

**İNCE SERT SERAMİK KAPLAMALARIN KAZIMALI
AŞINMA DAVRANIŞLARI İLE ENDÜSTRİYEL
ZİMBALAMA İŞLEMİNE UYGULANMALARI**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Alev OSMA
692.D.025**

100679

**Tezin Enstitiye Verildiği Tarih : 18 Mayıs 1999
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Temmuz 1999**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. E.Sabri KAYALI

S. Kayalı

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)

Prof.Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU (Y.T.Ü.)

Prof.Dr. Mustafa ÜRGEN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU (İ.T.Ü.)

TEMMUZ 1999

ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanması sırasında kıymetli fikir, öneri ve eleştirileriyle bana yol gösteren, tezimin her aşamasında ilgisini esirgemeyen hocam Sn.Prof.Dr.E.Sabri KAYALI'ya en içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Bu tezin hazırlanması sırasında bilgi ve yardımlarını eksik etmeyen, eleştirileriyle bana ışık tutan değerli hocam Sn.Prof.Dr.Mustafa ÜRGEN'e teşekkür etmekten mutluluk duyarım.

NATO-TU Science for Stability çerçevesinde İnce Film Kaplama ve Karakterizasyon laboratuvarlarının kurulmasında büyük emeği geçen Sn.Prof.Dr.A.Fuat ÇAKIR'a bu laboratuvarlarda çalışma imkanı sağladığı için teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım boyunca ilgi ve desteklerini her zaman gördüğüm hocam Sn.Doç.Dr.Erdem DEMİRKESEN teşekkür ederim. Dostluğunu her zaman bana hissettiren, ani kaybıyla acısını unutamayacağım kıymetli büyüğüm, hocam Sn.Doç.Dr.Ahmet ATMIŞOĞLU'nu saygıyla anarım.

Tezimin hazırlanmasında beni destekleyen ve yardımlarını hiç bir zaman esirgemeyen, iyi ve kötüyü birlikte paylaştığım, can dost Sn. Met. Y.Müh.M.Kürşat KAZMANLI ve kaplamaların yapılmasında emeği geçen arkadaşlarım Sn.Met. Y.Müh.O.Levent ERYILMAZ ile Sn.Kemal TOKMANOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Endüstriyel çalışmalarım sırasında bana destek sağlayan ARÇELİK A.Ş. Çayırova İşletmesi Üretim Alanı Mekanik Üretim Takımı üyeleri ile Ford-Otosan Otomotiv San.A.Ş. Genel Mdr.Yard. Sn.Ufuk GÜÇLÜ ve en zor günlerde desteğini gördüğüm, bana duyduğu inancı hiç bir zaman kaybetmeyen Sn.Dr.Hande GÜÇLÜ'ye teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

En son olarak bana gösterdikleri sabır nedeniyle aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 1999

Met. Y.Müh.Alev OSMA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
2. YÜZEY İŞLEMLERİ VE KAPLAMA TEKNİKLERİ	7
2.1. Gaz Fazında Yapılan Prosesler	10
2.1.1. Kimyasal buhar biriktirme (CVD)	10
2.1.2. Fiziksel buhar biriktirme (PVD)	11
2.2. Çözelti İçerisinde Yapılan İşlemler	15
2.2.1. Kimyasal teknikler kullanılarak yapılan kaplamalar	15
2.2.2. Elektrokimyasal kaplamalar	18
2.2.3. Sol-Jel kaplamalar	19
2.3. Ergimiş veya Yarı-Ergimiş Fazlarla Yapılan Yüzey İşlemleri	19
2.3.1. Termal püskürtme	19
2.3.2. Lazerle yüzey işlemleri	21
3. SÜRTÜNME VE TRIBOLOJİK SİSTEM	23
3.1. Tribolojik Sistem	23
3.2. Sürtünme Kanunları	25
3.3. Sürtünme Katsayısının Tarihsel Gelişimi ve Sürtünme Kavramının Modellenmesi	26
3.3.1. Dinamik sürtünme katsayısının modellenmesi	28
4. AŞINMA TANIMI VE TÜRLERİ	33
4.1. Abrasif Aşınma	37
4.2. Adhezif Aşınma	43
4.4. Korozyonlu Aşınma	47
4.5. Yorulmalı Aşınma	51
5. KAZIMALI AŞINMA	53
5.1. Kazımalı Aşınmaya Etki Eden Parametreler	54
5.1.1. Çevrim sayısı	54
5.1.2. Normal yük	55
5.1.3. Yer değiştirme miktarı	56
5.1.4. Frekans	60
5.1.5. Ortam şartlarının etkisi	60

5.1.6 Kazımalı Aşınma Deneylerinde Kullanılan Geometriler	63
5.2. Seramik Malzelerde Kazımalı Aşınma	64
5.2.1. Kazımalı aşınmada sürtünme katsayısının hesaplanması ve harcanan enerji kavramı	67
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	77
6.1. Endüstriyel Çalışmalar	77
6.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar	80
6.3. Deneylerde Kullanılan Kaplama Malzemelerinin Özellikleri	82
6.4. Taban Malzeme	84
6.5. Karşı Malzeme	85
6.6. Kazımalı Aşınma Deney Parametreleri	86
6.8. Işık ve Elektron Mikroskop Çalışmaları	89
6.9. Aşınma Miktarının Belirlenmesi	87
7. DENEY SONUÇLARI ve İRDELENMESİ	90
7.1. Endüstriyel Çalışmaların Sonuçları ve İrdelenmesi	90
7.2. Kazımalı Aşınma Deney Sonuçları ve İrdelenmesi	94
7.2.1. Farklı yük ve frekansa titanyum nitrür kaplama-ferritik paslanmaz çelik triboçiftinin kazımalı aşınma deney sonuçları ve irdelenmesi	97
7.2.2. Farklı sert seramik kaplamalar-ferritik paslanmaz çelik triboçiftinin kazımalı aşınma davranışı deney sonuçları ve irdelenmesi	109
7.2.2.1 Taramalı elektron mikroskobu çalışmaları ve irdelenmesi	114
7.2.2.2. Kazımalı aşınma miktarları ve irdelenmesi	116
7.2.2.3. Farklı sert seramik kaplamaların özellikleri ile sürtünme katsayısı arasında çok değişkenli doğrusal ilişkinin irdelenmesi	118
8. GENEL SONUÇLAR	122
KAYNAKLAR	124
EKLER	
EK A: ELEKTRON MİKROSKOBU FOTOĞRAFLARI	131
EK B: SÖZLÜK	149
ÖZGEÇMİŞ	150

KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan Testler ve Malzemeler Birliği
Ark-PVD	: Ark-Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
EC	: Avrupa Topluluğu
EDX	: Enerji Dağılımı Spektroskopisi
HSS	: Yüksek Hız Takım Çeliği
OECD	: Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü
OAS	: Amerikan Devletleri Örgütü
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
UDEAC	: Merkezi Afrika Ekonomik ve Gümrük Birliği



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1: Klasik-Fordist anlayış ile post-Fordist anlayış arasındaki farklılıklara örnekler.	3
Tablo 2.1: CVD tekniğiyle elde edilen saf metal kaplamalar ve proses koşulları.	11
Tablo 2.2: CVD Tekniğiyle kaplama yapılmış kalıp ve takımlara örneklerle performansları.	11
Tablo 2.3: Çeşitli PVD tekniklerine ait özellikler.	14
Tablo 2.4: Dönüşüm kaplamalar ve özellikleri.	17
Tablo 3.1: Tribolojik sistemlere örnekler.	24
Tablo 3.2: Sürtünmeyle ilgili kronolojik sıra ve bulgular.	27
Tablo 4.1: Aşınma mekanizmalarının göreceli önem dereceleri.	33
Tablo 4.2: Tek fazlı ve çok fazlı aşınmalara örnekler.	35
Tablo 4.3: Çeşitli malzeme çiftleri için 1000 çevrimde meydana gelen aşınma kayıpları.	46
Tablo 5.1: Kazımalı aşınma karakteristiklerinde geçiş kriterlerinin aldığı değerler.	74
Tablo 6.1: Deneylerde kullanılan cihazlar ve kullanım amaçları.	81
Tablo 6.2: Kaplama işleminde kullanılan ticari kaplama parametreleri.	82
Tablo 6.3: Deneylerde kullanılan kaplama malzemelerinin özellikleri.	83
Tablo 6.4: Karşı malzeme olarak kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri ile standartlarda istenen değerleri.	83
Tablo 6.5: Yüksek hız takım çeliği, paslanmaz çelik ve titanyum nitrüre ait özellikler.	88
Tablo 7.1: Farklı frekans ve normal kuvvet koşullarında yapılan kazımalı aşınma deneyleri sonucunda elde edilen ortalama kazımalı aşınma sabiti (r) değerleri.	103
Tablo 7.2: Kazımalı aşınma deneyleri sonucunda karşı malzeme olarak kullanılan AISI430 kalite ferritik paslanmaz çelik üzerindeki aşınmış yüzeydeki açık ve koyu bölgelerden alınan x-ışınları nokta analiz sonuçları.	104
Tablo 7.3: Farklı sert seramik kaplamalar ile karşı malzeme olarak kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemelerde meydana gelen aşınma miktarları.	116
Tablo 7.4: Ortalama sürtünme katsayısı, sertlik, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü için korelasyon katsayıları	119
Tablo 7.5: Çok değişkenli model örnekler ile bu modellere ait regrasyon katsayıları, uyarlanmış regrasyon katsayıları ve standart hata değerleri (H =kaplama sertliği, t =kaplama kalınlığı, R_a =yüzey pürüzlülüğü, a, b, c =sabitler).	120

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1: Çalışma konusu ile kullanılan terimler arasındaki ilişki.	5
Şekil 2.1: Yüzey işlemlerinin sınıflandırılması.	7
Şekil 2.2: Yüzey kaplama teknikleriyle elde edilen kaplamaların a)tipik kalınlık aralığı ve b)işlem sıcaklıkları.	8
Şekil 2.3: PVD tekniğinin şematik olarak görünümü.	13
Şekil 2.4: Katodik ark PVD tekniğinin şematik görünümü.	15
Şekil 2.5: Termal püskürtme kaplama tekniğinin şematik gösterilişi.	20
Şekil 2.6: Lazerle yüzeyin alaşımlandırılmasının şematik olarak gösterimi.	22
Şekil.3.1: Tribolojik Sistemin Şematik Olarak Gösterilişi.a)Malzeme, b)Karşı malzeme, c)Ara yüzey, d)Ortam.	24
Şekil 3.2: a)Statik ve b)Dinamik sürtünmenin şematik olarak gösterilişi.	25
Şekil 4.1: a)İki elemanlı b)üç elemanlı abrasif aşınmanın şematik gösterilişi.	37
Şekil 4.2: Çeliklerde abrasif aşınmanın sertlikle ilişkisinin şematik gösterimi.	39
Şekil 4.4: Çeliklerde karbon içeriğine göre göreceli aşınma direncinin değişimi.	42
Şekil 4.5: Düşük konsantrasyonlu korozif madde içeren ortamlarda korozyonlu aşınma gelişimi.	48
Şekil 4.6: Yüksek konsantrasyonlu korozif madde içeren malzemelerde korozyonlu aşınmanın gelişimi.	48
Şekil 4.7: Korozyonlu aşınmanın sıcaklıkla değişimi.	49
Şekil 4.8: (a)Yüzeyde oluşan, (b)yüzey altından kaynaklanan ve (c)çekirdekten kaynaklanan yorulmalarda meydana gelen çatlak oluşumu şematik olarak görülmektedir.	51
Şekil 5.1: Orta karbonlu çeliğin kuru hava ortamında kazımalı aşınma sırasında çevrim sayısı ile ağırlık kaybının değişimi.	54
Şekil 5.2: Çeliklerde kazımalı aşınmada normal yük ile ağırlık kaybı ilişkisi.	55
Şekil 5.3: a)Kazımalı aşınma durumu b)Karşılıklı kazıma (kayma) durumları için yer değiştirme miktarı (d) ile top çapı (a) arasındaki ilişki.	57
Şekil 5.4: Kuru havada düzgün çelik yüzeyinde kazımalı aşınma sonucunda elde edilen yer değiştirme miktarı ile ağırlık kaybı değişimi.	58
Şekil 5.5: Halliday ve Hirst'ün orta karbonlu çeliklerle yaptıkları çalışmalar sonucunda elde edilen yer değiştirme miktarı ile ağırlık kaybı değişimi.	59
Şekil 5.6: 50Hz frekansa, 3.45MPa normal yük altında farklı işlemler görmüş SAE 4140 çelik malzemenin ağırlık kaybı-yer değiştirme ilişkisi.	59
Şekil 5.7: Orta karbonlu çeliklerde kazımalı aşınmada frekans değişimiyle ağırlık kaybı ilişkisi: a)67000 çevrim, 90mm yer değiştirme miktarı; b)450000 çevrim, 90mm yer değiştirme miktarı c)67000 çevrim, 230mm yer değiştirme miktarı.	60

Şekil 5.8: Kuru havada kazımalı aşınmanın sıcaklıkla değişimi. Çelik malzeme, 90mm yer değiştirme miktarı, 9Hz frekans, 36.5MPa basınç kullanılmıştır.	61
Şekil 5.9: Orta karbonlu çelik malzemelerde kazımalı aşınma hacim kaybı ile sıcaklığın değişimi.	62
Şekil 5.10: Orta karbonlu çelik malzemelerde kazımalı aşınmanın argon atmosferinde sıcaklıkla değişimi.	62
Şekil 5.11: Kazımalı aşınmada farklı bağıl nem oranlarında TiN-Aluminyum oksit triboçiftinden elde edilen sürtünme katsayısının değişimi.	63
Şekil 5.12: a) Kazımalı aşınma deneylerinde kullanılan deney geometrisi, b) Pim üzerine salınım hareketi verilerek geliştirilmiş pim-disk geometrisi.	64
Şekil 5.13: Seramik-çelik tribosistemleri için kazımalı aşınma davranışı eğrileri.	65
Şekil 5.14: Seramik-çelik triboçiftinde seramik malzemelerdeki toplam aşınma hacminin gösterilişi (A:ZrO ₂ -çelik, B:SiC-çelik, C:Si ₃ N ₄ -çelik, D:Al ₂ O ₃ -çelik).	66
Şekil 5.15: Seramik-çelik triboçiftinde karşı malzeme-malzeme aşınma miktarlarının oranı (A:ZrO ₂ -çelik, B:SiC-çelik, C:Si ₃ N ₄ -çelik, D:Al ₂ O ₃ -çelik).	67
Şekil 5.16: Kazımalı aşınmada aşınma çevrim sayısı ile sürtünme katsayısının değişimi.	68
Şekil 5.17: Elastik yapışma koşullarında elde edilen dinamik sürtünme kuvveti yer değiştirme miktarı eğrisi.	69
Şekil 5.18: Kısmi kayma koşullarında elde edilen dinamik sürtünme kuvveti-yer değiştirme miktarı eğrisi.	70
Şekil 5.19: Kayma koşullarında elde edilen dinamik sürtünme kuvveti-yer değiştirme miktarı eğrisi.	70
Şekil 5.20: Kazımalı aşınma sabitinin grafik üzerinden eldesi.	71
Şekil 5.21: Kazımalı aşınmada enerji oranının (A) hesaplanması.	72
Şekil 5.22: Kazımalı aşınmada sistem serbest kriterinin (B) eldesi.	72
Şekil 5.23: Normal kuvvet-yer değiştirme ilişkisiyle elde edilen kazımalı aşınma karakteristikleri.	75
Şekil 5.24: Frekans-yer değiştirme ilişkisiyle elde edilen kazımalı aşınma karakteristikleri.	75
Şekil 6.1: Endüstride kullanılan farklı zımba geometrileri: a)Çatı tipi b)İç bükey c)Ters çatı tipi d)Çift yollu zımba geometrileri.	78
Şekil 6.2: Deneylerde kullanılan zımbanın uç kısmının genel görünüşü.	79
Şekil 6.3: Kaplama ve taban malzemeleri arasındaki yapışma mukavemetini gösteren kalitatif değerlendirme ölçeği.	83
Şekil 6.4: Taban malzemesi olarak kullanılan yüksek hız takım çeliğinin mikroyapısal görünümü.	84
Şekil 6.5: Karşı malzeme olarak kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mikroyapısal görünümü.	85
Şekil 6.6: Malzeme ve karşı malzemenin temas geometrisinin şematik olarak gösterilişi.	87

Şekil 7.1: a)Endüstriyel zımbalama işlemi sonrasında paslanmaz çelik ve kaplamalı zımbaların görünümü.b) ve c) Karşı malzemede meydana gelen hasarın detay görünümü.	91
Şekil 7.2: Sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi. TiN-ferritik paslanmaz çelik triboçifti, 2.5N, 10Hz, 0.5mm yer değiştirme miktarı, silindir-blok geometrisi.	95
Şekil 7.3: Her hangi bir çevrimde sürtünme kuvvetinin yer değiştirme miktarına göre değişimi. TiN-ferritik paslanmaz çelik triboçifti, 2.5N, 10Hz, 0.5mm, silindir-blok geometrisi.	96
Şekil 7.4: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (1N, 5Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.	97
Şekil 7.5: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (1.5N, 5Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.	98
Şekil 7.6: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (2N, 5Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.	99
Şekil 7.7: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (2.5N, 5Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.	100
Şekil 7.8: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (1.5N, 10Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.	100
Şekil 7.9: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (2N, 10Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.	101
Şekil 7.10: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (2.5N, 10Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.	102
Şekil 7.11: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (1N, 20Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.	102
Şekil 7.12: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (2.5N, 20Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.	103
Şekil 7.13: Frekans ve normal kuvvet değişimine bağlı olarak TiN-ferritik paslanmaz triboçiftinde kısmi kayma ve kayma karakteristiklerinin belirlendiği kazımalı aşınma mekanizması haritasının görünümü.	105
Şekil 7.14: Frekans ve normal kuvvet değişimine bağlı olarak TiN-ferritik paslanmaz triboçiftinde enerji oranı (A) ve serbest sistem kriterleri (B).	106
Şekil 7.15: TiN kaplama-ferritik paslanmaz çelik triboçifti için oluşturulan frekans-normal kuvvet kazımalı aşınma haritasında, kayma karakteristiğinin gözlemlendiği bölgelerdeki ortalama sürtünme katsayıları.	108

Şekil 7.16: Farklı kaplamaların kazımalı aşınma deneylerinde sürtünme katsayısının çevrim sayısına göre değişimi (Yük 2.5N, frekans 10Hz, 0.5mm yer değiştirme miktarı, silindir-blok geometrisi).	111
Şekil 7.17: Kaplamalara göre ortalama sürtünme katsayıları ve sürtünme katsayısındaki değişimler.	111
Şekil 7.18: Farklı sert seramik kaplama malzemeleri ile karşı malzeme olarak kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çeliklerde meydana gelen aşınma miktarı değişimi.	117
Şekil 7.19: Kaplama malzemesi türlerine göre malzeme/karşı malzeme aşınma miktarı oranlarının CrN kaplamada elde edilen değere göre değişimi.	118
Şekil A.1: CrN kaplamalı zımbanın 45000 delik deldikten sonra alın yüzeyi, kesme kenarı ve prizmatik yüzeyinin görüntüsü.	131
Şekil A.2: CrN kaplamalı zımbanın 120000 delik deldikten sonra elde edilen genel görüntüsü.	131
Şekil A.3: CrN kaplamalı zımbanın 150000 delik delme işleminden sonra elde edilen genel görüntüsü.	132
Şekil A.4: TiN kaplamalı zımbanın 45000 delik deldikten sonra alın yüzeyi, kesme kenarı ve prizmatik yüzeyinin görüntüsü.	132
Şekil A.5: TiN kaplamalı zımbanın 120000 delik delme işleminden sonra elde edilen genel görüntüsü.	133
Şekil A.6: TiN kaplamalı zımbanın 150000 delik deldikten sonra alın yüzeyi, kesme kenarı ve prizmatik yüzeyinin görüntüsü.	133
Şekil A.7: TiAlN-T kaplamalı zımbanın 45000 delik delme işleminden sonra elde edilen genel görüntüsü.	134
Şekil A.8: TiAlN-T kaplamalı zımbanın 150000 delik deldikten sonra alın yüzeyi, kesme kenarı ve prizmatik yüzeyinin görüntüsü.	134
Şekil A.9: TiAlN-D kaplamalı zımbanın 45000 delik delme işleminden sonra elde edilen genel görüntüsü.	135
Şekil A.10: TiAlN-D kaplamalı zımbanın 150000 delik deldikten sonra alın yüzeyi, kesme kenarı ve prizmatik yüzeyinin görüntüsü.	135
Şekil A.11: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (1N normal yük-5Hz frekans).	136
Şekil A.12: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 83.42Fe-15.85Cr-0.73Si (% Ağ.), koyu renkli bölge: 84.2Fe-14.96Cr-0.84Si (% Ağ.) (1N normal yük-5Hz frekans).	136
Şekil A.13: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (1.5N normal yük-5Hz frekans).	137
Şekil A.14: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 77.16Fe-16.06Cr-0.53Si-0.17Ti-6.08N (% Ağ.), koyu renkli bölge: 43.31Fe-8.17Cr-1.27Si-32.4Ti-14.85N (% Ağ.) (1.5N normal yük-5Hz frekans).	137

Şekil A.15: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (2N normal yük-5Hz frekans).	138
Şekil A.16: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 79.45Fe-16.07Cr-0.45Si-0.28Ti-3.75N (% Ağ.), koyu renkli bölge: 19.96Fe-2.46Cr-0.71Si-59.83Ti-17.04N (% Ağ.) (2N normal yük-5Hz frekans).	138
Şekil A.17: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (2.5N normal yük-5Hz frekans).	139
Şekil A.18: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 75.64Fe-15.20Cr-0.39Si-3.21Ti-5.56N (% Ağ.), koyu renkli bölge: 47.24Fe-10.51Cr-0.39Si-27.57Ti-14.29N (% Ağ.) (2.5N normal yük-5Hz frekans).	139
Şekil A.19: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (1.5N normal yük-10Hz frekans).	140
Şekil A.20: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 83.28Fe-15.99Cr-0.73Si (% Ağ.), koyu renkli bölge: 83.42Fe-15.85Cr-0.73Si (% Ağ.) (1.5N normal yük-10Hz frekans).	140
Şekil A.21: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (2N normal yük-10Hz frekans).	141
Şekil A.22: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 82.74Fe-16.53Cr-0.73Si (% Ağ.), koyu renkli bölge: 83.42Fe-15.85Cr-0.73Si (% Ağ.) (2N normal yük-10Hz frekans).	141
Şekil A.23: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (2.5N normal yük-10Hz frekans).	142
Şekil A.24: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 82.51Fe-16.76Cr-0.73Si (% Ağ.), koyu renkli bölge: 83.42Fe-15.85Cr-0.73Si (% Ağ.) (2.5N normal yük-10Hz frekans).	142
Şekil A.25: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (1N normal yük-20Hz frekans).	143
Şekil A.26: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 83.42Fe-15.85Cr-0.73Si (% Ağ.), koyu renkli bölge: 83.35Fe-15.85Cr-0.80Si (% Ağ.) (1N normal yük-20Hz frekans).	143

Şekil A.27: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (2.5N normal yük-20Hz frekans).	144
Şekil A.28: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 83.11Fe-16.16Cr-0.73Si (% Ağ.), koyu renkli bölge: 82.82Fe-16.35Cr-0.73Si (% Ağ.) (2.5N normal yük-20Hz frekans).	144
Şekil A.29: CrN kaplamalı yüksek hız takım çeliğinin aşınmış yüzeyinin detay görüntüsü.	145
Şekil A.30: TiN kaplamalı yüksek hız takım çeliğinin aşınmış yüzeyinin detay görüntüsü.	145
Şekil A.31: TiAlN-T kaplamalı yüksek hız takım çeliğinin aşınmış yüzeyinin detay görüntüsü.	146
Şekil A.32: TiAlN-D kaplamalı yüksek hız takım çeliğinin aşınmış yüzeyinin detay görüntüsü.	146
Şekil A.33: CrN kaplamanın karşı malzemesi olan ferritik paslanmaz çeliğin detay görüntüsü.	147
Şekil A.34: TiN kaplamanın karşı malzemesi olan ferritik paslanmaz çeliğin detay görüntüsü.	147
Şekil A.35: TiAlN-T kaplamanın karşı malzemesi olan ferritik paslanmaz çeliğin detay görüntüsü.	148
Şekil A.36: TiAlN-D kaplamanın karşı malzemesi olan ferritik paslanmaz çeliğin detay görüntüsü.	148

SEMBOL LİSTESİ

α	:Oran sabiti
β	:Dairesel kesimin açısı,
ε	:Bir yüklemede kırılıncaya kadar meydana gelen birim şekil değişimi
γ	:Partikül boyutu
γ_a, γ_b	:Yüzey enerjisi
η	:Çıkıntılarının dağılımı
ϕ	:Kayma hızı, sertlik ve elastisite modülünün fonksiyonu
λ	: Hem elastik hem de plastik deformasyon için kullanılan sabit
μ	:Sürtünme katsayısı
μ_k	:Dinamik sürtünme katsayısı
μ_{ad}	:Adhezyonla ilişkili dinamik sürtünme katsayısı
μ_{def}	:Deformasyonla ilişkili dinamik sürtünme katsayısı
ν_1, ν_2	:Poisson oranı
θ	:Akış hatlarının açık açısı
θ_x	:Partikülün yüzeyle meydana getirdiği açı
ρ	:Oksit tabakasının yoğunluğu
σ	:Normal gerilme
σ_{maks}	:Maksimum temas gerilmesi
τ_T	:Mikrokaynak noktalarının kayma gerilmesi
v	:Kayma hızı
a, b, c	:Sabitler
b_w	:Karşı malzemenin ortalama genişliği
d	:Yer değiştirme mesafesi
d_k	:Kayma mesafesi
d_x	:Temas alanındaki çıkıntı boyutu
d_d	:Silindir çapı
f_{ab}	:Aşınma katsayısı; mükemmel kesme için 1, hiç aşınma olmaması durumunda 0
h	:Nüfuz derinliği
i	:Malzeme sabiti
r_{rad}	:Yüzeydeki çıkıntılarının eğrilik yarıçapı
r	:Kazımalı aşınma sabiti
s	:Temas alanındaki kayma
t_i	:Kayma zamanı
t_{ik}	:Reaksiyon tabakası kalınlığı
t_k	:Karşı malzemenin kalınlığı
t	:Kaplama kalınlığı
v	:Kayma hızı
A_r	:Gerçek temas alanı
A_s	:Yüklenme alanı
A_c	:Arrhenius sabiti
A_v	:Aşınma izinin kesit alanı

C_1, C_2	:Sabit
E_e	:Elastik modül
E_{e1}, E_{e2}	:Elastik modül
E_1	:Histerisis eğrisinin alanı
E_2	:Maksimum ve minimum sürtünme kuvvetleriyle yer değiştirme miktarı arasında kalan bölgenin alanı.
E	:Harcanan enerji
F_T	:Sürtünme kuvveti
F_N	:Normal kuvvet
F_{ad}	:Deformasyona dik yöndeki kuvvet
H	:Sertlik
H_{V1}	:Aşınan malzemedeki yüzey sertliği
H_{V2}	:Aşındırıcının sertliği
K, k	:Sabit
K_a	:Hem elastik hem de plastik deformasyon için kullanılan sabit
K_T	:Kritik değer
N	:Çevrim sayısı
P_a	:Yumuşak olan malzemenin akma basıncı
P_t	:Temas halindeki yüzeyde kayma basıncı
P	:Yük
Q	:Aktivasyon enerjisi
R_g	:Gaz sabiti
T	:Temas bölgesindeki sıcaklık
R_a	:Yüzey pürüzlülüğü
R, R^2	:Regresyon katsayısı
R	:Aşınma direnci
W_s	:Standart malzemede meydana gelen aşınma miktarı
W_M	:Deneyde kullanılan malzemede meydana gelen aşınma miktarı
W_{yo}	:Yorulmalı aşınma hacmi
W_v	:Aşınma hacmi
W_k	:Karşı malzemede meydana gelen aşınma hacmi
W_{ab}	:Abrazif aşınma hacmi
W_{ab}	:Abrazif aşınma hacmi
W_{ad}	:Adhezif aşınma hacmi
W_{kor}	:Korozyonlu aşınma hacmi

İNCE SERT SERAMİK KAPLAMALARIN KAZIMALI AŞINMA DAVRANIŞLARI İLE ENDÜSTRİYEL ZİMBALAMA İŞLEMİNE UYGULANMALARI

ÖZET

Kazımalı aşınma, birbiriyle temas halindeki malzemeler arasında belirli bir frekansa göreceli yer değiştirme sonucunda meydana gelen aşınma olayıdır. Kazımalı aşınma; çevrim sayısı, normal yük, yer değiştirme miktarı, frekans, temas geometrisi ve ortam şartları gibi parametrelerden etkilenmektedir.

Kazımalı aşınmanın incelenmesinde sürtünme katsayısı-zaman eğrileri kullanılan yöntemlerden biridir. Son yıllarda; dinamik sürtünme kuvvetinin-yer değiştirme miktarına göre değişiminden hareketle sürtünme sırasında harcanan enerjiden yararlanılarak sürtünme katsayısının zamana göre değişimi incelenebilir. Kazımalı aşınmada, dinamik sürtünme kuvveti-zaman ölçümleri doğrusal yer değiştirme kullanılarak yapıldığında üç temel karakteristik ortaya çıkmaktadır: Elastik-yapışma, kısmi kayma ve kayma. Bu karakteristiklerin birbirlerinden ayrılmasında; dinamik sürtünme kuvveti-yer değiştirme miktarı eğrilerinden elde edilebilen, kazımalı aşınma sabiti (r) kavramı kullanılmaktadır. Araştırmacılar arasında kazımalı aşınma sabitinin farklı değerleri kısmi kayma ile kayma karakteristikleri arasında geçiş kriteri olarak kullanılmıştır. Bazı araştırmacılar için kazımalı aşınma sabitinin değeri 0.33 değerinden büyük olduğunda kayma karakteristiği gözlenmiştir. Başka araştırmacılar için ise bu değer 0.25'dir. Dinamik sürtünme kuvveti-yer değiştirme eğrilerinden sürtünme kuvveti sürtünme için harcanan enerji hesaplanara bulunabilir. Aynı zamanda, kazımalı aşınmayı etkileyen farklı parametrelerin değiştirilmesiyle ortaya çıkan karakteristiklerin belirlenebildiği kazımalı aşınma haritaları da meydana getirilmiştir.

Kazımalı aşınma, malzeme çitlerinin değiştirilmesi, yüzey özelliklerinin değiştirilmesi gibi yöntemler kullanılarak önlenabilir. Genel olarak aşınma ile ilgili sorunların giderilmesinde, ark-fiziksel buhar biriktirme (ark-PVD) yöntemi kesme, şekil verme, zımbalama ve enjeksiyonla kalıplamada endüstriyel amaçlarla uygulanmaktadır.

Bu çalışmada; farklı yük ve frekanslar kullanılarak TiN kaplamalı yüksek hız takım çeliği ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik arasında kazımalı aşınma karakteristikleri incelenmiştir. Aynı zamanda ticari ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi kullanılarak kaplanmış farklı ince sert seramik kaplamaların; CrN, TiN, tek katlı (TiAlN-T) ve iki katlı (TiAlN-D) TiAlN, ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik arasında kazımalı aşınma deneyleri yapılmış ve sürtünme katsayıları, bu kaplamalar ile endüstriyel alan deneylerinde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla; kazımalı aşınma deneyleri, enerji dağılımı spektroskopisiyle birlikte taramalı elektron mikroskobu incelemesi, kaplama kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve sertlik deneyleri yapılmıştır.

Kaplamalar, Novatech NVT-12 SIE katodik ark-PVD sistemiyle ticari parametreler kullanılarak yapılmıştır. Kazımalı aşınma deneylerinde kullanılan maksimum yük Hertz gerilme formülü yardımı ile triboçift elastik koşullarda kalacak şekilde hesaplanmıştır. Kaplama-taban malzemesi yapışma mukavemeti Rockwell C sertlik deneyi kullanılarak yapılmıştır. Kaplama sertlikleri Fischer HP 100 ultramikrosertlik cihazı yardımıyla belirlenmiştir. Karşı malzeme olarak kullanılan ferritik paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri ASTM standartlarına göre INSTRON kullanılarak belirlenmiştir. Kazımalı aşınma deneyleri; oda sıcaklığında, kuru ve göreceli nemin (%25-27) kontrol edildiği koşullarda Plint&Partners Micro Friction Machine TE 70 kullanılarak yapılmıştır. Bütün deneylerde yer değiştirme miktarı endüstriyel zımbalama işlemindekine benzer, kullanılan sacın nominal kalınlığı olacak şekilde 500µm olacak şekilde kullanılmıştır. Farklı yük ve frekansın kullanıldığı TiN kaplama-ferritik paslanmaz çelik kazımalı aşınma deneylerinde 1-2.5N normal kuvvet ile 5-20Hz frekans kullanılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için farklı kaplamalar (CrN, TiN, TiAlN tek ve TiAlN iki katlı) ile ferritik paslanmaz çelik arasında yapılan kazımalı aşınma deneylerinde normal kuvvet 2.5N ve frekans 10Hz olarak sabit tutulmuştur. Kazımalı aşınma deneyleri sonrasında kaplama ve karşı malzemelerin yüzeyleri enerji ayırmalı x-ışınları spektrometresinde içerisinde bulunduğu Jeol JSM-5400 taramalı elektron mikroskobu yardımıyla yapılmıştır.

Ark-PVD kaplamalı zımbalarda endüstriyel zımbalama işleminde yan yüzeylerde ortaya çıkan aşınma davranışı, laboratuvarında normal kuvvet-frekans değişimi sonucunda elde edilen kazımalı aşınma karakteristikleri ve farklı kaplamaların (CrN, TiN, TiAlN-T, TiAlN-D) kazımalı aşınma deneylerinin karşılaştırılması sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1)Yapılan endüstriyel çalışmalar sonunda bütün kaplamalı zımbalarda soğuk kaynak şeklinde gözlenen adhezif aşınma hasarı ve kaplamalı zımbalarla AISI 430 ferritik paslanmaz çelikde açılan deliklerde çapak oluşumu gözlenmemekle birlikte; kaplamalı zımbalar arasında en az aşınma hasarı, TiAlN-D kaplamalı zımbada; en yüksek aşınma hasarı ise CrN kaplamalı zımbada meydana geldiği gözlenmiştir.
- 2)Kaplama malzemeleri karşılaştırıldığında; 0.80 değeriyle en düşük sürtünme katsayısı TiAlN-D kaplamada, en yüksek sürtünme katsayısı ise 1.06 değeriyle CrN kaplamada gözlenmiştir. Bu durum endüstriyel çalışmalar ile uyum göstermektedir.
- 3)Toplam kazımalı aşınma miktarı ve kaplama malzemesi/karşı malzeme aşınma miktarı oranının en az olduğu durum TiAlN-D kaplama-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçiftinde gözlenmiştir. Toplam kazımalı aşınma açısından CrN kaplama-ferritik paslanmaz çelik ve TiN kaplama-ferritik paslanmaz çelik triboçiftlerinde çok büyük farklılıklar gözlenmemiş olmasına rağmen bütün kaplamalar arasında istenmeyen malzeme aşınmasının; kaplama malzemesi/karşı malzeme aşınma miktarı oranının, en fazla olduğu durum ise CrN-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçiftinde gözlenmiştir.
- 4)TiN kaplama-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçifti için farklı normal kuvvet ve frekanslar kullanılarak yapılan kazımalı aşınma deneylerinde elde edilen

kazımalı aşınma sabitleri ve taramalı elektron mikroskobu ile x-ışınları sonuçları nokta analizlerinin birlikte değerlendirilmesiyle normal kuvvet-frekans haritası meydana getirilmiştir. TiN kaplama-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçifti için normal kuvvet-frekans haritası incelendiğinde genel olarak düşük frekanslı ($f=5\text{Hz}$) bölgelerde kazımalı aşınmada kısmi kayma karakterinin ortaya çıktığı gözlenmiştir.

- 5)TiN kaplama-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçifti için oluşturulan normal kuvvet-frekans kazımalı aşınma mekanizma haritasını endüstriyel uygulama ile ilişkilendirilerek; kayma karakteristiğinin bulunduğu, yüksek yük ve frekanslı frekanslı bölgede zımbalama işleminin daha kolay olacağı düşünülmektedir.
- 6)Ark-PVD yöntemi kullanılarak yapılan ince sert seramik kaplamaların sürtünme davranışı; sertlik, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğünün birlikte etkilerinin bir fonksiyonu olarak, çok değişkenli doğrusal bir bağıntıyla ifade edilebilmektedir.



FRETTING WEAR BEHAVIOR OF THIN HARD CERAMIC COATINGS WITH AN APPLICATION OF INDUSTRIAL PUNCHING OPERATION

SUMMARY

Fretting wear individually has been described as the damage caused by fretting action. The fretting action or the fretting behavior of materials depends on a large number of parameters: Amplitude displacement, normal load, frequency, type of surface contact etc. are considered in fretting investigations.

The dynamic force measurements technique can be used to constitute the friction-time master curve for fretting process. Variation of the tangential force as a function of the displacement are measured during each cycle of the fretting test. Under fretting conditions, elastically loaded tribocouple; three type of fretting regimes are observed: In the first type; the tangential force increases linearly with the displacement and then decreases linearly with the same values in fretting test. This is elastic-stick regime. In the second type, mixed stick-slip (partial-slip); after the linear part, the cycle is elliptical ideally. The non-reversible load curve is observed in total fretting cycle. In gross-slip fretting regime; the tangential force increases and remains at a nominally constant value, then drops. The tangential force remains again at a constant value during the opposite movement. The cycle is close and the idealised shape is trapezoidal or quasi-rectangular. Fretting regime indicator (r) is used for the transition criteria between partial-slip and gross-slip characteristics. When the value of regime indicator is over 0.33, gross-slip fretting regime can be observed on mating surfaces; however there has still been a great confusion in this matter. For some researcher, the value of transition criteria between partial-slip and gross-slip fretting regimes is less than 0.25. The area enclosed by the force-displacement hysteresis loop represents the friction energy that is called as the dissipated energy concept. The friction coefficient is calculated from a complete fretting cycle.

The fretting damage can be reduced by different methods: changing of the material couples, surface modification in the contact region etc.. To reduce wear problems; advanced ceramics especially thin hard ceramic coatings have been used in metal and plastic working application such as cutting, forming, punching and injection moulding. One of the surface modification techniques is arc physical vapor deposition (arc-PVD, briefly PVD) performed in commercial application.

The aim of this investigation is to describe fretting regimes on TiN coated high speed steel (HSS)-AISI 430 ferritic stainless steel in different normal load and frequency; and also to compare the fretting behavior of the different thin hard ceramic coatings made by commercially arc-PVD process in gross-slip condition with industrial punching application. For this purpose; fretting tests, scanning electron microscopy (SEM) with energy dispersive spectroscopy (EDX), coatings thickness, hardness and roughness measurements were utilized.

Four type of arc-PVD base coatings, CrN, TiN, single (TiAlN-T) and double layered (TiAlN-D) TiAlN coatings; were used for fretting tests. Cathodic arc-PVD system, Novatech NVT-12 SIE; was used with commercial parameters for the coatings. Contact stress was calculated from Hertzian stress formula under the elastic condition of the tribocouple. Adhesion between coatings and substrate were measured by using Rockwell C hardness test. Ultramicrohardness measurement with Fischer HP 100 was used on the specimens to determine coating hardness. Mechanical properties of AISI 430 ferritic stainless steel were measured by using tensile testing in INSTRON machine according to ASTM standard. Fretting tests were performed at room temperature under unlubricated sliding conditions in climatized air ($25\% < RH < 27\%$). Tests were done on TE 70 Micro Friction Machine, Plint&Partners Ltd., with a computer control. Cylinder-on block contact geometry was used under unlubricated conditions for the fretting tests. For TiN-ferritic stainless steel tribocouples; 500 μ m displacement, 1-2.5N normal force and 5-20Hz frequency were used in fretting tests. For four different coatings; CrN, TiN, TiAlN-T and TiAlN-D; normal force 2.5N, frequency 10Hz and the displacement 500 μ m were performed in fretting tests for the comparison. Friction coefficient between the coatings and AISI 430 ferritic stainless steel were calculated from the running force-displacement hysteresis loops. The secondary electron imaging (SEI) mode of Jeol JSM-5400 scanning electron microscope (SEM) equipped with an energy dispersive spectrometer (EDX) was used to examine changes and chemical compositions in fretting tracks.

On the basis of microscopical observations and experimental data, the following conclusions can be drawn:

- 1) Cold welding between punch and AISI 430 ferritic stainless steel and furthermore chip formation on the stainless steel were not observed when all coated punches were used. The best performance among the four different coatings has been achieved in industrial observations by TiAlN-D coated punches.
- 2) From the comparison the friction coefficient values of coatings from the fretting tests; the lowest friction coefficient was observed with TiAlN-D coating, on the contrary, the highest friction coefficient value has been observed on CrN coating.
- 3) Based on the wear volume values; the lowest wear volume and the lowest coating wear volume/counter body wear volume ratio were observed on TiAlN-D coating/AISI 430 ferritic stainless steel tribocouple. The highest undesirable material removal; according to coating wear volume/counter body wear volume ratios, were observed on CrN coating/AISI 430 ferritic stainless steel tribocouple.
- 4) Based on the fretting regime indicator (r) and SEM observations with EDX analysis; frequency vs. normal force fretting wear map was established on the tribocouples, TiN coated HSS and AISI 430 ferritic stainless steel. Both partial-slip and gross-slip fretting regimes have been observed in frequency vs. normal force fretting wear map. Generally, partial-slip regime is in low frequency conditions with material transfer on the fretting wear map.

- 5)Constructed fretting wear map of TiN coating and AISI 430 ferritic stainless steel can be utilized in industrial punching applicaton. For the industrial punching application, it is believed that it would be easier to cut AISI 430 ferritic stainless steel on the gross slip fretting regime (high frequency and high force) which the necessary conditions known the fretting wear map.
- 6)Multivariable regression characteristic can be presented by using coating friction coefficient, hardness, thickness and roughness.



