

127120

**ELEKTROLİTİK SERT KROM İLE KATODİK ARK FİZİKSEL BUHAR
BİRİKTİRME YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ KROM NİTRÜR KAPLAMALARIN
YAĞLI ORTAM AŞINMA DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. E.Ebru BOZYAZI
(506981101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 2 Ocak 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Ocak 2002

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DEĞERLENDİRME KURULU

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mustafa ÜRGEN

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. A.Fuat ÇAKIR

Prof.Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)

OCAK 2002

127120

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca eleştiri, öneri ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN'e en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Dünya çapında sayılabilecek, malzeme ve yüzey karakterizasyonu yapabilmeye imkanı sunan, bir çok karakterizasyon cihazının bir arada bulunduğu, modern bir laboratuvarın kurulmasında etkin olan "NATO-TU Science for Stability" çerçevesinde yürütülen "İnce Film Kaplamalar" Projesi yürütücüsü değerli hocam Prof. Dr. Ali Fuat ÇAKIR'a bu imkanları bizlere sunduğu için teşekkür ederim.

Tezin hazırlanışı aşamasında bana yardımlarıyla destek olan ve bana çok şey öğreten Met.Y.Müh. O. Levent ERYILMAZ'a ve tezimi bitirmemde bana en büyük desteği veren Met.Müh.Nuri SOLAK'a teşekkür ederim.

Manevi desteklerinden dolayı sevgili arkadaşım Met.Müh. Burcu KOLOĞLU'na ve aileme teşekkür ederim.

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
BİLİŞİM TEKNOLOJİLERİ MERKEZİ**

Ocak , 2002

Met.Müh.E.Ebru BOZYAZI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTROLİTİK SERT KROM KAPLAMALAR	3
2.1. Sert Krom Kaplamaların Üretimi	3
2.1.1. Temel Reaksiyonlar	4
2.1.2. Geleneksel Banyolar	4
2.1.3. Karışık Katalizörlü Banyolar	5
2.1.4. Florsuz Banyolar	6
2.2. Sert Krom Kaplamaların Endüstriyel Kullanım Alanları	6
2.3. Sert Krom Kaplamaların Özellikleri	9
2.3.1. Sertlik	9
2.3.2. Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Dayanımı	10
2.3.3. Korozyon ve Sıcaklık Dayanımı	15
2.3.4. Çatlaklı Yapı	15
3. ELEKTROLİTİK SERT KROM KAPLAMA ALTERNATİFLERİ	18
3.1. Elektrolitik Kaplamalar	18
3.2. İyon İmplantasyonu	19
3.3. Isıl Püskürtme	21
3.4. Vakum Teknolojiler	23
4. KROM NİTRÜR KAPLAMALAR	25
4.1. CrN Kaplamaların Üretimi	25
4.2. Katodik Ark FBB Yöntemiyle Üretilmiş CrN Kaplamalar	26
4.3. CrN Kaplamaların Kullanım Alanları	27
4.4. CrN Kaplamaların Özellikleri	28

4.4.1. Sertlik	28
4.4.2. Sürtünme ve Aşınma Dayanımı	29
4.4.3. Kalınlık	33
4.4.4. Yapışma	34
4.4.5. Korozyon ve Oksidasyon Direnci	34
5. ELEKTROLİTİK SERT KROM KAPLAMA İLE FBB CrN KAPLAMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI	37
6. YAĞLI ORTAMDA AŞINMA	40
6.1. Aşınma	40
6.1.1. Abratif Aşınma	40
6.1.2. Adheziv Aşınma	40
6.1.3. Korozyonlu Aşınma	41
6.1.4. Yorulmalı Aşınma	41
6.1.5. Kazımalı Aşınma	41
6.2. Karşılıklı Kazımalı Aşınma	42
6.3. Yağlama	43
6.3.1. Hidrostatik Yağlama	46
6.3.2. Hidrodinamik Yağlama	46
6.3.3. Elastohidrodinamik Yağlama	46
6.3.4. Karışık Yağlama	46
6.3.5. Sınır Yağlama	47
6.3.6. Katı ile Yağlama	47
6.4. Sıvı Yağlayıcılar ile Yağlama	47
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	49
7.1. Numune Hazırlama	49
7.2. Ön karakterizasyon Çalışmaları	50
7.2.1. Kaplama Kalınlığı	50
7.2.2. Yüzey pürüzlülüğü	50
7.2.3. Sertlik Ölçümleri	51
7.3. Karşılıklı Kazımalı Aşınma Deneyleri	51
8. DENEY SONUÇLARI	55
8.1. Sert Krom ve CrN Kaplamalara Uygulanan Ön karakterizasyon Sonuçları	55
8.2. Yağlı Ortamda Yapılan Karşılıklı Kazımalı Aşınma Deney Sonuçları	56
8.2.1. Taban Malzemenin (YHÇ) Yağlı Ortamda Aşınma Davranışı	57
8.2.2. Sert Krom ve CrN Kaplamaların Sürtünme Katsayılarının Sıcaklık ve Yüke Bağlı Değişimi	57

8.2.3. Karşılıklı Kazımalı Aşınma Deneylerinde Sert krom ve CrN Kaplamalara Karşı Kullanılan M50 Bilyaların Aşınma Hacimleri ve Aşınma Oranları	61
8.2.4. Karşılıklı Kazımalı Aşınma Deneyleri Sonrası Sert Krom ve CrN Kaplamaların Aşınma Yüzeylerinin Profilometrik İncelenmesi	66
8.2.5. Bilyaların ve Kaplamalı Disklerin Aşınma Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri	68
8.2.6. Fırçalanmış CrN Kaplamanın Yağlı Ortamda Aşınma Davranışı	74
9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	81
EKLER	86
ÖZGEÇMİŞ	100

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Elektrolitik sert krom için sülfat banyoları	5
Tablo 2.2 Sert krom kaplamaların uygulama yerleri ve kalınlıkları.....	7
Tablo 2.3 Elektrolitik sert krom kaplamaların sertlik değerleri	10
Tablo 2.4 Karşılıklı kazıma elmas çizik ve Falex testlerinde oluşan aşınma oranları; Cr A; geleneksel sert krom kaplama, Cr D; çatlaksız krom kaplama, EN: akımsız nikel kaplama	14
Tablo 4.1 Magnetron sıçratma yöntemiyle yapılmış Cr, CrN kaplamaların ve kaplamasız paslanmaz çeliğin Vickers sertlik değerleri	28
Tablo 4.2 Paslanmaz çelik taban malzemesinin ve CrN kaplamanın sürtünme katsayısı ve aşınma hızları	29
Tablo 6.1 Çeşitli yağlama şekillerinde tipik yağlayıcı film özellikleri	45
Tablo 7.1 Elektrolitik sert krom kaplama üretim parametreleri	49
Tablo 7.2 Katodik ark FBB CrN kaplamaların üretim parametreleri	50
Tablo 7.3 M 50 bilyaya ait bileşim yüzdeleri.....	51
Tablo 7.4 Karşılıklı kazımalı aşınma deney parametreleri	52
Tablo 7.5 Karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde oluşan kontak basınçları.....	53
Tablo 8.1 Kaplamalarda kullanılan YHÇ taban malzemenin, sert krom ve CrN kaplamaların ön karakterizasyon sonuçları.	55

KISALTMALAR

FBB	: Fiziksel Buhar Biriktirme
KBB	: Kimyasal Buhar Biriktirme
PDKBB	: Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
VB	: Ölçüm aralığı
LT	: Çizgisel tarama uzunluğu
YHOG	: Yüksek Hızda Oksitleyici Gaz
YHÇ	: Yüksek Hız Çeliği
EDS	: Enerji Dağılımı Spektroskopisi
EHL	: Elastohidrodinamik Yağlama



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Elektrolitik sert krom için sülfat banyoları	5
Tablo 2.2 Sert krom kaplamaların uygulama yerleri ve kalınlıkları.....	7
Tablo 2.3 Elektrolitik sert krom kaplamaların sertlik değerleri	10
Tablo 2.4 Karşılıklı kazıma elmas çizik ve Falex testlerinde oluşan aşınma oranları; Cr A; geleneksel sert krom kaplama, Cr D; çatlaksız krom kaplama, EN: akımsız nikel kaplama	14
Tablo 4.1 Magnetron sıçratma yöntemiyle yapılmış Cr, CrN kaplamaların ve kaplamasız paslanmaz çeliğin Vickers sertlik değerleri	28
Tablo 4.2 Paslanmaz çelik taban malzemesinin ve CrN kaplamanın sürtünme katsayısı ve aşınma hızları	29
Tablo 6.1 Çeşitli yağlama şekillerinde tipik yağlayıcı film özellikleri	45
Tablo 7.1 Elektrolitik sert krom kaplama üretim parametreleri	49
Tablo 7.2 Katodik ark FBB CrN kaplamaların üretim parametreleri	50
Tablo 7.3 M 50 bilyaya ait bileşim yüzdeleri.....	51
Tablo 7.4 Karşılıklı kazımalı aşınma deney parametreleri	52
Tablo 7.5 Karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde oluşan kontak basınçları.....	53
Tablo 8.1 Kaplamalarda kullanılan YHÇ taban malzemenin, sert krom ve CrN kaplamaların ön karakterizasyon sonuçları.	55

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Krom kaplamaya çelik silindire yapılan plaka üzeri silindir aşınma testleri sonucu, zamana bağlı sürtünme katsayıları (a) 60 N, (b) 70 N	11
Şekil 2.2	70 N yüküyle yapılmış plaka üzerinde silindir aşınma testi sonucunda Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü	12
Şekil 3.1	Disk üzerinde pin aşınma deneyinde alümina topa karşı gelen implantasyon yapılmış ve yapılmamış sert krom yüzeylerin aşınma oranları	21
Şekil 3.2	Abrazif şartlarda 500 saatlik motor testinde kaplamasız silindir ve kaplamalı segmanların aşınması, Cr1, Cr3, Cr5; elektrolitik sert krom, YHOG; yüksek hızda oksitleyici gaz yöntemiyle üretilmiş Cr_3C_2 kompozit kaplama.....	22
Şekil 4.1	CrN kaplamalı ve kapsız basınçlı döküm kalıbı için ekstrüzyon yapılan Al biyet sayısı	30
Şekil 4.2	WC, TiN ve CrN kaplamaların aşınma derinlikleri ve sürtünme katsayıları	31
Şekil 4.3	Karşılaştırmalı deney sonuçları; (a) kaplama sertlikleri, (b) 50Hz frekansta, 1 mm genlikte 24 dk. yüksüz olarak yapılan plaka üzeri silindir aşınma deneyi sonuçları	32
Şekil 4.4	Kalınlığın aşınma dayanımı üzerindeki etkisi (plaka üzerinde blok testi, 100N yük, 1mm genlik)	33
Şekil 4.5	Anodik polarizasyon eğrileri. HSS Taban malzeme pürüzlülük $R_a 0,10 \mu m$, A CrN pürüzlülük $R_a 0,33 \mu m$, B CrN pürüzlülük $R_a 0,22 \mu m$, C CrN pürüzlülük $R_a 0,13 \mu m$	35
Şekil 4.6	CrN kaplamanın değişik sıcaklıklara ısıtıldıktan sonra çekilmiş X ışını difraksiyon paternleri	36
Şekil 6.1	Çeliğin kazımalı aşınmada aşınma oranlarının yer değiştirme miktarına bağlı değişimi	42
Şekil 6.2	Yağlama Mekanizmaları	43
Şekil 6.3	Stribeck Eğrisi	44
Şekil 6.4	Spesifik film kalınlığına bağlı sürtünme katsayısı değişimi	45
Şekil 7.1	Karşılıklı kazımalı aşınma hareketinin şematik gösterimi.	52
Şekil 7.2	Bilya aşınma hacmini hesaplamada kullanılan terimlerin şematik gösterilişi	54

Şekil 8.1	Elektrolitik sert krom kaplama yüzeyinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü.	56
Şekil 8.2	FBB CrN kaplama yüzeyinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü.	56
Şekil 8.3	Karşılıklı kazıma deneyi sonucu taban malzemede (YHÇ) oluşan aşınma izinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü. (60°C, 30N).....	57
Şekil 8.4	Oda sıcaklığında yapılan karşılıklı kazıma deneyi, sürtünme katsayıları (a) Sert krom kaplama, (b) CrN kaplama.	58
Şekil 8.5	60 °C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazıma deneyi, sürtünme katsayıları (a) Sert krom kaplama, (b) CrN kaplama.	60
Şekil 8.6	Bilyadaki aşınma izleri, (a) Sert krom kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (oda sıcaklığı, 30 N).	62
Şekil 8.7	Bilyalardaki aşınma izleri. (a) Sert krom kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (oda sıcaklığı, 10 N).	62
Şekil 8.8	Bilyalardaki aşınma izleri, (a) Sert krom kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (oda sıcaklığı, 5 N).	62
Şekil 8.9	Oda sıcaklığında yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde bilyalarda oluşan aşınma iz çapına göre hesaplanan aşınma hacimleri	63
Şekil 8.10	Oda sıcaklığında yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde bilyalarda oluşan aşınma hacimlerine bağlı hesaplanan aşınma oranları	63
Şekil 8.11	Bilyalardaki aşınma izleri (a) Sert Cr kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (60 °C, 30 N).....	64
Şekil 8.12	Bilyalardaki aşınma izleri (a) Sert Cr kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (60 °C, 10 N).....	64
Şekil 8.13	Bilyalardaki aşınma izleri (a) Sert Cr kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (60 °C, 5 N).....	64
Şekil 8.14	60 °C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde bilyalarda oluşan aşınma iz çapına göre hesaplanan aşınma hacimleri.	65
Şekil 8.15	60 °C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde bilyalarda oluşan aşınma hacimlerine bağlı hesaplanan aşınma oranları.	66
Şekil 8.16	60 °C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri sonucunda elektrolitik sert krom kaplamalı disklerde oluşan aşınma izleri	68
Şekil 8.17	CrN kaplamaya karşı hareket eden bilyada oluşan aşınma izi detay görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30 N).	69
Şekil 8.18	CrN kaplamalı diskte oluşan aşınma izi genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10N)	70
Şekil 8.19	Sert krom kaplamada oluşan aşınma izi genel görüntüsü (60°C, 30N)	71
Şekil 8.20	CrN kaplamada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 30N).....	71
Şekil 8.21	Sert krom kaplama karşıtı bilyadaki aşınma izi (60°C, 30N).....	73
Şekil 8.22	Fırçalama işlemi yapılmış CrN kaplamanın elektron mikroskobunda çekilmiş yüzey görüntüsü.....	74

Şekil 8.23	Fırçalanmış ve fırçalanmamış CrN kaplamalara oda sıcaklığında, 10 N yükle yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyi, mesafe-sürtünme katsayısı grafiği.....	75
Şekil 8.24	Fırçalanmış CrN kaplamalı diskte oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10N).....	76
Şekil 8.25	Fırçalanmış CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izi (Oda sıcaklığı, 10 N)	76
Şekil A.1	Sert krom kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N).....	86
Şekil A.2	CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N)	86
Şekil A.3	Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N)	87
Şekil A.4	CrN kaplamada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N)	87
Şekil A.5	Sert krom kaplamada oluşan aşınma izi uç kısmının detay görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N).....	88
Şekil A.6	CrN kaplamada oluşan aşınma izinin uç kısmının detay görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N)	88
Şekil A.7	Sert krom kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10 N).....	89
Şekil A. 8	CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10 N)	89
Şekil A.9	Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin detay görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10 N)	90
Şekil A.10	CrN kaplamada oluşan aşınma izinin detay görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10 N).....	90
Şekil A.11	Sert krom kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 5 N).....	91
Şekil A.12	CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 5 N)	91
Şekil A.13	Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin yakından görüntüsü (Oda sıcaklığı, 5 N)	92
Şekil A.14	CrN kaplamada oluşan aşınma izinin yakından görüntüsü (Oda sıcaklığı, 5 N)	92
Şekil A.15	Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin yakından görüntüsü (60°C, 30N)	93
Şekil A.16	CrN kaplamada oluşan aşınma izinin yakından görüntüsü (60°C,30N).....	93
Şekil A.17	Sert krom kaplamaya karşı kullanılan bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 30N).....	94
Şekil A.18	CrN kaplamaya karşı kullanılan bilyadaki aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 30N).	94

Şekil A.19 Sert krom kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 10N)	95
Şekil A.20 CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izi nin genel görüntüsü (60°C, 10N)	95
Şekil A.21 Sert krom kaplamada oluşan aşınma izi uç kısmının yakından görüntüsü (60°C, 10N)	96
Şekil A.22 CrN kaplamada oluşan aşınma izi uç kısmının yakından görüntüsü (60°C, 10N)	96
Şekil A.23 Sert krom kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 5 N)	97
Şekil A.24 CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 5 N)	97
Şekil A.25 Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 5).....	98
Şekil A.26 Sert krom kaplamada oluşan aşınma izi uç kısmının detay görüntüsü (60°C, 5 N)	98
Şekil A.27 CrN kaplamada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 5 N)	99
Şekil A.28 CrN kaplamada oluşan aşınma izinin yakından görüntüsü (60°C, 5)	99

SEMBOL LİSTESİ

R_a	: Aritmetik ortalama pürüzlülük değeri
T_s	: Altlık malzeme sıcaklığı
V_s	: Bias Voltajı
P_{N_2}	: Azot Basıncı
η	: Yağlayıcı viskozitesi
V	: Kayma hızı
P	: Basınç
$\sigma_{1,2}$	: Karşılıklı yüzeylerin pürüzlülük değerleri
σ	: Karşılıklı yüzeylerin ortalama pürüzlülüğü
h	: Sıvı film kalınlığı
h_{min}	: Minimum yağlayıcı film kalınlığı
E^*	: Kontaktaki malzemelerin kompozit elastisite modülü
$E_{1,2}$	: Kontaktaki malzemelerin elastisite modülleri
$\nu_{1,2}$	: Kontaktaki malzemelerin poisson oranları
λ	: Spesifik film kalınlığı
Sc	: Hertzian kontak basıncı
D	: Bilya çapı
L_N	: Uygulanan naormal yük
V_B	: Bilyadaki aşınma hacmi
d	: Bilya aşınma çapı
r	: Bilya yarıçapı
W_R	: Aşınma oranı
s	: Kayma mesafesi

ELEKTROLİTİK SERT KROM İLE KATODİK ARK FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ CrN KAPLAMALARIN YAĞLI ORTAM AŞINMA DAVRANIŞLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Elektrolitik sert krom kaplamalar aşınma amaçlı olarak uzun yıllardır kullanılan kaplamalardır. Elektrolitik yöntemde altı değerli krom içeren çözeltiler kullanılmaktadır. Altı değerli krom kanserojen madde olarak sınıflandırılmaktadır ve üretim sırasında verdiği sağlık zararlarının yanı sıra oluşan atıklar Cr^{+6} içeriğinden dolayı çevreye zarar vermektedir. Dolayısıyla üretim prosesine ve oluşan zehirli atıkların yok edilmesine dair ek işlemleri zorunlu hale getiren ve hatta Cr^{+6} 'nın kullanımını tamamen yasaklayan yasalar özellikle gelişmiş ülkelerde uygulanmaya başlamıştır. Çevreye verdiği zararlar ve bu yasal sınırlamalar sert krom kaplamaya alternatif olabilecek yeni yöntem ve kaplamaların araştırılmasına neden olmuştur.

Sert krom kaplamadan daha zararsız elektrolitik yöntemlerin yanı sıra elektrolitik sert krom kaplama prosesinden sonra uygulanan, kaplamaların performansını geliştirmeye yönelik iyon implantasyonu yöntemleri öncelikle araştırılmıştır. Yüksek hızda oksitleyici gaz püskürtme yöntemiyle yapılan kalın alaşım kaplamalar ve temiz teknolojiler olarak gösterilen kimyasal ve fiziksel buhar biriktirme yöntemleriyle yapılan sert kaplamalar sert krom alternatifi olarak oldukça ilgi gören kaplamalardır.

Son yıllarda aşınma amaçlı kullanımları hızla yaygınlaşan ark fiziksel buhar biriktirme metodu ile üretilen sert seramik kaplamalardan CrN kaplamalar da sert krom kaplamaya alternatif olarak gösterilmektedir.

Bu çalışmada amaç; elektrolitik sert krom kaplama ile katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle üretilen CrN kaplamaların yağlı ortamda aşınma davranışlarını karşılaştırmaktır.

Yüksek hız çeliği taban malzemesi üzerine geleneksel elektrolitik sert krom kaplama ve katodik ark fiziksel buhar biriktirme ile CrN kaplama yapılmıştır. Aşınma deneylerine geçmeden önce taban malzeme ve kaplamaların yüzey pürüzlülükleri, kaplamaların sertlikleri ve kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Tablo 1' de yapılan bu ön karakterizasyon sonuçları özetlenmiştir.

Tablo 1. Kaplamalara yapılan ön karakterizasyon sonuçları

Numune	Kalınlık (μm)	*Ra(μm)	**HV Sertlik (kg/mm^2)
Taban Malzeme	-	0,06	800 $\pm$ 50
Elektrolitik Sert Cr Kaplama	11 $\pm$ 1	0,18	1180 $\pm$ 150
CrN Kaplama	3 $\pm$ 0,2	0,22	2200 $\pm$ 190

*VB: 62,50, LT: 1,75mm parametreleriyle Facodyn optik uç kullanılarak Profilometre cihazında ölçülmüştür

**20 mN yük ile ultra mikro sertlik cihazında ölçülmüştür

Aşınma deneyleri karşılıklı kayma koşullarında ve yağlı ortamda yapılmıştır. Yağlayıcı olarak katkısız mineral yağ ve karşıt malzeme olarak 10 mm çaplı çelik bilya (M50) kullanılmıştır. Kaplamalı diskler içerisine yağ konulabilen bir tutucu içerisine yerleştirilmiştir. Deney parametreleri metal-metal kontağının sağlanabildiği koşullara göre ön deneylerle belirlenmiştir. Karşılıklı kazıma deneylerinde 50 Hz frekans, 1 mm genlik ve 180 dakikalık hareket süresi sabit deney parametreleri olarak kullanılmıştır. 5, 10 ve 30 N yük kullanılan deneylerde yağ, ısıtma olmadan (oda sıcaklığında) ve 60°C' ye önceden ısıtılarak kullanılmıştır.

Deneyler sonrasında temizlenen kaplamalı diskler ve karşıt malzeme olarak kullanılan bilyalarda oluşan aşınma izleri optik mikroskopta, profilometrede ve taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Optik mikroskopta bilyalarda oluşan aşınma iz çapları ölçülmüştür. Bilyalarda oluşan aşınma hacimleri ve yük ve mesafeye bağlı aşınma oranları hesaplanmıştır.

Oda Sıcaklığında Yapılan Karşılıklı Kazımalı Aşınma Deney Sonuçları

Oda sıcaklığında yapılan deneylerde kaplamaların sürtünme katsayıları arasında fark yoktur. Kaplamaların sürtünme katsayıları artan yüklerle azalmaktadır. Sürtünme katsayısı değerleri 0,1-0,2 aralığında olmasından dolayı yağlama rejiminin sınır ve/veya karışık yağlama olduğu anlaşılmaktadır.

Oda sıcaklığında yapılan aşınma deneyleri sonrasında kaplamalarda meydana gelen aşınma miktarının az olmasından dolayı profilometrik incelemede aşınma derinlikleri belirlenememiştir.

CrN kaplamaya karşı kullanılan bilyalarda kontak alanı dışında izler görülmüştür. CrN kaplama karşıt bilyanın aşınma hacim hesabında aşınma çapı kontak alanından alınmıştır. Bilyalarda oluşan aşınma iz çaplarına göre hesaplanan aşınma hacimleri ve aşınma oranlarında azalan yüklerle beraber azalma görülmüştür. CrN kaplamaya karşı kullanılan bilyalarda oluşan aşınma hacim ve oranlarının sert krom kaplama karşıt bilyalardakine oranla daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Kaplamalardaki aşınma miktarları azalan yüklerle azalmaktadır. Kaplamalı disklerin elektron mikroskobu incelemesinde CrN kaplamada oluşan aşınma izinde kaplamanın doğasında varolan dropletlere rastlanmamıştır. Sert krom kaplamada 30 ve 10 N yüklerde yapılan deney sonuçlarında hareket yönünde çizikler ve

kaplamadan kayıplar görülmekteyken 5 N yüke inildiğinde kaplanın yüzeyinde kırılma ya da kalkmaya benzer izler görülmektedir.

60 °C Sıcaklıkta Yapılan Karşılıklı Kazımalı Aşınma Deneyi Sonuçları

60°C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde kaplamaların sürtünme katsayıları oda sıcaklığında olduğu gibi artan yükle azalmaktadır. CrN kaplamanın sürtünme katsayısı sert krom kaplamaya kıyasla daha düşüktür.

Kaplamalara karşı kullanılan bilyalarda oluşan aşınma hacimleri azalan yükle azalmaktadır. 30 N yükte yapılan aşınma deneyi sonucunda sert krom karşıtı bilyanın aşınma hacim ve oranı CrN kaplama karşıtı bilyanın aşınma hacim ve oranına göre çok fazladır.. Yükün 5 N'a düşmesiyle CrN karşıtı bilyadaki aşınma hacim ve oranları sert krom kaplama karşıtı bilyanınkine yaklaşmaktadır.

Kaplamalı disklerde oluşan aşınma izlerinin profilometrik incelemesinde CrN kaplamada oluşan aşınma izi belirlenemezken sert krom kaplamada oluşan aşınma izlerinin derinlikleri belirlenebilmiştir. Azalan yükle beraber homojen olmayan aşınma izlerinin derinlikleri düşmekte ve genişlikleri azalmaktadır.

Taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde sert krom kaplamada oluşan aşınma izinde hareket doğrultusunda derin oyuklar görülmüştür.

Fırçalanmış CrN Kaplamaya Yapılan Karşılıklı Kazımalı Aşınma Deneyi

Yapılan aşınma deneyleri sonucunda CrN kaplamanın abrazyon aşınmasında öncelikle neden olduğu düşünülen kaplamadaki dropletlerin giderilmesi için kaplamaya fırçalama işlemi uygulanmıştır. Özellikle oda sıcaklığında karşıt malzemede etkisini açıkça gösteren dropletlerin etkisini görmek için; oda sıcaklığında ve 10 N yükte fırçalanmış numuneye karşılıklı kazımalı aşınma deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda aynı şartlarda fırçalanmamış CrN kaplamaya göre biraz daha düşük bir sürtünme katsayısı gösterdiği ve bilyalardaki aşınma izlerinin çevrelerinde aşınma ürünleri görülmemiştir.

Sonuç olarak kaplamalara sınır ve/veya karışık yağlama koşullarında yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde, CrN kaplamanın her iki sıcaklıkta da daha az aşındığı görülmüştür. 60°C sıcaklıkta yapılan deneylerde sert krom kaplama CrN kaplamaya oranla daha fazla aşınmıştır. Artan yüklerde sert krom kaplamada aşınma artarken, yükün CrN kaplama üzerindeki etkisinin daha az olduğu gözlenmiştir. Fırçalanmış CrN kaplama fırçalanmamış CrN kaplamaya kıyasla daha iyi performans göstermiştir.

COMPARISON OF LUBRICATED WEAR BEHAVIOURS OF ELECTROLYTIC HARD CHROMIUM AND CrN COATING PRODUCED BY CATHODIC ARC PHYSICAL VAPOUR DEPOSITION

SUMMARY

Electrodeposited hard chromium coatings have been widely used for improvements of wear resistance for a long time. In the electrodeposition processes, solutions containing hexavalent chromium have been used. Hexavalent chromium is classified as a cancerogen compound, which causes health risks if used in production and environmental problems due to the toxic character of the wastes. As a result of this, strict regulation or special care and techniques for the use of hexavalent chromium and disposal of their wastes became mandatory. Even regulations on total restriction of the use of hexavalent Cr are becoming into action in developed countries. The environmental concern on the use of hexavalent chromium stimulated the research activities for alternatives of hard chromium all over the world is resulting in ever increasing regulations of the chromium plating industry.

Less harmful electrolytic coatings and ion implantation methods for improving wear and corrosion performance of hard chrome have been investigated. Thick alloy coatings produced by high velocity oxygen fuel spray process and hard coatings produced by chemical and/or physical vapour deposition, known as clean technologies are also attractive alternatives.

Recently, the use of physical vapour deposited hard ceramic coatings for wear resistance applications have been increasing. Previous studies showed that physical vapour deposited CrN coating can be an alternative for hard chromium.

The aim of this study is the comparison of wear behaviours of electrodeposited hard chromium and cathodic arc PVD CrN coating under lubricated condition.

In the experimental study, conventional electroplated hard chromium and cathodic arc PVD CrN coatings are deposited on high speed steel substrates. Before the wear experiments, surface roughness of substrate and coatings, coatings hardness and thickness were measured. These results are given in Table 1.

Table 1. Characterization results of coatings and substrate

	Thickness (μm)	*Ra(μm)	**HV Hardness (kg/mm^2)
Substrate	-	0.06	800 $\pm$ 50
Electroplated Cr coating	11 $\pm$ 1	0.18	1180 $\pm$ 150
Arc PVD CrN	3 $\pm$ 0.2	0.22	2200 $\pm$ 190

- *VB: 62.50 LT: 1.75 Facodyn optic probe were used
- **20 mN load were applied.

Wear experiments were conducted under reciprocating sliding conditions. Mineral based oil (without any additive) as lubricant and M50 ball (10mm diameter) as counter body material were selected. Experimental parameters were determined by preliminary experiments. In reciprocating wear experiments, 50 Hz frequency, 1mm amplitude and 180 min sliding duration were kept constant. 5, 10, 30 N loads, room and 60°C oil temperature were used as variable parameters.

After wear experiments, wear scars on the coated samples and balls were investigated by optical microscopy, scanning electron microscopy and profilometry. Diameters of the wear scar on balls were measured by means of optical microscopy, from which wear volume and rates of the balls were calculated.

Results of reciprocating sliding wear test at room temperature

At room temperature, there was no distinct difference between the friction coefficients of coatings. The friction coefficient of coatings decreased with increasing loads. It is clear that the lubrication mode was boundary and/or mixed lubrication because the friction coefficient varied between 0,1-0,2.

Wear volumes and rates of balls decrease with the reducing load. In addition wear volume and rates of balls sliding against CrN coating were lower than the values of balls' sliding against hard chromium.

In the profilometric measurement conducted on all coated discs wear depths cannot be determined due to low wear amounts.

Scanning electron microscope investigation on coated discs revealed that the droplets on CrN coatings were not present in the wear tracks. On hard chromium coated discs wear tracks scratches in the direction of movement and grooves were observed. On the hard Cr coating wear track subjected to 5 N load cracks and peeling initiation was also observable coating.

Results of reciprocating sliding wear test at 60°C temperature

Coefficient of friction decrease with increasing loads at 60°C experiments, as in room temperature experiments. The friction coefficients of CrN coatings are lower than hard chromium coatings.

Wear volume of balls used against coatings decrease with decreasing load as in room temperature conditions, but amount of the wear was higher.

The comparison of wear volumes and rates of balls sliding against hard chrome and CrN coatings showed that;

- The wear volume of balls sliding against hard chrome coatings under 30 N load were very much higher than balls sliding against CrN under same conditions
- Ball wear rates, sliding against CrN and hard chromium became closer to each other at 10 and 5 N loads.

In profilometric examination of CrN coated discs wear depth were not detected. However hard chrome coated discs wear depths were easily detected and recorded.

In the scanning electron microscope image of wear scar on the hard chrome coated discs it was seen that deep grooves occurred along movement direction.

Results of reciprocating sliding wear test on brushed CrN coated

In order to investigate the role of droplets on CrN coating in the wear process, droplets were mechanically brushed away. Wear tests were conducted on brushed samples by using the same experimental parameters at room temperature and 10 N load.

Brushed CrN coatings had lower friction coefficients and the scratches observed outside the contact area on balls sliding against CrN were not present, which indicated that droplets on CrN after detaching from the surface acted as abrasive particles during sliding.

The results of this investigation showed that CrN performed better than hard chrome plating under lubricated reciprocating wear conditions used in this study. This effect became more pronounced by the increase of temperature and normal load.

1. GİRİŞ

Elektrolitik sert krom kaplama, yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, düşük aşınma ve yüksek korozyon dayanımı istenen bir çok uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sert kromun uzay, otomotiv ve deniz endüstrisi için hidrolik parçalar gibi çeşitli uygulama alanlarında, segmanların kaplanması ve tekstil endüstrisinde de kullanımı vardır [1]. Sert krom kaplamanın ticari olarak uygulanmaya başlamasından itibaren, bu endüstriyel üretim büyük oranda gelişmiş, organize olmuş ve finansal açıdan güçlenmiştir[2]. 1925 yılından beri ticari olarak kullanılan aşınmadan korunma amaçlı sert krom kaplamalar üzerinde aşınma davranışlarını belirten sistematik bir çalışmaya rastlanamamıştır.

Koruyucu, fonksiyonel ve dekoratif elektrolitik kaplamalar gibi geleneksel metal bitirme işlemleri için kullanılan proses ve teknolojiler, çevre kirliliğine yol açan sebeplerden biridir [2]. Krom kaplamalar kromik asit, sülfatlar, florürler ve diğer patentli kimyasallar içeren banyolardan oluşturulurlar. Temel banyolara ek olarak, temizleme, durulama ve sıyırılma sırasında atık sular oluşur. Temel banyolar ve bu atık sular altı değerli krom ve fosfatlar, yağlar vb. malzemeler içerirler. Bu atıklar kullanım ve elden çıkarmada çevresel probleme neden olurlar [3]. Temel konu sert krom kaplamanın üretiminde kanserojen madde olarak sınıflandırılan Cr^{+6} 'nın kullanılmasıdır. Atıkların yok edilmesi sırasında çok dikkat edilmesi gereklidir. Bu da sert krom üreticilerine ek üretim maliyeti ve sağlık riskleri nedeniyle ek işlemler getirmektedir [4]. Gelişen çevresel endişeler kaplama endüstrisinin sınırlamalarını arttırmıştır [3].

Elektrolitik sert krom üretiminde daha az çevre zararının sağlanması için iyon implantasyon tekniği üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntem, elektrolitik yöntemle yapılan sert krom kaplama miktarını azaltmakta ve iyon implantasyonu ile aşınma, sertlik gibi özelliklerini geliştirmektedir [5, 6]. Bununla beraber tüm dünyada çevre yasaları ve programları, endüstriyel üretimde temiz teknolojilerin gelişmesinde temel oluşturmuştur. Son 12 yıldır, bazı kirli teknolojilerin (özellikle kadmiyum,

krom ve çinko) yerini alabilmesi için yüksek performanslı kuru kaplamalar, temiz metotlar, üzerinde çalışmalar başlamıştır. Pek çok uygulanabilir teknoloji arasında en fazla ilgi Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB), Kimyasal ve Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB, PDKBB) ve Isıl Püskürtme yöntemleri üzerindedir [2].

TiN sert kaplamalar ile takımların ve makine parçalarının geliştirilmesiyle başlayan ve daha sonra TiCN, CrN ve TiAlN ile devam eden FBB kaplamalar üzerindeki araştırmalar halen sürmektedir [2]. Bu kaplamaların aşınma amacıyla kullanımları hızla yaygınlaşmakta ve kullanım alanları genişlemektedir.

FBB CrN kaplamalar son 17 yıldır geniş olarak araştırılmaktadır ve bir çok uygulama alanında elektrolitik kaplamaların yerini alabilirliği açısından oldukça ilgi çekmektedir [5, 6]. FBB CrN kaplamaların özellikleri halen tam olarak belirlenmiş değildir. Araştırmaya devam edilen özellikleri arasında aşınma dayanımı da yer almaktadır.

Sonuç olarak alternatifleri aranan sert krom kaplama ve özellikleri halen araştırılan ve kullanım alanları genişletilmeye çalışılan CrN kaplamaların yağlı ortamda aşınma davranışlarının karşılaştırılması bu çalışmada amaç edinilmiştir. Böylelikle yaygın kullanımı olan elektrolitik sert krom kaplamanın yağlı ortamda aşınma davranışı sistematik olarak ortaya konacak ve de CrN kaplamaların araştırılan özelliklerine katkıda bulunulacaktır.

2. ELEKTROLİTİK SERT KROM KAPLAMALAR

Krom kaplama ilk defa 1854 yılında Bunsen tarafından ortaya atılmıştır. Krom kaplamalar, Dr.Geuther' in 1856 yılında Almanya' da kromun elektrolitik kaplanmasıyla ilgili ilk detayları yayınlamasından sonra daha fazla ilgi görmüştür [8].

Sert krom kaplamanın gelişiminde ilk adım ise 1920' de G.J.Sargent tarafından atılmıştır. Sargent' in bu çalışmasında, ticari prosesler için çözeltilerin kromik asit ve sülfat içerikleri arasındaki kantitatif ilişkilerin ilk temelleri yer almıştır. Sert krom kaplama 1925 yılından beri ticari olarak kullanılmaktadır [9].

