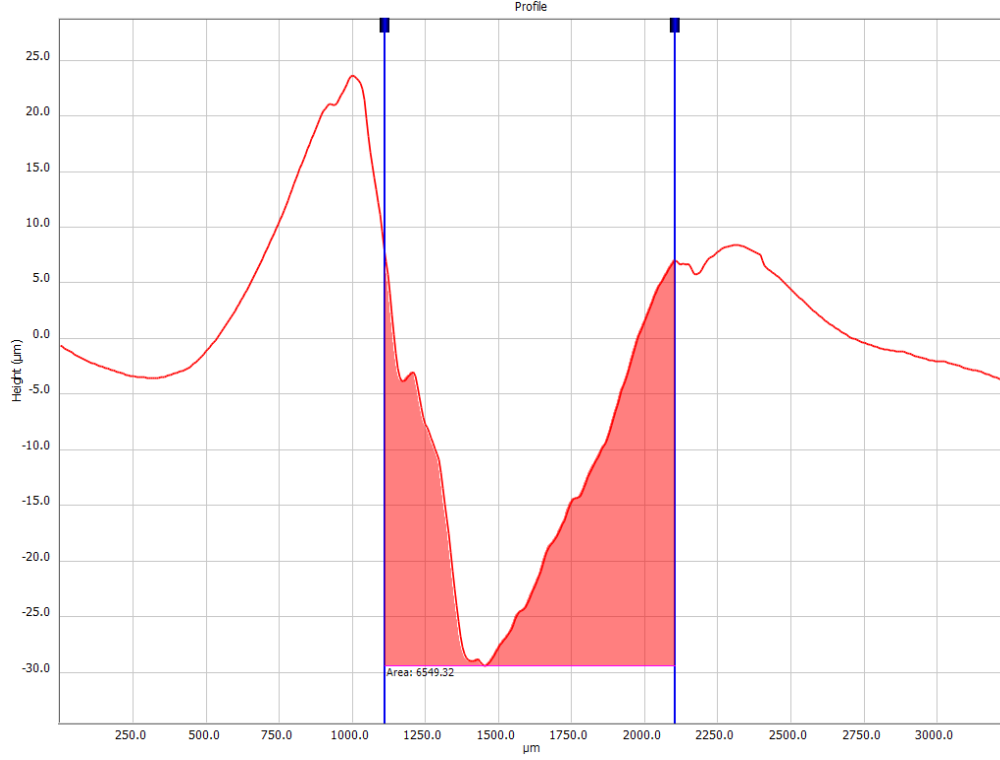
8.1.1. Nitrürasyon İşleminin Etkisi

Nitrürlü ve nitrürsüz 7131 altlık numuneler için yapılan deneylerin sonuçlarına göre elde edilen aşınma miktarlarının değerlendirilmesi karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Tablo 22: Kaplamasız nitrürsüz 7131 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük	Mesafe	Devir	Dönme Çapı	Aşınma Miktarı	Süre	Çevresel Hız
			(N)	(m)	(dev. /dak.)	(mm)	(mm ³)	(dak.)	(m/sn)
K1	7131 Nitrürsüz Kaplamasız	Kuru	13	1500	200	17	0,252147	135	0,18

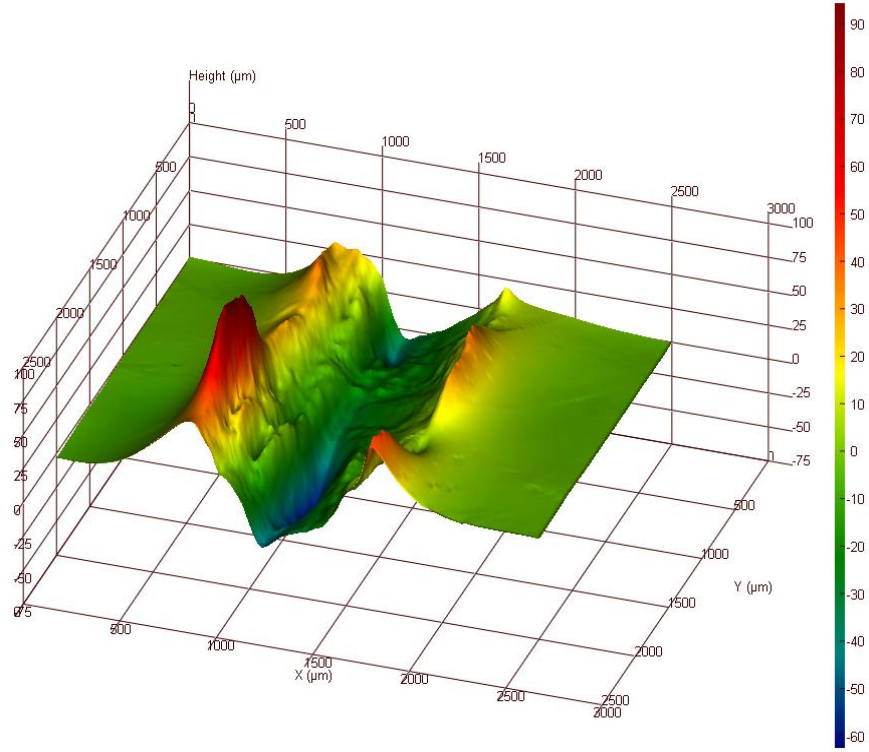
Tablo 22'de yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, kaplamasız nitrürsüz 7131 numunesinde $0,252147 \text{ mm}^3$ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 68'de verilmiştir.



Şekil 68: Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili (K1).

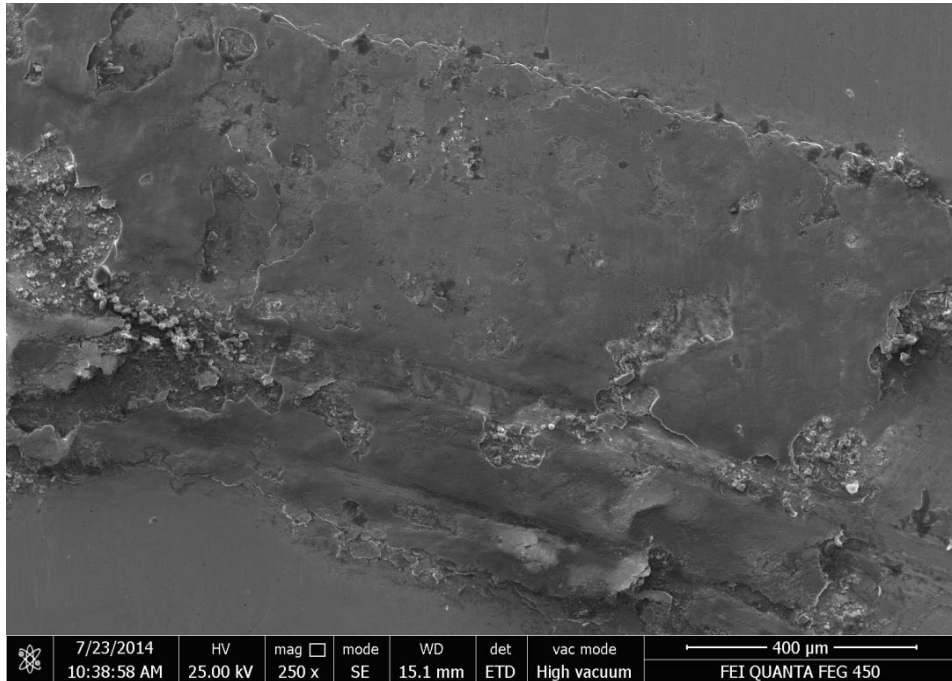
Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 69’da verilmiştir. Şekil 69 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.



Şekil 69: Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü.

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye (K1'e) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 70'te verilmiştir.



Şekil 70: Kaplamasız nitrürsüz 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K1).

Şekil 70 incelendiğinde üç cisimli abrazif (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcuklar da gözlenmektedir. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan partiküllerin de üç cisimli abrazif aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

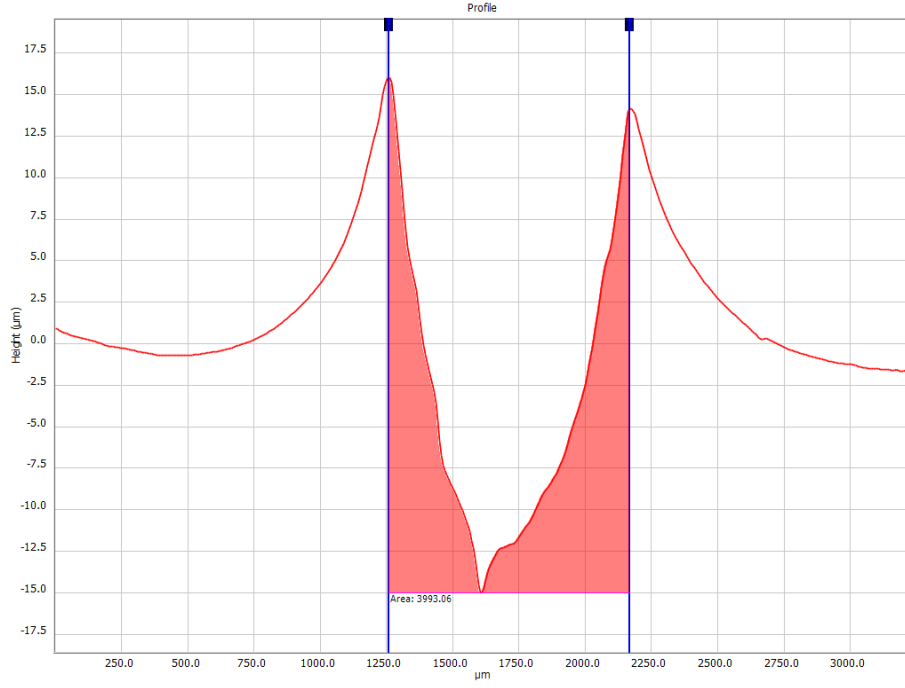
Tablo 22 ve Tablo 23 incelendiğinde, toplam kayma mesafesi ve kayma hızı sabit kaldığı zaman, artan iz çapına karşılık azalan devir sayısı ile aşındırıcı topun aynı noktadan geçiş sayısı azaldığından toplam hacimsel kütle kaybı değerinde de (0,155602 mm³ ile) yaklaşık 1,6 kat azalma meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 68 ve Şekil 71 incelendiğinde yukarıda belirtilen hususlara bağlı olarak aşınma izi derinliğinde 2 kat, aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde ise % 30 azalma meydana geldiği gözlemlenmektedir.

Tablo 23: Azalan devir sayısının kaplamasız nitrürsüz 7131 numunesinde kütle kaybına etkisi.

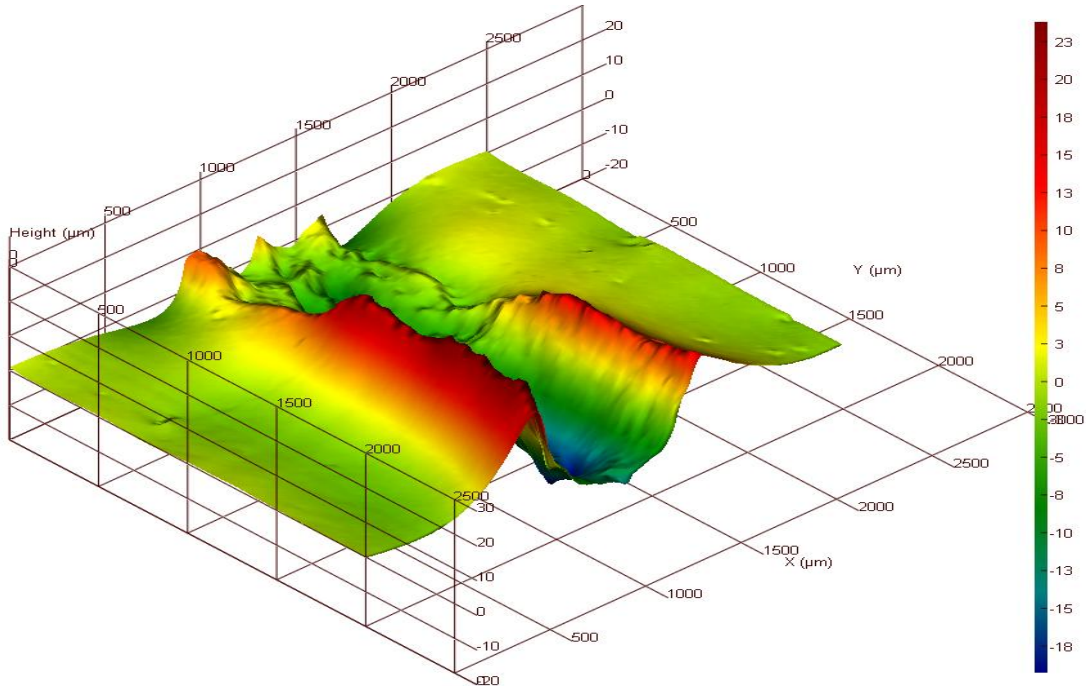
Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük (N)	Mesafe (m)	Devir (dev./dak.)	Dönme Çapı (mm)	Aşınma Miktarı (mm ³)	Süre (dak.)	Çevresel Hız (m/sn)
K2	7131 Nitrürsüz Kaplamasız	Kuru	16	1500	150	23	0,155602	135	0,18

İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 71’de verilmiştir.



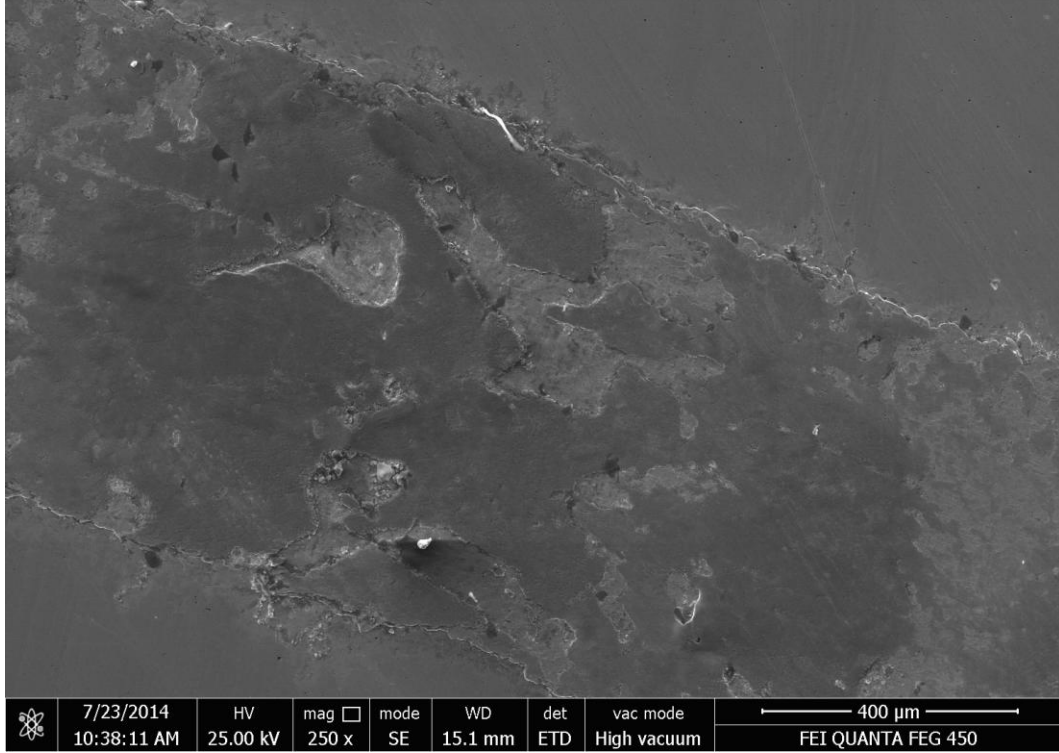
Şekil 71: Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili (K2).

Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 72’de verilmiştir. Şekil 72 incelendiğinde kaplama yüzeyinin K1 numunesiyle benzer bir aşınma davranışı gösterdiği görülmektedir.



Şekil 72: Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K2).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneye (K2'ye) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 73'te verilmiştir.



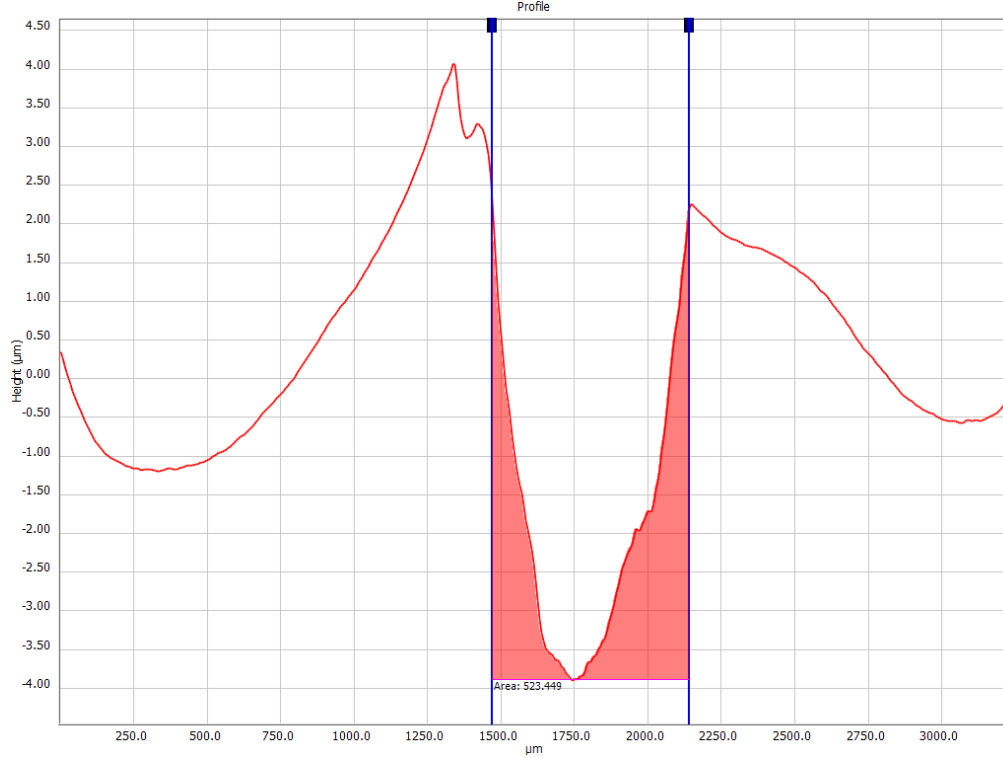
Şekil 73: Kaplamasız nitrürsüz 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K2).

Şekil 73 incelendiğinde K1 numunesine benzer biçimde, üç cisimli abrazyon (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcuklar da gözlenmektedir. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan partiküllerin de üç cisimli abrazyon aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

Tablo 24: Kaplamasız nitrürlü 7131 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük	Mesafe	Devir	Dönme Çapı	Aşınma Miktarı	Süre	Çevresel Hız
			(N)	(m)	(dev./dak.)	(mm)	(mm ³)	(dak.)	(m/sn)
K3	7131 Nitrürlü Kaplamaşız	Kuru	7	1500	200	17	0,031278	135	0,18

Tablo 24'te yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, kaplamasız nitrürlü 7131 numunesinde 0,031278 mm³ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 74'te verilmiştir.



Şekil 74: Kaplamasız nitrürlü 7131 numuneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili (K3).

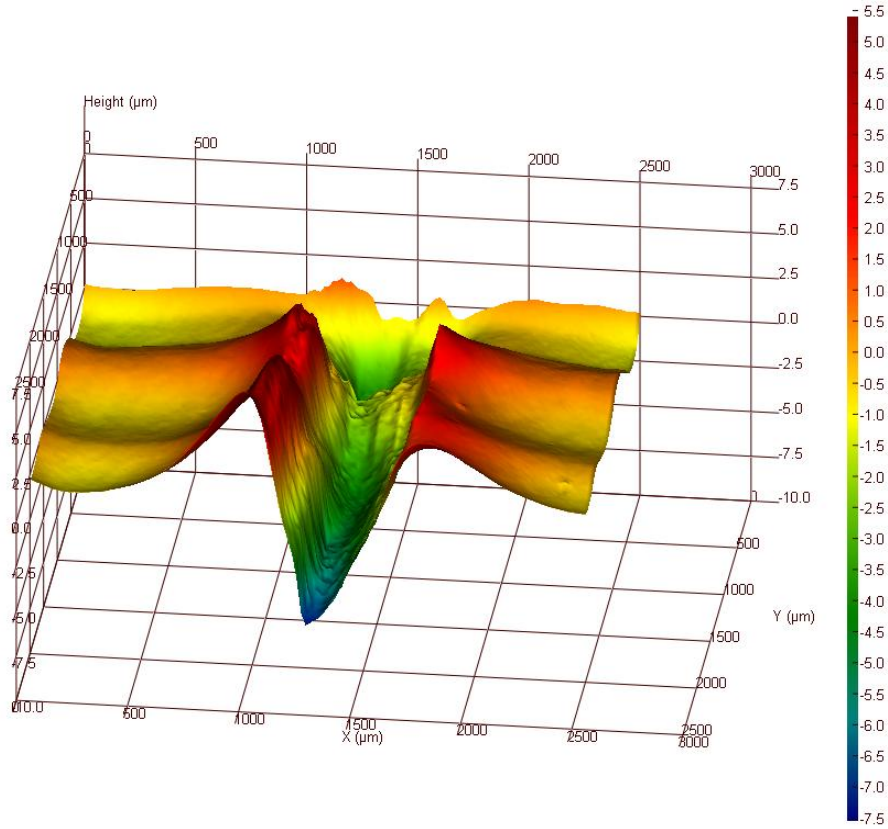
Şekil 71 ile Şekil 74 incelendiğinde kaplamasız nitrürsüz 7131 numune (K2)' ye göre aşınma izi derinliğinde 4 kat, aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde ise % 75 azalma meydana geldiği gözlemlenmektedir.

Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K1) deney sonuçları ile kaplamasız nitrürlü 7131 numune ile yapılan (K3) deney sonuçları karşılaştırıldığında, 7131 altlık malzemesine uygulanan nitrürasyon işleminin K3 numunenin yüzey sertliğini arttırdığı ve buna bağlı olarak hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 8 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

Yapılan Anova varyans analizine göre, deneylerde kullanılan yük aralığında, yük değişiminin deney sonuçları üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığı değerlendirilmektedir.