BÖLÜM 1. GİRİŞ

1930'lu yıllardan beri üretimde temel yöntem Ford sistemidir ve Fordizm (veya Taylorizm) olarak da adlandırılabilir. Genel olarak; Fordist sistem ayrıntılı iş bölümü esasına göre örgütlenmiş, her işçinin dar anlamda tanımlanmış ve rutin bir işi sürekli olarak yaptığı bir işleyişle verimlilik artışını hedefler[1]. Bu sistem; 1970'lerin başında "Altın Patlaması", petrol ve ekonomik krize kadar çok önemli değişiklikler olmadan devam etmiştir.

Sistemin oluşum nedeni; geniş ve istikrarlı pazarların varlığıdır. Bu sistem; 20.yy. başlarından II.Dünya Savaşı'na kadar kendi topraklarında, A.B.D., Güney ve Orta Amerika gibi yakın pazarlarda, II.Dünya Savaşı sonrası

-Sosyo-etno kültürel farklılıklarını ortadan kaldırması veya ihraç etmesiyle; Avrupa'da,

-Bütünleşmiş, ekonomik birlikte hareket etme fikriyle (Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü-OECD, Amerikan Devletleri Örgütü-OAS, Merkezi Afrika Ekonomik ve Gümrük Birliği-UDEAC, Avrupa Topluluğu-EC vb.), bütün dünyada

gibi nedenlerle yeni pazarlara açılabilmiştir. Bu yüzyıl başlarından itibaren gelişen ve II.Dünya Savaşı sonrası Orta Doğu, Afrika ve Güneydoğu Asya'da ulus-devlet anlayışının yükselişi, pazarın genişleyeceği ve Fordist sistemin ilerleyeceği işaretini vermiştir. Ancak; daha önce güdümlü varlıklarıyla kontrol edilen bu pazarlar 1970'lerin hemen başlarında pazarın bütününe hakim olmaya başladılar. Başka bir deyişle; pazarı sürükleyen dinamikler, göreceli olarak gelişmiş ve istikrarlı pazarlar yerine; daha az gelişmiş, küçük ve istikrarsız pazarlar tarafından kontrol edilmeye başlamıştır. Standart ucuz malın yerini; ucuz ve sürekli değişen ürünün almasıyla

birlikte klasik-Fordist sistemi sarsılmaya başlamıştır[1]. Tüketici talepleri; satış sonrası hizmetlerden, promosyonlardan ve bir kaç ürünün birlikte sunulmasından etkilenir hale gelmiştir. Standartlaşma kavramı, üründe değil sistemin bütününe yayılmış bir kavram olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca klasik Fordist yaklaşımın getirdiği bazı dezavantajlar;

- Uzun organizasyon ağı nedeniyle küçük birimlerin kontrolünün zorlaşması,
- Hemen hemen bütün her şeyde yetki ve sorumluluğu alacak birilerini bulma zorluğu,
- Karar vermek gerektiğinde, en ufak adım için dahi yönetime gidilmesi; bu nedenle yönetim kademesinin bloke olması, atalet

gibi nedenler, sermaye birikim hızını yavaşlatmıştır. Anglo-Sakson üretim ve yönetim anlayışının karşısına farklı yaklaşımlarıyla çıkan Asya-Japon tarzı üretim ve yönetim anlayışı, fikirden ürüne hızlı geçişleriyle klasik Ford sistemini pazarda geriletmeye başlamıştır. Bu ve benzeri nedenler klasik Ford sisteminden günümüzde bildiğimiz post-Fordist sisteme geçişe neden olmuştur[1].

Her iki sistem arasında;

- Üretim/çıktı/ürün,
- Malzeme/makina-teçhizat/yatırım anlayışı,
- İş gücü niteliği ve eğitimi,
- Sermaye birikim hızı ve şekliyle birlikte, şirketler arası ilişki,
- Organizasyon anlayışı

gibi konularda farklılıklar bulunmaktadır. Tablo 1.1.'de bu farklılıklar konusunda örnekler verilmiştir[1].

Değişken isteklere cevap verebilmek amacıyla üretimde esnekliğe geçilmiştir. Bunun dışında esnek üretimin beraberinde servis sürelerinin yeterli, bakım sürelerinin kısa tutulması gibi kavramlarda ortaya çıkmıştır.

Post-Fordist sistemle birlikte ortaya çıkan değişikliklerin yerine getirilebilmesi için;

- Enformatik
- Malzeme,
- Çevreye karşı duyarlı teknolojiler,
- Biyoteknoloji

gibi alanlarda çeşitli gelişmeler gerektirmiştir.

Tablo 1.1: Klasik-Fordist anlayış ile post-Fordist anlayış arasındaki farklılıklara örnekler[1].

	Fordizm	Post-Fordizm
Üretim/ürün/çıktı	Düşük maliyetli standart kitle üretimi	Esnek geniş ürün yelpazesi, küçük üretim miktarları, sürekli yenilik
Malzeme/makina/yatırım	Özel tek amaçlı, emekden tasarruf eden makina	Emek ve sermayeden tasarruf sağlayan, genel amaçlı, programlanabilir makinalar

Yaygınlaşan otomasyon ve sürekli artan değişken üretim talepleri yeni tekniklere uygun malzeme kullanımını da beraberinde getirmiştir.

Endüstride meydana gelen hasar problemleri genellikle üç kaynaktan ortaya çıkmaktadır: aşınma, korozyon ve yorulma[2,3]. Bir malzemenin aşınma ve korozyon özellikleri malzemenin doğrudan kütsel özellikleriyle olduğu kadar yüzey özellikleriyle de ilişkilidir. Yapısal özelliklerle birlikte uygun yüzey özelliklerine sahip malzemeleri bulmak ya çok zor ya da çok pahalı olmaktadır. Yeterli yapısal özellikleri sağlayan ve yüzey özellikleri kaplamalarla desteklenen; yukarıda belirtildiği gibi esnek-post Fordist üretim sürecine uyumlu malzemelerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

İnce film kaplama tekniklerinden biri olan kimyasal buhar biriktirme (CVD) 1960'lı yılların başında sert seramik kaplamalarla aşınma uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu tekniğin;

-Düşük sıcaklıkta temperlenen malzemelere uygulanmasının zorluğu,

-Çevre kirleticisi klor gazının prosesde kullanımı

gibi dezavantajları nedeniyle yeni arayışlara girilmiş ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniklerinden iyon kaplama 1970'lerin başında, daha sonra da ark-fiziksel buhar biriktirme (ark-PVD) geliştirilmiştir.

Bütün bu değişim rüzgarından Türkiye'nin etkilenmemesi mümkün değildir. Türkiye'de gecikmeli de olsa post-Fordist sistemin etkileri gözlenmektedir; değişken hızlı, çoklu seri tezgahların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu türde sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte kullanılan takım, kalıp gibi sistemlerin servis ömürleri/performansları, takım/kalıp değiştirme zamanı, tamir ve bakım süreleri önem kazanmaktadır. Bu konularda gelişmenin sağlanabilmesi otomasyon, değişken üretime uygun tezgah gibi konuların yanında yüksek kalitede malzeme kullanımını da gerektirmektedir. Dünyadaki eğilimlere benzer şekilde PVD kaplamaların kullanımı öncelikle talaşlı imalatda kullanılan takımlarda başlamış ve kullanımları diğer şekillendirme işlemlerinde de yaygınlaşmaktadır.

Bu çalışmada, endüstriyel olarak kullanılan zımbalarda yan yüzeylerde

-Soğuk kaynak/birleşme,

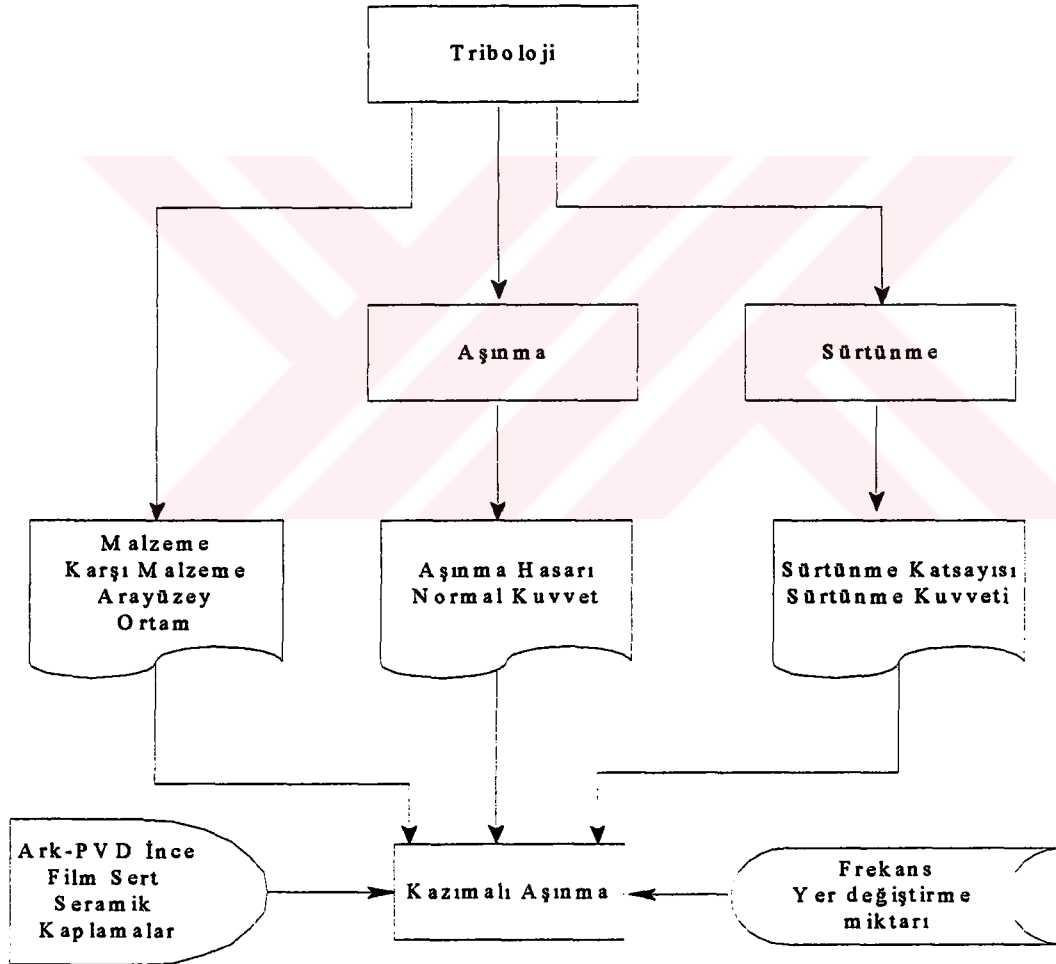
-Karşı malzemede (üründe) meydana gelen çapak

problemlerini gidererek zımba performanslarını arttırmak ve yan yüzeyde meydana gelen aşınmayı laboratuvarında benzeştirme yöntemiyle incelemek, amaçlanmıştır.

Çalışılan konu dikkate alındığında; farklı alanlardan bir çok kavramın bir arada kullanıldığı görülecektir:

- a) Sürtünmeyle ilgili, normal kuvvet (F_N), sürtünme kuvveti (F_T) ve sürtünme katsayısı (μ).
- b) Aşınma terimi; aşınma mekanizması, aşınma hasarı
- c) Tribolojik sistem; malzeme, karşı malzeme, ortam ve arayüzey
- d) Yüzey işlemleriyle ilgili terim; kaplama, ince film sert seramik kaplamalar.

Bu kavramların etkileşimi Şekil 1.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Çalışma konusu ile kullanılan terimler arasındaki ilişki.

Çalışmada teorik bölümlerde; aşınma direnci sağlayan kaplamaların üretim yöntemleri, triboloji ve sürtünme kavramları, dinamik sürtünme katsayısıyla ilgili modeller, aşınma kavramı ve aşınma mekanizmaları, bu çalışmada kullanılan aşınma mekanizması kazımalı aşınma hakkındaki bilgiler özetlenmeye çalışılmıştır.

Deneysel çalışmalarda;

- a)Krom nitrür (CrN), titanyum nitrür (TiN), tek ve iki katlı titanyum aluminyum nitrür (TiAlN) kaplamanın uygulandığı zımbaları karşılaştırmak amacıyla endüstriyel alan deneyleri,
- b)Farklı frekans ve yüklerde, titanyum nitrür kaplamalı yüksek hız takım çeliği-paslanmaz çelik triboçiftinde ortaya çıkan kazımalı aşınma karakteristiklerini incelemek amacıyla kazımalı aşınma deneyleri,
- c)Krom nitrür (CrN), titanyum nitrür (TiN), tek ve çok katlı titanyum aluminyum nitrür (TiAlN) kaplamaların paslanmaz çelik karşısında gösterdikleri aşınma davranışını karşılaştırmak amacıyla sabit frekans ve yükde kazımalı aşınma deneyleri

yapılmıştır.

BÖLÜM 2. YÜZEY İŞLEMLERİ VE KAPLAMA TEKNİKLERİ

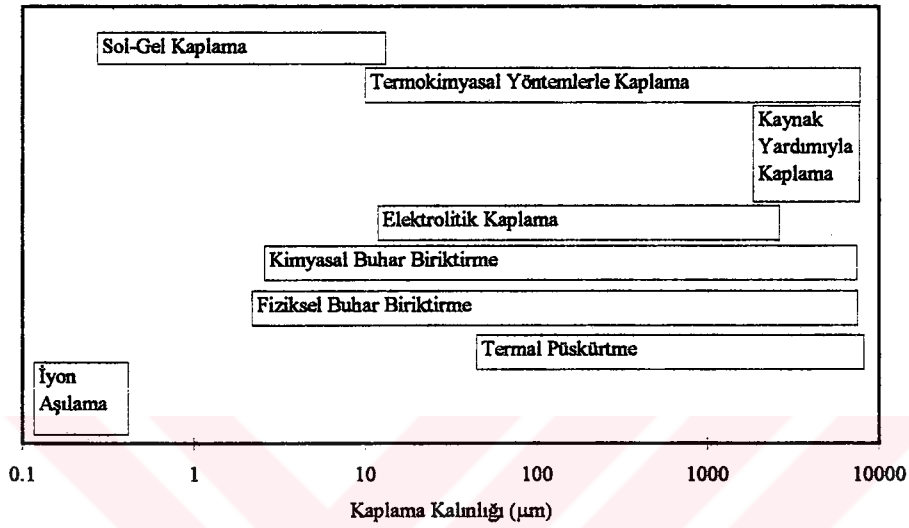
Yüzey işlemleri ve mühendisliği son yıllarda hızlı olarak gelişmesine rağmen yüzey işlemlerine dair pratik bilgiler oldukça eskidir. İ.Ö. 880 yıllarında Homer'in Odysseus'unda, demirci ustalarının baltaların yüzeyini sertleştirdiklerine dair bilgiler bulunmaktadır. Odysseus'un Tepegöz'ü öldürmek için kullandığı zeytin dalından yapılmış silahını sertleştirmek için yaptığı işlemler detaylı bir şekilde anlatılmaktadır[4,5]. Alman keşiş-yazar Theofilus'un karbürizasyonla yüzey sertleştirme işleminden bahsetmiştir. 11yy.da Çinli'lerin silahların mukavemetini arttırmak için soya fasulyesinin parçalanmasından (ayrışması) faydalandığı bilinmektedir. Bütün bunlara rağmen 20yy. başlarına kadar yüzey işlemleri bir disiplin olarak ele alınmamıştır[5]. Şekil 2.1.'de yüzey işlemlerinin genel bir sınıflandırması bulunmaktadır[2,5,6].

Yüzey İşlemleri		
Yüzeye Malzeme Eklennesi	Yüzey Kimyasal Bileşimini Değiştirme	Yüzey Mikroyapısını Değiştirme
Kaynak	Yüzey sertleştirme	Mekanik İşlemler
Termal Püskürtme	Difüzyonla Yüzey İşleme	Isı Etkisiyle Yüzey İşlemi Yapmak
Giydirme	Kimyasal İşlemler	
Elektrolitik Kaplama		
Buhar Biriktirme		
Kimyasal Yöntemle Kaplama		

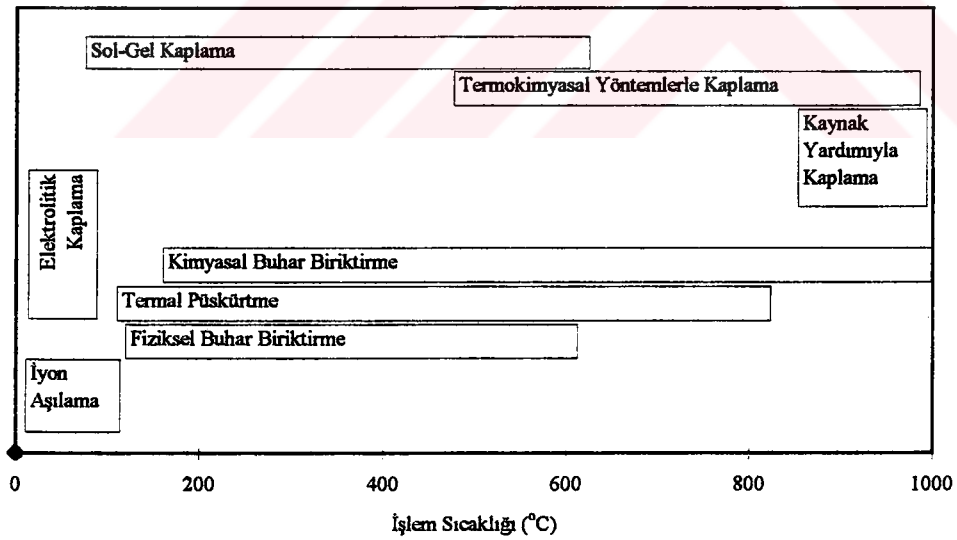
Şekil 2.1. Yüzey işlemlerinin sınıflandırılması[2,5,6].

Yüzey özelliklerini değiştirebilecek pek çok teknik bulunmaktadır. Yüzey işlem ve kaplama tekniklerinin seçimi fonksiyonel isteklere, şekil-boyut gibi geometrik faktörlere; taban malzeme özelliklerine ve yüzey işlemi-kaplama-taban malzemesi uyumu gibi özelliklere bağlıdır.

Temel olarak yüzey mühendisliği iki ana grupta ele alınabilir: Yüzey işlemleri ve yüzey kaplama teknikleri. Yüzey kaplama teknikleri kalınlık ve işlem sıcaklığı kriterlerine göre karşılaştırılabilir[7]. Şekil 2.2.'de yüzey kaplama tekniklerinin uygulandığı sıcaklık ve elde edilen kalınlık aralığı görülmektedir[7].



(a)



(b)

Şekil 2.2: Yüzey kaplama teknikleriyle elde edilen kaplamaların a)tipik kalınlık aralığı ve b)işlem sıcaklıkları[7].

Pek çok yüzey işlemi:

- a)Yüzey sertliğini arttırmak,
- b)Aşınma ve korozyon direncini arttırmak,
- c)Sürtünmeyi azaltmak

amacıyla yapılmaktadır. Bu amaçlarla yüzeyde aşınma direnci istenen takım ve kalıplara yapılan yüzey işlemleri:

1)Yüzey sertleştirme

a)Nitrürleme

i)Gaz nitrürleme

ii)Sıvı nitrürleme

iii)Plazma veya iyon nitrürleme

b)Karbürleme

c)Borlama

2)Yüzey kaplama

a)Oksit kaplama

b)Sert krom kaplama

c)Akımsız nikel kaplama

d)CVD

e)PVD

3)Yüzey modifikasyonu

a)İyon ekleme

b)Yüzey alaşımlandırma

c)Lazerle yüzey işlemleri

gibi gruplara ayrılabilir[5,6].

Holmberg yüzey kaplama tekniklerini, işlemin yapıldığı fazlara göre

- a)Gaz fazında,
- b)Çözelti içerisinde,
- c)Ergimiş veya yarı-ergimiş fazlarda

yapılanlar olmak üzere üç gruba ayırmıştır[7]. Bundan sonraki bölümlerde bu sınıflandırma esas alınarak, aşınmaya karşı dayanıklı yüzeylerin elde edilmesinde kullanılan kaplama teknikleri hakkında bilgi verilmiştir.

2.1. Gaz Fazında Yapılan Prosesler

Gaz fazındaki prosesler dikkate alındığında genel olarak iki ana grup ortaya çıkmaktadır: Kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD).

2.1.1. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

Temel CVD prosesinde kaplanacak elementler bir reaksiyon kabı içerisinde aktifleştirilir ve taban malzeme üzerinde yoğunlaştırılarak biriktirilir. CVD prosesinde; kimyasal reaksiyon genellikle 800-1200°C sıcaklık aralığında meydana gelmektedir[7,8,16]. Basınç konusunda literatürde farklılıklar mevcuttur. Basınçla ilgili literatür verileri değişiklikler göstermektedir:

- a)Atmosferik basınçla 1Pa aralığında[7],
- b)Atmosferik basınçla 65Pa aralığında[16],
- c)Atmosferik basınçla 670Pa aralığında[8]

Basınçla ilgili farklılıklar yukarıda belirtildiği gibidir. Taban malzeme elektrik direnci, indüksiyon veya infrared yöntemleriyle ısıtılır. CVD prosesinin en önemli dezavantajı yüksek taban malzeme sıcaklığı gerektirmesi ve klorlu gaz fazının korozif etkileridir. CVD tekniğiyle oldukça geniş bir aralıkdaki tranzisyon elementlerinin borürleri, karbürleri, nitrürleri, oksitleri, karbonitrürleri ve oksinitrürleri kaplama olarak elde

edilebilir[8]. Tablo 2.1’de CVD tekniğiyle saf metal kaplamalar ve proses koşulları; Tablo 2.2’de CVD tekniğiyle kaplanmış ve kaplanmamış kalıp ve takımların performanslarına örnekler verilmiştir[8].

Tablo 2.1. CVD tekniğiyle elde edilen saf metal kaplamalar ve proses koşulları[8].

Kaplama	Metal Reaktif	Diğer Reaktifler	Sıcaklık (C°)	Basınç (kPa)	Kaplama Hızı (µm.dak. ⁻¹)
W	WF ₆	H ₂	250-1200	0.13-100	0.13-50
	WCl ₆	H ₂	850-1400	0.13-2.7	0.25-38
Mo	MoF ₆	H ₂	700-1200	2.5-47	1.3-30
	MoCl ₅	H ₂	650-1200	0.13-2.7	1.3-20
Nb	NbCl ₅	H ₂	800-1200	0.13-100	0.08-25

Tablo 2.2: CVD Tekniğiyle kaplama yapılmış kalıp ve takımlara örneklerle performansları [8].

Parça	Çelik Türü (AISI)	Kaplama	Uygulama	Kaplamalı/Kaplamasız Performans Oranı
Trim Kalıbı	M2	TiN	Soğuk şekillendirme	4/1
Şekillendirme Kalıbı	T15	TiC	Makina vida uygulaması	5/1
Kesici Takım	M2	TiN	Düşük karbonlu çelik işlenmesi	7/1

2.1.2. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

Buhar fazında kaplama yapmadaki en önemli teknolojilerden biri de Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) dir. Metal ve alaşımlar; elektrik açısından iletken, yarı-iletken ve yalıtkan maddelerin ticari olarak kaplanmasında PVD yöntemi kullanılabilir[8].

PVD tekniği, vakum altında bulundurulan malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomların yüzeyden kopartılması ve kaplanacak taban malzeme yüzeyine biriktirilmesi esasına dayanır.

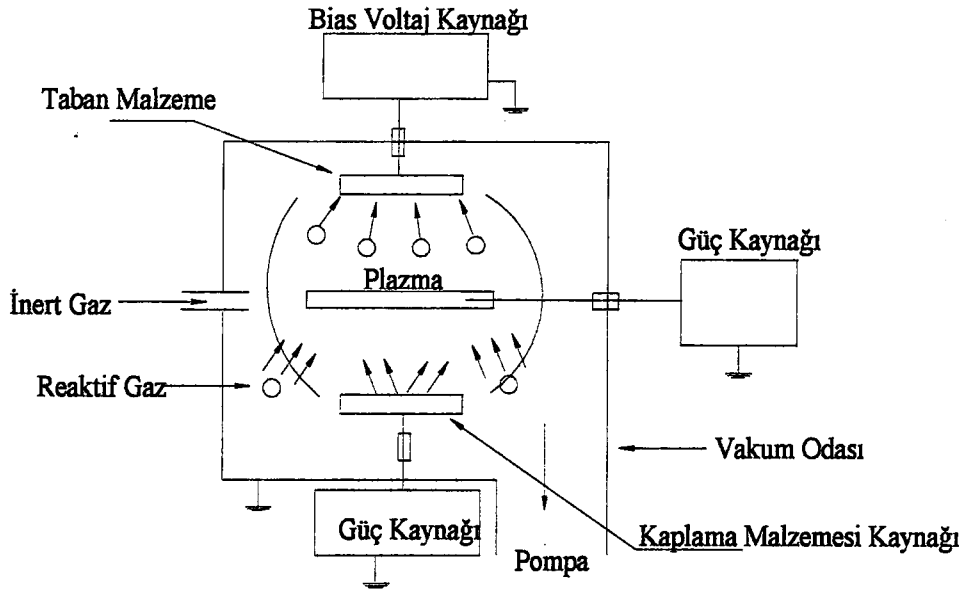
Faraday'ın 1850 yılında metalleri vakum altında buharlaştırarak ürettiği kaplamalar, PVD yönteminin ilk uygulamalarından biri olarak kabul edilir. 1888 yılında Kundt bu yöntemle üretilmiş ince filmlerin optik özellikleri üzerine çalışmalar yapmıştır[9]. Toz halindeki nitrürlerle ilgili gaz fazında yapılan çalışmalar 1912 yılından sonra hız kazanmıştır. 1948-1953 yılları arasında nitrür ve karbürlerle ilgili çalışmalar artmış ve CVD tekniği kullanılarak toz sentezi yapılmıştır. 1970'li yılların başında PVD tekniği, endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek hale gelmiştir[10].

PVD tekniği gaz fazının elde ediliş yöntemine göre iki gruba ayrılabilir[11]:

- a)Buharlaştırma
- b)Sıçratma

Her iki yöntemle elde edilen gaz fazı, ortama reaktif bir gazın ilave olarak verilmesiyle reaktif buharlaştırma veya sıçratma olarak adlandırılır[9]. şekil 2.3'de PVD tekniğinin genel şeması gösterilmiştir[8].

Genel olarak PVD tekniğiyle kaplama yapmak; metalin bir katod kaynağında buharlaştırılmasıyla başlar. Yüksek iyonize olmuş metal buharı taban malzemenin ısıtılması ve yüzeyin hazırlanması için kullanılır. Uygun vakum seviyelerine ulaşıldığında, yaklaşık 1.3 MPa; taban malzeme metal iyon bombardımanı yardımıyla ısıtılır. Bu olay adhezyonu arttırıcı bir etki yapar. Bias voltajı olarak -75-(-400)V arasında bir potansiyel aralığı kullanılır. Yüksek metal iyonu oranına sahip stokiyometrik filmler reaktif gaz basıncı, taban malzeme sıcaklığı ve voltajın yardımıyla taban malzeme yüzeyi üzerinde birikirler. Teknolojik olarak, azot gazı basıncı 0.13-8Pa arasında; sıcaklıkda 180°C'a kadar düşürülebilir.



Şekil 2.3: PVD tekniğinin şematik olarak görünümü[8].

PVD tekniği alternatif diğer yöntemlere göre;

- göreceli olarak pahalı teçhizat,
- sürekli sistem desteği,
- göreceli olarak uzun proses zamanı

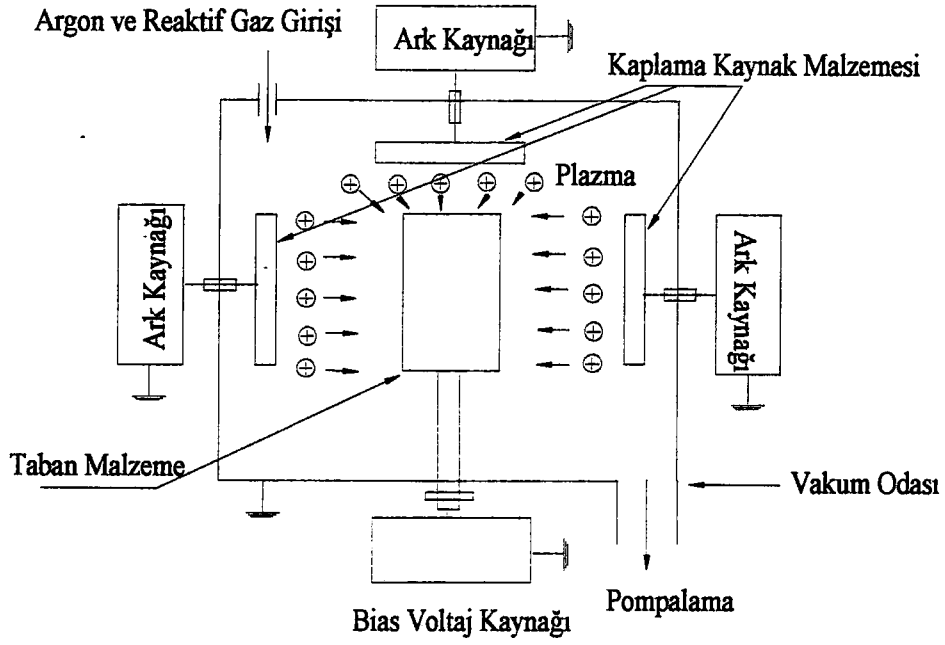
gerektirmesine rağmen sert seramik kaplamalar için uygun bir yöntemdir[8]. Tablo 2.3.'de çeşitli PVD tekniklerine ait özellikler karşılaştırma yapmak amacıyla gösterilmiştir[8].

Katodik ark yardımıyla buhar fazının elde edildiği PVD yöntemi; talaşlı imalatda ve takımların, aşınmaya dirençli sert seramik kaplamaların uygulanmasında kullanılan bir tekniktir[11]. Bu sistemde, buhar fazının elde edileceği malzeme vakum odasına katod olarak, kaplanacak taban malzeme anot olarak bağlanır. Sisteme uygulanan düşük voltaj (20-30 V) ve yüksek akım (100-200 A) etkisiyle katod yüzeyinde ark meydana gelir. Katod yüzeyinde arkın 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 ve plazma nedeniyle iyonlar bu bölgeden hızla uzaklaştırılırlar. Bias voltajı uygulanmış taban malzemeye doğru yönlendirilen iyonlar reaktif gazla reaksiyona girerek taban malzeme üzerinde biriktirilirler[11]. Şekil 2.4.'de katodik ark yöntemi şematik olarak gösterilmiştir[8].

Tablo 2.3: Çeşitli PVD tekniklerine ait özellikler[8].

Kaynak Tipi/Karakteristikler	Ark	Electron Işın Demeti	Sıçratma
Kaynak Yerleşimi	Üç Yönde	Altta	Üç Yönde
Kaynak Sayısı	Çoklu	Tekil	Çoklu
Kaynak-Taban Malzeme Uzaklığı (mm)	100-500	200-700	50-200
İyonizasyon Oranı (%)	≥ 50	1-10	≤ 1
Taban Malzeme Isıtması ve Yüzey Hazırlama	Metal İyonlarıyla	Radyasyon Isıtma ve Argon İyonlarıyla	Radyasyon Isıtma ve Argon İyonlarıyla
Taban Malzeme Sıcaklığı (°C)	180-550	200-550	300-550
Bias Voltajı (-V)	75-400	100-400	100-500
Azot Basıncı (Stokiyometri)	Geniş Aralıkda	Dar Aralıkda	Dar Aralıkda
Kaplama Hızı ($\mu\text{m}/\text{dak.}$)	0.025-0.3	≤ 1	≤ 0.2
Operasyon Karmaşıklığı	Düşük	Yüksek	Orta



Şekil 2.4. Katodik ark PVD tekniğinin şematik görünümü[8].

2.2. Çözelti İçerisinde Yapılan İşlemler

Çözelti içerisinde yapılan kaplama tekniklerinde; çözelti olarak genellikle sulu ortamlar kullanılır. Sulu çözeltilerden metal veya metal olmayan taban malzemelere kaplama yapılabilir. Çözelti içerisinde yapılan işlemler kimyasal ve elektrokimyasal teknikler olarak ayrılabilir[7].

2.2.1. Kimyasal Teknikler Kullanılarak Yapılan Kaplamalar

Kimyasal kaplamalar, elektrokimyasal kaplamalardan farklı olarak elektrik akımına ihtiyaç duymazlar[16]. Kimyasal kaplamalar;

- a) Homojen kimyasal reaksiyonlarla kaplama,
- b) Akımsız veya otokatalitik reaksiyonla gelişen kaplama,
- c) Çözeltiyle reaksiyona giren taban malzemenin dönüşümü sonucunda kaplama olmak üzere ayrılabilirler[7].

Kimyasal teknikle yapılan kaplamaların en yaygın olarak kullanılanları akımsız nikel kaplama ve dönüşüm kaplamalardır.

Gawrilov akımsız nikel kaplamayı üçe ayırmıştır[12]:

- a)İyon değişimiyle kaplama
- b)Metal tuzu içerisine daldırmayla kaplama
- c)Redükleyici madde içeren çözeltiden metal kaplama

1844'de Wurtz nikel tuzunun hipofosfitle redüksiyonundan yararlanarak metalik nikel kaplanabileceğini keşfetti. Bretau ve Roux redüksiyon yapıcı madde ilavesiyle parlak kaplamaların yapılabileceğini; bir kaç yıl sonra da Rfederici palladyum aktifleyici kullanımıyla hipofosfitli alkali ortamlarda nikel tuzlarının reaksiyonlarını tanımladı. Bu gün kullanılan akımsız nikel kaplama teknolojisi; 1946'da oluşturuldu. Brenner-Riddell uygulamayı geliştirerek yüksek sıcaklıkta sitrat banyosundan nikel-tungsten alaşım kaplama teknolojisini ortaya çıkardılar[12].

Nikel-bor alaşım kaplamalar ilk defa 1954'de ortaya çıktı. İlk sodyum borhidrit sentezi daha önceden 1942'de Schlesinger tarafından ortaya konmuşdu. 1957-1958 yıllarında nikel tuzu ve borhidrit çözeltisinden kaplamalar ve bunların inert atmosferde ısıt işlemleri geliştirildi. 1978-1982 yılları arasında fosforca zengin akımsız nikel kaplama geliştirildi ve endüstriyel olarak uygulanmaya başlandı. Kreye'ye göre abrazif aşınma direnci açısından en iyi uygulama fosforca zengin akımsız nikel kaplamayla mümkündür. Akımsız nikel kaplama uygulamaları:

- a)Homojen,
- b)Düşük poroziteli,
- c)Elektrolitik kaplamalara göre daha fazla korozyon dirençli
- d)Kompozit kaplama yapmaya elverişli
- e)Daha sert ve aşınma dirençleri daha yüksek

oldukları için tercih edilirler[16].

Akımsız nikel kaplamanın bazı dezavantajları;

- a) Banyo bileşiminin karmaşıklığı ve kontrolünün zorluğu,
- b) Elektrolitik kaplamaya göre pahalı olması,
- c) Elektrolitik kaplamaya göre işlem hızının yavaş olması

şeklinde sırlanabilir[16]. Akımsız nikel kaplama; plastik, çelik, paslanmaz çelik, alüminyum ve alaşımları gibi iletken ve iletken olmayan taban malzemelere uygulanabilir. Fren silindirleri ve fren diskleri gibi aşınmanın var olduğu uygulamaların[12] yanı sıra ısıtma işlemi görmüş akımsız nikel kaplamaların endüstride kalıplarda da uygulandığı bilinmektedir. Uygulamada nikel-fosfor akımsız nikel kaplamaların aşınma direncini arttırmak amacıyla kaplamaya ısıtma işlemi yapılabilir. 10-18µm kalınlığında %4-11 fosfor içerikli akımsız nikel kaplamada, yüzey sertliği ısıtma işlemiyle minimum 480 HV sertliğinden 750 HV sertliğine çıkartılabilir.

Dönüşüm kaplama, metal yüzeyinin en dış atomik tabakasının orjinal malzeme özelliklerinden farklı, metalik olmayan kaplamanın meydana getirilmesi olayıdır[16]. Dönüşüm kaplamaların en önemli örnekleri fosfatlama, oksidasyon, kromatlama, sülfürleme olarak sıralanabilir[7,8,16,]. Tablo 2.3.' de dönüşüm kaplamalara ait çeşitli örnekler gösterilmiştir[8].

Tablo 2.3: Dönüşüm kaplamalar ve özellikleri[8].

Kaplama	Taban Malzeme	Kaplama Ağırlığı (g.m ⁻²)	Görünüş
Çinko ve krom oksit	Çelik	0.16-0.5	Mavi altın rengi
Demir ve krom oksit	Çelik	0.16-0.5	
Demir fosfat	Çelik	0.16-0.9	Maviden kırmızıya altın rengi,
Çinko fosfat	Alüminyum	1.6-5.4	Gri

2.2.2. Elektrokimyasal Kaplamalar

Bu işlemde kaplama metali anot, kaplanacak malzeme katod olarak bir sulu çözelti içerisinde elektriksel olarak yüklenir[16]. Elektrolitik kaplama endüstride yaygın olarak kullanılan kaplama yöntemlerinden biridir. Bu tür kaplama tekniğiyle çinko kaplama en bilinen uygulamadır. En önemli tribolojik kaplama da sert krom olarak bilinen krom kaplamadır[7]. Sert krom kaplamada;

- a)Hızlı kaplama,
- b)Kolay banyo kontrolü

avantajları arasında yer alırken;

- a)Hidrojen gevrekliği,
- b)Heterojen kaplama kalınlığı

en önemli dezavantajlarıdır[7]. Aşınmaya dirençli uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan elektrolitik kaplama sert krom kaplama olarak bilinendir.

Sert krom kaplama yaklaşık 1.5-500µm kalınlık aralığında yapılabilmektedir. İnce kaplamalar düşük sürtünme özellikleri nedeniyle kesici takımlar için uygulanır. 1.5µm dan daha kalın kaplamalar kesici takımlarda kesme kenarında körlenme etkisi yarattıkları için tercih edilmez. Ayar parçaları gibi hafif aşınma gösteren parçalar 2.5-5µm kalınlığında; şaft gibi ağır aşınma gözlünen parçalarda 50-150µm kalınlığında krom kaplama yapılmaktadır[13]. Sert krom kaplama otomotiv sektöründe aşınmaya karşı çalışan uygulamalarda minimum 5µm kalınlığında olacak şekilde kullanılmaktadır. Özellikle silindir gömleklerinde bu kalınlık daha da artar ve ortalama 50µm kalınlığına ulaşmaktadır. Bütün elektrolitik kaplamalarda olduğu gibi sert krom kaplamada da hidrojen gevrekliği problemiyle karşılaşılabilir. Bu problemi ortadan kaldırmak amacıyla; kaplamadan sonra en geç 1 saat içerisinde çelik malzemenin cinsine göre 200°C’da 4 saat veya 150°C’da 8 saatlik bir ısı-ışıl işlem uygulanabilir.

2.2.3. Sol-Jel Kaplamalar

Sol-jel yöntemi 1846 yılında ortaya çıkmıştır[14]. Sol-jel prosesi; koloidal fazla, sol ile başlar ve akışkan sol katı jele; evaporasyon, elektrostatik destabilizasyon gibi işlemlerle dönüştürülür. Sol-jel dönüşümü katı fazın film, fiber ve mikro küre gibi şekillere dönüşümüne izin verir. Bu şekiller amorf olabildiği gibi yarı-kristal olabilirler[15]. Sol-jel yöntemiyle ilgili ilk yayın yapıldıktan sonra uzun bir durgunluk dönemi geçmiştir. 1935 yılına gelindiğinde sol-jel daldırmayla kaplama yöntemiyle ilgili ilk patent alınmıştır. 1970 lere gelindiğinde çok bileşenli oksitlerin sol-jel yöntemiyle sentezinden söz edilmiş ve sol-jel teknolojisi ortaya çıkmıştır[14]. Sol-jel yönteminin ilk ticari uygulamalarından biri film ve kaplama yapmaktır. Sol-jel filmlerin ilk uygulamaları da dielektrik özellikli kaplamalardır[16]. Sol-jel yöntemiyle koruyucu kaplamaların, membranların, sensörlerin kaplanması[17]; polietilen teraftalatın aşınmaya karşı direnç gösteren kaplama olarak kullanılması bilinen uygulamalardır[18].

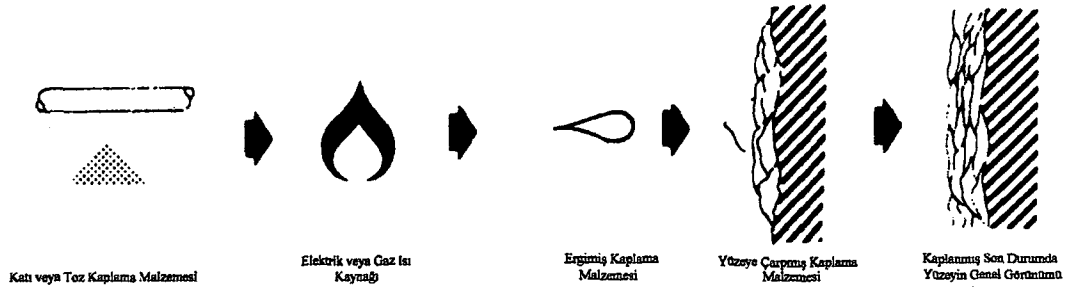
2.3. Ergimiş veya Yarı-Ergimiş Fazlarla Yapılan Yüzey İşlemleri

2.3.1. Termal Püskürtme

Termal püskürtme tel, çubuk veya toz halindeki ergimiş veya yarı ergimiş metal ve alaşımları, seramik malzemeleri püskürtme tabancası yardımıyla taban malzemeye bağlama olayıdır[8,19,20]. Termal püskürtme ile kaplama şematik olarak Şekil 2.5’de gösterilmiştir[20]. Termal püskürtme yöntemi:

- a)Alevle püskürtme
- b)Yüksek hızda oksijen içerikli yakıtla püskürtme
- c)İki tel elektrod yardımıyla püskürtme
- d)Plazma püskürtme
- e)Vakum plazma püskürtme

olarak sınıflandırılabilir[20].



Şekil 2.5: Termal püskürtme kaplama tekniğinin şematik gösterilişi[20].