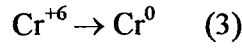
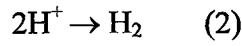
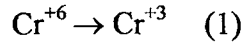
2.1. Sert Krom Kaplamaların Üretim Yöntemleri

Hem fonksiyonel hem de dekoratif krom kaplama yapmak için aynı altı değerli kromik asit çözeltisi kullanılır. Fonksiyonel krom kaplama için üç temel formül kullanılmaktadır. Tüm formüllerde krom-üç-oksit (CrO_3), krom kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu kimyasal su içinde çözüldüğünde H_2CrO_4 kromik asit formunu alır. Teknik olarak doğru olmamasına rağmen CrO_3 , kromik asit olarak refere edilmektedir [10].

Kromik asit çözeltilerinden kaplama yapmak, belirli bir miktarda katalizör içermiyorsa mümkün olmamaktadır. Eğer katalizör miktarı çok fazla ya da çok az ise krom metali kaplanmaz. Başarıyla tanıtılan katalizörler asit anyonlarıdır ve bunlardan ilk kullanılanı sülfattır [11]. SO_4^{2-} iyonları her üç tip çözeltide de gerekli katalizördür. Genelde sülfürik asit ya da küçük deneysel çalışmalarda sodyum sülfat tuzu olarak kullanılır [10].

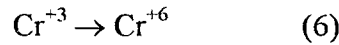
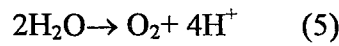
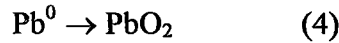
2.1.1. Temel Reaksiyonlar

Altı değerli kromdan krom meteline redüksiyonunda üç genel reaksiyonun göz önünde tutulması gereklidir. Hücre voltajı arttırıldığında ilk reaksiyon, altı değerli kromun üç değerli kroma redüklenmesidir. Bunu hidrojen iyonun hidrojen gazına redüksiyonu ve akabinde metalik kromun birikmesi izler. Reaksiyonlar şöyle özetlenir:



Genel bir tahmine göre kaplama akımının yaklaşık %10 kadarı 3 değerli Cr oluşturan ilk reaksiyon için harcanmaktadır. Hidrojen gazının oluşumuna harcanan akım miktarı yararlanılan krom kaplama kimyasına bağlıdır. Daha fazla etkin katalizörlü banyo daha az hidrojen demektir [10].

Anodun kurşun alaşımı olduğu varsayılırsa anottaki ilk reaksiyon anot yüzeyinin kahverengi kurşun iki okside oksidasyonudur. Bu yüzeyde, kaplama sırasında iki reaksiyon oluşur. İlk reaksiyon oksijen oluşumudur. İkincisi 3 değerli kromun geri 6 değerli krom iyonuna tekrar oksidasyonudur. Bu reaksiyonun oranı çoğunlukla anot yüzeyine üç değerli iyon transferi ile belirlenir. Aşağıda reaksiyonlar basit biçimde gösterilmektedir [10].



2.1.2. Geleneksel Sülfat Banyoları

Geleneksel sülfat banyolarında katalizör olarak sülfat kullanılır. Sülfat konsantrasyonu kritiktir ve belli oranda tutulur [5]. Kromik asidin sülfat radikaline ağırlık oranı 75:1 –120:1 aralığındadır. Düşük oranlarda, 75:1 –90:1 aralığında, daha parlak pürüzsüz kaplama oluşmasına rağmen optimum kaplama oranı 90:1-100:1 oranındadır ve bu oranlarda yüksek akım yoğunlukları oluşur [11].

50 g/lt (7 oz/gal) kadar düşük konsantrasyonlu kromik asit içeren çözeltilerden bahsedilmesine karşın bunlar üretimde pratik değildirler; a) kaplama aralığı çok sınırlıdır, b) kirliliğe karşı çok duyarlıdır, c) daha yüksek elektrik direncine sahiptirler, d) üretim için daha yüksek voltaj gerekir [11]. Geleneksel banyolarda kromik asit konsantrasyonu, yaygın olarak 225-250 g/lt kullanılmakla birlikte 150-450 g/lt aralığındadır[5]. Sert krom kaplamada kullanılan düşük ve yüksek konsantrasyonlu kromik asit-sülfat çözeltileri için üretim koşulları ve kompozisyonları Tablo 2.1' de verilmektedir [11].

Tablo 2.1. Elektrolitik sert krom için sülfat banyoları [11]

Banyo Tipi	Kromik Asit		Sülfat		Akım Yoğunluğu		Banyo Sıcaklığı (°C)
	g/lt	oz/gal	g/lt	oz/gal	A/dm ²	A/in ²	
Düşük konsantrasyon	250	33	2,5	0,33	31-62	2-4	52-63
Yüksek konsantrasyon	400	53	4,0	0,53	16-54	1-3,5	43-63

Kaplamanın yüksek konsantrasyona nazaran daha hızlı yapılabilmesi nedeniyle düşük konsantrasyon banyoları yaygın olarak kullanılır [11].

2.1.3. Karışık Katalizörlü Banyolar

Florürlü ya da karışık katalizörlü olarak adlandırılan banyolar 1950 yıllarında ticari olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu kimyasalların yüksek kaplama verimi, genellikle %20-30 (geleneksel banyolara göre %7-15), daha yüksek sertliği, daha fazla korozyon ve aşınma dayanımı olan kaplamalar oluşturur. Kromik asit miktarı 150-370 g/lt aralığındadır ve yaygın olarak 210-450g/lt kullanılır. Ağırlığa göre kromik asit sülfat oranı normalde 150-250:1 arasındadır. Flor, 2-3 g/lt miktarında SiF_6^{-2} olarak eklenir. Bu kimyasal, parlak nikel ve 300 serisi paslanmaz çelik gibi taban malzemelerin kaplanmasında daha iyi taban aktivasyonu sağlar. Geleneksel banyolara nazaran akım kesintisi problemi daha azdır [10].

En büyük sınırlama, flor ya da SiF_6^{-2} içeren kimyasalın parçanın banyo sıcaklığına ısıtılması sırasında çelik alanda kimyasal dağlanmaya neden olmasıdır. Ayrıca düşük akım yoğunluklu oluşan bu alanlar kaplama sürecine girildiğinde dağlanmaya devam eder ve kaplanmazlar [10].

2.1.4. Florsuz Banyolar

Florsuz yüksek hız kimyasalları 1986 yılında ortaya çıkmıştır. Bu kimyasaldan yapılan kaplama, krom kaplamalar içerisinde elde edilebilir en iyi aşınma ve korozyon özelliklerini sağlar. Bu patentli banyo üretim koşullarına göre çoğunlukla 250 g/lt kromik asit, 2,5g/lt sülfat içerir ve verim %20-26' dır. Bu kimyasalda ikinci katalizör olarak patentli katalizör vardır. Kromik asit ve ikinci katalizör seviyesi patentli yardımcı ajanlar tarafından belirlenir. Florsuz bu banyolarda kaplanmamış çeliğe zarar gelmez [10].

2.2. Sert Krom Kaplamaların Endüstriyel Kullanım Alanları

Yıllardan beri elektrolitik sert krom kaplama, segman, valf, hidrolik pompa, kalıp gibi aletler ve makine parçalarının yüzeylerinde aşınma dayanımının artırılmasında önemli rol oynamıştır [7]. Sert krom kaplamanın temel kullanım amaçları; a) aşınma dayanımı uygulamaları, b) takım ömürlerini ve performanslarını arttırma, c) parça kurtarmadır [12].

Kromun elektrolitik kaplanması genelde direk çıplak çelik üzerine olmaktadır ve 0,2-0,4 mm kalınlık aralığında kaplanır. Normalde 0,100-0,130 mm kalınlıklı kaplamalar pek çok uygulama için yeterlidir. Bir çok mühendislik taleplerinde 10-80 mikron aralığında ince kaplamalar aşınmaya karşı etkili koruma sağlar ya da hareketli parçaların birbirine adhezyonunu engeller. 50 mikronun altındaki kalınlıklarda genelde bir bitirme taşlama işlemi gerekmez [13].

Tablo 2.2'de sert krom kaplamanın uygulandığı bazı parçalar ve kaplama kalınlıklarına örnekler verilmiştir [11].

Tablo 2.2. Sert krom kaplamaların uygulama yerleri ve kalınlıkları [11].

Uygulanan parça	Kalınlık (μm)
Bilgisayar yazıcısı	25
Uçak motoru parçaları	75-180
Plastik kalıpları	5-13
Tekstil kılavuzları	5-100
Piston segmanları	150-255
Bilyalı valflerin bilyaları	7,5-13
Mikrometreler	7,5-13
Kilit kutuları	5-7,5
Silindir	255
Krank şaftlar	255-3800
Kesme takımları	1,3
Hidrolik silindir	13
Halka kafesleri	205
Merdaneler	13-255
Şekillendirme kalıpları	25
Silah namlusu	25

a) Aşınma dayanımı: Sert kromun çizilme ve abrazif aşınma nedeniyle piston segmanlarındaki aşınmayı azalmasıdaki etkinliğini belirleyen geniş veriler mevcuttur. Krom kaplamalı bir segmanın ortalama ömrü kaplamasız bir segmana göre yaklaşık 5 kattır. Pek çok motorun piston segmanlarının aşınan kısımları 100 ila 750 μm kalınlıkta kromla kaplanır. Kalınlık bazı zor koşullarda çalışan motorlarda 250 μm kadar çıkar [11].

Otomotiv endüstrisinde sert krom kaplamalar darbe absorblayıcı ve desteklerde aşınma ve korozyonun azaltılması amacıyla kullanılmaktadır. Valf sistemlerinde 0,25 μm kalınlıklı flaş kaplamalar yine aşınmanın azaltılması amacıyla kullanılmaktadır.

2-3 μm kalınlıklı sert krom kaplamalar her tür aracın hidrolik şaftlarında servis süresini arttırmak için kullanılmaktadırlar [11].

b) Takım uygulamaları: Çeşitli tipte takımlarda kullanılan sert krom kaplamanın nedenleri; 1) aşınmayı minimize etmek, 2) yapışma ve sıvanmadan korumak, 3) sürtünmeyi azaltmak, 4) korozyonu azaltmak ya da minimize etmektir. Çelik ya da berilyum bakır plastik kalıpları genelde kromla kaplanır, kaplama kalınlıkları 2,5-125 μm olarak tavsiye edilmektedir [11].

Derin çekme takımlarında takım performansını arttırmak ya da aşınmış parçaları yenilemek veya her iki sebeple 100 μm dan fazla kalınlıklarda sert kromla kaplanır. Çekme halkaları ve zımbaların ömürleri sert krom kaplamayla arttırılabilir. Buna ek olarak kaplama, zımbalardaki sürtünme kuvvetini azaltır ve örneğin çelik yüzeyiyle karşılaşan yapışma yerlerindeki iş parçalarını zımbadan uzaklaştırır. Kesme takımlarının servis süreleri 2,5-13 μm kalınlıklı krom kaplamayla genişletilir. Sert krom kaplama aşırı sıcaklık ve basınç oluşan çeşitli uygulamalarından dolayı soğuk ekstrüzyon takımlarında kullanılmaz [11].

c) Parça yenileme: Sert krom kaplama bazen çalışmayan ya da aşınmış yüzeylerin yenilenmesinde kullanılır. 1970'lerden beri bu tür parçaların yenilenmesinde daha kolay uygulanan plazma ya da ısı püskürtme yöntemleri sert kromun yerini almaktadır. Krom kaplama güvenli bir şekilde kullanılsa da kullanılsa da kırılma tokluğunu önemli miktarda azaltmaktadır [11].

Sert krom kaplama kompresörler ve dizel ya da gaz motorlarındaki geniş krank şaftların aşınmış yüzeylerinin orijinal boyutlarına getirilmesinde kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda kaplama kalınlığı 125 μm dan 1250 μm arasındadır ve kromun düşük sürtünme katsayısı ve iyi aşınma özellikleri oldukça avantajlıdır [11].

d) Diğer uygulamalar: özellikle çalışma süresini uzatmak için yazıcı tabakalarında ve daktilolarda sert krom kaplama kullanılmaktadır. Korozyon, yapışma, kazıma ve diğer aşınma tiplerine karşı dayanım için pres zımbalarında kullanılmaktadır [11].

2.3. Elektrolitik Sert Krom Kaplamaların Özellikleri

Elektrolitik krom kaplamalar dekoratif veya teknik amaçla yapılırlar. Teknik amaçlı yapılan kaplamalar, sert krom kaplama olarak adlandırılmaktadırlar. Sert krom kaplamayı dekoratif krom kaplamadan ayıran başlıca özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- a) Sert krom kaplamalar her şeyden önce fonksiyonel parçaların aşınma, abrasif, ısı ya da korozyon dirençlerini arttırarak servis sürelerini arttırmak için kullanılırlar. Kaplamalar aynı zamanda normalden küçük parçaların boyutlarını yenilemek için de yapılırlar.
- b) Sert krom kaplamalar genellikle 2,5 ila 500 mikron kalınlıkta kaplanırlar. Dekoratif krom kaplamalar nadiren 1,3 mikronu geçerken sert krom kaplamaların bazı uygulamalarında gerçekten büyük kalınlıklar kullanılmaktadır.
- c) Sert krom kaplama prensip olarak direkt taban malzeme üzerine uygulanmalıdır. Dekoratif krom kaplamalar ise nikel ya da bakır kaplamaların üzerine kaplanırlar ve kaplandıkları şekilde kullanılır ya da parlatılırlar [11].

2.3.1. Sertlik

Elektrolitik sert krom kaplamaların sertliğini ölçmek için en güvenilir ve yaygın olarak kullanılan Vickers 136° ve Knoop uçlarıdır. Bu sertlik testleri iyi hazırlanmış kaplama yüzeylerine ve sertlik değerinin taban malzemeden etkilenmeyecek derinliğinde uygulanır. Krom kaplamalardaki çatlaklar sertlik değerini etkiler ayrıca kullanılan uç ve uygulanan yüke de bağlıdır. Genellikle düşük yükler, sertlik değişimlerinde daha hassas olduklarından daha yüksek sertlik değerleri verebilirler

Tablo2.3'de kullanılan uç ve yüklere göre elektrolitik sert krom kaplamanın sertlik değerleri verilmektedir [11].

Tablo 2.3. Elektrolitik sert krom kaplamaların sertlik değerleri [11]

Yük, g	136° elmas piramit, Vickers uç	Knoop uç
100	950-1110	940-1090
500	780-905	685-890

2.3.2. Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Dayanımı

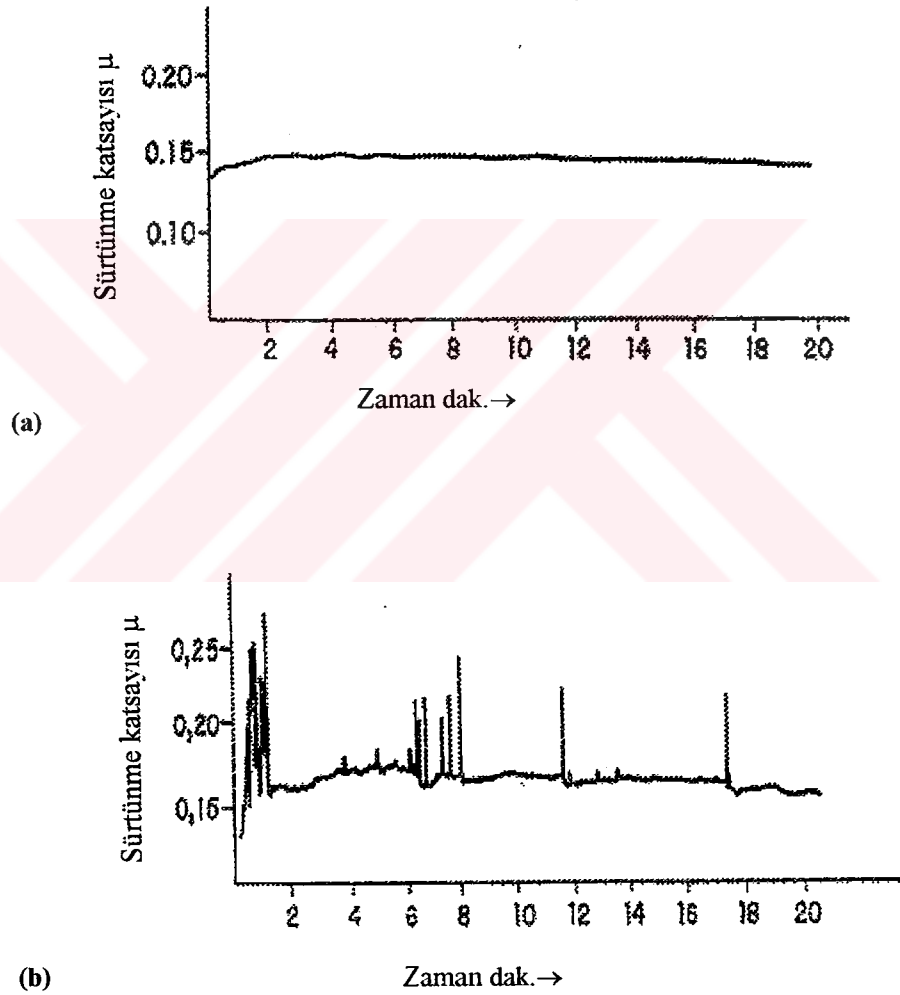
Sert krom kaplamanın endüstriyel alanda ve mühendislik uygulamalarında bu denli önem kazanmış olmasının nedenlerinden biride kaplamanın çok düşük yüzey enerjisine dolayısıyla düşük sürtünme katsayısına sahip olmasıdır [9].

Grigorescu ve diğerleri tarafından çelik taban malzeme üzerine kaplanmış 170 µm sert krom kaplama ve fırça tekniği ile yapılmış nikel ve nikel-kobalt kaplamalar üzerinde iki tip sürtünme ve aşınma testi, sürekli ve karşılıklı kazıma kayma koşullarında yapılmıştır. Sürekli kayma ekipmanı olarak Tikmen modunda Falex ring üzerine blok cihazı ve sabit blok olarak kaplamalı malzeme ve ring olarak karbon çelik kullanılmıştır. Bu test metodu yağlı sürtünmeden kuru sürtünmeye geçişin olduğu yükü ortaya çıkarmaktadır. Yağlayıcı olarak parafinli yağ kullanılmış ve 37 °C' ye önceden ısıtılmıştır. Kayma hızı 123 m dk⁻¹ dır ve normal yük aralığı 62 N - 1112 N' dur. Sürtünme katsayıları deney başında itibaren kaydedilmiş ve sürtünme katsayısı, μ hesaplanmıştır. Aşınma iz genişlikleri optik mikroskopla ölçülmüş ve geometrik yaklaşımla buna bağlı aşınma hacimleri hesaplanmıştır. Sonuçta artan yükler sırasında oluşan yağlanma rejimi sırasında sert krom kaplamanın daha iyi tribolojik özellikte olduğu belirlenmiştir. Bu etki krom kaplamadaki çatlakların özelliğidir. Çatlaklar sıvı ile dolan alanı genişleterek yağlayıcının hidrodinamik bileşenini artırır, böylelikle yük taşıma kapasitesi de artmış olur. Düşük yüklerde sert krom kaplama incelendiğinde çelik halkanın tercihi olarak aşındığı ve demir ve demir oksitçe zengin, az oranda Cr₂O₃ içeren küçük parçaların olduğu görülmüştür. Krom kaplamanın aşınma izinde EDS ile Fe varlığı belirlenmiştir. Tüm kimyasal kanıtlar kısmen yağlanmış yüzeylerde karşılıklı oluşan ürünlerin yapışma ve kırılma teorisini desteklemektedir [14].

Karşılıklı kazıma sürtünme ve aşınma deneyleri silindir-plaka test cihazında yürütülmüştür. Bu deneylerde kaplamalı numuneler sabit diskler olarak kullanılmıştır. **EC YÜKSEK GÜÇLÜ RİTİM KURULU**
DOĞRULAMA VE KONTROL MERKEZİ

kullanılmıştır. Standart salınım silindiri olarak 62-63 Rc sertlikli 100Cr6 çeliği kullanılmıştır. Yağlayıcı olarak parafinli yağ ve 20-25 N yük aralığı, 570 μm genlik, 50 Hz frekans, 95 °C sıcaklık ve 20-120 dakika deney parametreleri kullanılmıştır [14].

Plaka üzerinde silindir aşınma testlerinin temel sonucu, zamana bağlı μ değerlerinin miktarsal analizleriyle karşılıklı kazıma kayma sisteminde oluşan yağlı ortam aşınma mekanizmalarının belirlenmesidir. Aşınma izlerinin şekilsizliğinden ve aşınma sınırlarının düşük kontrastından dolayı aşınma yoğunlukları belirlenememiştir [14].



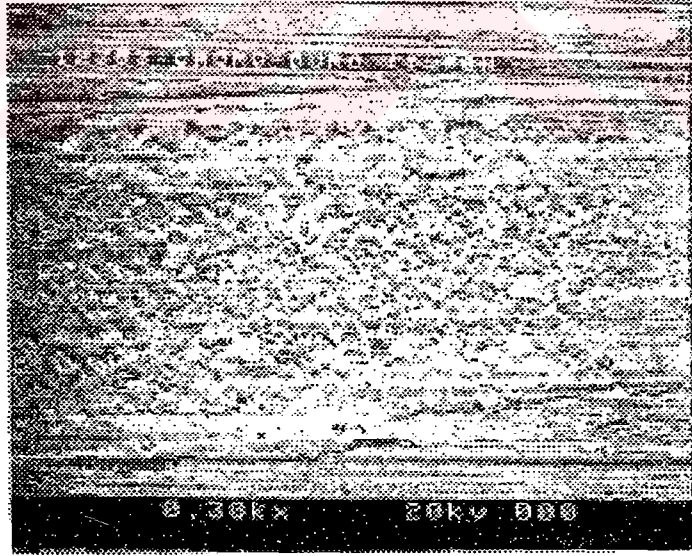
Şekil 2.1. Krom kaplamaya çelik silindirle yapılan plaka üzeri silindir aşınma testleri sonucu, zamana bağlı sürtünme katsayıları (a) 60 N, (b) 70 N [14].

Benzer test koşullarında zamanla sürtünme katsayısındaki değişim değerlerinde değişiklik görülmemiştir. Ayrıca sıcaklık, metalurjik karakteristikler, kontak basıncı gibi test parametreleriyle bu değerler arasında bir ilişki kurulamamıştır. Yine

morfolojik çalışmalar, zamana bağlı sürtünme katsayısı ile aşınma izinin yüzey topografyası arasında bir ilişkinin varolduğunu göstermektedir [14].

şekil 2.1' de verilen zamana bağlı sürtünme katsayıları sert malzemelerin tipik davranışını göstermektedir. İncelmiş aşınma izlerinde, düşük ve sabit ya da az değişimli sürtünme katsayısı olan numunelerde serbest yüzey kırıklarının kanıtları görülmüştür. Benzer zamana bağlı sürtünme katsayıları için, ancak daha yüksek yüklerde önceden oluşmuş mikro çatlakların içerisinde bir koruyucu sıvı tutulması görülmektedir (şekil 2.2). Buna ek olarak aşınma izlerinde farkına varılır miktarda demir bulunmuştur. Bu morfolojik ve kimyasal kanıtlar sabit gibi görünen sürtünme katsayıları ile kısmi yapışma yağlı ortam aşınma prosesi düşüncesini desteklemektedir [14].

Zamana bağlı sürtünme katsayılarında kaydedilen geçici artışlar, numunenin geçici metal-metal kontağıyla üretilmiş çeşitli metal hasarlarını göstermektedir. Yağ filminde birdenbire oluşan yırtılma ve yenilenmenin sürtünme katsayısında yükselmelere yansıdağı düşünülmektedir [14].



şekil 2.2. 70 N yükle yapılmış plaka üzerinde silindir aşınma testi sonucunda Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü [14].

Tüm yük aralığında oluşan karışık yağlama rejiminde sert krom kaplama en iyi performansı göstermiştir. Plaka üzerinde silindir karşılıklı kazıma kayma testinde sürtünme katsayısı değerleri aşınma mekanizmasının belirlenmesine olanak

sağlamaktadır. Sabit ve düşük sürtünme katsayısı değerlerinin karışık-sıvı-yapışma sürtünme ve aşınma mekanizmasına benzediği görülmektedir [14].

Komvopoulos ve diğerlerinin sınır yağlama koşullarında aşınma mekanizmasını araştırmak için yapmış oldukları çalışmada ise alüminyum, oksijensiz yüksek iletken bakır ve çelik üzerine 125 µm kalınlıklı elektrolitik krom kaplama kullanılmıştır. Katkısız mineral yağı yağlayıcı olarak kullanmışlar, parlatılmış ve temizlenmiş numuneler üzerinde disk üzerinde pin aşınma deneyleri yapmışlardır. Tüm deneylerde 2 N normal yük ve 0,6-4,3 cm s⁻¹ kayma hızı kullanılmıştır. Bu deney koşullarında, düşük yük ve yüksek hızlarda ortaya çıkan hidrodinamik etki ortaya çıkmamaktadır [15].

Profilometrik ölçüm sonuçlarına göre tüm numunelerde kayma mesafesinin artmasıyla yüzey topografyasında bir değişme meydana gelmektedir. Tüm numunelerin yüzeylerinin iyi bir şekilde parlatılmasına ve temizlenmesine rağmen yüzeyde aşınma ürünleri oluşumu ve oyukların açılması söz konusudur. Daha fazla oyuk ve aşınma ürünleri kayma devam ettikçe oluşur. Aşınma partikülleri yağ tarafından uzaklaştırılır ve azalmaya başlar ya da yüzeylerden birine yapışırlar. Krom kaplamada alüminyum ve bakırda oluşan sert geçişler görülmemiştir, ayrıca aşınma oyğunun derinliği ve genişliği de daha azdır. Buna göre artan sertlik değeriyle birlikte oyğun derinliği ve genişliğinde azalma vardır. Hesaplanan sürtünme katsayısı değerlerine ve aşınma oranlarına göre krom kaplama en az aşınan numune olmuştur. Bu sonuçlara göre malzemenin sertliği sınır yağlama koşullarında önemli bir rol oynamaktadır [15].

Komvopoulos'un yapmış olduğu araştırma sonucu, sınır yağlamadaki aşınma ürünlerinin rolünü göstermektedir. İyi parlatılmış ve temizlenmiş yüzeylerde kaymadan hemen sonra oluşan oyuklar aşınma ürünlerinin izlerin açılmasına etkisinin bir şekli olarak açıklanabilir. Kayma başladığı zaman pürüzlü yerler plastik olarak deforme olur ve sonuçta kırılır, küçük aşınma ürünleri oluşur ve bu abrazif aşınma tipi aşınma mekanizmasını başlatır. Bu partiküller kayma yüzeylerine yapışır ya da çizilmeye neden olur, sonuçta karşıt yüzeyde mikroklesikler ve izler oluşur. Aşınma ürünlerinin oyuklar açma ve mikro kesme hareketlerini göstermesi, sınır yağlama koşullarında öncelikli aşınma mekanizmasının abrazif tipte olduğunu ve yapışmanın toplam aşınmada ikincil etken olduğunu kanıtlamaktadır [15].

Elektrolitik sert krom kaplamanın bazı kaplamalardan daha üstün özellikte olduğunu gösteren başka çalışmalar da mevcuttur. Bunlardan Gawne ve Ma yaptıkları araştırmada, karbon çeliği üzerine 40 µm kalınlıklı üç tip sert krom kaplama, bir çatlaksız krom, iki elektrolitik nikel, bir akımsız nikel kaplamışlardır. Krom kaplamalardan birine ve akımsız nikel kaplamaya ısıtma işlemi uygulanmıştır. Aşınma performansları yağsız kuru ortamda Taber aşındırıcısı, Falex makinesi, karşılıklı kazıma elmas çizik tekniği, disk üzerinde pin testi ile incelenmiştir. Testler %60 bağıl nem ve 20 °C ortamında yapılmıştır [16].

2 kg yük altında elmas uç ile yapılan karşılıklı kazıma elmas çizik testinde aşınma, çizik oyğunun derinliği ile belirlenmiştir. Aşınmanın plastik deformasyon ve kırılma mekanizmaları tarafından oluşturulduğu belirlenmiştir. Akımsız nikel ve geleneksel krom kaplamalardaki aşınma oranı oldukça düşüktür, çatlaksız krom ve elektrolitik nikel kaplamada ise aşınma oranları yüksektir. Aşınma oranının düşük olduğu kaplamalardaki aşınma izleri üzerindeki taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde, kayma yönünde malzemede sıvanmalar, aşınma izinin kenarlarında plastik akış ve sünek yırtılmalar görülmüştür. Bu, fark edilir sünekliliği ve öncelikli olarak plastik deformasyon tarafından meydana getirilen aşınma izinin içinden gerekli malzeme çıkışını kanıtlamaktadır [16].

Tablo 2.4. Karşılıklı kazıma elmas çizik ve Falex testlerinde oluşan aşınma oranları; Cr A; geleneksel sert krom kaplama, Cr D; çatlaksız krom kaplama, EN: akımsız nikel kaplama [16].

Test metodu	Relatif aşınma oranları				
	Cr A 600	Cr D	EN	EN 400	EN 600
Karşılıklı kazıma Elmas çizik	2	71	14	46	33
Falex	—	—	165	32	19

Karbon çeliğinin karşıt malzeme olarak kullanıldığı Falex ve disk üzerinde pin testlerinde ise elmas çizik testinden farklı bir sıralama görülmektedir. Buradaki aşınma mekanizması abrazyondan yapışmaya transfer olmaktadır ve yine krom kaplamada görülen aşınma oranı diğerlerinden daha düşüktür. Tablo 2.4’ de iki ayrı test metodu ve bunların sonucunda hesaplanan aşınma oranları verilmiştir [16].

Krom kaplamalarda görülen düşük sürtünme katsayısı, aşınma yüzeyinin ince bir oksit tabakası ile pasif hale gelmesi nedeniyledir. Yüzeyde oluşan Cr_2O_3 filmi iki metalin kontağını kesen bariyer rolü görür. Çelik yüzeyine karşı gelen yüzeye yapışmayla gelen malzeme transferini engeller [16].

Gawne ve diğerlerinin yapmış oldukları bu çalışmada krom kaplamaların akımsız ve elektrolitik nikel kaplamalara oranla oldukça farklı aşınma oranları ve sertlikleri gösterdikleri ancak bu özellikler arasında bir ilgi olmadığı gözlenmemiştir. Yapılan tüm testlerde geleneksel krom kaplamaların diğer kaplamalara nazaran daha düşük aşınma oranlarına sahip oldukları görülmüştür [16].

2.3.3. Korozyon ve Sıcaklık Dayanımı

Sıcaklığın elektrolitik krom kaplamanın sertliği üzerindeki etkisi aşınma dayanımının içinde olduğu uygulamalarda önemli bir faktördür. Yaklaşık 205°C üzerindeki sıcaklıklarda elektrolitik metal kaplamanın sertliğinde azalma başlar. Sertlik sıcaklıkla azalmaya devam eder. Kaplamanın aşınma dayanımı da azalan sertlikten etkilenebilir. Krom kaplamalar uygulama sıcaklığının 420°C üzerinde olduğu durumlarda aşınma dayanımı amacıyla kullanılmamalıdır [11].

Birçok uygulamada sert krom kaplama kimyasal ve karşı tesirli temel maddelerin etkilerine dayanmaktadır. Kaplamanın koruyuculuk özellikleri birçok faktöre bağlıdır. Bunlardan en önemlisi kaplanan metalin çok ince tane yapısına sahip olması gerekliliğidir. Oksitleyici ve redükleyici reaktiflere karşı direnç ve yüksek oksitlenme sıcaklığı da aranan özelliklerdir [9].

Ana metalle galvanik çift oluşturulduğunda ve krom katodik olarak davrandığında kaplamada porozite olmaması istenir [9]. Çatlaklı yapısından dolayı çelik taban malzemeyi korozyona karşı çok az korur ya da koruyamaz. Kalınlığın 80 mikron olması durumunda korozyondan korunma sağlanabilir [13].

2.3.4. Çatlaklı Yapı

Elektrolitik krom kaplama sırasında yüzeyde çatlaklar oluşmaktadır. Yüzey genellikle, etrafı tamamen çatlak sınırlarıyla çevrilmiş çatlaksız bölgelerden oluşmaktadır [11].

Elektrolitik sert krom kaplama yüzeylerinde oluşan mikroçatlakların sebebi kaplama prosesi sırasında gelişen yüksek iç gerilmelerdir [17].

Elektrolitik kaplama prosesi sırasında oluşan mikroçatlaklar elektrolitik krom kaplamanın hem korozyon dayanımının hem de aşınma dayanımının düşmesine neden olmaktadır. Bu çatlaklar halen elektrolitik sert krom kaplamanın uygulama alanlarında sınırlamaya neden olmaktadır [18].

Grigorescu' nun[14] belirttiği yağlı ortam koşullarında sert krom kaplamada sıvı yağlayıcının çatlaklar içine dolmasının yük kapasitesini, aşınma dayanımını arttırmasına ek olarak Martyak' ın[17] çalışmasına bakıldığında çatlakların aşınmada en önemli etken olmadığı görülmektedir.

Martyak' ın çalışmasında iki farklı banyodan yapılmış sert krom kaplamaların yüzey yapısı ve aşınma davranışları değerlendirilmiştir. Kaplamalardan birinde çatlakların oluşturduğu yüzey boşluklarının hacmi diğerine göre yaklaşık iki kat daha fazladır. Bu kaplamada yağlı ortamda aşınma özelliğinin, yüzeydeki çatlakların içersine biriken sıvı yağlayıcı etkisiyle geliştiği düşünülmektedir. Yüzeyi daha düzgün olan kaplamada ise çatlak yoğunluğunun azlığına rağmen yağlı ortam aşınma dayanımında artıştan söz edilmiştir. Bu da krom kaplamaların yüzeylerindeki çatlakların aşınma performansında birincil etken olmadıklarını düşündürmektedir [17].

Krom kaplamaların yüzey topografyasının tribolojik davranışına etkisini incelemek için Arieta ve Gawne [19], kaplamaların ıslanabilirliklerini ve mukavemetini yağlı ortam koşullarında incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada üç farklı üretim parametresiyle oluşturdukları farklı yüzey yapılarına sahip sert krom kaplamaların aşınmalarını disk üzerinde top karşılıklı kazıma cihazında test etmişlerdir. Aşınma dayancı belirli bir yük altında kaplamada hasarın görünmeye başladığı çevrim sayısına bağlı olarak belirlenmiştir. 25 ila 55 kg yük altında yapılan deneyler sonucunda nodüler yüzey yapısına sahip olan ve nodüller arasındaki boşluklarla yağlayıcı yağın dağılmasını sağlayarak en iyi ıslanabilirlik özelliğine sahip numunenin aşınma dayancının en iyi olduğu görülmüştür. Artan yüklerle beraber kaplamanın aşınma mukavemeti azalmaktadır. Bu durum tüm numunelerde aynıdır. Yüzeyi daha düz olan geleneksel krom kaplama özelliğine sahip numune mukavemet

sıralamasında ikinci yeri almaktadır. Anodik dağlama ile yüzeyinde çatlakların en geniş olduğu ve çatlak yoğunluğunun en fazla olduğu numune ise mukavemet açısından en kötü durumdaki numunedir. Yine de aşınma açısından kötü görünen bu numune ıslanabilirlik açısından ikinci sırada yer almaktadır. Buradan  ıkarılan sonuca göre kaplamaların mukavemeti ıslanabilirlik değerleri ile doğrudan ilgili değildir. Malzemenin topografyası ıslanabilirlik ve kırılma üzerinde etkili olduğu kadar mukavemeti üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Bu bulgular krom kaplamanın yağlı ortamda kayması sırasında bir yorulma mekanizmasıyla yetersiz hale geldiği görüşünü desteklemektedir [19].



3. ELEKTROLİTİK SERT KROM KAPLAMA ALTERNATİFLERİ

Elektrolitik sert krom kaplama tüm dünyada milyonlarca farklı ürün üzerinde dekoratif olarak, korozyon ve aşınmaya karşı koruyucu tabaka olarak kullanılmaktadır. Bu kaplamalar altı değerli krom iyonları (Cr^{+6}) içeren çözeltilerden üretilirler. Tüm çevre yasaları içerisinde Cr^{+6} kanserojen olarak sınıflandırılmıştır. Sert krom kaplama, 6 değerli krom içeren fazla miktarlardaki zehirli atık, hava kirliliği ve su kirleticiler oluşturmaktadır. Bu nedenle yıllardan beri alternatif prosesler, malzemeler ve yeni tasarımlar araştırılmaktadır [2- 6, 20].

3.1. Elektrolitik Kaplamalar

Uygulanabilir alternatifler arayışında altı değerli kromdan daha az sağlık ve güvenlik riski olan diğer elektrolitik metotlar da yer almaktadır. Üç değerli krom tuzu içeren banyolardan krom kaplama elde edilmesi yolu birinci adım olarak atılmıştır. Üç değerli kromun kullanımı ve elden çıkarılmasında daha az yasal kısıtlama vardır. Bu nedenle elektrolitik sert kroma eşit özelliklerde istenen kaplamalarda krom temelli alternatiflerin kullanımı seçilmektedir [21]. Üç değerli krom kaplamalar, altı değerli krom kaplama alternatifidirler. Daha hızlı kaplama hızı, artan kaplama gücü ve yanmanın azaltılması bazı avantajlarıdır. Ancak yaygın olarak kabul görmemişlerdir. Dekoratif kaplamalarda biraz farklı renklidirler, kaplama prosesi kontrolü zordur ve kalın ve sert kaplama için yaygın bir proses değildir. Kalın ve sert altı değerli kromun yerini alabilmesi için kalın üç değerli krom prosesinin ticari olarak tanıtma üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir [22].