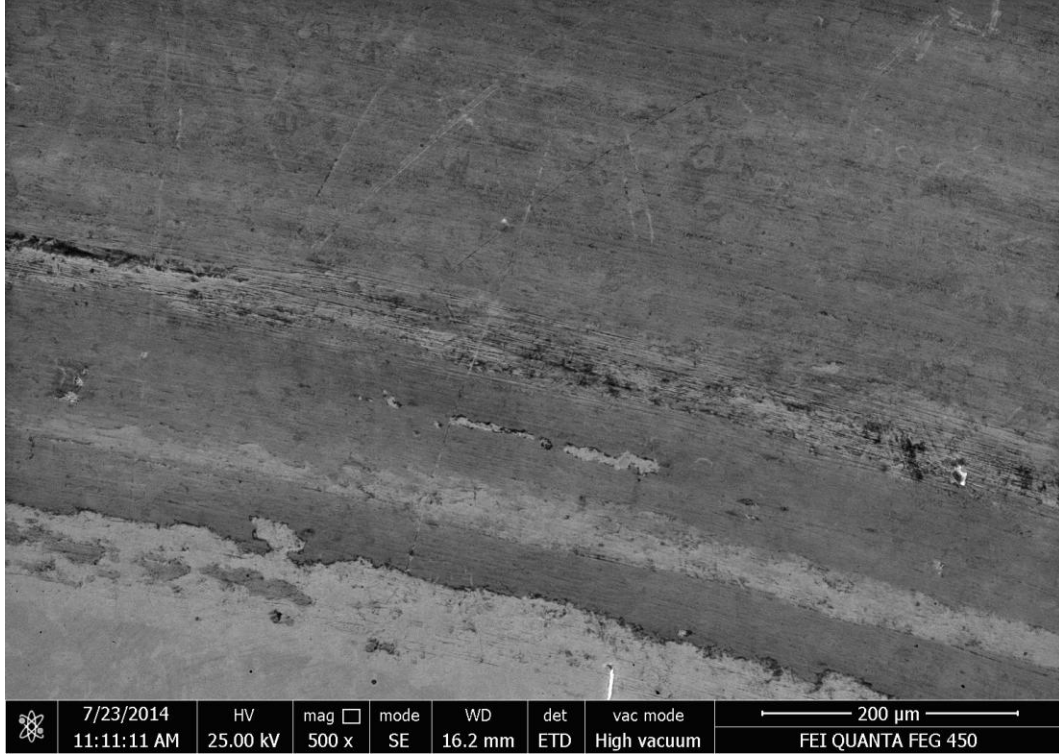
Kaplamasız nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 75'te verilmiştir. Şekil 75 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.



Şekil 75: Kaplamasız nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K3).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. Kaplamasız nitrürlü 7131 numuneye (K3'e) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 76'da verilmiştir.



Şekil 76: Kaplamasız nitrürlü 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K3).

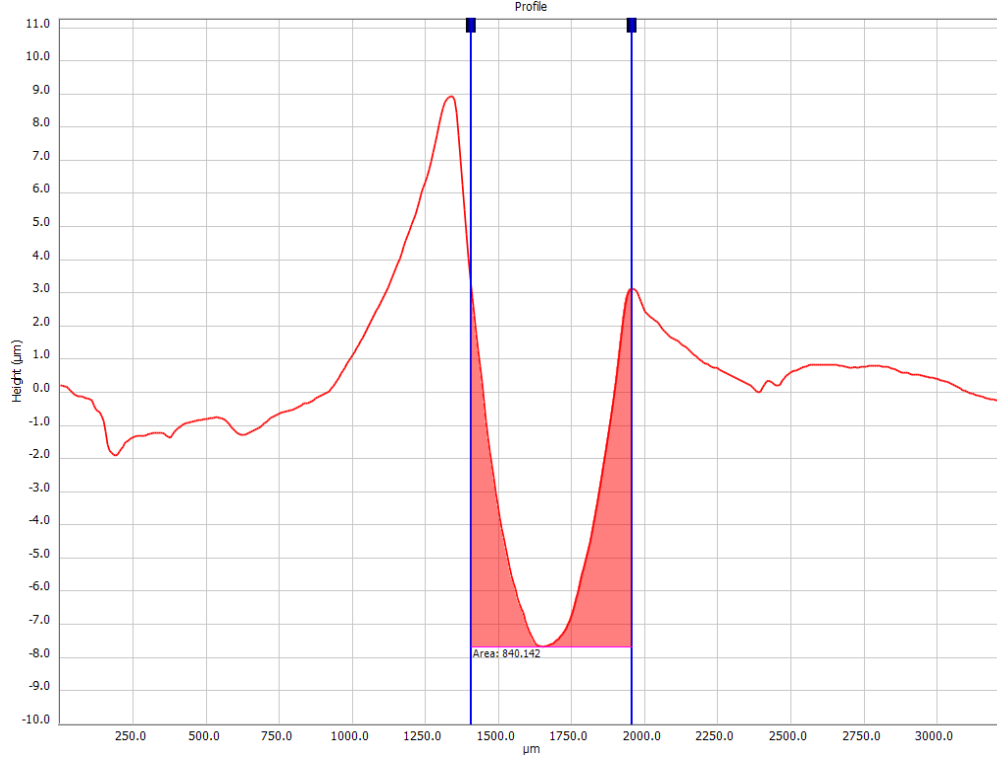
Şekil 76 incelendiğinde üç cisimli abrazif (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarının olduğu ancak nitrürasyon etkisiyle adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların oluşumunda azalma meydana geldiği gözlenmektedir. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan partiküllerin de üç cisimli abrazif aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

Nitrürlü ve nitrürsüz GGG55 altlık numuneler için yapılan deneylerin sonuçlarına göre elde edilen aşınma miktarlarının değerlendirilmesi karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Tablo 25: Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük (N)	Mesafe (m)	Devir (dev./dak.)	Dönme Çapı (mm)	Aşınma Miktarı (mm ³)	Süre (dak.)	Çevresel Hız (m/sn)
K17	GGG55 Nitrürsüz Kaplama	Kuru	7	1000	200	17	0,0516209	90	0,18

Tablo 25'te yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, kaplamasız nitrürsüz GGG55 numunesinde $0,0516209 \text{ mm}^3$ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 77'de verilmiştir.



Şekil 77: Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numuneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili (K17).

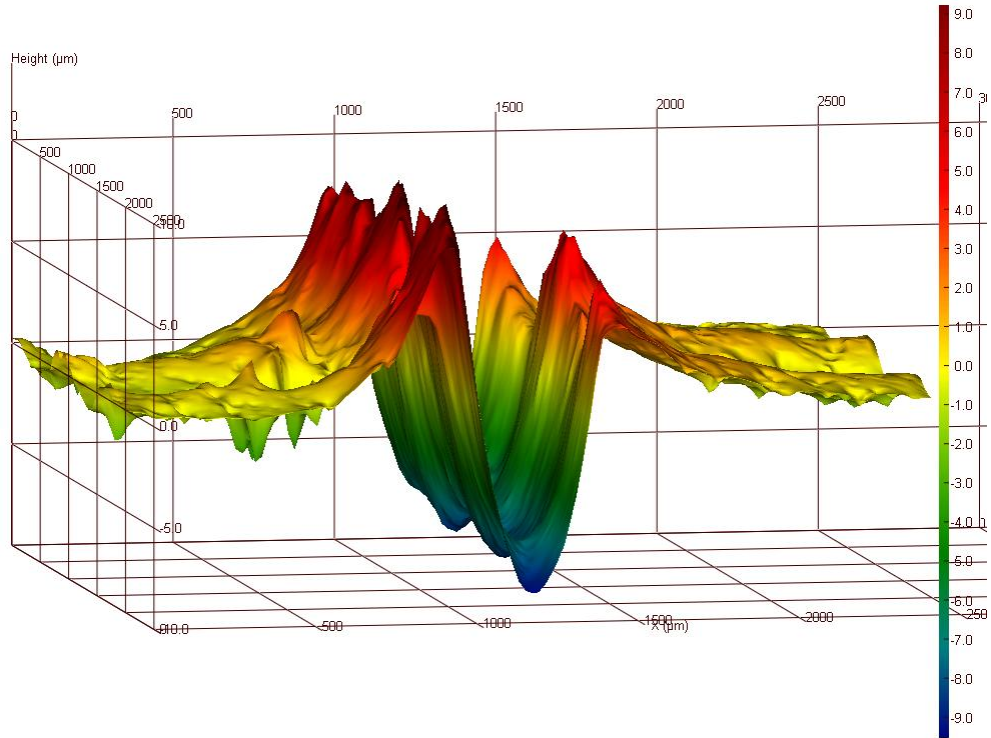
Şekil 68 ve Şekil 77 incelendiğinde kaplamasız nitrürsüz 7131 numune (K1)'ye göre kaplamasız nitrürsüz GGG55 numune (K17)'nin aşınma izi derinliğinde 3,7 kat, aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde ise % 61 azalma meydana geldiği gözlemlenmektedir.

Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K1) deney sonuçları ile kaplamasız nitrürsüz GGG55 numune ile yapılan (K17) deney sonuçları karşılaştırıldığında, altlık malzemesinin aşınma üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. GGG55 altlık malzemesinin hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 5 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

Ayrıca yapılan Anova varyans analizine göre de altlık faktörünün deney sonuçları üzerinde önemli bir etkisinin bulunduğu gözlemlenmiştir.

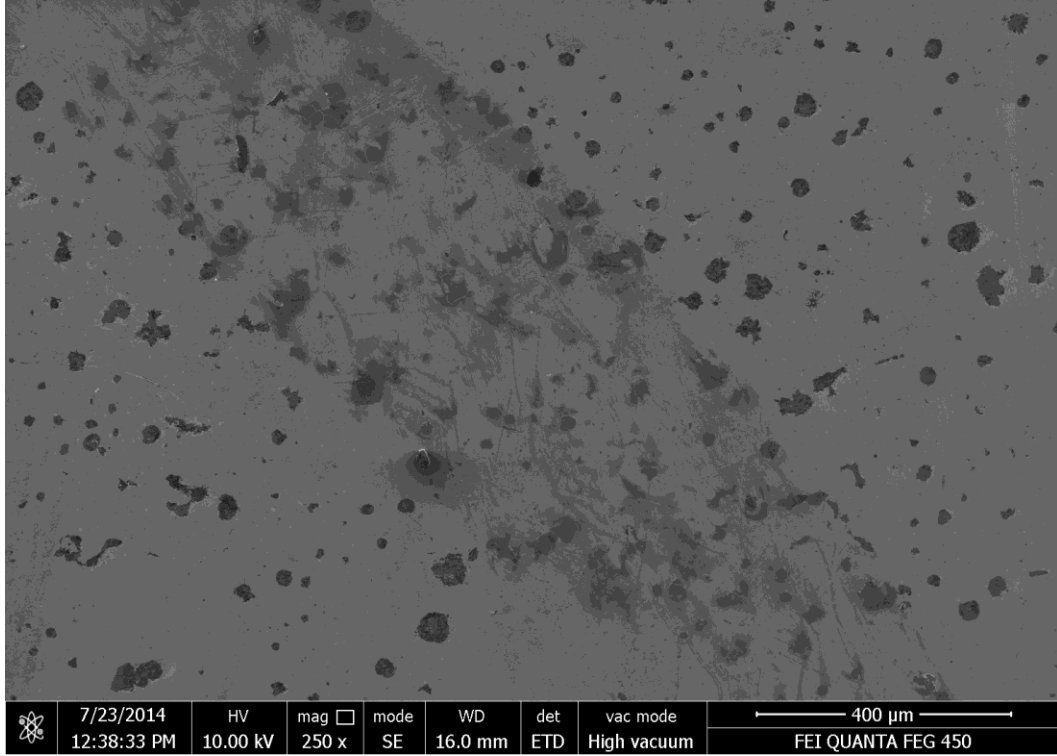
Tablo 16 incelendiğinde görüleceği üzere GGG55 numunelerin yüzey sertliğinin 7131 numunelere göre daha fazla oluşu, Şekil 79 incelendiğinde GGG55 numune yüzeyindeki grafit kürelerinin deney süresince yerlerinde stabil kalarak üç cisimli abrazyon aşınmayı desteklememiş olması, grafit yapının yüzey üzerinde düzgün dağılması, yapı itibarıyla sert ve dayanıklı olması sebepleriyle aşınmanın önünde önemli bir engel teşkil etmesi, GGG55 nitrürasyonsuz numunenin 7131 nitrürasyonsuz numuneden 5 kat daha az aşınmasının nedenleri olarak sıralanabilir.

Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 78’de verilmiştir. Şekil 78 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazyon aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir. Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.



Şekil 78: Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K17).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numuneye (K17'ye) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 79'da verilmiştir.



Şekil 79: Kaplamasız ve nitrürsüz GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K17).

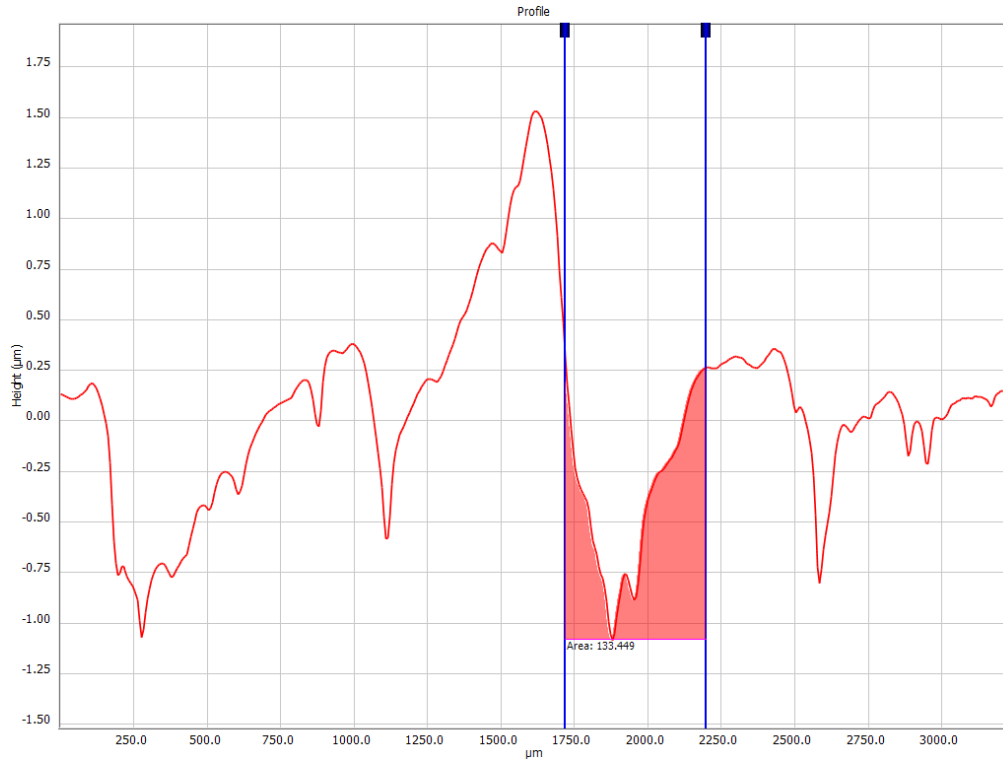
Şekil 79 incelendiğinde üç cisimli abrazif (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarının olduğu ancak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların yok denecek kadar az olduğu gözlenmektedir. Kabuk şeklinde kabarmış pulcuklar malzeme yüzeyinde gömülü bulunan sert grafit kürecikleri üzerinde oluşmuştur. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan partiküllerin de üç cisimli abrazif aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

Ayrıca malzeme yapısındaki grafit dağılımının homojen ve düzgün olduğu, grafit küreciklerinin stabil kalarak yuvalarından sökülmediği ve üç cisimli abrazif aşınmayı destekleyici yönde etki sağlamadığı gözlemlenmektedir.

Tablo 26: Kaplamasız nitrürlü GGG55 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük (N)	Mesafe (m)	Devir (dev./dak.)	Dönme Çapı (mm)	Aşınma Miktarı (mm ³)	Süre (dak.)	Çevresel Hız (m/sn)
K20	GGG55 Nitrürlü Kaplamasız	Kuru	16	1000	150	23	0,0075763	90	0,18

Tablo 26'da yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, kaplamasız nitrürlü GGG55 numunesinde 0,0075763 mm³ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 80'de verilmiştir.



Şekil 80: Kaplamasız nitrürlü GGG55 numuneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili (K20).

Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numuneyle yapılan (K17) deney sonuçları ile kaplamasız nitrürlü GGG55 numuneyle yapılan (K20) deney sonuçları karşılaştırıldığında, nitrürasyon yüzey işleminin K20 numune yüzey sertliğini arttırdığı ve buna bağlı olarak toplam hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 7 kat azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Ayrıca Tablo 25 ve Tablo 26 incelendiğinde toplam kayma mesafesi ve kayma hızının sabit kalması, bunun sonucu olarak artan iz çapına karşılık azalan devir sayısı ile aşındırıcı topun aynı noktadan geçiş sayısının azalması toplam hacimsel kütle kaybı değerindeki azalmada etkili olmuştur.

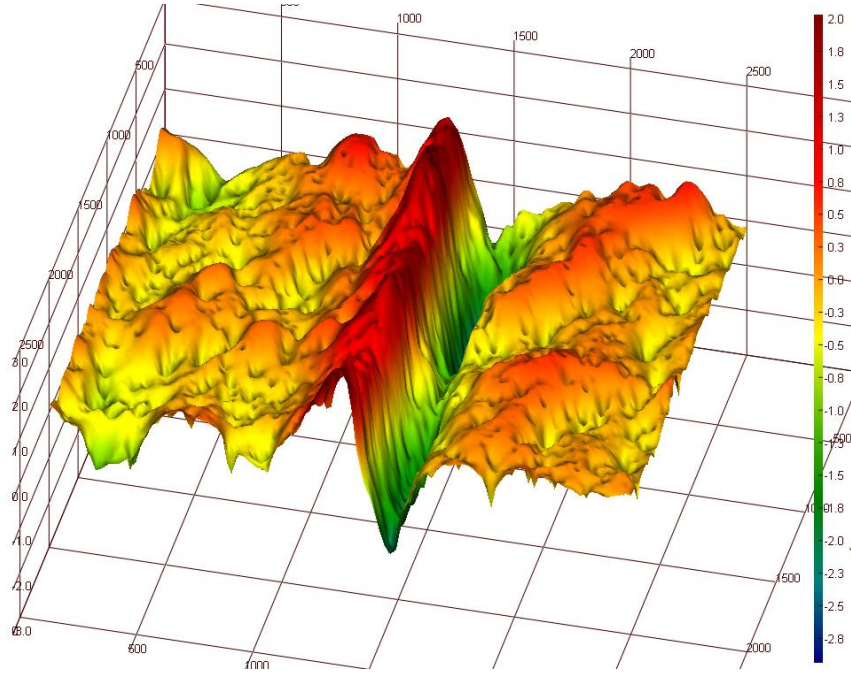
Anova varyans analizine göre deneylerde kullanılan yük aralığındaki yük değişiminin deney sonuçları üzerinde önemli bir etkisinin bulunmadığı değerlendirilmektedir.

Kaplamasız nitrürlü 7131 numuneyle yapılan (K3) deney sonuçları ile kaplamasız nitrürlü GGG55 numuneyle yapılan (K20) deney sonuçları karşılaştırıldığında GGG55 altlık malzemesine sahip K20 numunenin daha az aşındığı görülmektedir.

Nitrürlü GGG55 numunelerin yüzey sertliğinin, nitrürlü 7131 numunelere göre daha fazla oluşu, Şekil 82 incelendiğinde nitrürlü GGG55 numune yüzeyindeki grafit kürelerinin deney süresince yerlerinde stabil kalarak üç cisimli abrasif aşınmayı desteklememiş olması, grafit yapının yüzey üzerinde düzgün dağılması, yapı itibarıyla sert ve dayanıklı olması sebepleriyle aşınmanın önünde önemli bir engel teşkil etmesi GGG55 nitrürlü numunenin 7131 nitrürlü numuneden 4 kat daha az aşınmasının nedenleri olarak sıralanabilir.

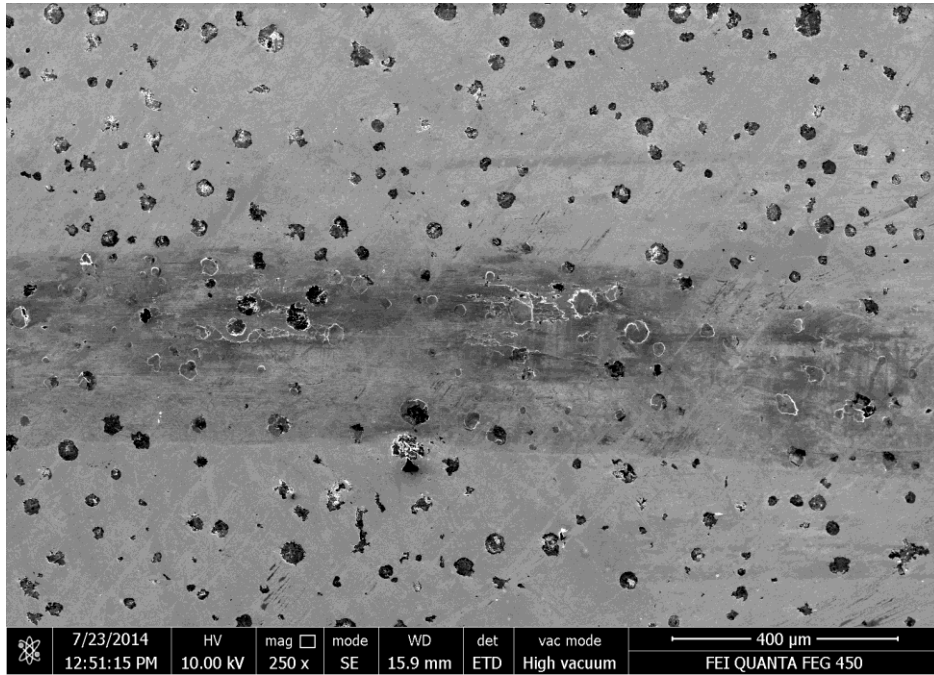
Kaplamasız nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 81’de verilmiştir. Şekil 81 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrasif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.



Şekil 81: Kaplamasız nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K20).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. Kaplamasız nitrürlü GGG55 numuneye (K20'ye) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 82'de verilmiştir.



Şekil 82: Kaplamasız nitrürlü GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K20).