Pek çok malzeme; metallerin bir çoğu, oksitler, metalik bileşikler, bazı karbürler termal püskürtme yöntemiyle kaplama olarak kullanılabilir[8]. Termal püskürtme yöntemi yaklaşık kırk (40) yıldır kullanılmasına rağmen; termal püskürtme ile kaplama, ilk önceleri hasarlı parçalar onarılması ve parça üzerindeki hataların giderilmesi için kullanılmıştır[8,20]. Ancak son yıllarda

- 1)Teçhizat alanındaki gelişmeler (örneğin püskürtme demetindeki gelişmeler),
- 2)İşlem parametrelerinin kolay kontrolü,
- 3)Düşük fiyat/kitle malzemesi oranları

gibi nedenlerden dolayı, gaz türbinleri parçalarından elektronik endüstrisine, benzinli ve dizel motor parçalarına kadar geniş bir alanda uygulanmaktadır[8,20].

2.3.2. Lazerle Yüzey İşlemleri

Lazerle desteğiyle yüzey işlemi yapmak yeni gelişen bir kavramdır. Lazerle yapılan yüzey işlemleri:

- a)Lazerle yüzey sertleştirme,
- b)Lazerle yüzey alaşımlandırma,
- c)Lazerle yüzeye giydirme yapmak,
- d)Lazerle kimyasal buhar biriktirme,
- e)Lazerle aşındırma,

bölümlerine ayrılabilir[21]. Lazerle yüzey sertleştirme içlerinden en çok bilinenidir. Diğer yüzey sertleştirme işlemlerinde olduğu gibi martenzite dönüşmüş ince bir tabaka yüzeyde meydana getirilir[8]. İşlemin en önemli sınırlaması sertleşebilen malzemelerin kullanımıdır.

Lazerle yüzey sertleştirmenin avantajları;

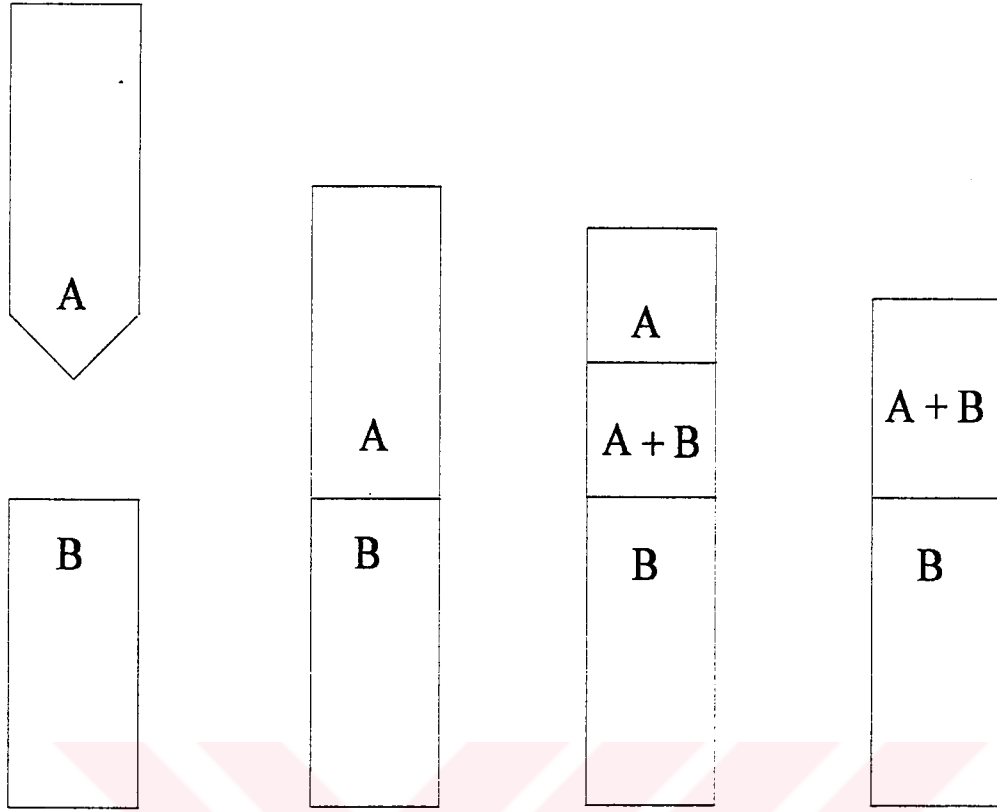
- a)Kolay ve doğru güç kaynağı kontrolü,
- b)Hızlı ısıtma ve kendi halinde sertleştirme nedeniyle düşük distorsiyon,
- c)Kontrollü derinlik ve istenilen bölgede sertleştirme,

dezavantajları ise;

- a)Yüksek maliyetli teçhizat,
- b)Sertleşme derinliğindeki sınırlamalar,

olarak sıralanabilir. Tipik uygulama derinliği; orta karbonlu çelikler için 1-1.5mm, yüksek alaşımlı çelikler için ise 2mm. civarındadır[8].

Lazerle yüzey alaşımlandırma, lazerle yüzey ergitilirken istenilen metalin ilavesiyle yüzey kimyasının değiştirilmesi esasına dayanır. Şekil 2.6'da lazerle yüzey alaşımlandırmanın, aşamaları şematik olarak gösterilmiştir[21].



Şekil 2.6: Lazerle yüzeyin alaşımlandırılmasının şematik olarak gösterimi[21].

Lazerle yüzeye giydirme; termal püskürtme yöntemiyle kaplama veya kaynak yardımıyla yüzey kaplama tekniklerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu işlemlerden farkı giydirilen malzemenin sıvılaşmamasıdır. Çelikler üzerine kobalt esaslı alaşımların kaplanmasında, krom-karbür, krom-nikel-molibden tozlarının karıştırılarak yüzeye giydirme işlemi yapıldığı bilinmektedir[21].

Sonuç olarak; pek çok yüzey işlemi aşınmaya karşı dirençli yüzeylerin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Kazımalı aşınmaya karşı dirençli yüzeylerin elde edilmesinde fosfatlama, termal püskürtme yöntemiyle kaplama, elektrolitik kaplama (sert krom kaplama) gibi yöntemler, ark-PVD yöntemiyle endüstriyel uygulamada yarışabilecek yöntemler olarak gözükmemektedir.

BÖLÜM 3. SÜRTÜNME VE TRİBOLOJİK SİSTEM

3.1. Tribolojik Sistem

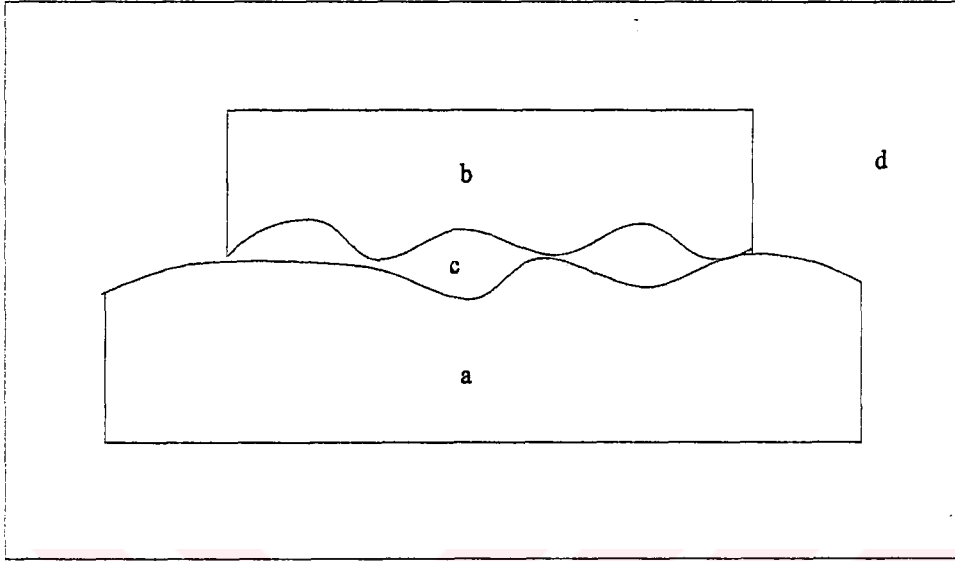
Bir katı madde yüzeyinden; göreceli olarak hareketli ve temas eden katı, sıvı veya gaz halindeki karşı madde tarafından mekanik etkiyle madde taşınımına aşınma denir[3,22-24]. Aşınma genel olarak; triboloji, sürtünme ve yağlama terimiyle birlikte kullanılmaktadır. Triboloji; bütün bu terimleri kapsayan bilim dalı olarak tanımlanmaktadır[3,22-25]. Aşınma olayının sistematik olarak incelenebilmesi için tribolojik sistemden söz etmek gerekir. Tribolojik sistemi oluşturan karakteristik bileşenler:

- a)Malzeme,
- b)Karşı Malzeme,
- c)Ara Yüzey/Ara Bölge/Ara Ortam,
- d)Çevre/Ortam

olarak tanımlanabilir[26]. Şekil 3.1.'de bir tribolojik sistem şematik olarak gösterilmiştir.

Malzeme ve karşı malzeme terimleri birbirlerine göre karşılıklı çalışmayı ifade etmektedir ve genel olarak karşı malzeme aşındırıcı olan malzemedir. Bir tribolojik sistemde ortam veya ara yüzeydeki ortam kavramı, genellikle sistemi çevreleyen atmosfer veya yağlayıcı için kullanılmaktadır. Tribolojinin en çok çalışılan ve endüstriyel uygulamasının en yaygın olan bölümü yağlama teknolojisidir. Bu konuda yapılan çalışmalar yaygın olarak sıvı yağlayıcılar üzerinedir.

Tribolojik sistemlerde aşınma çiftlerinin; malzeme ve karşı malzemenin, neler olacağı uygulamanın özelliklerine bağlı olarak değişmektedir[26]. Tablo 3.1.'de tribolojik sistemlere örnekler verilmiştir[26].



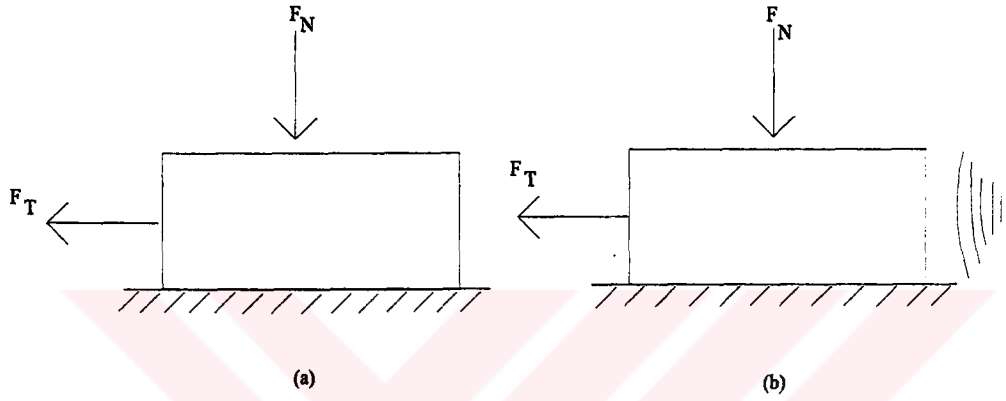
Şekil.3.1: Tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi. a)malzeme, b)karşı malzeme, c)ara yüzey, d)ortam[26].

Tablo 3.1: Tribolojik sistemlere örnekler[26].

	Malzeme	Karşı Malzeme	Ara Yüzey	Ortam
Elektrik Kontaktörleri	Fırça	Toplayıcı	-	İnert Gaz
Talaşlı İmalat	Takım	İş Parçası	Soğutma Yağı	Hava
Tel Çekme Kalıbı	Kalıp	Tel	Yağlayıcı	Hava

3.2. Sürtünme Kanunları

Sürtünme; birbiri üzerinde hareket eden malzemelerden birinin diğerine karşı gösterdiği dirençdir. İki malzeme arasında sürtünmeyi ifade eden terim sürtünme katsayısıdır[27]. Sürtünme katsayısı; sürtünmenin statik ve dinamik olmasına göre iki şekilde tanımlanmaktadır. Şekil 3.2.'de statik ve dinamik sürtünme şematik olarak gösterilmiştir[28].



Şekil 3.2: a)Statik ve b)dinamik sürtünmenin şematik olarak gösterilişi[28].

Sürtünme katsayısı sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranı olarak ifade edilmektedir[27]:

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (3.1)$$

Burada;

μ =Sürtünme katsayısı

F_T =Sürtünme kuvveti

F_N =Normal kuvvet

olarak belirtilmiştir[27].

3.3. Sürtünme Katsayısının Tarihsel Gelişimi ve Sürtünme Kavramının Modellenmesi

Sürtünme latince “fricare” kelimesinden gelmektedir ve kronolojik olarak bakıldığında sürtünmeyle ilgili çalışmalar ilk olarak Leonardo da Vinci tarafından yapılmıştır[22,29,30]: Bulunan kavramlar sürtünmenin temel kanunları olarak kabul edilebilir[22,30]:

- a) Statik sürtünme dinamik sürtünmeden büyüktür,
- b) Sürtünme kayma hızından bağımsızdır,
- c) Sürtünme kuvveti uygulanan normal kuvvetle doğru orantılıdır,
- d) Sürtünme kuvveti görünen temas alanından bağımsızdır.

Sürtünmeye ait kronolojik sıra Tablo 3.2.’ de gösterilmiştir[30]. Sürtünmeyle ilgili iki okul ortaya çıkmış ve sürtünmeyle ilgili gelişmeler bu iki okul tarafından gerçekleştirilmiştir: İngiliz ve Fransız okulları[22].

Fransız okulu 1699’da Amontons’un çalışmalarıyla ortaya çıkmıştır[22]. İsveç’li matematikçi ve teolog Euler, Amontons kanunlarını analitik anlamda formüle etmeye çalışmıştır. Sürtünme katsayısı olarak “ μ ” kavramını ilk kullanan Euler’dir. Aynı zamanda; Euler, statik ve dinamik sürtünme katsayısı kavramları arasındaki farkları da ortaya koymuştur. Fransız fizikçi ve mühendis Coulomb, Amontons’un kanunlarını deneysel olarak ispatlamıştır. İngiliz okulu, yine bir Fransız tarafından, Desaguliers’in çalışmalarıyla başlamıştır. Tribolojik çalışmalara önce kohezif, daha sonra da adhezyon olarak geçen olayın kavramlarını açıklamıştır. Tomlinson ve Hardy moleküler kuvvetler kavramını geliştirmişlerdir. Daha sonra Bowden ve Tabor çalışmalarını sürtünmenin ana nedeni olan adhezyon üzerinde yoğunlaştırmışlardır[22].

Tablo 3.2: Sürtünmeyle ilgili kronolojik sıra ve bulgular[30].

Bilimadamı	Tarih	Bulgu
Leonardo da Vinci	1495	Sürtünme kuvveti görünür alandan bağımsızdır. Sürtünme kuvveti uygulama kuvvetiyle doğru orantılıdır. Sürtünme katsayısı malzemeler için 0.25'dir.
Robert Hooke	1685	Yüksek elastik modüllü karşı malzemeler sürtünmeyi azaltır.
Isaac Newton	1687	Yağlı sistemlerdeki sürtünme yağlayıcının özelliğine bağlıdır.
Guillame Amontons	1699	Sürtünmenin alandan bağımsızlığı bir kez daha ispatlanmıştır. Farklı malzemelerin farklı sürtünme karakteristikleri vardır. Sürtünme yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanmaktadır.
J.T.Desagulies	1725	İlk sürtünmeyle ilgili veri tabanı oluşturuldu. Yüzeyler arasındaki adhezyonun etkisi anlaşıldı
Lonnard Euler	1750	μ sembolünün sürtünme katsayısı olarak kullanılması. Statik sürtünme katsayısı kavramının açıklanması
A.Coulomb	1785	Amontons kanunlarını deneysel olarak ispatlamıştır.
G.Rennie	1825	Metal-metal çiftlerinin sürtünme katsayısının 1/6 olduğu. Yumuşak metallerin sürtünme katsayısının daha yüksek olduğu. Yağlı metallerin sürtünme katsayısının yağlayıcıya bağlı olduğu tezleri ortaya atıldı.

3.3.1.Dinamik Sürtünme Katsayısının Modellenmesi

Dinamik sürtünme katsayısı kavramının incelenmesi ve modellenmesi de tarihsel bir yaklaşımla değerlendirilmelidir. Sürtünme katsayısıyla ilgili ilk çalışmalar kuru sürtünme ve mekanik teoriyle ilgilenen Leonardo Da Vinci'nin öncü çalışmalarıyla başlar. Da Vinci ilk defa malzeme ağırlığı ve sürtünme katsayısı arasındaki ilişkiyi 0.25 olarak belirlemiştir[31]. Bu olgu pratik olarak Amontons'a kadar yaklaşık 200 yıl devam eder. Amontons; basıncı sabit tutmak koşuluyla bu oranı 1/3 olarak bulmuştur. Daha sonra 1727'de Rusya'da Bulffingeri 0.3 değerini tesbit etmiştir[31].

Coulomb'un iki evrede; 1779-1781 ve 1781-1785 yılları arasında çalışmaları, daha sonra ona Paris Bilimler Akademisi ödülünü kazandırmış olup, bu konuda bir dönüm noktasıdır[31]. Bu çalışmalar sonucunda bu gün bildiğimiz ve kullandığımız "sürtünme katsayısı-normal kuvvet-sürtünme kuvveti" ilişkisi ortaya çıkmıştır. Günümüzde bu kanunların kimin tarafından ilk defa ortaya çıkarıldığı veya bilimsel olarak ifade edildiği hala tartışma konusudur. Bu kanunlar bazı araştırmacılara göre "Vinci-Amontons", bazılarına göre "Amontons-Coulomb"; kısaca "Amontons Kanunları" olarak da ifade edilmektedir[31]. Coulomb'dan bu yüzyılın başlarına kadar bu konuda yapılmış çalışmaların bütün hepsi her zaman ciddiye alınmamıştır. 1829'da Rennie ve 1914'de Deeley adlı araştırmacıların yaptığı çalışmalarda artan hız ve basınç altında sürtünme katsayısının kararlı kaldığından söz edilmiştir; her iki araştırmacının bulguları oturmamış görüşler olarak kabul edilmiştir[31].

Sürtünmeye ait teoriler ve dinamik sürtünme katsayısının modellenmesi çalışmaları 18yy'dan başlamış ve 20yy'a kadar devam etmiştir. Moleküler sürtünme kavramı ilk defa Desaguliers (1734) tarafından başlatılmış; Eving (1892), Hardy (1919,1936), Tomlinson (1929), Derjaguin (1934), Bowden-Tabor (1935-1940) ve Khai Kin(1939) takipçileri olmuştur[31]. Bu kavramı, Bowden ve Tabor'un kusursuz kaynaklanmış köprüler teorisi olarak da bilinen teori izlemiştir. Yapılan çalışmalar Archard tarafından da desteklenmiştir[31].

Sürtünme katsayısı,

$$\mu_k = \frac{F_T}{F_N} \quad (3.2.)$$

$$F_T = \tau_T A_r \quad (3.3.)$$

$$F_N = P_a A_r \quad (3.4.)$$

$$\mu_k = \frac{\tau_T}{P_a} \quad (3.5.)$$

olacak şekilde ifade edilmiştir[31,32]. Burada;

τ_T =Mikrokaynak noktalarının kayma gerilmesi

μ_k =Dinamik sürtünme katsayısı

P_a =Yumuşak olan malzemenin akma basıncı

A_r =Gerçek temas alanı

tanımlanmıştır.

Sürtünmeyi açıklamaya çalışan diğer bir teori de elastik ve plastik deformasyon teorilerinin birlikte kullanımıyla gerçekleşmiştir. Leslie'nin ardından (1804); Hirn (1884), Gümbel (1925), Tomlinson (1929), Holm (1938), Dreschner (1959) gibi araştırmacılar bu teoriden yararlanmışlardır[31]. Tomlinson'un orjinal ilişkisi; sürtünme katsayısını, deformasyona dik ve paralel yönlerdeki elastik modüllerin bir fonksiyonu olarak ifade eder.

Uygulamada zorluklarla karşılaşılmasına rağmen Drescher tarafından sürtünme katsayısı,

$$\mu_k = i\lambda \arcsin \left[\frac{\sqrt{2}}{4} \frac{2+\theta}{1+\theta} + \varphi \left(\nu; \frac{H}{E_e} \right) \right] \quad (3.6.)$$

olarak ifade etmiştir[31]. Burada;

i =Malzeme sabiti

λ =Elastik deformasyon için 0.1,
plastik deformasyon için 1 alınan bir katsayı

θ =Akış hatlarının açık açısı

ν =Kayma hızı

φ =Kayma hızı, sertlik ve elastisite modülünün fonksiyonu

H =Sertlik

E_e =Elastik modül

tanımlanmaktadır.

Moleküler ve mekanik teorisinin bir karışımı da Gümbel (1925) tarafından ortaya atılmıştır. Bu iki terimin ilişkisi Ernst ve Merchant (1940) tarafından ilk defa yazılmış; Bowden-Tabor bu ilişkiye yumuşak malzemenin uzaklaştırılması kavramını eklemişlerdir[31].

Holm (1938) spesifik sürtünme kuvvetinden söz etmiş ve bunu model içerisine yerleştirmiştir[31].

$$\mu_k = \frac{\varphi_s}{P_t} \quad (3.7.)$$

P_t =Temas halindeki yüzeyde kayma basıncı

$$\varphi_s = \frac{F_T}{A_s} \quad (3.8.)$$

A_s =Yüklenme alanı

φ_s =Spesifik sürtünme kuvveti

olarak göstermiştir[31]. Kraghelsk'e (1939) göre; sürtünme kuvveti adhezyon ve deformasyon parametrelerini de içermelidir[31].

$$\mu_{ad} = \frac{\tau_T}{\sigma} + \beta \quad (3.9.)$$

$$\mu_{def} = K_\alpha \left(\frac{h}{r_{rad}} \right)^{1/2} \quad (3.10.)$$

$$\beta = \left(\frac{\tau_{ad} - \tau_T}{\sigma} \right) \quad (3.11.)$$

$$\tau_{ad} = \frac{F_{ad}}{A_r} \quad (3.12.)$$

F_{ad} =Deformasyona dik yöndeki kuvvet

μ_{ad} =Adhezyonla ilişkili dinamik sürtünme katsayısı

μ_{def} =Deformasyonla ilişkili dinamik sürtünme katsayısı

σ =Normal gerilme

h =Nüfuz derinliği

r_{rad} =Yüzeydeki çıkıntılarının eğrilik yarıçapı

K_a =Plastik deformasyon için 0.55 olan sabit, elastik deformasyon için daha düşük kabul edilebilir.

olarak ifade edilmiştir. Son yıllarda; Suh, Sin (1981) ve Saka (1984) tarafından yapılan çalışmalarda, sürtünme katsayısının adhezyon, deformasyon, sürerek aşındırma, yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerin bir fonksiyonu olduğu bulunmuştur[31]. Sürtünme teorilerinin içerisinde barındığı en önemli terimlerden biri de sürtünme enerjisidir. Sürtünme sırasında önemli miktarda enerji üretilmektedir. Bu konuda ilk çalışmalar 1704'de Coulomb ve 1748'de Euler tarafından yapılmıştır. 1954'den 1984' e kadar sürtünme enerjisiyle ilgili teoriler triboloji çerçevesinde incelenmiştir. İlk defa 1954'de Davis ve Kuznetsov tarafından belirtilen bu teorik yaklaşım; bir çok araştırmacının ilgi odağı olmuştur. Rabinowicz 1956'da sürtünme katsayısını[31,32],

$$\mu_k = 0.3 + \frac{C_1 W_{ab}}{h} \quad (3.13.)$$

C_1 =Sabit

$$W_{ab} = \frac{\gamma_a + \gamma_b}{C_2} \quad (3.14.)$$

C_2 =Sabit

γ_a =Yüzey enerjisi

γ_b =Yüzey enerjisi

olarak ifade etmiştir.

BÖLÜM 4. AŞINMA TANIMI VE TÜRLERİ

Aşınma, üretim süreci sırasında kırılma hasarı kadar önemli bir hasar olmamasına karşı malzeme ve enerji kaybı nedeniyle ekonomik olarak pahalı bir hasar mekanizmasıdır[33].

Aşınma çok değişik şekillerde sınıflandırılmıştır. Araştırmacılar genellikle mekanizmaları, oluşum şiddetleri ve sıklıklarına, dolayısıyla önem derecelerini göz önüne alarak sınıflandırmışlardır. Eyre ve Rabinowicz farklı zamanlarda, aşınma mekanizmalarının önemini incelemişlerdir[2,32]. Tablo 4.1.'de aşınma mekanizmalarının göreceli olarak önem dereceleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Aşınma mekanizmalarının göreceli önem dereceleri[2,32].

Aşınma Mekanizmaları	Eyre (1976)	Rabinowicz (1983)
Abrazif Aşınma (Erozyonlu Aşınma dahil)	%58	%36
Adhezif Aşınma (Kazımalı Aşınma dahil)	%23	%45
Korozyonlu Aşınma	%5	%4
Yorulmalı Aşınma	%14	%15

Tablo 4.1.'de görüldüğü gibi 1976 yılı ile 1983 yılı arasındaki farklılık, abrazif ve adhezif aşınma mekanizmalarının önem derecelerinin değişmesidir. Tablo 4.1'deki verilere göre, yıllar geçtikçe adhezif aşınmanın önem derecesinin arttığı görülebilir. Ancak; abrazif aşınmanın daha hızlı gelişmesi ve ortaya çıkışının daha kolay farkedilebilir olması, abrazif aşınmayla ilgili önlemlerin başarıya ulaşması sonucunda en az abrazif aşınma kadar etkili olan adhezif aşınma üzerine yapılan çalışma ve

gözlemlerin artmaya başlaması, Eyre ve Rabinowicz'in bu değerlendirmeleri farklı kriterlere göre yapmaları gibi nedenlerden dolayı adhezif aşınmanın öneminin arttığı düşünülebilir.

Eyre ve Rabinowicz aşınma mekanizmalarını dört ana başlık altında toplamıştır[2,32]:

- 1)Adhezif aşınma,
- 2)Abrazif aşınma,
- 3)Korozyonlu aşınma,
- 4)Yorulmalı aşınma.

Özellikle Rabinowicz diğer aşınma türlerini “marjinal” olarak kabul etmiştir[32]. Wulpi aşınmayı Aşınma I ve Aşınma II olarak;

Aşınma I

Abrazif aşınma

- Erozyonlu aşınma
- Zımparalayarak aşınma
- Oyuk aşınması

Adhezif aşınma

- Kazımalı aşınma

Aşınma II

Yorulma aşınması

- Yüzeyaltı yorulma aşınması
- Yüzeyden gelişen yorulmalı aşınma
- Kavitasyonlu yorulma aşınması

olacak şekilde sınıflandırmıştır[33].

Bhushan aşınmayı birbirinden bağımsız olduğunu düşündüğü altı değişik mekanizmaya ayırmıştır[34]:

- 1)Adhezif aşınma, sürterek aşınma, sürüyerek aşınma;
- 2)Abrazif aşınma, kesme;
- 3)Yorulmalı aşınma;
- 4)Korozyonlu aşınma,
- 5)Erozyonlu aşınma, katı partiküllü, akışkan ortamı ve kavitasyonlu;
- 6)Elektrik arkıyla meydana gelen aşınma.

Bunların dışında kalan kazımalı aşınma adhezif, abrazif ve korozyonlu aşınmanın; darbeli aşınma erozyonlu ve yorulmalı aşınmanın bir bileşimi olarak düşünülmektedir[34]. Ayrıca Bhushan aşınmayı tek fazlı ve çok fazlı olmak üzere iki gruba ayırmaktadır. Tek fazlı aşınmada; aşınma göreceli hareket halindeki katı, sıvı veya gaz yüzeyden malzemenin uzaklaştırılmasına neden olur. Çok fazlı aşınmada ise; aşınmada yine katı, sıvı veya gaz hareketi mevcuttur; ancak burada katı, sıvı veya gaz ikincil fazı (aşınmış partiküller, çıkıntılar, sıvı damlaları, gaz kabarcıkları vb.) taşıyacak şekilde davranır ve aşınma meydana gelir[34].

Tablo 4.2: Tek fazlı ve çok fazlı aşınmalara örnekler[34].

Temas	Partikül	Hareket	Genel Adlandırma
Katı	-	Kayma	Kazımalı Aşınma
Gaz/Sıvı	-	Akışkan	Erozyonlu Aşınma
Sıvı	Gaz/buhar	Partikül Darbesi	Kavitasyon Aşınması
Sıvı	Katı	Yüzeyde Kayma	Abrazif

Görüldüğü gibi aşınma farklı yazarlara göre değişik metodlar oluşturularak çok değişik şekilde sınıflandırılmıştır. Bu yazarlar arasındaki ortak özellik, benzer mekanizmalarla gelişen aşınma olaylarını bir araya toplamak ve diğerlerinden farklarını ortaya koyarak sınıflandırma yapmak olmuştur.

Bu çalışmada aşınma aşağıdaki görüldüğü şekilde sınıflandırılmışdır[22]:

a)Partiküller veya akışkanla meydana gelen aşınma

Abrazif aşınma,
Katı partiküllü erozyon,
Kavitasyon erozyonu,
Parlatarak aşındırma,
Akışkan darbesiyle aşınma,
Bulamaç halindeki akışkanın aşındırması

b)Yuvarlanma, darbe ve kayma hareketiyle meydana gelen aşınma

Adhezif aşınma,
Kazımalı aşınma,
Yuvarlanan yüzeylerin aşınması,
Darbeli aşınma

c)Kimyasal reaksiyonlarla ilişkili aşınma

Korozyonlu aşınma,
Oksidasyon aşınması.

Bunların dışında kalan yorulmalı aşınma bu sınıflandırmaya dahil edilmelidir. Aşınma mekanizmalarından yukarıdaki sınıflandırmanın metodlar uygun olarak örnek mekanizmalar seçilmiş ve devam eden bölümlerde bu mekanizmalar hakkında bilgi verilmiştir.

4.1. Abrazif Aşınma

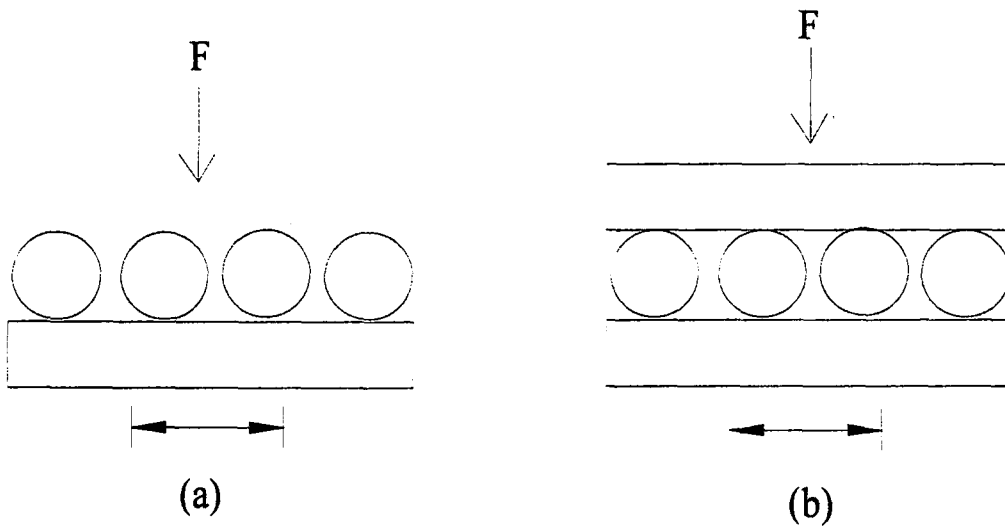
Abrazif aşınmayı tek bir anahtar kelimeyle karakterize etmek gerekirse; buna kesme denebilir. Abrazif aşınma, bir akışkan içerisinde süspansiyon halinde dağılmış sert partiküllerin yük altında hareket etmeleri sonucunda yüzeyde meydana getirdikleri hasara denir[33].

Abrazif aşınmayla talaşlı imalat yöntemleri arasındaki temel farklılık; abrazif aşınmanın tamamen istem dışı olmasıdır[33]. Abrazif aşınma bazı durumlarda şiddet derecesine göre;

- a)Çizilme,
- b)Çentik oluşturarak aşındırma,
- c)Oyuk şeklinde aşındırma

olarak adlandırılabilir[34].

Abrazif aşınma geometrik olarak ikiye ayrılmaktadır. Sürtündükleri malzemeye göre daha sert olan partiküllerin yüzeyi çizmesi iki elemanlı abrazif aşınma; iki malzeme yüzeyi arasında serbest olarak hareket eden partiküllerin meydana getirdiği hasara üç elemanlı abrazif aşınma adı verilmektedir[2,27]. Şekil 4.1.'de iki ve üç elemanlı abrazif aşınma şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1: a)İki elemanlı b)üç elemanlı abrazif aşınmanın şematik gösterilişi[2,27].

Abrazif aşınmanın temel mekanizmalarıyla ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. Bunların arasında abrazif aşınma olgusunu temel olarak açıklayan Krushchov ve Babichev'in çalışmaları olmuştur. Abrazif taneler aşınma yüzeyi ile temas halindeyken iki olayın meydana geldiği söylenmiştir[35]:

- 1)Malzemenin yüzeyinden ayrılma olmadan plastik deformasyon sonucunda aşınma izleri oluşabilir,
- 2)Mikroçapaklar oluşarak metal partikülleri ayrılır.

Abrazif aşınma davranışıyla ilgili pek çok model meydana getirilmiştir. Kruschov; göreceli abrazif aşınma direncini

$$R = \frac{W_s}{W_M} \quad (4.1.)$$

R=Aşınma direnci

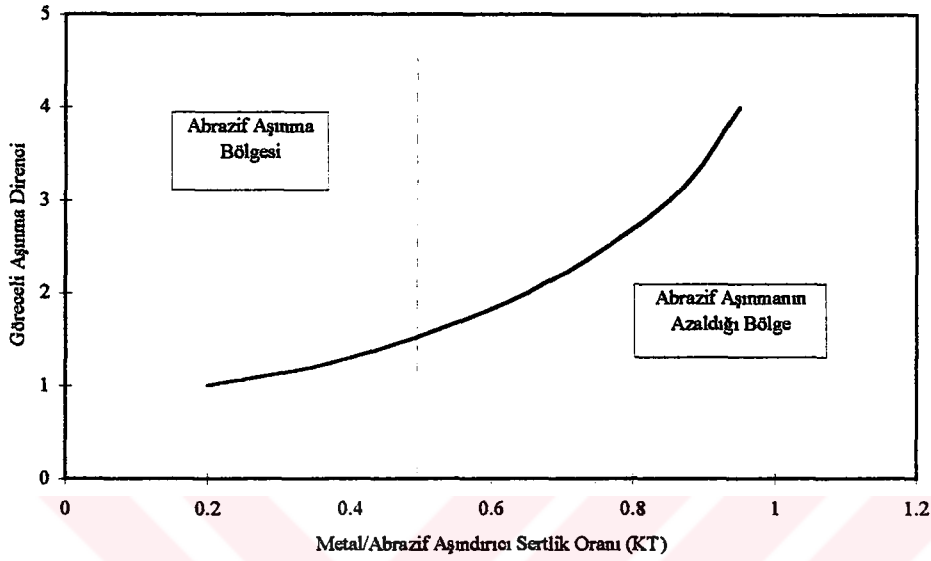
W_s =Standart malzemede meydana gelen aşınma miktarı

W_M =Deneyde kullanılan malzemede meydana gelen aşınma miktarı

olarak tanımlamıştır[2]. Abrazif aşınmayla ilgili çalışmalarda alaşım geliştirme önemli bir adım olmuştur. Bu nedenle; malzemelerin kimyasal bileşim ve mikroyapılarını değiştirerek abrazif aşınma direnci arttırılmaya çalışılmıştır.

Serpik ve Popov'un çalışmaları çeliklerde karbon içeriği ve dağılımıyla aşınma davranışı üzerine olmuştur[2]. Mikroyapı ve kimyasal bileşim değiştirilerek en temel mekanik özelliklerden, sertliğin değişimi sağlanmıştır. Ancak abrazif aşınma miktarıyla sertlik arasındaki ilişkinin çok basit olmadığı bilinmektedir.

Richardson'un çelikler üzerindeki çalışmaları sonucunda kritik değer (K_T) terimi ortaya konmuştur[2]. Şekil 4.2.'de kritik değer (K_T) ile göreceli aşınma direnci ilişkisi görülmektedir.



Şekil 4.2: Çeliklerde abrasif aşınmanın sertlikle ilişkisi[2].

Kritik değer;

$$K_T = \frac{H_{v1}}{H_{v2}} \quad (4.2.)$$

K_T =Kritik değer

H_{v1} =Aşınan malzemedeki yüzey sertliği

H_{v2} =Aşındırıcının sertliği

olarak ifade edilmiştir[2]. Abrasif aşınmanın, kritik değer (K_T) 0.5'den büyük olduğu durumlarda azaldığı ifade edilmektedir[2].

R.Hooke'un 1685'de ortaya koyduğu, yüksek elastisite modüllü malzemeler sürtünmeyi azaltır[30], prensibine uygun olarak elastisite modülü de abrazif aşınmanın modellenmesinde kullanılmıştır.

Kruschov elastik modülü aşınma hacminin hesaplanmasında kullanmıştır[22].

$$W_{ab} = \frac{k}{E_e^{1.3}} \quad (4.3.)$$

W_{ab} =Abrazif aşınma hacmi

E_e =elastik modül

k =Sabit

olarak ifade edilmiştir[22].

Abrazif aşınmada yaygın olarak bilinen model Rabinowicz tarafından 1965'de geliştirilmiştir[32,34].

Verilen birim kayma mesafesi için abrazif aşınma hacmi (W_{ab}),

$$W_{ab} = K \frac{F_N d_k}{\pi H} \tan \theta_x \quad (4.4.)$$

W_{ab} =Abrazif aşınma hacmi

θ_x =Partikülün yüzey açısı

K =Sabit

d_k =Kayma mesafesi

olarak tanımlanmıştır[34].

Bunlardan başka klasik Archard eşitliği kullanılarak daha karmaşık ilişkiler de ortaya çıkarılmıştır. Zum-Gahr abrazif aşınma katsayısını (f_{ab}) ortaya atmıştır[22]. Bu modelde mikro ölçekde kesme, sürerek aşındırma ve çatlaklar gözönüne alınmıştır[34]. Aşınma hacmi;

$$W_{ab} = f_{ab} A_v d \quad (4.5.)$$

f_{ab} =Aşınma katsayısı; mükemmel kesme için 1, hiç aşınma olmaması durumunda 0

A_v =Aşınma izinin kesit alanı

olarak tanımlanmıştır[22].

Abrazif aşınma,

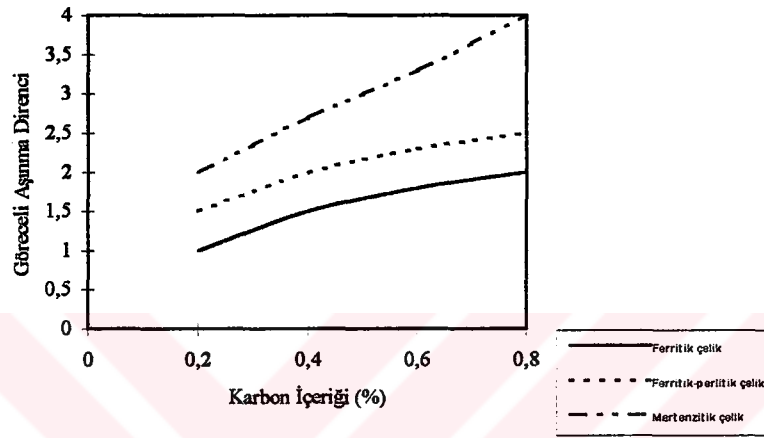
- 1)Yüzey sertliğinin artırılması,
- 2)Yabancı partiküllerin uzaklaştırılması
- 3)Aşınan parçanın değiştirilmesi

gibi çözümler alınarak önlenabilmektedir[33]. İlk iki önlemleri gerçekleştirebilmede malzeme seçimi önemli bir rol oynar. Abrazif aşınmaya karşı dirençli malzeme seçiminde en önemli kriter malzemenin sertliği olmuştur. Yüksek sertlikleri nedeniyle seramik malzemelerin kullanımı geniş yer tutmaktadır. Alümina, zirkonyum oksit, silisyum oksit ve silisyum nitrür gibi seramik malzemeler bu amaçla kullanılmaktadır[22].

Alaşımlı beyaz dökme demir en yaygın kullanımı olan demir esaslı malzemedir. Katılaşma sırasında karbür oluşumu abrazif aşınma direncini arttırmaktadır. Çeliklere göre daha düşük darbe mukavemetleri, talaşlı işleme özelliklerinin ve kaynak kabiliyetlerinin düşük olması bu malzemelerin kullanımında sınırlayıcı faktörlerdir[22].

Perlitik beyaz dökme demir modifikasyonları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin ısıl işlemle darbe dirençleri arttırılabilmektedir[22].

Çelik malzemelerde abrazif aşınma direnci, sertlik ve karbür içeriğinin bir fonksiyonudur. Şekil 4.4.'de karbon içeriğine göre aşınma direncinin değişimi görülmektedir[2].



Şekil 4.4: Çeliklerde karbon içeriğine göre göreceli aşınma direncinin değişimi[2].

Isıl-işlemlle sertleştirilmiş yüksek hız takım çeliği, yüksek kromlu çelikler ve havada sertleşebilen çelik malzemeler ve ostenitik yapılu Hadfield çelikleri abrazif aşınmaya karşı kullanılabilir[22].

Polimer malzemelerde, sertlik-elastik modül oranı azaldıça aşınma direncide azalmaktadır[22]. Azalan abrazif aşınma dirençlerine göre genel olarak polimer malzemeler; polietilen (PE), politetrafloroetilen (PTFE), polipropilen (PP), polioksimetilen (POM), polivinilklorür (PVC), floroetilen-propilen (FEP), polimetil metaakrilat (PMMA), polifenilen oksit (PPO), poliklorotrifloroetilen (PCTFE), polikarbonat (PC), poliamid 6 (PA-naylon 6) ve poliamid 66 (PA66-naylon 66) şeklinde sıralanabilir[36].