Alaşım kaplamalar krom alternatifi olarak araştırılmaya başlanmıştır. Nikel-Tungsten-Bor sert krom yerine kullanılmaya başlamıştır. Bu kaplama asit içinde mükemmel korozyon dayanımıyla beraber bariyer tipi koruma da sağlar. %35 tungsten içeren amorf –nanokristalin kompoziti ısıtılma işleminden sonra 950-1050 HV sertliğe sahip olmaktadır. Bu kaplama sert krom kaplamanın alternatifi olarak görülmektedir [22].

Geleneksel hipofosfit çözeltilerinden elde edilen akımsız Nikel-fosfor kaplamalarda krom kaplamalar yerine kullanılmaktadır. Borhidrür kimyasalından elde edilen akımsız nikel kaplamalar krom alternatifi olarak daha çok tercih edilmektedirler; çünkü krom kaplamalardan daha iyi aşınma, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek sertliğe sahiptirler. Nikel-bor altı değerli krom yerine tercih edilmektedirler. Bu kaplamalar cam üretiminde, jet motorlarında başarıyla kullanılmaktadırlar [22].

Bölüm 2.3.2' de yer alan Gawne' nin [16] çalışmasında geleneksel hipofosfit çözeltisinden elde edilen akımsız nikel kaplama ile elektrolitik sert krom kaplamanın aşınma davranışları kuru ortamda, 2 kg yük altında karşılıklı kazıma elmas çizik testi ile karşılaştırılmıştır ve sert kromun daha iyi aşınma özelliklerine sahip olduğu görülmüştür.

3.2. İyon İmplantasyonu

1970' li yıllardan beri yüksek dozda karbon, azot ve metalik iyonların implantasyonu aşınma, yorulma ve korozyon problemleri olan birçok aletin performansını geliştirmek ve ömürlerini uzatmak için etkili bir çözüm olmuştur [23]. Plazma kaynaklı iyon implantasyonu otomotiv endüstrisinde hafif malzemelerde, takımlarda ve kalıplarda, yarı iletkenlerde ve de sert krom kaplamaların geliştirilmesinde ya da yerine kullanılmasında uygulama alanlarına sahiptir [24].

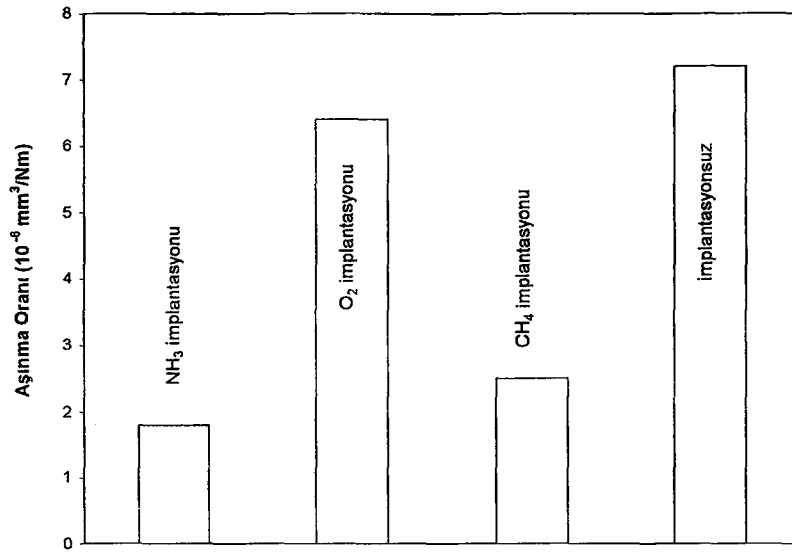
Uygulamalarda aşınma dayanımının artırılması için parçalar sert krom kaplanırlar ve kaplama aşınana kadar kullanılırlar daha sonra tekrar kaplanırlar. Eğer sert krom kaplamanın kullanım ömrü, çevre dostu çeşitli son işlemlerle artırılabilirse bu yeniden kaplama miktarını azaltarak çevreye bırakılan Cr^{+6} miktarını azalabilir [5].

Kuru ve düşük sıcaklıklarda uygulanan bir yüzey geliştirme yöntemi olan iyon implantasyonu malzemelerin aşınma ve korozyon dayanımını arttırmada oldukça etkilidir. Özellikle azot iyon implantasyonu metalurjik ve ortopedik uygulamalar için geniş olarak araştırılmaktadır. Bununla beraber, sert krom kaplamanın bir çok uygulaması için istenen aşınma ve korozyon dayanımını sağlayacak iyon implantasyonu yapılmış yüzey tabakaları sistemin doğası nedeniyle çok incedir [3].

Krom kaplama ile iyon implantasyonu tekniğinin kombinasyonu hem Cr^{+6} kullanımını azaltabilir hem de bu yöntemlerden tek başına elde edilecek aşınma ve korozyon özelliklerinden daha iyi sonuçlar elde edilir. Bu kombine proses, sert krom kaplamadaki çatlakları kapatmaya yarayan sıkıştırma gerilimi üreten yüzeye yakın yerlerdeki yüksek azot konsantrasyonundan dolayı oldukça etkilidir. Yüzeye yakın yerde implantasyon tabakası arkasında kalan geniş çatlakların implantasyon sonucu kapandığına dair bir deneysel kanıt bulunamamıştır. Buna ek olarak azot implantasyonu ile krom, krom nitrür formunu alır ve bu krom metalinden daha serttir ve aşınma dayanımının artmasını sağlar [25, 26].

Kroma azot iyon implantasyonu son yıllarda ilgi çekmektedir. Özellikle sert CrN faz formlarında önemli sertlik gelişimleri mevcuttur. Ayrıca azot iyon implantasyonu ile sürtünme katsayısında azalma ve bununla birlikte aşınma mekanizmasında değişiklikler olmaktadır. Azot iyon implantasyonu ile sertleşmenin sağlandığı krom kaplamaların çevre açısından yararı: a) krom kaplamanın yeniden kaplama sıklığının azaltılması. b) krom kaplamanın kalınlığının azaltılması olacaktır [3].

Walter ve diğ. yaptıkları çalışmada, paslanmaz çelik taban malzeme üzerine 50 mikronluk krom kaplama yapmışlardır. Kaplama yüzeylerine, Plazma Kaynaklı İyon İmplantasyon yöntemiyle azot, karbon ve oksijen implantasyonu yapılmıştır. İyon implantasyonu yapılmış ve hiçbir işlem yapılmamış elektrolitik kaplamalara kuru ortamda, 6 mm çaplı Al_2O_3/Cr top kullanılarak 0,8 N yükle disk üzerinde pin aşınma deneyi yapılmıştır. %50 nem oranında açık havada yapılan aşınma testinde kayma hızı 8 cm/s ve toplam kayma mesafesi 300 metredir. Deney sonuçlarında aşınma oranları, aşınma izlerinin hacimleri, yük ve kayma mesafesine göre hesaplanmıştır. Şekil 3.1' de yer alan sonuçlara göre implantasyon yapılmamış sert krom kaplamadaki aşınma oranın diğerlerine göre fazla olduğu görülmektedir [5].



Şekil 3.1. Disk üzerinde pin aşınma deneyinde alümina topa karşı gelen implantasyon yapılmış ve yapılmamış sert krom yüzeylerin aşınma oranları [5].

Chen ve diğerlerinin plazma kaynaklı iyon implantasyonu üzerinde yapmış oldukları araştırmada çelik üzerine 25 µm kalınlıklı sert krom kaplamaya azot implantasyonu yapılmıştır. Yapılan kaplamaların aşınma davranışlarını incelemek için yağlı ortamda disk üzerinde pin aşınma testi uygulanmıştır. Karşıt malzeme olarak alümina top, 100g yük altında 4 saat 1,4 m dk⁻¹ kayma hızı ve yağlayıcı olarak WD-40 kullanılmıştır. Aşınma direncini belirlemek için aşınma derinlikleri profilometrede incelenmiştir. İmplantasyon yapılmamış sert krom kaplamadaki aşınma izinin derinliği 1,3 µm' dur. İmplantasyon yapılmış kaplamalardaki aşınma izleri normal pürüzlülükten ayırt edilememiştir. Aynı çalışmada, sert kroma oranla implantasyon yapılmış numunelerin sertliğinde artış ve sürtünme kuvvetlerinde azalma gözlenmiştir [3].

Geleneksel iyon implantasyon metotları pahalı görünmekle birlikte yaygın üretim yöntemleri içinde ticari açıdan uygulaması komplekstir [3].

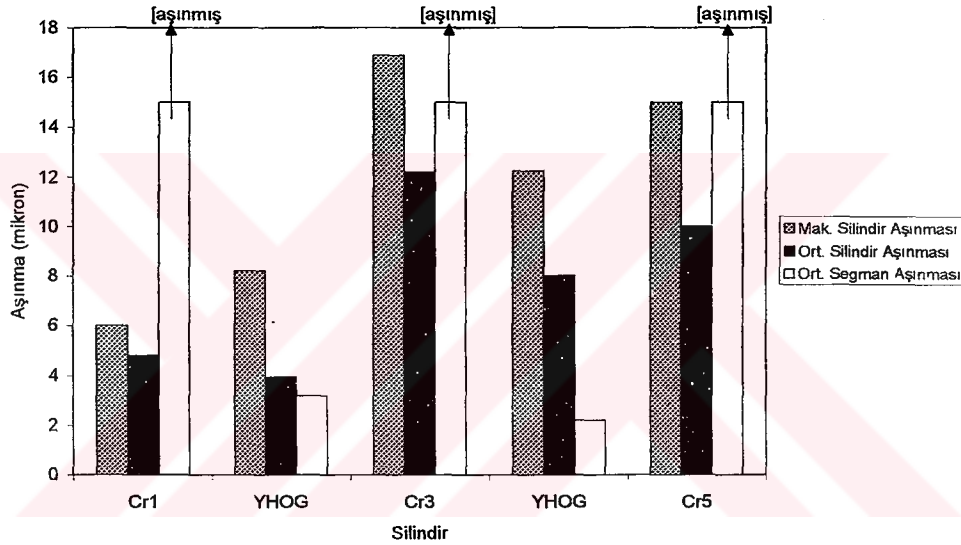
3.3. Isıl Püskürtme

Yüksek hızda oksitleyici gaz (YHOG) püskürtme yöntemi sert krom kaplamaya alternatif olarak görülmektedir. YHOG kaplamalar genelde diğer ısı püskürtme yöntemlerine göre yüksek yapışma ve yapışma mukavemeti ile daha yoğun

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DENEYİMLERİ MERKEZİ**

üretilmektedirler [4]. YHOG yöntemiyle Sert krom kaplamaya nazaran kaplama yoğunluğu, korozyon dayanımı daha yüksek, daha homojen kaplama üretilir [22].

Segmanlarda kullanımı yaygın ve önemli yeri olan sert krom kapmalar yerine aranan kaplama araştırmaları iki konu üzerinde odaklanmıştır: 1) segmanlarda kullanılan krom kaplamadan daha ucuz kaplama üretilmesi, 2) en az sert krom kaplama kadar iyi performansa sahip olması. Isıl püskürtme ile yapılan kaplamalar kazıma koşullarında krom kaplama yerine kullanılmaktadırlar. Plazma sprej kaplamalar kazıma için iyi performans göstermelerine karşın aşınma açısından performansları iyi değildir [4].



Şekil 3.2. Abrazif şartlarda 500 saatlik motor testinde kaplamasız silindir ve kaplamalı segmanların aşınması, Cr1, Cr3, Cr5; elektrolitik sert krom, YHOG; yüksek hızda oksitleyici gaz yöntemiyle üretilmiş Cr_3C_2 kompozit kaplama [20].

Yüksek hızda oksitleyici gaz kaplamalar pek çok alaşımla ve bazı kompozitlerle yapılabilir ve yenileme işlemlerine uygun olması için 1 mm den daha fazla kalınlıklarda kaplanabilir. Ateşteki toz partiküller için kalma zamanının limitli olmasıyla sınırlandırmasından dolayı YHOG yüksek erime sıcaklığındaki seramikler için kullanılamazlar. Bununla beraber, seramik partiküllerinin değil sadece matris metalin erimesi gerekli olduğu WC-Co ve Cr_3C_2 -NiCr gibi kompozitlerle ve aşınmaya dayanıklı alaşımlarla başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 3.2' de sert krom ve YHOG yöntemi ile Cr_3C_2 -kompoziti kaplanmış segmanlara yapılmış motor testinin

sonuçları görülmektedir. Sonuçlara göre tüm sert krom kaplamalar kötü sonuçlar vermiştir, YHOG kaplamalar ise daha az aşınmıştır [20].

Motorlarda yapılan testlere göre YHOG yöntemiyle kaplanan segmanlardaki aşınma krom kaplamalardakine nazaran 6 kat daha azdır, silindirlerdeki aşınma ise 3 kat daha azdır [4].

YHOG kaplamaların bitirme işlemleri sert krom kaplamaya göre daha kolay ve daha ucuzdur[20]. Sert, aşınma dirençli kaplamalar üreten bu teknik elektrolitik sert krom kaplamaya alternatif bir teknik görülmektedir [4, 27].

3.4. Vakum Teknikleri

Vakum teknikleri elektrolitik sert krom kaplamaya alternatif olarak gösterilmektedirler. Vakum yöntemleriyle metaller dahil olmak üzere nitrürler, oksitler, karbürler, karbonitrürler ve her biri nanometre kalınlığında çok katlı kaplamalar yapılabilir. Genel olarak bu teknikler öncelikle kimyasal buhar biriktirme (KBB) ve fiziksel buhar biriktirme (FBB) olarak ikiye ayrılmaktadır [28].

Fiziksel buhar biriktirme teknolojisi, yarı iletkenlerde iletken metalik tabakalar, CD'lerde yansıtıcı Al tabakalar, düz camlarda geçici geçirgen tabakalar ve profesyonel takımlarda seramik aşınma dayanımlı tabakalarda uygulanmaktadır. Son yıllarda aşınmaya dirençli FBB kaplamalar başarıyla uygulanmaktadır [1]. FBB kaplamalar genellikle takım çeliklerinde ve tungsten karbür takımlarda çok iyi performansla kullanılmaktadırlar [20].

Prensip olarak FBB kaplama metodu; mikroyapıyı etkileyerek, çok katlı kaplamalar oluşturularak, bileşimi değiştirilerek kaplama özelliklerinde ayarlama yapılabilme kolaylığına sahiptir. Bu özelliklerde ayarlama yapılması kolaylığı ile mühendislik spesifik kaplama özelliklerinin sert kromdan daha iyi olmasına imkan sağlamaktadır [1].

Fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle üretilmiş TiN kaplamalar üzerinde pek çok araştırma yapılmıştır. TiN kaplamalar aşınma dayanımını oldukça geliştirmesine karşı korozyondan korumada çoğunlukla yetersiz kalmaktadır. Bu araştırmalar olumlu sonuçların elde edildiği CrN kaplamalar ile devam etmiştir [29]. İyi aşınma ve

korozyon özellikleriyle FBB CrN kaplamalar endüstride Cr^{+6} ile üretilen elektrolitik sert krom kaplamanın kısmen ya da tamamen yerini alabilir [30].

Sert krom kaplamaya alternatif olarak gösterilen uygulanabilir yöntemler arasında fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle üretilmiş özellikle Cr-N kaplamalar son 15 yıldır geniş çapta araştırılmaktadır. İyi oksidasyon özelliğiyle Cr-N sistemleri sıçratma, katodik ark ve elektron demeti ile buharlaştırma yöntemleriyle yapılan sert kaplamalardır. Farklı üretim tekniklerinden bağımsız olarak Cr, Cr-N, Cr_2N , $\text{Cr}_2\text{N/CrN}$ karışımı ve CrN fazları N_2 reaktif gaz kısmi basıncına bağlı olarak her birinde ortaya çıkmaktadır. Bileşimi $\text{CrN}_{0,1}$ ’ den stokiometrik CrN arasındaki fazlarında sertlik değerleri 1700-2400 HV arasındadır [7].

Broszeit ve diğ., magnetron sıçratma FBB tekniğiyle üretilmiş CrN ve Cr_2N (6-8 μm) ile elektrolitik krom (100 μm) kaplamalara disk üzerinde ring aşınma deneyleri yapmışlardır. Ringlerin kaplamalı malzeme olduğu ve 50 N yük altında, 50 °C’ de dizel motor yağının kullanıldığı aşınma deneylerinde kayma mesafesi 720 m ve kayma hızı 0,01 m/s’ dir. Aşınma deneyleri sonucunda FBB kaplamaların aşınmayı elektrolitik kromla karşılaştırıldığında yaklaşık 1/10 azalttığı görülmüştür. Sürtünme katsayılarında ise birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir [31, 32].

Lyubimov ve diğerlerinin yapmış oldukları çalışmada ise çok katlı ark FBB kaplamalar ile elektrolitik sert krom kaplanmış piston segmanlarının içten yanmalı motor içersindeki aşınmaları incelenmiştir. Sonuç olarak çok katlı FBB kaplamaların servis sürelerinde elektrolitik krom kaplamalı olanlara göre arttığı gözlenmiştir. Ayrıca silindirdeki aşınmanın da %30 kadar düştüğü görülmüştür [33].

4. KROM NİTRÜR KAPLAMALAR

Son 12 yıldır kesme ve şekillendirme takımlarında ve mekanik parçalarda, aşınma ve korozyon dayanımını arttıran TiN, TiC gibi ince sert filmlerin uygulanmasıyla servis ömrünün uzatılması başarılmıştır. Yüksek sertlik ve görünüm özellikleriyle TiN fiziksel buhar biriktirme ya da kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle üretilerek takımlardan, mekanik parçalardan dekoratif amaçlara kadar bir çok endüstriyel alanda başarıyla uygulanmaktadır. CrN kaplamalar, TiN kaplamalardan sonra oldukça ilgi çekmiş ve piyasalarda CrN kaplamalı takımlar yer almıştır. TiN sert seramik kaplamalar halen kullanımı en yaygın kaplama olmasına karşın CrN kaplamaların bazı özellikler ile TiN kaplamalara oranla daha iyi olduğunu gösteren bazı araştırmalar mevcuttur [12, 34-36].

CrN kaplamaların sertlik ve korozyon direnci yüksektir. Araştırmalar CrN kaplamaların termal kararlılığının ve korozyon dayanımının TiN kaplamalardan daha iyi olduğunu göstermektedir [37]. Bu özelliklerinin yanı sıra düşük sürtünme katsayısı ve yüksek tokluğa sahiptirler [35].

4.1. CrN Kaplamaların Üretim Yöntemleri

CrN kaplamalar, gaz fazındaki kimyasal buhar biriktirme (KBB) ve fiziksel buhar biriktirme (FBB) yöntemleriyle kaplanırlar. Temel KBB prosesinde kaplanacak elementler bir reaksiyon kabı içerisinde aktifleştirilir ve taban malzeme üzerine yoğunlaştırılarak biriktirilir [38].

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi vakum altında bulundurulmuş malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomların yüzeyden kopartılması ve kaplanacak taban malzeme yüzeyine biriktirilmesi esasına dayanır [38].

4.2. Katodik Ark FBB Yöntemiyle Üretilen CrN Kaplamalar

CrN kaplamalar oyuk katod, iyon demeti destekli biriktirme, manyetik alanda sıçratma, katodik ark buharlaştırma gibi çeşitli fiziksel buhar biriktirme yöntemleriyle kaplanmaktadır. Katodik ark buharlaştırma prosesi, yüksek verim ve yüksek iyon-akım yoğunluğu nedeniyle tribolojik uygulamalar için CrN kaplamaların üretimde yaygın olarak kullanılmaktadır [39].

Katodik ark FBB sisteminde, buhar fazının elde edileceği malzeme vakum odasına katod olarak, kaplanacak malzeme anot olarak bağlanır. Sisteme uygulanan düşük voltaj ve yüksek akım etkisiyle katod yüzeyinde ark meydana gelir. Katod yüzeyinde arkin meydana geldiği noktalarda sıcaklığın çok yüksek değerlere ulaşması, bu noktalarda ergime ve buharlaşmalara neden olur. Burada meydana gelen buhar fazı, katod önündeki yüksek elektron yoğunluklu bölgede çarpışmalara maruz kalarak hızla iyonize olur. Homojen olmayan potansiyel dağılımı nedeniyle iyonlar bu bölgeden hızla uzaklaştırılırlar. Bias voltajı uygulanmış taban malzemeye doğru yönlendirilen iyonlar reaktif gazla reaksiyona girerek taban malzeme üzerinde biriktirilirlir [38].

Yüksek proses sıcaklığı ve sıcak katot noktalarında iri dropletlerin çıkması spesifik malzemelere ve parçalara uygulanmasını sınırlamasıyla beraber, bazı uygulamalarda bu yüksek ısı yükü ve yüzey pürüzlülüğüne neden olan dropletler kabul edilebilir. Manyetik filtre sistemleri, s-şekilli filtre sistemleri, yönlendirilmiş ark sistemleri ve darbeli akım sistemlerin de dahil olduğu droplet azaltıcı çeşitli modifikasyonlar kurulmaktadır. Bu sistemlerin çoğu, kaplama kalitesini açıkça geliştirmektedir ancak azalan biriktirme hızı, işlem karmaşası ana maliyete önemli bir artış ekler [39]. Bunların yerine kaplama prosesi sonrasında basit fırçalama tekniği ile yüzeydeki dropletlerden kurtulmak mümkündür.

Katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemindeki kaplama parametreleri olan azot gazı basıncı (P_{N_2}), altlık malzemesi sıcaklığı (T_s) ve bias voltajı (V_s) kaplamanın yapısını etkilemekte; dolayısıyla bu da kaplamanın özelliklerini değiştirmektedir [40, 41]. Örneğin; bu parametrelerden bias voltajının artmasıyla CrN kaplamanın tane boyutunda ve dropletlerin miktarında meydana gelen azalmanın, kaplamaların sertliğini ve aşınma dayanımı arttırdığı görülmüştür [40].

4.3. CrN Kaplamaların Kullanım Yerleri

Krom nitrür kaplamalar çoğunlukla metal şekillendirme ya da cam endüstrisinde, kalıplarda, merdanelerde, kesicilerde, aşınma ve korozyondan korunma istenildiği yerlerde kullanılmaktadır [42]. Sürtünme, aşınma ve yüksek sıcaklığa dayanımıyla krom nitrür kaplamalar kesme takımları, taşıma millerinde ve birçok mekanik parçada kullanım yeri bulmuştur [43].

Islak ve abrazif tahta ürünlerin işlenmesinde Cr_xN_y kaplamaların TiN kaplamalara nazaran daha iyi performans gösterdiğine dair araştırmalar mevcuttur [43].

CrN özellikle çekme ve pres kalıplarının yüzeylerinin korunmasında ve alüminyum esaslı alaşımların çalışma sıcaklığı 350-500 °C olduğu basınçlı döküm maçalarında ve kalıplarında kullanılmaktadır. CrN kaplamalar aynı zamanda Cu ve Ti esaslı alaşımların işlenmesinde kullanılan torna ve freze takımlarında kullanılmaktadır [12, 44].

Plastik endüstrisindeki kalıpların, takım ve parçaların aşınma ve korozyon problemlerini çözmek için kullanılırlar [44]. Dearnley'in plastik enjeksiyon kalıpları üzerinde yapmış olduğu çalışmada kalıplar magnetron sıçratma yöntemiyle TiN, MoS_2 ve CrN kaplanmıştır. CrN kaplama diğerlerine göre 80°C de enjeksiyon kuvveti testlerine göre daha iyi performans göstermiştir [45].

Kağıt, tekstil, seramik endüstrisinde kalın CrN ya da çok katlı kaplamalarla takımları yüksek abrazif aşınmadan koruma sağlanabilir. Düşük sıcaklık CrN kaplamalar, alaşımlı takım çeliklerinden yapılan derin çekme takımları gibi takımların özelliklerinin geliştirilmesinde kullanılırlar [44].

Hidrolik takımlarda ya da motor parçalarında aşınmayı azaltmak için ya da kimya endüstrisinde şiddetli korozyona maruz kalan geniş bilyalı valflerin bilyalarında ve kaplama sırasında sıcaklığın 250 °C' yi geçmemesi gereken sıcaklığa duyarlı malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmede kullanılırlar [44].

FBB kaplamaların yeni uygulama alanlarından biri de yeni ve temiz teknolojilerle birlikte galvanik kaplamaların yerini almalarıdır. Başlangıç araştırma sonuçlarına göre CrN kaplamaların sert krom kaplamaların yerini alması mümkün olabilir [44].

4.4. CrN Kaplamaların Özellikleri

Son yıllarda seramik kaplamalar içerisinde krom nitrür kaplamalar üzerinde yapılan çalışmalar oldukça artmıştır. CrN kaplamaların temel fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki bu çalışmalar, oksidasyon ve korozyona karşı direnç özelliğini vurgulamakta ve TiN kaplamalara kıyasla daha üstün olduğunu göstermektedir [34, 35].

TiN kaplamalı çeliklerin yaygın kullanımı olmasına karşın araştırmacılar CrN kaplamaların TiN kıyasla çeliğin korozyon ve aşınma davranışlarını daha fazla geliştirdiğini belirtmektedirler [46].

4.4.1. Sertlik

Kaplama malzemesinin sertlik ölçümü taban malzemenin özelliklerinden ve film kalınlığından oldukça etkilenmektedir. Taban malzemedan bağımsız gerçek sertlik değerleri batma derinliğine göre ölçüm yapan ultra mikro sertlik cihazında azalan yüklerle artmaktadır. Taban malzemenin etkisi kaplama kalınlığının artması ya da yükün azaltılmasıyla azalmaktadır [47].

Fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle üretilen CrN kaplamalar aşınma dayanımları, oksidasyon davranışları ve korozyon dayanımları sebebiyle tribolojik uygulamalarda kullanımı gittikçe artan kaplamalardır. FBB süresince oluşan ve servis süresince değişen mikroyapı ile bu özelliklerin kontrol edildiği kabul edilmektedir. Mikroyapısal özellikler içerisinde bileşim, yapı, latis hata yoğunluğu, kalıntı gerilmeler ve morfoloji yer almaktadır. Mikroyapıdan oldukça fazla etkilenen bir kaplama özelliği de sertliktir [48, 49].

Tablo 4.1 Magnetron sıçratma yöntemiyle yapılmış Cr, CrN kaplamaların ve kaplamasız paslanmaz çeliğin Vickers sertlik değerleri [50].

	Paslanmaz çelik (taban malzeme)	Cr	CrN
Vickers Sertliği (kg/mm ²)	230±30	1100±150	3000±200

Stockemer ve diğerlerinin paslanmaz çelik üzerine magnetron sıçratma yöntemiyle yaptıkları Cr ve CrN kaplamaların sertlikleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi N içeriği kaplamanın sertliğinde önemli ölçüde artışa neden olmuştur [50].

Azot içeriğindeki artış ile kaplamanın sertliği artmaktadır [46]. Taban bias voltajının artması da sertlikte artışa neden olabilmektedir. Örneğin ark FBB yöntemiyle üretilen CrN kaplamanın sertlik değeri, taban malzemeye uygulanan bias voltajı 30V’ tan 200V’a çıktığında 16GPa değerinden 25 GPa değerine çıkmaktadır [48].

4.4.2. Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Dayanımı

CrN kaplamaların pürüzlülük değerleri sürtünme katsayısını ve aşınmayı etkilemektedir. Lee ve diğ. yapmış oldukları çalışmada yüksek hız çeliği üzerine kaplı değişik pürüzlülük değerlerine sahip CrN kaplamalar blok üzerinde ring aşınma test cihazında test edilmişlerdir. Sonuçta düzgün yüzeyli CrN kaplamaların kaplamasız malzemeye kıyasla daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Sürtünme katsayısındaki bu azalmada aynı zamanda sertliğin ve kontak alanının etkisi vardır. CrN kaplamalı malzemenin yüksek sertliği yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Pürüzlü yüzeylerdeki kontak alanının genişlemesi de bu yüzeylerdeki sürtünme katsayısı değerlerini arttırmaktadır. Aşınma oranlarının azalması sadece CrN kaplamalı numunelerde değil karşıt malzemelerde de görülmektedir [42].

Aşınma dayanımlarının yanı sıra CrN kaplamalar düşük sürtünme katsayısına ve yüksek tokluğa sahiptir [51].

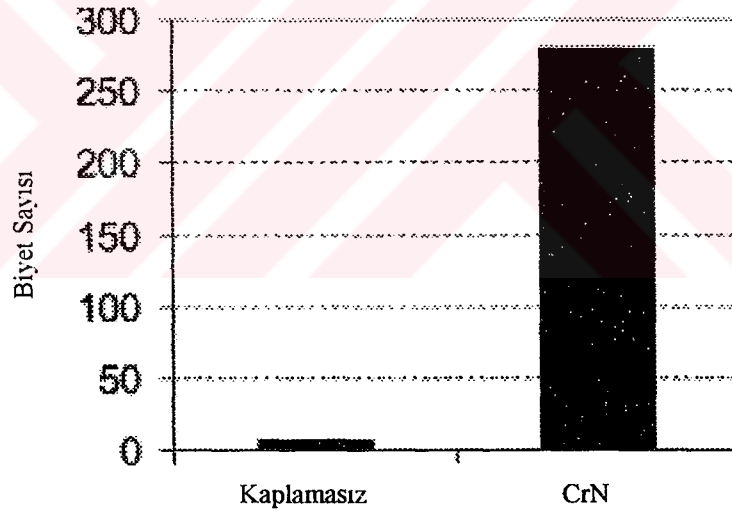
Tablo 4.2. Paslanmaz çelik taban malzemesinin ve CrN kaplamanın sürtünme katsayısı ve aşınma hızları [52].

Numune	Sürtünme Katsayısı	Aşınma Hızı ($\mu\text{m/dk}$)
Paslanmaz çelik	0,54	2,24
CrN kaplı paslanmaz çelik	0,47	1,75

Jagielski ve diğ. paslanmaz çelik üzerine iyon demeti destekli kaplama yöntemiyle kapladıkları CrN kaplamaların aşınma davranışlarını incelemiştir. Disk üzerinde

pin aşınma testleri sonuçlarına (Tablo 4.2) göre CrN kaplama taban malzeme kıyasla düşük sürtünme katsayısına ve aşınma hızına sahiptir [52].

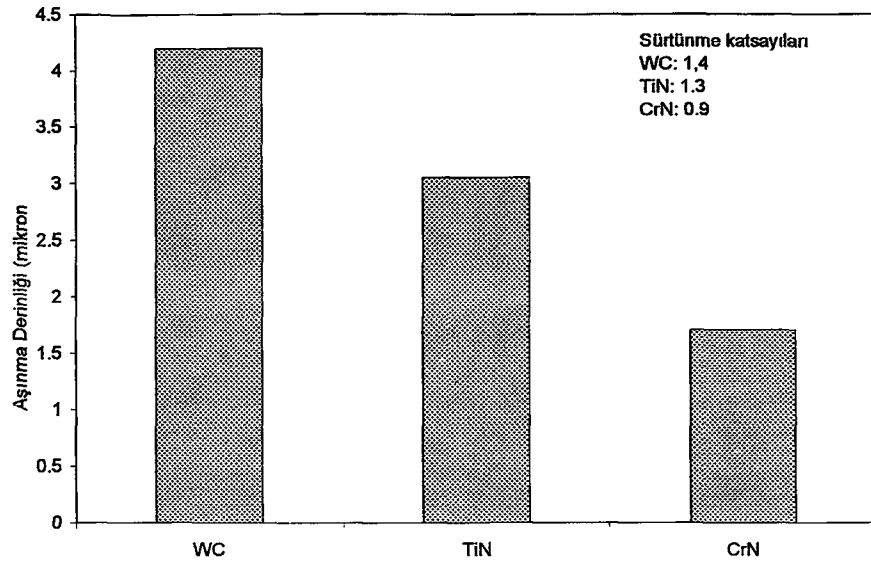
Alüminyum basınçlı dökümünde gaz nitrürleme, kalıpların yüzeylerini hem aşınmadan hem de korozyondan korumak için uzun yıllardır kullanılmaktadır. Son yıllarda FBB kaplamalar ekstrüzyon kalıplarında adhezif aşınmayı ve termal yorulmayı önlemek için kullanılmaya başlanmıştır. Panjan ve diğ. CrN kaplamalı Al ekstrüzyon kalıplarının performanslarını gerçek çalışma koşullarında test etmişlerdir. Şekil 4.1’de H13 ve CrN kaplamalı kalıpların ilk temizlenmelerinden önceki ekstrüze edilen biyet sayısı görülmektedir. Buna göre CrN kaplamalı kalıbın performansı oldukça yüksektir. Yüksek sertliği, iyi korozyon dayanımıyla FBB CrN kaplamalı kalıplar aynı zamanda kalıp ömrünü uzatır, kalıp düzeltme zamanını kısaltır ve düzeltmeden sonra işleme gerek kalmaz ve de işlem maliyetini düşürür [53].



Şekil 4.1. CrN kaplamalı ve kapsız basınçlı döküm kalıbı için ekstrüzyon yapılan Al biyet sayısı [53].

Su ve diğ. Ark FBB yöntemiyle WC üzerine biriktirdikleri 5 µm kalınlıklı TiN ve CrN kaplamaların aşınma davranışlarını yağsız ortamda plaka üzerinde silindir karşılıklı kazıma test cihazında incelenmişlerdir. 1 mm genlik, 50 Hz frekans ve 100 N yük kullanılan deneyde kaplamalı plakalar sabittir ve silindir(S45C) plaka üzerinde gidip gelme hareketi yapmaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen aşınma derinlikleri ve sürtünme katsayıları Şekil 4.2’ de verilmiştir.

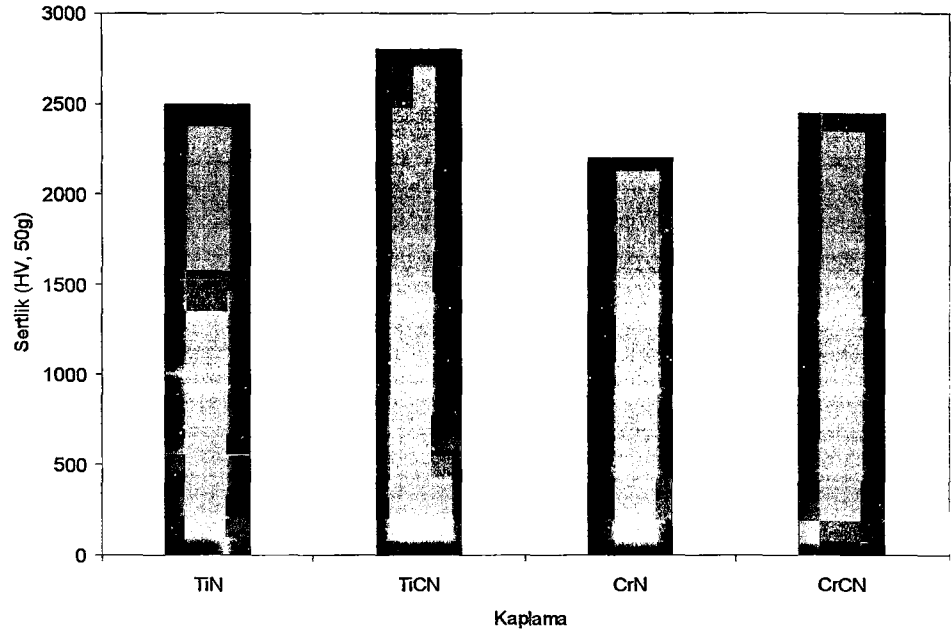
ELAZIĞ İTİFAK ÜNİVERSİTESİ
İKTİSADİ İCRA VE İDARE FAKÜLTESİ
İKTİSADİ İCRA VE İDARE BÖLÜMÜ



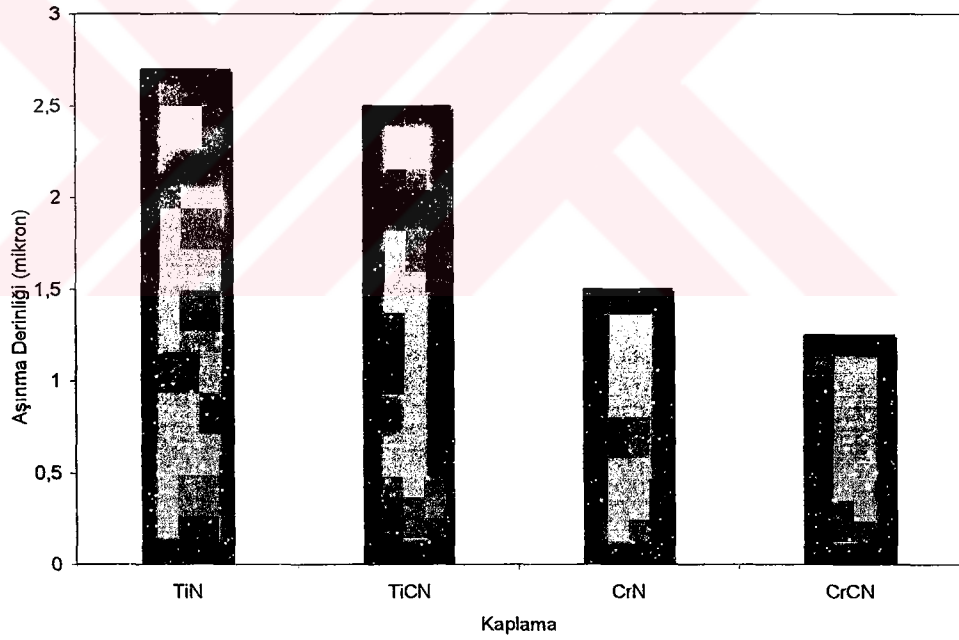
Şekil 4.2. WC, TiN ve CrN kaplamaların aşınma derinlikleri ve sürtünme katsayıları [35].