Şekil 82 incelendiğinde üç cisimli abrazif (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcuklar da gözlenmektedir. Kabuk şeklinde kabarmış pulcuklar çoğunlukla malzeme yüzeyinde gömülü bulunan sert grafit kürecikleri üzerinde oluşmuştur. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan partiküllerin de üç cisimli abrazif aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

Ayrıca malzeme yapısındaki grafit dağılımının düzgün olduğu, grafit küreciklerinin yuvalarından sökülmediği ve üç cisimli abrazif aşınmayı desteklemediği gözlemlenmektedir.

8.1.2. TiN Kaplamanın Aşınma Davranışı

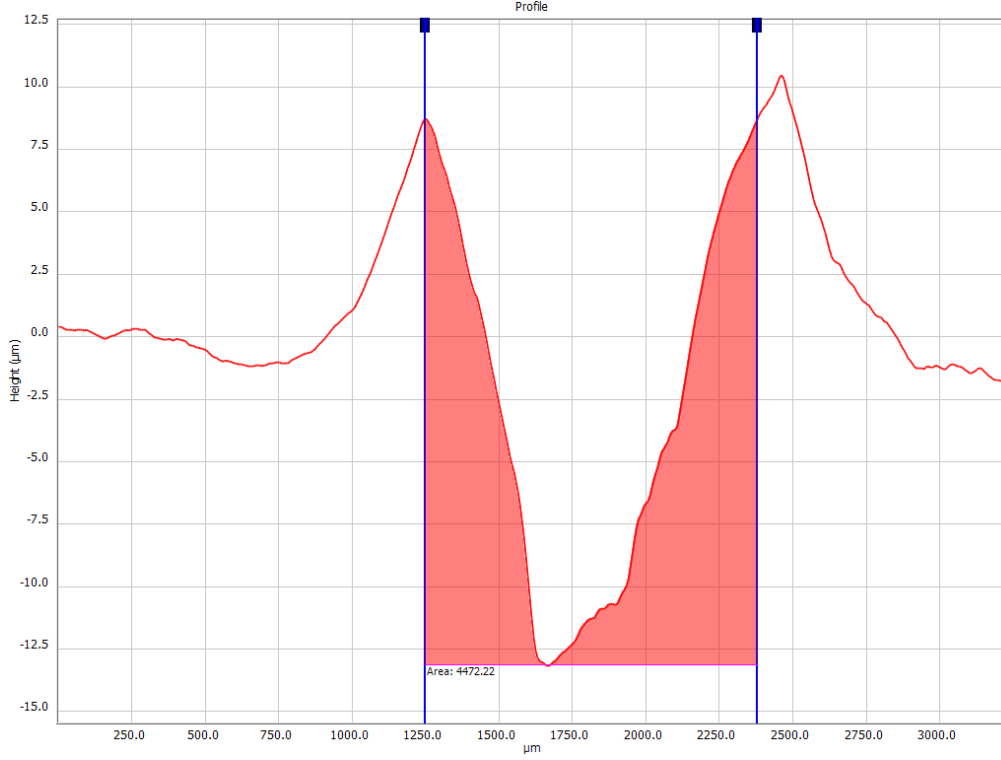
Şekil 62’de verilen TiN kaplanmış sicon wafer kesitine ait SEM mikrografi incelendiğinde ortalama kaplama kalınlığının 3µm olduğu görülmektedir. Nanoindentasyon yöntemi ile gerçekleştirilen sertlik ölçümlerine ilişkin olarak Tablo 19'daki ölçüm sonuçları incelendiğinde TiN kaplama sertliğinin yaklaşık 23 Gpa olduğu görülmektedir.

TiN kaplamalı nitrürsüz ve TiN kaplamalı nitrürlü 7131 altlık numuneler için yapılan deneylerin sonuçlarına göre elde edilen aşınma miktarlarının değerlendirilmesi karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Tablo 27: TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük	Mesafe	Devir	Dönme Çapı	Aşınma Miktarı	Süre	Çevresel Hız
			(N)	(m)	(dev. /dak.)	(mm)	(mm ³)	(dak.)	(m/sn)
K7	7131 Nitrürsüz TiN	Kuru	13	1000	200	17	0,109688	90	0,18

Tablo 27’de yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunesinde 0,109688 mm³ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 83’te verilmiştir.



Şekil 83: TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili (K7).

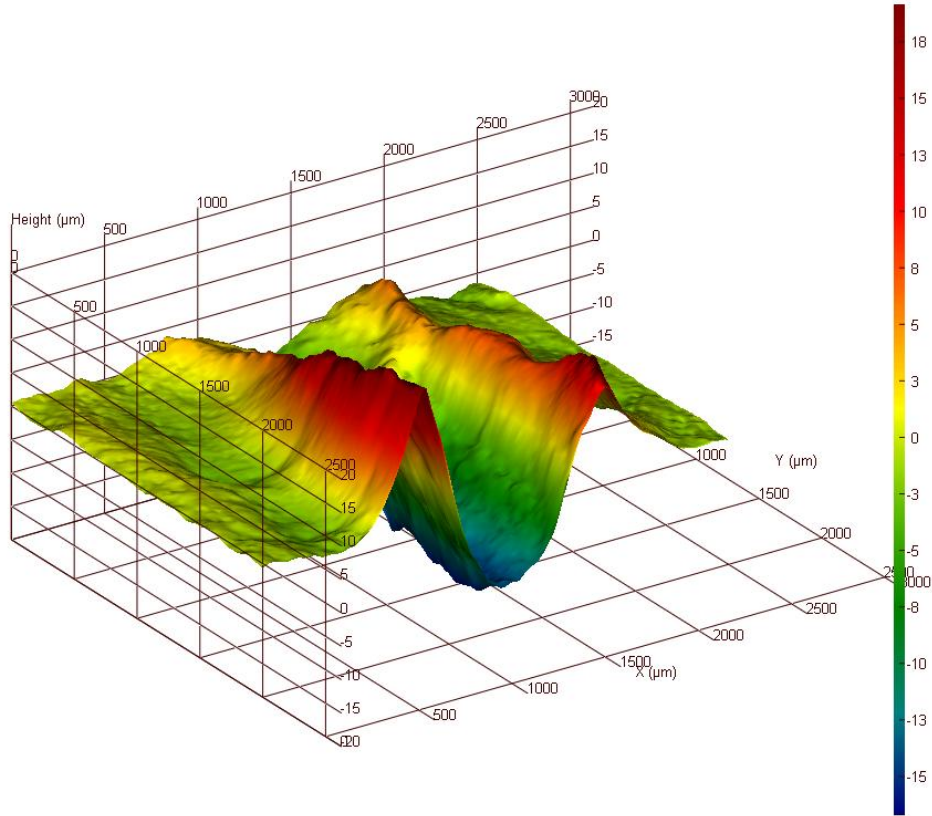
TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 84’te verilmiştir. Şekil 84 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazyon aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

Şekil 83 ve Şekil 84 incelendiğinde Tablo 27 de yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplamanın tamamen aşındığı, aşınmanın taban malzeme üzerinde devam ederek yaklaşık 13 µm derinliğinde bir aşınma izinin oluştuğu görülmektedir.

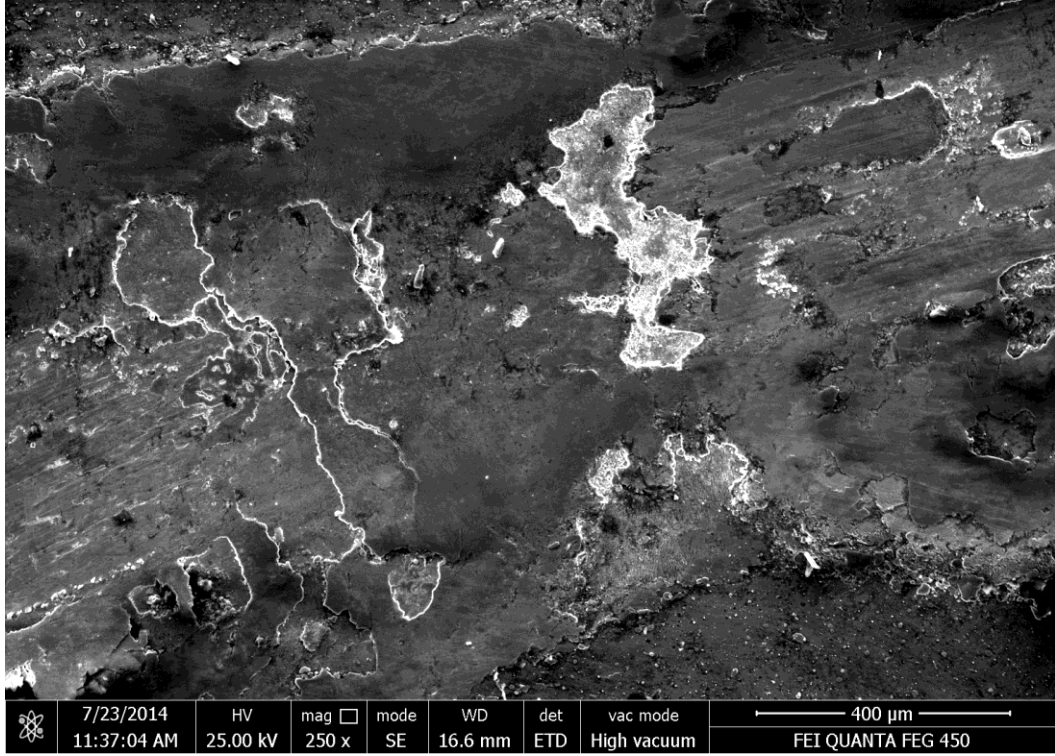
Şekil 71 ile Şekil 83 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürsüz 7131 numune (K2)' ye göre % 66 azalma meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın yaklaşık 10 μm seviyelerine kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K2) deney sonuçları ile TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numune ile yapılan (K7) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiN kaplamanın hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,4 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 84: TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K7).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye (K7'ye) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 85'te verilmiştir.



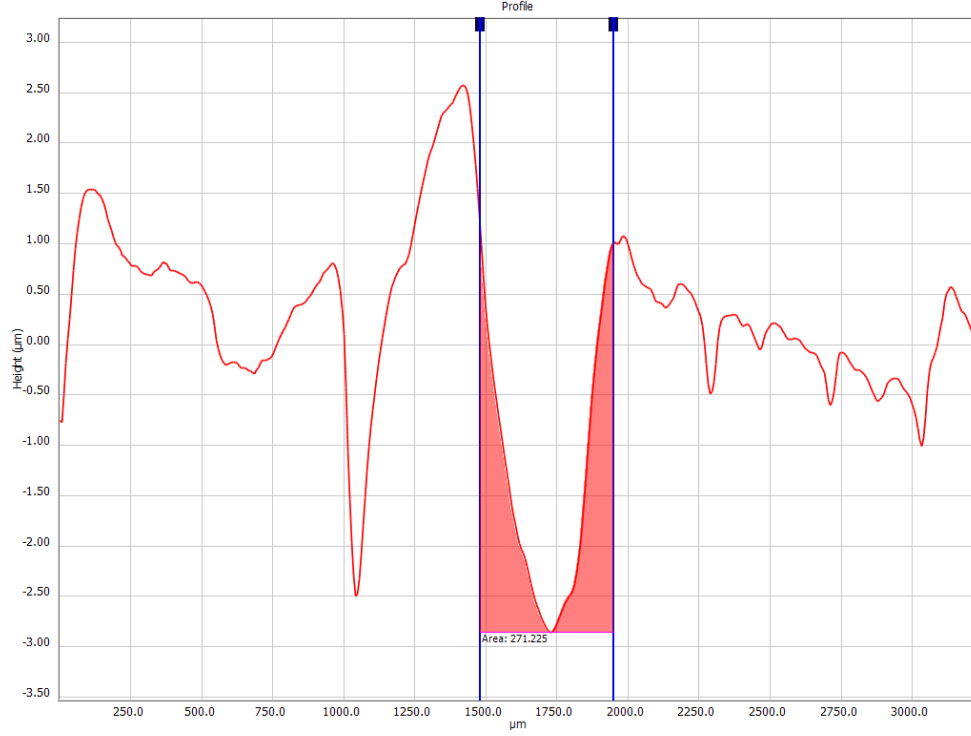
Şekil 85: TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K7).

Şekil 85 incelendiğinde TiN kaplamanın tamamen aşındığı, aşınmanın taban malzeme üzerinde devam ettiği, üç cisimli abrazif (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların olduğu gözlenmektedir. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan partiküllerin de üç cisimli abrazif aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir. Şekil 73 ve Şekil 85 incelendiğinde K2 ve K7 deney numunelerinde, taban malzeme üzerinde meydana gelen pulcuk oluşumunun benzerlik gösterdiği görülmektedir.

Tablo 28: TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük	Mesafe (m)	Devir (dev. /dak.)	Dönme Çapı (mm)	Aşınma Miktarı (mm ³)	Süre (dak.)	Çevresel Hız (m/sn)
			(N)						
K6	7131 Nitrürlü TiN	Kuru	10	1000	150	23	0,017319	90	0,18

Tablo 28'de yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numunesinde $0,017319 \text{ mm}^3$ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 86'da verilmiştir.



Şekil 86: TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili (K6).

TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 87'de verilmiştir. Şekil 87 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

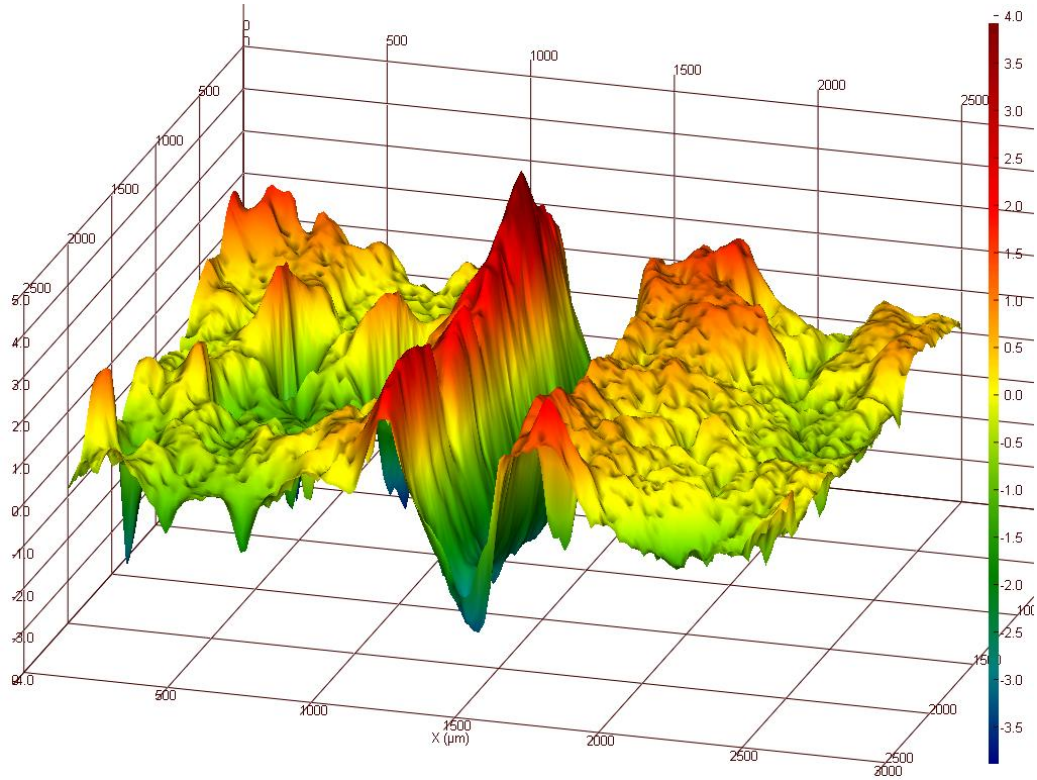
Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

Şekil 86 ve Şekil 87 incelendiğinde Tablo 28'de yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplama tabakasının tamamen aşınmadığı, yaklaşık $2,8 \text{ µm}$ derinliğinde bir aşınma izinin oluştuğu görülmektedir.

Şekil 74, Şekil 83 ve Şekil 86 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürlü 7131 numune (K3)' ye göre % 62 , TiN kaplamalı nitrürsüz numune (K7)'ye göre ise %300 azalma meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın yaklaşık 2,5 μm seviyelerine kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

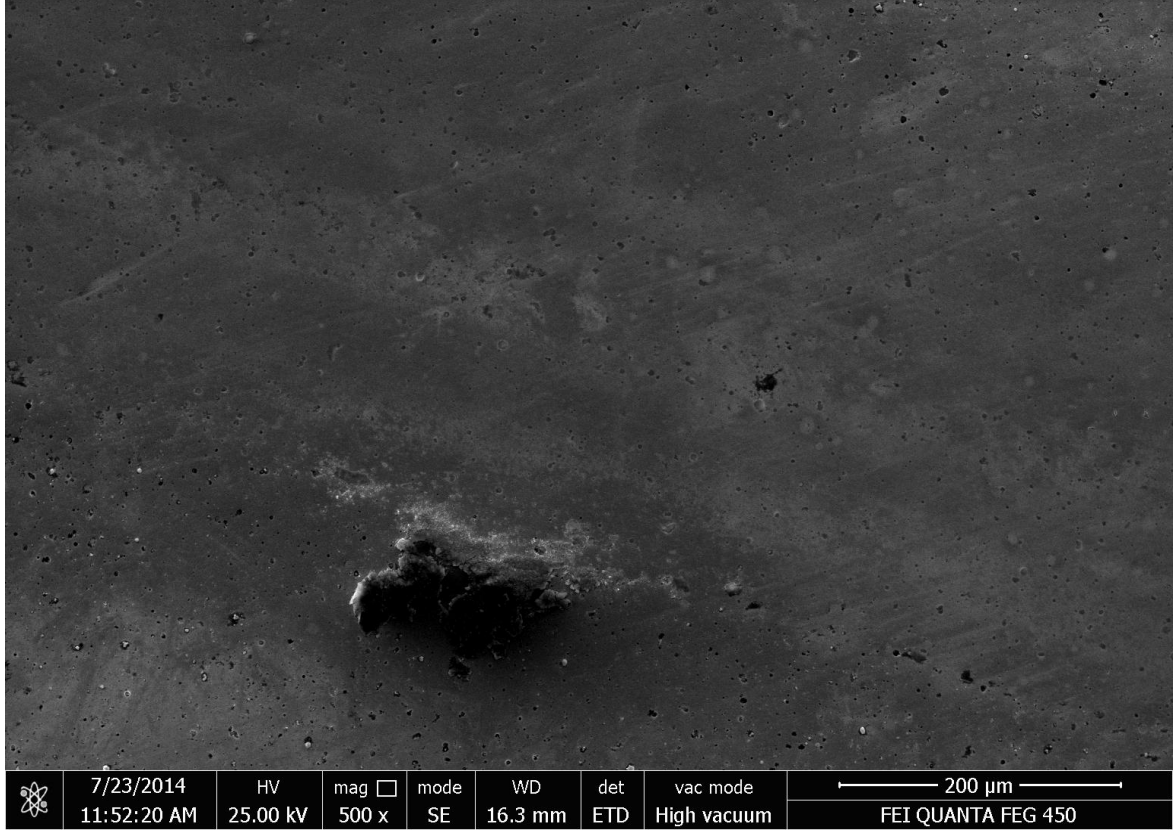
Kaplamasız nitrürlü 7131 numuneyle yapılan (K3) deney sonuçları ile TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numune ile yapılan (K6) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiN kaplamanın, hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,8 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K7) deney sonuçları ile TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numune ile yapılan (K6) deney sonuçları karşılaştırıldığında nitrürasyon yüzey işleminin, hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 6 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 87: TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K6).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye (K6'ya) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 88'de verilmiştir.



Şekil 88: TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K6).

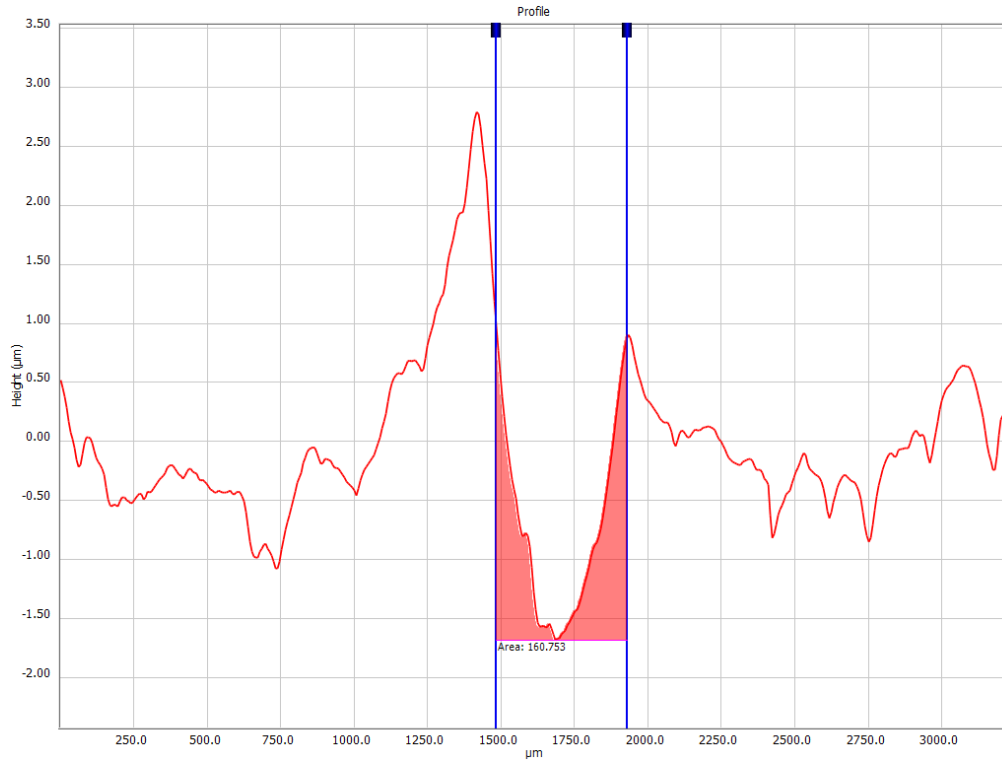
Şekil 88 incelendiğinde TiN kaplamanın tamamen aşınmadığı, üç cisimli abrazyon (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların az miktarda olduğu gözlenmektedir. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan sert kaplama partiküllerinin de üç cisimli abrazyon aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

TiN kaplamalı nitrürsüz ve TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 altlık numuneler için yapılan deneylerin sonuçlarına göre elde edilen aşınma miktarlarının değerlendirilmesi karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Tablo 29: TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük	Mesafe	Devir	Dönme Çapı	Aşınma Miktarı	Süre	Çevresel Hız
			(N)	(m)	(dev. /dak.)	(mm)	(mm ³)	(dak.)	(m/sn)
K24	GGG55 Nitrürsüz TiN	Kuru	10	1500	150	23	0,0162763	135	0,18

Tablo 29'da yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunesinde 0,0162763 mm³ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 89'da verilmiştir.