4.2. Adhezif Aşınma

Abrazif aşınma gibi adhezif aşınma da tek bir kelimeyle kaynaklanma veya mikrokaynaklanma kelimesiyle tanımlanabilir[33]. Adhezif aşınma;

- a)Çentik açarak aşındırma,
- b)Sürüyerek aşındırma,
- c)Sürterek aşındırma,
- d)Yakalayarak aşındırma

olarak da adlandırılabilir[33,34]. Adhezif aşınmada; birbiri üzerinde hareket eden iki yüzeyde temas eden çıkıntılardaki basınç plastik deformasyona neden olacak kadar yükselir ve adhezyon, mikrokaynaklanma gerçekleşir[2]. Bu adhezyonla birleşmiş noktalar koparak adhezif aşınma meydana gelir. Mikro ölçekde bakıldığında adhezif aşınmada;

- a)İki yüzey arasındaki çıkıntıların sürtünme ısısından dolayı mikrokaynaklanma,
- b)Sürtünmenin ilerlemesiyle mikrokaynak noktalarında kopma veya kırılmalar meydana gelmekte,
- c)Kopan/kırılan malzemenin uzaklaşması

durumları söz konusudur[33].

Rabinowicz adhezif aşınmayla ilgili teorileri aşağıdaki şekilde özetlemektedir[32]:

- a) IBM yorulma teorisi

IBM tarafından geliştirilmiştir. Her kayma çevriminde; temas halindeki yüzeylerde birleşme noktaları gerilme değişiminden dolayı yorulmaya başlar ve bu durum yorulma çatlaklarının oluşmasını sağlar (Bayer 1972, Halling 1975).

b) İstatistik aşınma teorisi

Ara yüzeylerdeki birleşme ve çıkıntılar için ortalama gerilme ve bir gerilme aralığı vardır. Mukavemet birinci malzemede (transferin olduğu malzeme) yüksek, ikinci malzemede (transferi yapan) düşük olduğunda malzeme transferi gerçekleşir (Rabinowicz 1981).

c) Tabaka halinde kalkarak aşınmanın meydana gelmesi

Birleşme yüzeylerinin altında uzun bir çatlak meydana geldiğinde adhezif aşınma meydana gelir ve hasar büyür. Bu çatlak genel olarak yüzeye paraleldir (Suh 1986).

d) Komvopoulos, Saka ve Suh (1985) yaklaşımı

Transferin meydana geldiği malzeme diğer malzemeye göre tam olarak yatay değildir. Bu nedenle adhezif aşınma meydana gelir.

Bhushan ve Gupta adhezif aşınmayla ilgili gözlemleri aşağıdaki şekilde özetlemişlerdir[34]:

- a) Ara yüzeydeki metalik adhezyon bağı temas halindeki malzemelerin elektronik yapılarına bağlıdır. Elektron alış-verişi kolaylıkla meydana geliyorsa kuvvetli adhezyon oluşmaktadır (Buckley 1972, Czichos 1972, Ohmae ve arkadaşları 1980).
- b) Adhezif aşınmada birbiriyle temas halindeki iki malzemenin katı eriyik ve arakimyasal bileşik oluşturma eğilimleriyle doğrudan ilgilidir (Rabinowicz 1980,1984).
- c) Kristal yapısı adhezif aşınmayla ilişkilidir. Hegzagonal kristal yapılı malzemeler; hacim ve yüzey merkezli kübik yapılı malzemelere göre daha düşük adhezif aşınma karakteristiğine sahiptirler. Bu farklılığın kayma sistem sayılarının ve temas halindeki çıkıntılarla meydana gelen deformasyon türlerinin farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir (Buckley 1981).

- d) Kristal yönlenmesi adhezif aşınmayı etkilemektedir. Genel olarak; düşük adhezif aşınma yüksek atom yoğunluğu, düşük yüzey enerjili düzlemlerde gözlenmiştir (Buckley 1981).
- e) Farklı metal temaslarında; adhezif aşınma genel olarak partiküllerin hareketi iki malzemeden kohezif kuvvetin daha zayıf olduğu yerlerden kohezif kuvvetin daha kuvvetli olduğu yerlere doğru olacaktır (Buckley 1981).

Sayısal olarak adhezif aşınma klasik Archard eşitliğiyle ifade edilir[34].

$$W_{ad} = K \frac{F_N d}{H} \quad (4.6.)$$

W_{ad} =Adhezif aşınma hacmi

K =Sabit

Bu eşitliğin dışında Rhee tarafından polimer esaslı malzemeler için

$$W_{ad} = \alpha F_N^a v^b t_c^c \quad (4.7.)$$

α =Oran sabiti

v =Kayma hızı

t_c =Kayma zamanı

a, b, c =Sabitler

modeli geliştirilmiştir[36].

Adhezif aşınmayı engellemek amacıyla alınması gereken önlemler aşağıda özetlenmiştir[33]:

- a)Adhezif aşınma yerel olarak yüksek sıcaklıklarda meydana geldiği için tribosistemin aşırı ısınmasını engellemek.
- b)Temas halindeki malzemelerin birbirlerine karşı ilgilerinin düşük olmalıdır.

Rabinowicz saf elementlerin birbirlerine karşı ilgilerini de dikkate alarak adhezif aşınmayla ilgili bir tablo oluşturmuştur[2]. Benzer bir çalışma Schumacher tarafından paslanmaz çelikler için yapılmıştır[37]. Tablo 4.3’de çeşitli malzeme çiftleri için 1000 çevrimde meydana gelen adhezif aşınma miktarları gösterilmiştir[37].

- c)Adhezif aşınma bir mikrokaynaklanma prosesi olduğu için eğer her iki malzemeninde kaynaklanma özellikleri zayıfsa bu malzemelerde adhezif aşınma gözükmebilir. Özellikle metalik malzemelerde kaplama yapılarak bu olay önlenir.

Tablo 4.3: Çeşitli malzeme çiftleri için 1000 çevrimde meydana gelen aşınma kayıpları [37].

Alaşım	AISI 304	AISI 316	17-4 PH	Bronz	Stellite 6B
AISI 304	12.8mg	10.5mg	24.7mg	2.1mg	3.1mg
17-4 PH	24.7mg	18.5mg	52.8mg	2.0mg	3.8mg
Nitronic 32	8.4mg	9.4mg	17.2mg	2.3mg	2.0mg
Nitronic 60	6.0mg	4.3mg	5.4mg	2.2mg	1.9mg

- d)Parlak ve düz yüzeyli malzemelerin kullanılması adhezif aşınmayı engeller. Eğer her iki malzemedede çok düzgün yüzeyli ve iyi bir yağlama sağlanıyorsa bu malzemelerin birbiriyle teması engellenebilir.

- e) Birbiriyle temas halindeki yüzeyleri kimyasal olarak kirli tutmak adhezif aşınmayı engeller. Kimyasal filmler adhezif aşınmaya neden olan metal-metal temaslarını ortadan kaldırır.

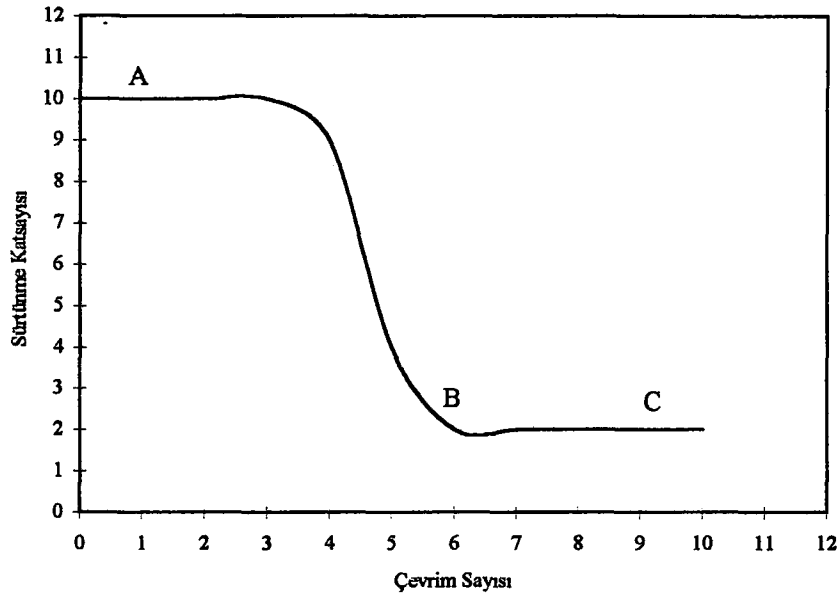
4.4. Korozyonlu Aşınma

Korozyonlu aşınma; birbiriyle temas halindeki yüzeylerin kayma sırasında çevrelerindeki ortamla kimyasal olarak reaksiyona girmeleriyle aşınmaları olayıdır[22,34]. Korozyonlu aşınmada ortamla temas halindeki yüzeyler arasında dinamik bir ilişki mevcuttur. Bu ilişki adımlara ayrılmış çevrimsel bir prosesdir[32]:

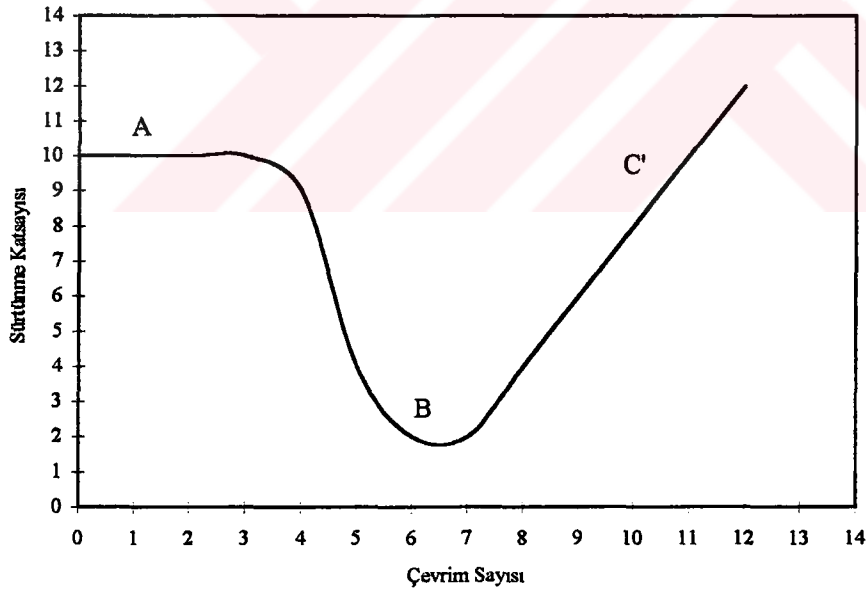
- i) İlk adımda; temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girerler. Reaksiyon ürünleri yüzeylerde meydana gelir.
- ii) İkinci adımda; temas alanında reaksiyon ürünleri çatlak oluşumu veya abrazyon etkiye neden olur.

Şekil 4.5.'de düşük miktarda korozyon etki yaratan ortamda aşınmanın gelişimi görülmektedir[32].

Düşük konsantrasyonlu korozyon yapıcı maddeler içeren ortamlarda; etkili yağlama olmadığı için yüzeylerdeki aşınma fazla olacaktır (A bölgesi). Korozyonun etkisinin artmasıyla; meydana gelen korozyon ürünleri katı yağlayıcı etkisi yaratarak aşınma hızını azaltır (B bölgesi). Daha sonra aşınma miktarı kararlı olarak sabit kalır (C bölgesi)[32]. Yüksek konsantrasyonlu korozyon madde içeren ortamlardaki aşınma davranışı Şekil 4.6.'da görülmektedir[32]. Yüksek konsantrasyonda korozyon madde içeren malzemelerin aşınma davranışında da düşük konsantrasyonlu korozyon madde içeren malzemelerinkine benzer bir başlangıç (A ve B bölgeleri) gerçekleşmektedir. Ancak aşınmanın azaldığı bölgede, korozyon maddenin yüksek konsantrasyonu nedeniyle korozyon hızı artmakta ve geçiş çok hızlı olarak meydana gelip, aşınma miktarı artmaktadır (C' bölgesi)[32].

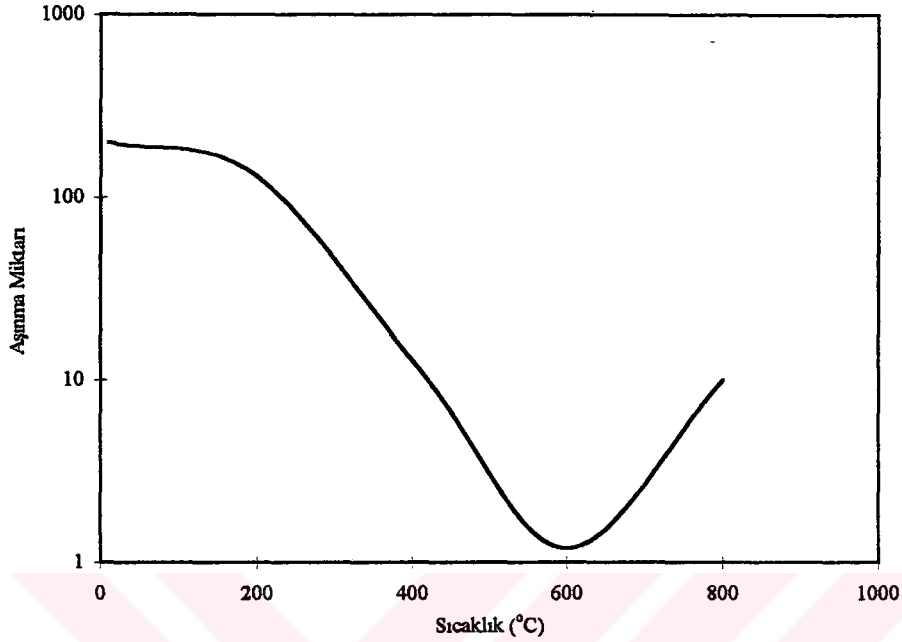


Şekil 4.5: Düşük konsantrasyonlu korozyonlu madde içeren ortamlarda korozyonlu aşınma gelişimi[32].



Şekil 4.6: Yüksek konsantrasyonlu korozyonlu madde içeren malzemelerde korozyonlu aşınmanın gelişimi[32].

Korozyonlu aşınmada, konsantrasyonun yanında sıcaklık da korozyon hızını etkilediğinden; tribosistemin aşınma davranışı sıcaklıktan etkilenmektedir. Şekil 4.7.'de tribosisteme sıcaklığın etkisi görülmektedir[32].



Şekil 4.7: Korozyonlu aşınmanın sıcaklıkla değişimi[32].

Korozyonlu aşınmada aşınma hızı Quinn tarafından ifade edilmiştir[34].

$$W_{kor} = \frac{d_x A_c e^{-\frac{Q}{R_g T}}}{3 t_{ik}^2 \rho^2 v H} F_N \quad (4.8.)$$

W_{kor} =Korozyonlu aşınma hacmi

A_c =Arrhenius sabiti

Q =Aktivasyon enerjisi

R_g =Gaz sabiti

T =Temas bölgesindeki sıcaklık

t_{ik} =Reaksiyon tabakası kalınlığı

d_x =Temas alanındaki çıkıntı boyutu

v =Kayma hızı

ρ =Oksit tabakasının yoğunluğu

Korozyonlu aşınmayı önlemek amacıyla;

a)Malzeme seçimine dikkat edilmelidir. Bu konudaki yaklaşımlar ömür ve ekonomik şartların bileşkesi şeklindedir. İlk yakalaşım; malzemenin kullanımı sırasında verilen süre içersinde değıştirilen parça sayısıyla malzeme kaybı ölçölür[22]. Bu konuda uygulamada 1000 parça için geçen süre (rpt-repair part per thousand veya MIS-mounths in service) terimi performansı belirlemede kullanılmaktadır.

b)Diğer bir yaklaşımda alan deneyleriyle laboratuvar deneyleri arasında bir ilişki kurmaya çalışmaktır. Isaacson ve arkadaşları endüstriyel maden öğütme ortamında korozyon hızını polarizasyon yöntemleriyle belirlemeye çalışmışlardır. Madsen ise laboratuvar sistemini taşınabilir hale getirerek gerçek alan içerisinde deneyler yapmıştır. A.B.D. Maden Bürosu bir çamur aşındırma testinde polarizasyon ölçümleri yapmış ve gerçek ortama yaklaştırmaya çalışmıştır[22].

c)Yüksek sertliğe ve korozyon direncine sahip kaplama malzemeleriyle yüzeyi kaplamak.

d)Ortamın havayla temasının kesmek ve pH sınırını düşürmek.

e)Kromat ve nitratlar gibi inhibitörlerin kullanmak.

f)Katodik koruma uygulamak.

gibi yöntemler kullanılabilir[22].

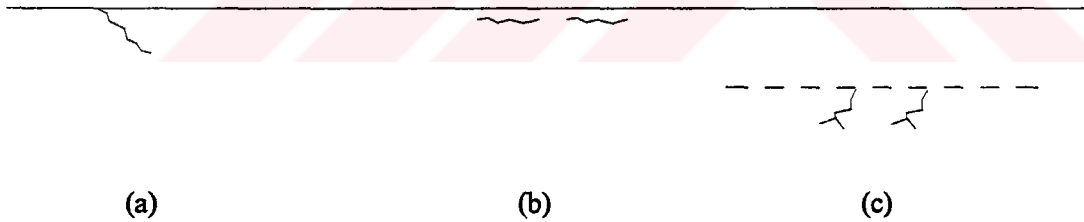
4.5. Yorulmalı Aşınma

Pratikde bütün makine parçaları değişken gerilmeler altında bulunabilir. Yorulmalı aşınma tekrarlanan yükler altında çevrimsel kayma sonucunda meydana gelen hasar olarak ifade edilebilir[34].

Wulpi yorulmalı aşınmayı oyuklanma aşınması veya temas alanındaki yorulmadan kaynaklanan aşınma olarak tanımlamıştır[33]. Oluşum şekillerine göre yorulmalı aşınma dört gruba ayrılmaktadır[32-34]:

- a)Yüzey altından kaynaklanan yorulma
- b)Yüzeyde oluşan yorulma
- c)Çekirdekden kaynaklanan yorulma
- d)Kavitasyonlu yorulma

Şekil 4.8.'de yorulmalı aşınmanın yüzeyden, yüzey altından ve çekirdekden kaynaklanan çatlak oluşumları şematik olarak gösterilmiştir[32-34].



Şekil 4.8: (a)Yüzeyde oluşan, (b)yüzey altından kaynaklanan ve (c)çekirdekten kaynaklanan yorulmalarda meydana gelen çatlak oluşumu şematik olarak görülmektedir[32-34].

Yüzey altında meydana gelen yorulma tamamen yuvarlanma koşulları altında temas halindeki malzemelerin yüzeylerinde göreceli olarak küçük oyukların oluşumuyla başlamaktadır. Yüzey yorulması ise kayma ve yuvarlanma koşullarının birlikte olduğu durumlarda malzeme yüzeylerinde oyuk oluşumuyla başlamaktadır. Çekirdekten kaynaklanan yorulma genellikle yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış olan çeliklerde

gözlenmiştir. Kavitasyonlu yorulmalı aşınmada akışkan etkisiyle yüzeyde yorulma çatlakları başlayarak aşınma meydana gelmektedir.[33].

Yorulma aşınması analitik olarak;

$$W_{yo} = K \frac{\eta\gamma}{\epsilon_i H} F_N \quad (4.9.)$$

W_{yo} =Yorulmalı aşınma hacmi

η =Çıkıntılarının dağılımı

γ =Partikül boyutu

ϵ =Bir yüklemede kırılıncaya kadar meydana gelen birim şekil değişimi

K =Sabit

bağıntısıyla ifade edilmiştir[34].

Bhushan ve Gupta'nın kazımalı aşınma için yapmış olduğu tanımlamaya ek olarak bu tanımın içerisine yorulmalı aşınmanın da eklenmesi gerekmektedir. Pek çok endüstriyel uygulamada kazımalı aşınmanın meydana geldiği durumlarda (dizel motrolarda valfler, otomotivde kullanılan yaprak yaylar-makaslar, silindirik rulmanlı yataklar); temas eden iki malzeme arasında kazımalı aşınmayı meydana getiren hareket yalnız abrazif, adhezif ve korozyonlu aşınmanın bir karışımını değil aynı zamanda yorulma aşınması sonrasında ortaya çıkan yüzeyden, yüzey altından ve çekirdekden kaynaklanan çatlak oluşumlarına benzer hasar mekanizmalarını da ortaya çıkarmaktadır.

BÖLÜM 5. KAZIMALI AŞINMA

Kazımalı aşınma, birbiriyle temas halindeki malzemeler arasında belirli bir frekansa göreceli yer değiştirme sonucunda meydana gelen olaydır[22,38-49]. İlk defa 1911'de Eden, Rose ve Cunningham tarafından tesbit edilmiştir[22,38]. Kazımalı aşınma ve korozyon terimleri 1927'ye kadar Tomlinson dışında kimse tarafından kullanılmamıştır. 1941'de Warlow-Davis kazımalı korozyon ve yorulma mukavemeti, 1953'de McDowell, Tierney ve McClellan farklı malzemelerin kazımalı korozyon eğilimleri ve 1958'de Fenner ve Field kazımalı aşınmada çatlak gelişimiyle ilgili çalışmalar yapmışlardır[22,38]. Kazımalı aşınma/korozyon ve yorulma terimleri Tomlinson'dan sonra birlikte veya karışık kullanılmışlardır. Bunun başlıca nedenleri;

- a)Kazımalı aşınma sırasında Eden, Rose ve Cunningham'ın oksit partikülleri gözlemesi[22],
- b)1967-68'de Jacobson'un araba endüstrisinde korozyon problemlerinden bahsederken kazımalı aşınmayı[38]

kullanmasıdır. Kazımalı aşınma, korozyon ve yorulma terimleri ilk defa 1970'li yılların başında; Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü'nün (OECD) bir toplantısında ve hemen sonrasında da Waterhouse tarafından tanımlanmışlardır[38].

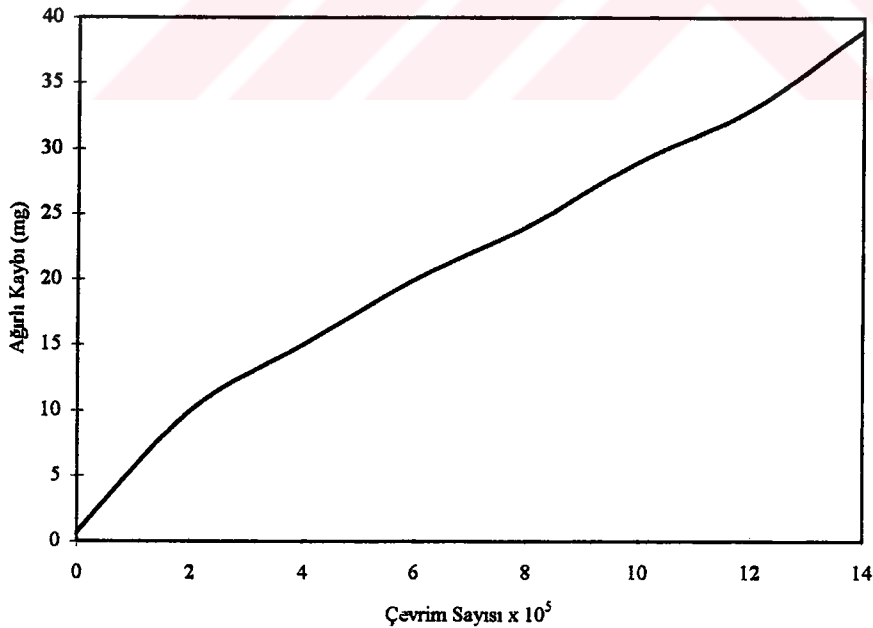
Kazımalı korozyon; yüzey ve ortamın etkileşerek kimyasal bir reaksiyon sonucunda meydana getirdikleri ürünlerle kazımalı aşınma sisteminin etkilenmesi ve kazımalı yorulma; aşınma ve yorulmanın birlikte oluşturdukları hasar olaylarına denmektedir. Kazımalı aşınma yukarıda tarif edildiği gibi yorulma ve korozyondan bağımsız, kendi başına, istenmeyen bir hasar ve aşınma mekanizmasıdır[38].

5.1. Kazımalı Aşınmaya Etki Eden Parametreler

Kazımalı aşınma; çevrim sayısı, normal yük, yer değiştirme miktarı, frekans, temas geometrisi ve ortam şartları gibi parametrelerden etkilenmektedir[4,38]. Bu parametrelerin etkileri aşağıda özetlenmiştir.

5.1.1. Çevrim Sayısı

Çelikler üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda aşınma hacmiyle çevrim sayısının doğru orantılı olduğu ortaya konmuştur. Pek çok çalışmada, aşınmanın başlangıç hızı yüksektir; ancak, daha sonra hızla azalır ve eğri doğrusal kalır. Bu olaya en tipik örnek Feng ve Uhlig'in 1954'de yaptıkları çalışmada rastlanır. Şekil 5.1.'de orta karbonlu bir çeliğe 9Hz frekansa, 90µm yer değiştirme miktarı ve 36.5 MPa normal yük altında kazımalı aşınma deneyi yapıldıktan sonra elde edilen çevrim sayısı-ağırlık kaybı ilişkisi görülmektedir[38].



Şekil 5.1: Orta karbonlu çeliğin kuru hava ortamında kazımalı aşınma sırasında çevrim sayısı ile ağırlık kaybının değişimi[38].

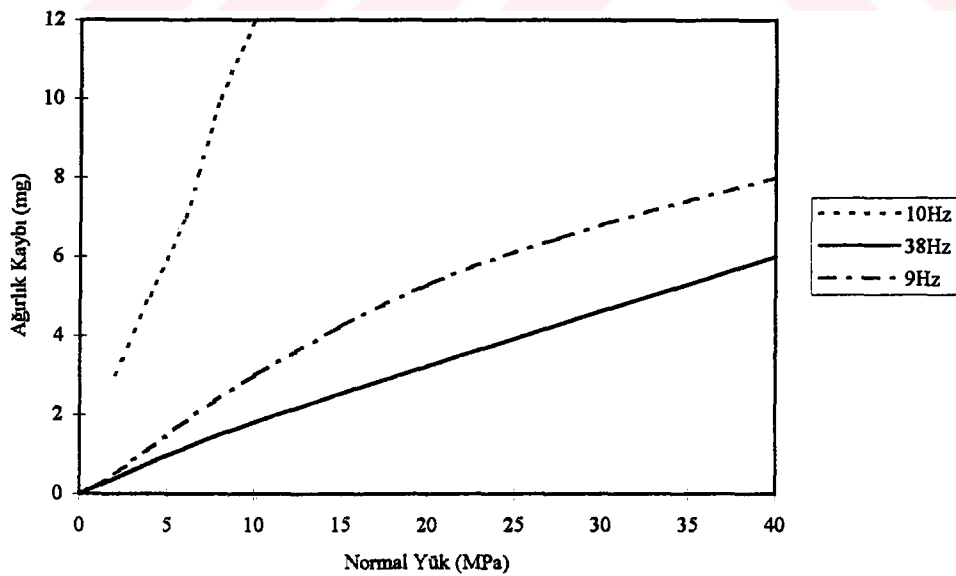
Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi çevrim sayısı ile ağırlık kaybı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Commissaris ve deGee 1966-67'de sinterlenmiş alüminyum tozuyla (SAT)-çelik/zirkonyum/SAT malzeme çiftleri üzerinde yaptıkları çalışmalar sonucunda benzer bir ilişkiyi gözlemişlerdir. Feng ve Rightmire (1956), başlangıçtaki aşınma hızının yüksekliğinin kopan partiküller sonucunda oksit filminin uzaklaştırılmasıyla ilgili olduğunu düşünmektedirler[38].

5.1.2. Normal Yük

Normal yükle kazımalı aşınmadaki ağırlık kaybı arasındaki karşılaştırılabilir ilişkiler sırasıyla;

- a)Wright tarafından 38Hz'de
- b)Feng ve Uhlig tarafından 9Hz'de
- c)Reed ve Batter tarafından 10Hz'de

yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur. Şekil 5.2.'de çeliklerde kazımalı aşınma sırasında normal yük ile ağırlık kaybı arasındaki ilişki gösterilmiştir[38].



Şekil 5.2: Çeliklerde kazımalı aşınmada normal yük ile ağırlık kaybı ilişkisi[38].

Şekil 5.2.'de Wright, Feng-Uhlig ve Reed-Batter'in çalışmalarını sonucunda elde edilen eşit çevrim sayısı için normal yük-ağırlık kaybı ilişkisi gösterilmiştir. Gee, Commissaris ve Zaat tarafından 1964'de normal vibrasyon, torsiyonel vibrasyon ve her ikisinin birlikte olduğu durum için normal yük-ağırlık kaybı ilişkisi çıkartılmış ve daha öncekine benzer şekilde artan normal yükle artan aşınma ağırlığı olgusu ortaya konmuştur[38].

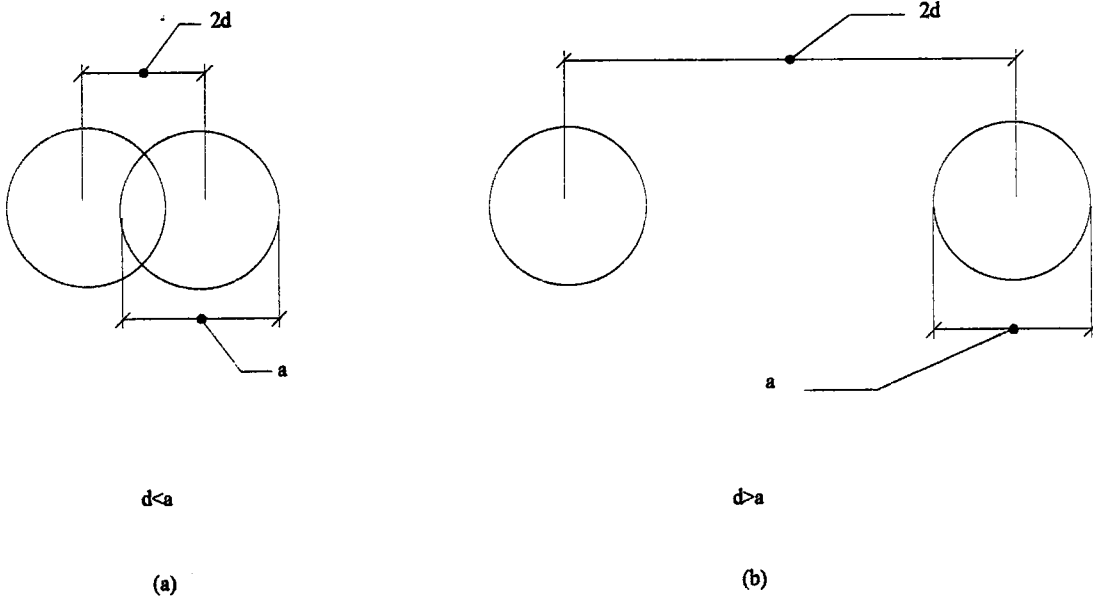
5.1.3. Yer Değiştirme Miktarı

Üzerinde en fazla konuşulmuş kazımalı aşınma parametresidir. Yer değiştirme miktarına göre kazımalı aşınma şekli değişmektedir. Yer değiştirme miktarının büyümesiyle birlikte karşılıklı kayma (veya karşılıklı kazımalı aşınma) durumu ortaya çıkar[4,38]. Bazı araştırmacılar bu konuda sınırlamalar koymuşlardır:

- a)Aşınma hızının; yer değiştirme miktarının $100\mu\text{m}$ 'dan büyük ($>100\mu\text{m}$) olduğu durumlarda sabit kaldığı ve bundan sonra karşılıklı kaymanın başladığı[4],
- b)Kazımalı aşınmanın $400\mu\text{m}$ civarına kadar meydana geldiği[44],

belirlenmektedir.

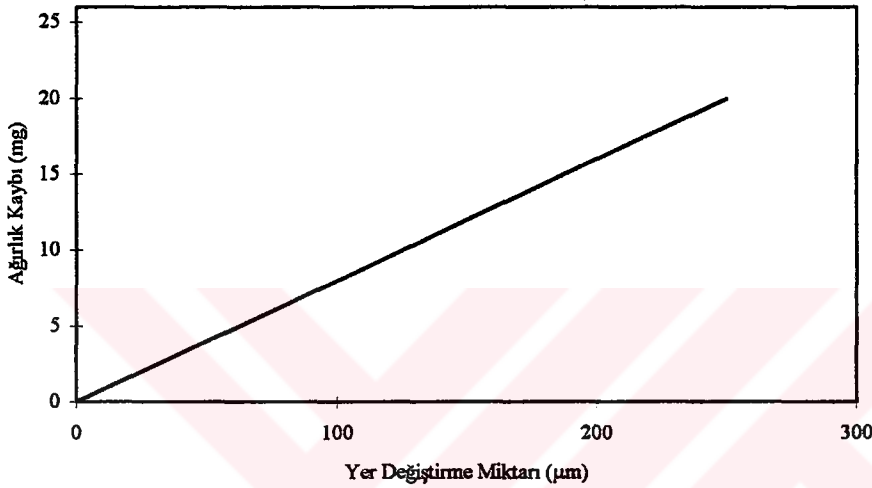
Son yıllarda olarak top-disk geometrisi için Vingsbo ve Söderberg kritik yer değiştirme miktarı kavramını ortaya atmışlardır[41]. Kritik yer değiştirme miktarı deneysel olarak tesbit edilebilir; her geometri için düşünülmüş ve değerlendirilmemiştir. Kazımalı aşınma hareketi yer değiştirme miktarına bağlı olarak iki durumu ortaya çıkarmaktadır: Kazımalı aşınma ve karşılıklı kazıma. Kazımalı aşınma ile karşılıklı kazımayı birbirinden ayıran en önemli parametre yer değiştirme miktarıdır. Şekil 5.3'de görüldüğü gibi; eğer başlangıç durumundaki temas genişliği yer değiştirme miktarından çok büyükse; bir başka deyişle malzeme, kazımalı aşınma sırasında hareket ettiği yönde kendi boyundan daha fazla mesafe kat ediyorsa karşılıklı kazımalı aşınma durumu mevcuttur[48].



Şekil 5.3: a)Kazımalı aşınma durumu b)Karşılıklı kazıma (kayma) durumları için yer değiştirme miktarı (d) ile top çapı (a) arasındaki ilişki[48].

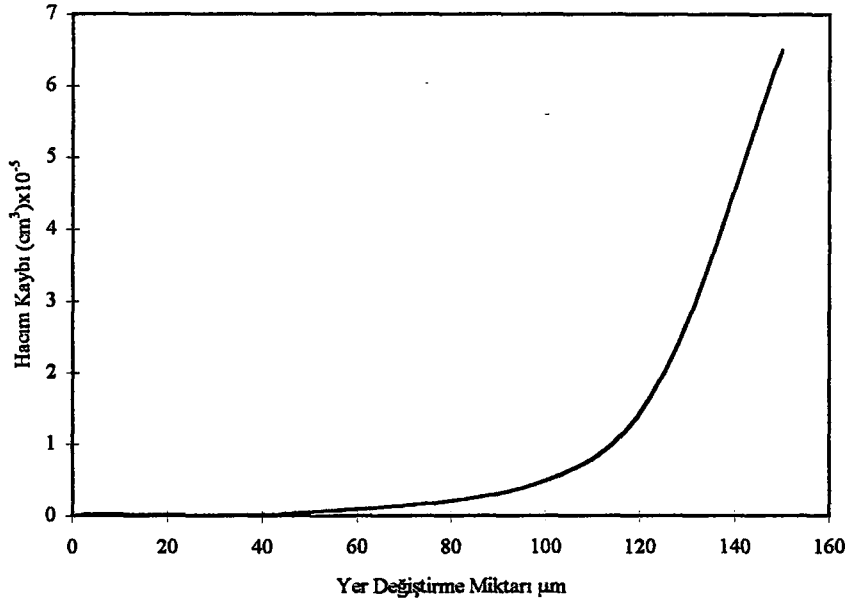
Silindir bloğuyla piston segmanı arasındaki ilişki karşılıklı kazıma (kayma) oluşumunu anlatan en iyi örnektir. Motordaki yanma sırasında piston segmanıyla silindir bloğu arasındaki temas mesafesi, pistonun hareketi sırasında yer değiştirme miktarından çok küçüktür. Segman her zaman kendi boyutundan daha fazla bir mesafede gidip-geldiği için bu harekete karşılıklı kayma/çalışma (karşılıklı kazıma) adı verilmektedir[50]. Süpape ile süpape kılavuzu (valve guide) arasındaki ilişki ise kazımalı aşınmayı göstermektedir[22]. Ancak dikkat edilmesi gereken nokta, endüstriyel dizel motorlarda süpape aldığı yolun (valve train) 8.5-11.5mm arasında olduğudur. Bu durum; karşılıklı kazıma (kayma) ile kazımalı aşınmayı birbirinden ayırtedebilmek için tribosistemi oluşturan malzeme ile karşı malzemenin geometrik şekli, boyutları ve yer değiştirme miktarının birlikte değerlendirilmesini ortaya çıkarmaktadır. Bütün bunlara ek olarak yer değiştirme miktarı ile ilgili genellemeler; endüstride kazımalı aşınma olaylarında yer değiştirme miktarının tesbit edilmesinin çok zor olmasından dolayı yapılamamıştır[51].

Kuru havada düzgün çelik yüzey üzerinde yapılan kazımalı aşınma deneylerinde, aşınma ağırlığıyla yer değiştirme miktarının doğrusal olarak arttığı gözlenmiştir. Şekil 5.4.'de yer değiştirme miktarıyla ağırlık kaybı arasındaki ilişki gösterilmiştir[38]. Halliday ve Hirst 1956'da yaptıkları çalışmalarda, dönmeyle meydana gelen kazımalı aşınma çalışmalarında; çelik çiftleri kullanılmış ve yer değiştirme miktarının artışıyla birlikte aşınma hacminde ani artış gözlenmiştir.

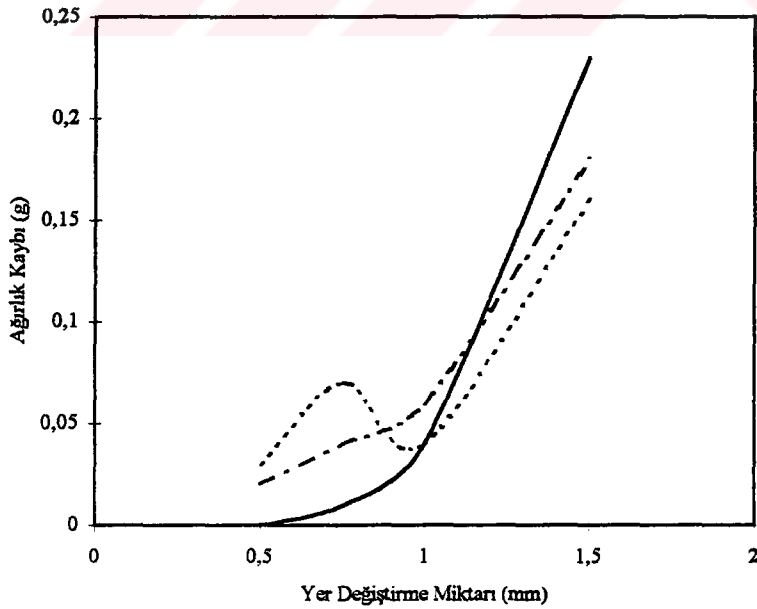


Şekil 5.4: Kuru havada düzgün çelik yüzeyinde kazımalı aşınma sonucunda elde edilen yer değiştirme miktarı ile ağırlık kaybı değişimi[38].

Şekil 5.5.'de Halliday ve Hirst'ün yaptığı çalışmalarda elde ettikleri sonuçlar gösterilmiştir[38]. Şekil 5.4.'den görüldüğü gibi aşınma yaklaşık 100µm'a kadar yavaş ilerlerken daha sonra hızlıca artmıştır. 1957'de Halliday'in yaptığı çalışmalarda 50µm'luk yer değiştirme miktarının altında kazımalı aşınma miktarı sıfır (0) olarak okunmuştur[38]. Ancak bunun ölçüm tekniklerinin yetersizliğiyle ilişkili olduğu düşünülmelidir. 1960'da Reed ve Batter 750µm'luk yer değiştirme miktarında aşınma hasarının hızla arttığını gözlediler. Benzer bir ilişki daha yüksek yer değiştirme miktarları için McMath tarafından 1961'de ortaya konmuştur. Şekil 5.6.'da ağırlık kaybıyla yer değiştirme miktarları arasındaki ilişki gösterilmiştir[38].



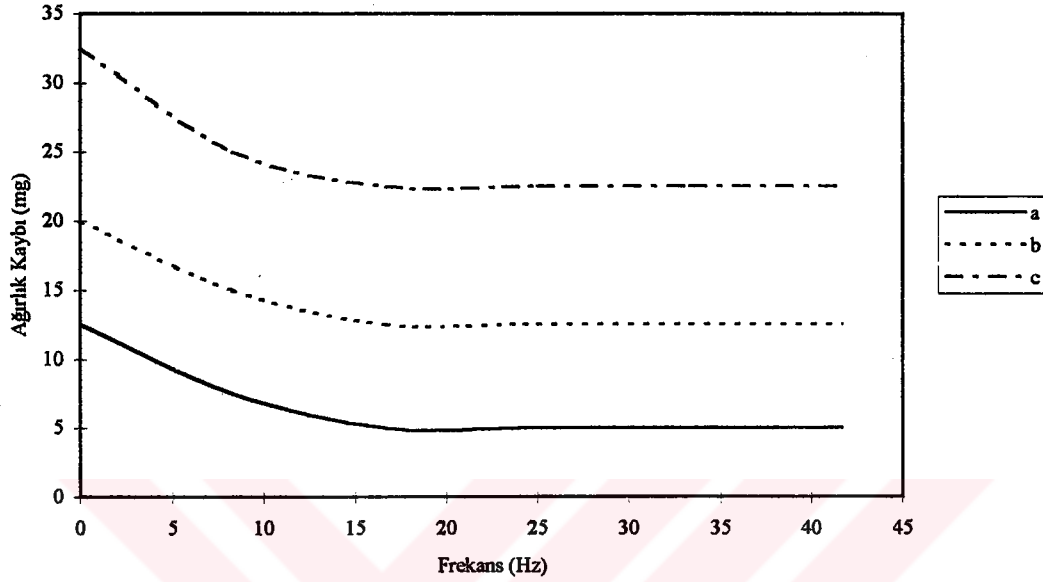
Şekil 5.5: Halliday ve Hirst'ün orta karbonlu çeliklerle yaptıkları çalışmalar sonucunda elde edilen yer değiştirme miktarı ile ağırlık kaybı değişimi[38].



Şekil 5.6: 50Hz frekansa, 3.45MPa normal yük altında farklı işlemler görmüş SAE 4140 çelik malzemenin ağırlık kaybı-yer değiştirme ilişkisi[38].