Aynı çalışmada CrN kaplamaların performansı kesme testi ile araştırılmıştır. Kesme testinde demire karşı kullanılan kaplamanın kötü performans gösterdiği belirlenmiştir. Bunun sebebi olarak demir için kromun yüksek afinitesinin olduğu düşünülmektedir. Bu da CrN kaplama tabakasının adhezif aşınma nedeniyle dökülmesine neden olmaktadır [35].

Su ve diğerlerinin(1998) yaptıkları diğer bir çalışma kaplamanın aşınma özelliğinin sertlik özelliği ile direkt ilgisi olmadığını göstermektedir. Bu çalışmada 3 μ m kalınlıklı TiN, Ti(C,N), CrN ve Cr(C,N) kaplamaların sertlikleri 50 gr yük uygulanarak vikers mikro sertlik cihazında ve aşınmaları plaka üzerinde silindir karşılıklı kazıma test cihazında test edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.3 (a) ve (b) de verilmiştir. Cr temelli kaplamalar daha düşük sertliklerine rağmen daha iyi aşınma performansı göstermişlerdir [34].



(a)



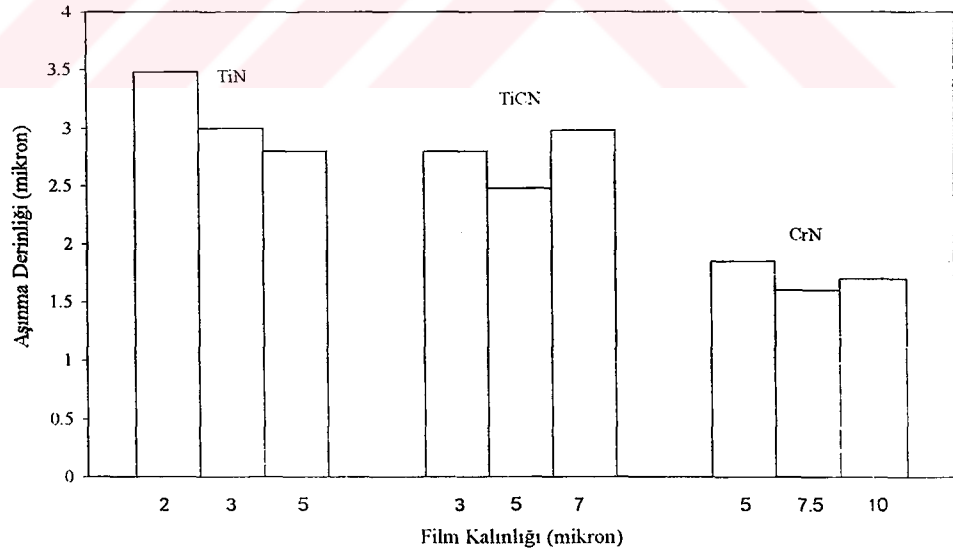
(b)

Şekil 4.3. Karşılaştırmalı deney sonuçları; (a) kaplama sertlikleri, (b) 50Hz frekansta, 1 mm genlikte 24 dk. yüksüz olarak yapılan plaka üzeri silindir aşınma deneyi sonuçları [34].

4.4.3. Kalınlık

Genellikle CrN kaplamalar ince taneli ve düşük gerilmeli yapıyla karakterize edilirler bu da kaplamanın birkaç mikronluk geleneksel FBB kaplamalardan daha fazla kalınlıklarda biriktirilmesine olanak sağlar. Çeşitli uygulamalarda 10-25 μm kalınlıkta CrN kaplamalar kullanılmaktadır [44].

CrN kaplamalar, genelde 10 μm altında kalınlıklarda kullanılan TiN kaplamalardan çok daha kalın kaplanabilirler, bu kaplamaların asıl amacı tabanı korozyondan korumaktır. Taban- film tribo-sistemde film kalınlığı bir sistemin karakteristiklerini ve performansını belirlemede önemli bir rol oynar. Genel kanı olarak daha kalın filmlerin yüksek iç kalıntı gerilmeler nedeniyle kırılmayarak daha uzun servis sürelerine sahip olacağıdır. Ancak bu her zaman doğru değildir. Pratikteki deneyimler servis koşullarının bir fonksiyonu olarak optimum bir film kalınlığı olduğunu göstermiştir. Örneğin, tornalama için kalın kaplama servis ömrünü uzatırken frezelerde ve kesikli kesme işlemlerinde optimum bir film kalınlığı vardır. Film kalınlığı kaplama sisteminin davranışı üzerinde etkili önemli bir parametredir ve göz ardı edilmemelidir [12].



Şekil 4.4. Kalınlığın aşınma dayanımı üzerindeki etkisi (plaka üzerinde blok testi, 100N yük, 1mm genlik) [12].

Kaplama kalınlığının artması taban malzemenin etkisini azaltır. Sonuç olarak gerçekte mikrosertliği daha az olan bir kaplamanın yük taşıma kapasitesi, kalınlığı artırılarak geliştirilebilir [12].

Su ve diğ. Ark FBB yöntemiyle üretilmiş kaplamalar üzerinde yaptıkları araştırmada kaplama kalınlığının aynı zamanda aşınma davranışını etkilediği belirlemişlerdir. Değişik film kalınlıklarındaki kaplamaların aşınma derinlikleri ilişkisi Şekil 4.4' de verilmektedir [12].

4.4.4. Yapışma

Kaplamanın taban malzeme ile yapışma mukavemeti kaplamalı parçalar için çok önemlidir. Geçmişte kaplamanın yapışmasını belirlemek için temeli indentasyona dayalı bir çok metot geliştirilmiştir. Bu testler sadece numune üzerine uygulanan yükü batma ve çizik temellerine dayanarak yapılmaktadır [51].

Seok ve diğerlerinin magnetron sıçratma yöntemiyle değişik N₂ içerikli sıçratma gazı ile yaptıkları CrN kaplamaların yapışma özellikleri çizik testi ile belirlenmiştir. Çizik testi ile oluşan çizik izi optik mikroskopla incelenmiş ve kritik yük değerleri akustik sinyallerle belirlenmiştir. Sıçratma gazındaki N₂ gazı içeriğinin artmasıyla kritik yük değerlerinde artış belirlenmiştir. Yapışma özelliği artan N₂ içeriği ile artmaktadır [46].

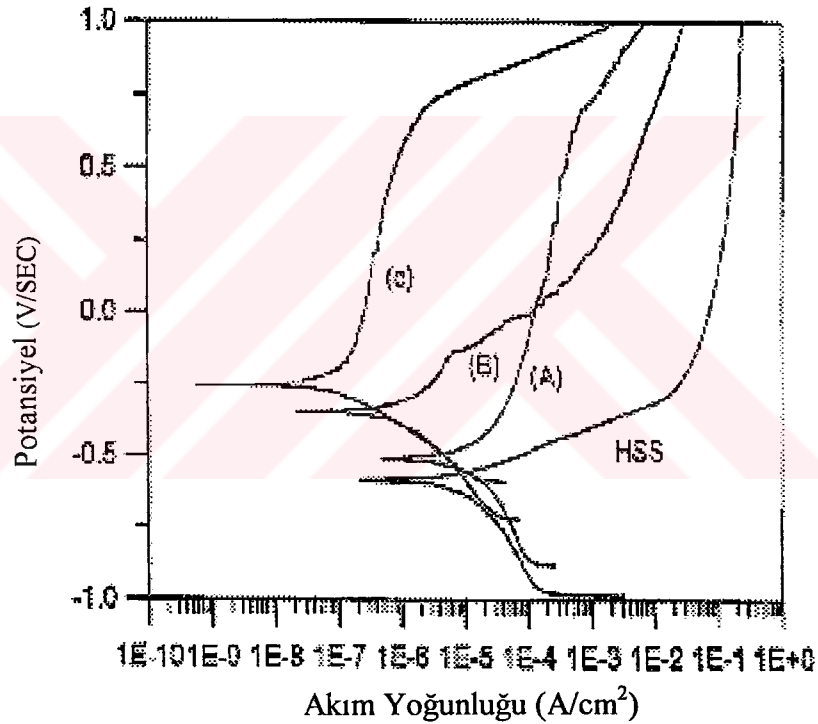
Taban malzemenin pürüzlülüğü kaplamanın yapışmasında önemli bir etkidir. Pürüzlü taban malzeme üzerine kaplanan CrN filmin yapışması düzgün yüzeye yapışmasından daha kötüdür [42].

Çelik taban malzemelere yapışma, 0,1- 0,5 µm kalınlıkta Cr ara tabakası kaplanarak geliştirilebilmektedir [44].

4.4.5. Korozyon ve Oksidasyon Direnci

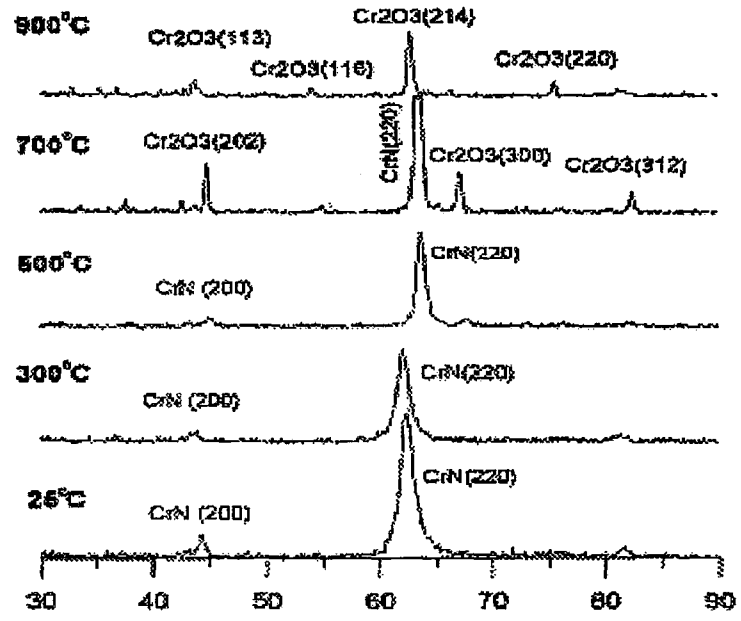
Kaplamaların korozyona karşı tam bir dayanım sağlayabilmelerinin temel koşulu, taban malzeme ile ortam arasındaki ilişkinin tamamen kesilmesidir [54]. Ürgen ve Çakır[55] yaptıkları çalışmada CrN kaplamada Cu dekorasyon deneyi ile tabana kadar ulaşan boşlukların varlığını göstermişlerdir. CrN kaplamaların kimyasal

kararlılıkları yüksek olmasına rağmen korozif ortamın bu boşluklardan geçerek tabana ulaşır ve daha sonra korozif ortam CrN kaplamayı bozabilir. Pürüzlü yüzeye sahip numuneler için, CrN kaplamaların kolonsal yapıda büyümesi tercihlidir ve daha düzgün yüzeyli numunelere göre kaplamada küçük deliklerin oluşması kolaydır ve yüksektir. Lee ve diğ. katodik ark FBB CrN kaplamalar üzerinde yapmış oldukları çalışmada korozyon davranışlarını %5'lik NaCl çözeltisinde test etmişlerdir. Şekil 4.5'de verilen anodik polarizasyon eğrilerine göre en iyi korozyon direncini gösteren kaplama pürüzlülüğü en az olan CrN kaplamadır. Küçük deliklerin az oluşu CrN kaplamalar ve taban malzemenin daha düzgün olduğu numunelere kaplanan CrN kaplamalar daha iyi korozyon davranışı sergilemektedirler [42].



Şekil 4.5. Anodik polarizasyon eğrileri, YHÇ Taban malzeme pürüzlülük Ra 0,10 μm , A CrN pürüzlülük Ra 0,33 μm , B CrN pürüzlülük Ra 0,22 μm , C CrN pürüzlülük Ra 0,13 μm [42].

Lee ve diğerlerinin yapmış oldukları çalışmada 300 ile 900°C arasında CrN kaplamalı numuneler üzerinde oksidasyon performansları incelenmiştir. X ışını difraksiyonunda(Şekil 4.6) 700 °C'de CrN'ün oksitlenmesi ve Cr₂O₃'e dönüşmesinin başladığı görülmüştür. 900 °C üzerinde sadece Cr₂O₃ piki oluşmaktadır [42].



Açı 2θ

Şekil 4.6. CrN kaplamanın değişik sıcaklıklara ısıtılmasından sonra çekilmiş X ışını difraksiyon paternleri [42].

5. ELEKTROLİTİK SERT KROM KAPLAMA İLE FBB KROM NİTRÜR KAPLAMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Elektrolitik sert krom kaplamanın başlıca problemi üretiminde altı değerli krom çözeltisi kullanılması ve krom ile kirlenmiş çok miktarda zehirli atık oluşmasıdır. Altı değerli kromun kanserojen olduğu, deri ve ciğer rahatsızlıkları oluşturduğu bilinmektedir. Altı değerli krom yüksek birikme hızı ve kalın kaplama yapılabilme imkanı ile ticari sert krom kaplama yapılması için kullanılan tek yöntemdir. Elektrolitik sert krom kaplamanın çeşitli çevresel riskleri şunlardır;

1. Havayla yayılma ya da deri kontağı ile insanın direkt maruz kalması.
2. Kullanılmış kaplama çözeltisi, parça üzerinde banyodan çekilen çözelti, temizleme ve sıyırma için kullanılan asit ya da bazlar, çözünen anottan gelen kurşun sülfat çamuru, atık durulama suyu ve maske malzemesinden gelen kirlilikleri içeren zehirli atıklar [20].

Kaplama operasyonundaki geniş hacimdeki kirli sular ve kullanılmış çözeltilerinden kurtulmak için tüm zehirli malzemelerin çöktürülmesi ya da buharlaştırılarak uzaklaştırılması, suyun lâğım sistemlerine, katıların ise zehirli atık çöplüklerine taşınması zorunludur. Bu nakliye ve boşaltım sert krom üreticileri için giderek pahalı olmaktadır [20].

Fiziksel buhar biriktirme yönteminde tamamen atık oluşmaması durumu söz konusu değildir. Kaplamaya geçmeden önce bazı yüzey temizleme ve hazırlama işlemleri yapılmaktadır. Sonuçta sıvı temizleyici atıklar (öncelikle yüzey aktifleştirici ve yağ ile kirlenilmiş sular) oluşmaktadır. Elektrolitik sert kromla karşılaştırıldığında atıkların hacmi oldukça azdır ve atıklar altı değerli krom içermezler [20].

Avrupa ve Amerika' daki çevre koruma ile ilgili yasaların sıklığı sert kromun üretiminde açığa çıkan altı değerli krom içeren atıkların yok edilmesini ekonomik açıdan da güçleştirmiştir. Bununla beraber tüm dünyada sert krom gibi standart

elektrolitik kaplamaların FBB kaplamalar gibi hiçbir zararlı atık oluşmayan temiz teknolojilerle yer değiştirmesi eğilimi oldukça güçlüdür. Bu yöndeki ilk girişimler birkaç yıl önce sert krom yerine CrN kaplamaların kullanılması olmuştur. Ancak bu yalnızca bazı özel uygulamalar içindir. Aynı zamanda kaplama üreticileri kitlesel üretimde sert krom yerine CrN kullanımını amaçlamışlardır [44].

Geleneksel sert kromla karşılaştırıldığında, CrN kaplamanın en az iki kat daha fazla sertlik, oldukça düşük porozite, tüm taban malzemelere daha iyi yapışma, kenarlarda yuvarlanma olmaksızın üretim, ek ısı işlem ya da bitirme işlemine gerek olmaması, oldukça düşük kalınlığına (12-20 μm yerine 3-5 μm) rağmen daha iyi korozyon dayanımı özelliklerini gösteren kanıtlar mevcuttur [44].

Sert krom kaplama yerine FBB CrN kaplama kullanımı ile ilgili ilk olumlu sonuçlar, Slovenya' daki manyetik göbekler (içten yanmalı motorlarda marşları birleştirmek için kullanılır) üzerindeki sert krom kaplama yerine 3 μm kalınlıklı CrN kaplama kullanılarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü $R_a=0,12$ olan göbeğin aşınma dayanımı (farklı iklim koşullarında altı ay boyunca sürekli çalıştırma) ve korozyon dayanımı (196 saat %5 NaCl içinde bekletme) test edilmiştir. Her iki test sonucu da pozitif çıkmıştır [44].

FBB yönteminde tipik elektrolitik kaplama proseslerinde olduğu kadar yüksek kaplama hızı vardır. Ark FBB yönteminde sadece numunenin şekli ve boyutunda bazı sınırlamalar mevcuttur. Elektrolitik sert krom kaplama ile üretilen parçaların boyutları banyo hacmi ile sınırlıdır. FBB yönteminde ise reaktörle sınırlıdır [2].

Sert krom kaplamalar genelde 2,5-500 μm kalınlığında kaplanırlar [11]. Kaplama üretimi sırasında yüksek iç gerilmeler nedeniyle çatlaklı yapıda olur. Bu çatlaklar kaplamanın korozyon ve aşınma dayanımını olumsuz yönde etkilemektedirler [18]. Fiziksel buhar biriktirme ile yapılan kaplamaların kalınlıklarının yüksek iç gerilmeler nedeniyle 3-5 μm dan fazla olması yapışma özelliklerinde problem yaratır. Yalnızca CrN kaplamalar 20 μm hatta 50 μm kalınlığa kadar kolayca üretilebilmektedirler. Bu kaplamalar özellikle korozyon dayanımı için kaplanmaktadır. Kaplama kalınlığının artması ile kritik akım yoğunluğu azalmaktadır ve mikroporlardan demirin çözülmesinde azalma belirlenmiştir. 1 μm kalınlıktan daha fazla kalınlıklarda demirin çözülmesine rastlanmamıştır [2]. Lee' nin çalışmasında 2,36 μm

kalınlıktaki FBB CrN kaplamaların taban malzemeyi korozyondan korumada etkin olduğunu göstermiştir [42].

Elektrolitik sert krom kaplamanın sertliği 600 ila 1200 HV arasında değişmektedir [7]. Artan sıcaklıkla özellikle 350 °C üzerinde sertliğinde önemli ölçüde azalma olmakta bununla beraber aşınma dayanımı da azalmaktadır [18]. Ayrıca elektrolitik sert krom kaplamanın termal ve mekanik yük çevrimlerinde kırılma eğiliminin varlığından söz edilmektedir [33].

FBB CrN kaplamaların sertlik değerleri 1700-2400 HV arasındadır [7]. Lee ve diğerlerinin yapmış oldukları çalışmada çeşitli sıcaklıklara ısıtılmış CrN kaplamalı ve kaplamasız HSS numunelerin sertlik değerleri alınmıştır. Sonuçta kaplamanın sertliğinin 1700 HV iken 900°C' ye ısıtılmasından sonraki sertliği 1040 HV olarak ölçülmüştür. Taban malzemenin sertliği ise 700°C' de 722 HV' den 600HV' e düşmüştür. Bu da açıkça 700°C üzerinde taban malzemenin yumuşaması ve CrN fazının tamamen Cr₂O₃ dönüşmesiyle kaplamanın sertliğinde azalma meydana geldiğini göstermektedir [42].

Aşınma davranışları karşılaştırılan bazı çalışmalarda FBB CrN kaplamaların sert krom kaplamadan daha iyi performans gösterdikleri belirlenmiştir [31, 32].

Elektrolitik sert krom kaplama alternatif kaplamanın yalnızca iyi aşınma ve korozyon dayanımının olması yeterli değildir. Alternatif kaplama a) temiz (örneğin zehirli olmayan atıkların oluşması), b) teknik olarak etkili (en az sert krom kaplamanınkine eşit performans), c) fiyat olarak etkili olması ile bütünüyle ele alınmalıdır [20].

Fiziksel Buhar Biriktirme CrN kaplamaların maliyetlerinin elektrolitik sert kroma göre çok daha fazla olduğu düşünülmektedir. Maliyet nihai ürüne bağlıdır. Ürünün şekli boyutları, karmaşıklığı, kalitesi, kaplamada kullanılan malzemeler, gerekli yüzey bitirme işlemleri ve diğer bir çok faktöre bağlıdır. Bu nedenle sert krom kaplamadan daha pahalıya malolacağı gibi ön yargıya varmak doğru değildir [28].

6. YAĞLI ORTAMDA AŞINMA

6.1. Aşınma

Aşınma iki katı kontağındaki yüzeylerin her ikisinden ya da birinden malzeme kaybı olmasıdır. Aşınma bu iki katı yüzeyin birbirlerine bağlı kayma ve dönme hareketi yapması sonucu oluşur [56]. Aşınma üretim süreci sırasında kırılma hasarı kadar olmamasına karşın malzeme ve enerji kaybı nedeniyle ekonomik olarak pahalı bir hasar mekanizmasıdır [38].

Aşınma mekanizmalarını çok değişik şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Bu çalışmada aşınma mekanizmaları içerisinde önemli olarak karşımıza çıkan bazı aşınma türleri hakkında kısa bilgiler verilmektedir.

6.1.1. Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, malzeme yüzeylerine kendisinden daha sert olan partiküllerle basınç altında etkileşmesiyle, sert partiküllerin malzeme yüzeylerinde çizik ya da parça koparılmasıyla sonuçlanan bir aşınma türüdür. Bu aşınmanın sonuçları kazınma, çizilme ve oyuklanma şeklinde ortaya çıkmaktadır. Abrazif aşınma temel olarak iki elemanlı ve üç elemanlı abrazif aşınma olarak iki gruba ayrılır. İki elemanlı abrazif aşınma, sürtünme halinde bulunan elemanların doğrudan etkileşmeleriyle meydana gelmektedir. Üç elemanlı abrazif aşınma ise iki malzeme arasında serbest partiküller ile oluşabileceği gibi, aşınma sonucunda yüzeylerden kopan partiküllerin ara malzemeler olarak davranması ve her iki malzeme üzerinde de hasar oluşturmaları şeklinde gelişebilir [57].

6.1.2. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, birbiri üzerinde hareket eden yüzeylerin temas eden noktalarındaki plastik deformasyonun sonucunda yapışmayla mikro kaynaklar meydana gelmesi ve

iki malzemeyi birbirine bağlayan kaynak noktalarının daha sonra kopmasıyla her iki taraftan da malzeme kaybı ile sonuçlanan bir aşınma türüdür [57].

6.1.3. Korozyonlu Aşınma

Korozyonlu aşınma, birbirleriyle temas halinde bulunan yüzeylerin kayma hareketi sırasında bulundukları ortamla reaksiyona girmeleriyle aşınmaları olayıdır. Korozyonlu aşınmada ortamla temas halinde bulunan yüzeyler arasında dinamik bir ilişki mevcuttur. Temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girer, ürünler yüzeyde oluşur ve daha sonra reaksiyon ürünleri çatlak oluşumu veya abrazif aşınmaya sebep olur [57].

6.1.4. Yorulmalı Aşınma

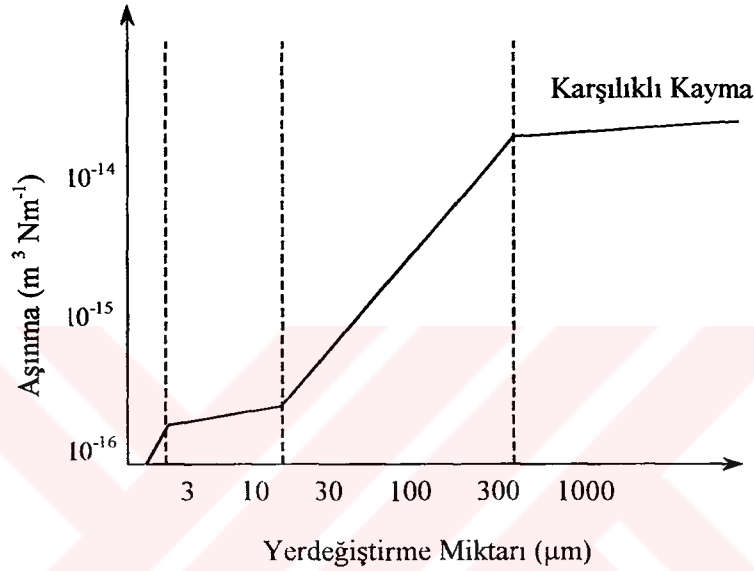
Yorulmalı aşınma malzemelerin çevrimsel kaymaya maruz kalmaları sonucunda ortaya çıkar. Oluşum şekillerine göre; yüzey altından kaynaklanan yorulma, yüzeyde oluşan yorulma, çekirdekten kaynaklanan yorulma, kavitasyonlu yorulma olarak dört gruba ayrılır [57].

6.1.5. Kazımalı Aşınma

Birbiri ile temas halinde bulunan malzemelerin kendi aralarında belli frekansta göreceli olarak yer değiştirmeleri sonucunda meydana gelen aşınma türüdür. Kazımalı korozyon, malzemelerin yüzeylerinde ortam şartlarının da etkisiyle etkileşerek kimyasal bir reaksiyon meydana getirmesi ve bu reaksiyon sonucunda meydana gelen ürünlerle kazımalı aşınma sistemlerinin etkilenmesidir. Kazımalı yorulma ise aşınma ve yorulmanın birlikte olduğu hasar olayıdır. Kazımalı aşınma korozyon ve yorulmadan bağımsız kendi başına bir hasar ve aşınma türüdür. Kazımalı aşınmada etkin parametreler çevrim sayısı, normal yük, yer değiştirme miktarı, frekans ve ortam şartlarıdır [38].

6.2. Karşılıklı Kazımalı Aşınma

Kazımalı aşınmada, yer değiştirme miktarına bağlı olarak aşınma şekli değişmektedir. Eğer genlik yeterince artarsa aşınma hızı katsayısının yaklaşık sabit olduğu bir safhaya ulaşılır. Şekil 6.1’ de verilen çeliğin kazımalı aşınmasında aşınma oranının, yer değişiminin bir noktasında yaklaşık sabit bir değere geldiği görülmektedir [58].



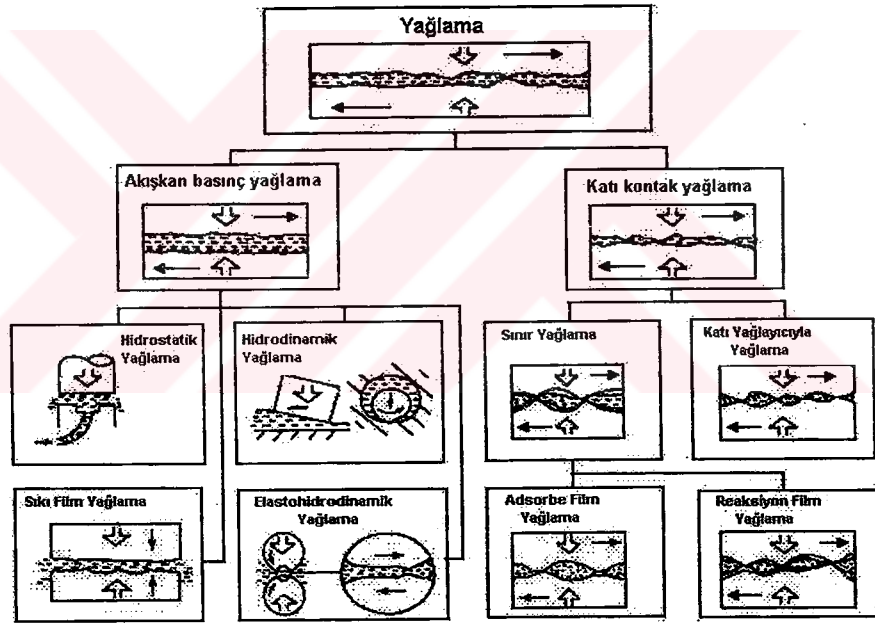
Şekil 6.1. Çeliğin kazımalı aşınmada aşınma oranlarının yer değiştirme miktarına bağlı değişimi [58]

Karşılıklı kazımalı aşınma ya da karşılıklı kayma denilen bu aşınma rejiminde başlangıçtaki temas mesafesi yer değiştirme miktarından daha fazla mesafe kaydeder. Diğer bir deyişle kazımalı aşınma sırasında malzeme hareket ettiği yönde kendi boyundan daha fazla mesafe kaydediyorsa karşılıklı kazımalı aşınma durumu sözkonusudur. Bu duruma en iyi örnek içten yanmalı motorlarda silindir bloğuyla piston segmanı arasındaki ilişkidir. Motordaki yanma sırasında piston segmanı ile silindir bloğu arasındaki temas mesafesi, pistonun hareketi sırasında yer değiştirme miktarından çok küçüktür [38]. Karşılıklı kazımanın temel karakteristikleri oluşan ürünlerin kontak içinde oksitlenmemiş olması ve aşınma katsayısının kazımalı aşınma koşullarındakine oranla daha büyük olmasıdır [59].

**TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
BİLİM VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI**

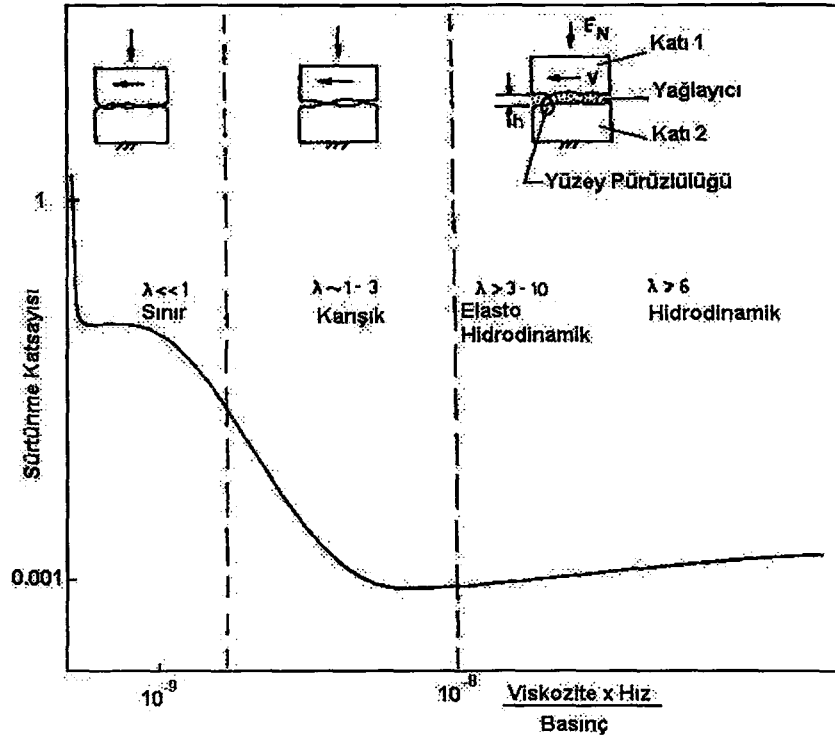
6.3. Yağlama

Sürtünme ve aşınma mekanizmaları birbirlerine karşı hareketli iki yüzey arasındaki fiziksel etkileşime dayalıdır. Yağlama bu iki yüzey arasında bir yağlayıcı ile, beraber hareket eden iki katı yüzey arasında sürtünme ve aşınmayı azaltan ya da oluşan ısı ve aşınma ürünlerini uzaklaştırmaya yarayan bir prosestir. Yağlamanın rolü katı bir film, sıvı ya da gaz malzeme ile hareketli yüzeyleri ayırmaktır. Yağlama prosesi, kontak yüzeylerinin geometrisi, hareketli yüzeylerin pürüzlülüğü, birleşme yükü, yağlayıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri, malzeme bileşimi ve yüzeye yakın tabaka özelliklerine bağlı olarak pek çok şekil alır. Şekil 6.2’de yağlama şekillerinin detaylı bir sınıflandırılması yer almaktadır [56].



Şekil 6.2. Yağlama Mekanizmaları [56].

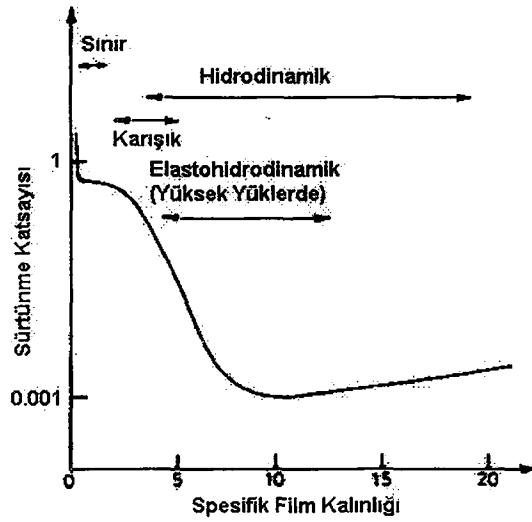
Hidrostatik yağlama, yağlayıcı arayüzeye basınç altında verilir, bu iki katının kontağını engeller. Hidrodinamik, elastohidrodinamik ve sıkı film yağlamada, relatif hareketle yağlayıcıda basınç oluşur, bu da iki katı arasındaki kontağı keser. Sınır yağlama ve katı yağlamada ise, hareketli yüzeyler arasındaki yüzey pürüzlülüğü önemli rol oynar. Sınır yağlama altında meydana gelen sürtünme, kısmen yağlayıcıdaki kaymadan, kısmen de pürüz kontaklarındaki kaymadan ileri gelir [56].



Şekil 6.3. Stribeck Eğrisi [56]

Hidrostatik yağlama mekanizması dışında, diğer yağlama şekillerindeki farklılaşma Stribeck eğrisi temel alınarak gösterilebilir. Bu eğri farklı yağlama rejimlerine göre sürtünme davranışlarını gösterir. Şekil 6.3’ de görülen Stribeck eğrisinde, ηVP^{-1} (η ; yağlayıcı viskozitesi, V ; kayma hızı, P ; basınç) yağlama parametresinin bir fonksiyonu olarak sürtünme katsayısındaki değişiklik gösterilmektedir. Bununla beraber geometri, yağlayıcı özellikleri ve işlem koşullarına bağlı olarak üç temel yağlama rejimi tanımlanır [56]:

1. Hidrodinamik ve Elastohidrodinamik yağlama ($h \geq \sigma$)
2. Karışık yağlama ($h \approx \sigma$)
3. Sınır yağlama ($h \leq \sigma$)



Şekil 6.4. Spesifik film kalınlığına bağlı sürtünme katsayısı değişimi [56].

h → Sıvı film kalınlığı

σ → Karşılıklı yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülüğü $\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$

λ → Spesifik film kalınlığı $\lambda = h_{\min} \sigma^{-1}$

$h_{\min}$ → Minimum film kalınlığı

Sürtünme davranışının spesifik film kalınlığı, λ ile değişimi ise, Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Tablo 6.1'de ise, değişik yağlama mekanizmalarına karşılık gelen, film kalınlıkları ve sürtünme katsayıları verilmiştir [56].

Tablo 6.1. Çeşitli yağlama şekillerinde tipik yağlayıcı film özellikleri [56].

Yağlama mekanizması	Yağlayıcı Film Özellikleri		
	Yağlayıcı film kalınlığı, $h_{\min}(\mu)$	Spesifik film kalınlığı, λ	Sürtünme katsayısı, μ
Sınır yağlama	0.005-0.1	$\ll 1$	0.03-1
Karışık yağlama	0.01-1	1-3	0.02-0.15
Elastohidrodinamik yağlama	0.01-10	3-10	0.01-0.1
Hidrodinamik yağlama	1-100	6-100	0.01-0.01

6.3.1. Hidrostatik Yağlama

Hidrostatik yağlama koşullarının hakim olduğu hidrostatik yataklarda yüzeyler, ara yüzeylerine pompa gibi dış bir basınç kaynağından beslenen bir yağlayıcının oluşturduğu kalın bir film ile ayrılırlar. Bu nedenle bunlar genelde dıştan basınçlı yataklar olarak adlandırılır. Film kalınlığı ve sıvı basınç profili ara yüzeyde oldukça homojendir. Hidrostatik yataklar yüzeyler arasında göreceli bir hareketin az olduğu ya da olmadığı uygulamalarda kullanılmaktadır [56].

6.3.2. Hidrodinamik Yağlama

Sıvı yağlayıcı dönen ya da kayan yüzeyler arasında bulunduğunda kalın sıkıştırılmış bir film oluşabilir. Bu yağlama şekli genellikle hidrodinamik yağlama olarak adlandırılır [60]. Hidrodinamik film kalınlığı, teğetsel yüzey hızları ile birleşme aralığı boyunca yağlayıcının araya sıkışmasıyla ya da kontak yüzeyler arasında relatif normal hızı ile kontak alanına yağlayıcının sıkışmasıyla oluşabilir. Hidrodinamik basınç birleşen malzemelerin sertlikleriyle karşılaştırıldığında düşüktür ve belirgin bir bölgesel deformasyona neden olmaz. Hidrodinamik yağlama koşulu, hareketli yüzeylerin hızından, viskozite başta olmak üzere yağlayıcının temel fiziksel özelliklerinden etkilenir [56].