Şekil 89: TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili (K24).

TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 90'da verilmiştir. Şekil 90 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

Şekil 89 ve Şekil 90 incelendiğinde Tablo 29'da yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplama tabakasının tamamen aşınmadığı, yaklaşık 1,65 µm derinliğinde bir aşınma izinin olduğu görülmektedir.

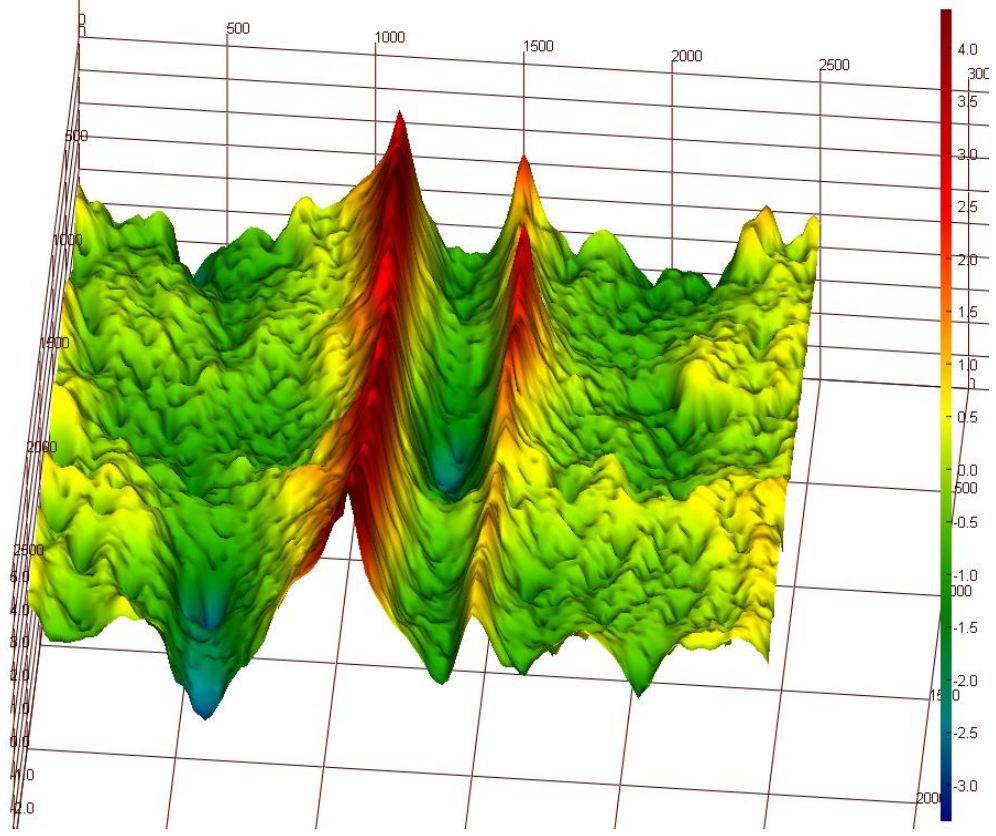
Şekil 77, Şekil 83 ve Şekil 89 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürsüz GGG55 numune (K17)' ye göre % 69, TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numune (K7)'ye göre ise % 74 azalma meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın yaklaşık 1,5 µm seviyelerine kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numuneyle yapılan (K17) deney sonuçları ile TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune ile yapılan (K24) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiN kaplamanın hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 3 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K7) deney sonuçları ile TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune ile yapılan (K24) deney sonuçları karşılaştırıldığında altlık malzemesinin aşınma üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. GGG55 altlık malzemesinin 7131 altlık malzemesine göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 7 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

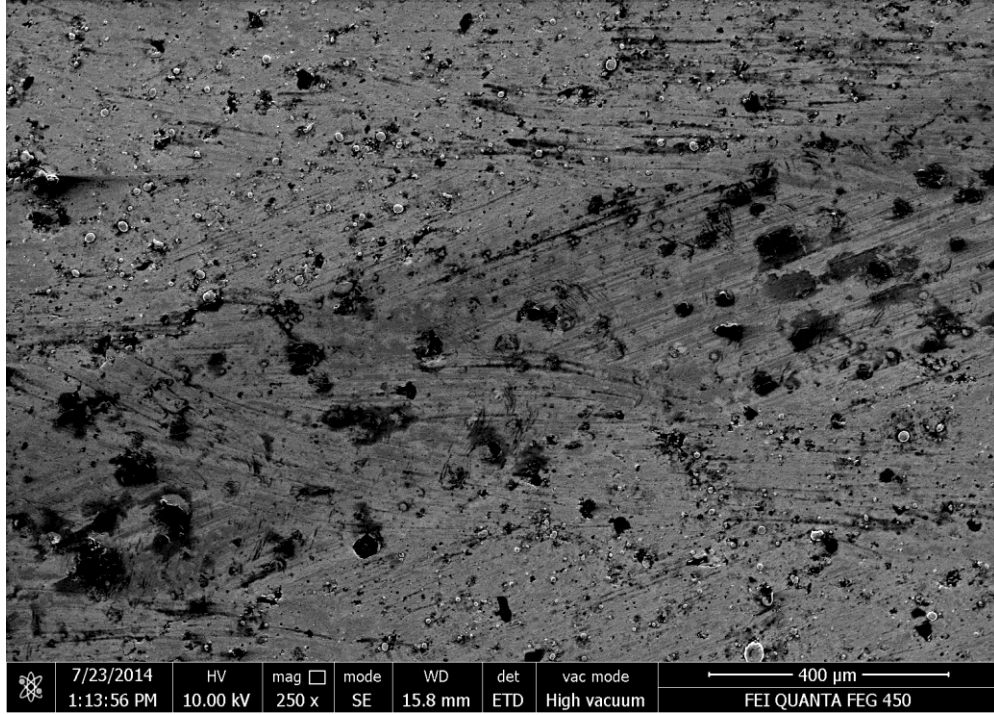
Ayrıca yapılan Anova varyans analizine göre de altlık faktörünün deney sonuçları üzerinde önemli bir etkisinin bulunduğu gözlemlenmiştir. Tablo 16 incelendiğinde görüleceği üzere GGG55 numunelerin yüzey sertliğinin 7131 numunelere göre daha fazla oluşu, Şekil 91 incelendiğinde GGG55 numune yüzeyindeki grafit kürelerinin deney süresince yerlerinde stabil kalarak üç cisimli abrazif aşınmayı desteklememiş olması, grafit yapının yüzey üzerinde düzgün dağılması, yapı itibarıyla sert ve dayanıklı olması sebepleriyle aşınmanın

önünde önemli bir engel teşkil etmesi, TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunenin TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneden 7 kat daha az aşınmasının nedenleri olarak sıralanabilir.



Şekil 90: TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K24).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye (K24'e) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 91'de verilmiştir.



Şekil 91: TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K24).

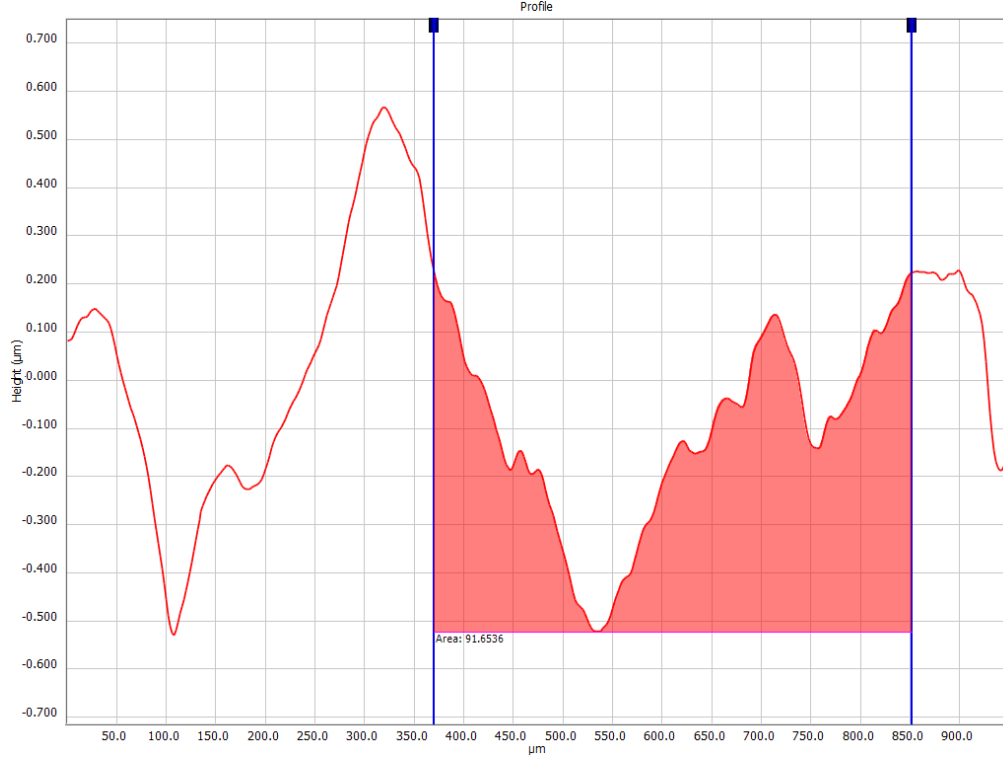
Şekil 91 incelendiğinde üç cisimli abrazif (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların olduğu gözlenmektedir. Kabuk şeklinde kabarmış pulcuklar çoğunlukla malzeme yüzeyinde gömülü bulunan sert grafit kürecikleri üzerinde oluşmuştur. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan sert kaplama partiküllerinin de üç cisimli abrazif aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

Ayrıca malzeme yapısındaki grafit dağılımının homojen ve düzgün olduğu, grafit küreciklerinin stabil kalarak yuvalarından sökülmediği ve üç cisimli abraziv aşınmayı destekleyici yönde etki sağlamadığı gözlemlenmektedir.

Tablo 30: TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük	Mesafe	Devir	Dönme Çapı	Aşınma Miktarı	Süre	Çevresel Hız
			(N)	(m)	(dev./dak.)	(mm)	(mm ³)	(dak.)	(m/sn)
K22	GGG55 Nitrürlü TiN	Kuru	16	1500	150	23	0,0017527	135	0,18

Tablo 30'da yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunesinde $0,0017527 \text{ mm}^3$ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 92'de verilmiştir.



Şekil 92: TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili (K22).

TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 93'te verilmiştir. Şekil 93 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

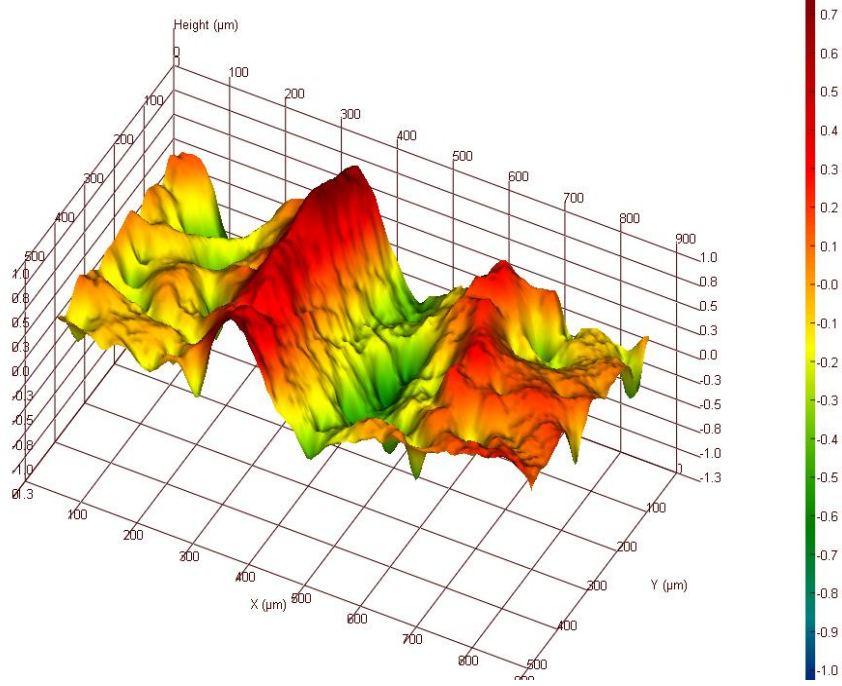
Şekil 92 ve Şekil 93 incelendiğinde Tablo 30'da yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplama tabakasının tamamen aşınmadığı, yaklaşık $0,52 \text{ µm}$ derinliğinde bir aşınma izinin oluştuğu görülmektedir.

Şekil 80, Şekil 89 ve Şekil 92 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürlü GGG55 numune (K20)' ye göre % 63, TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune (K24)'ye göre ise % 80 azalma meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın yaklaşık 0,5µm seviyelerine kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

Kaplamasız nitrürlü GGG55 numuneyle yapılan (K20) deney sonuçları ile TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune ile yapılan (K22) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiN kaplamanın hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 4 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

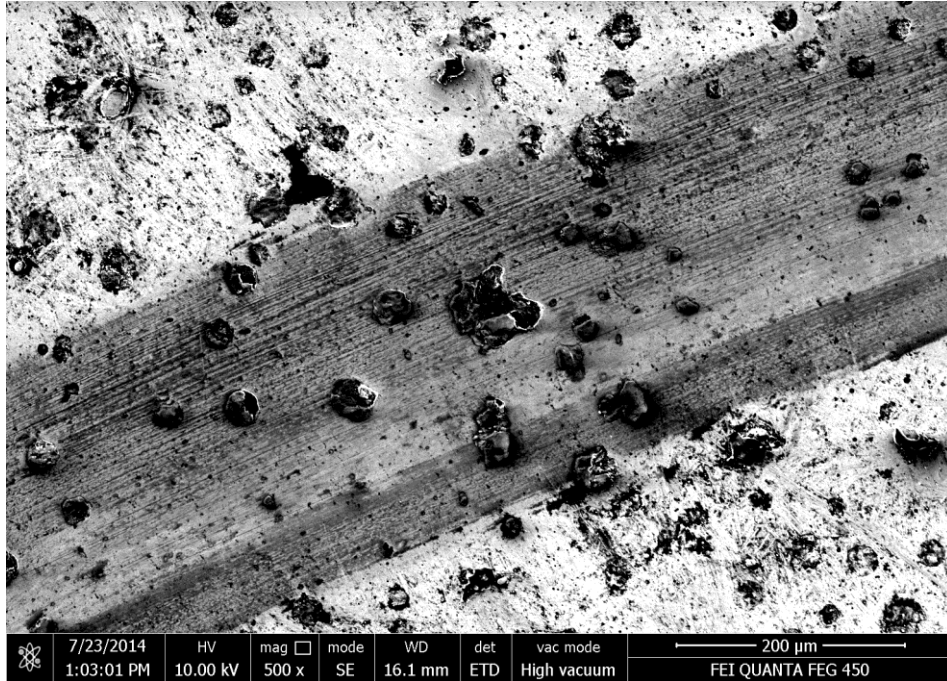
TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneyle yapılan (K6) deney sonuçları ile TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune ile yapılan (K22) deney sonuçları karşılaştırıldığında GGG55 altlık malzemesinin 7131 altlık malzemesine göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 10 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 16 incelendiğinde, GGG55 numunelerin 7131 numunelere göre daha fazla yüzey sertliğine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 94 incelendiğinde GGG55 numune yüzeyindeki grafit kürelerinin deney süresince yuvalarında stabil kalarak üç cisimli abrazif aşınmayı desteklemediği, grafit yapının yüzey üzerinde düzgün dağıldığı, sert ve dayanıklı yapıları itibarıyla grafit kürelerinin aşınmanın önünde önemli bir engel teşkil ettiği gözlemlenmiştir.



Şekil 93: TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K22).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye (K22'ye) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 94'te verilmiştir.



Şekil 94: TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K22).

Şekil 94 incelendiğinde üç cisimli abrazyon (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların olduğu gözlenmektedir. Kabuk şeklinde kabarmış pulcuklar çoğunlukla malzeme yüzeyinde gömülü bulunan sert grafit kürecikleri üzerinde oluşmuştur. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan sert kaplama partiküllerinin de üç cisimli abrazyon aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

Bunun yanısıra malzeme yapısındaki grafit dağılımının homojen ve düzgün olduğu, grafit küreciklerinin stabil kalarak yuvalarından sökülmediği ve üç cisimli abrazyon aşınmayı destekleyici yönde etki sağlamadığı gözlemlenmektedir.

8.1.3. CrN Kaplamanın Aşınma Davranışı

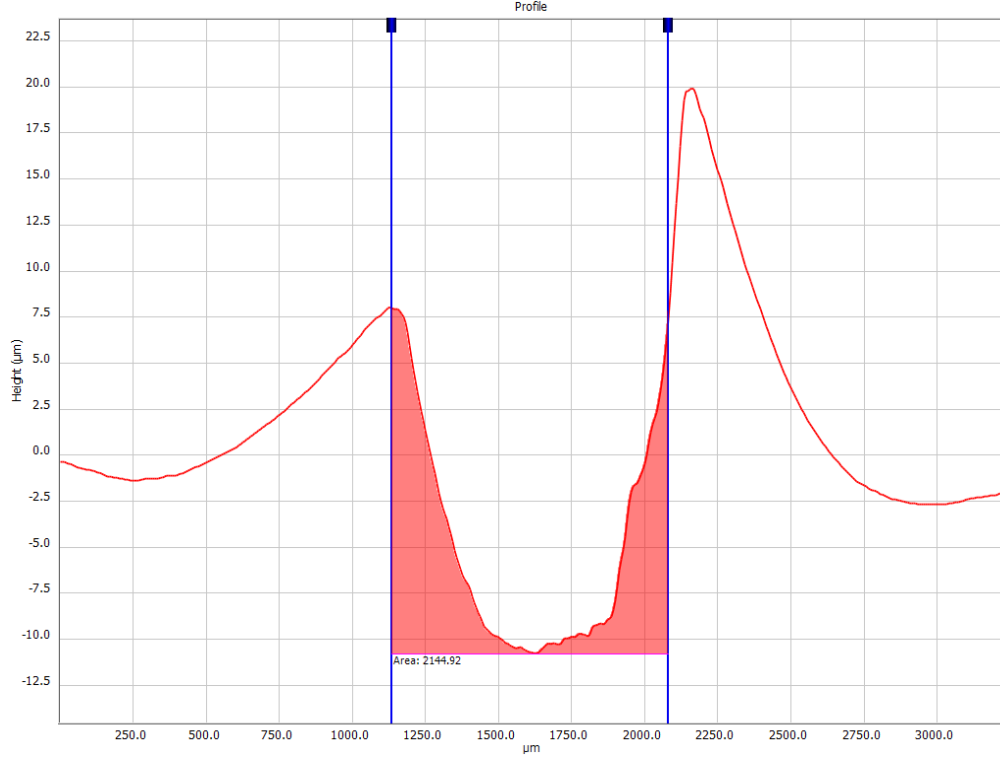
Şekil 63'te verilen CrN kaplanmış siliyon wafer kesitine ait SEM mikrografi incelendiğinde ortalama kaplama kalınlığının 3 µm olduğu görülmektedir. Nanoindentasyon yöntemi ile gerçekleştirilen sertlik ölçümlerine ilişkin olarak Tablo 19'daki ölçüm sonuçları incelendiğinde CrN kaplama sertliğinin yaklaşık 18 Gpa olduğu görülmektedir.

CrN kaplamalı nitrürsüz ve CrN kaplamalı nitrürlü 7131 altlık numuneler için yapılan deneylerin sonuçlarına göre elde edilen aşınma miktarlarının değerlendirilmesi karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Tablo 31: CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük (N)	Mesafe (m)	Devir (dev./dak.)	Dönme Çapı (mm)	Aşınma Miktarı (mm ³)	Süre (dak.)	Çevresel Hız (m/sn)
K11	7131 Nitrürsüz CrN	Kuru	7	1000	200	17	0,106482	90	0,18

Tablo 31'de yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunesinde 0,106482 mm³ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 95'te verilmiştir.