5.1.4. Frekans

Bu konuda klasik yaklaşım Feng ve Uhlig tarafından 1954’de ortaya konmuştur. Şekil 5.7.’de frekans artışıyla ağırlık kaybı arasındaki ilişki görülmektedir[38].

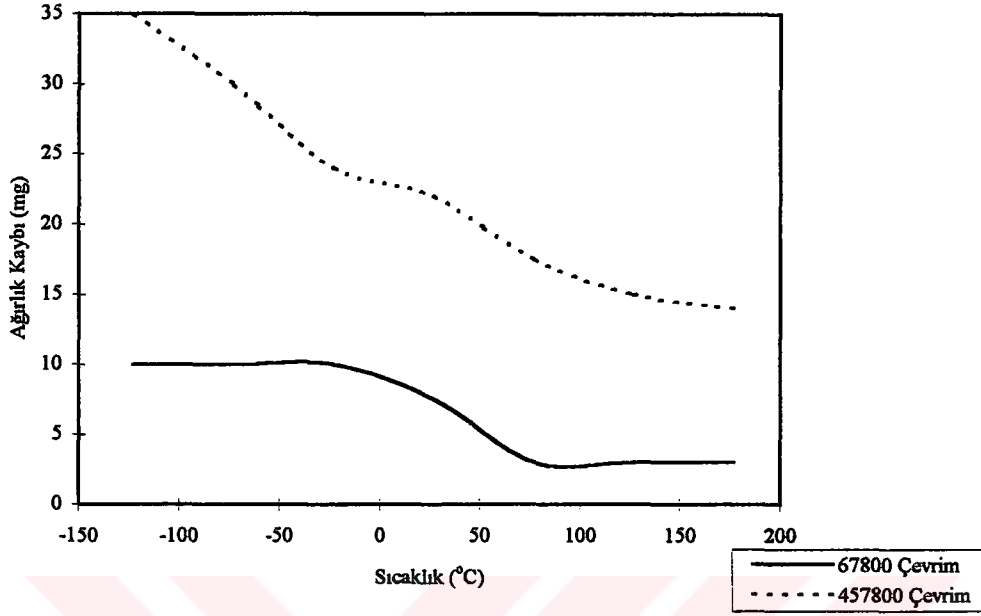


Şekil 5.7: Orta karbonlu çeliklerde kazımalı aşınmada frekans değişimiyle ağırlık kaybı ilişkisi: a)67000 çevrim, 90µm yer değiştirme miktarı; b)450000 çevrim, 90µm yer değiştirme miktarı c)67000 çevrim, 230µm yer değiştirme miktarı[38].

Frekans artışı ile kazımalı aşınma hasarı azalmakta ve frekansın belli bir değerinden sonra; yaklaşık 20Hz, kazımalı aşınma miktarı sabit kalmaktadır. Ancak literatürde; frekans seçimine dair bir kural bulunmamaktadır. Kazımalı aşınma deneylerinde çok farklı frekans değerleri; 0.003Hz gibi çok düşük frekansların yanında, 250Hz gibi çok yüksek frekans değerleri de kullanılmıştır[52,53].

5.1.5. Ortam Şartlarının Etkisi

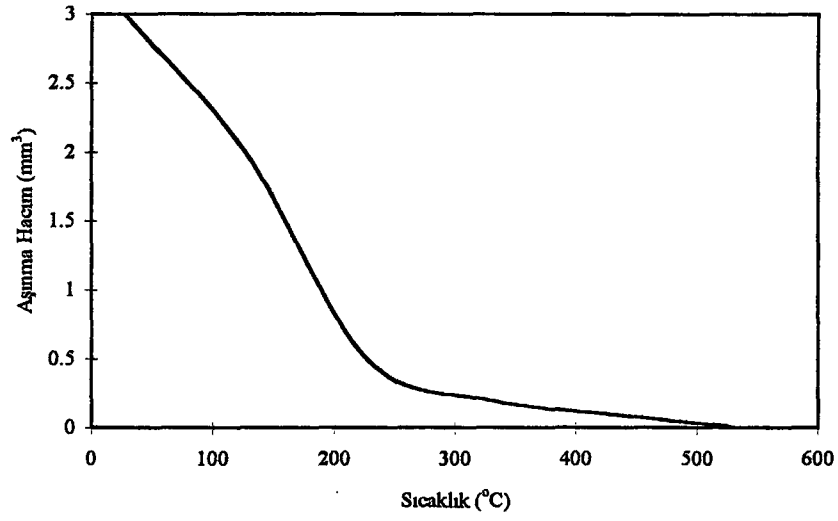
Kazımalı aşınmayı en fazla etkileyen parametreler ortam şartlarını meydana getiren sıcaklık ve bağıl nemdir. Sıcaklık kazımalı aşınmada ilk önce fark edilmiş parametrelerdendir. 1954 yılında Feng ve Uhlig tarafından ilk defa kantitatif ölçümler yapılmıştır. Şekil 5.8.’de Feng ve Uhlig’in sıcaklık ile kazımalı aşınmadaki ağırlık kaybı arasında ki ilişkiyi gösteren çalışmaları görülmektedir[38].



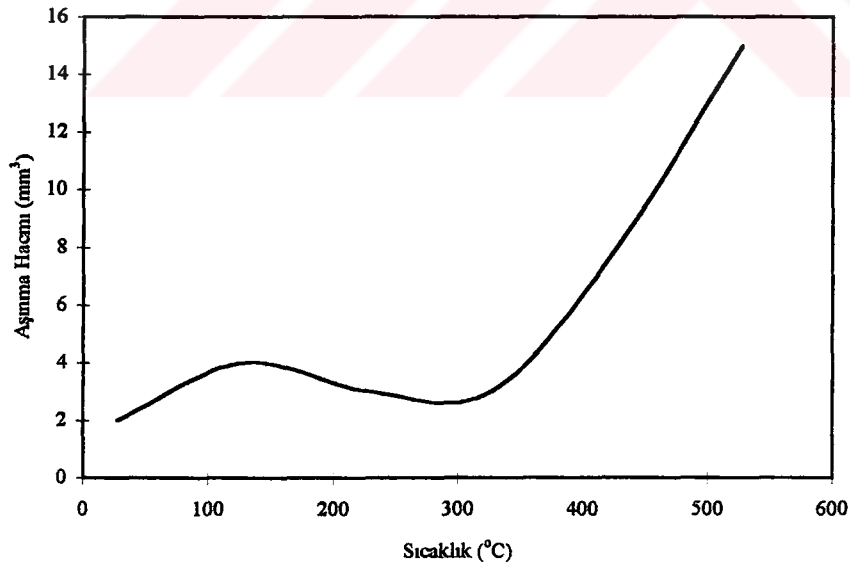
Şekil 5.8: Kuru havada kazımalı aşınmanın sıcaklıkla değişimi. Çelik malzeme, 90µm yer değiştirme miktarı, 9Hz frekans, 36.5MPa basınç kullanılmıştır[38].

Feng ve Uhlig'in çalışmalarından elde edilen sonuçlarda artan sıcaklıkla kazımalı aşınmanın azaldığı gözlenmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. 1969-70'de Hurricks ve Ashford oda sıcaklığı ile 500°C sıcaklık aralığında da artan sıcaklıkla kazımalı aşınmanın azaldığını bulmuşlardır. Şekil 5.9'da bu çalışmadan elde edilen sonuçlar gösterilmiştir[38].

Ancak kuru hava ortamında yapılan bu çalışmalardan farklı olarak argon atmosferinde yapılan çalışmalar sonucunda bir geçiş gözlenmiş ve kazımalı aşınma miktarı belli bir sıcaklıktan sonra artmaya başlamıştır. Şekil 5.10.'da argon atmosferi altında kazımalı aşınmanın sıcaklıkla değişimi şematik olarak gösterilmiştir[38].

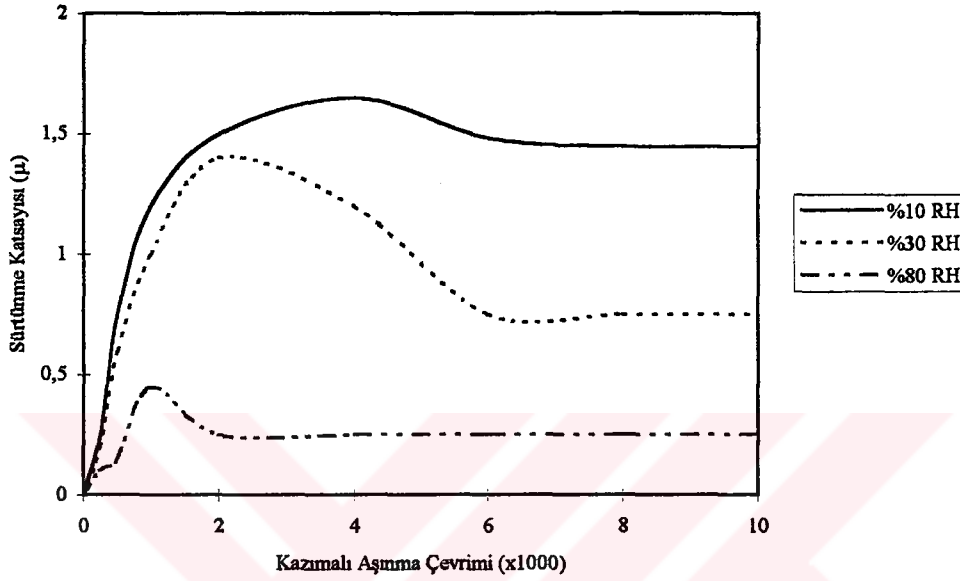


Şekil 5.9: Orta karbonlu çelik malzemelerde kazımalı aşınma hacim kaybının sıcaklık ile değişimi[38].



Şekil 5.10: Orta karbonlu çelik malzemelerde kazımalı aşınma hacim kaybının argon atmosferinde sıcaklıkla değişimi[38].

Bağıl nem artışıyla yüzeyde kaymayı kolaylaştırıcı bir filmin meydana gelmesi nedeniyle kazımalı aşınma azalmaktadır. Şekil 5.11.'de Farklı bağıl nem oranlarına göre kazımalı aşınmada sürtünme katsayısının değişimi görülmektedir[40].

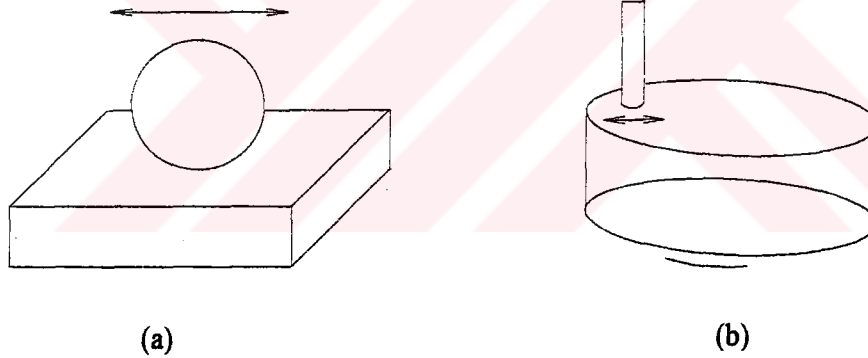


Şekil 5.11: Kazımalı aşınmada farklı bağıl nem oranlarında TiN-Aluminyum oksit triboçiftinden elde edilen sürtünme katsayısının değişimi[40].

5.1.6. Kazımalı Aşınma Deneylerinde Kullanılan Geometriler

Şimdiye kadar yapılan çalışmaların hemen hemen tümünde kazımalı aşınma deneyleri top-disk geometrisi (Şekil 5.12-a) kullanılarak yapılmıştır[41-49]. Bunun nedeninin; top-disk geometrisinde iki nokta arasında bir doğru çizilebilecek şekilde (tek noktadan temas-dengeli temas) temas bölgesinin çok kolay olarak sağlanabilmesi ve deneyde kullanılacak yer değiştirme miktarının Midlin teorileri yardımıyla tesbit edilmesinin etkin olduğu düşünülmektedir.[54]. Top-disk geometrilerinde genel olarak Midlin teorilerinin kullanılmasının; bu teorinin birbiriyle temas halindeki konveks geometrilerde elastik davranışın ortaya konmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Midlin teorilerinin top-disk geometrisi dışında başka bir geometride uygulamasına rastlanmamıştır[48].

Klasik pim-disk deney yönteminden (sabit pim dönen disk) farklı olarak, pim üzerine salınım hareketi verilerek (Şekil 5.12-b) kazımalı aşınmaya benzer bir çalışma yapılmıştır. Pim-disk temas yüzeyinde aşınma sonucunda ortaya çıkan yığıntıların, salınım hareketi sayesinde sistemden daha kolay uzaklaştırıldığı gözlenmiştir. Ancak yine de aşınma yığılmasını temas bölgesinden uzaklaştırmak amacıyla %10 (Ağ.) oleik asitli kerosen karışımı süpürme işleminde kullanılmıştır.[55]. Taber indeksinin belirlenebildiği bazı deney düzeneklerinde ise bu işlemin hava ile yapıldığı gözlenmiştir. Bütün aşınma deneylerinde ortaya çıkan aşınma yığılması, aşırı miktarlarda olduğunda temas bölgesindeki hareketi engelleyebilir. Bu nedenle bu yığılmanın hareketin devamını sağlamak amacıyla temas bölgesinden uzaklaştırılması gerekebilir. Bu tür aşınma yığıntısını ortadan kaldırmak için kullanılan sıvı katkıların yağlayıcı görevi göreceği, dolayısıyla kuru aşınma koşullarında gözlenen aşınma olgularından farklı özelliklerin ortaya çıkabileceği öngörülmelidir.



Şekil 5.12: a) Kazımalı aşınma deneylerinde kullanılan deney geometrisi, b) Pim üzerine salınım hareketi verilerek geliştirilmiş pim-disk geometrisi[41-49,55].

5.2. Seramik Malzelerde Kazımalı Aşınma

Son yıllarda seramik malzemelerin hızlı gelişimi, bu malzemelerle ilgili kazımalı aşınma özelliklerinin ve davranış biçimlerinin ortaya konmasına neden olmuştur. Önceleri kütle seramik malzemeler daha sonra da seramik kaplamalar ile ilgili çalışmalar artmaya başlamıştır.

Top-disk geometrisinde ve seramik-çelik tribosisteminde yapılmış çalışmalar sonucunda aşınma hacmi;

$$W_v = k2dNF_N \quad (5.1)$$

W_v =Aşınma hacmi

k =Sabit

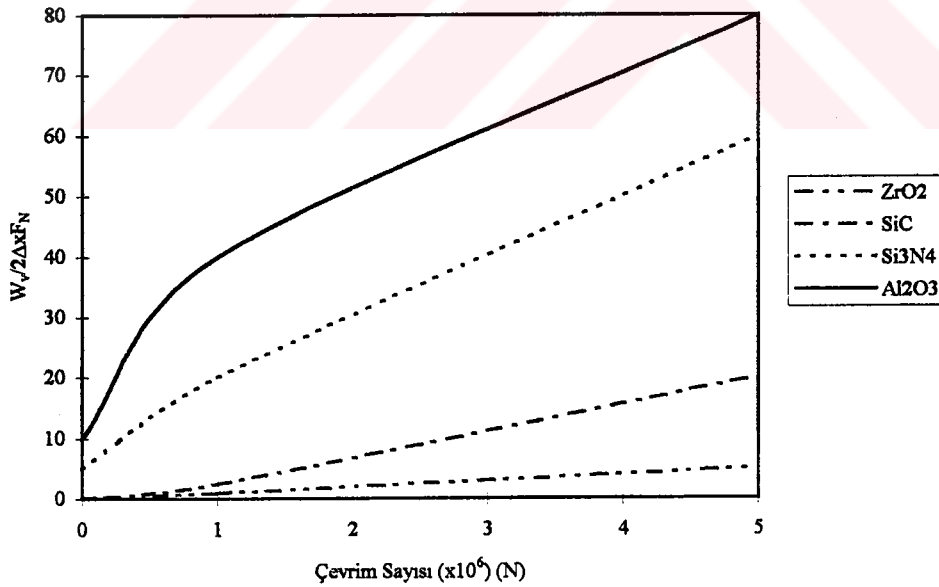
d =Yer değiştirme miktarı

N =Çevrim sayısı

F_N =Normal kuvvet

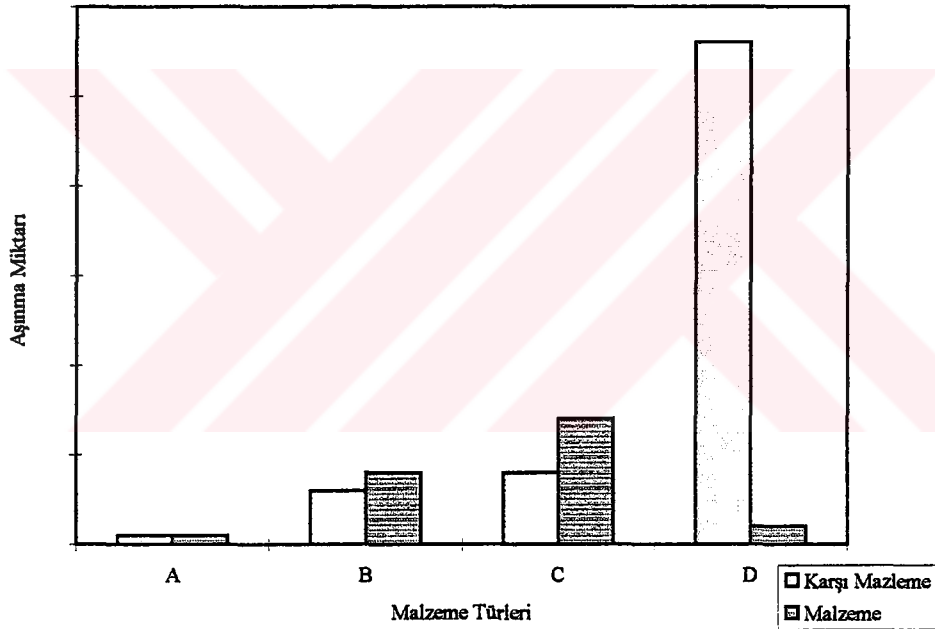
olarak hesaplanmaktadır[39].

Denklem (5.1) düzenlenerek çizilmiş grafik Şekil 5.13'de çeşitli seramik-çelik triboçiftleri için gösterilmiştir[39].

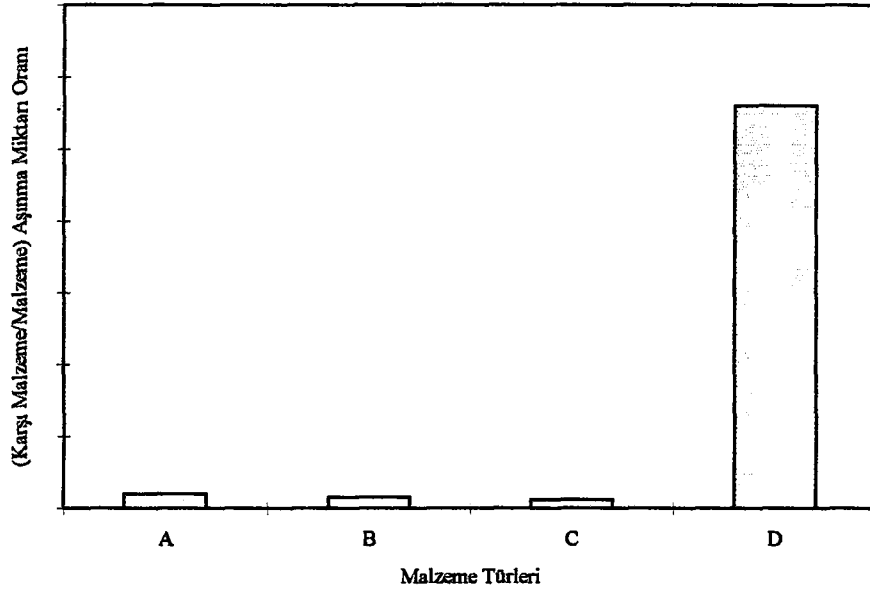


Şekil 5.13: Seramik-çelik tribosistemleri için kazımalı aşınma davranışı eğrileri[39].

Şekil 5.13.'de görüldüğü gibi sabit çevrim sayısı için artan aşınma sabiti aşınma hacminin da arttığını göstermektedir. Bu malzemelere ait toplam aşınma hacmi Şekil 5.14'de ve malzeme-karşı malzeme aşınma oranı Şekil 5.15.'de şematik olarak gösterilmiştir[39]. Şekiller incelendiğinde; en az kazımalı aşınma çelik-ZrO₂ triboçiftinde, en yüksek kazımalı aşınma miktarı ise çelik-Al₂O₃ triboçiftinde görülmektedir. Çelik-ZrO₂ triboçiftinde karşı malzeme ve malzemede aşınma hemen hemen aynı miktarda meydana gelirken; çelik-Al₂O₃ triboçiftinde yüksek karşı malzeme aşınmasına karşılık çok düşük malzeme aşınması gözlenmiştir[39].



Şekil 5.14: Seramik-çelik triboçiftinde seramik malzemelerdeki toplam aşınma hacminin gösterilişi (A:ZrO₂-çelik, B:SiC-çelik, C:Si₃N₄-çelik, D:Al₂O₃-çelik)[39].



Şekil 5.15: Seramik-çelik triboçiftinde karşı malzeme-malzeme aşınma miktarlarının oranı (A: ZrO_2 -çelik, B: SiC -çelik, C: Si_3N_4 -çelik, D: Al_2O_3 -çelik)[39].

5.2.1. Kazımalı Aşınmada Sürtünme Katsayısının Hesaplanması ve Harcanan Enerji Kavramı

Seramik kaplamaların kazımalı aşınma olaylarında uygulamalarının artması ile sürtünme ve aşınma davranışı konusunda yeni kavramlar da kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel olarak aşınmayla ilgili çalışmalar göz önüne alındığında;

1) Tribografikler

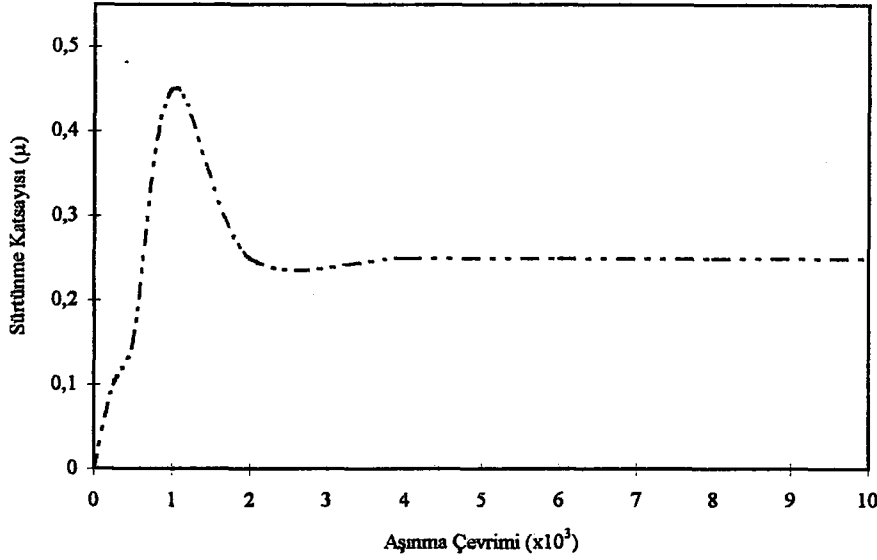
- a) Sürtünme katsayısı-zaman eğrileri
- b) Aşınma-zaman eğrileri
- c) Aşınma-yük-hız-sıcaklık eğrilerinin birlikte kullanımı
- d) Ağırlık/hacim kaybı eğrileri

2) Geçiş diyagramları

3) Triboharitalar

gibi yöntemler aşınma verilerinin analizinde yaygın olarak kullanılmışlardır[4].

Sürtünme katsayısı-zaman eğrileri kazımalı aşınma davranışını incelemeye de kullanılan yöntemlerden biridir (Şekil 5.16)[40].



Şekil: 5.16: TiN kaplama-korundum arasında kazımalı aşınma deneylerinde elde edilen, aşınma çevrim sayısı ile sürtünme katsayısının değişimi[40].

Şekil 5.16'de gösterilen sürtünme katsayısı-aşınma çevrimi eğrisi; TiN kaplamalı soğuk iş takım çeliği korunduma karşı; 100μm. yer değiştirme miktarı, 10Hz frekans, 1N normal kuvvet ve %80 bağıl nem koşullarında elde edilmiştir[40]. Bu tribografik, dinamik sürtünme kuvvetinin-yer değiştirme miktarına göre değişiminden hareketle sürtünme sırasında harcanan enerjiden yararlanılarak elde edilmiştir.

Kaplamaların kazımalı aşınma davranışında, hareket aşağıdaki gibi

- a) Doğrusal yer değiştirme (Tip I),
- b) Radyal yer değiştirme (Tip II),
- c) Çevresel yer değiştirme (Tip III),

üç farklı durumda meydana gelebilir[40]. Kazımalı aşınmada dinamik sürtünme kuvveti-zaman ölçümleri doğrusal yer değiştirme (Tip I) için ilk defa Vingsbo-Söderberg tarafından yapılmıştır[41,42].

Kazımalı aşınma deneylerinde dinamik sürtünme kuvveti-zaman eğrileri;

- a)Elastik-yapışma,
- b)Yapışma-kayma (karışık) veya kısmi kayma,
- c)Kayma,

olmak üzere üç karakteristik durumu göstermektedir[41-44].

Şekil 5.17’de elastik yapışma durumunda elde edilen dinamik kuvvet-yer değiştirme miktarı eğrisi şematik olarak gösterilmiştir[41-44]. Elastik yapışma koşullarında doğrusal yer değiştirme elde edilirken; kazımalı aşınma için hiç bir enerji harcanmaz[41-45].

Kısmi kayma durumu için elde edilen dinamik kuvvet-yer değiştirme miktarı eğrisi şematik olarak Şekil 5.18’de gösterilmektedir[41-45]. Kısmi kayma durumunda kapalı dörtgen veya eliptik karakterde bir eğri elde edilir ve bu durumda, kazımalı aşınma için bir enerji harcanmıştır[41-47].

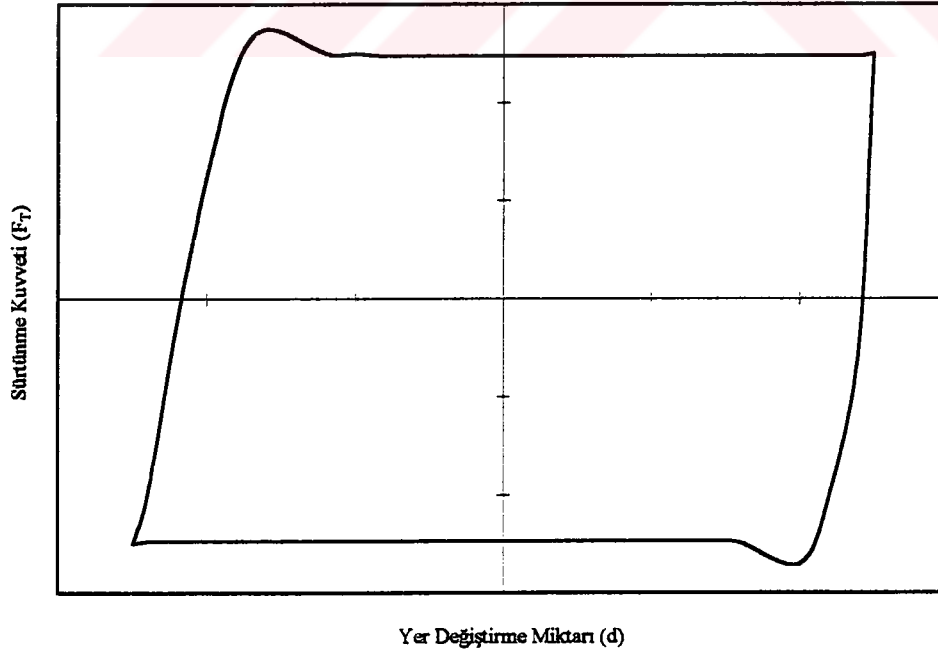


Şekil 5.17: Elastik yapışma koşullarında elde edilen dinamik sürtünme kuvveti-yer değiştirme miktarı eğrisi[41-45].

Kayma durumundaki karakteristik eğri şematik olarak Şekil 5.19'da gösterilmiştir[41-47]. Kayma durumunda dikdörtgene benzer kapalı bir grafik elde edilir ve buradan elde edilen enerji sürtünme katsayısının hesaplanmasında kullanılır[40-47].

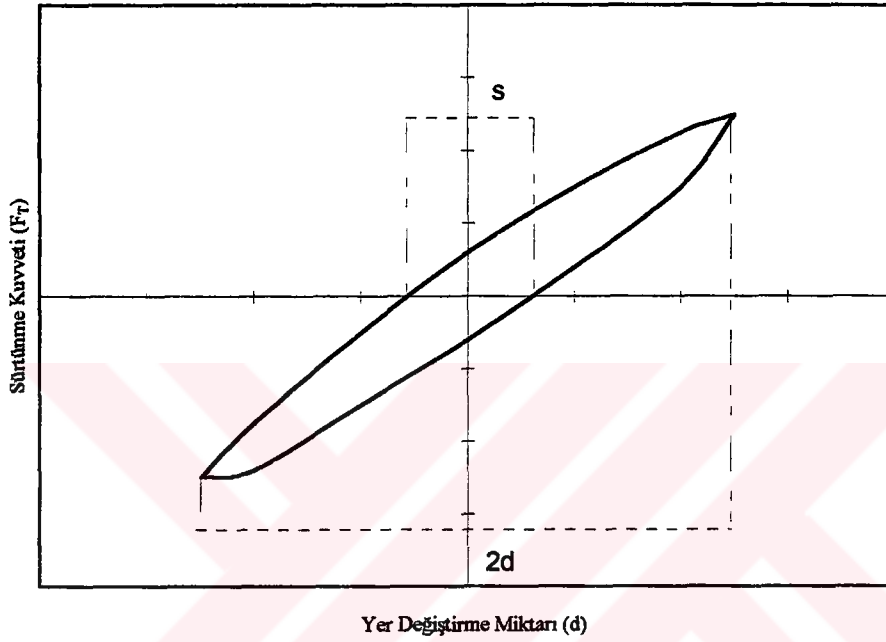


Şekil 5.18: Kısmi kayma koşullarında elde edilen dinamik sürtünme kuvveti-yer değiştirme miktarı eğrisi[40-47].



Şekil 5.19: Kayma koşullarında elde edilen dinamik sürtünme kuvveti-yer değiştirme miktarı eğrisi[41-47].

Kazımalı aşınma koşullarına göre farklı evrelerde ortaya çıkabilen bu karakteristikler sabit bir süre boyunca kazımalı aşınmanın davranış biçimi izlenebilir kılmaktadır. Her bir çevrimdeki değişimin karakteri farklı olduğu için aşınmanın gelişimi izlenebilir. Bu karakteristik durumların belirlenmesinde; kayma oranı/kazımalı aşınma sabiti (r), enerji oranı (A), serbest sistem kriteri (B), gibi kriterler kullanılarak kazımalı aşınma karakteri belirlenebilir. Bu kriterler grafik üzerinden elde edilebilir[48]. Şekil 5.20’de kazımalı aşınma sabitinin eldesi görülmektedir[48].



Şekil 5.20: Kazımalı aşınma sabitinin grafik üzerinden eldesi[48].

Şekil 5.20’den elde edilen kazımalı aşınma sabiti (r):

$$r = \frac{s}{2d} \quad (5.2)$$

Burada;

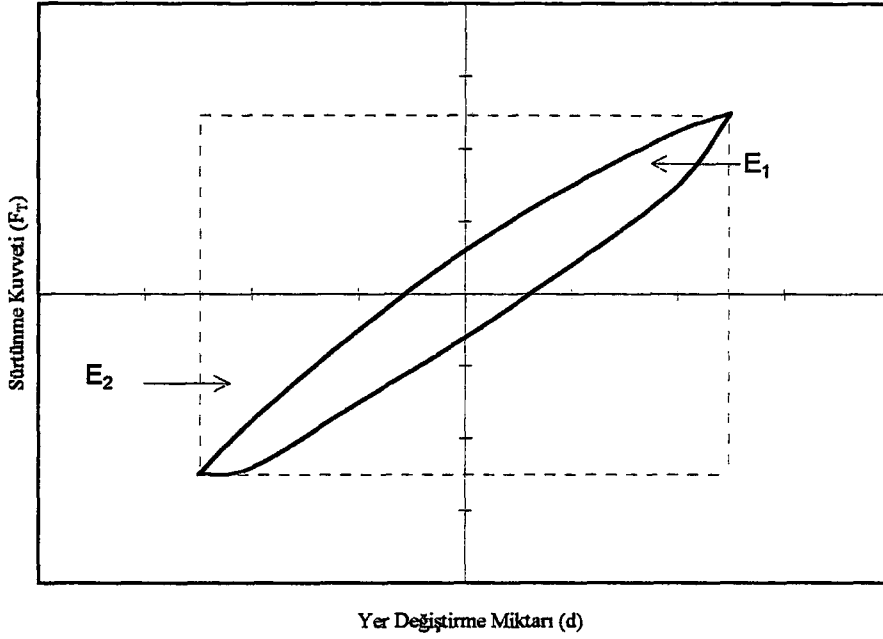
r=kazımalı aşınma sabiti

s=temas alanındaki kayma

d=yer değiştirme mesafesi

olarak ifade edilmektedir[40,48].

Enerji oranı (A) ise Şekil 5.21’da görüldüğü şekilde hesaplanarak ifade edilir[48].



Şekil 5.21: Kazımalı aşınmada enerji oranının (A) hesaplanması[48].

Enerji oranı (A);

$$A = \frac{E_1}{E_2} \quad (5.3)$$

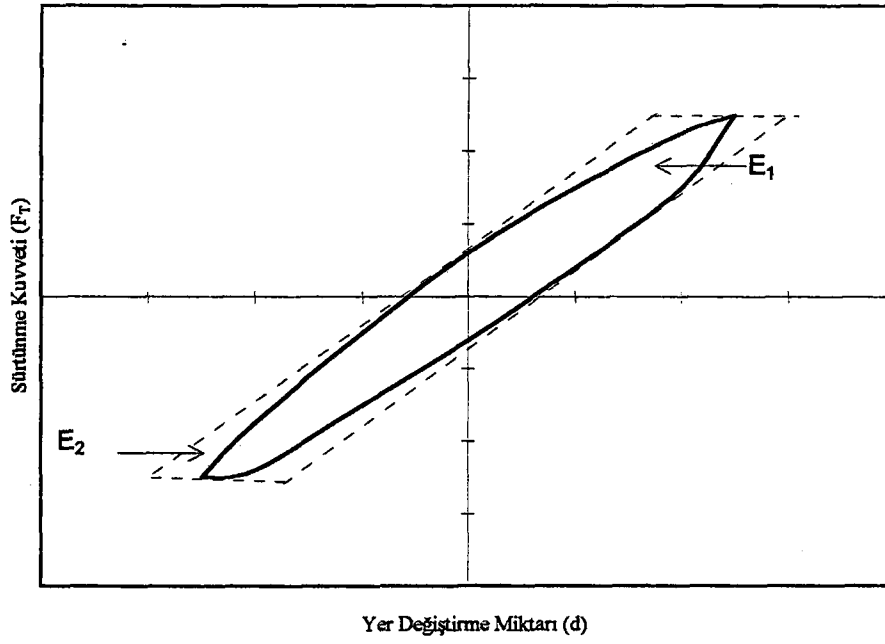
burada,

E_1 =Histerezis eğrisinin alanı

E_2 =Maksimum ve minimum sürtünme kuvvetleriyle yer değiştirme miktarı arasında kalan bölgenin alanı.

olarak ifade edilmektedir[48].

Serbest sistem kriteri (B) de Şekil 5.22’de görüldüğü şekilde grafikden hesaplanabilir[48].



Şekil 5.22: Kazımalı aşınmada sistem serbest kriterinin (B) eldesi[48].

Serbest sistem kriteri (B);

$$B = \frac{E_1}{E_2} \quad (5.4)$$

Bu formülde;

E_1 =Histerezis eğrisinin alanı

E_2 =Şekil 5.22.'de gösterildiği şekilde maksimum ve minimum sürtünme kuvvetleriyle yer değiştirme miktarı arasında kalan paralel kenarın alanı.

olarak ifade edilmektedir[48].

Bu kriterlere (r,A ve B) göre; kazımalı aşınma doğrusal elastik yapışma, kısmi kayma ve kayma belirli sayısal değerler alır ve bu karakteristik durumlar için geçiş değerleri

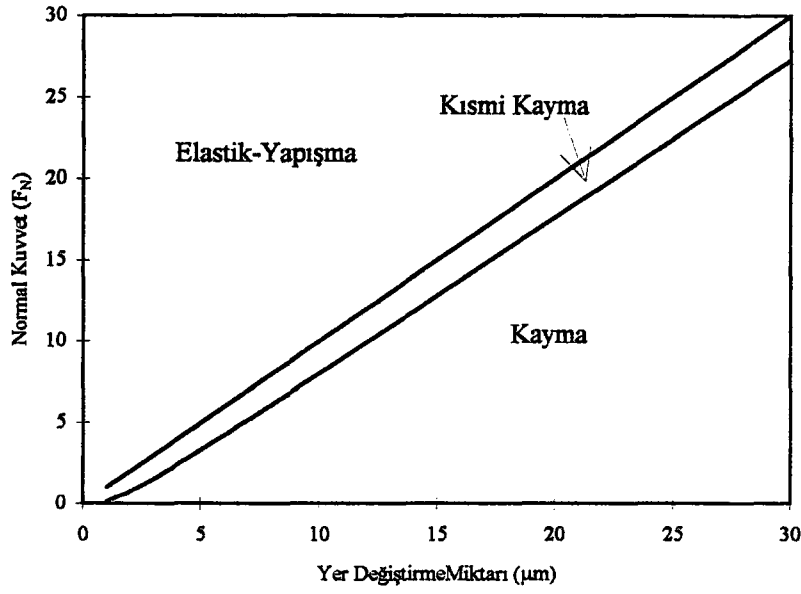
kullanılmaktadır. Farklı araştırmacılar tarafından kısmi kaymadan kayma karakteristiğine geçiş değeri farklı sayısal değer olarak ifade edilmektedir. Bu geçiş değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir[40,44,46-49].

Tablo 5.1: Kazımalı aşınma karakteristiklerinde geçiş kriterlerinin aldığı değerler[40,44,46-49].

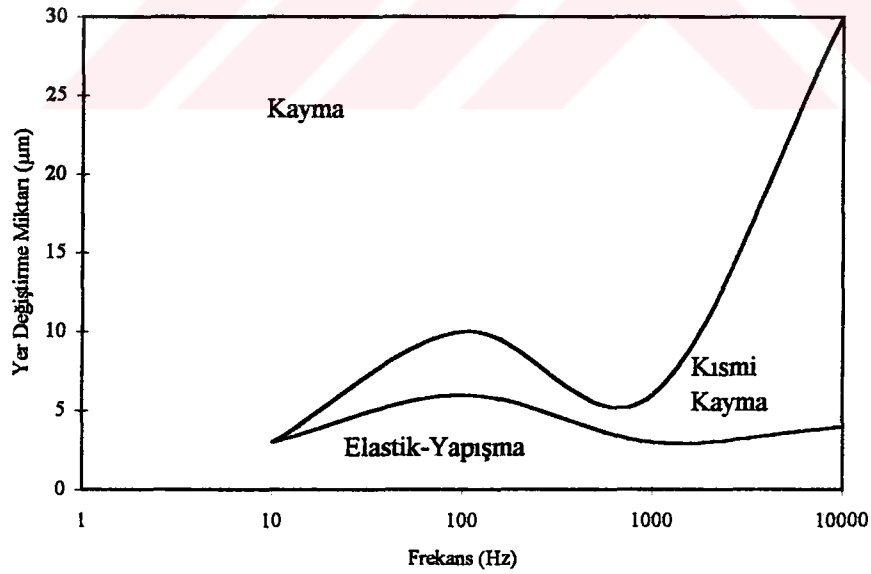
Kriter/ Kazımalı Aşınma Karakteri	Doğrusal Elastik Yapışma	Kısmi Kayma	Kayma
Kazımalı Aşınma Sabiti (r)	<0.05	<0.26 veya <1/3	
Enerji Oranı (A)		<0.2	
Sistem Kriteri (B)		<0.77	

TiN kaplama-korundum için top-disk geometrisi kullanılarak yapılan kazımalı aşınma deneylerinde; kısmi kayma-kayma geçiş kriteri olarak kazımalı aşınma sabitinin 1/3 (0.33) değeri kabul edilmiştir. Farklı araştırmacılara göre farklı değerler olarak alınan bu kriterler üzerinde çalışmalar devam etmektedir[46].

Farklı kazımalı aşınma karakteristiklerini gösteren “kazımalı aşınma” haritaları meydana getirilmiştir. Normal kuvvet-yer değiştirme miktarı ile frekans-yer değiştirme miktarı arasında elde edilen kazımalı aşınma haritaları, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24’de görülmektedir[41]. Bu çalışmalarda düşük karbonlu çelik (AISI 1018), ostenitik paslanmaz çelik (AISI 304) ve %99.8 saflıkda niyobyum kazımalı aşınma deneylerinde kullanılmıştır. Kazımalı aşınma haritaları, dinamik sürtünme kuvveti-zaman eğrilerinin geometrisi ve malzemenin üzerindeki kazımalı aşınma hasarının görünüşü incelenerek elde edilmiştir[41]. Her üç tipdeki kazımalı aşınma karakteristiği haritalar üzerinde görülmektedir. Bu çalışmadan farklı olarak alüminyum alaşımları, nitrürlenmiş çelik, kadmiyum kaplama için de benzer kazımalı aşınma haritaları meydana getirilmiştir[56,57]. Literatürde rastlanan diğer bir çalışmada ise TiN kaplama ile korundum arasında yapılmış ve bu çalışmada kazımalı aşınma haritası çıkarılmadan, kazımalı aşınma sabiti ve dinamik sürtünme kuvveti-zaman eğrileri kullanılarak kazımalı aşınma karakteristikleri ifade edilmiştir[47].



Şekil 5.23: Normal kuvvet-yer değiştirme ilişkisiyle elde edilen kazımalı aşınma karakteristikleri[41].



Şekil 5.24: Frekans-yer değiştirme ilişkisiyle elde edilen kazımalı aşınma karakteristikleri[41].