6.3.3. Elastohidrodinamik Yağlama

Eğer birbirlerine uymayan yüzeyler kontak halindeyse, bu kontak çizgi ya da nokta şeklinde olabilir, kontak bölgesindeki bölgesel basınç hidrodinamik yağlamadaki ile karşılaştırıldığında çok daha büyüktür [58].

6.3.4. Karışık Yağlama

Karışık yağlamada kontak davranışı çoğunlukla elastohidrodinamik ya da hidrodinamik ve sınır yağlama karışımından etkilenmektedir. Kontak yüzeylerinin ince bir yağlayıcı filmle birbirinden ayrılmasına rağmen yüzey çıkıntılarında kontaklar oluşabilir. Toplam uygulanan yükün bir kısmını bu yüzey çıkıntılarındaki kontaklar ve diğer kısmını hidrodinamik hareketin taşıdığı düşünülmektedir. Toplam

sürtünme kısmen noktasal kontakta kısmen de viskoz yağlama sürtünmesinden ortaya çıkmaktadır [56].

6.3.5. Sınır Yağlama

Yüksek kontak basınçları ya da çok düşük kayma hızlarında hidrodinamik kuvvetler kayma yüzeyleri arasında ince bir elastohidrodinamik film oluşturmak için yetersiz kalır ve çıkıntılarda direkt kontak oluşur. Uygun bir sınır yağlayıcı tarafından korunan yüzeyler dışında, yüksek sürtünme ve aşınma oranları hakim olmaktadır. Sınır yağlayıcılar yüzeyler üzerinde adsorblanmış moleküller şeklindedir [58].

Genellikle katı-katı etkileşimi sınır yağlayıcının tavrı ile değişir, böylece sınır yağlama kontağının sürtünme ve aşınma davranışı, katı-yaglayıcı-katı arayüzeyi tarafından belirlenir ve çevre koşullarından önemli ölçüde etkilenir [56].

Sınır yağlayıcılar, temas bölgelerinde kayan yüzeylerle reaksiyona girerek düşük kayma mukavemetine sahip bileşikler oluştururlar. Sınır yağlayıcılar metal yüzeyleri ile reaksiyona girerek çalıştıklarından, kayma sırasında malzeme yüzeyinden bir miktar kayıp kaçınılmazdır [56].

6.3.6. Katı ile Yağlama

Düşük sürtünme katsayısına sahip katı malzemeler çeşitli nedenlerden dolayı sıvı ya da gaz yağlayıcılar yerine kullanılabilirler [58]. Katı film yağlama kayan yüzeyler arasına yeterli kalınlıkta sert ya da yumuşak katı filmin koyulması ile gerçekleşir. Yağlama etkisi, katı film ile yüzeyleri tamamen ayırma ya da kesişme parçalarının üzerine etkiyerek ya da tüm yüzeyde bitmemiş tabaka olarak bulunması ile gerçekleşir. Kayan yüzeylerin birbirinden tamamen ayrılması en etkili yoldur [56].

6.4. Sıvı Yağlayıcılar ile Yağlama

Katı yağlama dışındaki yağlama rejimleri gres ya da yağlar için geçerlidir. Gres ve yağların özellikleri yağlama koşullarını oldukça etkilemektedir. Yağlama amaçlı bir yağın en önemli özelliği viskozitesidir. Viskozite kesme akmasına karşı bir sıvının direncinin ölçülmesini sağlar ve sıvı içinden bir düzlem üzerindeki kesme gerilmesi olarak tanımlanabilir [58].

Çoğu yağlayıcı yağlar mineral kökenlidir ve çeşitli farklı hidrokarbon türleri içerirler. Mineral yağın uygun olmadığı koşullarda sentetik yağlar kullanılır [58].

Mineral yağların viskoziteleri bileşimlerine bağlıdır. Yüksek viskozite yüksek molekül ağırlığına bağlıdır. Yağlayıcı olarak bir yağın uygunluğu belirlemedeki önemli bir özellikte viskoziteye bağlı sıcaklıktır. Viskozite indeksi bu değişimleri gösterir. Sıcaklığın artması viskoziteyi ve yağlayıcının etkinliğini düşürmektedir. Viskozite indeksi yüksek olan yağın viskozitesi, sıcaklıktan daha az etkilenir dolayısıyla daha iyi yağlayıcı özelliğe sahiptir. Yağın viskozitesi aynı zamanda hidrostatik basınca bağlıdır. Yağların özelliklerini geliştirmede katkı maddelerinin kullanımı yağların ömürlerini uzatmakta ve kullanım alanlarına uygun özelliklere gelmelerini sağlayabilmektedir [58].

Sıvı yağlayıcı bir sistemde yağlayıcı filminin kalınlığı ile köşeli çıkıntıların boyları oranı(λ), yağlama rejimini belirlemektedir. Kontaktaki normal yükün artması, kayma hızının azalması ya da yağlayıcı viskozitesinin düşmesi film kalınlığının azalmasına neden olabilirler. Elastohidrodinamik (EHL) ve hidrodinamik yağlama koşulları altında, yüzeydeki çıkıntılar kontakta değildirler ve aşınma oranı oldukça düşüktür [58].

Eğer λ , $3'$ ün altına düşerse çıkıntı kontağı oluşacaktır ve kısmi (karışık) EHL rejimine girilecektir. Tabi ki aşınma oranı tam sıvı film yağlama koşulundakinden daha fazla olacaktır. $\lambda < 1$ olması durumu sadece sınır ya da katı yağlayıcılarla ya da yağlama olmayan bir sistemde oluşur [58].

Yağ ile yağlamada yağın viskozitesi, sınır yağlama özelliği, katkı maddeleri içermesi ve biriktirme prosesi (sürme ya da yağ banyosu ile yağlama) özellikleri yağlamayı etkiler [61]. Yağlı ortamda yüksek kayma hızlarında hidrodinamik yük taşıma kapasitesi artar bu nedenle aşınma miktarları düşer [62]. Sonuç olarak yağlı ortamda sürtünme katsayısı; normal yükün, kayma hızının, sıcaklığın, yağın viskozitesinin, kimyasal katkıların ve yüzeyin durumuna bağlıdır [63].

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada elektrolitik sert krom kaplama ile katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle üretilmiş krom nitrür kaplamaların yağlı ortamda aşınma davranışları karşılaştırılmıştır. Taban malzeme olarak yüksek hız çeliği (YHÇ) kullanılmıştır. Öncelikle kaplamaların ön karakterizasyonu yapılmış, sertlik kalınlık, pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Aşınma davranışlarının incelenmesi için karşılıklı kazımalı aşınma mekanizması temel alınmıştır. Karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri, M50 bilya ve katkısız baz yağ kullanılarak yapılmıştır ve deneyler sonrasında numunelerdeki aşınma izleri optik mikroskobta, taramalı elektron mikroskobunda ve aşınma derinlikleri için profilometrede incelenmiştir.

7.1. Numune Hazırlama

Taban malzemesi olarak % 4,5 Co ve % 2,6 V içeren yüksek hız çeliği, yüzeyleri klasik metalografik metotlarla parlatılmış ve asetonla temizlenmiştir. Elektrolitik sert krom kaplama iki numune üzerine Tablo 7.1' de yer alan banyo koşullarında HUĞLU Kaplama San. A.Ş. tarafından yapılmıştır.

Tablo 7.1. Elektrolitik sert krom kaplama üretim parametreleri

CrO ₃	250g/lt
SO ₄ ⁻²	%0,3
Sıcaklık	65 °C
Akım yoğunluğu	30 A/dm ²
Voltaj	7 V
Banyo hacmi	1 m ³

Krom nitrür kaplama, iki numune üzerine İ.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Bölümü, Kaplama Laboratuvarında katodik ark fiziksel buhar biriktirme metoduyla Tablo 7.2’ de verilen kaplama parametreleri ile kaplanmıştır. Kaplamaya geçmeden önce numunelere 10 dakika süreyle 1000 V’luk bias voltajıyla temizleme ve ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.2. Katodik ark FBB CrN kaplamaların üretim parametreleri

Kaplama Süresi (dk)	80
Katod Akımı (A)	90
Bias Voltajı (V)	150
Kaplama Sıcaklığı (°C)	250-300
Kaplama Basıncı (torr)	$7,5 \times 10^{-3}$

7.2. Ön Karakterizasyon Çalışmaları

Ön karakterizasyon çalışmasıyla kaplamaların temel özellikleri belirlenmiştir. Böylece yalnız aşınma davranışlarını değil, kaplamaların diğer özelliklerinde karşılaştırılması amaçlanmıştır.

7.2.1 Kaplama Kalınlığı

Kaplama kalınlıklarını ölçmek için Calotest cihazında sert krom kaplama için 10 mm, CrN kaplama için 20 mm çaplı bilyalar ve 1 mikronluk elmas pasta kullanılarak kaplama yüzeyleri aşındırılmıştır. Numunede oluşan izler optik mikroskopta ölçülerek kaplama kalınlıkları basit bir geometrik işlem ile hesaplanmıştır.

7.2.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için Perthen Perthometer S&P Profilometre cihazı, Focodyn optik uç ile kullanılmıştır. LT: 1,750µm, VB: 62,5 parametreleriyle ölçüm yapılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra) alınmıştır.

Kaplamalı diskler, oluşan aşınma izlerinin derinliklerini görmek amacıyla profilometre cihazında incelenmiştir. Belirlenebilen aşınma izlerinin üç boyutlu görüntüleri, cihaza bağlı bilgisayarda özel bir programda alınmıştır.

7.2.3. Sertlik Ölçümleri

Kaplamaların sertlikleri, Fischer H100 XYPROG dinamik ultra mikrosertlik cihazı ile belirlenmiştir. Sertlik almak için uygulanan yük 20 mN'dur. Elmas uç kaplamaya 120 adımda 0,5'er saniyelik sürelerle yük uygulamıştır. Yükün boşaltımı da yine aynı şekildedir. Her iki numune üzerinde de 15' er noktadan ölçüm alınmıştır.

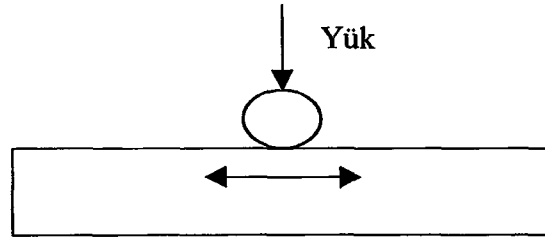
7.3. Karşılıklı Kazımalı Aşınma Deneyleri

Aşınma deneylerinde Plint & Partners TE 70 Micro Friction cihazı kullanılmıştır. Cihaz bilgisayar kontrollüdür, deney öncesinde deney parametrelerinin deneyin yürütüldüğü programa girilmesi gerekmektedir. Deney sırasında elde edilen dinamik sürtünme kuvveti değerleri; cihaza bağlı çalışan ve okuduğu kuvvet değerlerini elektriksel potansiyel değerlere dönüştürüp bu verileri bilgisayara gönderen bir cihaz tarafından sağlanır.

Tablo 7.3. M 50 bilyaya ait bileşim yüzdeleri.

Karbon	Tungsten	Molibden	Krom	Vanadyum	Kobalt
0,85	0,1	4,25	4,00	1,00	-

Cihaz karşılıklı kazımalı aşınma koşullarında çalıştırılmıştır. Kaplamalı diskler, içerisine yağ konulabilen bir tutucuya yerleştirilmiştir ve sabittir. Yağın ısıtılması sıcaklık kontrol ünitesine bağlı haznenin altında bulunan bir rezistans ile sağlanır. Karşıt malzeme olarak 10 mm çaplı M50 çelik bilya kullanılmıştır. M50 bileşimi Tablo 7.3' de verilmiştir. Tutucu içerisine yerleştirilen bilya üzerine yük uygulanmaktadır. Bilya disk üzerinde gidip gelme hareketi yapmaktadır. Şekil 7.1' de bilyanın disk üzerinde hareketi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 7.1. Karşılıklı kazımalı aşınma hareketinin şematik gösterimi.

Aşınma deneylerinde kullanılan parametreler Tablo 7.4' de verilmiştir. Deney parametreleri yağlı ortamda metal-metal kontakının sağlandığı koşulların bulunması için ön deneyler yapılarak belirlenmiştir. Bu kontakın sağlanması ve sürtünme katsayılarının gösterdiği değerlerle sınır yağlama ve karışık yağlama koşullarında çalışıldığı söylenebilir. Deney parametrelerinden, yük ve sıcaklık üzerinde değiştirmeler yapılarak deneyler sürdürülmüştür.

Tablo 7.4 Karşılıklı kazımalı aşınma deney parametreleri

Yağlayıcı	Katkısız mineral yağ (Viskozite 40°C 150 cSt)
Frekans (Hz)	50 ± 0.02
Genlik (µm)	1000 ±2
Süre (dk)	180
Yük (N)	30, 10, 5
Sıcaklık	60 ±4 °C, oda sıcaklığı

Disk üzerinde küre kontak geometresine bağlı olarak, elastik (Hertzian) kontak - gerilmeleri eşitlik 7-2' de verilen formüle [64] göre hesaplanmıştır. Eşitlik 7-1' de; E^* ; kontaktaki malzemelerin kompozit elastisite modülü (GPa), $\nu_{1,2}$; kontaktaki malzemelerin poisson oranları, $E_{1,2}$; kontaktaki malzemeler için elastisite modüllerini (GPa) simgelemektedir. Eşitlik 7-2' de S_c ; Hertzian kontak basıncı (GPa). L_N ; uygulanan normal yük (g), D ; bilya çapı (mm) ve E^* ; kontaktaki malzemelerin kompozit elastisite modülünü simgelemektedir.

$$E^* = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} \right) + \left(\frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \quad (7-1)$$

$$Sc = 0,918 - \sqrt[3]{\frac{LN}{(D^2 E^*)^2}} \quad (7-2)$$

Deneylerde kullanılan yüklerin oluşturduğu Hertzian kontak basınçları (Sc) Tablo 7.5’ de verilmiştir.

Tablo 7.5 Karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde oluşan kontak basınçları

Yük (N)	Hertzian kontak basıncı (MPa)
30	965
10	669
5	531

Her deney öncesinde ISO 12156-1 standardında belirtilen laboratuvar koşullarının sağlanıp sağlanmadığının belirlenmesi için ortam sıcaklığı ve nemi ölçülmüştür.

Aşınma deneyleri bitiminde numune ve bilya önce aseton daha sonra toluen içerisinde ultrasonik temizleme cihazında 15’er dakika süreyle temizlenmiştir. Temizleme işleminden sonra optik mikroskop altında aşınma izleri bulunmuş ve ölçülendirilmiştir.

Aşınma deneylerinin değerlendirilmesi, aynı koşullarda yapılan iki deney sonucunda bilyalarda oluşan aşınma çaplarının ortalamaları kullanılarak aşınma hacimleri ve oranlarının hesaplanması şeklinde olmuştur. Sürtünen bilyanın aşınma hacimleri eşitlik 7-4’deki formüller [56] kullanılarak hesaplanabilmektedir.

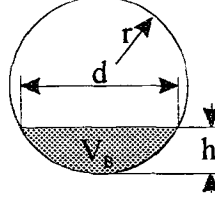
$$V_B = \frac{\pi}{6} h \left(3 \frac{d^2}{4} + h^2 \right) = \frac{1}{3} \pi h^2 (3r - h) \quad (7-1)$$

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{d^2}{4}} \quad (7-2)$$

$$\frac{h}{r} \ll 1 \Rightarrow h \approx \frac{d^2}{8r} \quad (7-3)$$

$$V_B = \frac{\pi d^4}{64r} \quad (\text{mm}^3) \quad (7-4)$$

Yukarıdaki bağıntıda kullanılan; V_B : topdaki aşınma hacmini (mm^3), d : bilya aşınma çapını (mm), r : bilya yarıçapını (mm), h : bilya aşınma yüksekliğini (mm) simgelemektedir (Şekil 7.2)



Şekil 7.2. Bilya aşınma hacmini hesaplamada kullanılan terimlerin şematik gösterilişi.

$$W_R = \frac{V_B}{L_N s} \quad (\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}) \quad (7-5)$$

Aşınma oranının hesaplandığı (7-5) formülünde kullanılan V_B : aşınma hacmi (mm^3). L_N : normal yük (N) ve s : (m) kayma mesafesidir. Bu şekilde her bir deney için yük ve mesafenin de dikkate alındığı bir aşınma oranı hesaplanabilmektedir [56].

Karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri sonucunda disklerdeki aşınma izleri, aşınma derinliklerinin belirlenebilmesi için profilometre cihazında incelenmiştir.

Deneyler sonrasında hem disklerde hem de bilyalarda oluşan aşınma izleri taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Elektron mikroskobunda aşınma izleri incelemesi aşınma mekanizmasının belirlenmesi açısından daha faydalı olmuştur.

Aşınma deneylerinde kaplamalı diskler geçmeden önce taban malzemedeki aşınma mekanizmasını incelemek amacıyla çelik numune üzerinde bir aşınma deneyi yapılmıştır. Bu deney 30 N yük altında ve sıcaklığı $60 \pm 1^\circ\text{C}$ ve 14 ağırlıkta yapılmıştır.

OC-YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

8. DENEY SONUÇLARI

Deney sonuçları; karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri öncesinde yapılan karakterizasyon çalışmalarını ve deney sonrası yapılan aşınma bölgelerinin incelenmelerini kapsamaktadır. Karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinin sonuçları, sürtünme katsayıları, optik mikroskop görüntüleri, profilometrik inceleme sonuçları ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

8.1. Sert Krom ve CrN Kaplamalara Uygulanan Ön Karakterizasyon Sonuçları

Kaplamaların aşınma davranışlarını incelemeye geçmeden önce kaplamaların temel özelliklerini belirlemek ve bu özelliklerini de karşılaştırmak amacıyla karakterizasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan ön karakterizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen kaplama kalınlıkları, yüzey pürüzlülükleri ve sertlik değerleri Tablo 8.1’ de özetlenmiştir.

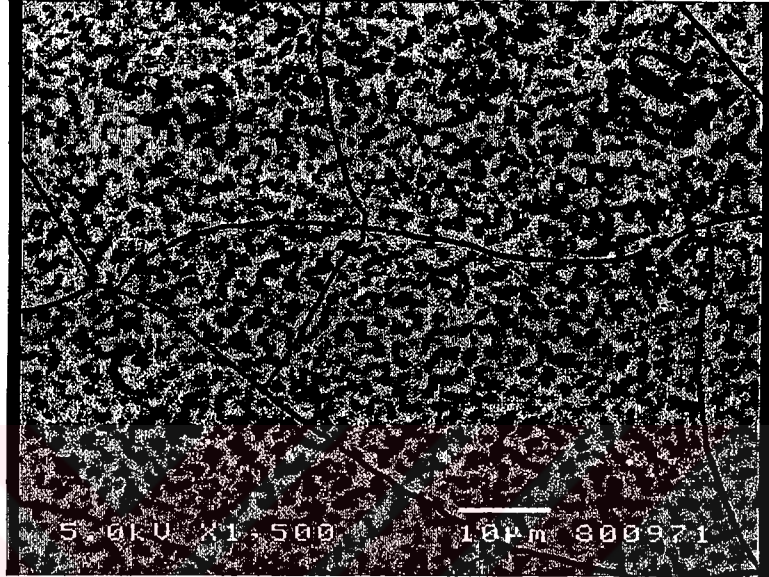
Tablo 8.1. Kaplamalarda kullanılan YHÇ taban malzemenin, sert krom ve CrN kaplamaların ön karakterizasyon sonuçları.

Numune	Kaplama Kalınlığı (μm)	Ra (μm)	HV Sertlik (kg/mm^2)
Taban Malzeme (YHÇ)	-	0,06	800 ± 50
Elektrolitik Sert Krom Kaplama	11 ± 1	0,18	1180 ± 150
CrN Kaplama	$3 \pm 0,3$	0,22	2233 ± 190

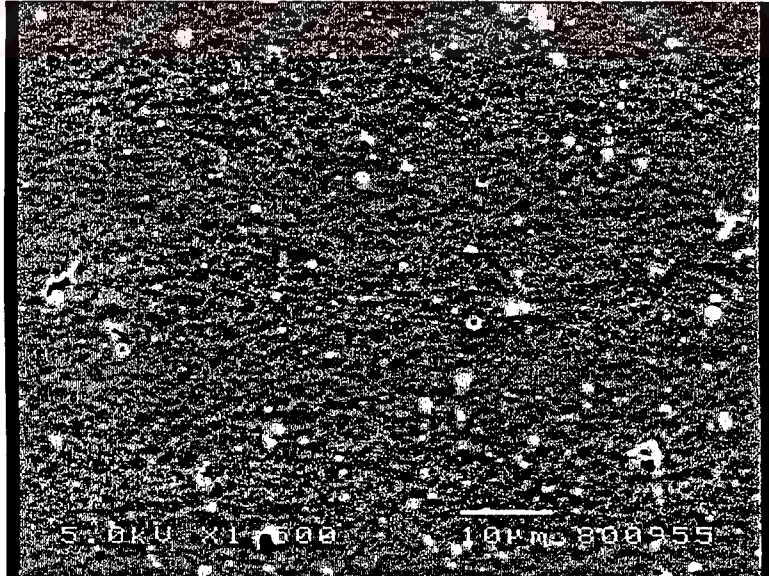
Bu sonuçlara göre, elektrolitik sert krom kaplamanın kalınlığı, krom nitrür kaplamanın kalınlığının yaklaşık üç katı olmasına karşın sertliği ancak CrN kaplamanın sertliğinin yarısı kadardır. Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü değerlerinin birbirine yakın olması aşınma davranışlarının karşılaştırması açısından uygundur.

8.2. Yağlı Ortamda Yapılan Karşılıklı Kazımalı Aşınma Deney Sonuçları

Aşınma deneyleri öncesinde kaplama yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopunda görüntüleri alınmıştır. Böylece aşınmış yüzeylerle kaplama yüzeyleri arasındaki farklar görülebilecektir.



Şekil 8.1. Elektrolitik sert krom kaplama yüzeyinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü.



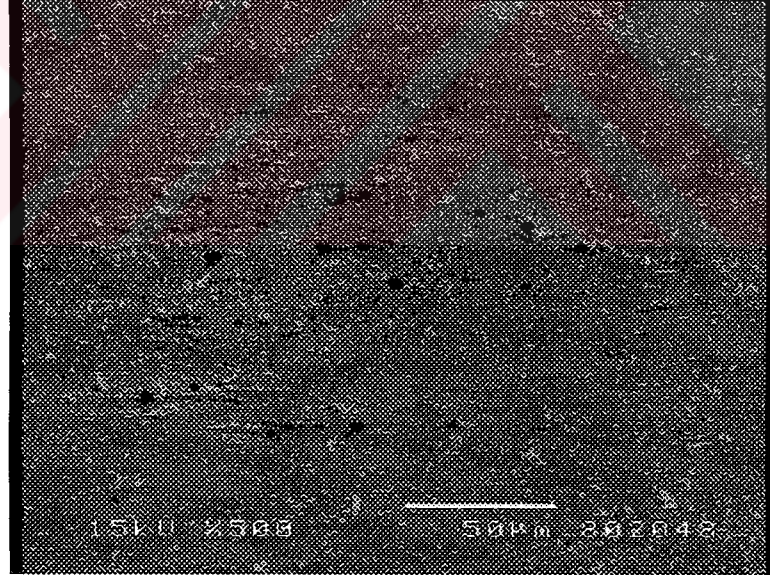
Şekil 8.2. FBB CrN kaplama yüzeyinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü.

Elektrolitik sert krom kaplamada üretim sırasında oluşan çatlaklar ve çatlaklar arasındaki noduler yapı açıkça görülmektedir (Şekil 8.1). Bu yapı endüstriyel amaçla

kullanılan sert krom kaplamalarda gözlenen yapılar ile uyum içerisindedir. CrN kaplamada ise ark FBB tekniğinin doğasından kaynaklanan dropletler gözlenmektedir (Şekil 8.2).

8.2.1. Taban Malzemenin (YHÇ) Yağlı Ortamda Aşınma Davranışı

Kaplamalarda kullanılan yüksek hız çeliği taban malzemesinin yağlı ortamda aşınma davranışının belirlenmesiyle kaplamalardaki aşınma davranışı ile karşılaştırması sağlanabilir. Çelik taban malzemesi üzerinde M 50 çelik bilya ile 30N ve 60 °C' de yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyi sonrasında çelik diskte oluşan aşınma izi taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir (Şekil 8.3). Oluşan aşınma izine bakıldığında pürüzlülüğün çok düşük olmasına rağmen küçük oyuklar şeklinde bir aşınma meydana geldiği görülmüştür. Bu aşınma tipi homojen olmayan ve istenmeyen adhezif tipte aşınmadır. Dolayısıyla kaplama ile yalnız aşınmanın azaltılması değil aşınmanın mekanizmasının değiştirilmesi sözkonusudur.

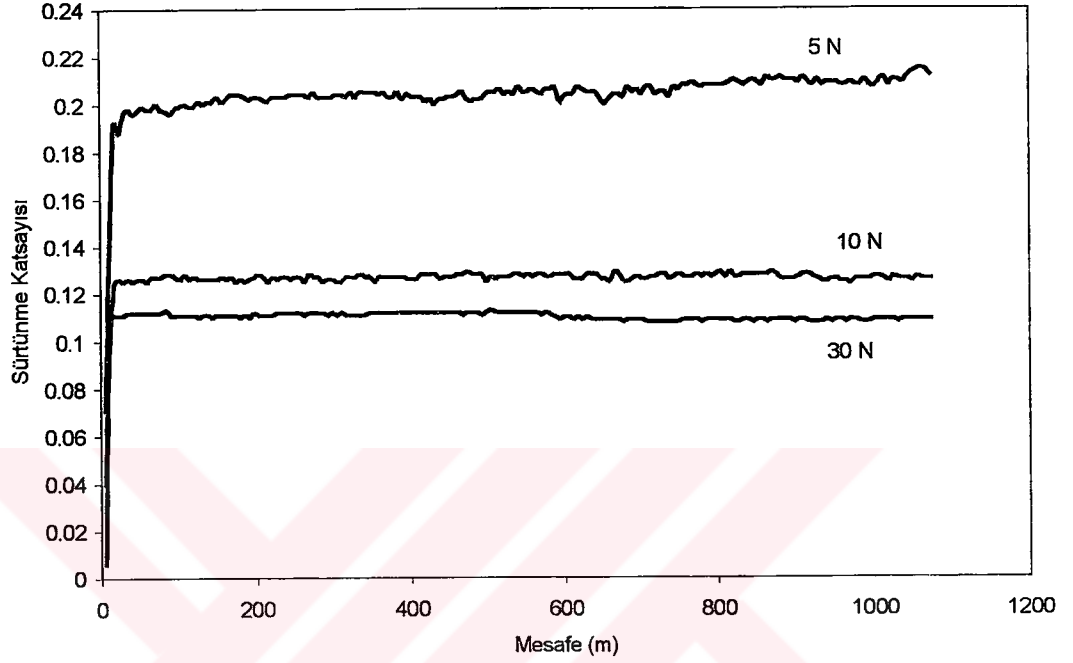


Şekil 8.3. Karşılıklı kazıma deneyi sonucu taban malzemede (YHÇ) oluşan aşınma izinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü. (60°C, 30N)

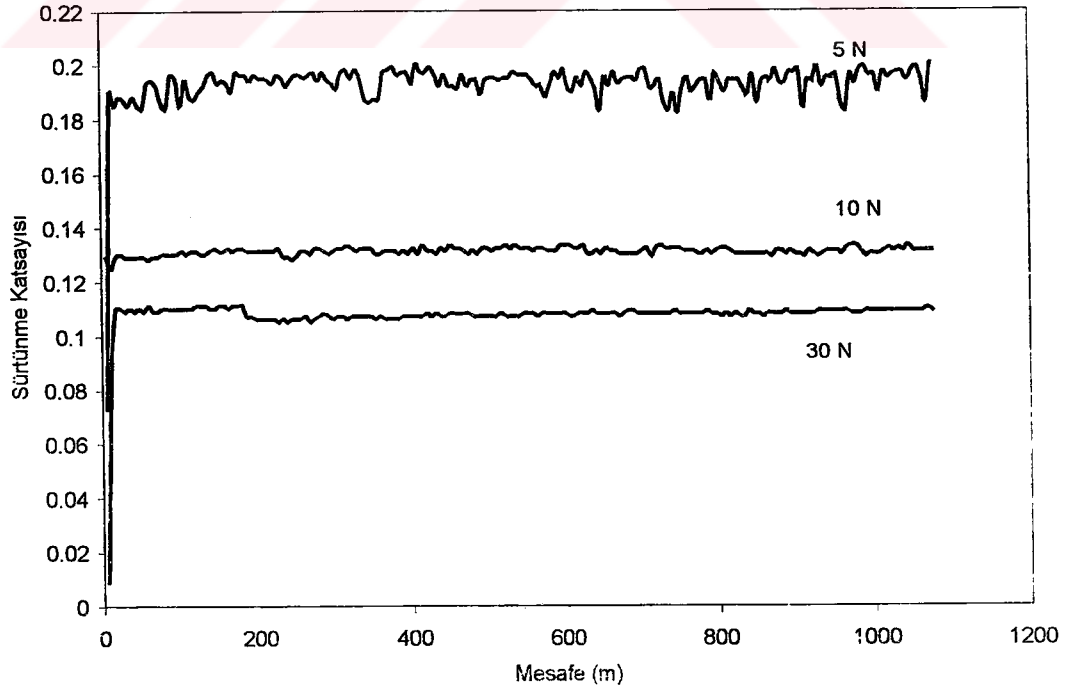
8.2.2 Sert Krom ve CrN Kaplamaların Sürtünme Katsayılarının Sıcaklık ve Normal Yüke Bağlı Olarak Değişimi

Aşınma deneyleri sırasında kaydedilen sürtünme kuvveti değerleri başka bir programda sürtünme katsayısına, çevrimler de mesafeye çevrilerek mesafe-sürtünme

katsayısı grafikleri oluşturulmuştur. Deneyler sırasında alınan verilerle oluşturulan mesafe sürtünme katsayıları grafikleri yapılan deney parametrelerinden sıcaklığa göre ayrılarak karşılaştırılmıştır. Grafiklerden yükün kaplamanın sürtünme katsayısındaki etkisi de görülmektedir.



(a)



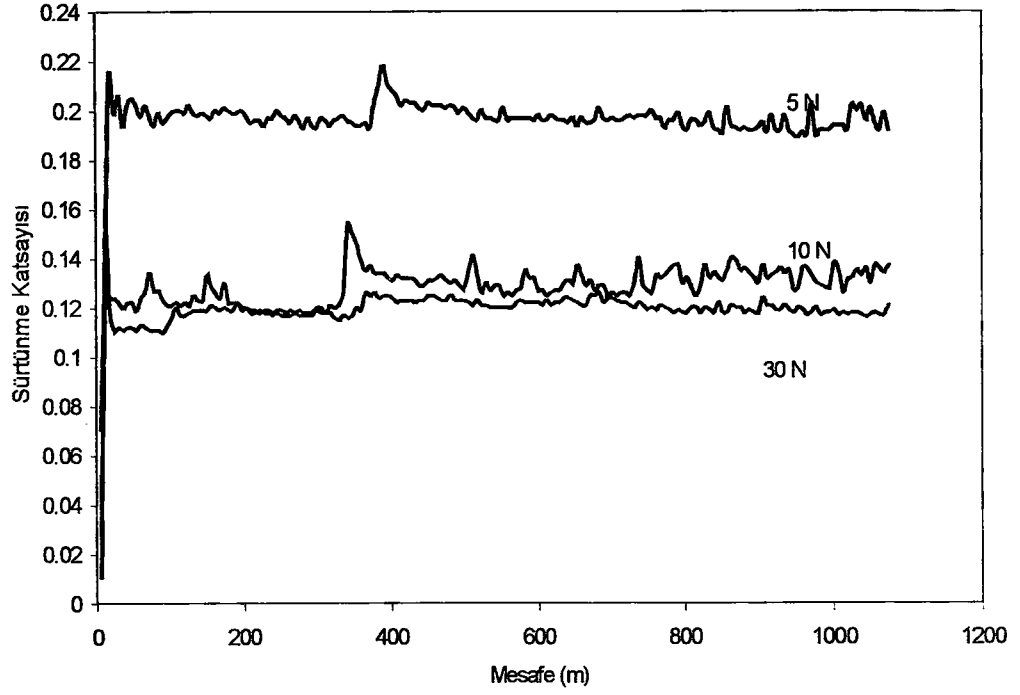
(b)

Şekil 8.4. Oda sıcaklığında yapılan karşılıklı kazıma deneyi, sürtünme katsayıları (a) Sert krom kaplama, (b) CrN kaplama.

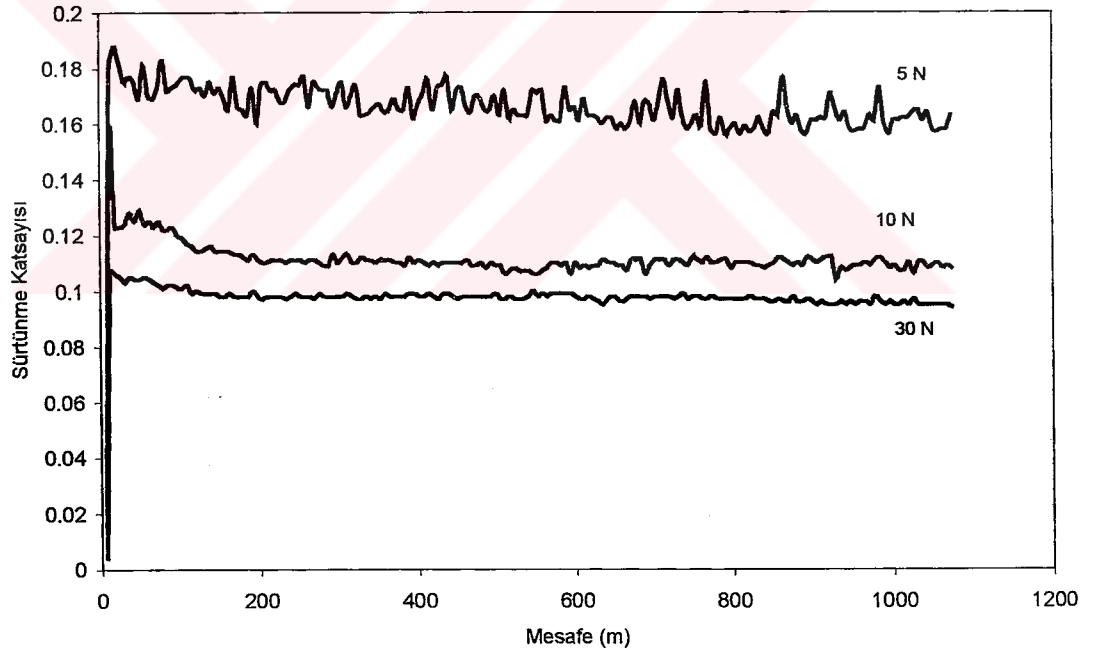
Şekil 8.4 (a) ve (b)' de oda sıcaklığında yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinden elde edilen mesafe-sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. Grafiklerden oda sıcaklığında yapılan deneylerde sert krom kaplamanın ve CrN kaplamanın sürtünme katsayılarının aynı değerlerde olduğu görülmektedir.

Oda sıcaklığında yapılan deneylerde genel olarak yükün artmasıyla kaplamaların çelik bilyaya karşı sürtünme katsayısı değerlerinin azaldığı görülmektedir. Yükün azalmasına rağmen sürtünme katsayılarının daha yüksek olması sınır ve/veya karışık yağlama koşullarında bilya ile kaplama yüzeyi arasındaki teması sağlayan pürüzlülüklerin zaman bağlı olarak daha az aşınmasına bağlanabilir. Ayrıca yükün az olması aşınma ürünlerinin sürtünme arayüzeyinden ayrılmasını veya sürtünme özelliklerini etkileyebilir.

Şekil 8.5 (a) ve (b)' de 60 °C sıcaklıkta yapılan deneylerden elde edilen sürtünme katsayıları verilmiştir. Oda sıcaklığındaki deneylerde olduğu gibi 60°C sıcaklıkta da artan yüklerle beraber azalan sürtünme katsayıları görülmektedir. 60 °C sıcaklıkta, sert krom kaplamanın sürtünme katsayılarının CrN kaplamaninkine oranla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak aşınma mekanizmalarındaki farklılık gösterilebilir. Sert krom kaplamaya ait mesafe-sürtünme katsayısı grafiğine bakıldığında yaklaşık 350-400 metrede sabit giden sürtünme katsayısında bir yükselme ve değişme görülmüştür. Bu değişimin aşınma sırasında meydana gelen aşırı yapışmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Genel olarak sert krom kaplamanın sürtünme katsayısının mesafeyle değişimindeki iniş ve çıkışlarda bu yapışma nedeniyledir. CrN kaplamanın sürtünme katsayısında ise özellikle yüksek yüklerde daha düzgün bir değişim vardır. CrN kaplamanın sürtünme katsayısında 200 metreye yakın bir mesafede sürtünme katsayısında azalma meydana gelmekte ve daha sonra sabit kalmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 8.5. 60 °C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazıma deneyi, sürtünme katsayıları (a) Sert krom kaplama, (b) CrN kaplama.