Şekil 95: CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izi profili (K11)

CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 96'da verilmiştir. Şekil 96 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

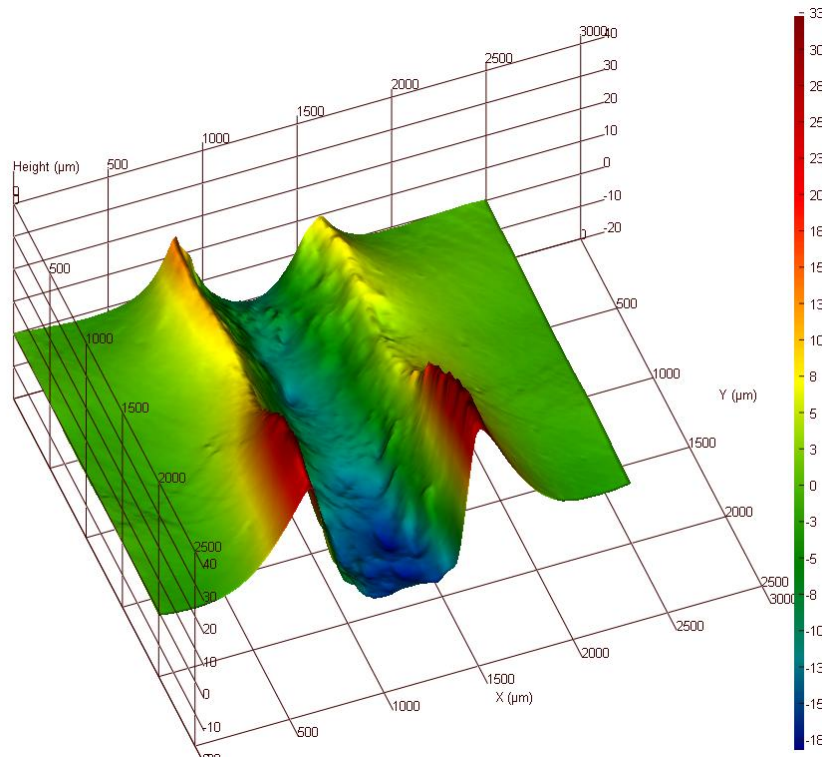
Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

Şekil 95 ve Şekil 96 incelendiğinde Tablo 31'de yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplamanın tamamen aşındığı, aşınmanın taban malzeme üzerinde devam ederek yaklaşık 11 µm derinliğinde bir aşınma izinin oluştuğu görülmektedir. Şekil 71, Şekil 83 ve Şekil 95 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürsüz 7131 numune (K2)'ye göre %20, TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numune (K7)'ye göre % 45 artış meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın yaklaşık 10 µm seviyelerine kadar devam ettiği, bu

seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

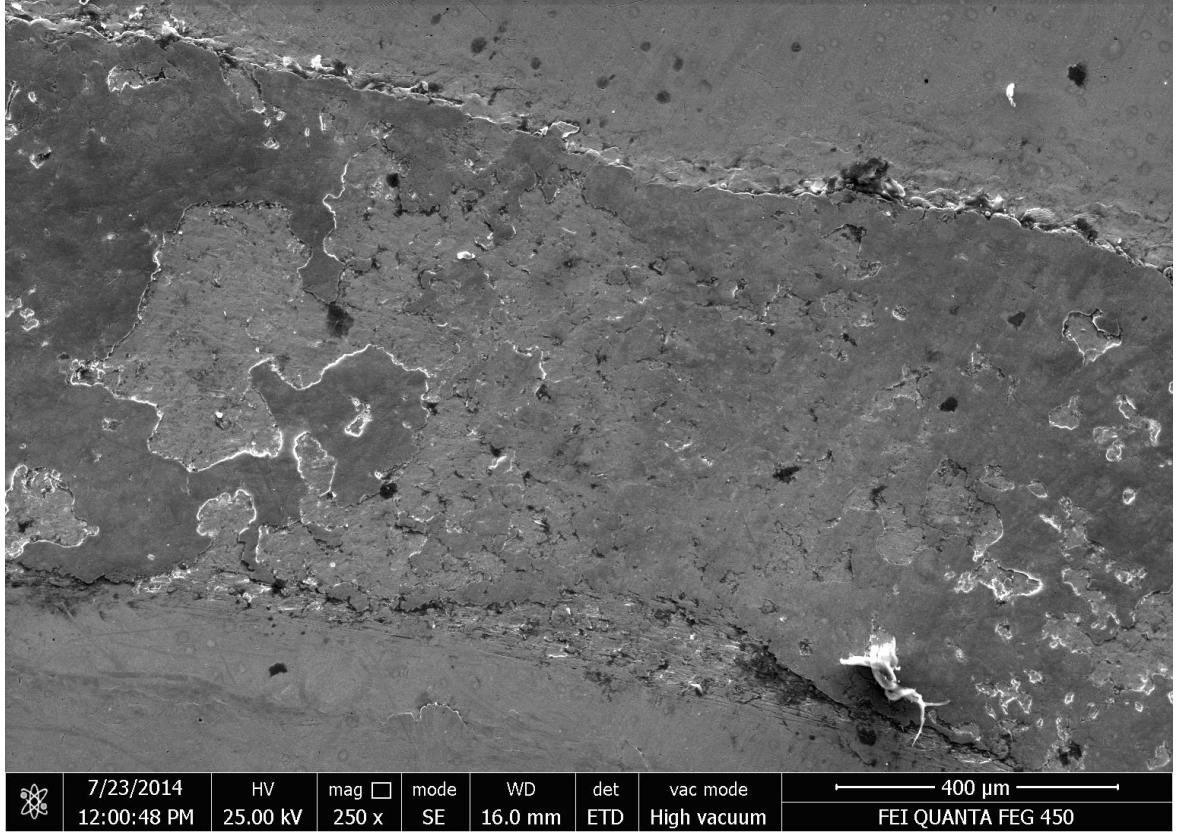
Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K2) deney sonuçları ile CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numune ile yapılan (K11) deney sonuçları karşılaştırıldığında CrN kaplamanın hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,5 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K7) deney sonuçları ile CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numune ile yapılan (K11) deney sonuçları karşılaştırıldığında CrN kaplamanın TiN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,03 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 96: CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneyle ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K11).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneyle (K11'e) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 97'de verilmiştir.



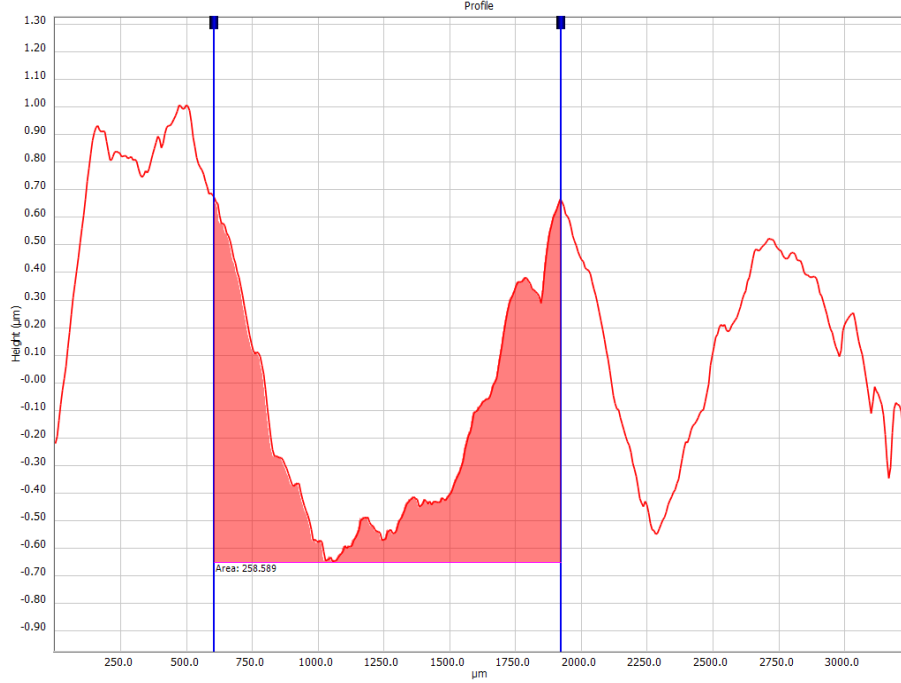
Şekil 97: CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K11).

Şekil 97 incelendiğinde CrN kaplamanın tamamen aşındığı, aşınmanın taban malzeme üzerinde devam ettiği, üç cisimli abrazyon (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların olduğu gözlenmektedir. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan partiküllerin de üç cisimli abrazyon aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir. Şekil 70, Şekil 73 ve Şekil 97 incelendiğinde K1, K2 ve K11 deney numunelerinde, taban malzeme üzerinde meydana gelen pulcuk oluşumunun benzerlik gösterdiği görülmektedir.

Tablo 32: CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük (N)	Mesafe (m)	Devir (dev./dak.)	Dönme Çapı (mm)	Aşınma Miktarı (mm ³)	Süre (dak)	Çevresel Hız (m/sn)
K9	7131 Nitrürlü CrN	Kuru	13	1000	200	17	0,003921	90	0,18

Tablo 32'de yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numunesinde $0,003921 \text{ mm}^3$ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 98'de verilmiştir.



Şekil 98: CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izi profili (K9).

CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 99'da verilmiştir. Şekil 99 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

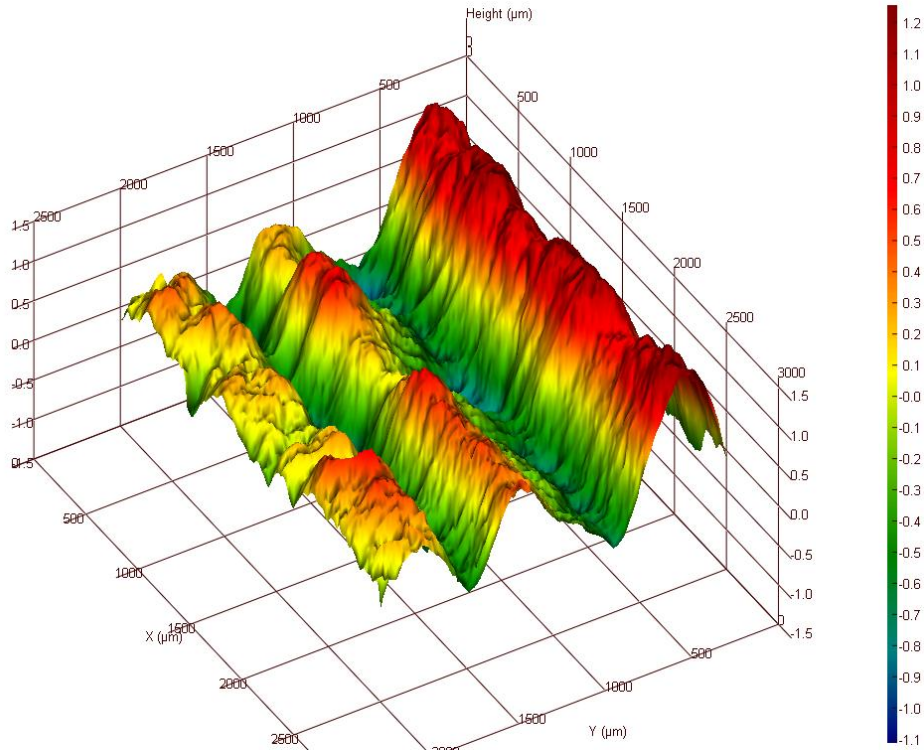
Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

Şekil 98 ve Şekil 99 incelendiğinde Tablo 32'de yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplama tabakasının tamamen aşınmadığı, yaklaşık $0,65 \text{ µm}$ derinliğinde bir aşınma izinin oluştuğu görülmektedir.

Şekil 74, Şekil 86 ve Şekil 98 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürlü 7131 numune (K3)' ye göre % 75, TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numune (K6)'ye göre % 60 azalma meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın yaklaşık 0,6 μm seviyelerine kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

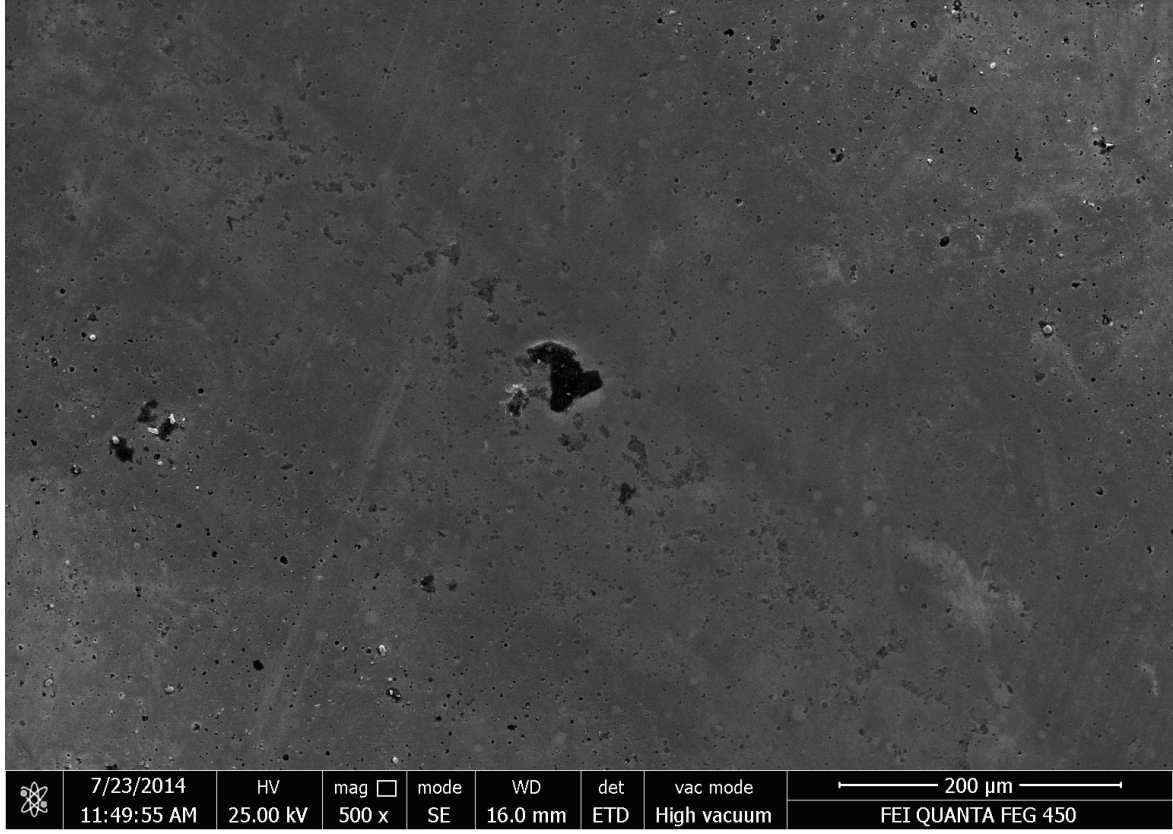
Kaplamasız nitrürlü 7131 numuneyle yapılan (K3) deney sonuçları ile CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numune ile yapılan (K9) deney sonuçları karşılaştırıldığında CrN kaplamanın hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 8 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneyle yapılan (K6) deney sonuçları ile CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numune ile yapılan (K9) deney sonuçları karşılaştırıldığında CrN kaplamanın TiN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 4,4 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 99: CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K9).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye (K9'a) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 100'de verilmiştir.



Şekil 100: CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K9)

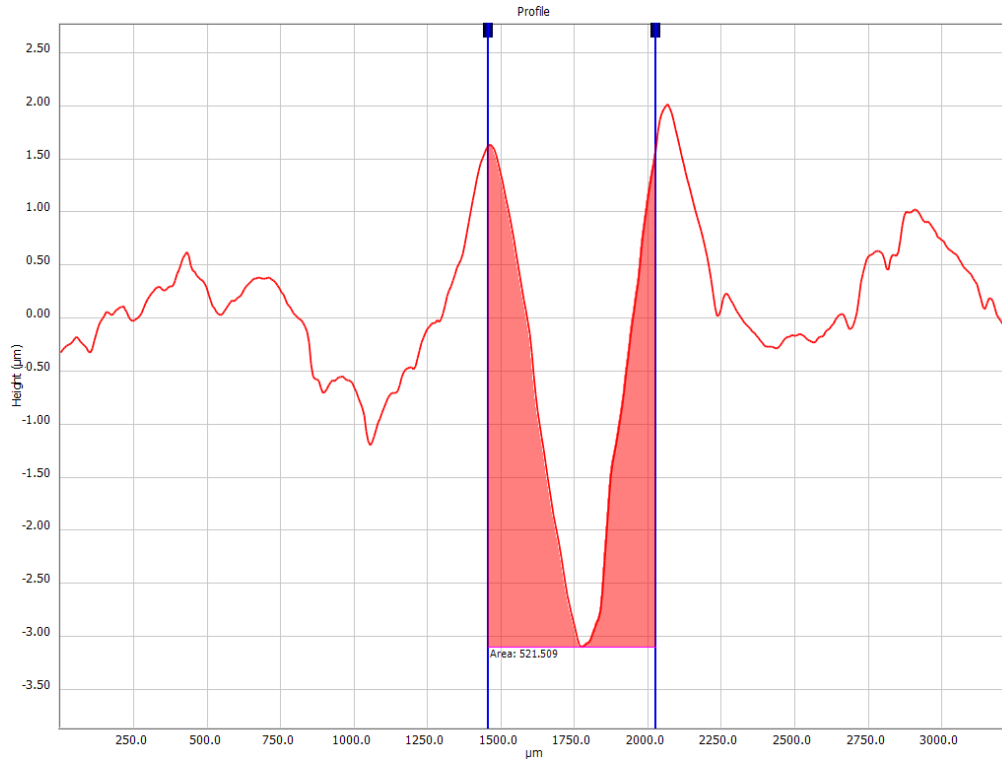
Şekil 100 incelendiğinde CrN kaplamanın tamamen aşınmadığı, üç cisimli abrazyon (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların olduğu gözlenmektedir. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan sert kaplama partiküllerinin de üç cisimli abrazyon aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

CrN kaplamalı nitrürsüz ve CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 altlık numuneler için yapılan deneylerin sonuçlarına göre elde edilen aşınma miktarlarının değerlendirilmesi karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Tablo 33: CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük	Mesafe	Devir	Dönme Çapı	Aşınma Miktarı	Süre	Çevresel Hız
			(N)	(m)	(dev./dak.)	(mm)	(mm ³)	(dak.)	(m/sn)
K27	GGG55 Nitrürsüz CrN	Kuru	13	1500	200	17	0,0129594	135	0,18

Tablo 33'te yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunesinde 0,0129594 mm³ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 101'de verilmiştir.



Şekil 101: CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izi profili (K27)

CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 102'de verilmiştir. Şekil 102 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

Şekil 101 ve Şekil 102 incelendiğinde Tablo 33'te yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplama tabakasının tamamen aşındığı, aşınmanın taban malzeme üzerinde devam ederek yaklaşık 3,1 µm derinliğinde bir aşınma izinin oluştuğu görülmektedir.

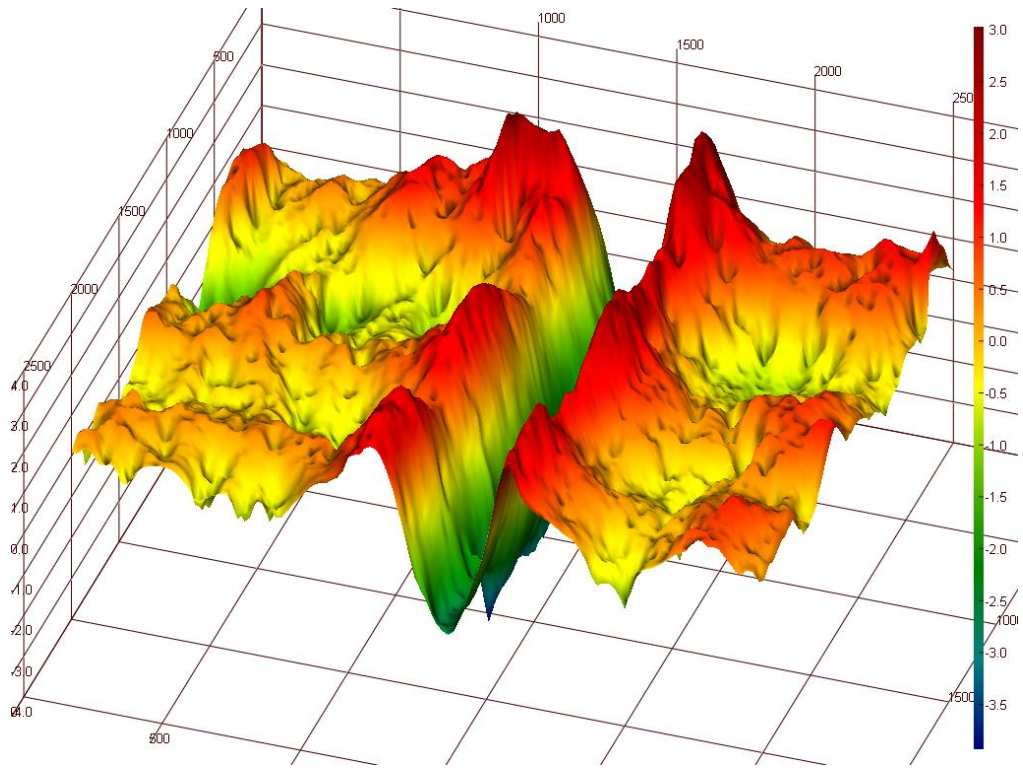
Şekil 77, Şekil 89 ve Şekil 101 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürsüz GGG55 numune (K17)' ye göre %77, TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune (K24)'ye göre % 27 azalma meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın yaklaşık 2,8 µm seviyelerine kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numuneyle yapılan (K17) deney sonuçları ile CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune ile yapılan (K27) deney sonuçları karşılaştırıldığında CrN kaplamanın hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 4 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneyle yapılan (K24) deney sonuçları ile CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune ile yapılan (K27) deney sonuçları karşılaştırıldığında CrN kaplamanın TiN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,3 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

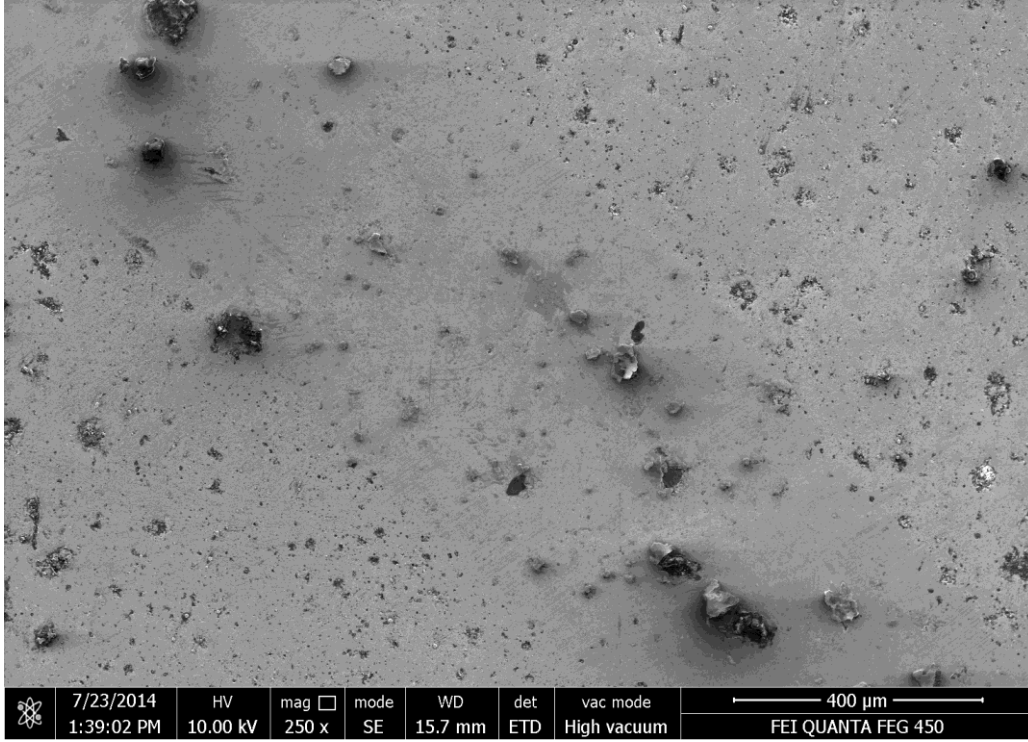
CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K11) deney sonuçları ile CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune ile yapılan (K27) deney sonuçları karşılaştırıldığında GGG55 taban malzemesinin 7131 taban malzemesine göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 8 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

Ayrıca yapılan Anova varyans analizine göre de altlık faktörünün deney sonuçları üzerinde önemli bir etkisinin bulunduğu gözlemlenmiştir. Tablo 16 incelendiğinde görüleceği üzere GGG55 numunelerin yüzey sertliğinin 7131 numunelere göre daha fazla oluşu, Şekil 103 incelendiğinde GGG55 numune yüzeyindeki grafit kürelerinin deney süresince yerlerinde stabil kalarak üç cisimli abrazif aşınmayı desteklememiş olması, grafit yapının yüzey üzerinde düzgün dağılması, yapı itibariyle sert ve dayanıklı olması sebepleriyle aşınmanın önünde önemli bir engel teşkil etmesi, CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunenin, CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneden 8 kat daha az aşınmasının nedenleri olarak sıralanabilir.