Kazımalı aşınma çalışmalarında dinamik sürtünme kuvveti-yer değiştirme miktarı eğrilerinden yararlanarak her bir çevrim için sürtünme katsayısı da belirlenebilmekte ve elde edilen enerjilerden sürtünme katsayısı aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir[40]:

$$\mu_k = \frac{E}{(2sF_N)} \quad (5.5)$$

Burada;

μ_k =Dinamik sürtünme katsayısı,

E=Harcanan enerji,

s=Temas alanındaki kayma,

F_N =Normal kuvvet,

olarak ifade edilmiştir[40].

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

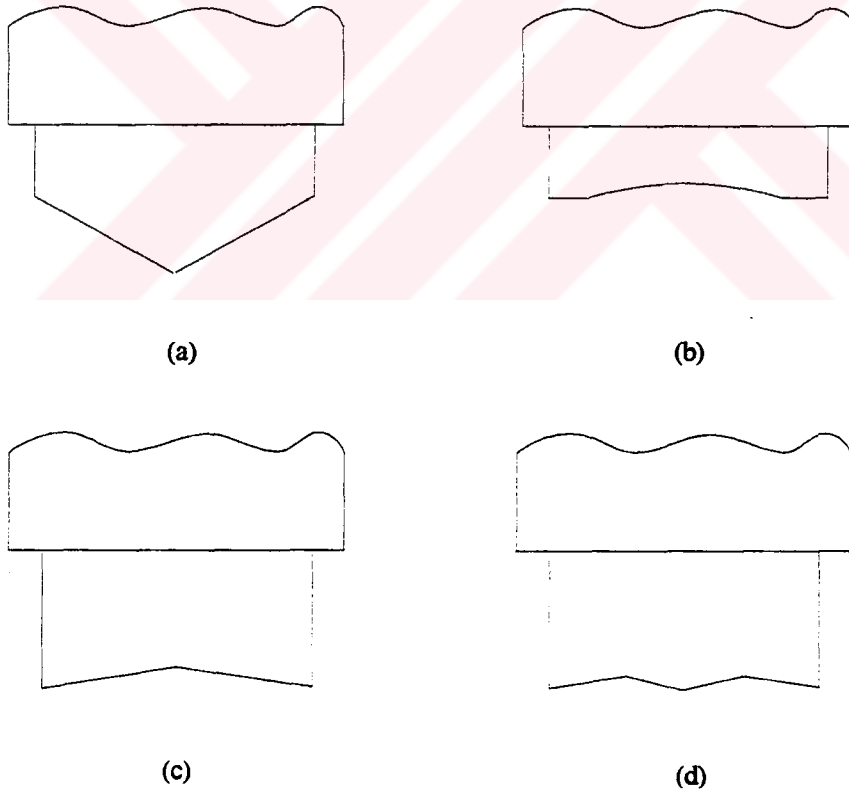
6.1. Endüstriyel Çalışmalar

PVD ve CVD yöntemleri kullanılarak kaplama yapılan zımbalarla endüstriyel zımbalama işlemlerinde performans artışı sağlamaya yönelik çalışmalar daha önce de yapılmıştır[58,59]. Bu çalışmalarda kullanılan yöntem, sabit bir delik delme sayısından (örneğin 150000 delik) sonra zımbalardaki aşınma miktarının ölçümüne dayanmaktadır[58,59]. Ancak ince sert seramik filmlerin kalınlığı (genellikle $<10\mu\text{m}$) düşünüldüğünde, aşınma miktarının endüstriyel koşullarda ölçümünün oldukça zor olacağı düşünülmelidir. Bu nedenle; bu tez kapsamında, endüstriyel işlemlerden sonra zımbaların incelenmesinde farklı bir yöntem kullanılmıştır. Endüstriyel çalışma koşullarında çalışan zımbaların belirli bir zamanda kalıptan sökülerek taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmesi yöntem olarak kullanılmıştır. Burada temel kriter: Artan delik sayısı ile incelenen zımbalarda meydana gelen aşınma hasarının en az bir önce incelenen zımbada meydana gelen aşınma hasarı kadar olması gerekliliğidir. Eğer incelenen zımbada alın yüzeyi, kesme kenarı ve prizmatik yüzeylerde bir önce incelenen zımbadan daha az aşınma hasarıyla karşılaşırsa; ya deney sayısı arttırılmalı ya da istatistiki yöntemler kullanılarak sonuca gidilmelidir.

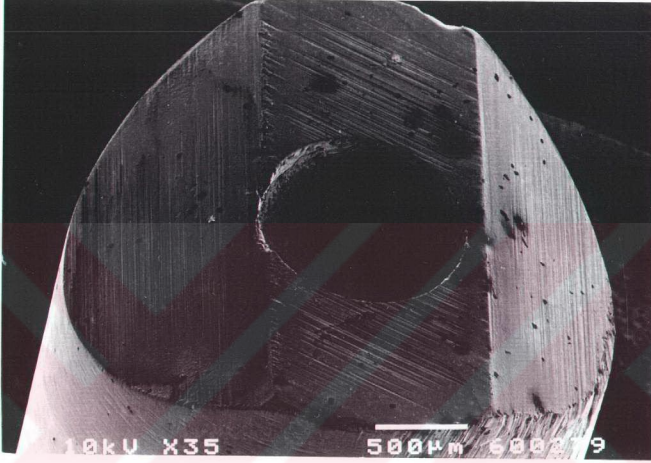
PVD esaslı kaplamalar yoğun olarak talaşlı imalatda kullanılan kesici takımlara başarıyla uygulanmaktadır; özellikle TiN kaplamalı takımlar endüstriyel anlamda yaygın olarak kullanılmaktadır. Titanyum nitrür kaplamaların; yüksek sertlikleri, düşük kaynak eğilimleri ve yüksek aşınma dirençleri nedeniyle soğuk ekstrüzyon, derin çekme vb. soğuk şekillendirme kalıplarında da uygulamaları başlamıştır[60]. PVD ve CVD yöntemleri ile kaplanmış TiN ve TiCN kaplamalı zımbaların; karbon çeliği, bakır ve alüminyumun soğuk şekillendirilmesinde endüstriyel boyutta kullanıldığı bilinmektedir[7,58,59,61].

Paslanmaz çeliğin zımbalama işlemi üretim açısından zor olduğu için kaplamalar dışında farklı çelik malzemelerin zımba malzemesi olarak kullanılmasıyla ilgili çalışmalar halen devam etmektedir[62]. Nillson'un çalışmasında AISI 304 ostenitik paslanmaz çelik, kaplanmamış soğuk iş takım çelikleriyle endüstriyel koşullarda zımbalanmış ve AISI 304 kalite ostenitik paslanmaz çeliğin zımbalama işlemi sırasında plastik şekil değişimi sonrasındaki kararsız durumu ile delik delme işlemi sonrasında soğu iş takım çeliğinden yapılmış zımbaların silindirik yüzeyinde meydana gelen aşınma hasarı incelemiştir[62].

Günümüzde çok farklı zımba geometrileri endüstriyel olarak kullanılmaktadır. Şekil 6.1.'de endüstriyel olarak kullanılan farklı zımba geometrileri görülmektedir[63,64]. Bu çalışmada kullanılan zımba geometrisi uç kısmı profilli, baş kısmı düz kademeli delik zımbası olarak tanımlanabilir[64]. Endüstriyel çalışmalarda kullanılan zımbaların uç kısmı Şekil 6.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1: Endüstride kullanılan farklı zımba geometrileri: a)Çatı tipi, b)İç bükey, c)Ters çatı tipi, d)Çift yollu zımba geometrileri[63,64].



Şekil 6.2: Deneylerde kullanılan zımbanın uç kısmının genel görünüşü.

Zimba malzemesi yüksek hız takım çeliği ve deldiği karşı malzeme AISI 430 ferritik paslanmaz çelik, kazımalı aşınma deneylerinde kullanılan malzemelerle aynıdır. Kaplama ticari ark-PVD prosesidir ve zımbalar kazımalı aşınma deneylerinde kullanılan numunelerle birlikte kaplanmışlardır. Kaplama malzemesi olarak CrN, TiN, TiAlN-Tek katlı (TiAlN-T) ve TiAlN-İki katlı (TiAlN-D) kaplamalar yüksek hız takım çeliğine (HSS) uygulanmıştır. Zımbalar üç grup halinde aynı koşullar altında deneye alınmış ve aynı zamanda tezgah durdurulmuş, kalıp dışarı çıkartıldıktan sonra zımbalar sökülüştür. Zımbalar sırasıyla; 44000, 121000 ve 156000 delik deldikten sonra kalıptan çıkartılmış ve taramalı elektron (SEM) mikroskobunda incelenmişlerdir. Zımbalar taramalı elektron mikroskobunda incelenmeden önce etilalkol içerisine daldırılarak temizlenmiş ve sıcak kuru havayla kurutulmuştur.

Endüstriyel zımbalama işleminde, tüm hat Miramondi firması tarafından Saronni tezgahları ile yapılmıştır. Klasik zımbalama işleminin yapıldığı Saronni tezgahına ait bazı özellikler aşağıda verilmiştir.

Hava girişi	1/4''
Hava basıncı	6 Bar
Oleodinamik güç ünitesi için gerekli olan su girişi	3/4''
Genel hava tüketimi	640 lt/dak.
Genel su tüketimi	90 lt/dak.
Toplam motor gücü	51 Kw
Zımbalama ünitesine ait yağ tank kapasitesi	250 lt.
Zımbalama ünitesinin devre basıncı	250 Bar
Zımbalama ünitesinin motor gücü	30 Kw.

6.2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar

Deneyler sırasında

- a) Kimyasal bileşimin analizi,
- b) Hasarlı bölgenin incelenmesi,
- c) Kaplama, taban malzemesi ve karşı malzeme özelliklerinin belirlenmesi

amacıyla Tablo 6.1.'de gösterilmiş cihazlar kullanılmıştır.

Kazımalı aşınma deneylerinde kullanılan deney cihazı, Advantech™ PCL-1800 kartı yardımıyla bilgisayar kontrollü hale getirilmiş ve bu deneyde Visual Basic ile hazırlanmış bir uygulama yazılımı kullanılmıştır.

Tablo 6.1: Deneylerde kullanılan cihazlar ve kullanım amaçları.

Kullanılan Cihaz	Marka	Amaç
Optik Mikroskop	Olympus PMU3	Yapışma mukavemetini belirlenmesi
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Ayrımlı X-Işınları Spektroskopisi	Jeol JSM 5410	Kaplama ve karşı malzemede meydana gelen aşınma hasarının incelenmesi
Çekme Makinası	İnstron 4505	Karşı malzeme mekanik özelliklerinin belirlenmesi
Kalotest	Wirtz Buehler Calotest	Kaplama malzemesi kalınlıklarının belirlenmesi
Yüzey Pürüzlülüğü	Mahr Perthen S8P (FRW 750 Uç)	Kaplama ve taban malzemesi yüzey pürüzlülüğü ölçümü
Ultra Mikrosertlik-Vickers	Fischer H100 XYPROG	Kaplama sertliğinin belirlenmesi
Mikrosertlik-Vickers	Schimidzu HMV 2000	Taban malzeme sertliğinin belirlenmesi
Kazımalı Aşınma Deneyi	Plint&Partners TE 70 Micro Friction Machine	Kazımalı aşınma deneylerinin yapılması
Sertlik-Rockwell C	Woelpert Universal	Kaplama-taban malzeme arasındaki yapışma mukavemetinin belirlenmesi

6.3. Deneylerde Kullanılan Kaplama Malzemelerinin Özellikleri

Deneylerde krom nitrür (CrN), titanyum nitrür (TiN), titanyum alüminyum nitrür tek katlı (TiAlN-T) ve titanyum alüminyum nitrür iki katlı (TiAlN-D) kaplamalar kullanılmıştır. Kaplama özelliklerinin belirlenmesinde en az üç deney yapılmıştır. Yüksek hız takım çeliğine yapılan kaplamalar katodik ark-PVD tekniğiyle, Novatech NVT-12 SIE cihazında; ticari parametreler kullanılarak yapılmıştır. Kaplama işleminde kullanılan ticari parametreler kaplama malzemelerine göre Tablo 6.2’de gösterilmiştir.

Kaplama malzemelerinin kalınlıklarının belirlenmesi için kaplama yüzeyinde; kalotest cihazında 10mm. çapında bir çelik bilya, 30dev./sn. hızla 20sn. süreyle döndürülmüş ve kaplamalar aşındırılmıştır. Meydana gelen izin iç ve dış çapları ölçülerek, kaplama kalınlıkları belirlenmiştir. Kaplama kalınlıkları, kaplama malzemelerinin diğer özellikleri ile birlikte Tablo 6.3.’de gösterilmiştir.

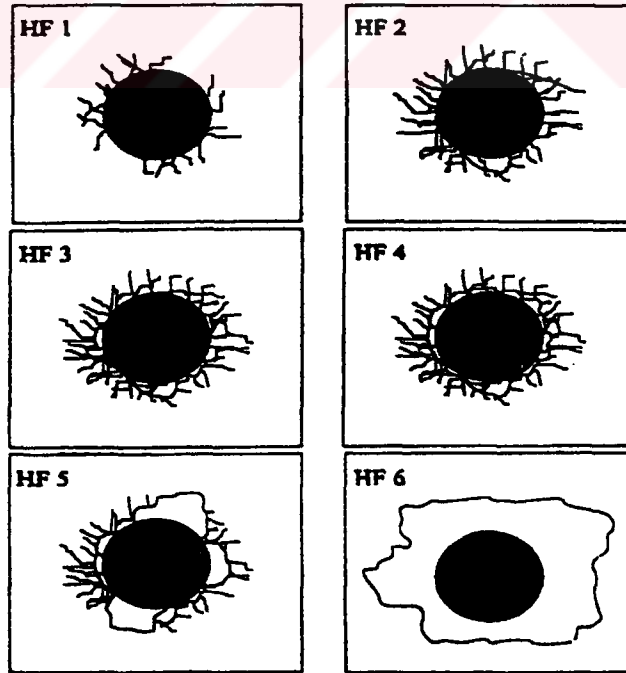
Tablo 6.2: Kaplama işleminde kullanılan ticari kaplama parametreler.

	CrN	TiN	TiAlN-T	TiAlN-D
Katod Akımı (A)	80	80	70-80 (Ti için katod), 50 (Al için katod)	70-80 (Ti katod için), 50 (Al katod için)
Bias Voltajı (V)	-150	-200	-150	-150
Basınç (torr)	6×10^{-3}	5×10^{-3}	5×10^{-3}	5×10^{-3}
Süre (dak.)	40	50	40	60
Kaplama Sıcaklığı (T°C)	400-500	400-500	400-450	400-450
Isıtma	Cr iyonları	Ti iyonları	Ti iyonları	Ti iyonları

Kaplamanın yapışma mukavemetinin belirlenmesinde Rockwell C deneyi kullanılmıştır[65]. Sertlik cihazında 150kg. yük altında oluşturulan izler optik mikroskopda 100x büyütme altında incelenmiştir. İzlerin standart değerleri Şekil 6.3’de gösterilmiştir. HF1-4 arasındaki değerler kaplama-taban malzemesi yapışma mukavemeti açısından “yeterli (uygun)”; HF5 ve HF 6 “yetersiz (uygun olmayan)” kaliteleri göstermektedir[65]. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, kaplamaların yapışma mukavemetinin nitel olarak HF3 olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6.3: Deneylerde kullanılan kaplama malzemelerinin özellikleri.

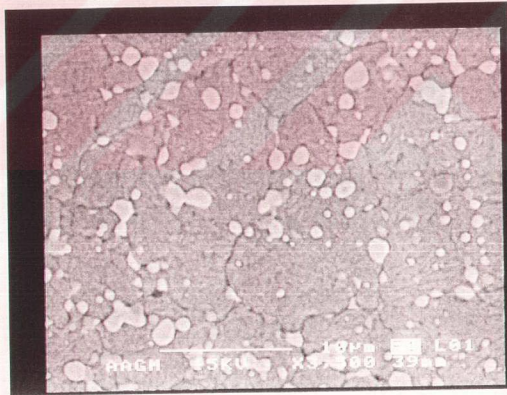
Malzeme	Yüzey Pürüzlülüğü (R_a μm)	Kaplama Kalınlık (μm)	Sertlik (H_v , kg.mm^{-2})
CrN	0.18	2.5	2940
TiN	0.22	2.5	3200
TiAlN-(T)	0.20	2	3900
TiAlN-(D)	0.20	2.9	3100



Şekil 6.3: Kaplama ve taban malzemeleri arasındaki yapışma mukavemetini gösteren kalitatif değerlendirme ölçeği[65].

6.4. Taban Malzeme

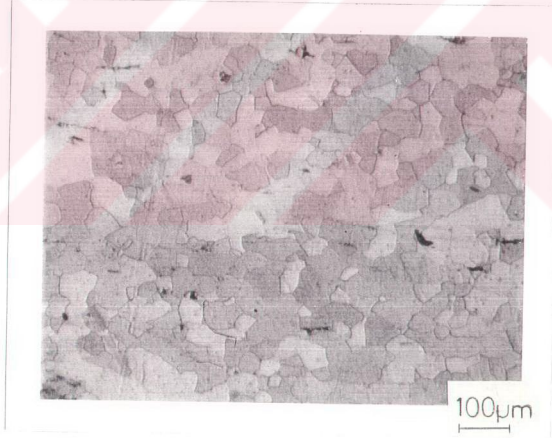
Taban malzeme olarak soğuk şekillendirme işlemlerinde sık olarak kullanılan yüksek hız takım çeliği, DIN 1.3343 kullanılmıştır[66]. Bu malzemenin nominal kimyasal bileşimi % ağırlık olarak Fe-4.16Cr-5Mo-1.9V-6.92W-0.9C-0.40Si-0.37Mn<0.0030P-<0.0030S'dür. Taban malzemenin sertliği 900 kg.mm⁻² (H_v) ve yüzey pürüzlülük değeri 0.17 µm (R_a) olarak belirlenmiştir. Yüksek hız takım çeliğinin metalografik yapısı, standart parlatma işlemlerinden sonra %5'lik nital çözeltisiyle kimyasal dağlamayı içermektedir. Şekil 6.4'de bu mikroyapı gösterilmiştir. Yüksek hız takım çeliği, martenzitik matriks içerisinde küreselleşmiş karbürlerin bulunduğu ve literatürde verilen mikroyapılarla uyumlu bir yapı olarak gözlenmektedir.



Şekil 6.4: Taban malzeme olarak kullanılan yüksek hız takım çeliğinin mikroyapısal görünümü.

6.5. Karşı Malzeme

Karşı malzeme olarak AISI 430 kalite ferritik paslanmaz çelik kullanılmıştır[66,67]. Karşı malzemenin nominal kimyasal bileşimi Fe-16.5Cr-0.048C-0.80Si-0.83Mn-0.001P-0.001S'dür. Karşı malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri ASTM E8M-89 standardına uygun olarak yapılmıştır[68]. Mekanik özelliklerin sonuçları Tablo 6.4.'de gösterilmiştir. Karşı malzemenin mikroyapısı, standart parlatma işlemi sonrasında yapılan Vilella çözeltisiyle kimyasal dağlama işlemini içermektedir ve Şekil 6.5'de gösterilmiştir. Ferritik paslanmaz çeliğin mikroyapısı, tek fazlı ve eş eksenli ferrit tanelerinden meydana gelmektedir ve literatürde verilen mikroyapılarla uyumludur.



Şekil 6.5: Karşı malzeme olarak kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mikroyapısal görünümü.

Tablo 6.4: Karşı malzeme olarak kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri ile standartlarda istenen değerleri[66,67].

	Akma Mukavemeti (min., MPa)		Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama (min.)	
	Hadde Yönüne Paralel	Hadde Yönüne Dik		Hadde Yönüne Paralel	Hadde Yönüne Dik
Standart Değerler	250	270	450-600	20	18
Ortalama Değerler	313.6	330.79	521.34	38.79	38.66

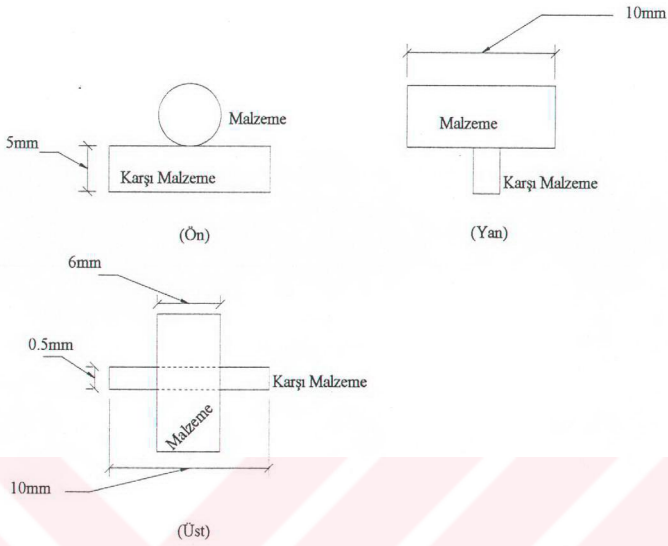
6.6. Kazımalı Aşınma Deney Parametreleri

Kazımalı aşınma parametreleri;

- a)Temas geometrisi
- b)Temas alanındaki gerilme,
- c)Yer değiştirme miktarı,
- d)Frekans,
- e)Göreceli rutubet,
- f)Ortam sıcaklığı

olarak ifade edilmiştir.

Kazımalı aşınma deneylerinde silindir-blok geometrisi kullanılmıştır[12]. Malzeme ve karşı malzeme konumları Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6: Malzeme ve karşı malzemenin temas geometrisinin şematik olarak gösterilişi.

Temas alanındaki gerilme; Hertz gerilme formülüne göre maksimum gerilme (σ_{maks}), olacak şekilde hesaplanmıştır[69,70].

$$\sigma_{maks} = 0.789 \sqrt{\frac{F_N}{t_k d_d \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_{e1}} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_{e2}} \right]}} \quad (6.1.)$$

Burada;

σ_{maks} =Maksimum temas gerilmesi (MPa),

F_N =Normal kuvvet (N),

t_k =Karşı malzemenin kalınlığı (mm),

d_d =Silindir çapı (mm),

ν_1 =Malzeme ve karşı malzemenin poisson oranları,

E_{e1} ve E_{e2} =Malzeme ve karşı malzemenin elastisite modülleri (MPa),

olarak ifade edilmektedir[69].

Bağıntı (6.1) aşağıdaki şekilde düzenlenebilir:

$$F_N = t_k d_d \left(\frac{\sigma_{maks}}{0.789} \right)^2 \left(\frac{1 - v_1^2}{E_{e1}} + \frac{1 - v_2^2}{E_{e2}} \right) \quad (6.2.)$$

Bağıntı (6.2) yardımı ile bir örnek teşkil edecek şekilde, temas alanında maksimum gerilmeyi meydana getirecek normal kuvvet hesaplanabilir. Bağıntı (6.2.) de kullanılan terimlerle ilgili olarak yüksek hız takım çeliği, AISI 430 paslanmaz çelik ve titanyum nitrüre için kullanılan değerler Tablo 6.5’de gösterilmiştir.

Tablo 6.5: Yüksek hız takım çeliği, paslanmaz çelik ve titanyum nitrüre ait özellikler[67,71-73].

Malzeme/Özellikler	HSS-Yüksek Hız Takım Çeliği	AISI 430 Paslanmaz Çelik	TiN
Elastisite Modülü (E, GPa)	230	200	260
Poisson Oranı (ν)	0.28	0.28	0.20

Tribosistemin daha yumuşak olan malzemesi olan AISI 430 ferritik paslanmaz çelik için minimum akma mukavemeti (σ_{akma}) (Tablo 6.4.de; yer alan standart değer, 250 MPa), maksimum temas gerilmesi olarak alındığında; tribosistemin elastik bölgede kalabileceği maksimum normal yük 2.5N olarak hesaplanmaktadır.

Deneylerde TiN kaplamalarda frekans-yük haritasının çıkartılabilmesi için 5-20Hz arasında değişen frekanslar kullanılmıştır. CrN, TiN, TiAlN(T) ve TiAlN(D) kaplamalarla 10Hz’lik frekans kullanılarak elde edilen kazımalı aşınma deney sonuçları karşılaştırma için kullanılmıştır. Frekans seçiminde ağırlık kaybının frekansa göre değişimini gösteren Şekil 5.6.’da görüldüğü gibi; ağırlık kaybının doğrusal olarak azaldığı ve kararlı bölgeye geçişi esas alınmıştır. Yer değiştirme miktarı olarak karşı malzemenin nominal kalınlığı olan 0.5mm (500µm) kullanılmıştır. Göreceli rutubet ve

ortam sıcaklığı bütün deneylerde; deney süresince gözlenmiştir. Ortam bütün deneylerde klimatize şartlarda yapılmış; bağıl rutubet %25-27, ortam sıcaklığı oda sıcaklığı 25°C olarak tesbit edilmiştir. Bütün deney sonuçları en az üç deney tekrarlandıktan sonra gösterilmiştir.

6.7. Işık ve Elektron Mikroskop Çalışmaları

Kaplama malzemesiyle taban malzeme arasında adhezyonun belirlenmesinde ışık mikroskop; kazımalı aşınma deneyleri sonucunda malzeme ve karşı malzemede oluşan aşınma hasarının incelenmesinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve aşınma hasarının meydana geldiği bölgede kimyasal bileşim analizinde taramalı elektron mikroskobuyla birlikte kullanılan enerji ayırmalı x-ışınları spektroskopisi (EDX) kullanılmıştır.

6.8. Aşınma Miktarının Belirlenmesi

Kazımalı aşınma deneyleri sonucunda kaplama malzemelerinde meydana gelen aşınma miktarları iz düşüm yöntemine göre belirlenmiştir. Bu yöntemde, kaplamalı malzeme yüzeyinde meydana gelen elips şeklindeki aşınma hasarının alanı esas alınarak aşınma miktarı belirlenmiştir. Karşı malzemede meydana gelen aşınma miktarları ise mm³ cinsinden,

$$W_k = \frac{d_d^2 b_w}{8} (\beta - \sin \beta) \quad (6.3)$$

formülü kullanılarak hesaplanabilmektedir[22,69]. Burada;

W_k =Karşı malzemede meydana gelen aşınma hacmi,

d_d =Silindir çapı (malzeme),

b_w =Karşı malzemenin ortalama genişliği,

β =Dairesel kesimin açısı,

olarak verilmiştir[22,69].

BÖLÜM 7. DENEY SONUÇLARI ve İRDELENMESİ

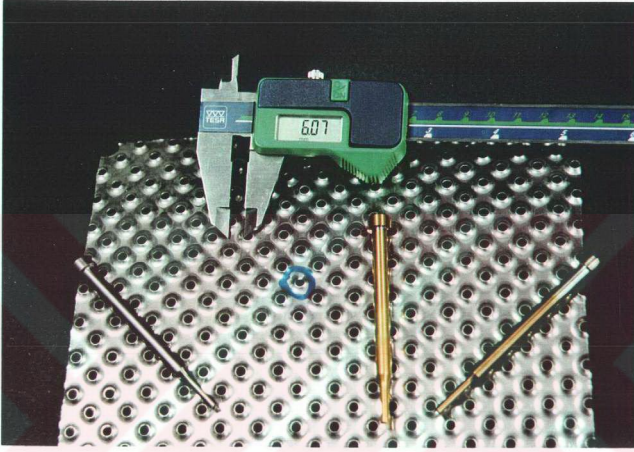
7.1. Endüstriyel Çalışmaların Sonuçları ve İrdelenmesi

Bu tez çalışmasının kapsamında yapılan endüstriyel çalışmalarda ark-PVD yöntemi kullanılarak yapılmış CrN, TiN, TiAlN-T ve TiAlN-D kaplamalı zımbalar ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik zımbalama işleminde ilk defa kullanılmıştır. Kaplamalı zımbalardaki aşınma hasarı; 45000, 120000 ve 150000 delik delindikden sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Zımbalama işlemi sırasında kullanılan nominal 0.5mm kalınlığındaki AISI 430 kalite paslanmaz çelik üzerinde elde edilen delikler, çeşitli kaplamalı zımbalar ve oluşan hasarın detayı Şekil 7.1.'de gösterilmiştir. Kaplamasız zımbalarla açılmış olan deliklerde meydana gelen çapaklanma mavi halka içerisinde işaretlenmiştir.

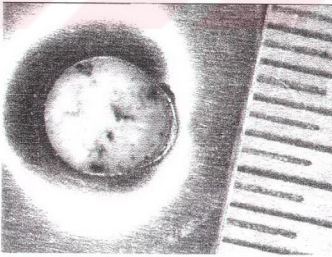
CrN kaplamalı zımbanın sırasıyla 45000, 120000 ve 150000 delik deldikten sonraki alın yüzeyi, kesme kenarı ve silindirik yüzeylerine ait görüntüler Şekil A.1-Şekil A.3.'de gösterilmiştir. Şekil A.1.'de kesme kenarı ve alın yüzeyi incelendiğinde; alın yüzeyinin oldukça düzgün ve hasarsız olduğu, ancak kesme kenarında, silindirik yüzey üzerinde belirgin olarak bir hasarın başladığı görülmektedir. Benzer bir durum 120000 delik deldikten sonra incelenen CrN kaplamalı zımbada da gözlenmiştir (Şekil A.2). 150000 delik deldikten sonra incelenen CrN kaplamalı zımbanın delik delme işleminden sonra elde edilen görüntüleri Şekil A.3.'de gösterilmiştir. CrN kaplamalı zımbada silindirik yüzeyde görülen hasarın genişlediği ve hasarın çevresel yüzey çatlaklarına benzediği görülmektedir.

Zımbalama işleminde 45000 deldikten sonra TiN kaplamalı zımbaya ait elektron mikroskobu görüntüleri Şekil A.4.'de gösterilmiştir. Silindirik yüzeyde kesme kenarına yakın bölgeler ve altında deformasyon gözlenmiştir. 120000 delik delmeden sonra TiN kaplamalı zımbaya ait fotoğraflar Şekil A.5'de gösterilmiştir. Alın

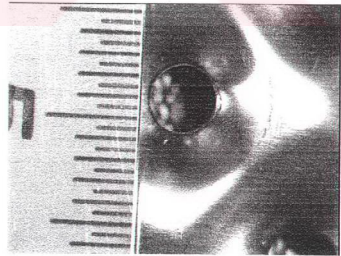
yüzeyinde deformasyon gözlemlenirken, silindirik yüzeyde kesme kenarına yakın bölgede yüzey çatlaklarının başladığı görülmektedir. 150000 delik delindikden sonra TiN kaplamalı zımbadan elde edilen görüntüler Şekil A.6.'da gösterilmiştir. Aynı koşullardaki CrN kaplamalı zımbada olduğu gibi (Şekil A.3) silindirik yüzeyde çevresel yüzey çatlaklarıyla kaplı bir alan gözlenmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.1: a)Endüstriyel zımbalama işlemi sonrasında paslanmaz çelik ve kaplamalı zımbaların görünümü.b) ve c) Karşı malzemede meydana gelen hasarın detay görünümü.

TiAlN-T kaplamalı zımbanın 45000 delik deldikten sonra elde edilen elektron mikroskobu fotoğrafları Şekil A.7.'de gösterilmiştir. Zımba alın kısmında büyük oranda dökülmeler ve deformasyon izleriyle beraber, silindirik yüzeyde aşınma hasarından kaynaklanan bölgeler gözlenmiştir. TiAlN-T kaplamalı zımbanın 120000 delik deldikten sonra gözlenen durumu, 45000 delik deldikten sonraki durumla hemen hemen aynıdır. 150000 delik deldikten sonra TiAlN-T kaplamalı zımbaya ait elektron mikroskobu fotoğrafları Şekil A.8.'de gösterilmiştir. Alın yüzeyindeki hasarın artarak devam ettiği ve kesme kenarı ile alın yüzeyinin kesiştiği, kesme kuvvetinin en yüksek olduğu bölgede kaplamanın tamamen kalkmış olduğu gözlenmektedir. Silindirik yüzeyde aşınma ile birlikte çevresel yüzey çatlakları bulunmaktadır.

TiAlN-D kaplamalı zımbanın 45000 delik deldikten sonraki elektron mikroskobu görüntüleri Şekil A.9.'da gösterilmiştir. Zımba alın yüzeyinde, kesme kenarı ve silindirik yüzeyde her hangi bir aşınma gözlenmemektedir. Yan yüzeyde küçük karıncalanmalar ile birlikte deformasyon izleri gözlenmiştir. 120000 delik delindikden sonra gözlenen TiAlN-D kaplamalı zımbada da alın, kesme kenarı ve silindirik yüzeyde aşınma hasarı gözlenmemiştir. 150000 delik deldikten sonra incelenen TiAlN-D Şekil A.10.'da gösterilmiş ve kaplamalı zımbanın alın yüzeyinde her hangi bir aşınma hasarı gözlenmemesine karşın, silindirik yüzey ile kesme kenarının kesiştiği bölgede aşınma hasarından kaynaklanan küçük bir bölge gözlenmektedir. Silindirik yüzeyde, kaplamanın sürekliliğini devam ettirdiği ancak yüksek sürtünme kuvvetlerinden kaynaklanan çiziklerin meydana geldiği gözlenmektedir.

Yapılan endüstriyel çalışmalar; kullanılan inceleme yöntemi açısından değerlendirildiğinde, bütün kaplamalı zımbalarda artan delik sayısı ile aşınma hasarının bir önceki durumla aynı veya daha fazla olduğu gözlenmiştir. Genel olarak aşınma hasarı; bütün zımbalarda, kesme kuvvetinin en yüksek olduğu kesme kenarından başlamayarak silindirik yüzeyde genişlemektedir. Nilsson tarafından yapılan çalışmalarda; soğuk iş takım çeliğinden yapılmış olan zımbaların silindirik yüzeyinde görülen derin çiziklere benzeyen; tel çekme işleminde yüksek sürtünme kuvvetlerinin oluşturduğu durumlarda da görülen [62,74], çevresel yüzey çatlakları CrN, TiN ve

TiAlN-T kaplamalı zımbalarda meydana gelmesine rağmen; TiAlN-D kaplamalı zımbalarda aşınma hasarı çok az olduğu için çevresel yüzey çatlaklarına rastlanmamıştır. Bütün kaplamalı zımbalarda soğuk kaynak şeklinde gözlenen adhezif aşınma hasarı ve kaplamalı zımbalarla açılan deliklerde karşı malzemede çapak oluşumu gözlenmemiştir. Taramalı elektron mikroskobu incelemelerinin sonucunda; kaplamalı zımbalar arasında en az aşınma hasarı, TiAlN-D kaplamalı zımbada; en yüksek aşınma hasarı ise CrN kaplamalı zımbada meydana geldiği söylenebilir.

Podop ve Richter ile Teeter'in yaptıkları endüstriyel çalışmalarda; TiN ve TiCN kaplamalı zımbaların 150000 delik delme sayılarına ulaştığı belirtilmektedir[58,59]. Bu anlamda gelecekte; TiCN kaplama ile çok katlı kaplamaların endüstriyel zımbalama işlemlerinde kullanımının yaygınlaşacağı düşünülebilir. Riedel, akımsız nikel kaplamanın da şekil verme kalıplarında endüstriyel olarak uygulanabileceğini ifade etmiştir[12]. Ancak, akımsız nikel kaplama uygulamalarında elde edilen en yüksek sertlik değerinin ($1100 H_v$, $kg.mm^{-2}$) ark-fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle elde edilen kaplamalardan oldukça düşük olması, bu tür uygulamalarda akımsız nikel kaplamaların daha yüksek performans gösteremeyeceğinin işaretidir.

Kesme işleminde kullanılan malzemelerindeki gelişmeler; örneğin, ağırlıkça %4, 6 ve 10 V elementi içeren yüksek karbonlu kitle halinde toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş çeliklerin kullanımı önem kazanmaktadır. Bu tür malzemelerin uygulamada AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin kesme ve derin çekme operasyonlarında gösterdikleri başarı kullanım potansiyellerini arttırmaktadır. Ancak hacımsal olarak bu malzemelerin kullanımında önemli değerlendirme kriterlerinden biri ekonomik kullanımdır. Ürün sayılarının yüksek olduğu durumlarda bu malzemelerinin kullanımları, benzeri malzemelere göre ekonomik olmaktadır. Bu tür yüksek alaşımlı çelik malzemeler ile ince sert seramik kaplamaların, paslanmaz çeliğin kesme ve şekil verme işlemlerinde birlikte kullanımları endüstriyel anlamda başarılı olabilir.

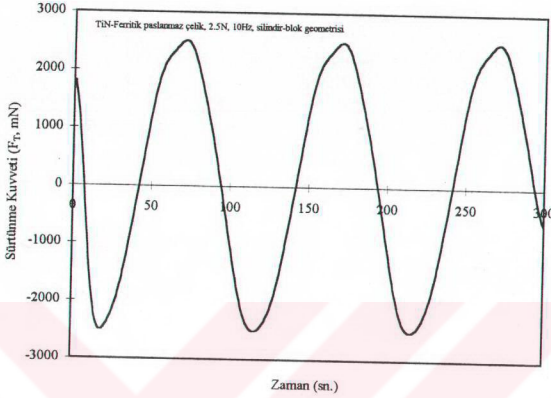
Endüstriyel zımbalama işleminde kullanılan malzemeler kadar zımba geometrisinin önemli olduğu göz önünde tutulmalıdır. Bu çalışmada kullanılan ve Şekil 6.2'de gösterilen zımba geometrisi (uç kısmı profilli, alın kısmı düz kademeli delik zımbası) el ile kontrol edilebilen taşlama tezgahlarında, her hangi bir işçi niteliği gerektirmeden

taşlanabilmektedir. Bu anlamda ekonomik ve kolay tamir edilebilen bu zimbalar, kesme etkinliği ve aşınma açısından diğer kullanılacak geometrilere göre daha zayıf gözükmetedir. İç bükey (koni-çanak) veya çift yollu zimba geometrileri gibi daha iyi kesme yapabilen zimba geometrilerinin kullanımı, özel profil taşlama ve nitelikli işçilik gereksinimi nedeniyle daha pahallıya mal olacaktır.

7.2. Kazımalı Aşınma Deney Sonuçları ve İrdelenmesi

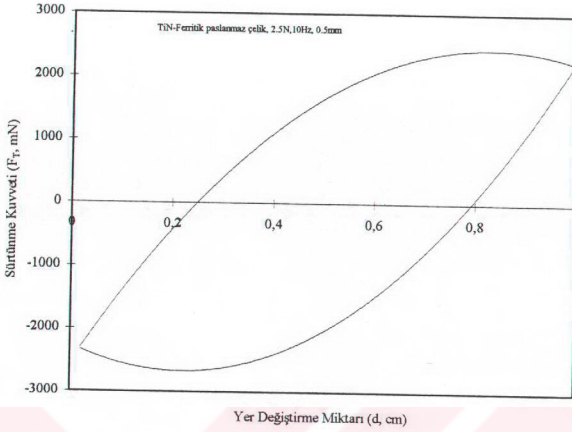
Paslanmaz çelikler ile ilgili tribolojik çalışmalar, çoğunlukla ostenitik paslanmaz çelikler ve martenitik paslanmaz çeliklerin aşınma davranışlarını içermektedir[22,37]. Genel olarak paslanmaz çeliklerin korozyon dirençleri ve termal kararlılıkları iyi olduğundan kazımalı aşınma uygulamalarında tercih edilebilir[22]. Literatürde TiN sert seramik kaplama ile yüksek Cr içeren karşı malzeme triboçiftinde yapılmış kazımalı aşınma çalışmaları bulunmaktadır. Ancak; bu çalışmada kullanılan yüksek Cr içerikli karşı malzeme DIN 1.3505 olarak bilinen çelik malzemedir[40,66,67] ve bu malzemenin kimyasal bileşiminde Cr elementi içeriği %1.40-1.65(Ağ.) arasında bulunmaktadır[40,66,67]. Bu nedenle, bu tez çalışmasında malzeme olarak kullanılan kaplamalar (CrN, TiN, TiAlN-T ve TiAlN-D) ile karşı malzeme olarak kullanılan ferritik paslanmaz çelik (AISI 430) triboçiftlerinin kazımalı aşınma davranışları ilk defa incelenmektedir.

Kazımalı aşınma deneyleri frekansa bağlı olarak değişen zamanlarda yapılmış ve çevrim sayısı 18×10^3 olacak şekilde tamamlanmıştır. Deneylerde doğrusal yer değiştirme (Tip I) hareketi kullanılmıştır. Deneyler sırasında klimatize ortamda bağıl rutubet sürekli kontrol edilmiş ve bağıl rutubetin değeri %25-27 olarak tesbit edilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında, 25°C'da yapılmıştır. En az üç deney ortalaması deney sonucu olarak gösterilmiştir. Toplam yer değiştirme süresi sabit olduğundan; yer değiştirme sırasında meydana gelen sürtünme kuvveti değişimi, zamana göre ölçülmüştür. Şekil 7.2'de sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi, örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.2: Sürtünme kuvvetinin zamana göre değişimi. TiN-ferritik paslanmaz çelik triboçifti, 2.5N, 10Hz, 0.5mm yer değiştirme miktarı, silindirik-blok geometrisi.

Elde edilen grafikde doğrusal yer değiştirme karakteristiği kullanılarak zaman yerine yer değiştirme miktarı bir çevrim için kullanılırsa, yer değiştirme sırasında sürtünme kuvvetinin değişimine göre bir histeresis eğrisi elde edilir. Şekil 7.3'de bu histeresis eğrisine bir örnek gösterilmiştir. Histeresis eğrisi içerisinde kalan alan, meydana gelen çevrim için harcanan enerjiyi (E) vermektedir. Yer değiştirme miktarı ekseninin eğrileri kestiği noktalardaki değerler üzerinden, temas alanındaki kayma miktarı (s) ve kazımalı aşınma sabiti (r) belirlenebilir.