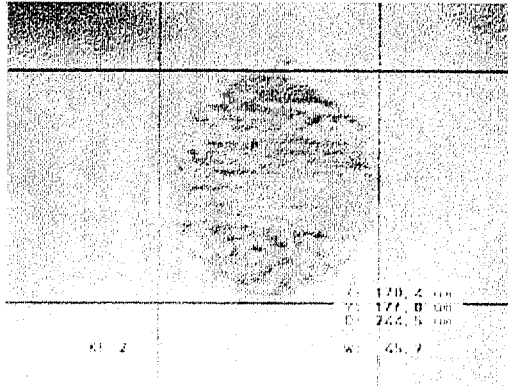
Yağın sıcaklığının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi sert krom kaplamada sürtünme katsayısının sıcaklığın varlığında artması ile ortaya çıkmaktadır. CrN kaplamada ise sıcaklığın artması sürtünme katsayısını azaltmıştır. Sıcaklığın artması

yağın viskozitesini azaltır. Daha akışkan hale gelen yağ iki katı yüzeyi birbirinden ayırmada yetersiz hale gelir. Dolayısıyla sürtünme katsayılarının yağın sıcaklığının artmasıyla artması gerekir. Sert krom kaplamanın sürtünme katsayıları bu duruma uygunluk göstermektedir. CrN kaplamada oda sıcaklığında sürtünme katsayıları ile 60°C deki sürtünme katsayılarından biraz daha fazla olması, viskoz yağın oluşan ürünleri uzaklaştırmada akışkan sıvı kadar etkin olmaması veya yüksek sıcaklıkta oluşan aşınma ürünlerinin niteliğinin farklılaşması şeklinde açıklanabilir.

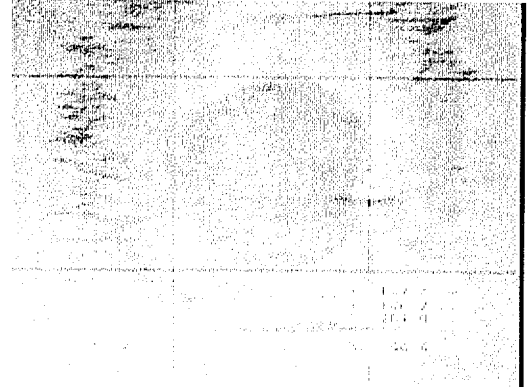
8.2.3. Karşılıklı Kazımalı Aşınma Deneylerinde Sert Krom ve CrN Kaplamalara Karşı Kullanılan M50 Bilyaların Aşınma Hacim ve Oranları

Karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinden sonra kaplamalı disklerde ve bilyalardaki aşınma izleri optik mikroskopta incelenmiştir. Kaplamalı disklerde aşınmanın az olmasından dolayı bilyalardaki aşınma iz çapları ölçülerek aşınma hacimleri ve aşınma oranları hesaplanmıştır. Şekil 8.6-8.8 (a) ve (b)' de oda sıcaklığında yapılan aşınma deneyleri sonucunda bilyalarda oluşan aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri verilmektedir.

Her iki kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izlerin çapları azalan yüklerle beraber azalmaktadır. CrN kaplama karşıtı bilyadaki aşınma izinde kontak alanı dışında aşınma ürünlerinin oluşturduğu bir alan görülmektedir. Bu alan yükün azalmasıyla artmaktadır. Bunun nedeni olarak abrasif aşınmaya sebep olan aşınma ürünlerinin düşen yük ile serbest hareketinin artması gösterilir.

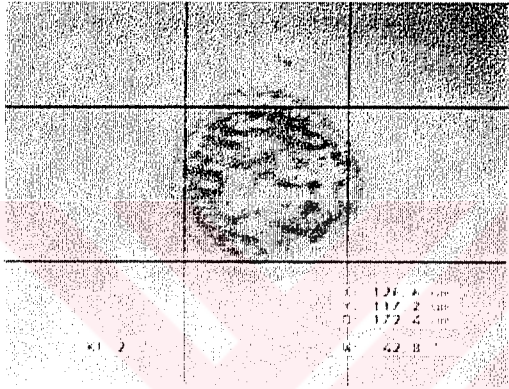


(a)

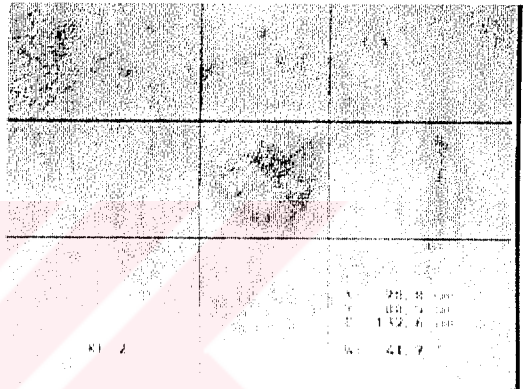


(b)

Şekil 8.6. Bilyadaki aşınma izleri, (a) Sert krom kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (oda sıcaklığı, 30 N).

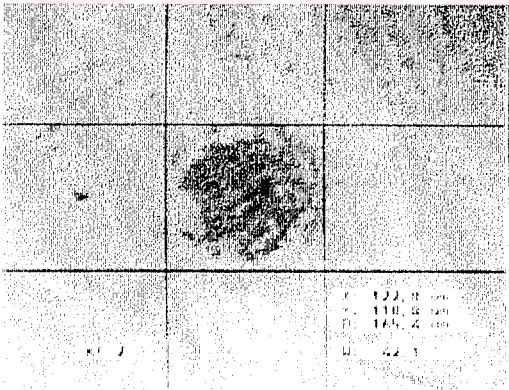


(a)

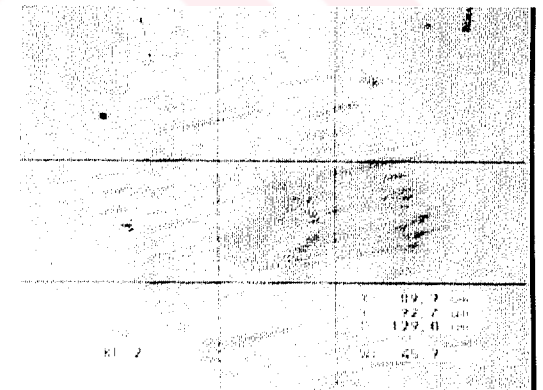


(b)

Şekil 8.7. Bilyalardaki aşınma izleri, (a) Sert krom kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (oda sıcaklığı, 10 N).



(a)

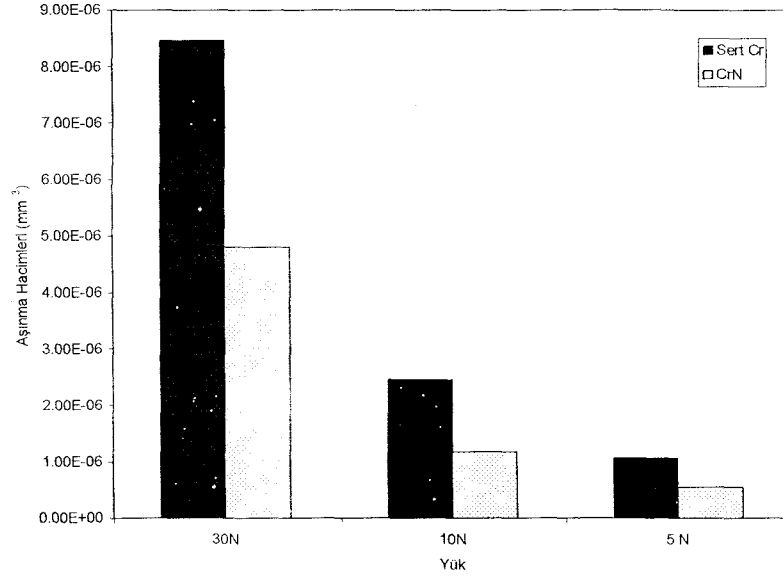


(b)

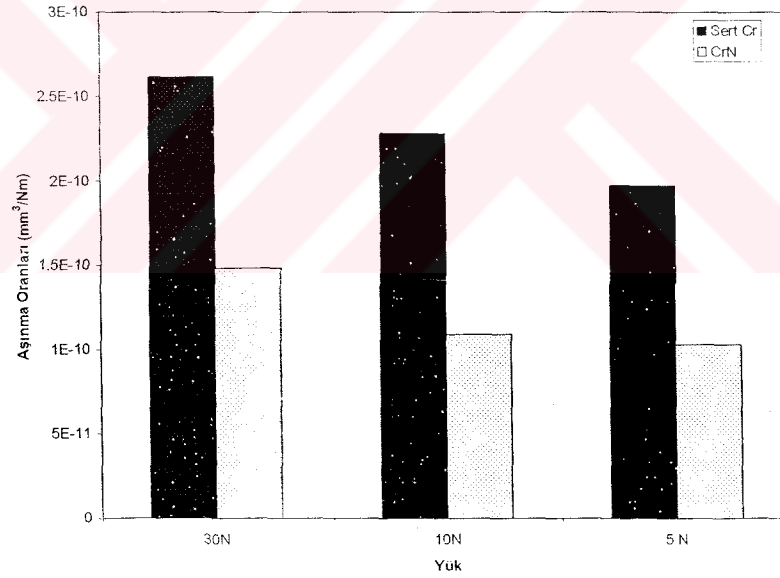
Şekil 8.8. Bilyalardaki aşınma izleri, (a) Sert krom kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (oda sıcaklığı, 5 N).

Oda sıcaklığında yağlı ortamda yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde sert krom ve CrN kaplamalara karşı hareket eden bilyalardaki aşınma iz çapları kullanılarak hesaplanan aşınma hacimleri ve aşınma oranları Şekil 8.9 ve 8.10' da

karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Hesaplamalarda kullanılan iz çapları kontak alanından alınmıştır.



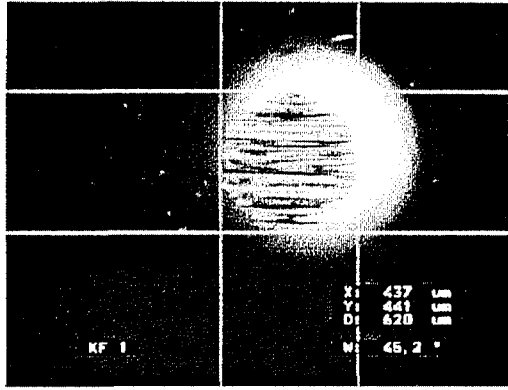
Şekil 8.9. Oda sıcaklığında yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde bilyalarda oluşan aşınma iz çapına göre hesaplanan aşınma hacimleri



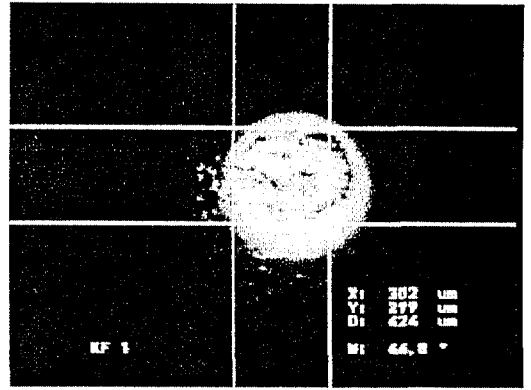
Şekil 8.10. Oda sıcaklığında yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde bilyalarda oluşan aşınma hacimlerine bağlı hesaplanan aşınma oranları

Oda sıcaklığında yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri sonucunda; yükün azalması ile bilyalardaki aşınma hacimlerinin azaldığı görülmüştür. Aynı şekilde yükün ve mesafenin etkisi ile birlikte hesaplanan aşınma oranlarında da azalan yüklerle birlikte her iki kaplama karşıtı bilyadaki aşınma oranlarında azalma söz konusudur.

CrN kaplama karşıtı bilyalar için hesaplanan aşınma oranları sert krom kaplamaya karşı kullanılan bilyalardaki aşınma oranlarına nazaran daha düşüktür.

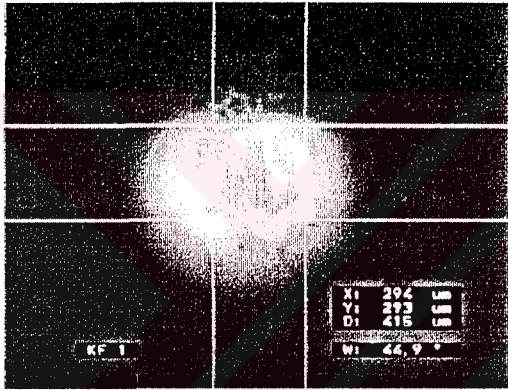


(a)

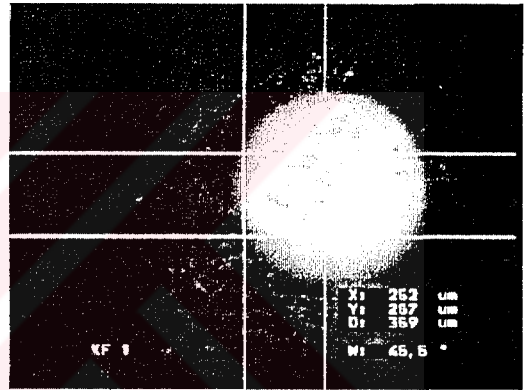


(b)

Şekil 8.11. Bilyalardaki aşınma izleri (a) Sert Cr kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (60 °C, 30 N)

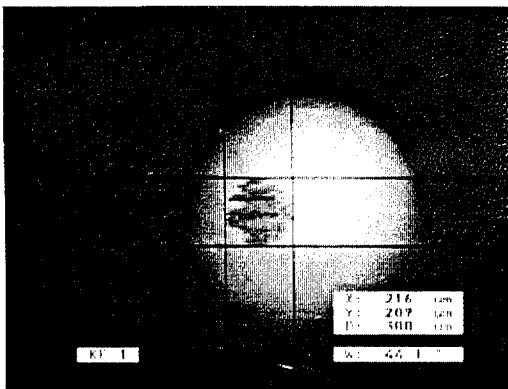


(a)

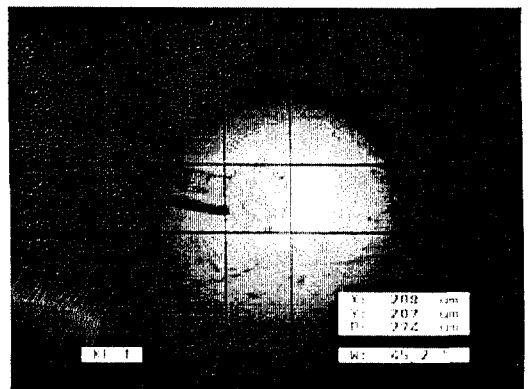


(b)

Şekil 8.12. Bilyalardaki aşınma izleri (a) Sert Cr kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (60 °C, 10 N)



(a)

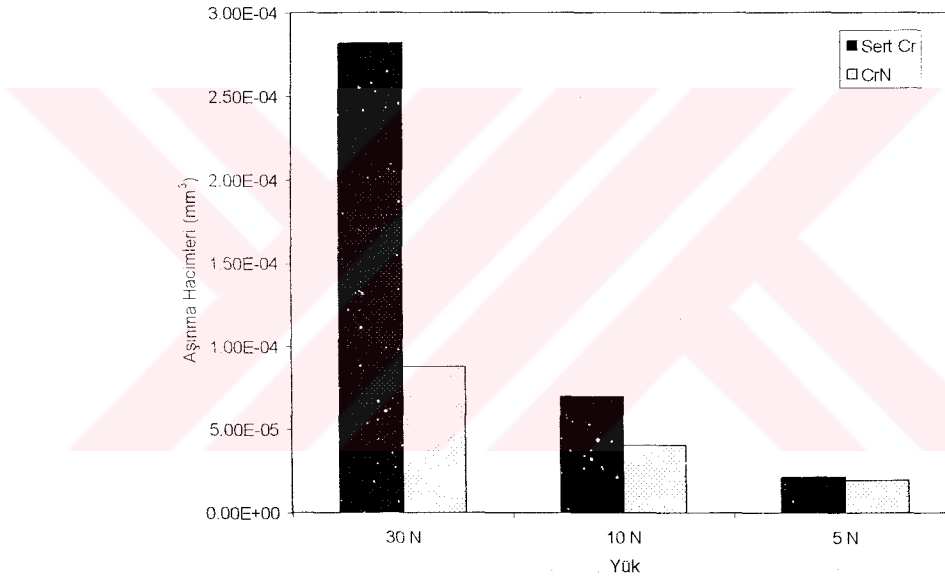


(b)

Şekil 8.13. Bilyalardaki aşınma izleri (a) Sert Cr kaplamaya karşı, (b) CrN kaplamaya karşı (60 °C, 5 N)

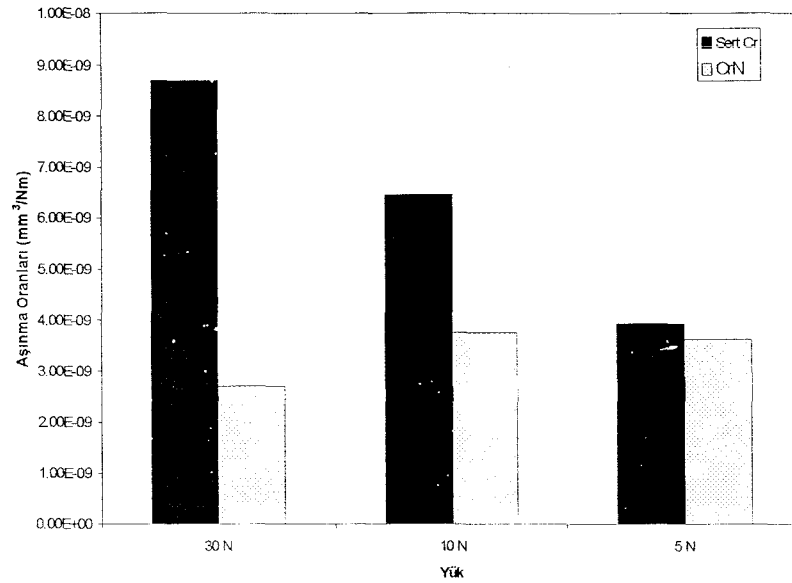
Şekil 8.11-8.13 (a) ve (b)' de 60 °C sıcaklıkta aşınma deneyleri sonucunda bilyalarda oluşan aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Optik mikroskop görüntülerinde azalan yüklerle beraber bilyalarda oluşan aşınma iz çaplarının küçüldüğü görülmektedir. CrN kaplama karşıtı bilyalarda oluşan aşınma iz çapları sert krom kaplama karşıtı bilyalarda oluşanlara oranla daha küçüktür. Yükün 30 N olduğu deney sonucunda bu farkın daha fazla olduğu görülmüştür.

60 °C sıcaklıkta 5, 10 ve 30 N yükte yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde bilyalarda oluşan aşınma izlerin optik mikroskopta ölçülmüş çapları ile bilyalardaki aşınma hacimleri ve aşınma oranları hesaplanmıştır. Şekil 8.14 ve 8.15' de kaplamalara karşı kullanılan bilyalardaki aşınma hacim ve oranları sırasıyla verilmektedir.



Şekil 8.14. 60 °C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde bilyalarda oluşan aşınma iz çapına göre hesaplanan aşınma hacimleri.

60°C sıcaklıkta yapılan deneyler sonucu bilyada oluşan iz çapına göre hesaplanan aşınma hacimlerinde yükün 30 N olduğu durumda iki kaplama karşıtı bilyalardaki aşınma hacimlerinde yüksek bir fark oluşmuştur. Yükün azalması ile her iki kaplamaya karşı kullanılan bilyalarda aşınma hacimleri azalmıştır. Yükün düşmesiyle CrN kaplamaya ait bilyadan hesaplanan aşınma hacmi sert krom kaplamaya karşı çalışan bilyanın aşınma hacmine yaklaşmaktadır.



Şekil 8.15. 60 °C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde bilyalarda oluşan aşınma hacimlerine bağlı hesaplanan aşınma oranları.

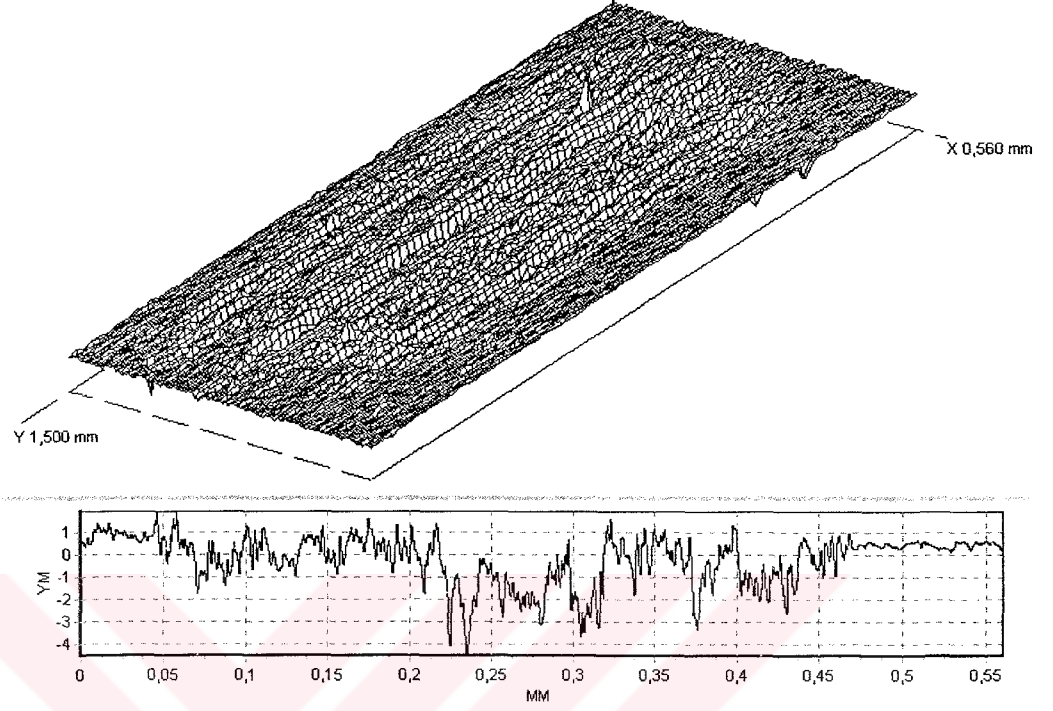
60°C sıcaklıkta yapılan deney sonuçlarında bilyalarda oluşan aşınma hacimlerine göre hesaplanan aşınma oranlarına bakıldığında sert krom kaplamaya karşı kullanılan bilyanın aşınma oranı yükün azalmasıyla azalmaktadır. Ancak CrN kaplamaya karşı kullanılan bilyalardaki aşınma oranları belirli bir düzen göstermemiştir.

Oda sıcaklığı ile kıyaslandığında 60°C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde bilyalarda oluşan aşınma hacim ve oranları daha yüksektir. Bu da yağın yağlayıcı özelliğinin bozularak daha fazla aşınmaya neden olmasıdır.

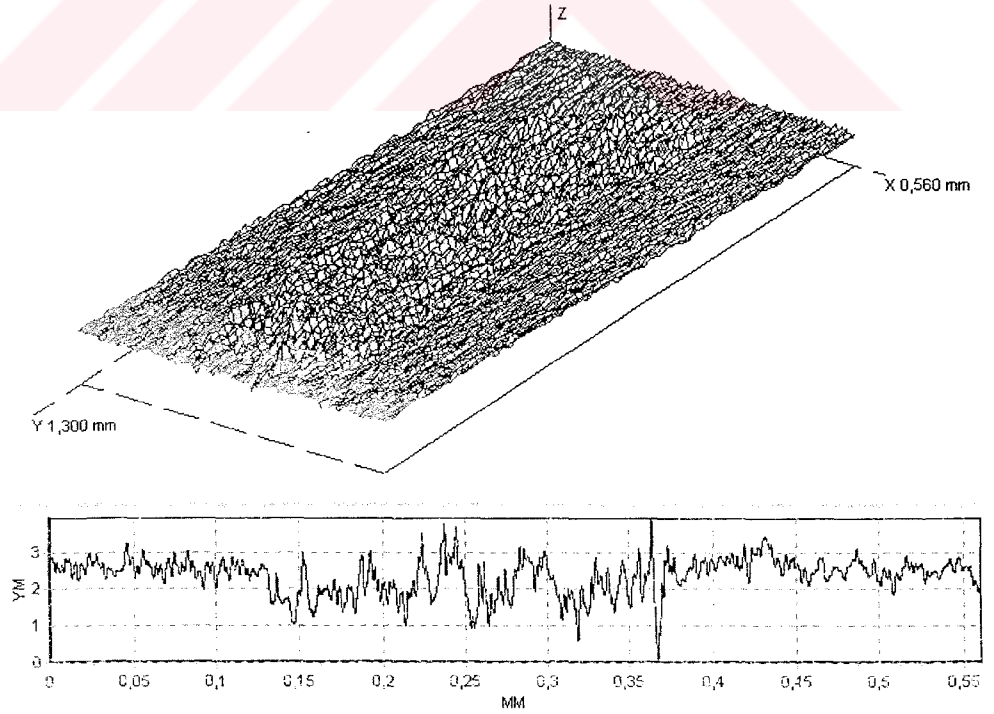
8.2.4. Karşılıklı Kazımalı Aşınma Deneyleri Sonrası Sert Krom ve CrN Kaplamaların Aşınma Yüzeylerinin Profilometrik İncelemesi

Sert krom ve CrN kaplamalı disklerdeki aşınma derinliklerinin belirlenmesi için kaplamalı diskler profilometre cihazında incelenmiştir. Yapılan incelemede oda sıcaklığında yapılan deneyler sonucunda kaplamalarda oluşan aşınma izlerinin derinlikleri tespit edilememiştir. 60 °C sıcaklıkta yapılan deneyler sonucunda CrN kaplamada oluşan aşınma izi derinliği ölçülemezken elektrolitik sert krom kaplamada oluşan aşınma izlerin derinlikleri belirlenebilmiştir. 60 °C sıcaklıkta ve 30 N yükte, 10 N yükte ve 5 N yükte yapılan deneyler sonucunda sert krom kaplamalı diskte oluşan izlerin profilometrede alınan üç boyutlu görüntüleri sırasıyla Şekil 8.16 (a), (b) ve (c)' de yer almaktadır. Bu görüntülerde aşınma derinliğinin ve genişliğinin

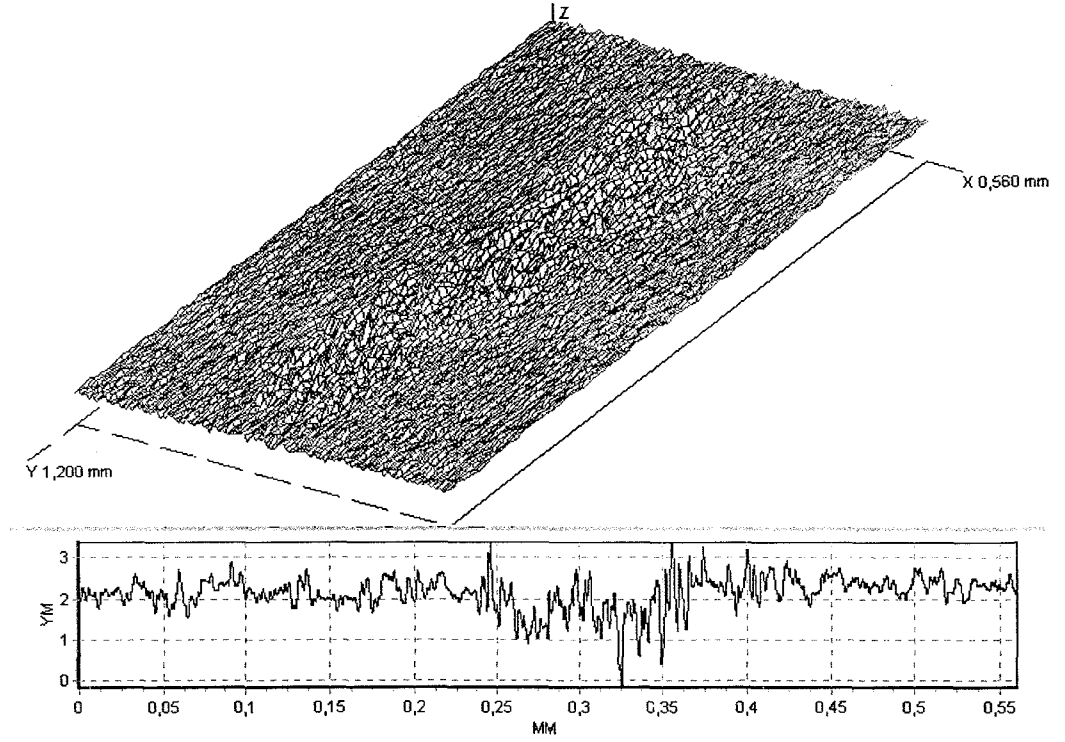
azalan yükü azaldığı görülmektedir. Aşınma izinin şekilsizliği (homojen olmaması) nedeniyle sert krom kaplamalı disklerdeki bu aşınmanın hacmi tam olarak hesaplanamamıştır.



(a) 30 N yük altında yapılan aşınma deneyi sonucu



(b) 10 N yük altında yapılan aşınma deneyi sonucu



(c) 5 N yük altında yapılan aşınma deneyi sonucu

Şekil 8.16. 60 °C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri sonucunda elektrolitik sert krom kaplamalı disklerde oluşan aşınma izleri, (a) 30 N yükte, (b) 10 N yükte, (c) 5 N yükte.

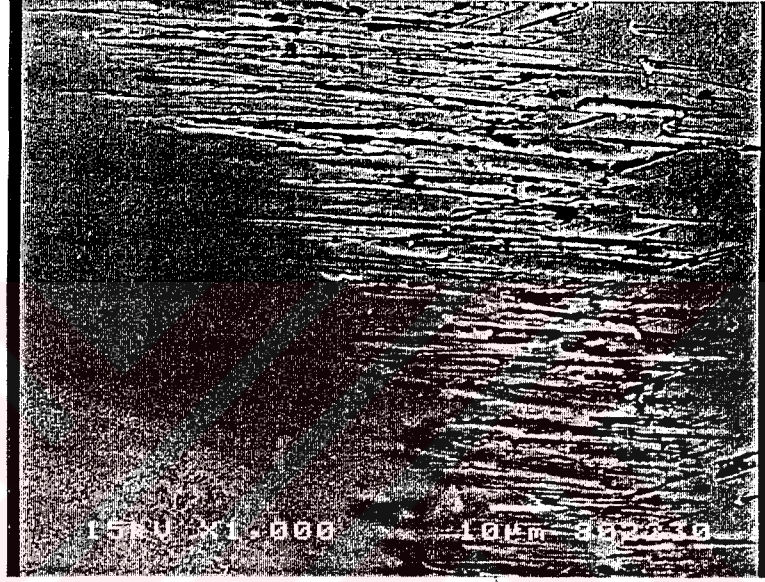
Şekil 8.16' de görüldüğü gibi 60°C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri sonucunda sert krom kaplamalı diskte oluşan aşınma izlerindeki maksimum derinlikler; 30 N yük altında 3,5 μm , 10 N yük altında 1,5 μm ve 5 N yük altında 1 μm civarındadır.

8.2.5. Bilyaların ve Kaplamalı Disklerin Aşınma Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri

Taramalı elektron mikroskobu ile, yağlı ortamda karşılıklı kazımalı aşınma deneyi yapılmış kaplamalı disklerde ve disklerle karşı sürtünen bilyalarda oluşan aşınma izleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu inceleme ile sert krom ve CrN kaplamada M50 çelik bilyaya karşı yağlı ortamda nasıl aşınma mekanizmaları geliştiği görülmektedir.

Oda sıcaklığında yapılan deneylerde oluşan aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde; yükün 30 N olduğu durumda sert krom kaplamaya karşı hareket eden bilyanın aşınma bölgesinde koyu görünen kısımların kaplamadan

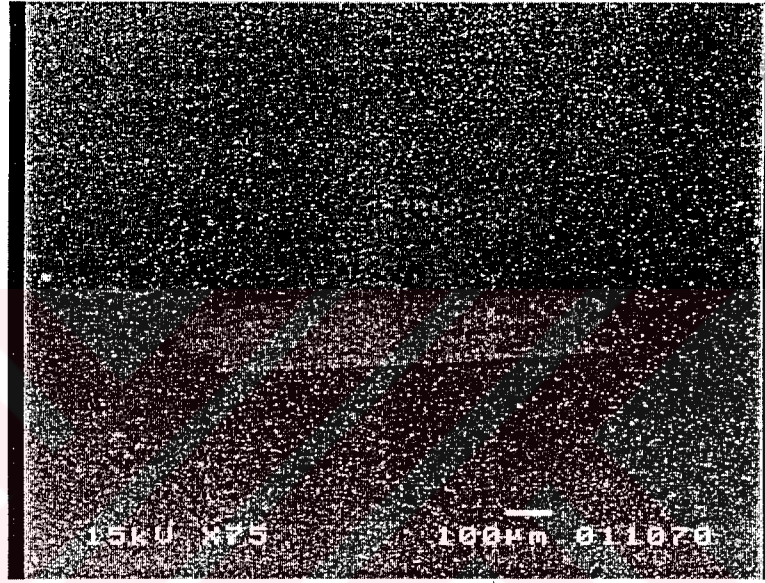
transfer olan krom olduğu tespit edilmiştir(Şekil A.1). CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinde ise hem kontak alanında hem izin çevresinde çiziklerin olduğu görülmüştür (Şekil A.2). Kontak alanı dışındaki bölgede oluşan bu izler kaplama yüzeyinden kopan sert partiküllerin neden olduğu çizikler ve biriken aşınma ürünleridir. Viskoz yağ tarafından fazla uzaklaştırılamayan ürünler kontak alanı çevresinde çizikler oluşturmuş ve birikmiştir. Şekil 8.17’ de kontak alanı ve dışarı doğru hareket yönünde çiziklere neden olan ve biriken bu aşınma ürünleri görünmektedir.



Şekil 8.17. CrN kaplamaya karşı hareket eden bilyada oluşan aşınma izi detay görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30 N).

Oda sıcaklığında ve 30 N yükte kaplamalarda meydana gelen aşınmaların elektron mikroskobu görüntüleri Şekil A.3-A.6’ da verilmiştir. Sert krom kaplamalı diskte aşınma miktarının oldukça az olduğu görülmektedir. Yağlı ortamda aşınmasının iyi olduğu söylenen krom kaplamanın oda sıcaklığındaki bu davranışı literatürü destekler niteliktedir. Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin derinliğinin fazla olmadığı, izin içersinden çatlaklı yapının görülmemesinden anlaşılmaktadır. Kayma hareketinin yönünde çiziklerle beraber bölgesel kayıpların olduğu görülmektedir. CrN kaplamada ise sert krom kaplamaya nazaran daha az bir aşınma olduğu ve oluşan aşınma izinde hareket yönündeki çizikler ve yüzeyin yapısındaki değişim görülmektedir.

Oda sıcaklığında ve 10 N yükte yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde sert krom kaplamaya karşı hareket eden bilyada oluşan aşınma izinin koyu görünen bölgelerde az miktarda krom transferi vardır (Şekil A.7). CrN kaplamaya karşı hareket eden bilyada oluşan aşınma izinde ürünlerin kontak alanı çevresinde yerleşiminin arttığı görülmektedir (Şekil A.8). Bu ürünler CrN kaplamalı diskte kontak alanı dışında aşınma bölgesindeki benzer yüzeyin değişimine neden olmaktadır. Şekil 8.18’ de aşınma izinin hemen üzerinde bu bölge daha açık görülmektedir.



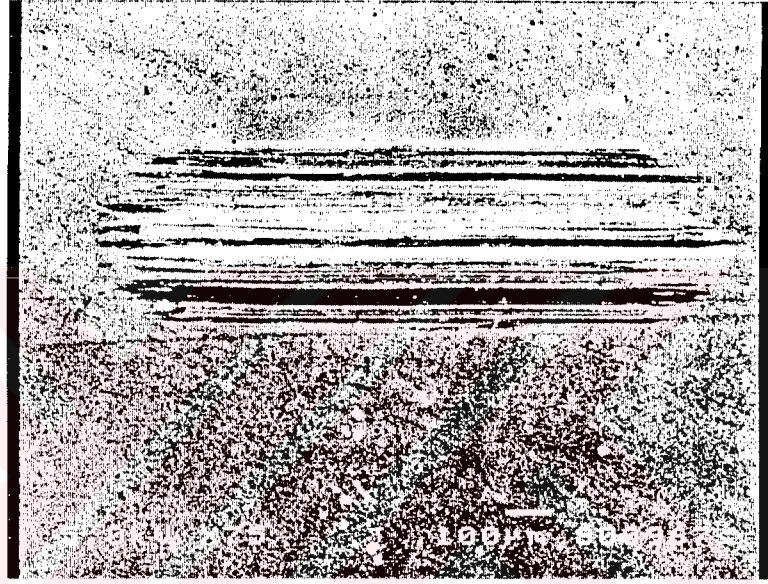
Şekil 8.18. CrN kaplamalı diskte oluşan aşınma izi genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10N)

Sert krom kaplamanın oda sıcaklığı ve 10 N yükteki aşınma izinin elektron mikroskobu görüntüsünde aşınmanın azaldığı, aşınma alanı içerisinde çatlakların daha belirgin olduğu Şekil A.9’ de görülmektedir. CrN kaplamada yine aynı yapının oluşması ve aşınmanın düşen yük ile azalması sözkonusudur (Şekil A.10).