Şekil 102: CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K27).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye (K27'ye) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 103'te verilmiştir.



Şekil 103: CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K27)

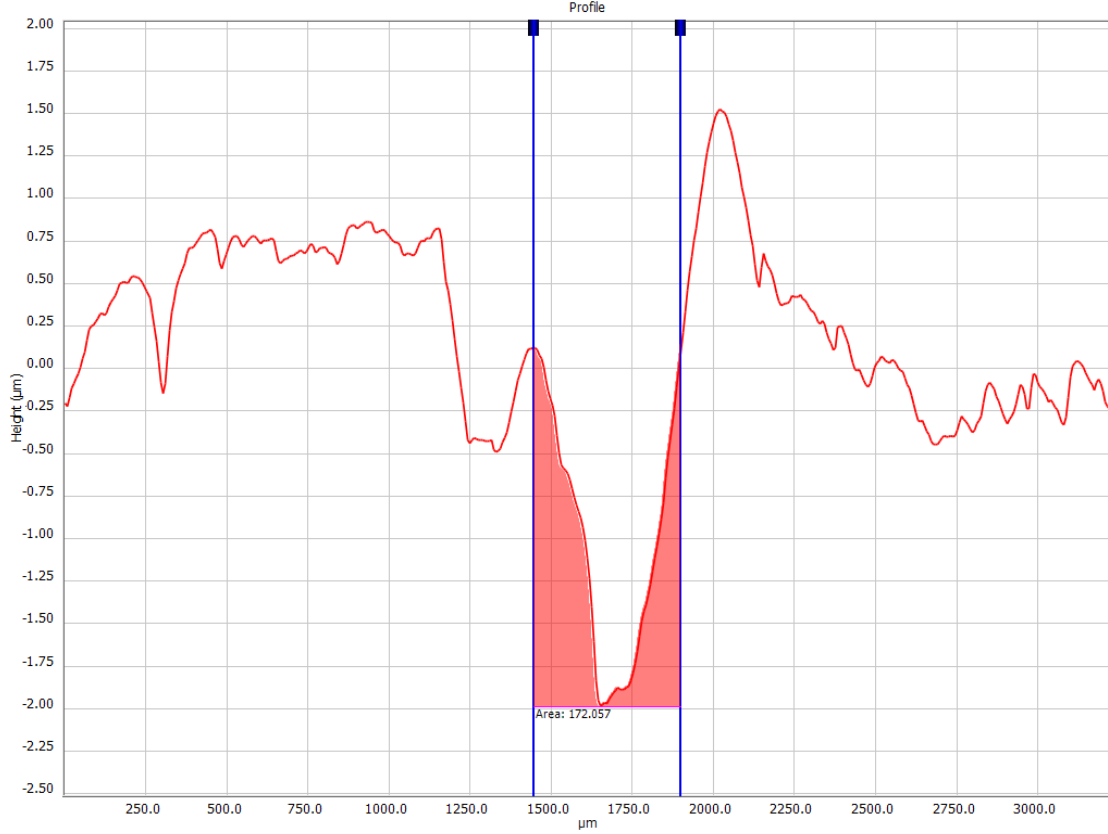
Şekil 103 incelendiğinde üç cisimli abrazif (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarının olduğu ancak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların yok denecek kadar az olduğu gözlenmektedir. Kabuk şeklinde kabarmış pulcuklar malzeme yüzeyinde gömülü bulunan sert grafit kürecikleri üzerinde oluşmuştur. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan partiküllerin de üç cisimli abrazif aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

Ayrıca malzeme yapısındaki grafit dağılımının homojen ve düzgün olduğu, grafit küreciklerinin stabil kalarak yuvalarından sökülmediği ve üç cisimli abrazif aşınmayı destekleyici yönde etki sağlamadığı gözlemlenmektedir.

Tablo 34: CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük (N)	Mesafe (m)	Devir (dev./dak.)	Dönme Çapı (mm)	Aşınma Miktarı (mm ³)	Süre (dak.)	Çevresel Hız (m/sn)
K25	GGG55 Nitrürlü CrN	Kuru	7	1500	200	17	0,0082769	135	0,18

Tablo 34'te yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunesinde $0,0082769 \text{ mm}^3$ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 104'te verilmiştir.



Şekil 104: CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izi profili (K25).

CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 105'te verilmiştir. Şekil 105 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

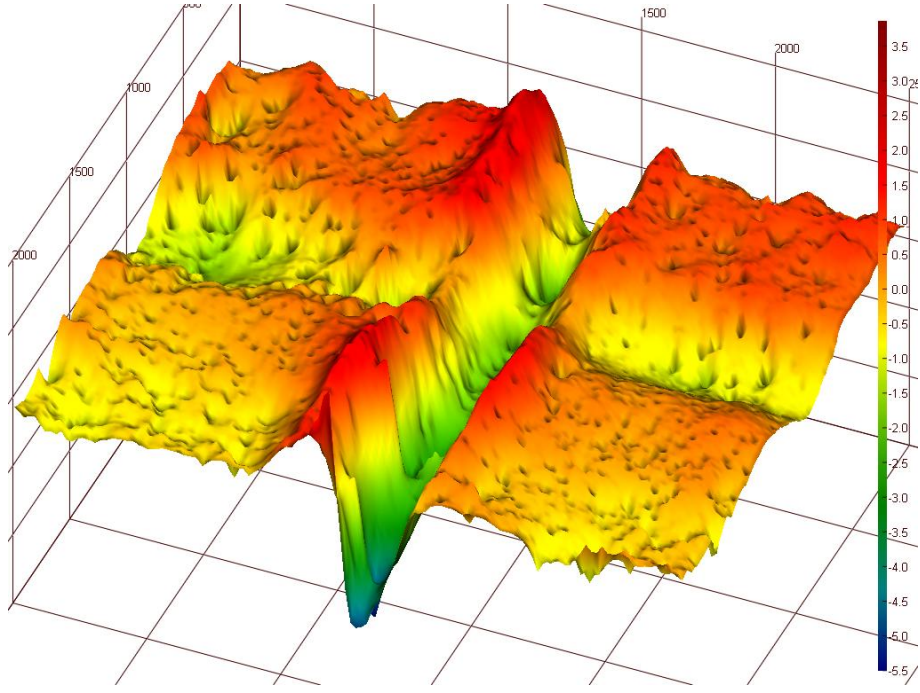
Şekil 104 ve Şekil 105 incelendiğinde Tablo 34'te yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplama tabakasının tamamen aşınmadığı, yaklaşık 2 µm derinliğinde bir aşınma izinin oluştuğu görülmektedir.

Şekil 80, Şekil 92 ve Şekil 104 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürlü GGG55 numune (K20)'ye göre % 2 azalma, TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune (K22)'ye göre % 168 artış meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın yaklaşık 1,90 µm seviyelerine kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

Kaplamasız nitrürlü GGG55 numuneyle yapılan (K20) deney sonuçları ile CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune ile yapılan (K25) deney sonuçları karşılaştırıldığında CrN kaplamanın hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,09 kat artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

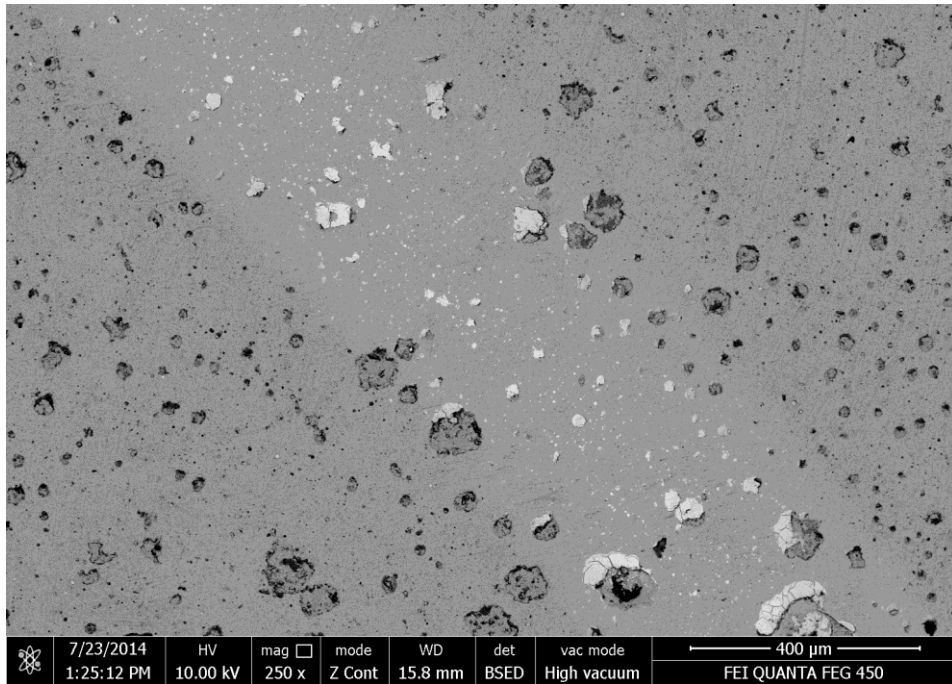
TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneyle yapılan (K22) deney sonuçları ile CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune ile yapılan (K25) deney sonuçları karşılaştırıldığında CrN kaplamanın TiN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 5 kat artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneyle yapılan (K9) deney sonuçları ile CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune ile yapılan (K25) deney sonuçları karşılaştırıldığında GGG55 taban malzemesinin 7131 taban malzemesine göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 2 kat artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 105: CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K25).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye (K25'e) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 106' da verilmiştir.



Şekil 106: CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K25)

Şekil 106 incelendiğinde üç cisimli abrazif (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarının olduğu bunun yanında adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların da olduğu gözlenmektedir. Kabuk şeklinde kabarmış pulcuklar malzeme yüzeyinde gömülü bulunan sert grafit kürecikleri üzerinde oluşmuştur. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan sert kaplama partiküllerinin de üç cisimli abrazif aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

Ayrıca malzeme yapısındaki grafit dağılımının homojen ve düzgün olduğu, grafit küreciklerinin stabil kalarak yuvalarından sökülmediği ve üç cisimli abrazif aşınmayı destekleyici yönde etki sağlamadığı gözlemlenmektedir.

8.1.4. TiAlN Kaplamanın Aşınma Davranışı

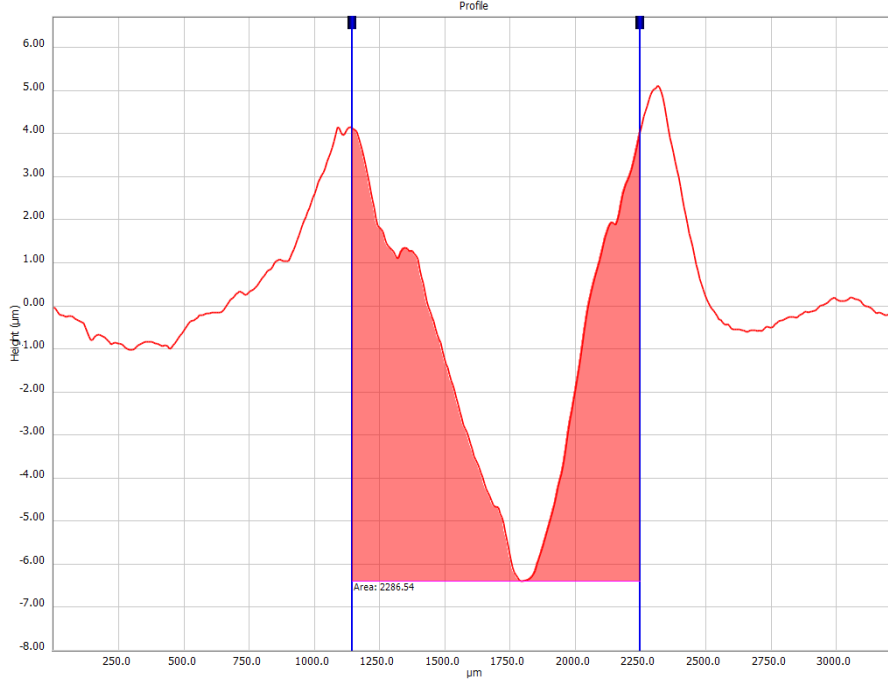
Şekil 64'te verilen TiAlN kaplanmış slicon wafer kesitine ait SEM mikrografı incelendiğinde ortalama kaplama kalınlığının 3 µm olduğu görülmektedir.

TiAlN kaplamalı nitrürsüz ve TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 altlık numuneler için yapılan deneylerin sonuçlarına göre elde edilen aşınma miktarlarının değerlendirilmesi karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Tablo 35: TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük (N)	Mesafe (m)	Devir (dev./dak.)	Dönme Çapı (mm)	Aşınma Miktarı (mm ³)	Süre (dak.)	Çevresel Hız (m/sn)
K16	7131 Nitrürsüz TiAlN	Kuru	10	1500	150	23	0,0634359	135	0,18

Tablo 35'te yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunesinde 0,0634359 mm³ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 107'de verilmiştir.



Şekil 107: TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izi profili (K16).

TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 108’de verilmiştir. Şekil 108 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

Şekil 107 ve Şekil 108 incelendiğinde Tablo 35’te yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplamanın aşındığı, aşınmanın taban malzeme üzerinde devam ederek yaklaşık 6,4 µm derinliğinde bir aşınma izinin oluştuğu görülmektedir.

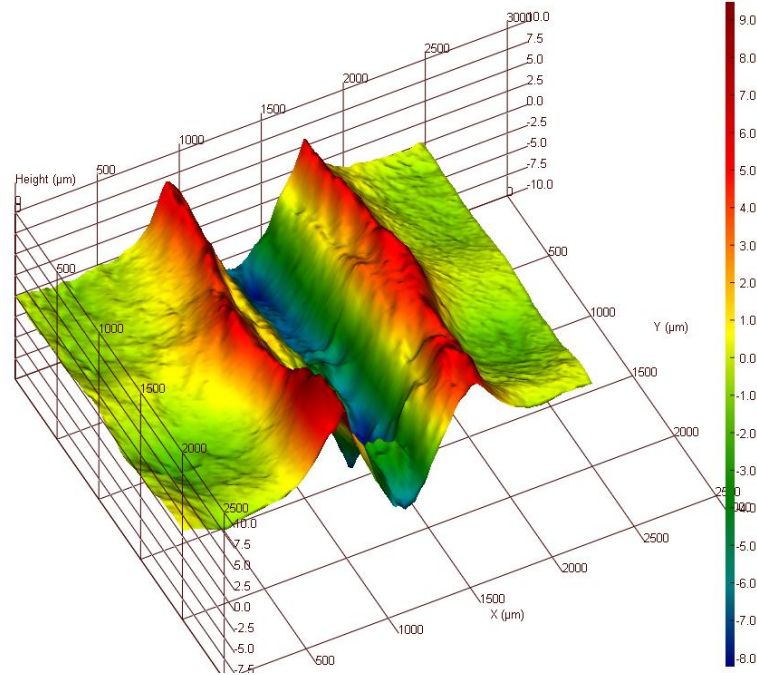
Şekil 71, Şekil 83, Şekil 95 ve Şekil 107 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürsüz 7131 numune (K2)’ye göre % 69 , TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numune (K7)’ye göre %52 , CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numune (K11)’ye göre %75 azalma meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın

yaklaşık 5,5 μm seviyelerine kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

Kaplamasız nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K2) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numune ile yapılan (K16) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 2,5 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

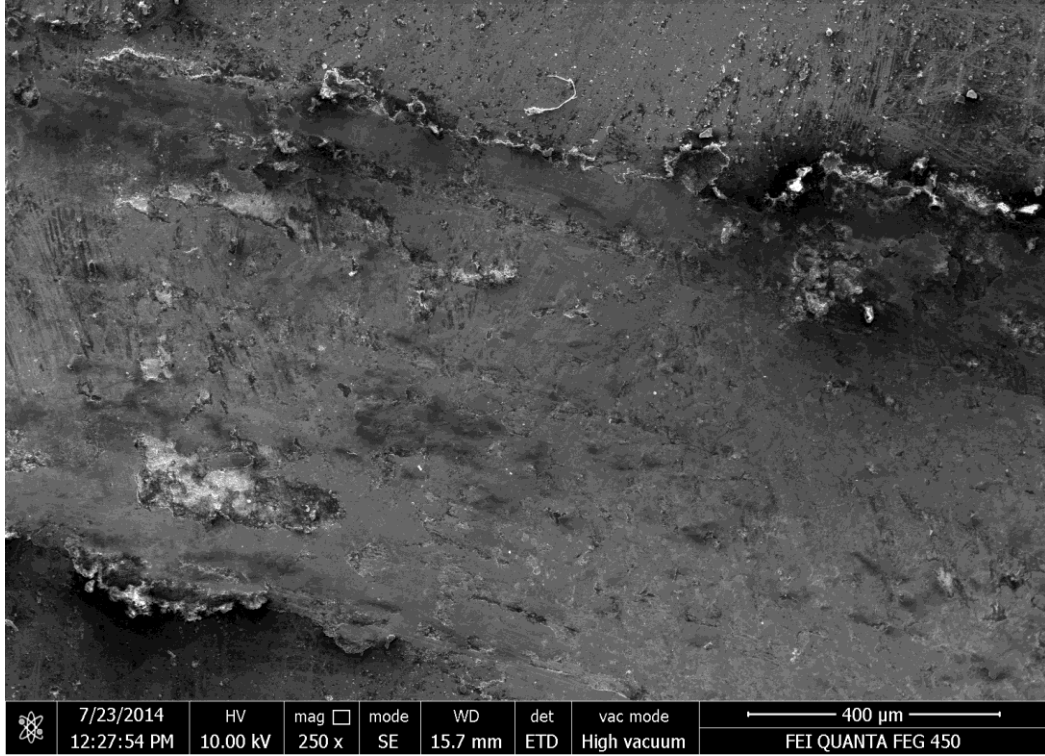
TiN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K7) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numune ile yapılan (K16) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın TiN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,7 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

CrN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K11) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numune ile yapılan (K16) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın CrN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,68 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 108: TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K16).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneye (K16'ya) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 109'da verilmiştir.



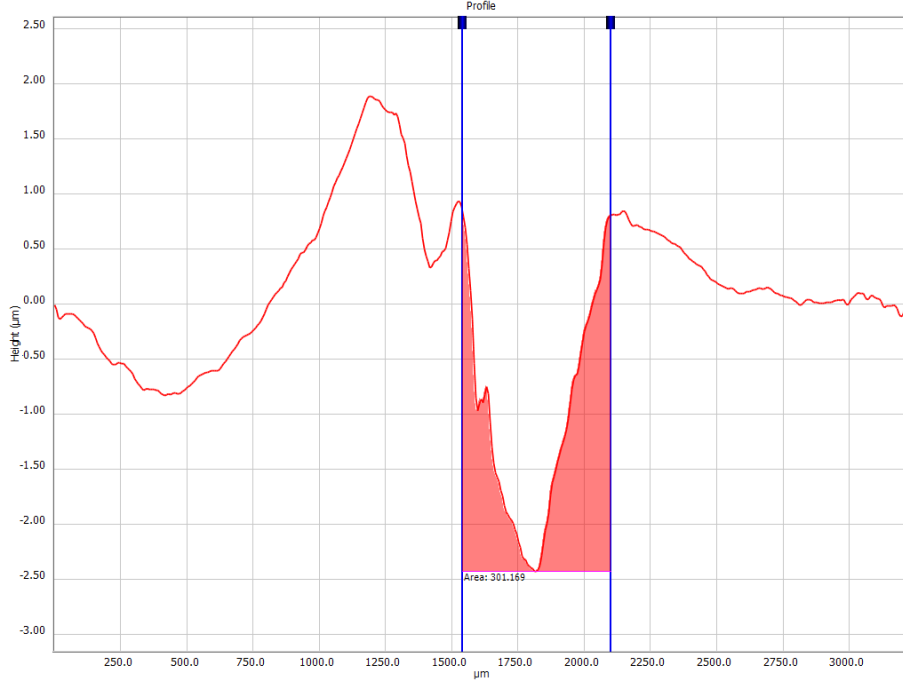
Şekil 109: TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K16).

Şekil 109 incelendiğinde TiAlN kaplamanın tamamen aşındığı, aşınmanın taban malzeme üzerinde devam ettiği, üç cisimli abrazyon (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların olduğu gözlenmektedir. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan partiküllerin de üç cisimli abrazyon aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

Tablo 36: TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük (N)	Mesafe (m)	Devir (dev./dak.)	Dönme Çapı (mm)	Aşınma Miktarı (mm ³)	Süre (dak.)	Çevresel Hız (m/sn)
K13	7131 Nitrürlü TiAlN	Kuru	13	1500	200	17	0,0142964	135	0,18

Tablo 36'da yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numunesinde $0,0142964 \text{ mm}^3$ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 110'da verilmiştir.



Şekil 110: TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izi profili (K13).

TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 111'de verilmiştir. Şekil 111 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

Şekil 110 ve Şekil 111 incelendiğinde Tablo 36'da yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplama tabakasının tamamen aşınmadığı, yaklaşık $2,5 \text{ µm}$ derinliğinde bir aşınma izinin oluştuğu görülmektedir.