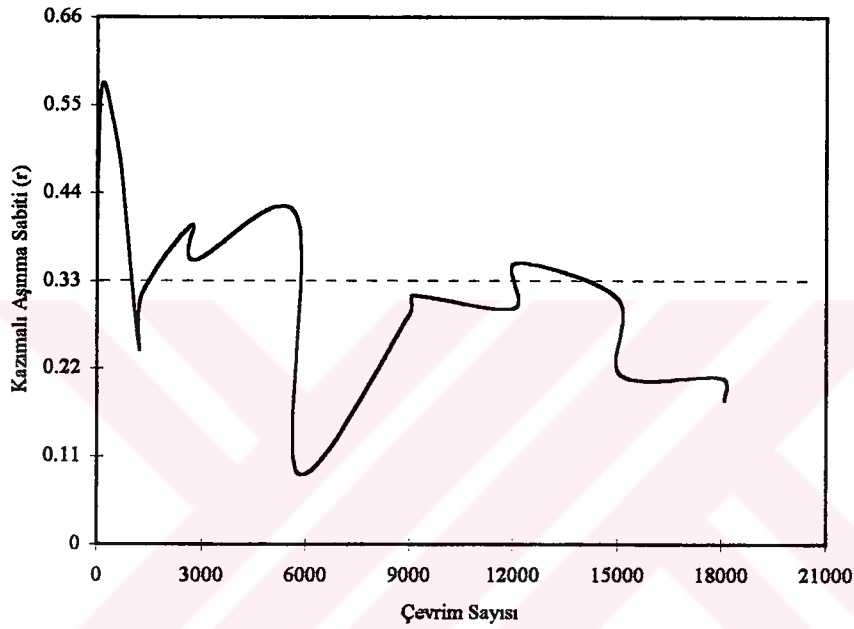
Şekil 7.3: Her hangi bir çevrimde sürtünme kuvvetinin yer değiştirme miktarına göre değişimi. TiN-ferritik paslanmaz çelik triboçifti, 2.5N, 10Hz, 0.5mm, silindir-blok geometrisi.

Kazımalı aşınma deneyleri iki bölüm halinde yapılmıştır. İlk bölümde, TiN kaplamalı yüksek hız takım çeliği ferritik paslanmaz çeliğe karşı farklı yük ve farklı frekanslarda kazımalı aşınma deneylerine tabi tutulmuştur.

Farklı yük ve frekansla elde edilen deney sonuçları; kazımalı aşınma mekanizmalarının incelenmesi amacıyla, kazımalı aşınma sabitleri (r) karşılaştırılmıştır. Kısmi kayma ve kayma mekanizmalarının normal kuvvet-frekans değişimine göre bölgesel olarak yerleri incelenmiştir. Kazımalı aşınma sabitinin (r) sayısal değerinin 0.33 olduğu durum kısmi kayma-kayma geçiş kriteri olarak kullanılmıştır. İkinci bölümde kayma karakteristiğinin görüldüğü koşullarda farklı kaplamaların sabit yük ve frekansda ferritik paslanmaz çelik karşısındaki kazımalı aşınma davranışları, sürtünme katsayıları kullanılarak karşılaştırılmıştır.

7.2.1. Farklı Yük ve Frekansa Titanyum Nitrür-Ferritik Paslanmaz Çelik Triboçiftinin Kazımalı Aşınma Deney Sonuçları ve İrdelenmesi.

Normal yük 1N, frekans 5Hz, 0.5mm. yer değiştirme miktarı ve silindir-blok geometrisi koşullarında, TiN-ferritik paslanmaz çelik triboçiftinin kazımalı aşınma deneyleri sonucunda elde edilen kazımalı aşınma sabitinin değişimi Şekil 7.4'de gösterilmiştir.

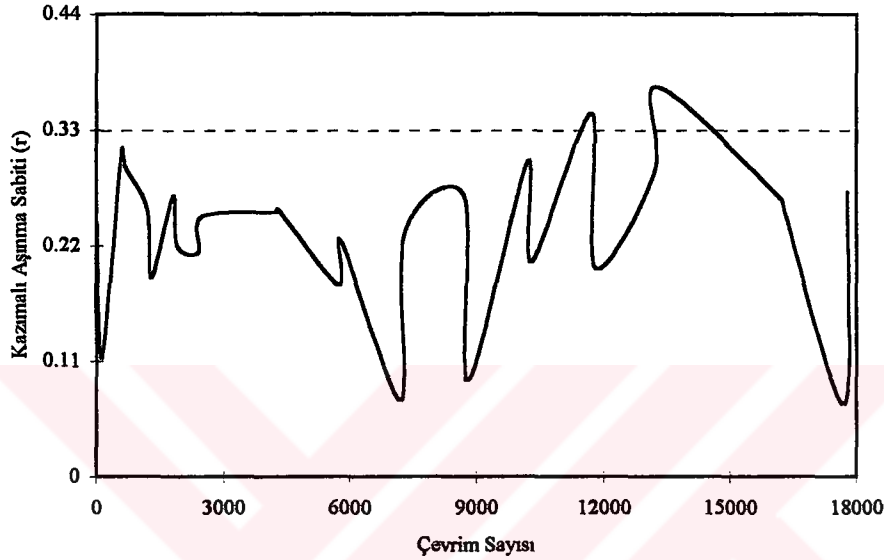


Şekil 7.4: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (1N, 5Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.

Şekil 7.4'de görüldüğü gibi, kazımalı aşınma sabiti değişimi incelendiğinde; yaklaşık 1000 çevrime kadar kayma karakteristiğinin kazımalı aşınmaya hakim olduğu; ani bir azalmayla 1500 çevrime kadar kısmi kayma karakteristiğinin gözlemlendiği görülmektedir. Daha sonra yaklaşık 6000 çevrime kadar tekrar kayma karakteristiği kazımalı aşınmaya hakim olduğu ve 6000 ile 12000 çevrim arasında kazımalı aşınma sabiti kısmi kayma-kayma geçiş kriterinin altına düştüğü, ancak çok kısa bir süre yaklaşık 1000 çevrim daha (13000 çevrime kadar) kayma mekanizması sisteme hakim olmuştur. 13000 çevrimden sonra tekrar kısmi kayma karakteristiğinin ortaya çıktığı gözlenmektedir. Deney boyunca elde edilen kazımalı aşınma sabitleri (r) kısmi kayma-

kayma geçiş kriterine göre değerlendirildiğinde, ortalama kazımalı aşınma sabiti 0.33 değeriyle sınırda bulunmaktadır.

Normal yük 1.5N, frekans 5Hz, 0.5mm yer değiştirme miktarı ve silindir-blok geometrisi koşullarında aynı triboçift için elde edilen kazımalı aşınma sabiti değişimi şekil 7.5'de gösterilmiştir.

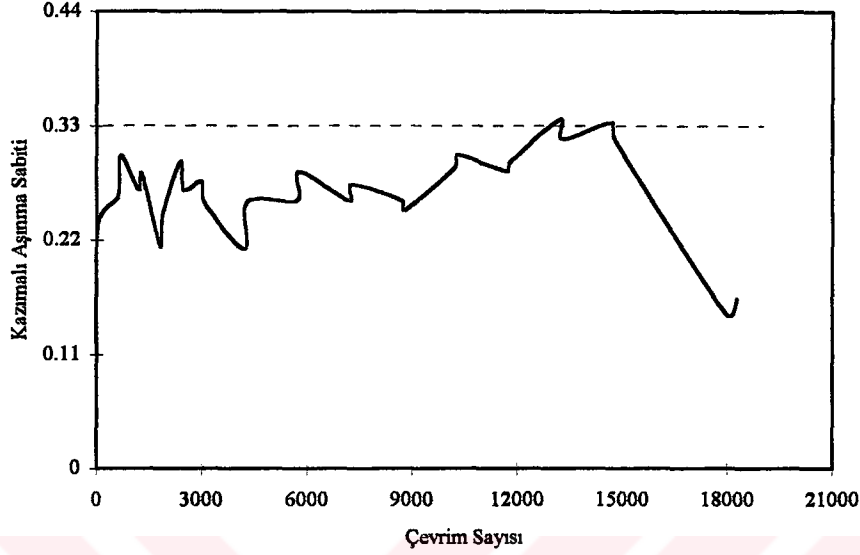


şekil 7.5: TiN-Feritik paslanmaz elik (1.5N, 5Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.

şekil 7.5.'de elde edilen kazımalı aşınma sabiti değişimi incelendiğinde; deney boyunca elde edilen bütün kazımalı aşınma sabitleri (r) kısmi kayma-kayma geçiş kriterinin altındadır ve ortalama kazımalı aşınma sabiti 0.23 olarak bulunmuştur. Bu koşullarda kazımalı aşınmaya tamamen kısmi kayma karakteristiğinin hakim olduğu gözlenmektedir.

Normal yük artırılarak 2N olduğunda aynı koşullarda TiN-feritik paslanmaz elik triboçift için elde edilen kazımalı aşınma sabiti değişimi şekil 7.6.'da gösterilmiştir. şekil 7.6.'da görülen kazımalı aşınma sabiti değişimi incelendiğinde; daha önceki koşullarda elde edilen deney sonuçlarına benzer şekilde, deney boyunca elde edilen kazımalı aşınma sabitleri (r) kısmi kayma-kayma geçiş kriterinin altındadır ve ortalama

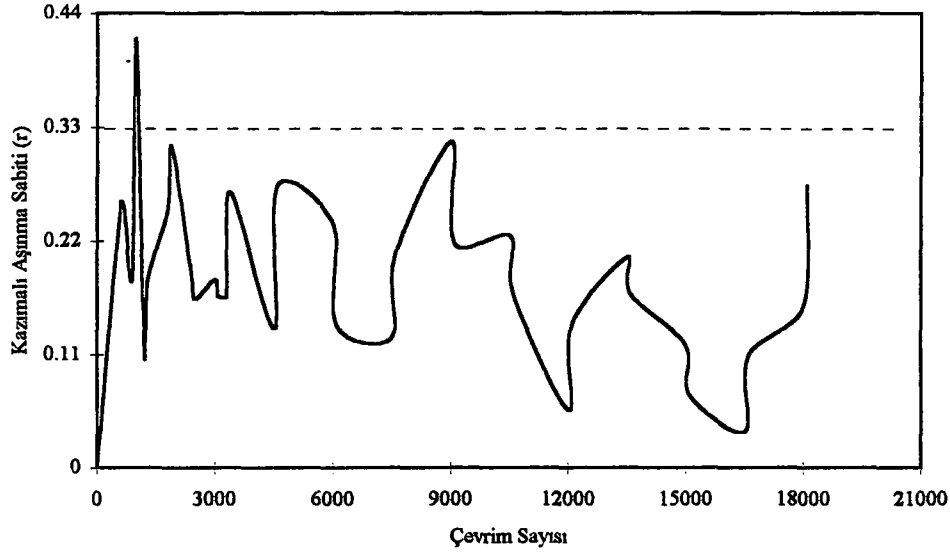
kazımalı aşınma sabiti 0.26 değerindedir. Aynı koşullarda ancak yük 2.5N olan TiN-ferritik paslanmaz çelik triboçifti için elde edilen kazımalı aşınma sabiti değişimi Şekil 7.7.'de gösterilmiştir.



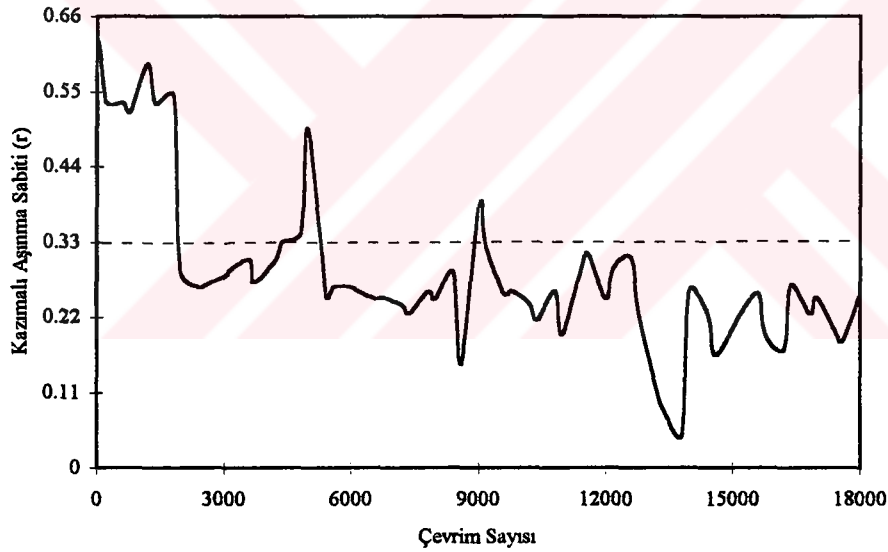
Şekil 7.6.: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (2N, 5Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.

Şekil 7.7.'de görülen kazımalı aşınma sabiti değişimi incelendiğinde; kazımalı aşınma karakterinin bütün deney boyunca kısmi kayma karakterinde olduğu gözlenmektedir. Deney boyunca elde edilen kazımalı aşınma sabitleri (r) kısmi kayma-kayma geçiş kriterinin altında ve ortalama kazımalı aşınma sabiti 0.19 olarak gözlenmiştir.

Normal yük 1.5N, frekans 10Hz, 0.5mm yer değiştirme miktarı ve silindir-blok geometrisi koşullarında aynı TiN-ferritik paslanmaz çelik triboçifti için elde edilen kazımalı aşınma sabiti değişimi Şekil 7.8.'de gösterilmiştir. Şekil 7.8'de elde edilen kazımalı aşınma sabiti değişimi incelendiğinde; ilk 2000 çevrime kadar kayma karakteristiği gösteren kazımalı aşınma daha sonra kısmi kayma-kayma geçiş kriterinin altında ve üstünde değerler olarak yaklaşık 12500 çevrime kadar ilerlemiştir. Bu çevrim sayısından sonra kısmi kayma karakteristiğinin kazımalı aşınmaya hakim olduğu görülmektedir. Deneyler sonucunda elde edilen kazımalı aşınma sabitleri (r) değerlendirildiğinde; ortalama kazımalı aşınma sabiti 0.33 değeriyle kısmi kayma-kayma karakteristiklerinin sınırındadır.



Şekil 7.7.: TiN-Feritik paslanmaz çelik (2.5N, 5Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.



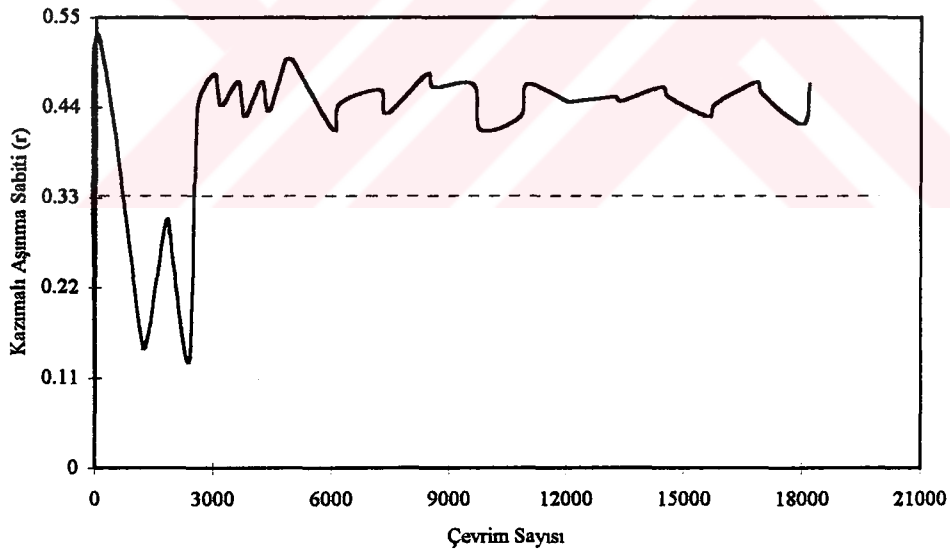
Şekil 7.8.: TiN-Feritik paslanmaz çelik (1.5N, 10Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.

Aynı koşullarda yük 2N'a arttırıldığında, TiN-feritik paslanmaz çelik triboçifti için elde edilen kazımalı aşınma sabiti değişimi Şekil 7.9'da gösterilmiştir. Şekil 7.9'da görüldüğü gibi kazımalı aşınma sabiti (r); yaklaşık 670 çevrimde aniden azalarak kısmi kayma-kayma geçiş kriterinin altına düşmüş ve 2500 çevrimden sonra da geçiş kriterinin üstündeki bir değerle deney sonuna kadar devam etmiştir.

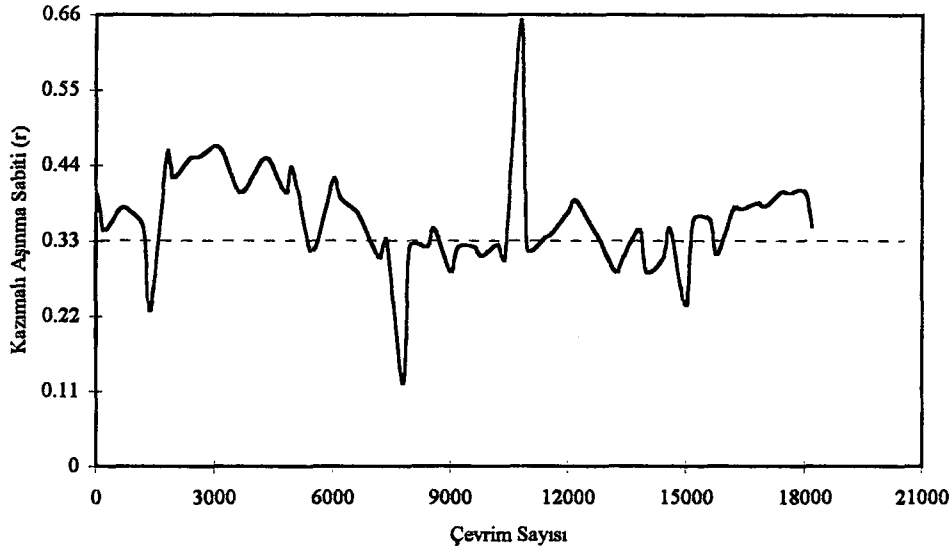
Deney boyunca elde edilen kazımalı aşınma sabitleri (r) değerlendirildiğinde ortalama kazımalı aşınma sabiti 0.42 değerindedir.

Yük diğer koşullar değiştirilmeksizin 2.5N'a çıkarıldığına TiN-ferritik paslanmaz çelik triboçifti için elde edilen kazımalı aşınma sabiti Şekil 7.10'de gösterilmiştir. Kazımalı aşınma sabitinin değişiminin genel olarak kısmi kayma-kayma geçiş kriteri; 0.33 değerinin üzerinde olduğu gözlenmiştir. Deney sonucunda elde edilen kazımalı aşınma sabitleri (r) değerlendirildiğinde ortalama kazımalı aşınma sabiti 0.36 değerindedir.

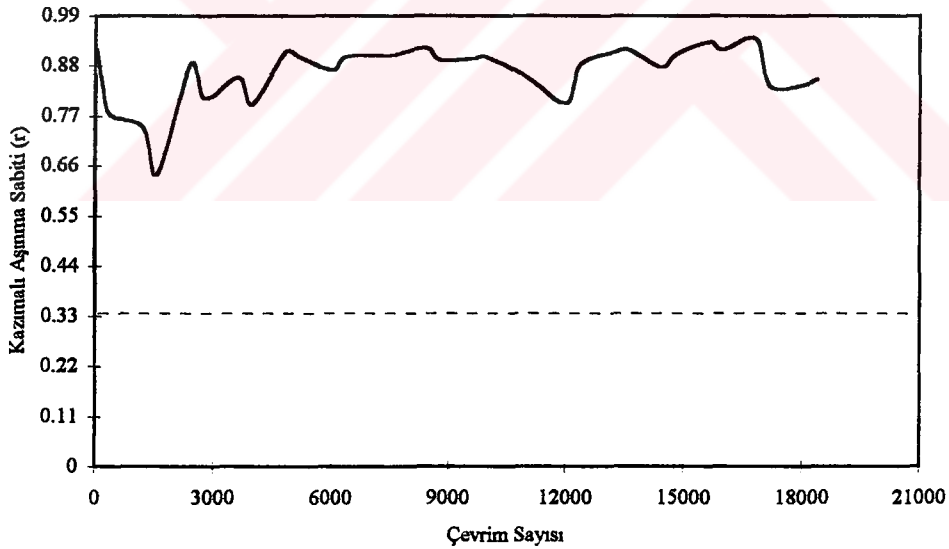
Normal yük 1N, frekans 20Hz, 0.5mm. yer değiştirme miktarı ve silindir-blok geometrisi koşullarda TiN-ferritik paslanmaz çelik triboçifti için elde edilen kazımalı aşınma sabiti değişimi Şekil 7.11'de gösterilmiştir. Şekil 7.11.'de görüldüğü gibi kazımalı aşınma sabiti değişimi genel olarak kısmi kayma-kayma geçiş kriterinin çok üzerinde olup ortalama kazımalı aşınma sabiti 0.87 değerindedir.



Şekil 7.9.: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (2N, 10Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.



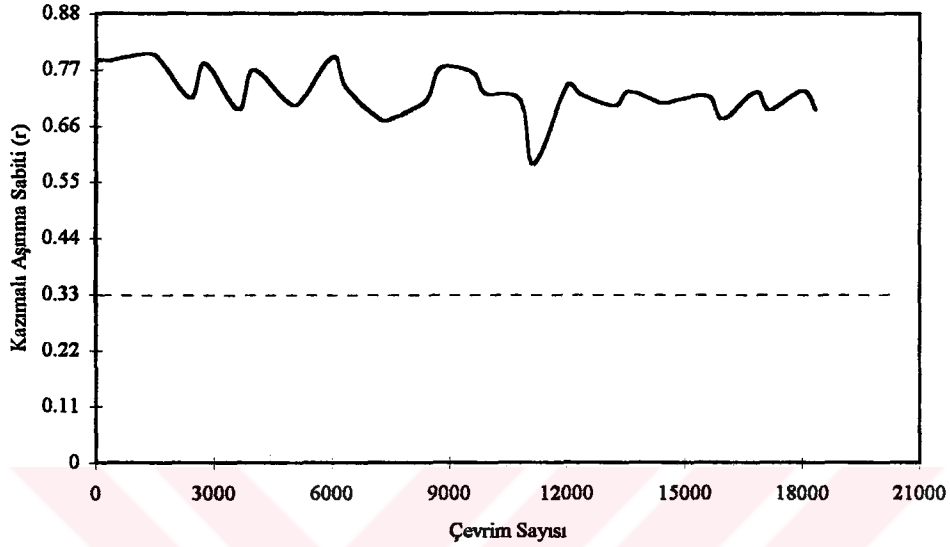
Şekil 7.10: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (2.5N, 10Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.



Şekil 7.11.: TiN-Ferritik paslanmaz çelik (1N, 20Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.

Frekans, yer değiştirme miktarı ve çevrim sayısının aynı, ancak yükün 2.5N olduğu koşullarda TiN-ferritik paslanmaz çelik için elde edilen kazımalı aşınma sabiti ve enerji değişimi sonuçları Şekil 7.12’de gösterilmiştir. Şekil 7.12 incelendiğinde; kazımalı

aşınma sabiti değişimi, bir önceki şartlardakine benzer olarak kısmi kayma-kayma geçiş kriterinin çok üzerindedir ve ortalama kazımalı aşınma sabitinin 0.73 değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Farklı frekans ve yüklerde yapılan kazımalı aşınma deneylerinde elde edilen ortalama kazımalı aşınma sabitleri Tablo 7.1’de özetlenmiştir.



Şekil 7.12: TiN-Feritik paslanmaz çelik (2.5N, 20Hz, 0.5mm., silindir-blok geometrisi) için çevrim sayısına göre kazımalı aşınma sabiti değişimi.

Tablo 7.1: Farklı frekans ve normal kuvvet koşullarında yapılan kazımalı aşınma deneyleri sonucunda elde edilen ortalama kazımalı aşınma sabiti (r) değerleri.

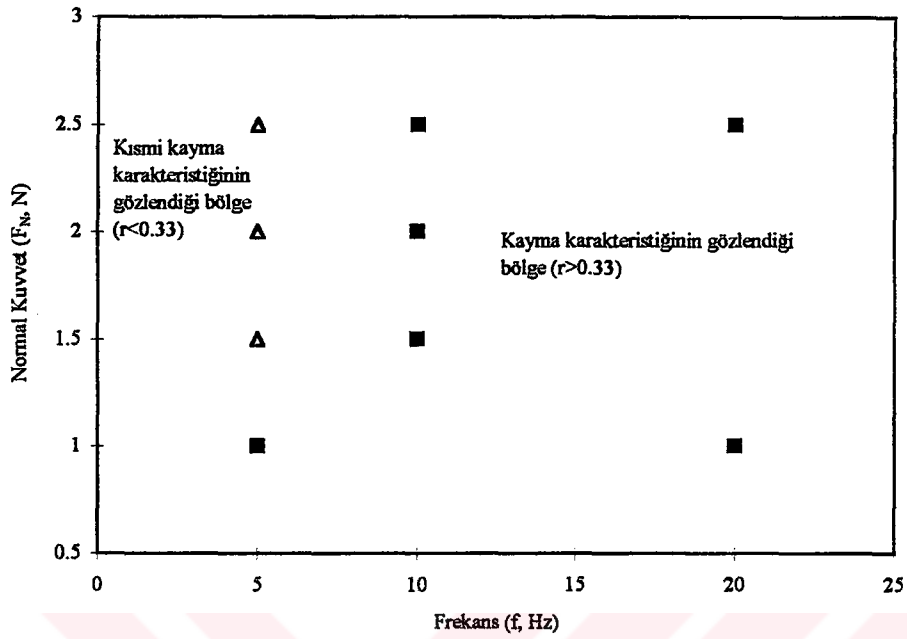
Normal Kuvvet (N)	Frekans (Hz)		
	5	10	20
1	0.33		0.87
1.5	0.23	0.33	
2	0.26	0.42	
2.5	0.19	0.36	0.73

Kazımalı aşınma deneyleri sonrasında AISI 430 ferritik paslanmaz çelik karşı malzeme yüzeylerinde meydana gelen aşınma taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiş ve bu yüzeylerden x-ışınları nokta analizleri (EDX) alınmıştır (Şekil A.11-A.28). Açık ve koyu olarak adlandırılan bölgelerden alınan x-ışınları nokta analizlerinin sonuçları Tablo 7.2’de özetlenmiştir. Karşı malzeme olarak kullanılan

AISI 430 kalite ferritik paslanmaz çelik yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopunda incelenmesi sırasında alınan x-ışınları nokta analizlerine göre, düşük frekanslı bölgelerde Ti ve N elementleri belirlenmiştir. Karşı malzeme yüzeyinde Ti ve N bileşiminin varlığı ve açık/koyu bölgelerdeki bileşim farklılığı kaplama malzemesinden karşı malzeme yüzeyine malzeme taşınımının meydana geldiğini göstermektedir. Bu durumun kazımalı aşınma deneylerinde seçilen çevrim sayısı boyunca kazımalı aşınma sabitleri (r) kısmi kayma-kayma geçiş kriteri 0.33 değerinin altında kalınan koşullarda bulunan karşı malzeme yüzeylerinde ortaya çıkması, kısmi kayma koşullarında karşı malzemeye kaplamalı malzemedan malzeme taşınımının olduğunu göstermektedir. Kazımalı aşınma deneylerinde elde edilen kazımalı aşınma sabitleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilen x-ışınları sonuçlarının (EDX) birlikte değerlendirilmesiyle normal kuvvet-frekans haritası oluşturulabilir (Şekil 7.13). TiN kaplama-ferritik paslanmaz çelik triboçifti için normal kuvvet-frekans değişimi haritası incelendiğinde (Şekil 7.13) genel olarak düşük frekanslı ($f < 5\text{Hz}$) bölgelerde kazımalı aşınmada kısmi kayma karakterinin ortaya çıktığı söylenebilir.

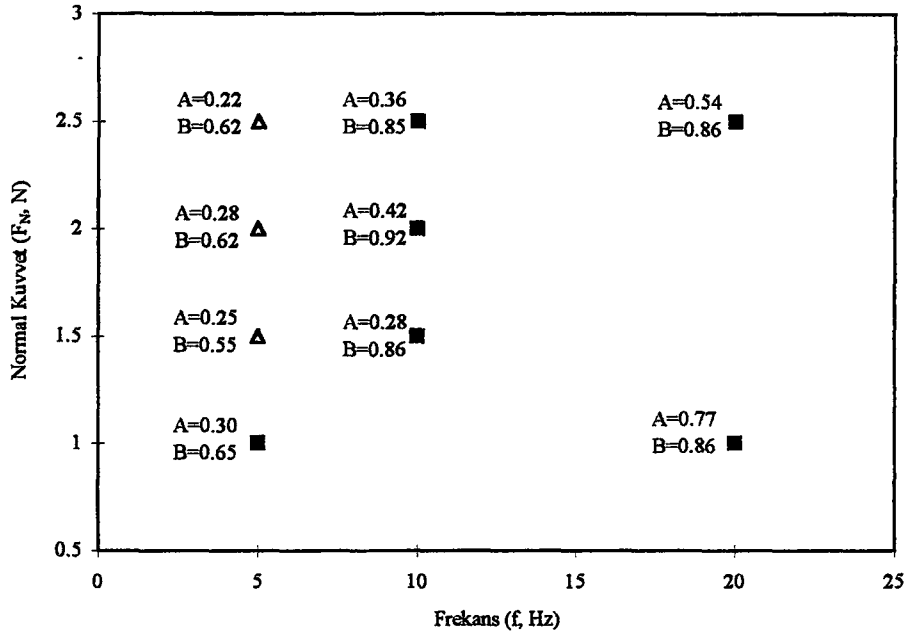
Tablo 7.2: Kazımalı aşınma deneyleri sonucunda karşı malzeme olarak kullanılan AISI 430 kalite ferritik paslanmaz çelik üzerindeki aşınmış yüzeydeki açık ve koyu bölgelerden alınan x-ışınları nokta analiz sonuçları.

Koşul	Bölge	Elementler (% Ağırlık)				
		Fe	Cr	Si	Ti	N
1N, 5Hz	Açık	83.42	15.85	0.73	-	-
	Koyu	84.20	14.96	0.84	-	-
1.5N, 5Hz	Açık	77.16	16.06	0.53	0.17	6.08
	Koyu	43.31	8.17	1.27	32.4	14.85
2N, 5Hz	Açık	79.45	16.07	0.45	0.28	3.75
	Koyu	19.96	2.46	0.71	59.83	17.04
2.5N, 5Hz	Açık	75.64	15.20	0.39	3.21	5.56
	Koyu	47.24	10.51	0.39	27.57	14.29
1.5N, 10Hz	Açık	83.28	15.99	0.73	-	-
	Koyu	83.42	15.85	0.73	-	-
2N, 10Hz	Açık	82.74	16.53	0.73	-	-
	Koyu	83.42	15.85	0.73	-	-
2.5N, 10Hz	Açık	82.51	16.76	0.73	-	-
	Koyu	83.42	15.85	0.73	-	-
1N, 20Hz	Açık	83.42	15.85	0.73	-	-
	Koyu	83.35	15.85	0.80	-	-
2.5N, 20Hz	Açık	83.11	16.16	0.73	-	-
	Koyu	82.82	16.45	0.73	-	-



Şekil 7.13: Frekans ve normal kuvvet değişimine bağlı olarak TiN-ferritik paslanmaz triboçiftinde kısmi kayma ve kayma karakteristiklerinin belirlendiği kazımalı aşınma mekanizması haritasının görünümü.

Literatürde kısmi kayma-kayma geçiş kriteri olarak çok farklı kazımalı aşınma sabitleri kullanılmıştır (Tablo 5.1.) [40,44,46-49]. Farklı normal kuvvet ve frekans kullanılarak TiN kaplama-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçifti için yapılan kazımalı aşınma deneylerinden elde edilen enerji oranları (A) ve serbest sistem kriterleri (B) Şekil 7.14’de görüldüğü gibi, normal kuvvet-frekans haritasına yerleştirilmiştir. Elde edilen enerji oranları ve serbest sistem kriterleri değerlendirildiğinde; kısmi kayma karakteristiği, literatürden farklı olarak enerji oranının değerinin 0.28’den ($A < 0.28$) ve serbest sistem kriterinin değerinin 0.65’den ($B < 0.65$) küçük olduğu durumlarda belirlenebilmektedir. Bu nedenle; bu tez çalışmasında; kazımalı aşınma sabitinin değeri Mohrbacher ve diğerleri tarafından, TiN kaplama ile yapılan çalışmalarda kullanılan 0.33 değeri, kısmi kayma-kayma geçiş kriteri olarak kullanılmıştır[47].



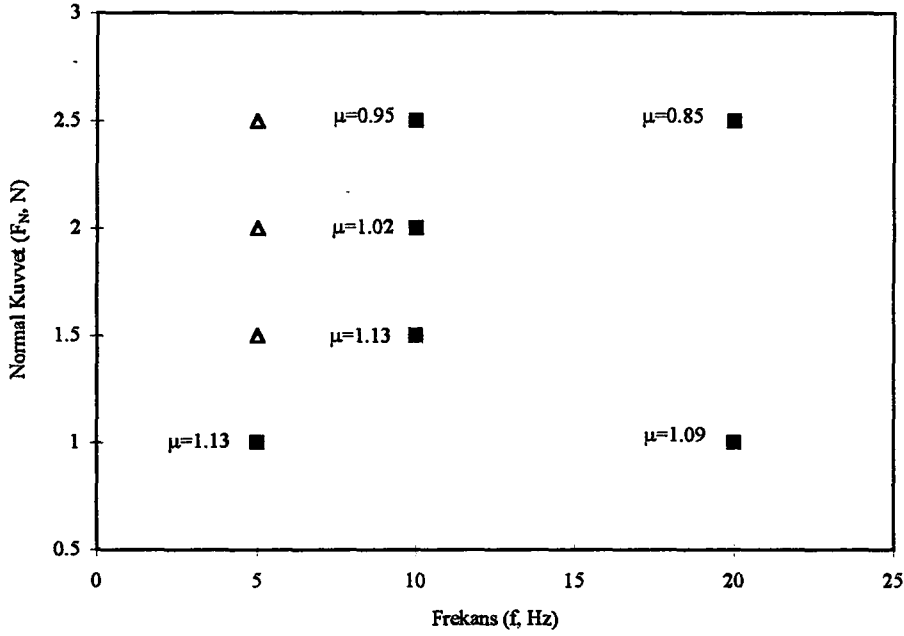
Şekil 7.14: Frekans ve normal kuvvet değişimine bağlı olarak TiN-ferritik paslanmaz triboçiftinde enerji oranı (A) ve serbest sistem kriterleri (B).

Vingsbo ve Söderberg'in yaptığı çalışmalarda meydana getirilen kazımalı aşınma haritalarında; elastik, kısmi kayma ve kayma karakteristiklerinin her üçü de elde edilmiştir. Bu çalışmalarda normal kuvvet-yer değiştirme miktarı, normal kuvvet-sürtünme kuvveti ve frekans-yer değiştirme miktarı arasında kazımalı aşınma haritaları ortaya çıkmıştır[41,42]. PVD TiN kaplama ile korundum arasında yapılan kazımalı aşınma deneylerinde, sürtünme katsayısı-çevrim sayısı arasında bir tribograf meydana getirilmiştir[40]. Bu açıdan bakıldığında Şekil 7.13'de meydana getirilen normal kuvvet-frekans haritası ilk defa meydana getirilmektedir. Daha önce literatürde yer alan kazımalı aşınma haritalarından farklı olarak, sadece kısmi kayma ve kayma karakteristiklerinin gözlenmesi, kullanılan yer değiştirme miktarı ve geometri ile ilgili olabilir.

Kaplamalı malzemelerde tribolojik olaylar; makromekanik ve mikromekanik aşınma mekanizmaları ile birlikte malzeme taşınımı ve kimyasal reaksiyonları da içerirler[7]. Bu makromekanik ve mikromekanik olayları ayıran kesin sınırlar bulunmamaktadır, bu olaylar birbirleriyle iç içedir. Genel olarak tribokimyasal olaylar mikro ölçekde gerçekleşirken; malzeme taşınımı hem makro hem de mikro seviyede meydana

gelmektedir[7]. Hem TiN kaplama-ferritik paslanmaz çelik hem de farklı ark-PVD kaplama-ferritik paslanmaz çelik triboçiftlerinin kazımalı aşınma deneylerinde; makromekanik, mikromekanik ve malzeme taşınımı olayları aşınmanın gelişimi sırasında meydana gelmektedir.

Kazımalı aşınma deneyleri sırasında; karşı malzeme olarak kullanılan ferritik paslanmaz çelik deneyler öncesinde metalografik olarak parlatılmış ise de, aşınmanın başlangıç aşamasında temas halindeki malzeme ve karşı malzeme yüzeylerindeki çıkıntılar birbirlerine mikrokaynaklanma yoluyla tutunmaktadır. Aşınmanın başlangıcında; yüzeylerin birbirlerine tutunduğu ve yerel olarak sürtünme kuvvetinin kaymaya neden olan kuvvetten daha düşük olduğu durumlarda; bu mikrokaynaklar kırılmayabilir. Bunun sonucunda yer değiştirme sırasında, triboçift kısmen elastik olarak hareket edebilir. Bu olay; Şekil 7.13'de görülen, TiN kaplama-ferritik paslanmaz çelik çifti için hazırlanmış olan mekanizma haritasındaki, kısmi kayma bölgesindeki kazımalı aşınma karakteristiğini ortaya çıkartabilir. Yerel olarak artan sürtünme yükü veya hız, yerel olarak artan sıcaklıklar temas bölgesinde mikrokaynaklanmış çıkıntıların kırılmasına neden olabilir ve bu durumda yer değiştirme sırasında kayma tamamlanabilir. Çıkıntıların kırılarak kaymanın tamamlanması; Şekil 7.13'de görülen, kayma bölgesindeki kazımalı aşınma karakteristiğinin meydana gelmesine neden olabilir. Kazımalı aşınma sırasında, temas bölgesinde kopan çıkıntılar; hareket devam ederken partiküllerin çizme etkisine sahiptirler. Aynı zamanda bu partiküller yük altındaki yüzeylerin çıkıntı tepelerinde yerel yüksek basınçlar meydana getirebilir. Bu yüksek basınç bölgeleri plastik deformasyona veya kaplamada çatlak oluşumuna neden olurken; kısmi kayma karakteristik bölgesinde karşı malzemede görüldüğü gibi, malzeme serbestleşmesine ve serbestleşen malzemenin yüksek basıncın etkisiyle küçük miktarlarda malzeme taşınımına, karşı malzeme yüzeyine yapışmasına neden olabilir. Kayma karakteristiğine sahip bölgelerdeki deneylerde rastlandığı gibi kısmen de tribosistemin dışına taşınır. Bu şekilde meydana gelen malzeme taşınım olayları, uygulamada kazımalı aşınmanın farkedilebilme özelliği ile uyumludur[75].



Şekil 7.15: TiN kaplama-ferritik paslanmaz çelik triboçifti için oluşturulan frekans-normal kuvvet kazımalı aşınma haritasında, kayma karakteristiğinin gözlemlendiği bölgelerdeki ortalama sürtünme katsayıları.

Bağıntı (5.5)'de görüldüğü gibi dinamik sürtünme katsayısı ile normal kuvvet arasında ters orantı ($\mu_k \propto 1/F_N$) söz konusudur. Şekil 7.15'de kayma karakteristiğinin bulunduğu bölgelerdeki ortalama sürtünme katsayıları incelendiğinde; bağıntı (5.5)'de görülen, normal kuvvet arttıkça sürtünme katsayısı azalır ilişkisi genel olarak ortaya çıkmaktadır. Frekans artışıyla da, sürtünme katsayısının azalmaktadır. Bu durum da, ince sert seramik kaplamaların yüksek hızlarda kullanımıyla ilgili tavsiyelerle paralellik göstermektedir.

Bütün bunların sonucunda; kazımalı aşınma deneyleri sonucunda oluşturulan normal kuvvet-frekans mekanizma haritasını uygulama ile ilişkilendirmek mümkün olabilir. Endüstriyel uygulamada kısmi kayma bölgesindeki koşullarda, malzeme taşınımının olduğu durumlarda çalışıldığında; zımbalama işleminde hem kesme işlemi daha zor olacaktır (kesme işlemi için harcanması gereken enerjinin tümü harcanmamış olacaktır) hem de kaplamalı zımbalar adhezif aşınmanın etkisiyle daha kolay aşınabilecektir. Zımbalama işlemi kesmenin daha kolay gerçekleştiği, malzeme taşınımının olmadığı,

kayma karakteristiğinin bulunduğu ve aşınmanın daha az olduğu (düşük sürtünme katsayısı nedeniyle) yüksek yük ve frekanslı frekanslı bölgede yapılması uygun olabilir. Bu durum da endüstriyel zımbalama işleminde, üretim hızı artışı sağlanabilir.

Blanpain ve diğerleri[44] ile Mohrbacher ve diğerleri[47]; elips şeklinde elde edilen dinamik sürtünme kuvveti-zaman eğrilerinin kısmi kayma, dikdörtgen şekilde elde edilen dinamik sürtünme kuvveti-zaman eğrilerinin ise kayma karakteristiğini gösterdiğini söylemektedirler. Ancak bu konuda farklı yaklaşımlar vardır. Fouvry ve diğerleri[46]; bu konuda farklı bir yaklaşımı benimsemişler ve yaptıkları deneylerde; kayma karakteristiğinde dikdörtgen, kısmi kayma karakteristiğinde ise dikdörtgen ve eliptik şekilli dinamik sürtünme kuvveti-zaman eğrileri karışık olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada; TiN-ferritik paslanmaz çelik triboçiftine ait farklı yük ve frekanslarda elde edilen dinamik sürtünme kuvveti-zaman eğrilerinde; literatürdekine benzer şekilde kısmi kayma karakteristiğinde eliptik, kayma karakteristiğinde ise dikdörtgen karakterde eğriler elde edilmiştir. Bu bakımdan bu çalışmada elde edilen sürtünme kuvveti-zaman eğrileri Blanpain ve diğerleri[44] ile Mohrbacher ve diğerlerinin[47] belirttiği şekillerle uyumludur. Bütün bunlara rağmen, kazımalı aşınma deneylerinde dinamik sürtünme kuvveti-zaman eğrilerinin şeklinin tek başına kazımalı aşınma karakteristiklerinin elde edilmesinde belirleyici olmadığı düşünülmektedir.