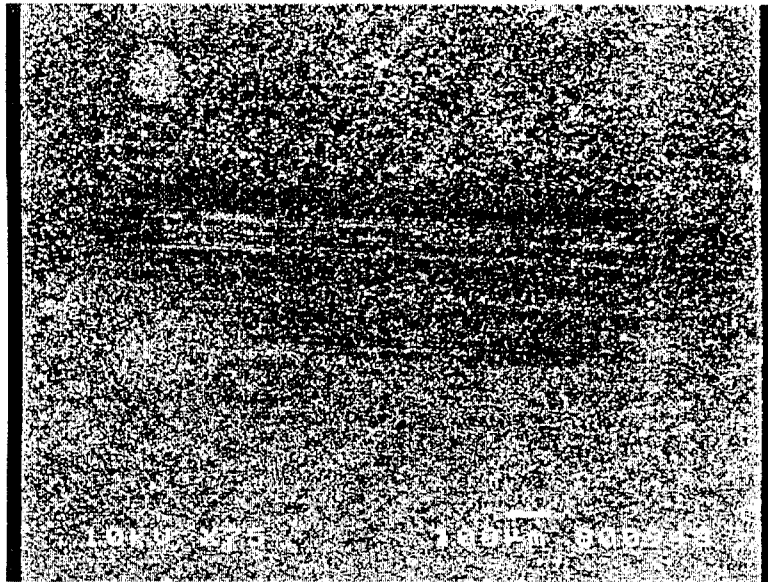
Oda sıcaklığında ve 5 N yük ile yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri sonucunda bilyalarda oluşan izlerin Şekil A.11’ de verilen taramalı elektron görüntüsüne bakıldığında; sert krom kaplama karşıtı bilyada aşınma izi çapının küçüldüğü mekanizmanın değişmediği görülmektedir. CrN kaplama karşıtı bilyada ise kontak alanı, çiziklerden dolayı belirsizleşmiştir (Şekil 12).

Kaplamalarda oda sıcaklığı ve 5 N yükte yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri sonucunda oluşan izlere bakılacak olursa Şekil A.13’ de görüldüğü gibi sert krom kaplamada çatlak kenarlarında ve çatlaklar arasında kırılma ya da kalkmaya benzer izler görülmektedir. CrN kaplamadaki aşınma izinde diğer yüklerde olduğu gibi dropletsiz bir yapı görülmüştür (Şekil A.14).

60 °C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri sonucunda kaplamalı diskler ve bilyalarda oluşan aşınma izleri taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.



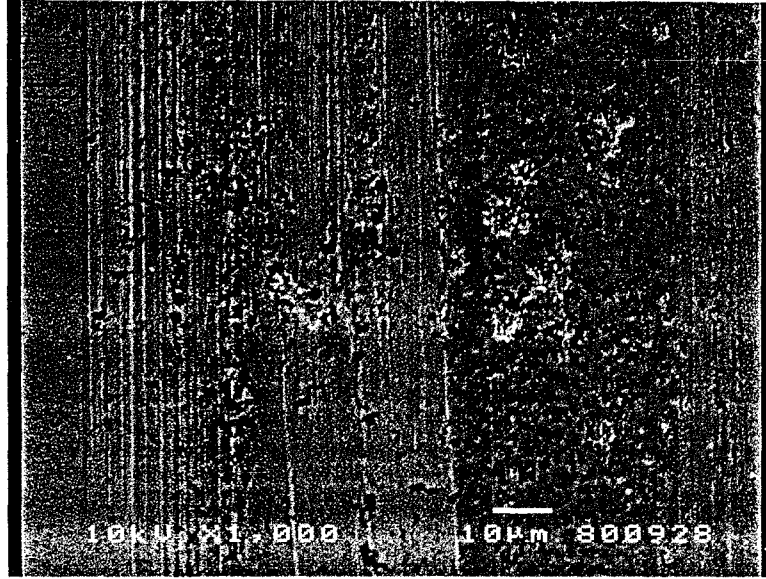
Şekil 8.19. Sert krom kaplamada oluşan aşınma izi genel görüntüsü (60°C, 30N)



Şekil 8.20. CrN kaplamada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 30N)

60 °C sıcaklıkta yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri sonrasında yapılan taramalı elektron mikroskobu incelemesinde aşınmış yüzeylerin genel ve detay görüntüleri alınmıştır. 30 N yük altında yapılan deneyler sonucunda kaplamalı disklerde oluşan aşınma izlerinin genel görüntüleri Şekil 8.19 ve 8.20’ de verilmektedir. Sert krom kaplamalı diskte oluşan aşınma izinin genel görüntüsünde kayma hareketi yönünde oluşan derin çizikler görülmektedir. Şekil A.15’ de detay görüntüsü verilen sert krom kaplamanın aşınma izinde, sert krom kaplamanın yüzey yapısının değiştiği ve Şekil 8.1’de görülen sert kromun çatlaklı yüzey yapısının tamamen yok olduğu görülmektedir. Şekil 8.20’ daki CrN kaplamalı diskte oluşan aşınma izinin genel görüntüsüne bakıldığında izin kenarları da dahil olmak üzere kaplama yüzey yapısının değiştiği görülmektedir. Şekil A.16’ da detay görüntüsü verilen aşınma izinde normalde kaplamanın yüzeyinde varolan dropletler görülmemektedir.

60 °C sıcaklıkta ve 30 N yük altında yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinin sonucunda kaplamalara karşı hareket eden bilyalarda oluşan aşınma izleri Şekil A.17-18’ de verilmektedir. CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinde kontak alanı dışında aşınma ürünleri birikimi görülmektedir. Sert krom kaplama karşıtı bilyadaki aşınma izinde görülen koyu bölgeye yakından bakılacak olursa (Şekil 8.21); bu bölgeye kaplamadan krom transferinin olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle koyu bölge ve bilyada aşınmanın olmadığı bölgelerden alınan EDS analizi alınmıştır. Sonuçta bu koyu bölgelerde Cr miktarının bilyada bulunması gereken miktardan daha fazla olduğu görülmüştür. Bu sonuç sert krom kaplamadan çelik bilyaya yapışmanın var olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 8.21. Sert krom kaplama karşıtı bilyadaki aşınma izi (60°C, 30N).

60°C sıcaklıkta ve 10 N yükte yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri sonucunda karşıt malzemelerde oluşan aşınma izleri Şekil A.19 ve A.20’ de verilmektedir. Kaplamalara karşı hareket eden bilyalardaki aşınma, 30 N yükte yapılan aşınma deneyleri sonuçlarına benzemektedir. Sadece miktarsal olarak aşınma izlerinin çapları küçülmüştür. Bilyanın disk üzerinde hareketinin ters yöne çevrildiği aşınma izlerinin uç kısımları elektron mikroskopunda detaylı incelenmiştir (Şekil A.21). Sert krom kaplamada aşınma izinin kenarlarında herhangi bir ürün birikimine rastlanmamıştır. Aşınma sonucunda sert krom kaplamadan ayrılan kısımların yırtılma şeklinde izler oluşturulduğu görülmektedir. CrN kaplamada ise kontak alanındaki yapı değişiminin kontak alanı dışındaki kısmına nazaran daha belirgin olduğu görülmüştür (Şekil A.22).

60°C sıcaklıkta ve 5 N yükle yapılan deneylerin sonucunda karşıt malzemelerde oluşan aşınma izleri Şekil A.23-A.24’ de verilmektedir. CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma iz çapı sert krom kaplama karşıtı bilyada oluşan iz çapına oldukça yakındır.

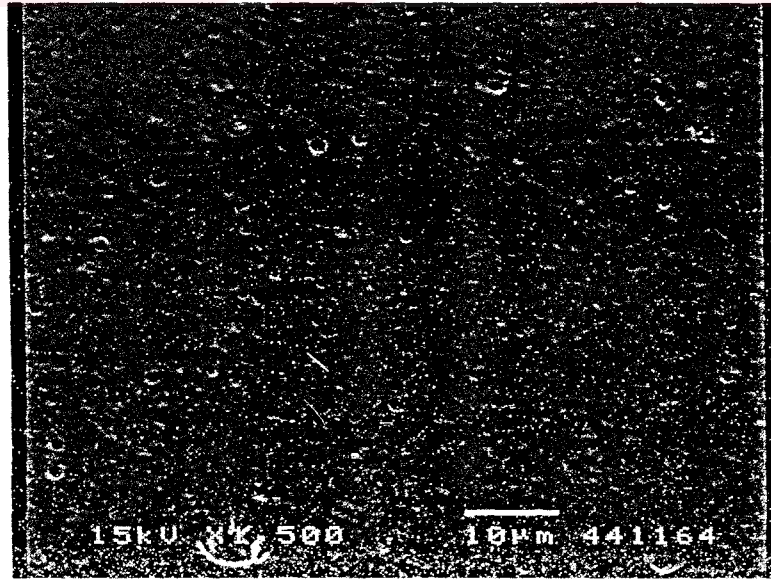
Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinde yüzeyden bölgesel kopmalar daha net görülmektedir (Şekil A.25). Aşınma izinin uç kısmından alınan Şekil A.26 verilen detay görüntüsünde bölgesel kopmalarla birlikte kayma hareketi yönünde izler ve aşınmanın derinliği görülmektedir. CrN kaplamanın aşınma izinden alınmış taramalı

elektron mikroskobu görüntüsünden (Şekil A.27) yine hareket yönünde derin olmayan çizikler ve aşınma bölgesinin detaylı görüntüsünde (Şekil A.28) dropletsiz bir yüzey görülmektedir.

8.2.6. Fırçalama İşlemi Uygulanmış CrN kaplamanın Yağlı Ortam Aşınma Davranışı

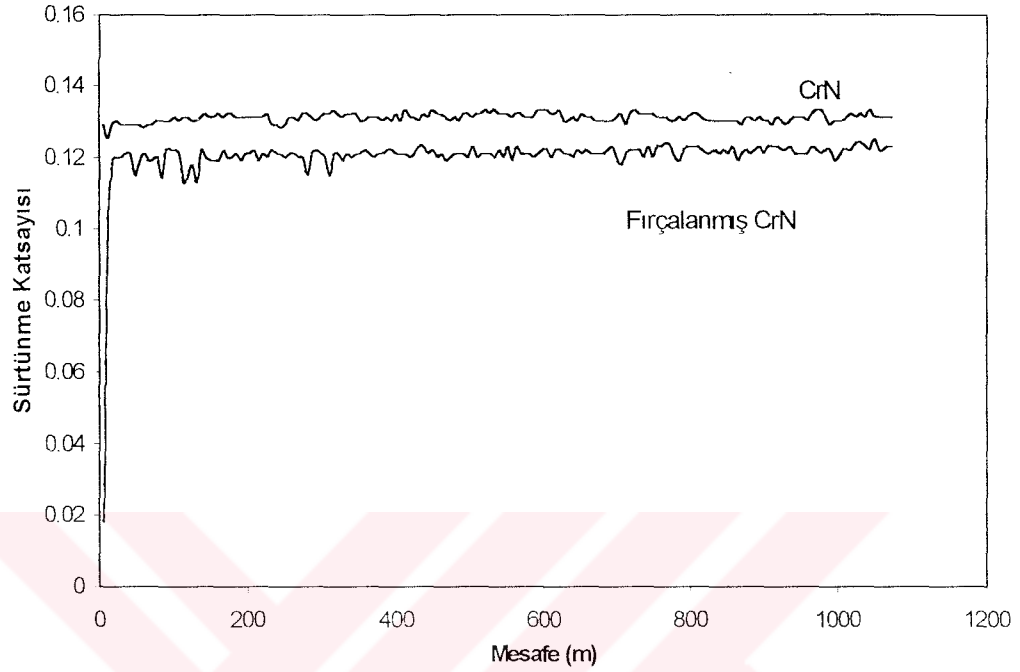
CrN kaplamaların aşınma mekanizmasının, tipik abrazif aşınma olduğu yapılan aşınma deneyleri sonucunda ortaya çıkmıştır. Abrazif aşınmaya öncelikle kaplama yüzeyindeki dropletlerin aşınma sırasında koparak aşınma arayüzeyinde hareketlerinin neden olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle CrN kaplama yüzeylerindeki dropletlerin giderilmesi için fırçalama işlemi yapılmıştır. Fırçalanmış numunenin aşınma davranışını karşılaştırmak için oda sıcaklığında ve 10 yük altında karşılıklı kazımalı aşınma deneyi yapılmıştır. Böylece CrN kaplamaya oda sıcaklığında yapılan aşınma deney sonuçlarında daha etkin görünen aşınma ürünlerinin davranışı gözlemlenebilecektir.

CrN kaplamada abrazif aşınmaya neden olduğu düşünülen dropletlerin giderilmesi için yapılan fırçala işlemi sonunda kaplamanın yüzey görüntüsü Şekil 8.22' de verilmiştir.



Şekil 8.22. Fırçalama işlemi yapılmış CrN kaplamanın elektron mikroskobunda çekilmiş yüzey görüntüsü.

Fırçalanmış numuneye uygulanan karşılıklı kazımalı aşınma deneyinde oluşan sürtünme katsayısının aynı koşullarda fırçalanmamış CrN kaplamanın sürtünme katsayısı ile karşılaştırılması Şekil 8.23’ de verilen mesafe-sürtünme katsayısı grafiğinde görülmektedir.



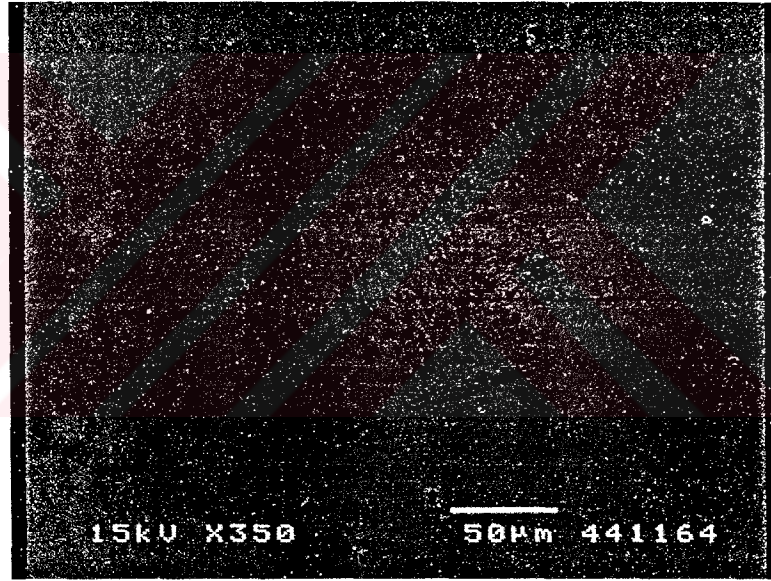
Şekil 8.23. Fırçalanmış ve fırçalanmamış CrN kaplamalara oda sıcaklığında, 10 N yüküyle yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyi, mesafe-sürtünme katsayısı grafiği.

CrN kaplamanın yüzeyindeki dropletlerin giderilmesi için yapılan fırçalama işleminden sonra kaplamaya uygulanan karşılıklı kazımalı aşınma deneyi sonucunda; aynı koşullarda yapılmış deney sonucuna nazaran sürtünme katsayısının daha düşük olduğu gözlenmektedir (sürtünme katsayıları; fırçalanmamış CrN: 0,13, fırçalanmış CrN: 0,12).

Fırçalanmış CrN kaplamaya oda sıcaklığında, 10N yük ile yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyi sonucunda oluşan aşınma izinin genel görüntüsü Şekil 8.24’ de verilmektedir. Fırçalanmış CrN kaplamanın aşınma izinde, CrN kaplamalı diskte kontak alanı çevresinde oluşan izler görülmemektedir.



Şekil 8.24. Fırçalanmış CrN kaplamalı diskte oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10N)



Şekil 8.25. Fırçalanmış CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izi (Oda sıcaklığı, 10 N)

Aynı zamanda Şekil 8.25’ de görülen fırçalanmış CrN kaplama karşıtı bilyadaki aşınma izinde çiziklere rastlanmamıştır. Bu sonuçlar, dropletlerin aşınma sırasında koparak karşıt malzemede çizikler oluşturma düşüncesini desteklemektedir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Sonuçlar

1. Taban malzeme olarak kullanılan yüksek hız çeliğinin sınır ve/veya karışık yağlama koşullarında yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneyleri sonucunda aşınma miktarının fazla olmamasına karşın aşınma mekanizmasının homojen olmayan adhezif aşınma tipinde olduğu görülmüştür.

Oda sıcaklığında yapılan deneyler;

2. Oda sıcaklığında yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri hemen hemen birbirinin aynıdır. Sürtünme katsayılarının mesafeyle değişimi yaklaşık sabit değerlerdedir. Artan yüklerle beraber sürtünme katsayılarında düşme görülmüştür.
3. Oda sıcaklığında yağın daha etkin olması söz konusudur. Kaplamalara karşı hareket eden bilyalardaki aşınma hacimleri ve aşınma oranlarında azalan yüklerle birlikte azalma görülmüştür. Ancak abrazif aşınan CrN kaplama karşıtı bilyada aşınma ürünlerinin viskoz yağ tarafından fazla uzaklaştırılamaması ve kontak alanı çevresinde çiziklere ve birikmelere neden olması söz konusudur.
4. Oda sıcaklığında kaplamalarda oluşan aşınma izleri, profilometrik incelemede aşınmanın az olmasından dolayı tespit edilememiştir.
5. 30 N yükte yapılan aşınma deneyi sonrasında elektron mikroskopunda incelenen sert krom kaplamada aşınmanın hareket yönünde yırtılmalar şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Yükün azalması sert krom kaplamalı diskte oluşan aşınma mekanizmasının belirginleşmesine yardımcı olmuştur. Azalan yüklerle kaplamada aşınma azalmıştır ve 5 N da yapılan deneylerde diskteki kontak alanında mikro çatlakların ortalarından kaplamanın kalkmaya başladığı görülmüştür.

6. CrN kaplamaya karşı hareket eden bilyada oluşan aşınma ürünlerinin kontak alanı dışında birikmesi azalan yüke rağmen artmıştır. Buna, aşınma ürünlerine çelikten daha sert olan dropletlerin koparak aşınma alanı içindeki serbest hareketlerinin sebep olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle dropletlerden kurtulmak için CrN kaplı numuneye fırçalama işlemi uygulanmıştır. Fırçalanmış numunenin yüzey görüntüsünde dropletlerin koptuğu belirlenmiştir. Fırçalanmış numuneye oda sıcaklığında ve 10 N yükte yapılan aşınma deneyi sonucunda karşıt malzeme olan bilyadaki aşınma izinde çiziklere rastlanmamıştır. Bu da dropletsiz üretilen CrN kaplamada daha iyi aşınma davranışı olacağını göstermektedir. Fırçalanmış CrN numunesinin sürtünme katsayısı hiçbir bitirme işlemi yapılmamış CrN kaplamadakine kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür.

60 °C sıcaklıkta yapılan deneylerde;

7. CrN kaplamanın sürtünme katsayısı değerleri sert krom kaplamanın sürtünme katsayılarına oranla daha düşüktür. Artan yükle oda sıcaklığında olduğu gibi sürtünme katsayılarında azalma görülmüştür. Sert krom kaplamanın sürtünme katsayısı mesafe grafiğindeki yükselme alçalmalar sert krom kaplamada aşınma sırasında yapışmaların olduğunu göstermektedir.
8. Sıcaklık sıvı yağlayıcılarda en önemli parametre olan viskozitenin düşmesine neden olur. Sıcaklık yağın yağlayıcılık özelliğini azaltıcı yönde etki etmektedir dolayısıyla sıcaklığın var olması durumunda her iki kaplamaya karşı hareket eden bilyalardaki aşınma hacimleri ve oranları artmıştır
9. Sıcaklık artan yükle beraber sert krom kaplama için daha fazla tahrip edici olmuştur. 60 °C sıcaklıkta yapılan deneylerde sert krom kaplamada belirgin miktarda aşınma meydana geldiği görülmüştür. Öyle ki sert krom kaplı disklerde aşınma derinlikleri profilometrede ölçülebilmıştır. CrN kaplı diskte oluşan aşınma derinlikleri profilometrik incelemede saptanamamıştır.
10. 60°C sıcaklıkta sert krom kaplamaya karşı hareket eden bilyalarda oluşan aşınma izlerinde kromun çelik bilyaya transferi söz konusudur. Yükün düşmesiyle transfer miktarında azalma olmuştur. 5 N yükte yapılan aşınma deneyinde sert krom kaplı diskten kopmaların olduğu açıkça görülmüştür. Bu da aşınma mekanizmasının adhezif aşınma olduğunu göstermektedir.

11. 60°C sıcaklıkta yapılan aşınma deneyleri sonrasında CrN kaplamalı diskteki aşınma izlerinde kaplamanın dropletli yapısının kaybolduğu görülmektedir. CrN kaplı diskin kontak alanında hareket yönünde derin olmayan çizikler görülmüştür. Kontak alanı dışında kaplamanın yüzeyinde görülen değişime, aşınma ürünlerinin veya yüzeyden kopan dropletlerin neden olduğu düşünülmektedir. CrN kaplamalara karşı hareket eden bilyalarda oluşan aşınma izlerinin kenarlarındaki aşınma ürünleri bu düşüncayı desteklemektedir.

12. 60°C sıcaklıkta ve yükün 30 N olduğu durumda kaplı disklerle karşı hareket eden bilyalara göre hesaplanan aşınma hacimleri ve aşınma oranları karşılaştırıldığında farkın çok fazla olduğu görülmüştür. Yükün azalması ile aşınma hacimleri azalmıştır. Miktersal olarak bu azalma sert krom kaplamada daha fazla olmuştur.

Öneriler

Sonuç olarak sınır ve/veya karışık yağlama koşullarında yapılan karşılıklı kazımalı aşınma deneylerinde CrN kaplamanın daha az aşındığı görülmüştür. Karşıt malzemeyi aşındırma açısından düşük yüklerde her ne kadar sert kroma yakın görünüyor olsa da CrN kaplamaya karşı çalışacak daha uygun malzemelerin araştırılabilir.

Kaplamalara karşı kullanılan bilyaların aşınma hacim ve oranlarının genel olarak oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni yüksek frekansta yapılan deneylerde yağlamada ortaya çıkan hidrodinamik etkiler sebebiyle olabilir. Dolayısıyla aşınma davranışlarının belirlenmesinde yapılacak çalışmalar daha düşük frekanslarda yapılabilir.

Sert krom kaplama sıcaklık ve yüklerle beraber çok fazla aşınmaktadır. Özellikle sıcaklıkta yapışmanın olduğu, düşen yüklerle yapılan aşınma deneyleri sonrasında kaplamadaki aşınma yüzeylerinden anlaşılmıştır. Kromun bilyaya transferi EDS analizi ile de anlaşılmıştır. Kalınlığın sert krom kaplamaların aşınma davranışları üzerinde etkisi olabilir bu nedenle kalın sert krom kaplamalar kullanılarak yağlı ortam aşınmaları araştırılabilir.

Fırçalanmış CrN kaplamanın aşınma izlerinde çiziklerin olmaması CrN aşınmasında dropletlerin önemli faktör olduğu düşüncesini desteklemektedir. Katodik ark fiziksel

buhar biriktirme yöntemi sırasında oluşan dropletlerin oluşumunun engellenmesi ile elde edilen daha düzgün yüzeyli CrN kaplamalar üzerinde aşınma davranışlarının karşılaştırılması daha iyi sonuçlar verebilir.



KAYNAKALAR

- [1] Kubinski, J.A., CEF, Hurkmans, T., Trinkt, T., Fleischer, W., Van der Kolk, G.J., October 1999, Perspective for Replacement of Hard Chromium by PVD, *Plating and Surface Finishing*, 20-25.
- [2] Navinsek, B., Panjan, P., Milosev, I., 1999, PVD Coatings as an Environmentally Clean Alternative to Electroplating and Electroless Process, *Surf. and Coat. Technol.*, 116-119, 476-487.
- [3] Chen, A., Qui, X., Sridharan, K., Horne, W.g. Dodd, R.A., 1996, Chromium Plating Pollution Source Reduction by Plasma Source Ion Implantation, *Surf. and Coat. Technol.*, 82, 305-310.
- [4] Pastegar, F., Richardson, D.E., 1997, Alternative to Chrome: HVOF Cermet Coatings for High Horse Power Diesel Engines, *Surf. and Coat. Technol.*, 90, 156-163.
- [5] Walter, K.C., Scheuer, J.T., McIntyre, P.C., Kodali, P., Yu, N., Nastasi, M., 1996, Increased Wear Resistance of Electrodeposited Chromium Through Applications of Plasma Source Ion Implantation Techniques, *Surf. and Coat. Technol.*, 85, 1-6.
- [6] Walter, K.C., Kern, K.T., Tesmer, J.R., Scarborough, W.K., Woodring, J.S., Nastasi, M., 1997, Nitrogen and Boron Ion Implantation into Electrodeposited Hard Chrome, *Surf. and Coat. Technol.*, 97, 250-253.
- [7] Rebholz, C., Ziegele, H., Leyland, A., Matthews, A., 1999, Structure, Mechanical and Tribological Properties of Nitrogen Containing Chromium Coatings Prepared by Reactive Magnetron Sputtering, *Surf. and Coat. Technol.*, 115, 222-229.
- [8] Dennis J.K. and Such T.E., 1972, Nickel and Chromium Plating,
- [9] Greenwood, J. D., 1971, Hard Chromium Plating, Robert Draper, London.
- [10] Newby, K.R., 2000, Functional Chromium, *Metal Finishing*, 98 (1), 223-234
- [11] ASM Handbook, Vol: 5, 1992, Hard Chromium Plating, ASM Int. USA
- [12] Su, Y.L., Yao, S.H., Leu, Z.L., Wei, C.S., Wu, C.T., 1997, Comparison of Tribological Behaviour of Three Films-TiN, TiCN and CrN-Grown by Physical Vapour Deposition, *Wear*, 213, 165-174

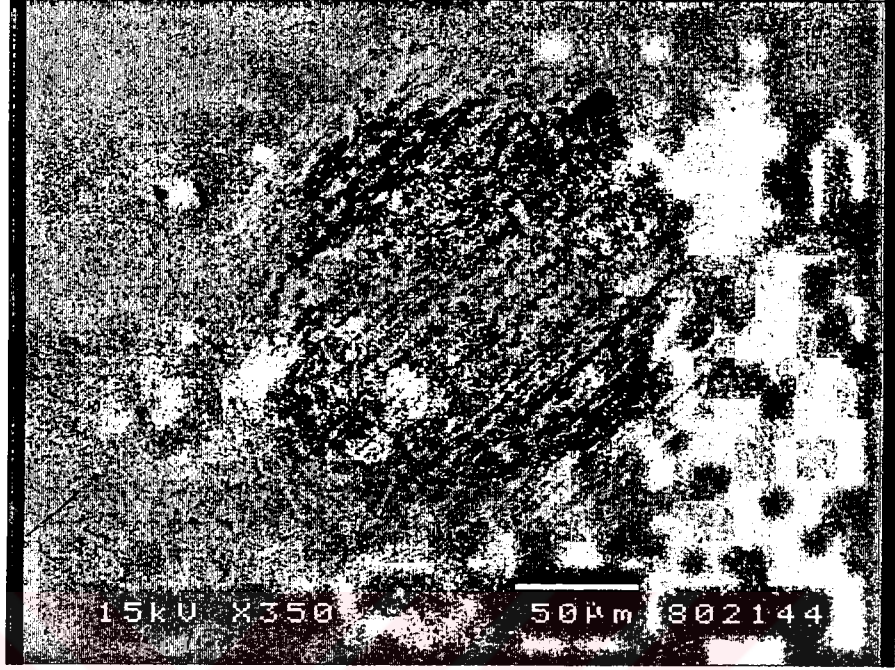
- [13] **Plumb, S.A., Smith, C.G., Smith, J.D.**, 1999, Nitrotec S, an Environmentally Friendly Alternative to Hard Chromium Plating, 77(1), *Trans.IMF*, B12
- [14] **Grigorescu, I.C., Gonzalez,Y., Rodrigues,O., De Vita, Y.**, 1995, Tribological Behaviour of Electrochemically Deposited Coatings for Shaft Restoration, *Surf. and Coat. Technol.*, 76-77, 604-608
- [15] **Komvopoulos, K., Suh, Nam P., Saka, N.**, 1986, Wear of Boundary Lubricated Metal Surfaces, *Wear*, 107, 107-132
- [16] **Gawne, D.T., Ma, U.**, 1989, Friction and Wear of Chromium and Nickel Coatings, *Wear*, 129, 123-142
- [17] **Martyak, N.M., McCaskie, J.E.**, 1995, Surface Structures of Electrodeposited Chromium, *Jour.of Mater. Sci. Letters*, 14, 1329-1331.
- [18] **Menthe, E., Rie, K.T.**, 1999, Plasma Nitriding and Plasma Nitrocarburizing of Electroplated Hard Chromium to Increase The Wear and The Corrosion Properties, *Surf. and Coat. Technol* 112, 217-220.
- [19] **Arieta, F.G., Gawne, D.T.**, 1995, The Wettability and Durability of Chromium Plating, *Surf. and Coat. Technol.*, 73, 105-110
- [20] **Legg, K.O., Graham, M., Chang, P., Rastagar, F., Gonzales, A., Sartwell, B.**, 1996, The Replacement of Electroplating, *Surf. and Coat. Technol.*, 81, 99-105.
- [21] **Brooman, E.W.**, July 2000, Corrosion Performance of Environmentally Acceptable Alternatives to Cadmium and Chromium Coatings Chromium-Part I, *Metal Finish.*, 38-43.
- [22] **Weis, M., Manty, B.**, 1995, Overview of Hexavalent Chromium Plating Alternatives, *Soci.of Vacuum Coaters*, 38.Annual Tech. Conf. Proce., 325-330.
- [23] **Rodriguez, R:J., Sanz, A.L., Medrano, A.M:**, 1996, The Search for New Applications of Ion Implantation Treatments, *Surf. and Coat. Technol.*, 84, 594-599.
- [24] **Munson, C.P., Faehl, R.J., Henins, I., Nastasi, M., Reass, W.A., Rej, D.J., Scheuer, J.T., Walter, K.C., Wood, B.P.**, 1996, Recent Advances in Plasma Source Ion Implantation at Los Alamos National Laboratory, *Surf. and Coat. Technol.*, 84, 528-536.
- [25] **Alexander, R.B.**, July 1996, Ion Implantation Comes to the Rescue of Hard Chromium Plating, *Plating and Surf. Finish.*, 9-11.
- [26] **Onate, J.L, Alonso, F., Garcia, A.**, 1998, Improvement of Tribological Properties by Ion Implantation, *Thin Solid Films*, 317, 471-476.

- [27] **Natishan, P.M., Lawrence, S.H., Foster, R.L., Lewis, J., Sartwell, B.D.**, 2000, Salt Fog Corrosion Behaviour of High-velocity oxygen-fuel Thermal Spray Coatings Compared to Electrodeposited Hard Chromium, *Surf. and Coat. Technol.*, 130, 218-223.
- [28] **Legg, K.O.**, July 1996, Economically Viable Hard Chromium Alternatives, *Plating and Surf. Finish.*, 12-14.
- [29] **Engel, P. Schwarz, G., Wolf, G.K.**, 1999, Characterisation of Chromium Nitride Films Prepared by Ion Beam Assisted Deposition, *Surf. and Coat. Technol.*, 112, 286-290.
- [30] **Engel, P., Schwarz, G, Wolf, G.K.**, 1998, Corrosion and Mechanical Studies of Chromium Nitride Films Prepared by Ion Beam Assisted Deposition, *Surf. and Coat. Technol.*, 98, 1002-1007.
- [31] **Broszeit, E., Friedrich, C., Berg, G.**, 1999, Deposition, Properties and Applications of PVD Cr_xN Coatings, *Surf. and Coat. Technol.*, 115, 9-16.
- [32] **Friedrich, C., Berg, G., Broszeit, E., Rick, F., Holland, J.**, 1997, PVD Cr_xN Coatings for Tribological Application on Piston Rings, *Surf. and Coat. Technol.*, 97, 661-668.
- [33] **Lyubimov, V.V., Voevodin, A.A., Yerokhin, A.L., Timofeev, Y.S., Arkhipov, I.K.**, 1992, Development and Testing of Multilayer Physically Vapour Deposited Coatings fo Piston Rings, *Surf. and Coat. Technol.*, 52, 145-151
- [34] **Su, Y.L., Yao, S.H., Wei, C.S., Wu, C.T., Kao, W.H.**, May1998, Evolution on the Wear, Tension and Fatigue Behaviour of Various PVD Coated Materials, *Mater.Letters*, 35, 255-260.
- [35] **Su, Y.L., Yao, S.H.**, 1997, On The Performance and Application of CrN Coating, 1997, *Wear*, 205, 112-119.
- [36] **Fu, Y., Zhu, X., Tang, B., Hu, X., He, J., Xu, K., Batchelor, A.W.**, 1998, Development and Characterization of CrN Films by Ion Beam Enhanced Deposition for Improved Wear Resistance, *Wear*, 217, 159-166.
- [37] **Fu, Y., Loh, N.L., Batchelor, A.W., Zhu, X., Xu, K., He, J.**, 1999, Preparation and Fretting Wear Behaviour of Ion-Beam Enhanced-Deposition CrN Films, *Mater. Sci. and Eng.*, A265, 224-232.
- [38] **Osma, A.**, 1999, İnce Film Sert Seramik Kaplamaların Kazımalı Aşınma Davranışları ile Endüstriyel Zımbalama İşlemine Uygulanmaları, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [39] **Wang, Da-Y., Weng, Ko-W.**, 2001, Deposition of CrN Coatings by Current-Modulating Cathodic Arc Evaporation, *Surf. and Coat. Technol.*, 137, 31-37.