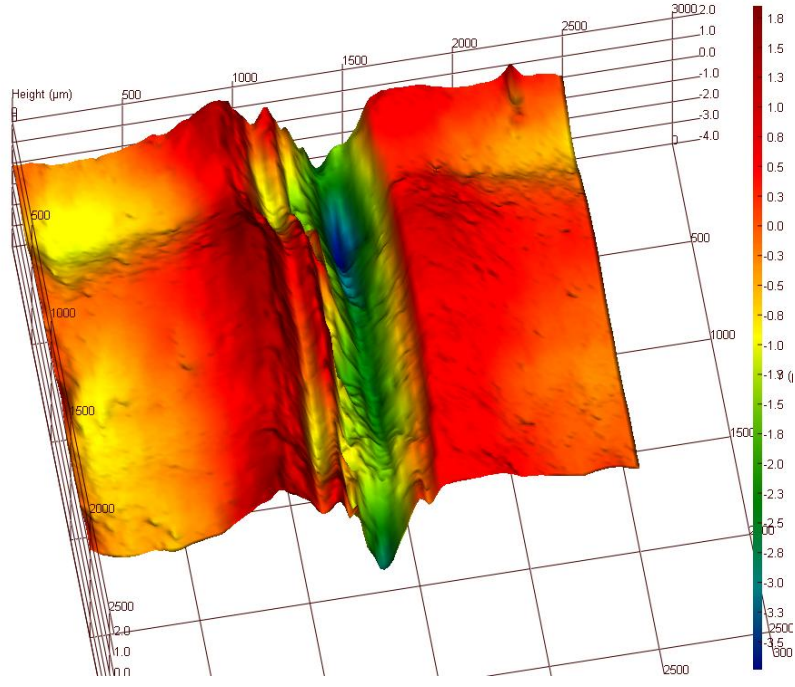
Şekil 74, Şekil 86, Şekil 98 ve Şekil 110 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürlü 7131 numune (K3)' ye göre % 54 , TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numune (K6)'ye göre % 28 azalma, CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numune (K9)'ye göre % 87 artış meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın yaklaşık 2,4 µm seviyelerine kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

Kaplamasız nitrürlü 7131 numuneyle yapılan (K3) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numune ile yapılan (K13) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 2 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

TiN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneyle yapılan (K6) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numune ile yapılan (K13) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın TiN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,2 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

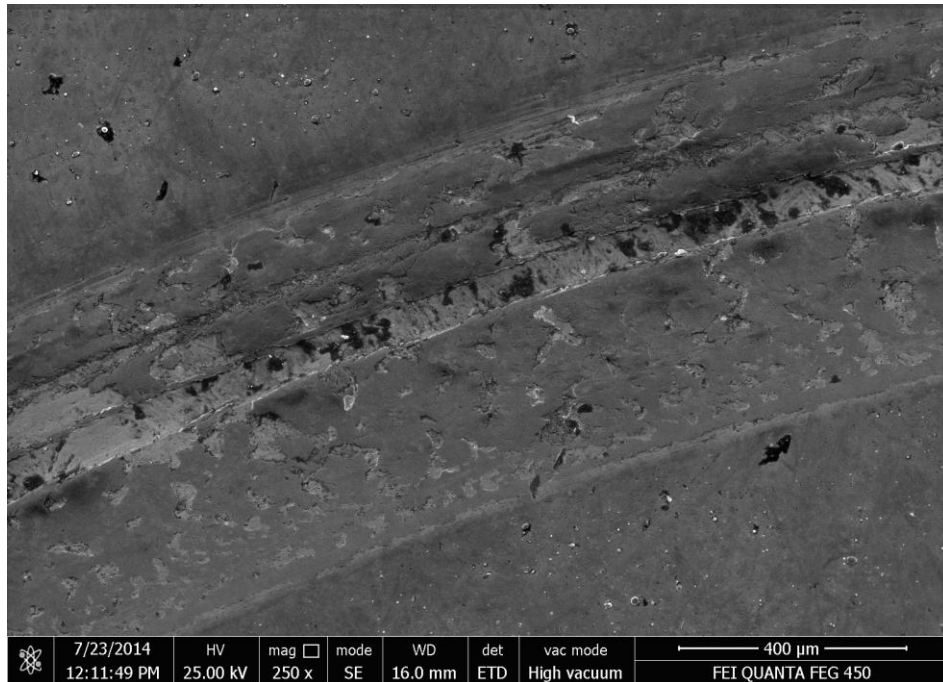
CrN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneyle yapılan (K9) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numune ile yapılan (K13) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın CrN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 3,6 kat artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K16) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numune ile yapılan (K13) deney sonuçları karşılaştırıldığında nitrürasyon işleminin hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 4,5 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 111: TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K13).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneye (K13'e) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 112'de verilmiştir.



Şekil 112: TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K13).

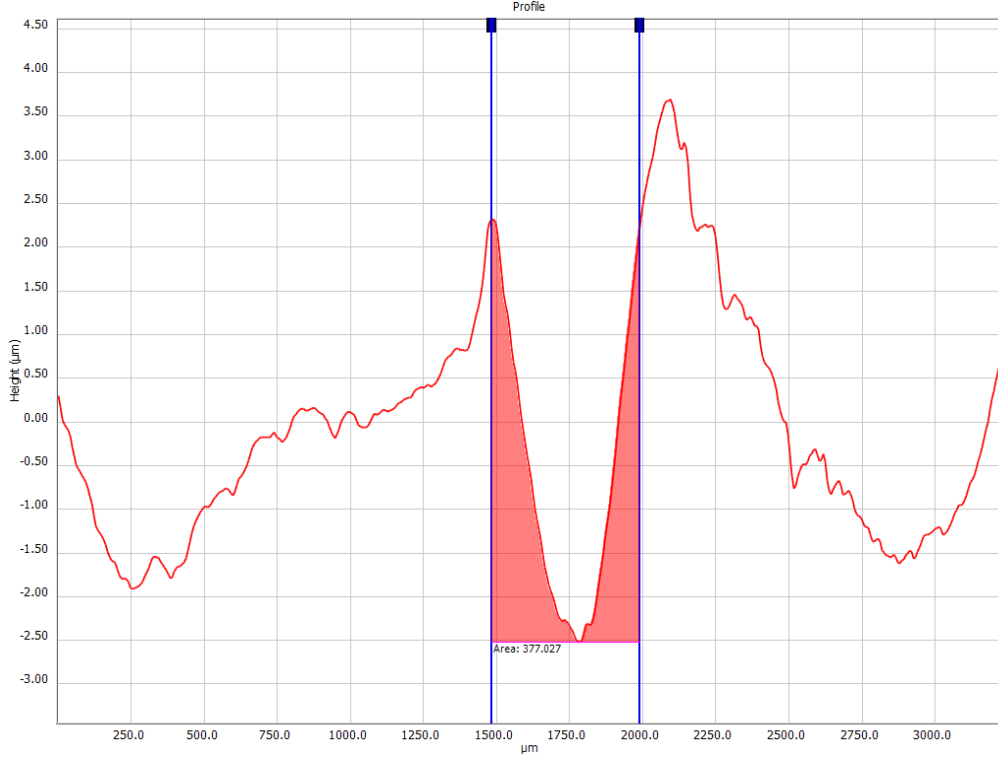
Şekil 112 incelendiğinde TiAlN kaplamanın tamamen aşınmadığı, üç cisimli abrazif (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların olduğu gözlenmektedir. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan set kaplama partiküllerinin de üç cisimli abrazif aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

TiAlN kaplamalı nitrürsüz ve TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 altlık numuneler için yapılan deneylerin sonuçlarına göre elde edilen aşınma miktarlarının değerlendirilmesi karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Tablo 37: TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük (N)	Mesafe (m)	Devir /dak (Dev. /dak.)	Dönme Çapı (mm)	Aşınma Miktarı (mm ³)	Süre (dak.)	Çevresel Hız m/sn
K31	GGG55 Nitrürsüz TiAlN	Kuru	13	1000	200	17	0,0158809	90	0,18

Tablo 37'de yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunesinde 0,0158809 mm³ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 113'te verilmiştir.



Şekil 113: TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izi profili (K31).

TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 114’te verilmiştir. Şekil 114 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

Şekil 113 ve Şekil 114 incelendiğinde Tablo 37’de yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplama tabakasının tamamen aşınmadığı, yaklaşık 2,5 µm derinliğinde bir aşınma izinin oluştuğu görülmektedir.

Şekil 77, Şekil 89, Şekil 101 ve Şekil 113 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürsüz GGG55 numune (K17)’ ye göre % 59 azalma, TiN

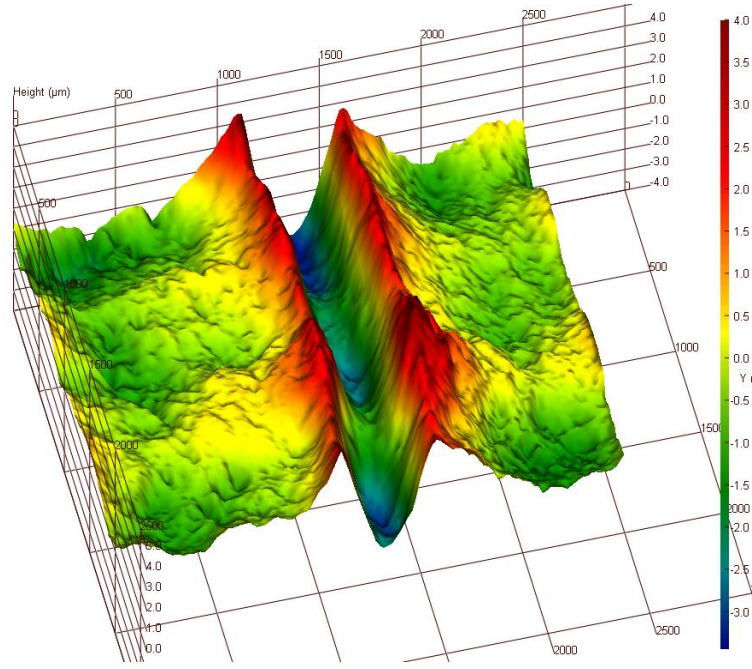
kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune (K24)'ye göre % 35 artış, CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune (K27)'ye göre % 85 artış meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın yaklaşık 2 μ m seviyelerine kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

Kaplamasız nitrürsüz GGG55 numuneyle yapılan (K17) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune ile yapılan (K31) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 3 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

TiN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneyle yapılan (K24) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune ile yapılan (K31) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın TiN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,03 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

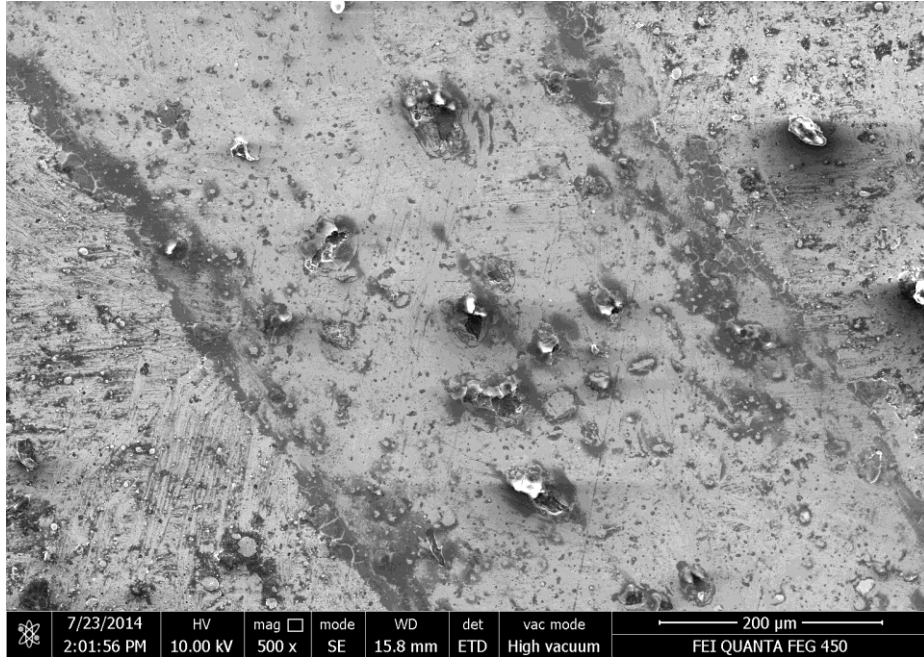
CrN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneyle yapılan (K27) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune ile yapılan (K31) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın CrN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,23 kat artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

TiAlN kaplamalı nitrürsüz 7131 numuneyle yapılan (K16) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numune ile yapılan (K31) deney sonuçları karşılaştırıldığında GGG55 taban malzemesinin 7131 taban malzemesine göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 4 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 114: TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K31).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneye (K31'e) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 115'te verilmiştir.



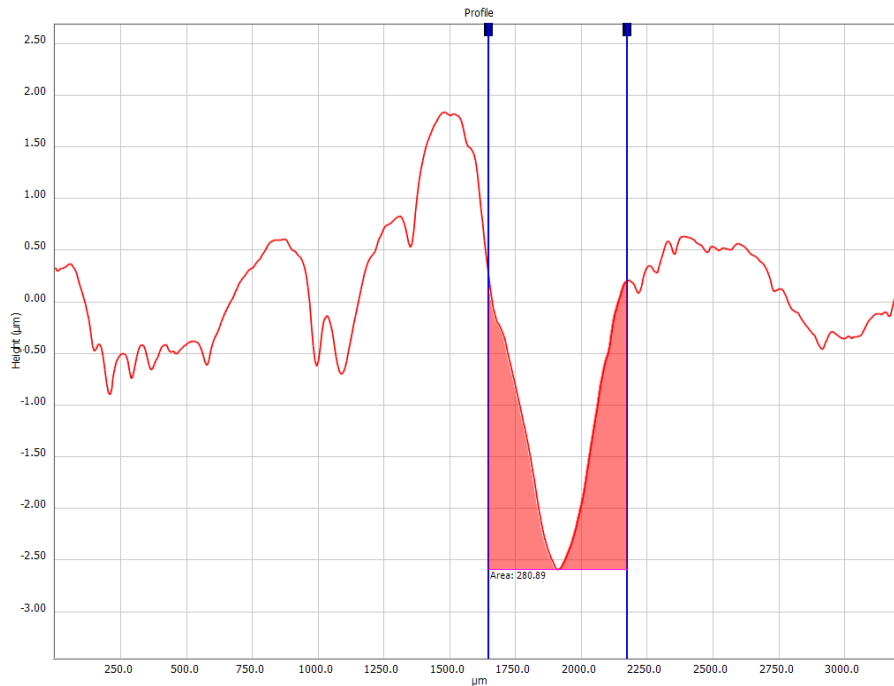
Şekil 115: TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K31).

Şekil 115 incelendiğinde TiAlN kaplamanın tamamen aşınmadığı, üç cisimli abrazif (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların da olduğu gözlenmektedir. Kabuk şeklinde kabarmış pulcuklar malzeme yüzeyinde gömülü bulunan sert grafit kürecikleri üzerinde oluşmuştur. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan sert kaplama partiküllerinin de üç cisimli abrazif aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

Tablo 38: TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunesine ait deney parametreleri ve elde edilen kütle kaybı.

Deney Nu.	Numune	Deney Ortamı	Uygulanan Yük (N)	Mesafe (m)	Devir (dev./dak.)	Dönme Çapı (mm)	Aşınma Miktarı (mm ³)	Süre (dak.)	Çevresel Hız m/sn
K29	GGG55 Nitrürlü TiAlN	Kuru	7	1000	200	17	0,010617	90	0,18

Tablo 38'de yer alan parametrelere göre yapılan deney sonucunda, TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunesinde 0,010617 mm³ hacimsel kütle kaybı meydana geldiği görülmektedir. İlgili deneye ait 2D (2 boyutlu) aşınma izi profili Şekil 116'da verilmiştir.



Şekil 116: TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izi profili (K29).

TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneye ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü Şekil 117’de verilmiştir. Şekil 117 incelendiğinde aşınma izi dışında oldukça düzgün bir numune yüzeyinin elde edildiği, aşınma izi çevresinde ise plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde oluştuğu görülmektedir.

Ayrıca aşınmada, üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığı gözlenmektedir. Aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsündeki yuvarlanma aralıklarının lokal derin çukurlar oluşturduğu (mavi derinlikler) bölgeler bu durumu desteklemektedir.

Şekil 116 ve Şekil 117 incelendiğinde Tablo 38’de yer alan parametrelerle uygulanan deney sonucunda 3 µm kalınlığındaki kaplama tabakasının tamamen aşınmadığı, yaklaşık 2,6 µm derinliğinde bir aşınma izinin oluştuğu görülmektedir.

Şekil 80, Şekil 92, Şekil 104 ve Şekil 116 incelendiğinde aşınma profilinin kenar yığılması yüksekliğinde kaplamasız nitrürlü GGG55 numune (K20)’ye göre % 11 artış, TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune (K22)’ye göre % 230 artış, CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune (K25)’ye göre % 22 artış meydana geldiği ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazımanın yaklaşık 2,5 µm seviyelerine kadar devam ettiği, bu seviyenin altında ise üç cisimli aşınmanın yani aşındırıcı partikülün yuvarlanma yoluyla aşındırma mekanizmasının da etkinliğini gösteren izlerin varlığının yer aldığı gözlemlenmektedir.

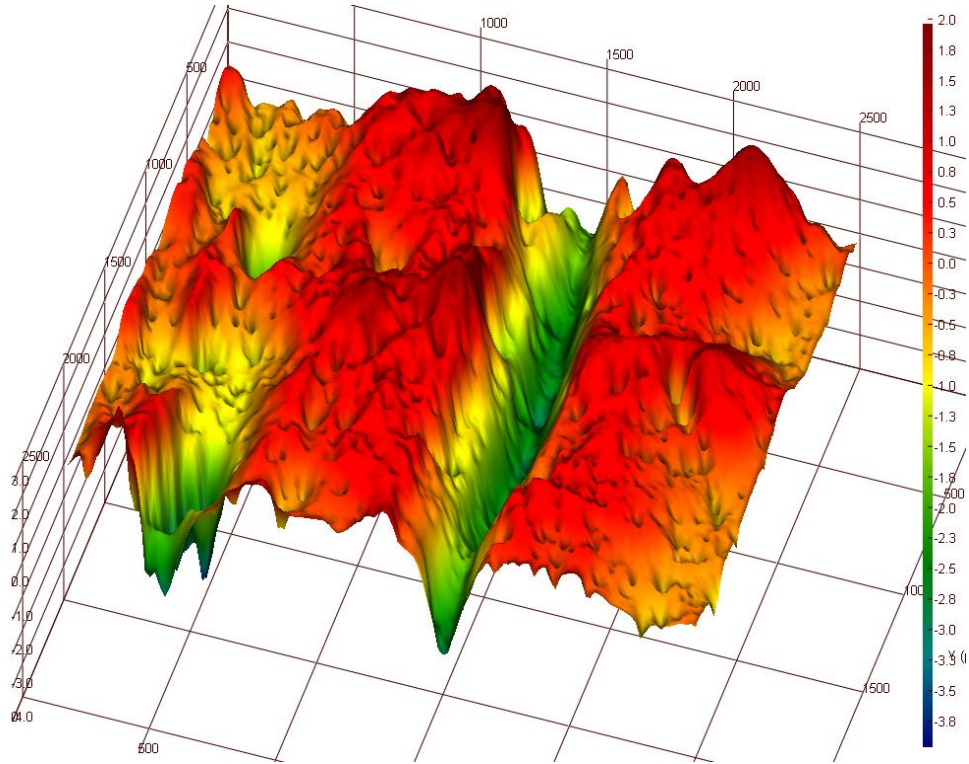
Kaplamasız nitrürlü GGG55 numuneyle yapılan (K20) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune ile yapılan (K29) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,4 kat artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneyle yapılan (K22) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune ile yapılan (K29) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın TiN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 6 kat artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

CrN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneyle yapılan (K25) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune ile yapılan (K29) deney sonuçları karşılaştırıldığında TiAlN kaplamanın CrN kaplamaya göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,3 kat artış meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

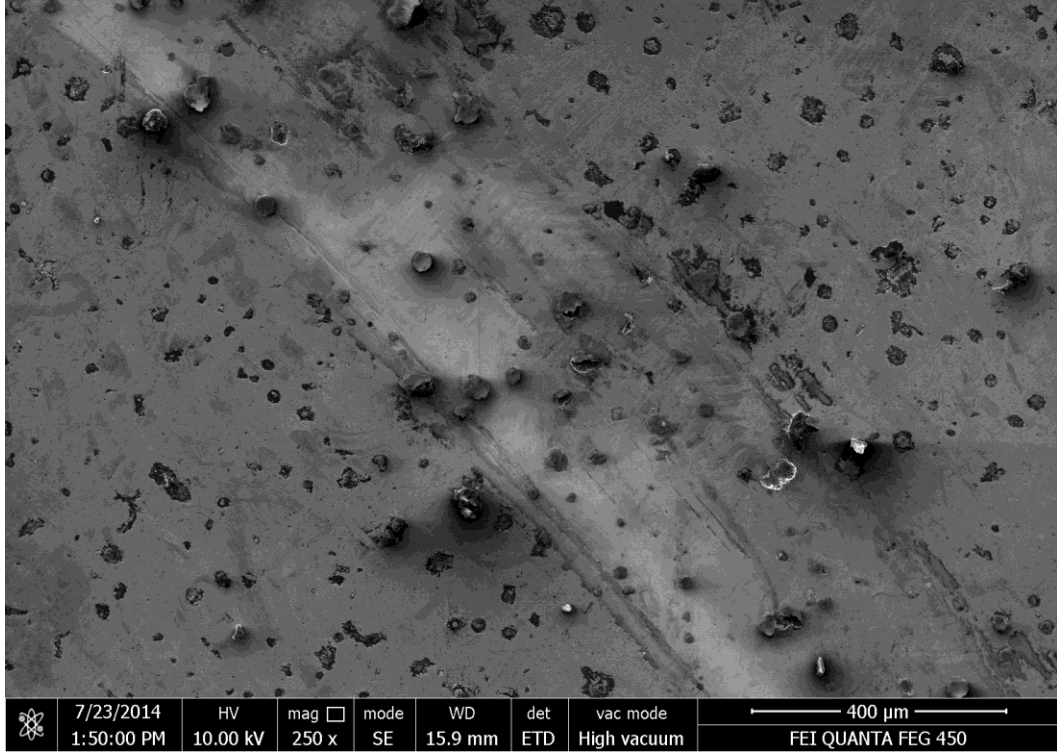
TiAlN kaplamalı nitrürlü 7131 numuneyle yapılan (K13) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune ile yapılan (K29) deney sonuçları karşılaştırıldığında GGG55 taban malzemesinin 7131 taban malzemesine göre hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,35 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

TiAlN kaplamalı nitrürsüz GGG55 numuneyle yapılan (K31) deney sonuçları ile TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune ile yapılan (K29) deney sonuçları karşılaştırıldığında nitrürasyonun hacimsel kütle kaybı değerinde yaklaşık 1,5 kat azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 117: TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numuneyle ait aşınma izinin 3D (3 boyutlu) görüntüsü (K29).