- [40] **Gautier, C., Machet, J.;** 1997, Study of the Growth Mechanism of Chromium Nitride Films Deposited by Vacuum ARC Evaporation, *Thin solid films*, 295, 43-52
- [41] **Yargan, A. M.,** 1999, CrN+Cr₂N Kaplamaların Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [42] **Lee, S.C., Ho, W.Y., Lai, F.D.,** 1996, Effect of Substrate Surface Roughness on the Characteristics of CrN Hard Film, *Mater. Chem. and Phys.*, 43, 266-273
- [43] **Nouveau, C, Djouadi, M.A., Deces-Petit, C., Beer, P., Lambertin, M.,** 2001, Influence of Cr_xN_y Coatings Deposited by Magnetron Sputtering on Tool Service Life in Wood Processing, *Surf. and Coat. Technol.*, 142-144, 94-101
- [44] **Navinsek, B., Panjan, P., Milosev, I.,** 1997, Industrial Applications of CrN (PVD) Coatings, Deposited at High and Low Temperatures, *Surf. and Coat. Technol.*, 97, 182-191
- [45] **Deamley, P.A.,** 1999, Low Friction Surfaces for Plastic Injection Moulding Dies-an Experimental Case Study, *Wear*, 225-229, 1109-1113
- [46] **Seok, J.W., Jadeed, N.M., Lin R.Y.,** 2001, Sputter-Deposited Nanocrystalline Cr and CrN Coatings on Steel, *Surf. and Coat. Technol.*, 138, 14-22
- [47] **Ichimura, H., Ishii, Y.,** 2001, Mechanical Properties of Ark-Evaporated CrN Coatings, Part II: intrinsic Film Hardness and Composite Hardness, *Surf. and Coat. Technol.*, 145, 94-100
- [48] **Oden, M., Almer, J., Hakansson, G., Olsson, M.,** 2000, Microstructure-Property Relationships in Arc-Evaporated Cr-N Coatings, *Thin Solid Films*, 377-378, 407-412.
- [49] **Marhofer, P.H., Tischler, G., Mitterer, C.,** Microstructure and Mechanical/Thermal Properties of Cr-N Coatings Deposited by Reactive Unbalanced Magnetron Sputtering, *Surf. and Coat. Technol.*, 142-144, 78-84
- [50] **Stockemer, J., Winand, R., Brande, P.V.,** 1999, Comparison of Wear and Corrosion Behaviours of Cr and CrN Sputtered Coatings, *Surf. and Coat. Technol.*, 115, 230-233.
- [51] **Cho, C.W., Lee, Y.Z.,** 2000, Wear Life Evaluation of CrN-coated Steels Using Acoustic Emission Signals, *Surf. and Coat. Technol.*, 127, 59-65.
- [52] **Jagielski, J., Khanna, A.S., Kucinski, J., Mishra, D.S., Racolta, P.,vs,** 2000, Effect of Chromium Nitride Coatings on The Corrosion and Wear Resistance of Stainless Steel, *Applied Surf. Sci.*, 156, 47-64
- [53] **Panjan, P., Cvahte, P., Cekada, M., Navinsek, B., Urankar, I.,** 2001, PVD CrN Coating for Protection of Extrusion Dies, *Vacuum*, 61, 241-244

- [54] **Şen, Y.**, Ark PVD Yöntemi ile Üretilmiş CrN Kaplamaların HSS Taban Malzeme Yüzeyinden Sökülmesi, *Yük.Lisans Tezi*, İTÜ, Ocak 1998
- [55] **Ürgen, M., Çakır, A.F.**, The Effect of Heating on Corrosion Behaviour of TiN and CrN-Coated Steels, 1997, *Surf. and Coat. Technol.*, 96, 236-244
- [56] **Bhushan, B., and Gupta B. K.**, 1991, *Handbook of Tribology*, Mc Graw-Hill
- [57] **Karadayı, Ö.**, 2000, MoN Kaplamaların Kazımalı Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Bitirme tezi*, İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi.
- [58] **Hutchings, I. M.**, 1992, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, London.
- [59] **Baker, R.F., Olver, A.V.**, 1997, Direct Observations of Fretting Wear of Steel, *Wear*, 203-204, 425-433.
- [60] **ASM Handbook vol: 18**, 1992 Friction, Lubrication and Wear Technology. ASM Int. USA.
- [61] **Zhou, Z.R., Vincent, L.**, 1999, Lubrication in Fretting –a Review, *Wear*, 225-229, 962-967
- [62] **Winn, A.J., Dowson, D., Bell, J:C.**, 1995, The Lubricated Wear of Ceramics, Part I, *Tribology International*, 28, 383-393
- [63] **Kuo, W.F., Chiou, Y.C., Lee, R.T.**, 1996, A Study on Lubrication Mechanism and Wear Scar in Sliding Circular Contacts, *Wear*, 201, 217-226
- [64] **Peter J Blau, Oak Ridge**, 1995, *Friction science and technology*, TennesseeMrcel Dekker,Inc. New York Basel, Hong Kong

EKLER A



Şekil A.1. Sert krom kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N)



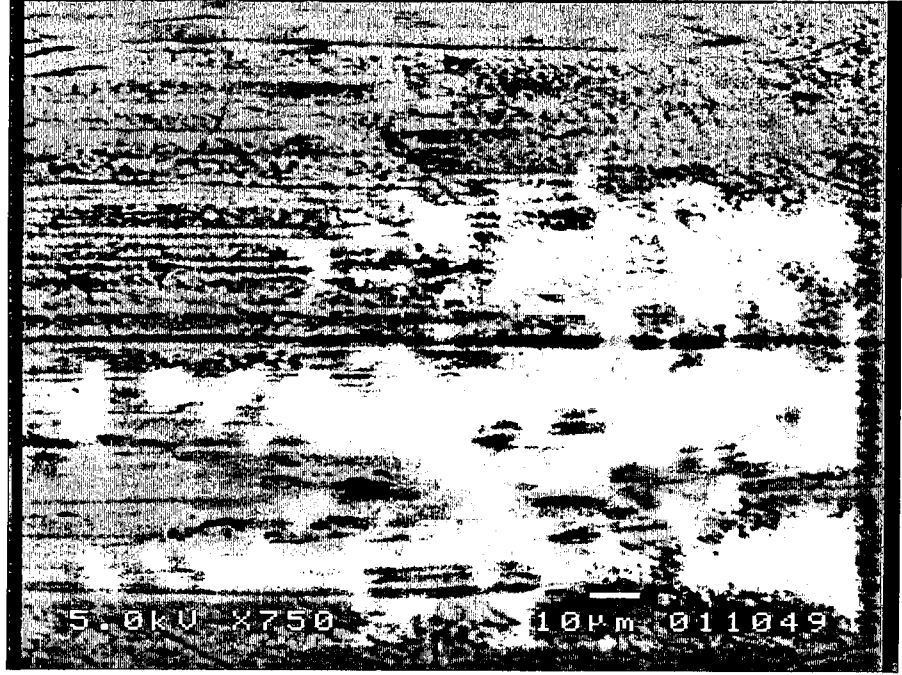
Şekil A.2. CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N)



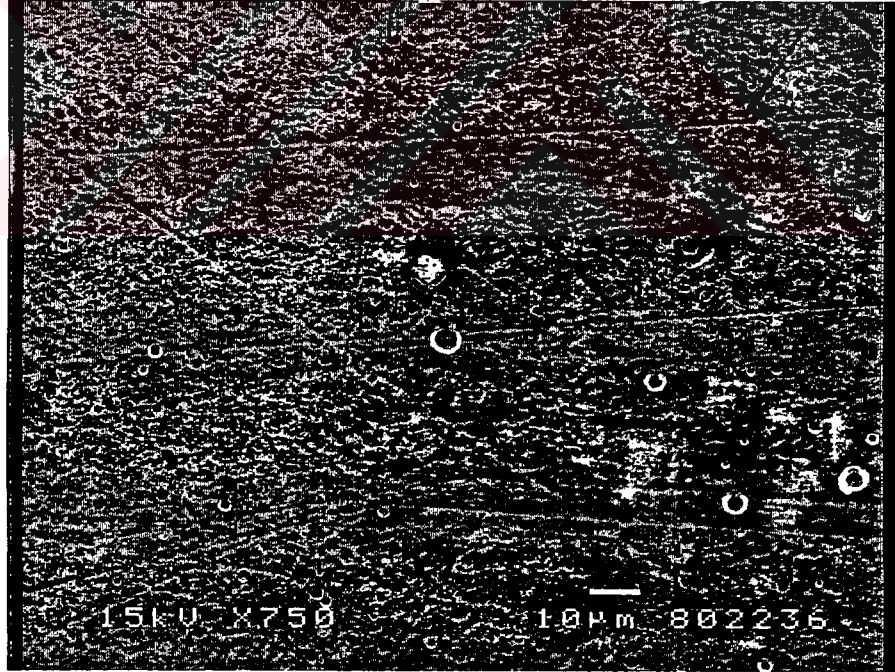
Şekil A.3. Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N)



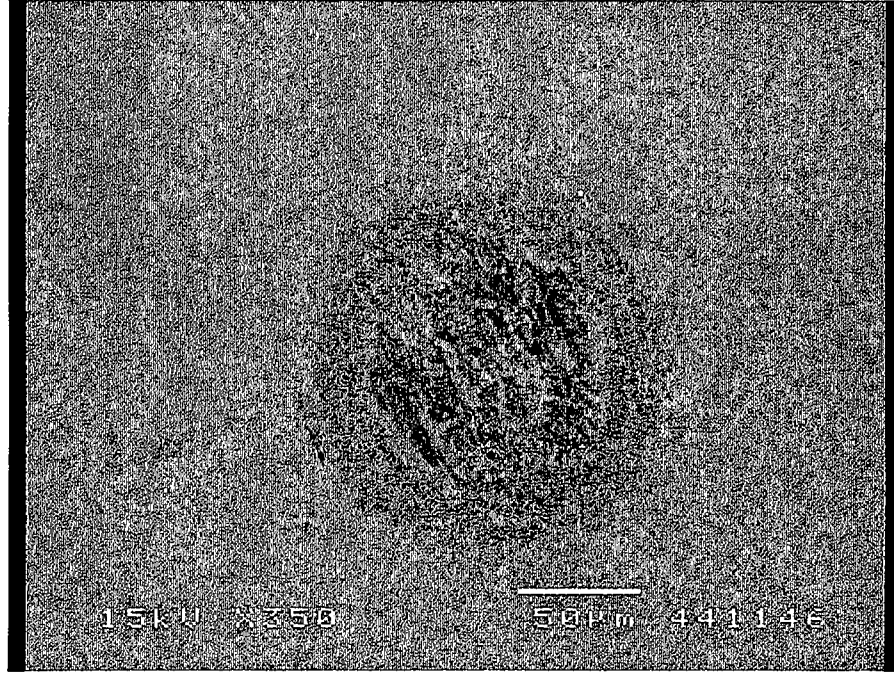
Şekil A.4. CrN kaplamada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N)



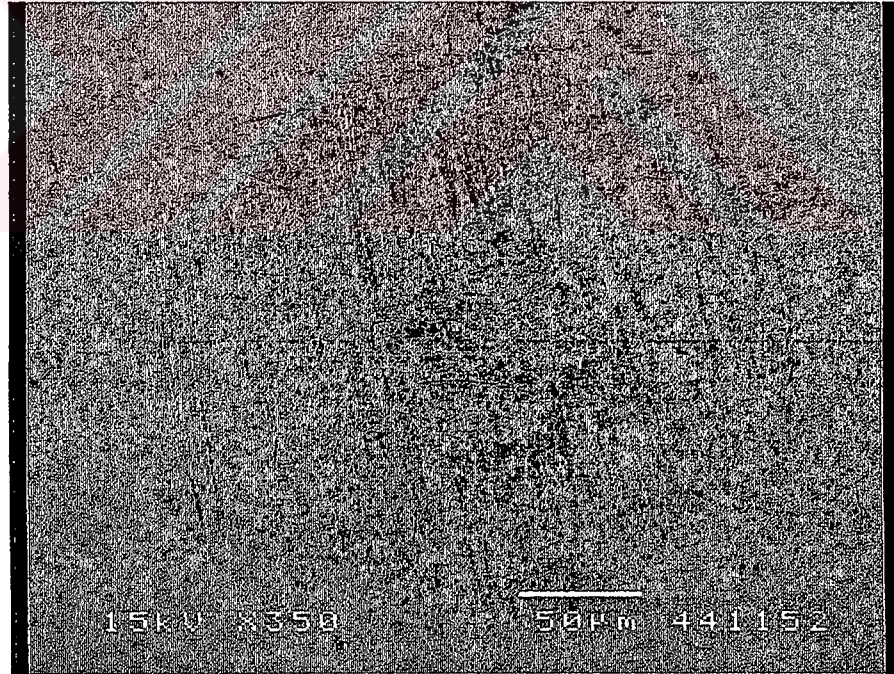
Şekil A.5. Sert krom kaplamada oluşan aşınma izi uç kısmının detay görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N)



Şekil A.6. CrN kaplamada oluşan aşınma izinin uç kısmının detay görüntüsü (Oda sıcaklığı, 30N)



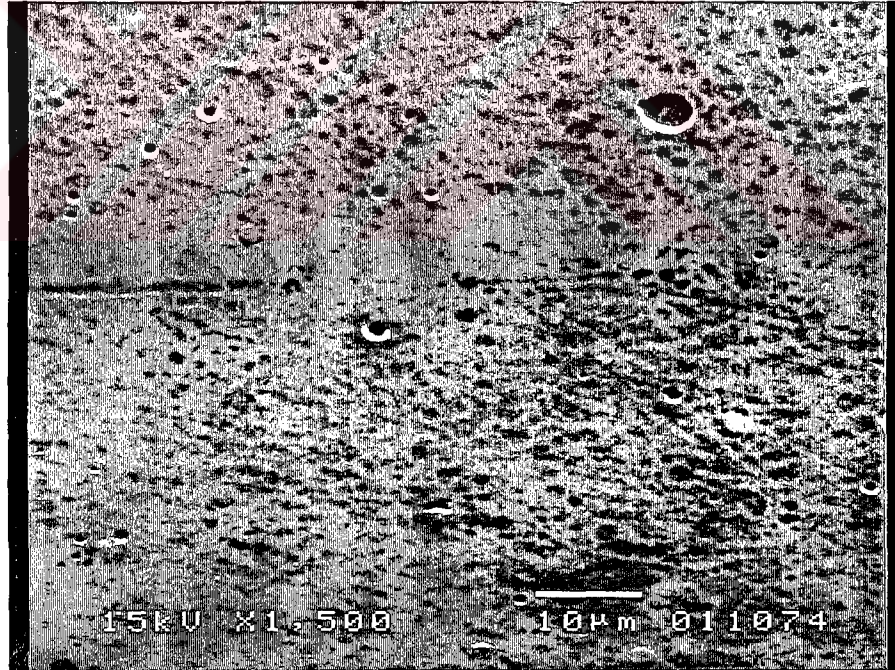
Şekil A.7. Sert krom kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10 N)



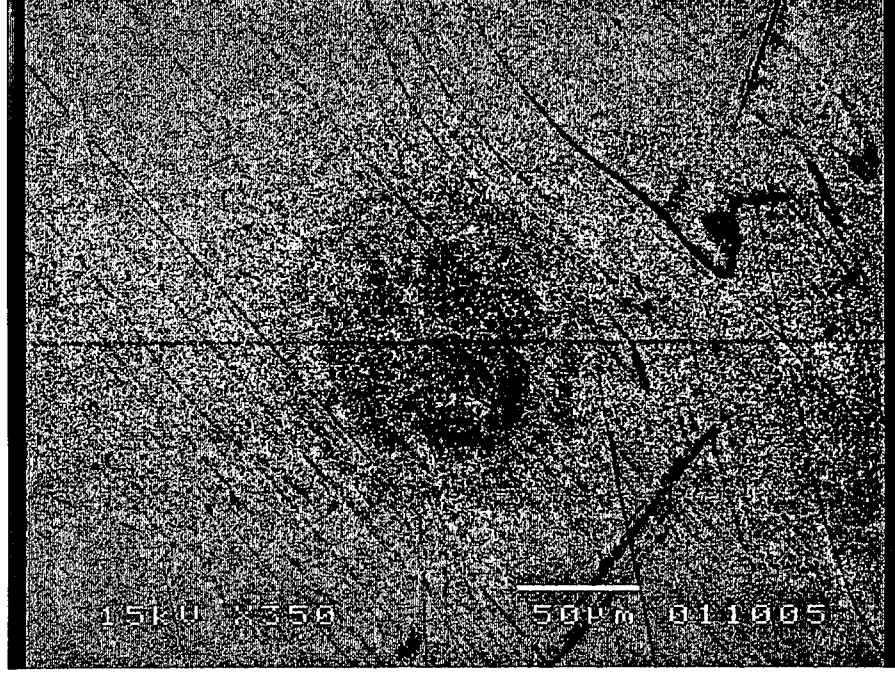
Şekil A. 8. CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10 N)



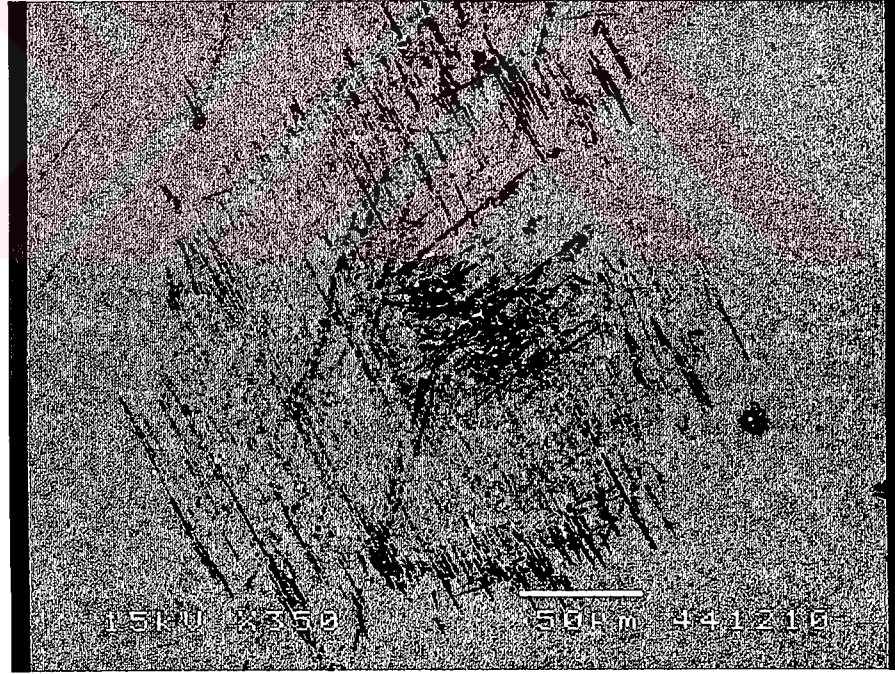
Şekil A.9. Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin detay görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10 N)



Şekil A.10. CrN kaplamada oluşan aşınma izinin detay görüntüsü (Oda sıcaklığı, 10 N)



Şekil A.11. Sert krom kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 5 N)



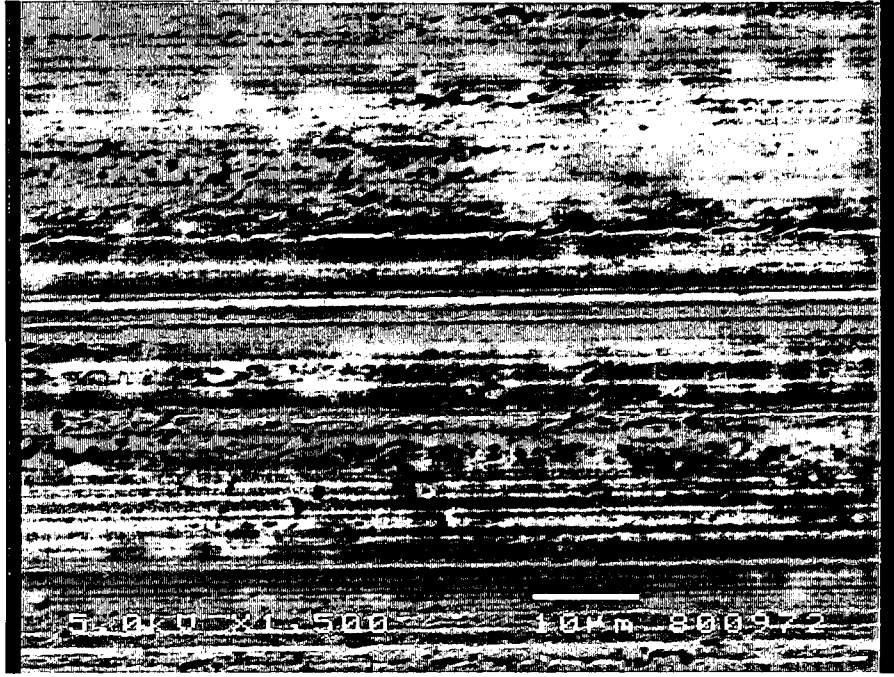
Şekil A.12. CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (Oda sıcaklığı, 5 N)



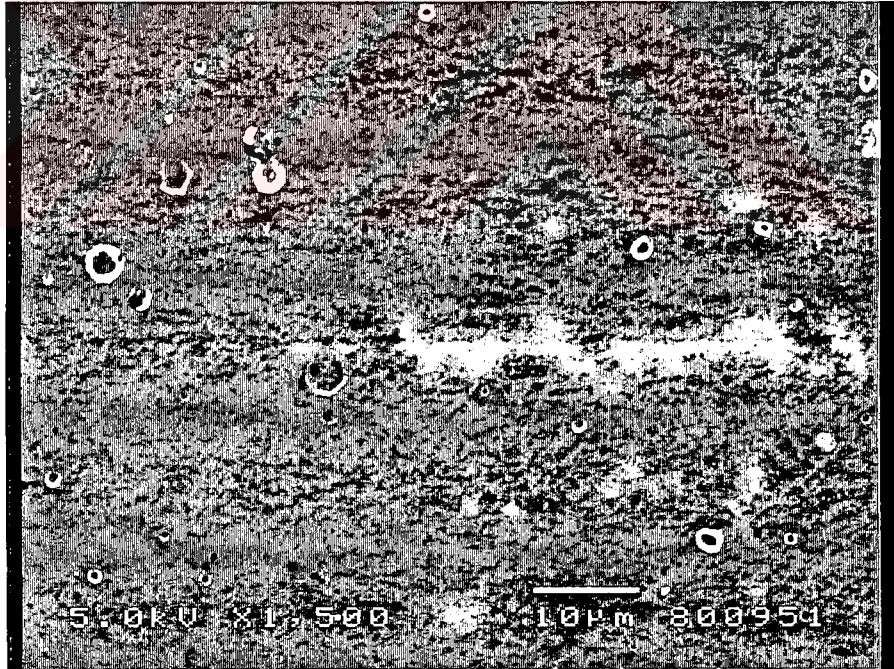
Şekil A.13. Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin yakından görüntüsü (Oda sıcaklığı, 5 N)



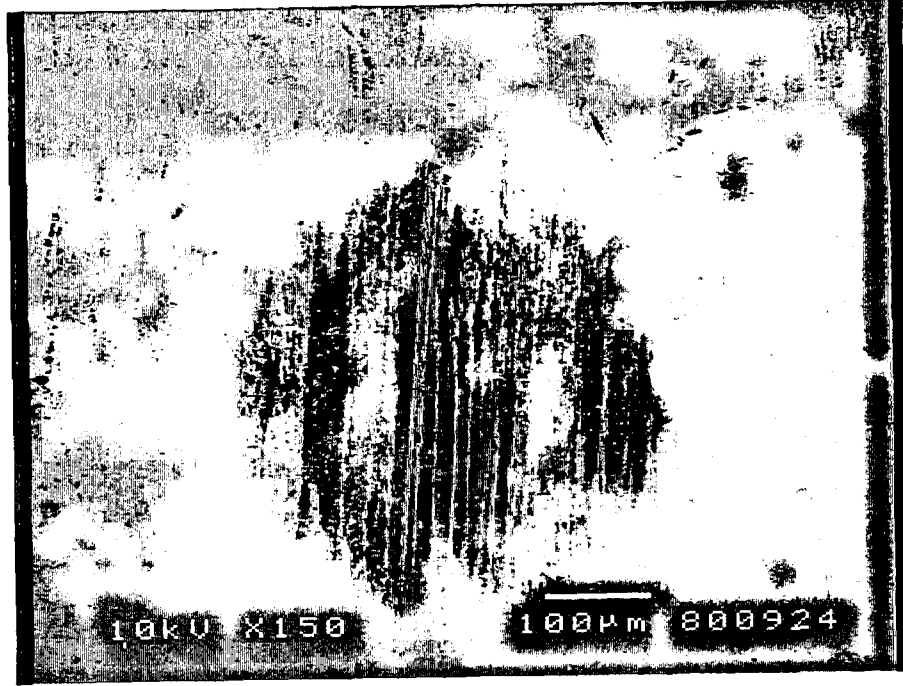
Şekil A.14. CrN kaplamada oluşan aşınma izinin yakından görüntüsü (Oda sıcaklığı, 5 N)



Şekil A.15. Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin yakından görüntüsü (60°C, 30N)



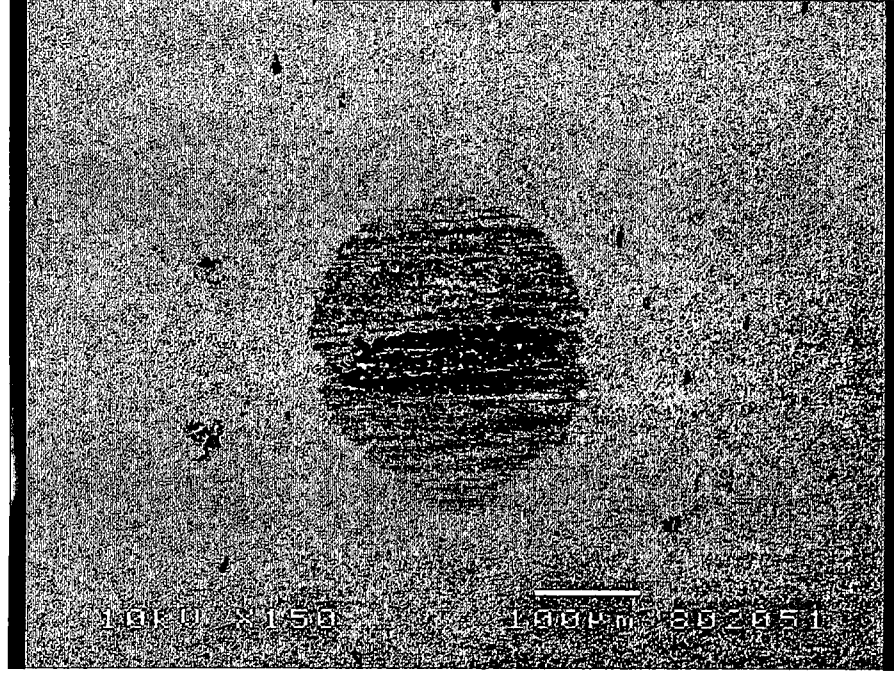
Şekil A.16. CrN kaplamada oluşan aşınma izinin yakından görüntüsü (60°C, 30N)



Şekil A.17. Sert krom kaplamaya karşı kullanılan bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 30N)



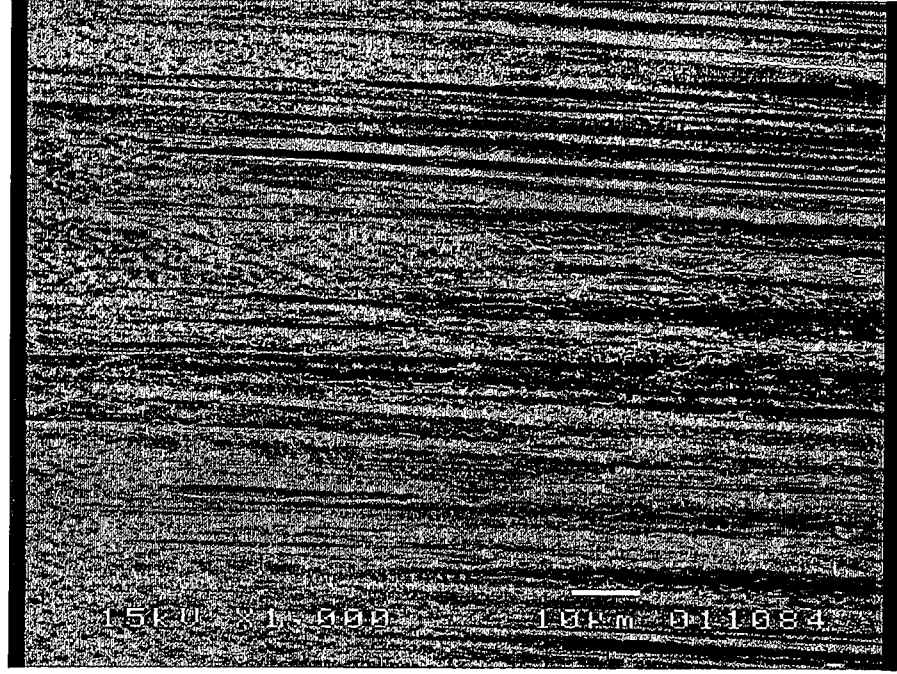
Şekil A.18. CrN kaplamaya karşı kullanılan bilyadaki aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 30N).



Şekil A.19. Sert krom kaplama karştı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 10N)



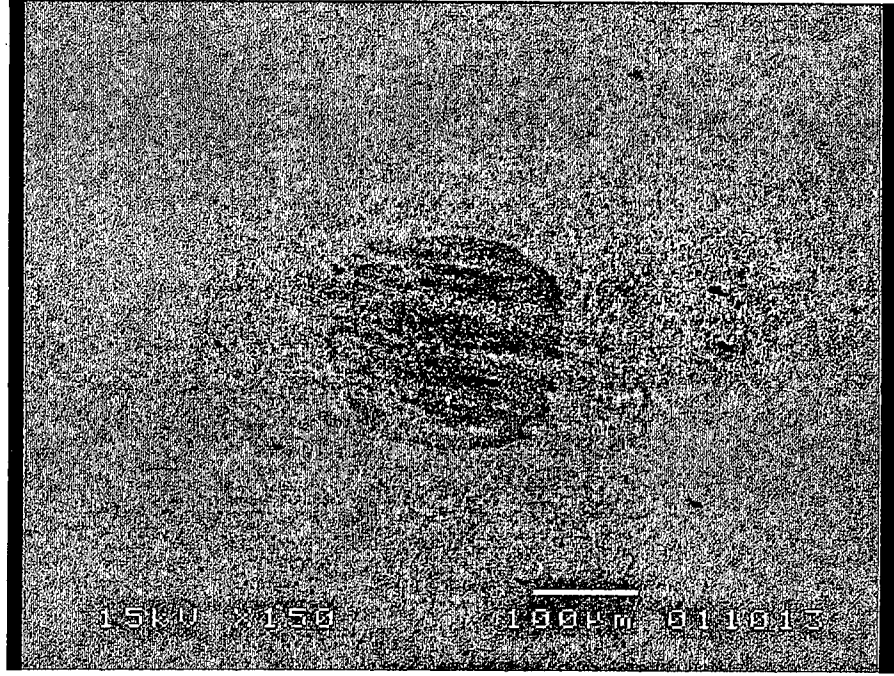
Şekil A.20. CrN kaplama karştı bilyada oluşan aşınma izi nin genel görüntüsü (60°C. 10N)



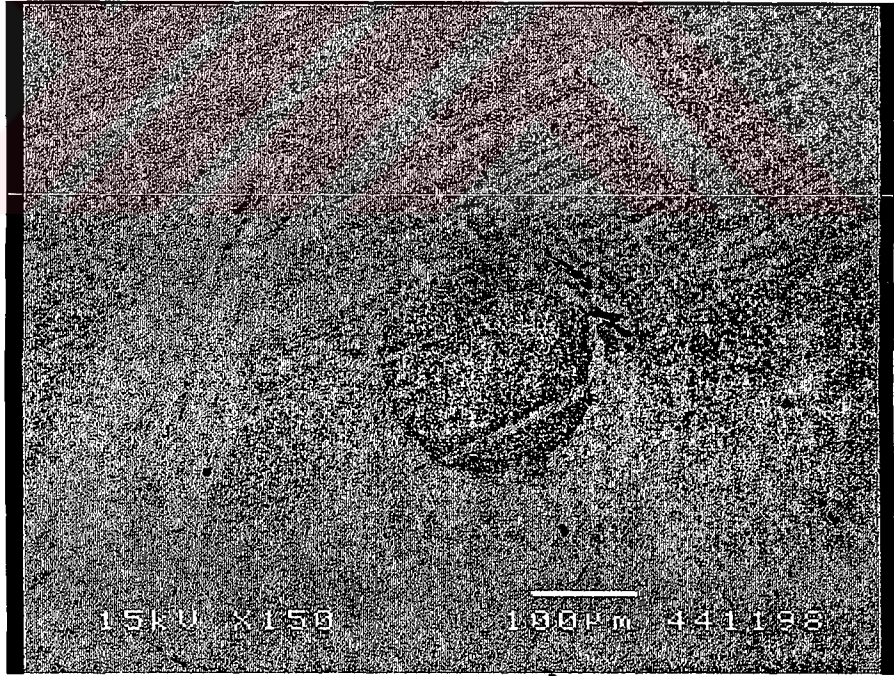
Şekil A.21. Sert krom kaplamada oluşan aşınma izi uç kısmının yakından görüntüsü (60°C, 10N)



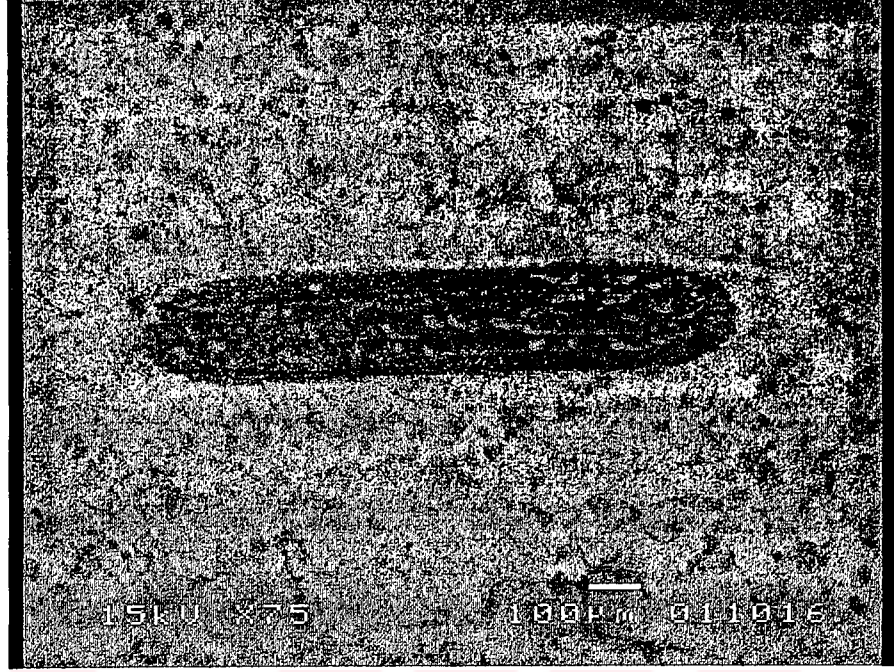
Şekil A.22. CrN kaplamada oluşan aşınma izi uç kısmının yakından görüntüsü (60°C, 10N)



Şekil A.23. Sert krom kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 5 N)



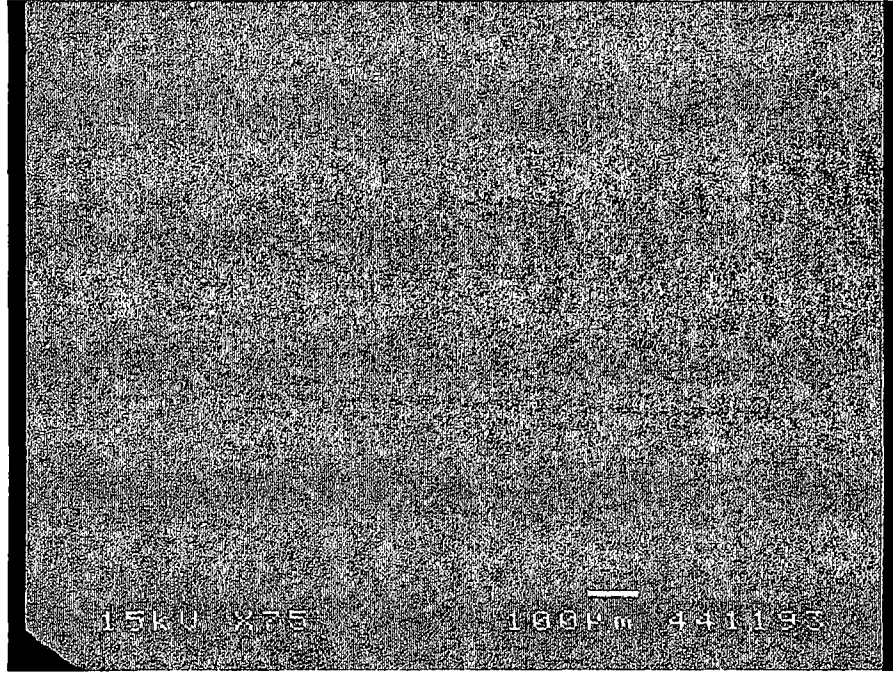
Şekil A.24. CrN kaplama karşıtı bilyada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 5 N)



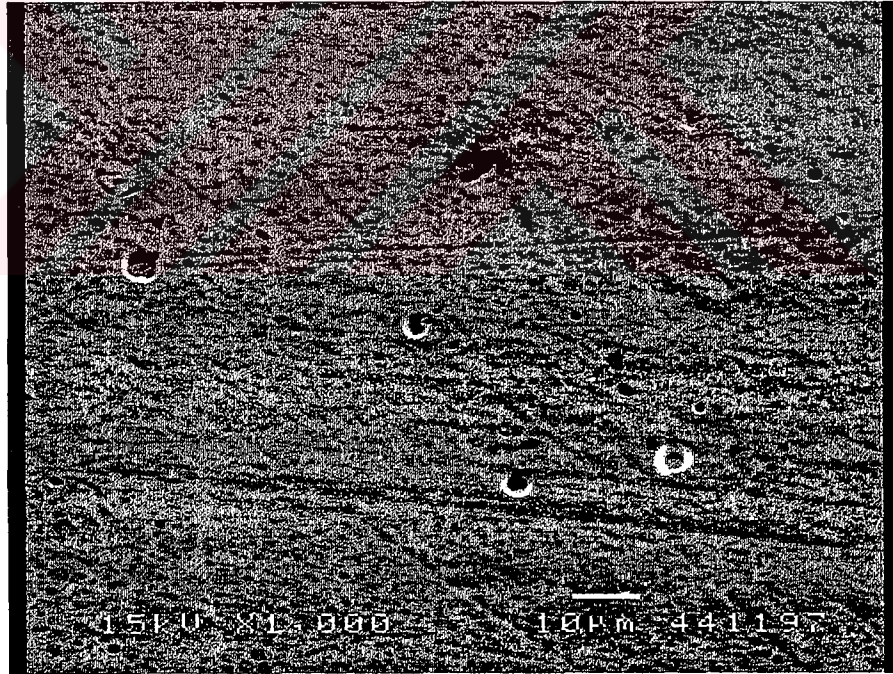
Şekil A.25. Sert krom kaplamada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 5 N)



Şekil A.26. Sert krom kaplamada oluşan aşınma izi uç kısmının detay görüntüsü (60°C, 5 N)



Şekil A.27. CrN kaplamada oluşan aşınma izinin genel görüntüsü (60°C, 5 N)



Şekil A.28. CrN kaplamada oluşan aşınma izinin yakından görünüşü (60°C, 5 N)

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında İstanbul’ da doğdu. İlköğrenimini Selim Sırrı Tarcan İlkokulunda tamamladı. Orta ve lise eğitimini Nişantaşı Kız Lisesinde 1993 yılında tamamladı. Aynı yıl, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 1998 yılında Metalurji Mühendisliği ünvanını aldı. Halen İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Üretim Metalurjisi Programında yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.