Meydana gelen aşınma izinde etkili olan aşınma mekanizmalarının değerlendirilmesinde, aşınma izine ait yüzey SEM görüntüsünden yararlanılmıştır. TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numune (K29'a) ait aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 118'de verilmiştir.



Şekil 118: TiAlN kaplamalı nitrürlü GGG55 numunenin aşınma izi SEM görüntüsü (K29).

Şekil 118 incelendiğinde TiAlN kaplamanın tamamen aşınmadığı, üç cisimli abrazyon (3-body abrasion) aşınmaya işaret eden lokal kütle kayıplarına ek olarak adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pulcukların da olduğu gözlenmektedir. Kabuk şeklinde kabarmış pulcuklar malzeme yüzeyinde gömülü bulunan sert grafit kürecikleri üzerinde oluşmuştur. Pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan sert kaplama partiküllerinin de üç cisimli abrazyon aşınmayı desteklediği değerlendirilmektedir.

8.2. Varyans Analizi ve Doğrulama Deneyi

Elde edilen deney sonuçları sinyal gürültü S/N oranlarına dönüştürüldüğünde, deneyler sonucunda en az aşınma miktarının elde edildiği TiN kaplamalı nitrürlü GGG55 (K22) numunenin sinyal gürültü oranının aynı zamanda en büyük değere sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, GGG55 malzemedan üretilerek aşınma deneylerine tabi tutulan

numuneler arasında optimum aşınma değerin 16 N yük, 1500 m mesafe TiN kaplamalı ve nitrürlü altlık parametre düzeyleri ile elde edildiğini göstermektedir.

Deney parametrelerinin deney sonuçlarını etkileme oranlarını belirlemek maksadıyla yapılan varyans analizinde, altlık parametresinin % 70,0854 oranında, kaplama parametresinin % 11,7410 oranında, yük parametresinin % 0,7978 oranında ve mesafe parametresinin % 0,2949 oranında deney sonuçlarını etkilediği gözlemlenmiştir. Varyans analiz sonuçları Tablo 39'da verilmiştir.

Tablo 39: Varyans analiz sonuçları.

Source	DF	Seg SS	Adj SS	Adj MS	F	%
mesafe	1	0,000295	0,000295	0,000295	0,36	0,294926
yük	3	0,000798	0,000798	0,000266	0,33	0,797800
kaplama	3	0,011744	0,011744	0,003915	4,81	11,741064
altlık	3	0,070103	0,070103	0,023368	28,72	70,085478
Residual Error	21	0,017085	0,017085	0,000814	-	17,080729
Total	31	0,100025	-	-	-	100

Deneylerdeki ana parametrelerin sinyal gürültü (S/N) oranları Tablo 40'ta verilmiştir.

Tablo 40: Deneylerdeki ana parametrelerin sinyal gürültü S/N oranları

Response Table for Signal to Noise Ratios Smaller is better				
Level	mesafe	yük	kaplama	altlık
1	31,61	30,72	33,09	34,64
2	31,12	28,51	33,90	18,48
3	-	32,75	32,21	39,85
4	-	33,49	26,26	32,48
Delta	0,49	4,98	7,64	21,37
Rank	4	3	2	1

Yapılan deneylerde en düşük aşınma miktarı 1500 m mesafe, 16 N yük, TiN kaplama ve GGG55 nitrürlü atlık malzemede elde edildiğinden, doğrulama deneyi yapılırken bu düzeylere karşılık gelen sinyal gürültü oranlarının kullanılması uygun olacaktır. Bu durumda Tablo 40'ta yer alan 31,12 / 33,49 / 33,09 / 39,85 sinyal gürültü oranları için doğrulama deneyi yapıldığında elde edilen aşınma miktarı 0,0067297 mm³ olarak hesaplanmıştır. Doğrulama deneyi sonucu ile yapılan deneyler arasında en düşük aşınma miktarını veren K22 deneyi sonucu (0,0017527 mm³) değerlendirildiğinde elde edilen optimum aşınma değerinin hedeflenen değerlere yakın olduğu belirlenmiştir.

Yapılan varyans analizi ve doğrulama deneyi sonuçları da dikkate alındığında hidrolik pompa gövde malzemesi olan GGG55 sfero döküm malzemenin yüzeyine nitrürasyon işlemi uygulanarak ve TiN kaplanarak imal edilmesinin aşınma sorunlarını büyük ölçüde ortadan kaldıracabileceği düşünülebilir.

Bu aşamada hidrolik pompa dişli malzemesi olan 7131 malzemeye uygulanacak yüzey işlemi ve kaplama türünün tespiti maksadıyla deney sonuçlarına ait sinyal gürültü oranları içerisinde, 7131 malzemeye ait en yüksek sinyal gürültü oranı tespit edilerek doğrulama deneyi 7131 altlık malzeme için tekrarlanmıştır. Yapılan deneylerde 7131 altlık malzemesi için en yüksek sinyal gürültü oranının dolayısıyla en düşük aşınma miktarının elde edildiği düzeyler 1000 m mesafe, 13 N yük, CrN kaplama ve 7131 nitrürlü altlık malzeme olduğundan doğrulama deneyinde bu düzeylere ait sinyal gürültü oranları kullanılmıştır. Bu durumda Tablo 40'ta yer alan 31,61 / 32,75 / 33,90 / 34,64 sinyal gürültü oranları için doğrulama deneyi yapıldığında elde edilen aşınma miktarı 0,0114947 mm³ olarak hesaplanmıştır. Doğrulama deneyi sonucu ile yapılan deneyler arasında 7131 malzeme için en düşük aşınma miktarını veren K9 deneyi sonucu (0,003921 mm³) değerlendirildiğinde elde edilen optimum aşınma değerinin hedeflenen değerlere yakın olduğu belirlenmiştir.

Yapılan varyans analizi ve doğrulama deneyi sonuçları da dikkate alındığında hidrolik pompa dişli malzemesi olan 7131 (16MnCr5) malzemenin yüzeyine nitrürasyon işlemi uygulanarak ve CrN kaplanarak imal edilmesinin aşınma sorunlarını büyük ölçüde ortadan kaldıracabileceği düşünülebilir.

BÖLÜM IX

SONUÇ ve ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Yapılmış olan deneysel çalışmanın sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

a. En az aşınma gösteren GGG55 sfero döküm malzemeden imal edilen nitrürasyon ısıtma işlemi uygulanmış TiN kaplamalı numune (K22) ile, pompa üreten firmalar tarafından hali hazırda kullanılan GGG55 sfero döküm malzemeden imal edilen nitrürasyonsuz ve kaplamasız numune (K17) aşınma miktarları karşılaştırıldığında aşınma performansında yaklaşık 30 kat iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir.

b. 7131 numuneler arasında en az aşınma gösteren 7131 (16MnCr5) sementasyon çeliği malzemeden imal edilen nitrürasyon ısıtma işlemi uygulanmış CrN kaplamalı numune (K9) ile, firma tarafından hali hazırda kullanılan 7131 (16MnCr5) sementasyon çeliği malzemeden imal edilen nitrürasyonsuz ve kaplamasız numune (K1) aşınma miktarları karşılaştırıldığında aşınma performansında yaklaşık 64 kat iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir.

c. Alsaran vd. (2002, 3) yüzey pürüzlülüğü R_a 0,02 μm alınarak yapılan kaplama işlemlerinde iyi yapışma davranışı elde edildiğini belirtmişlerdir. Yapılan bu deneysel çalışmada kaplama öncesi, hazırlanan 7131 numunelerin yüzey pürüzlülüğü ortalama R_a 0,02 μm , GGG55 numunelerin yüzey pürüzlülüğü ise ortalama R_a 0,17 μm ölçülmüştür. Kaplama öncesi yüzey temizliği ve yüzey pürüzlülüğünün en aza indirilmesi maksadıyla uygulanan yüzey parlatma işleminin kaplamanın yapışma davranışı üzerinde olumlu etki yarattığı gözlemlenmiştir.

ç. GGG55 numunelerin, 7131 numunelere göre daha fazla yüzey pürüzlülüğüne sahip olmasının nedenleri arasında en büyük etkinin, numune hazırlama işlemi esnasında zımparalama ve parlatma aşamalarında GGG55 numune yapısında bulunan grafit küreciklerinin yüzeyden dökülerek çukurcuklar meydana getirmesi olduğu değerlendirilmektedir.

d. CrN ve TiN kaplama sertlik değerlerinin ölçümü nanoindentasyon yöntemiyle yapılmış ve literatürde yer alan kaplama sertlik değerlerine yakın ölçüm sonuçları elde edilmiştir.

e. Nitrürasyon ısııl işleminin sert kaplama malzemesi ile yumuşak taban malzemesi arasında kademeli bir sertlik geçişi sağladığından nitrürasyonlu numunelerin nitrürasyonsuz numunelere göre daha iyi aşınma performansı gösterdiği değerlendirilmektedir.

f. Nitrürasyon ısııl işleminin her iki altlık malzemesi türü için de (GGG55 ve 7131) aşınma miktarının azaltılmasında ortalama 7-8 kat oranında, kenar yığılma yüksekliğinin azaltılmasında ise % 80'in üzerinde fayda sağladığı gözlemlenmiştir.

g. Varyans analizi sonuçları dikkate alındığında deney parametrelerinden altlık malzeme türünün deney sonuçlarını % 70, kaplama türünün ise deney sonuçlarını % 11,7 oranında etkilediğı, yük ve mesafe faktörlerinin deney sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir.

ğ. Tüm numunelerle yapılan deneylerde abrazif ve 3 cisimli aşınma mekanizmalarının benzer şekilde çalıştığı, ancak adezyon aşınması incelendiğinde pulcuk oluşumunun GGG55 malzemeden üretilen numuneler üzerinde sert grafit yapının etkisiyle daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.

h. GGG55 Sfero döküm malzemenin yapısındaki grafit dağılımının homojen olduğu, sert grafit küreciklerinin adezyon aşınmasını destekleyici yönde etki yarattığı fakat gömülü bulundukları yüzey üzerinden sökülmeyip stabil kalmaları sebebiyle 3 cisimli aşınmayı destekleyici yönde hareket tarzı sergilemedikleri gözlemlenmiştir.

ı. Adezyon aşınmasına ait yapışarak kabuk şeklinde kabarmış pullanma sebebiyle yüzeyden ayrılan sert kaplama partikülleri ile taban malzemeden ayrılan partiküllerin de üç cisimli abrazif aşınmayı desteklediğı gözlemlenmiştir.

i. Nitrürasyon ısııl işleminin, 7131 numuneler için adezyon aşınması pulcuklarının oluşmasını azaltıcı yönde etki sağladığı gözlemlenmiştir.

j. Aşınma izleri dışında kaplamalı ve kaplamasız tüm numune yüzeylerinin oldukça düzgün olduğu gözlemlenmiştir.

k. Tüm numunelerde aşınma izi çevresinde plastik deformasyondan kaynaklı yığılmaların etkin olduğu, aşınma profilinin kenara yığılma ve abrazif aşınma sonucu keskin hatlı kazıma şeklinde olduğu gözlemlenmiştir.

9.2. Öneriler

a. Hidrolik pompa gövdesinin GGG55 Sfero döküm malzemeden üretilmiş, nitrürasyon ısıtıl işlemi uygulanmış ve TiN kaplanmış olarak konstrüksiyon düzeltmesine tabi tutulmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

b. Hidrolik pompa dişlilerinin 7131 (16MnCr5) sementasyon çeliği malzemeden üretilmiş, nitrürasyon ısıtıl işlemi uygulanmış ve CrN kaplanmış olarak konstrüksiyon düzeltmesine tabi tutulmasının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

c. Konstrüksiyon düzeltmesine tabi tutulan elemanların hidrolik pompa üzerine monte edilerek, gerçek yükleme şartlarına uygun olarak tasarlanacak bir deney düzeneği üzerinde en az 200 saat süreyle denenmesinin, deneme sonrasında pompanın demontajı yapılarak elemanlar üzerindeki aşınma karakteristiklerinin incelenmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

ç. Aşınma izlerine ait 2D (2 boyutlu) ve 3D (3 boyutlu) profilometre görüntülerinin her bir deney numunesi için en az 4 farklı noktadan (90° lik açılarla) alınarak değerlendirilmeye tabi tutulmasının, deneyler esnasında oluşabilecek lokal hataların meydana getirebileceği yanlışlıkları ortadan kaldırma yönünde fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

d. Birlikte çalışacak makine elemanlarının aşınma performanslarının iyileştirilmesi konusunda yapılacak deneysel çalışmalara yönelik deney tasarımlarında, malzeme türü ayrımı gözetmeksizin tüm faktörleri ve düzeylerini içine alan tek bir deney tasarımı yerine malzeme türlerine göre oluşturulmuş ayrı deney tasarımlarının kullanılmasının mevcut akademik çalışmalara göre farklılık yaratacağı değerlendirilmektedir.

e. Hidrolik pompa elemanlarının üretildiği malzemelerden imal edilen ve kuru sürtünme şartlarında aşınma testlerine tabi tutulan numunelerin, sıvı / yarı sıvı sürtünme şartlarında (yağlı ortamda) yapılacak deneylerinde daha düşük aşınma performansları sergileyecekleri değerlendirilmektedir.

ÖZ GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Mehmet Yavuz BALALI
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa - Mustafakemalpaşa 10 Temmuz 1979

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine
Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce
Bilimsel :
Faaliyet/Yayınlar : Kırmacı, V., Cebeci,İ., Balalı, M.Y. (2013). Altı Nozullu
Karşıt Akışlı Vorteks Tüpünün Performansının Deneysel
Olarak İncelenmesi, Bartın Üniv. Müh. ve Tek. Bil. Dergisi,
2013 (1), 77-90
Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar :
Projeler ve Kurs Belgeleri :
Çalıştığı Kurumlar : K.K.Astsb.MYO Mekatronik Öğretim Görevlisi

İletişim

E-Posta Adresi : mehmetyavuzbalali@gmail.com
Tarih : 29.08.2014

KAYNAKLAR

- Alsaran, A., Çelik, A., Karakan M., Yetim F. (2002). Yüzey mühendisliğinde yeni bir yaklaşım; dubleks yüzey işlemi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 1-7.
- Arı, Ş., Parlar, Z. (2013). Measurement Methods Of Wear Between Piston Ring And Cylinder Liner. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 31(2013), 319-334.
- Belevi, M., Eş, M. (2007). Investigation of Wear Characteristics of Discs Manufactured from 16MnCr5 Unders Sliding - Rolling Conditions. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9 (1), 45-57.
- Büyükkelleci, Ü., (2008). *Yeni bir aşınma test cihazı tasarımı ve bazı metallerin aşınma davranışlarının araştırılması*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Fırat Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Çakan, A., Özkaner V., Yıldırım, M. M., (2007). TiCN kaplamalı AISI 1070 çeliği kesici takımlarda farklı kesme koşullarında oluşan kuvvet değişimlerinin incelenmesi. *Fırat Üniversitesi DAUM Dergisi*, 5(3), 61-66
- Çalışkan, H., Kurbanoglu, C., Çolak, O. (2010). Yüksek güç darbeleri magnetron sıçratma ile kaplama üretimi ve kesici takımlar üzerinde uygulamalar. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(4), 57-71.
- Çelik, K.H., Uçar, M., Cengiz, A. (2007). Yüksek basınçlı dişli pompalarda gövdenin parametrik tasarımı, gerilme analizi ve optimizasyonu. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 49 (576), 15-24.
- Çetin, M., Gül, F. (2007). Kuru kayma şartlarında matris yapısının küresel grafitli dökme demirin sürtünme katsayısına ve pim sıcaklığına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (3), 273-280.
- Demiral, M., Yasar, M. (2006). 95200-95300 Cu-Al-Fe Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *Teknoloji Dergisi*, 9 (1), 17-26.
- Doğan, H. (2001). *İyon beam implantasyon tekniği ile malzeme yüzeyinin modifikasyonu ve PVD ile karşılaştırılması*. (Yayımlanmış doktora tezi), Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Düzcükoğlu, H., Demirci, M. T., (2008). Östempirlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışlarının incelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2008 (3), 21-31
- Ekinci, Ş., Akdemir, A. (2011). Nitrülenmiş AISI 4140 çeliğine uygulanan yükün aşınma hızına etkisi. *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Teknik-Online Dergi*, 10 (1), 38-52.

Ezirmik, K. V. (2008). *Mo-N-Ag Nanokompozit kaplamaların üretimi ve tribolojisi*. (Yayımlanmış doktora tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Gündüz, O., Oktar, F., Salman, S. (2005). Effect of Pulse Bias Voltage on ZrN Coatings by Cathodic Vacuum Arc. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2005 (3), 49-57.

İnçal, E. (2007). *PVD yöntemi ile kaplanan HSS takım çeliklerinin karakterizasyonu ve aşınma dayanımının İncelenmesi*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

İşler, D. (2010). *Çeliğin yarı-katı halde şekillendirilmesinde kullanılacak kalıpların fiziksel buhar biriktirme (FBB) yöntemiyle kaplanması*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

İzciler, M., Bilgiç, E. (2001). Aşınma esnasında malzeme üzerinde oluşan kuvvetlerin analizi. *TMMOB Makine Mühendisleri Odası I. Demir - Çelik Sempozyum Bildirileri*, 1 (94), 836-842.

İzciler, M., Öcal, İ. (2001). Yüzey topografyasına bağlı olarak aşınmanın ölçümü. *TMMOB Makine Mühendisleri Odası I. Demir - Çelik Sempozyum Bildirileri*, 1 (93), 829-833.

Kalkan, N. (2008). *PVD yöntemi ile TiN, CrN ve TiN /CrN kaplanmış soğuk iş takım çeliğinin aşınma performanslarının deneysel incelenmesi*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Selçuk Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Kara, L., (2009). *Yüzeyi ince film kaplanmış 100Cr6 çeliğinin çeşitli ortamlarda sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Karaoğlu, Y. (2006). *Bir aşınma test cihazının tasarımı ve imalatı*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Kaya, A. U. (1998). *PVD kaplama tekniğiyle hazırlanan TiN ince filmlerin temel karakteristiklerinin incelenmesi*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Kocaeli Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Kıyak, M., Çakır, O., Altan, E. (2003). CVD ve PVD Kaplama Yöntemlerinin Kesici Takımlara Uygulanması. *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Konya Şubesi Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi II*. 26-27 Eylül 2003. Konya.

Koç, R., (2010). Bilgisayar Kontrollü Aşınma Test Cihaz Tasarımı ve İmalatı. 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*. 11-12 Kasım 2010. Balıkesir.

Okay, F. (2006). *PVD yöntemi ile kaplı östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin adhesiv aşınma davranışlarının incelenmesi*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Okay, F., Sert, H., Habalı, K., Gül, F., (2010). Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin aşınma davranışı üzerinde PVD yöntemi ile TiN kaplamanın etkisi. *Gazi*

Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25 (4), 787-794.

Oğuz, B., (1993). *Aşınma sorunları ve dolgu kaynakları*. OERLIKON Yayını, 1-7

Özmen, Y. (2004). Makine elemanlarının tribolojik hasarları ve uygun malzeme seçimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2004 (1), 31-37.

Öztürk, U. (2010). *AISI 3343 çeliği kalıp zimbalarının kaplamasız, PVD tekniği ile TiN ve CrN kaplayarak aşınma davranışlarının incelenmesi*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Savaş, S. (2004). *PVD metodu ile TiN kaplanmış S 6-5-2 yüksek hız çeliğinin aşınma davranışlarının incelenmesi*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Erciyes Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Sert, H., Karataş, Ç., Özdemir, A., Kılınç, Y., Dağ, M., Samtaş, G. (2002). Thin and thick hard coating of metals, their environments and performance comparisons. *International Conference on Tribology*. 15-18 July 2002. Kayseri.

Soydaş, S. (2006). *Üniversal aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Kocaeli Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Sönmezoğlu, S., Koç, M., Akın, S. (2012). İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28 (5), 389-401.

Şafak, H. E. (2008). *Yüzeyi PVD yöntemiyle kaplanmış metallerde tribolojik özelliklerin belirlenmesi*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Ege Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Türküz, M. C. (2006). *Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yapılan zirkonyum nitrür ince film kaplamanın kaplama parametrelerinin incelenmesi ve optimizasyonu*. (Yayımlanmış Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

URL-1, (2012). PVD tanıtım bilgileri, <http://www.eifeler.com.tr>

URL-3, (2013). <http://www.eifeler.com.tr/tr/content/pvd-tanitim-bilgileri>, Eifeler Kaplama San. ve Tic. Ltd. Şti.

URL-4, (2003). <http://www.titanit.com.tr/teknik/tablo2.htm>, 2003, Titanit Ultra Sert Kaplamalar Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.

URL-5, (2013). <http://www.eifeler.com.tr/tr/content/pvd-tanitim-bilgileri>, Eifeler Kaplama San. ve Tic. Ltd. Şti.

URL-6, (2013). <http://www.ionbond-tinkap.com/>, Ionbond Tinkap Yüzey Teknolojileri San. Tic. A.Ş.

URL-7 , (2013). <http://www.basaktin.com/>, Başaktin Sert Kaplamalar Merkezi

URL-8, (2013). <http://www.yuzeymuhendislik.com/>, Yüzey Mühendislik ve Özel Malzeme Tasarımı San.Tic.Şti.,

URL-9, (2014). http://tr.wikipedia.org/wiki/Triboloji#Yorulma_.28pitting., Wikipedia

URL-10, (2014), <http://tr.wikipedia.org/wiki/Korozyon>, Wikipedia

Urun, R., (2008). *Sürtünme ve aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı*. (Yayımlanmış yüksek lisans tezi), Celal Bayar Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.