7.2.2. Farklı Sert Seramik Kaplamalar-Ferritik Paslanmaz Çelik Triboçiftinin Kazımalı Aşınma Deney Sonuçları ve İrdelenmesi

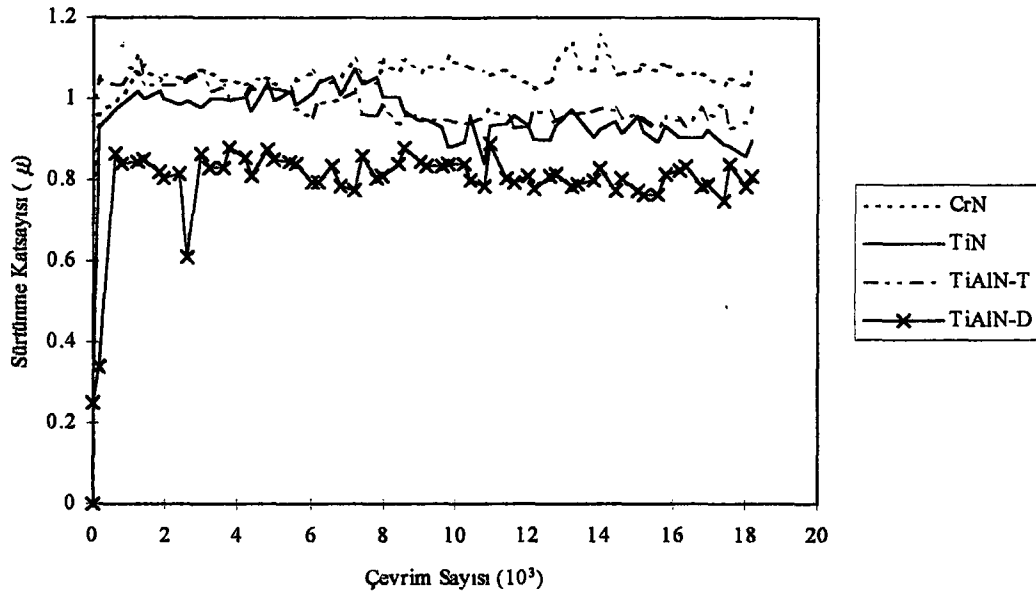
Sabit normal kuvvet, frekans ve yer değiştirme miktarı kullanılarak ark-PVD tekniği ile kaplanmış farklı sert seramik kaplamalar; CrN, TiN, TiAlN-T ve TiAlN-D kullanılarak kazımalı aşınma davranışı karşılaştırılmıştır.

Normal kuvvet (2.5N), frekans (10Hz) ve yer değiştirme miktarı (0.5mm) seçildiğinde; AISI 430 ferritik paslanmaz çelik ile yapılan kazımalı aşınma deneyleri sonucunda ortalama kazımalı aşınma sabitleri CrN için 0.41, TiN için 0.36, TiAlN-T için 0.42 ve TiAlN-D için 0.39 olarak belirlenmiştir. Ortalama kazımalı aşınma sabitleri incelendiğinde; bütün kaplamalar ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik

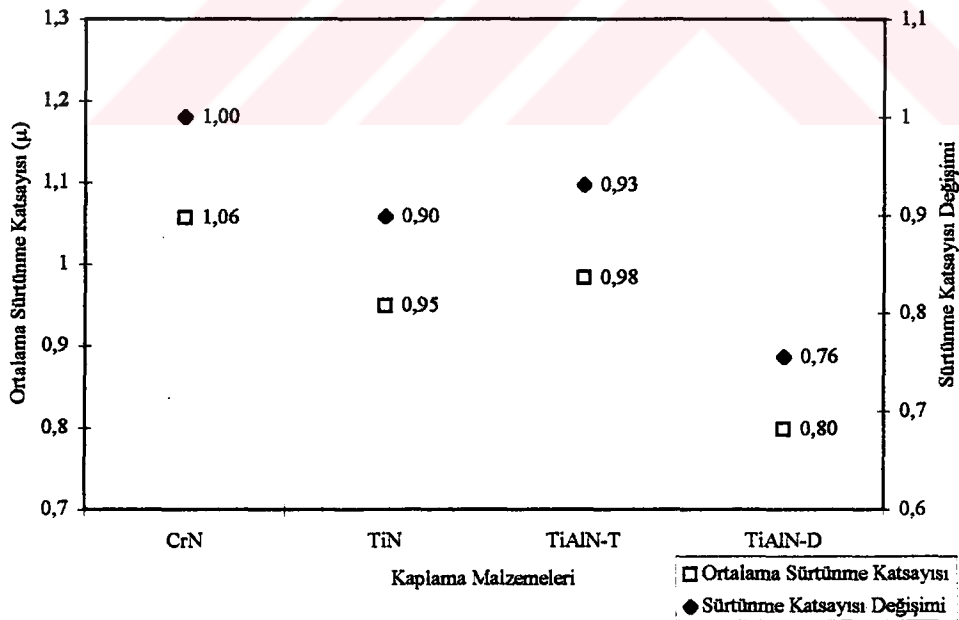
arasında yapılan kazımalı aşınma deneyleri, kayma karakteristiğinin bulunduğu koşullarda yapılmıştır. Deneyler daha önce belirtildiği gibi oda sıcaklığında (25°C) ve klimatize ortamda, aynı bağıl nem (%25-27) koşullarında gerçekleştirilmiştir. En az üç deney ortalaması deney sonucu olarak gösterilmiştir.

Elde edilen dinamik sürtünme kuvveti-yer değiştirme eğrilerinden çevrim başına düşen enerji hesaplanmış ve bağıntı (6.5) kullanılarak sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Sürtünme katsayılarının çevrim sayısına göre değişimi Şekil 7.16'da gösterilmiştir. Şekil 7.16'da görüldüğü gibi, yaklaşık 7.8×10^3 çevrime kadar CrN, TiN ve TiAlN-T kaplamalara ait sürtünme katsayısı arasında büyük farklılıklar yoktur. Ancak bu çevrimden sonra CrN kaplamanın sürtünme katsayısı diğerlerinden daha yüksek gözükmemektedir.

Ortalama sürtünme katsayısı açısından en düşük sürtünme katsayısı 0.80 değeriyle TiAlN-D kaplamada elde edilmiştir. TiN ve TiAlN-T kaplamalarda ortalama sürtünme katsayısı açısından; sırasıyla 0.95 ve 0.98, çok fazla fark yoktur. En yüksek ortalama sürtünme katsayısı CrN kaplamada 1.06 değeriyle elde edilmiştir. Farklı sert seramik kaplamaların ortalama sürtünme katsayılarının, en yüksek ortalama sürtünme katsayısının elde edildiği CrN kaplamaya ($\mu=1.06$) oranı sürtünme katsayısı değişimi olarak tanımlanmış ve bulunan değerler ortalama sürtünme katsayısı değerleriyle birlikte Şekil 7.17'de gösterilmiştir. Buna göre sürtünme katsayısındaki değişim CrN için 1.00, TiN için 0.90, TiAlN-T için 0.93 ve TiAlN-D kaplama için 0.76 olarak bulunmaktadır. Şekil 7.17'de görüldüğü gibi en düşük ortalama sürtünme katsayısına sahip TiAlN-D kaplamalı malzemedeki sürtünme katsayısının CrN kaplamaya göre düşüşü %24 olarak hesaplanmıştır. Bu durum, incelenen sert seramik kaplamalar içinde TiAlN-D kaplamalı malzemenin AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğe, kazımalı aşınma koşullarında daha uzun süre dayanabileceğini göstermektedir.



Şekil 7.16: Farklı kaplamaların kazımalı aşınma deneylerinde sürtünme katsayısının çevrim sayısına göre değişimi (Yük 2.5N, frekans 10Hz, 0.5mm yer değiştirme miktarı, silindir-blok geometrisi).



Şekil 7.17: Kaplamalara göre ortalama sürtünme katsayıları ve sürtünme katsayısındaki değişimler.

Literatürde CrN, TiN ve TiAlN kaplamaların tribolojik özellikleri pim-disk ve top-disk geometrileri kullanılarak karşılaştırılmıştır[76-78]. Oda sıcaklığında farklı hız ve yüklerde, kuru aşınma koşullarında; top-disk geometrisi kullanılarak CrN, TiN ve TiAlN kaplamalar çelik bilya karşısında deneyler yardımıyla sürtünme katsayıları karşılaştırıldığında; bütün deney koşullarında en düşük sürtünme katsayısı CrN kaplama ile elde edilmiştir. Düşük sürtünme katsayısının elde edilmesinin, CrN kaplamanın diğer kaplamalara göre daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve bu durumun sürerek aşındırmaya daha az neden olduğu ile açıklanmaktadır[76]. Bu çalışmada deneyler yapılırken her hangi bir akışkan yardımıyla süpürme yapılmamıştır. Aşınma yığılmalarının deney süresince yaratabileceği durum tamamen ihmal edilmektedir. Yukarıda belirtilen sonuçların tam tersi pim-disk geometrisi, kuru aşınma koşullarında farklı hızlarda CrN, TiN, ve TiAlN kaplamalar için elde edilmiştir. Bu çalışmada özellikle yüksek hızlarda yüksek termal kararlılığı ve düşük oksidasyon hızı nedeniyle TiAlN kaplama en düşük aşınma değerlerini vermiştir[77]. Benzer bir durumda AISI 52100 malzemesine karşı, pim-disk geometrisinde kuru sürtünme koşullarında; CrN, TiN, ve TiAlN kaplamalar karşılaştırıldığında da elde edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısı bütün deney süresi boyunca TiAlN kaplamada, en yüksek sürtünme katsayısı ise CrN kaplamada elde edilmiş ve TiAlN kaplamanın gösterdiği düşük sürtünme davranışının yüzeyde oluşan kararlı oksit filmi ile ilişkili olduğu açıklanmıştır[78]. Benzer şekilde; talaşlı kesme işlemi ile yapılan deneylerde yüksek hız takım çeliğine ark-PVD tekniği kullanılarak yapılan TiN kaplamaya göre daha TiAlN kaplamalı takımların; düşük termal iletgenliğe sahip örneğin ostenitik paslanmaz çelik (AISI 304L) karşısında daha iyi performans sağladığı gözlenmiştir[79].

Farklı ince sert seramik kaplamalar (CrN, TiN, TiAlN-T ve TiAlN-D) ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemelerle yapılan kazımalı aşınma deneyleri ile elde edilen sürtünme katsayıları değerlendirildiğinde; en düşük sürtünme katsayısı TiAlN-D kaplama, en yüksek sürtünme katsayısı CrN kaplamayla elde edilmiştir. Bu durumun ince film sert seramik kaplamanın metal bileşenleri ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik arasındaki etkileşimle ilgili olduğu düşünülmektedir. Genel olarak paslanmaz çeliklerin tümünde, özel de ise ferritik paslanmaz çeliklerde yakalayarak

tutunma/yapışma özelliğinin bulunduğu bilinmektedir[80]. TiAlN-D kaplamanın, metal bileşeni içerisindeki Al elementinden dolayı oksidasyon direncinin ve termal kararlılığının yüksek olması, kazımalı aşınma ve endüstriyel koşullarda ferritik paslanmaz çelik ile etkileşiminin daha az olduğunu; bu nedenle düşük sürtünme katsayısı ve daha az aşınma hasarının meydana geldiğini düşünülmektedir. Benzer bir durum paslanmaz çeliklerin şekil verme işlemlerinde, yakalayarak tutunma/yapışma veya mikrokaynaklanma olayını önlemek amacıyla Al-bronzunun kullanarak da elde edilebilir[80]. Çamaşır makinası kazan bükme işleminde Al-bronzu makaraların kullanımı, bu durumu en iyi ifade eden örneklerden biridir. Tam tersine bir durum CrN kaplama-ferritik paslanmaz çelik triboçifti için düşünülebilir. Ferritik paslanmaz çelik içerisindeki yüksek Cr elementi içeriğinin; bu triboçiftin birbirlerine olan ilgilerinin yüksek olmasına, dolayısıyla mikrokaynakların daha kolay meydana gelmesine neden olduğu düşündürmektedir. Adhezif aşınmanın önlenmesi malzemelerin birbirlerine karşı ilgilerinin az olmasını gerektirmektedir[33]. Rabinowicz'in saf elementler için oluşturduğu tablonun bir benzeri Schumacher tarafından paslanmaz çelikler için meydana getirilmiştir[2,37]. Tablo 4.3'de oda sıcaklığında, kuru sürtünme koşullarında, 71N yük kullanılarak yapılan deneyler sonucundaki ağırlık kayıpları incelendiğinde[37]; genel olarak paslanmaz çelik-paslanmaz çelik triboçiftlerinde meydana gelen aşınma miktarlarının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Sürtünmeyle ilgili bir çok model geliştirilmiş ve halen kullanılmaktadır[31]. Genel olarak; sürtünme katsayısı, sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranı olarak ifade edilen klasik model geçerliliğinin korumaktadır. Sürtünme sırasında ortaya çıkan enerji ile ilgili çalışmalar, ilk önce Coulomb ve Euler daha sonra da Davis ve Kuznetzov tarafından yapılmıştır[31]. Rabinowicz sürtünme katsayısı ile sürtünen malzemelerin yüzey enerjileri arasında bir ilişkiyi ortaya koymuştur[31,32]. En son olarak da Mohrbacher ve diğerleri PVD TiN kaplamanın kazımalı aşınma davranışı ile ilgili yaptıkları çalışmada, sürtünme katsayısını harcanan enerji kavramıyla ilişkilendirmiştir[40]. Bu tez çalışmasında TiN kaplama-ferritik paslanmaz çelik triboçifti arasında elde edilen sürtünme katsayısı; farklı koşullar olmasına rağmen, Mohrbacher ve diğerlerinin TiN kaplama-korund triboçiftinde %30 göreceli rutubetde kazımalı aşınma deneylerinde elde ettiği sürtünme katsayısı ile

uyumludur[40]. Kazımalı aşınma deneylerinde sürtünme katsayısının yer değiştirme sırasında sürekli olarak değişimi, dinamik sürtünme katsayısının hesaplanmasında harcanan enerji kavramının kullanılmasını gerekli kıldığı düşünülmektedir. Aynı zamanda kazımalı aşınma deneylerinde ortaya çıkan farklı karakteristikler; elastik-yapışma, kısmi kayma ve kayma karakteristikleri ancak dinamik sürtünme kuvveti-yer değiştirme miktarı eğrilerinden belirlenebilmektedir.

Bu tez çalışmasının başlangıç aşamasında CrN, TiN, TiAlN-T ve TiAlN-D kaplamalar ile ferritik paslanmaz çelik triboçiftlerinde yapılan kazımalı aşınma deneylerinde klasik yöntem; sürtünme kuvvetinin belirlenmesi yöntemi, kullanılmış ve bağıntı (2.1) yardımıyla sürtünme katsayıları hesaplanmıştır. Ancak yapılan kazımalı aşınma deneylerinde dinamik sürtünme kuvvetinin yer değiştirme miktarına göre değişimi belirlenemediği için kazımalı aşınma karakteristikleri belirlenememiştir. Kayma karakteristiğinin meydana geldiği koşullarda sürtünme sırasındaki kayma tamamlanabildiği için kazımalı aşınma deneylerinde; sürtünme katsayıları kullanılarak yapılacak bir karşılaştırmada triboçiftin kayma karakteristiğini göstermesinin gerekli olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle; daha önce klasik yöntem kullanılarak hesaplanan sürtünme katsayıları ile daha sonra harcanan enerji kavramı kullanılarak elde edilen sürtünme katsayıları arasında büyük farklılıkların olduğu gözlenmiştir. Örneğin; TiN kaplama-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçiti için 2.5N normal yük, 10Hz frekans, bağıl nem %25-27, yer değiştirme miktarı 0.5mm kullanılarak yapılan deneylerde klasik yöntem kullanılmış ve sürtünme katsayısı, bir deneyde 0.35 diğer bir deney de ise 1.20 olarak hesaplanmıştır.

7.2.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu Çalışmaları ve İrdelenmesi

Kazımalı aşınma deneylerinde malzeme olarak kullanılan CrN, TiN, TiAlN-T ve TiAlN-D kaplamalı yüzeyler taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Şekil A.29'da görüldüğü gibi CrN kaplamalı numunede aşınma hasarı iki bölge (açık ve koyu bölgeler) olduğu görülmektedir. Koyu bölgenin açık bölgeye göre daha fazla aşındığı ve açık bölgenin çıkıntılarının düzleştiği görülmektedir. Harekete dik yönde taban malzemenin yüzey profilini tekrarlayacak şekilde aşınma hasarı izleri

görülmektedir. Şekil A.30'da gösterilen TiN kaplamalı malzemede de CrN kaplamalı malzemeye benzer bir aşınma hasarı numune yüzeyinde gözlenmektedir.

TiAlN-T kaplamalı numunede aşınma hasarı Şekil A.31'de gösterilmiştir. TiAlN-T kaplamalı malzemede, TiN ve CrN kaplamalı numunelere göre daha az aşınma hasarı gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, yüzeyi düzgünleştiği detay görüntüde görülmektedir. Hareket yönüne paralel derin çatlaklar oluşmaya başlamıştır.

TiAlN-D kaplamalı malzemeye ait aşınma hasarı Şekil A.32'de gösterilmiştir. Kazımalı aşınmanın meydana geldiği yüzeyde çok az aşınma hasarı gözlenmektedir. Kazımalı aşınma hareketi nedeniyle yüzeyin düzgünleştiği görülmektedir. Genel olarak; TiAlN-D kaplamalı numuneden sırasıyla, TiAlN-T, TiN ve CrN kaplamalı numuneye doğru gidildikçe aşınmanın hangi aşamalardan geçtiği görülmektedir. Aşınma başlangıçta; TiAlN-D numunede olduğu gibi, kazımalı aşınma hareketinin etkisiyle yüzeyin düzgünleşmesiyle başlamaktadır. Daha sonra, TiAlN-T kaplamalı numunede olduğu gibi, taban malzeme yüzey profiline dik (kazımalı aşınma hareket yönüne paralel) derin yarık/çatlakların meydana gelmesiyle aşınma hasarı ortaya çıkmaktadır. En sonunda yüzeyden kopmalar/dökülmelerin yerel olarak başladığı, CrN ve TiN kaplamalı numunelerde olduğu gibi, ve yine yerel olarak yüzeyin düzgünleştiği birbirine göre zıtlık (aydınlık ve karanlık bölgeler) gösteren iki bölgeci aşınma hasarı meydana geldiği söylenebilir.

Kazımalı aşınma deneylerinin sonunda CrN, TiN, TiAlN-T ve TiAlN-D kaplamalı malzemelere göre karşı malzeme olarak çalışan ferritik paslanmaz çelik yüzeyler de taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. CrN ve TiN kaplamalı malzemeye karşı çalışmış olan ferritik paslanmaz çelikler sırasıyla Şekil A.33 ve Şekil A.34'da gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde; kazımalı aşınma deneyleri sırasında malzeme-karşı malzeme arasında tam temasın sağlanamadığı görülmektedir. Her iki karşı malzemede de iki bölgeci (aydınlık ve karanlık olmak üzere) aşınma hasarı gözlenmiştir. Karanlık bölgelerde gözlenen izlerin aşınma hasarının abrazif aşınmadan meydana geldiği söylenebilir. TiAlN-T ve TiAlN-D kaplamalı malzemelere karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelikler Şekil A.35 ve Şekil A.36'da gösterilmiştir.

Kazımalı aşınma deneyleri sırasında daha iyi temas koşullarının sağlandığı gözlenmektedir.

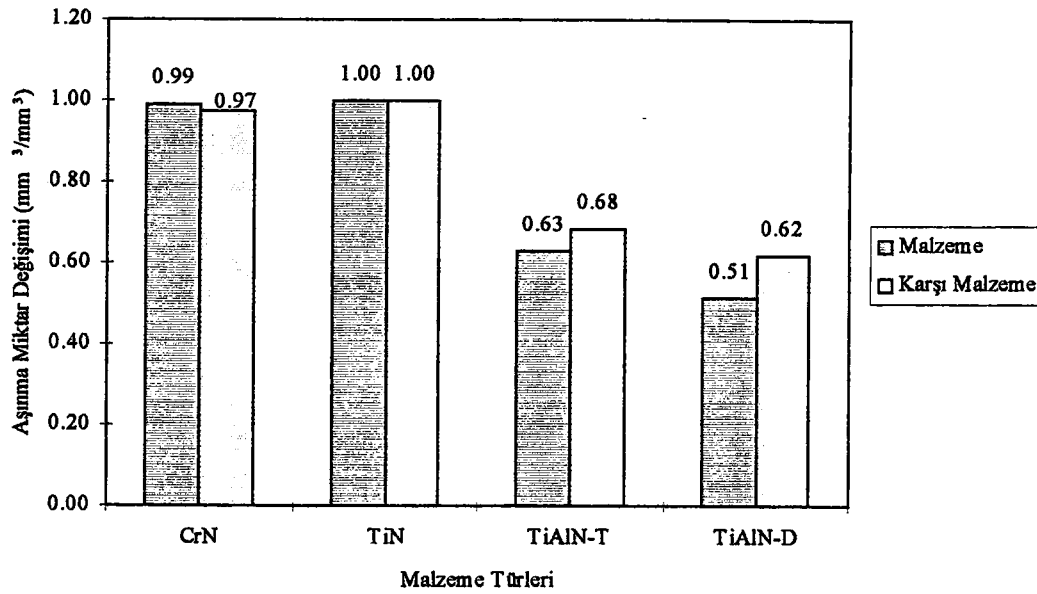
7.2.2.2. Kazımalı Aşınma Miktarları ve İrdelenmesi

Farklı ince sert seramik kaplamalar (CrN, TiN, TiAlN-T ve TiAlN-D) ile AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçiftleri arasında yapılan kazımalı aşınma deneyleri sonunda kaplamalar ile ferritik paslanmaz çeliklerde meydana gelen aşınma miktarları hesaplanmış ve Tablo 7.3’de gösterilmiştir.

En düşük aşınma miktarı, TiAlN-D kaplama ile bu kaplamanın karşı malzemesi olan ferritik paslanmaz çelik malzemede gözlenmiştir. En yüksek aşınma miktarı ise TiN kaplama-ferritik paslanmaz çelik ile CrN kaplama-ferritik paslanmaz çelik triboçiftlerinde gözlenmektedir. Bu triboçiftlerin aşınma miktarları arasında büyük farklılıklar gözlenmemiştir. Karşılaştırma açısından aşınma miktarı değişimi; farklı kaplamalar ile ferritik paslanmaz çeliklerde elde edilen aşınma miktarlarının, en yüksek aşınma miktarının elde edildiği TiN kaplama ve TiN kaplamaya karşı çalışmış olan ferritik paslanmaz çelikte elde edilen değerlere oranı olarak ifade edilebilir. Farklı sert seramik kaplamalar ile bu kaplamalar karşı çalışmış olan ferritik paslanmaz çeliklerin aşınma miktarı değişimleri Şekil 7.18’de gösterilmiştir.

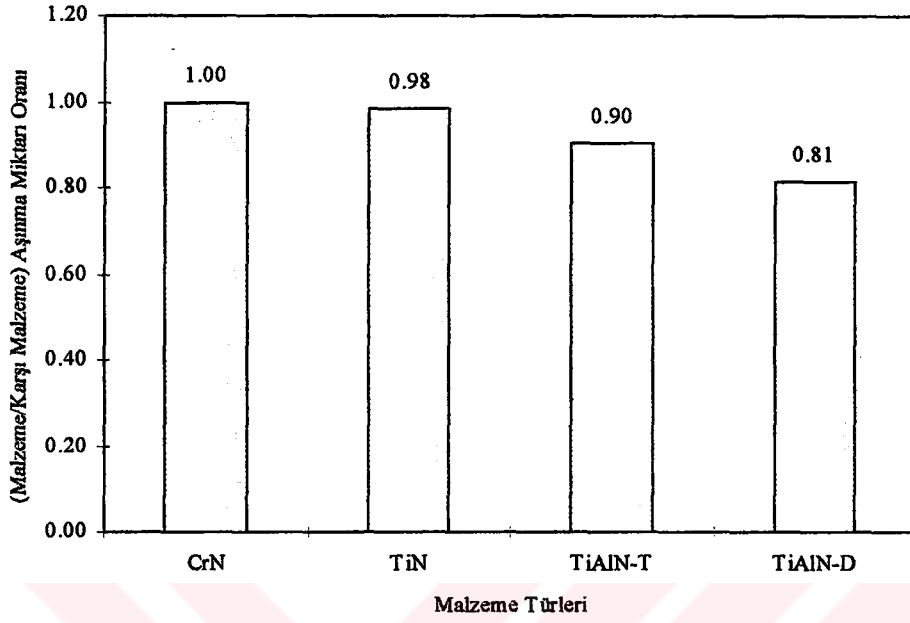
Tablo 7.3: Farklı sert seramik kaplamalar ile karşı malzeme olarak kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemelerde meydana gelen aşınma miktarları.

Kaplama Türleri	Aşınma Miktarları (mm ³)	
	Malzeme	Karşı Malzeme
CrN	0.73	42.55
TiN	0.74	43.68
TiAlN-T	0.46	29.91
TiAlN-D	0.38	27.15



Şekil 7.18: Farklı sert seramik kaplama malzemeleri ile karşı malzemele olarak kullanılan AISI 430 ferritik paslanmaz çeliklerde meydana gelen aşınma miktarı değişimi.

Toplam kazımalı aşınma açısından en az aşınma, TiAlN-D kaplama malzemesi ve ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin oluşturduğu tribosistemde meydana gelmektedir. Toplam aşınma açısından en fazla aşınma, TiN-ferritik paslanmaz triboçiftinde gözlenmekle beraber; CrN kaplama malzemesi-ferritik paslanmaz çelik triboçifti ile aralarında çok büyük bir farklılık gözlenmemiştir. İstenmeyen malzeme kayıplarının karşılaştırılabilmesi için kaplama malzemesi/karşı malzeme aşınma miktarı oranı tanımlanmış ve bu oranın değişimi incelenmiştir. Kaplama malzemesi/karşı malzeme aşınma miktarı oranının değişimi; farklı sert seramik kaplamalar ile ferritik paslanmaz çeliklerin kaplama malzemesi/karşı malzeme aşınma miktarı oranlarının en yüksek kaplama malzemesi/karşı malzeme aşınma miktarı oranının gözlendiği CrN kaplama-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçiftinde elde edilen orana bölünmesiyle elde edilmiş ve Şekil 7.19’da gösterilmiştir.



Şekil 7.19: Kaplama malzemesi türlerine göre malzeme/karşı malzeme aşınma miktarı oranlarının CrN kaplamada elde edilen değere göre değişimi.

Kaplama malzemesinin karşı malzemeye göre en az aşındığı durum TiAlN-D kaplama malzemesi-ferritik paslanmaz çelik triboçiftinde ve istenmeyen malzeme kaybının en yüksek olduğu durum ise, CrN kaplama-ferritik paslanmaz çelik triboçiftinde gözlenmektedir.

7.2.2.3. Farklı Sert Seramik Kaplamaların Özellikleri ile Sürtünme Katsayısı Arasında Çok Değişkenli Doğrusal İlişkinin İrdelenmesi

Ortalama sürtünme katsayısı ile Tablo 6.3.'de kaplamalar için verilen sertlik, kalınlık ve yüzey pürüzlülüğü değerleri arasında bir ilişki kurabilmek amacıyla korelasyon katsayıları incelenmiştir.

Korelasyon katsayısı;

$$R = \frac{\sum S_x S_y}{\sqrt{(\sum S_x^2)(\sum S_y^2)}} \quad (7.1)$$

R=Regrasyon (korelasyon) katsayısı,

S_x ve S_y =x ve y değerlerinin standart sapması

olarak ifade edilmiştir[81,82]. Ortalama sürtünme katsayısı, sertlik, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü için korelasyon katsayısı hesaplanmış ve Tablo 7.4’de gösterilmiştir.

Tablo 7.4: Ortalama sürtünme katsayısı, sertlik, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü için korelasyon katsayıları

	Ortalama Sürtünme Katsayısı	Sertlik	Kaplama Kalınlığı	Yüzey Pürüzlülüğü
Ortalama Sürtünme Katsayısı	1			
Sertlik	0.29	1		
Kaplama Kalınlığı	-0.65	-0.81	1	
Yüzey Pürüzlülüğü	-0.40	-0.25	Çok düşük	1

Tablo 7.4’de görülen sayısal korelasyon değerleri iki veri değeri için kullanılabilir. Kaplamaların bütün karakteristik özellikleri bir arada, kaplamanın aşınma ve sürtünme özelliklerini etkilediğinden dolayı çok değişkenli doğrusal regrasyonun kullanılması doğrudur.

Bu nedenle; çok değişkenli doğrusal regrasyon için; sertlik (H , $N.mm^{-2}$), kaplama kalınlığı (t , μm) ve yüzey pürüzlülüğü ($R_a, \mu m$) bağımsız değişken; ortalama sürtünme katsayısı ($\mu_{ort.}$) bağımlı değişken alınarak yapılan hesaplamalarda regrasyon katsayısı (R^2), uyarlanmış regrasyon katsayısı ve standart hata değerleri hesaplanmıştır. Çeşitli çok değişkenli doğrusal modeller için bu değerler Tablo 7.5’de gösterilmiştir.

Tablo 7.5: Çok değişkenli model örnekler ile bu modellere ait regrasyon katsayıları, uyarlanmış regrasyon katsayıları ve standart hata değerleri (H =kaplama sertliği, t =kaplama kalınlığı, R_a =yüzey pürüzlülüğü, a, b, c =sabitler).

Model No	Matematik İfade	R^2	Uyarlanmış R^2	Standart Hata
1	$\mu_{ort.}=a+bH+ct+dR_a$	1	65535	0
2	$\mu_{ort.}=a+b(HxtxR_a)$	0.991396291	0.987094436	0.012337206
3	$\mu_{ort.}=a+b(Hxt)+cR_a$	0.999999799	0.999999398	$8.42531 \cdot 10^{-5}$
4	$\mu_{ort.}=a+b(HxR_a)+ct$	0.999984392	0.999953176	0.000743128
5	$\mu_{ort.}=a+b(txR_a)+cH$	0.971801762	0.915405285	0.031586386
6	$\mu_{ort.}=a+b(HxR_a)+c(txR_a)$	0.76367029	0.29101087	0.091442504
7	$\mu_{ort.}=a+b(Hxt)+c(txR_a)$	0.76421713	0.29265139	0.091336649
8	$\mu_{ort.}=a+b(Hxt)+c(HxR_a)$	0.507906681	-0.476279957	0.131951

Regrasyon katsayısı ile uyarlanmış regrasyon katsayısı arasındaki farkın çok olması; o doğrusal denklem modeli için bağımsız değişkenlerden birinin zayıf etkili olduğunu göstermektedir. Bu nedenle; regrasyon katsayısı, uyarlanmış regrasyon katsayısı ve standart hata birlikte değerlendirildiğinde; Tablo 7.4’deki modeller birbirlerine çok yakın olmakla birlikte, 3 no’lu model

$$\mu_{ort.} = 3.237252365 - 0.000155412(H \times t) - 5.208555592R_a \quad (7.2)$$

çok değişkenli doğrusal ilişkiyi en doğru şekilde ifade etmektedir.

Yapılan korelasyon çalışmalarında kaplamaların sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığının sürtünme katsayısı üzerine etkisi sayısal olarak ifade edilmeye çalışılmıştır. Artan çevrim sayısı ile kaplama ve karşı malzeme yüzey özelliklerinin sürekli olarak değişmekte ve meydana gelen aşınmanın bir önceki durumdan farklı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca bu tür istatistiki yöntemlerin kullanılması ve genelleştirmelerin yapılması için çok fazla sayısal verinin bulunması gerektiği unutulmamalıdır.

Bu tez çalışmasında kullanılan sayısal verilerin, bu tür bir genellemeyi yapmak açısından yeterli olmadığı bilinmesine rağmen kaplamaların başlangıç durumundaki özelliklerinin kaplamaların aşınma ve sürtünme davranışları üzerindeki etkilerini göstermesi açısından çok değişkenli doğrusal ilişkinin dikkat çekici olduğu düşünülmektedir.

Formül (7.2)'de olduğu gibi çok değişkenli doğrusal bir ilişkinin elde edilmesi, bu aşınma sistemindeki ark-PVD esaslı kaplamalarda sürtünme davranışının; sertlik, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğünün birlikte etkilerinin bir fonksiyonu olduğu söylenebilir. Bu ilişki içerisine, sayısal hale getirilmiş taban ve kaplama malzemesi arasındaki yapışma mukavemeti terimi de eklenebilir.

BÖLÜM 8. GENEL SONUÇLAR

Ark-PVD kaplamalı zımbalarda endüstriyel zımbalama işleminde yan yüzeylerde ortaya çıkan aşınma davranışı, laboratuvarda normal kuvvet-frekans değişimi sonucunda elde edilen kazımalı aşınma karakteristikleri ve farklı kaplamaların (CrN, TiN, TiAlN-T, TiAlN-D) kazımalı aşınma deneylerinin karşılaştırılması sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1)Yapılan endüstriyel çalışmalar sonunda bütün kaplamalı zımbalarda soğuk kaynak şeklinde gözlenen adhezif aşınma hasarı ve kaplamalı zımbalarla AISI 430 ferritik paslanmaz çelikde açılan deliklerde çapak oluşumu gözlenmemekle birlikte; kaplamalı zımbalar arasında en az aşınma hasarı, TiAlN-D kaplamalı zımbada; en yüksek aşınma hasarı ise CrN kaplamalı zımbada meydana geldiği gözlenmiştir.
- 2)Kaplama malzemeleri karşılaştırıldığında; 0.80 değeriyle en düşük sürtünme katsayısı TiAlN-D kaplamada, en yüksek sürtünme katsayısı ise 1.06 değeriyle CrN kaplamada gözlenmiştir. Bu durum endüstriyel çalışmalar ile uyum göstermektedir.
- 3)Toplam kazımalı aşınma miktarı ve kaplama malzemesi/karşı malzeme aşınma miktarı oranının en az olduğu durum TiAlN-D kaplama-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçiftinde gözlenmiştir. Toplam kazımalı aşınma açısından CrN kaplama-ferritik paslanmaz çelik ve TiN kaplama-ferritik paslanmaz çelik triboçiftlerinde çok büyük farklılıklar gözlenmemiş olmasına rağmen bütün kaplamalar arasında istenmeyen malzeme aşınmasının; kaplama malzemesi/karşı malzeme aşınma miktarı oranının, en fazla olduğu durum ise CrN-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik tirboçiftinde gözlenmiştir.

4)TiN kaplama-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçifti için farklı normal kuvvet ve frekanslar kullanılarak yapılan kazımalı aşınma deneylerinde elde edilen kazımalı aşınma sabitleri ve taramalı elektron mikroskobu ile x-ışınları sonuçları nokta analizlerinin birlikte değerlendirilmesiyle normal kuvvet-frekans haritası meydana getirilmiştir. TiN kaplama-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçifti için normal kuvvet-frekans haritası incelendiğinde genel olarak düşük frekanslı ($f=5\text{Hz}$) bölgelerde kazımalı aşınmada kısmi kayma karakterinin ortaya çıktığı gözlenmiştir.

5)TiN kaplama-AISI 430 ferritik paslanmaz çelik triboçifti için oluşturulan normal kuvvet-frekans kazımalı aşınma mekanizma haritasını endüstriyel uygulama ile ilişkilendirilerek; kayma karakteristiğinin bulunduğu, yüksek yük ve frekanslı frekanslı bölgede zımbalama işleminin daha kolay olacağı düşünülmektedir.

6)Ark-PVD yöntemi kullanılarak yapılan ince sert seramik kaplamaların sürtünme davranışı; sertlik, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğünün birlikte etkilerinin bir fonksiyonu olarak, çok değişkenli doğrusal bir bağıntıyla ifade edilebilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] DURUİZ, L., YENTÜRK., N., 1996, "Yeni Teknolojik Gelişmeler Karşısında Türk Sanayii" Cumhuriyet Dönemi Türkiye Ansiklopedisi, Yüzyıl Biterken, Cilt 15, İletişim Yayıncılık, İstanbul., pp.1365-1368.
- [2] EYRE, T.S., 1978, Wear Characteristic of Metals, in Source Book on Wear Control Technology, D.A.RIGNEY, W.A.GLAESER (Eds.); ASM Metals Park, Ohio 44073, USA, pp.1-11.
- [3] VAN STAPPEN M., STALS L.M., KERKHOFS M., QUAEYHAEGENS C., 1995 "State of the Art for Industrial Use of Ceramic PVD Coatings", Surface and Coating Technology, 74-75, pp.629-633.
- [4] HOMEROS, 1998, Odysseia Destanı, Türkçe'ye Çeviren: A.ERHAT, A.KADİR, Bölüm IX, Can Yayınları Ltd.Şti., İstanbul, Türkiye, ss. 370-400.
- [5] SANKARAN, V, 1992, "Surface Engineering-A Consultancy Report" in Advances in Materials Technology: Monitor, Issue 24/25, UNIDO, P.O. Box 300, A-1400 Vienna, Austria, pp.1-39.
- [6] BHUSHAN, B., 1987, "Overview of Coating Materials, Surface Treatments and Screening Techniques for Tribological Applications-Part 1: Coating Materials and Surface Treatments" in Testing of Metallic and Inorganic Coatings, ASTM STP 947, W.B.HARDING, G.A.DiBARI (Eds.), ASTM, Philadelphia, pp.289-309.
- [7] HOLMBERG, K., MATTHEWS, A.,1994, Coatings Tribology, Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering, Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands, pp.7-31, 370.
- [8] Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Materials-Finishing and Coating, 1985, 4th Ed., Vol 3, C.WICK, R.F.VAILLEUX, (Eds.), Society of Manufacturing Engineers (SME), One SME Drive, P.O.Box 930, Dearborn, Michigan 48121, USA.
- [9] BUNSHAH, R.F., 1980, "High Rate Physical Deposition Processes", AGARD Lecture Series No:106, Materials Coating Techniques, Harford House, London, England, pp.21-26

- [10] ZEGA, B., 1989, "Hard Decorative Coatings by Reactive Physical Vapor Deposition: 12 Years of Development" *Surface and Coating Tech.*, 39/40, pp.507-520.
- [11] VANCOILLE, E., 1993, Ph.D. Thesis, Katholieke University, Leuven, pp.5 117.
- [12] RIEDEL.,W, 1991, *Electroless Nickel Plating*, Finishing Publication Ltd., England, pp.7-290.
- [13] MOHLER., J.B., 1969, *Electroplating and Related Processes*, Chemical Publishing Co., Inc., USA, pp. 115-116.
- [14] DISLICH, H., 1985, "Sol-Gel 1984-2004 (?)" *J.of Non-Cryst. Solids*, 73, pp.599-612.
- [15] BRINKER, C.J., ASHLEY, C.S., CAIRNCROSS, R.A., CHEN, K.S., HURD, A.J., REED, S.T., SAMUEL, J., SCHUNK, P.R., SCHWARTZ, R.W., SCOTTO, C.S., 1996, "Sol-gel Derived Ceramic Films-Fundamentals and Application" in *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*, K.H.STERN (Ed.), Chapman and Hall, England, pp.112-151.
- [16] PHULE, P., RAGHAVAN, S., RISBUD, S., 1987, "Comparison of Ba(OH)₂, BaO, and Ba as Starting Materials for Synthesis of Barium Titanate by the Alkoxide Method" *J.Am.Ceram.Soc.*, 70, 5, pp.C108-C109.
- [17] SCHROEDER, H., 1969, in *Physics of Thin Films*, G.HASS (Ed.), Academic Press New York, USA, pp.87-141.
- [18] NASS, R., ARPAÇ, E., GLAUBITT, W., SCHMIDT, H., 1990, "Modelling of Ormacer Coatings by Processing" *J.of Non-Cryst. Solids*, 121, pp.370-374.
- [19] KALPAKJIAN, S., 1995, *Manufacturing Engineering and Technology*, Third Ed., Addison-Wiley Publishing Co., USA, pp.990-1011.
- [20] HERMAN, H., SAMPATH, S., 1996, "Thermal Spray Coatings", in *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*, K.H.STERN (Ed.),Chapman and Hall, England, pp.261-289.
- [21] MAZUMDER, J., 1996, "Laser Asisted Surface Coatings", in *Metallurgical and Ceramic Protective Coatings*, K.H.STERN (Ed.), Chapman and Hall, England, pp.74-111.
- [22] ASM Handbook, 1995, *Friction, Lubrication and Wear Technology*, 2nd. Printing, Vol.18, ASM International, Materials Park, Ohio 44073, USA, pp.184-190, 236-241, 242-256.

- [23] ASM Materials Engineering Dictionary, 1992, J.R.DAVIS (Ed.), ASM International, Materials Park, Ohio 44073, USA, pp.497-522.
- [24] ASM Handbook, 1985, Mechanical Testing, Vol.8, ASM International, USA, pp. 601-608.
- [25] ASTM G 40-88, 1989, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, Vol.03.02, ASTM, PhiladelphiA, USA.
- [26] DIN 50320, 1979, Wear, Terms, Systematic Analysis of Wear Processes, Classification of Wear Phenomena, Beuth Verlag GmbH, Berlin 30-Köln 1, Germany.
- [27] HUTCHINGS I.M., 1992, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, St. Edmundsbu'gh Ltd. Press, Mill Road , Dunton Green Sevenoaks, Kent TN 13YA, GB, pp. 23.
- [28] ASHBY, M.F., JONES, D.R.H; 1980, Engineering Materials, An Introduction to Their Properties and Applications, Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, Oxford OX3 0BW, England, 223-235.
- [29] The Oxford English Dictionary, 1989, 2nd. Ed., J.A.SIMPSON, E.S.C.WEINER (Prep.) Vol VI, Oxford, GB.
- [30] BUDINSKI, K.G., 1991, Friction in Machine Design, in Tribological Modelling of Mechanical Designers, ASTM STP 1105, K.C.LUDEMA, R.G.BAYER (Eds.), ASTM, Philadelphia, USA, pp.89-126.
- [31] PAVELESCU D., TUDOR A., 1987, "The Sliding Friction Coefficient-Its Usefulness" Wear,120, (3), pp.321-326.
- [32] RABINOWICZ E., 1995, Friction and Wear of Materials, 2nd. Ed., John Wiley & Sons, USA, pp.74.
- [33] WULPI D.J., 1985, Understanding How Components Fail, ASM Metals Park, Ohio 44073, USA, pp.163-204.
- [34] BHUSHAN B., GUPTA B.K., 1991, Handbook of Tribology, Materials, Coatings and Surface Treatments, McGraw-Hill, Inc., USA, pp. 6.1-6.29.
- [35] MOORE, M.A.; 1974, "A Review of Two-Body Abrasive Wear" Wear, 27, pp.1-17.
- [36] STEIJN, R.P., 1979, "Characteristics of Polymer Wear" in Wear Tests for Plastics: Selection and Use, ASTM STP 701, R.G. BAYER (Ed.), ASTM, pp. 3-17.

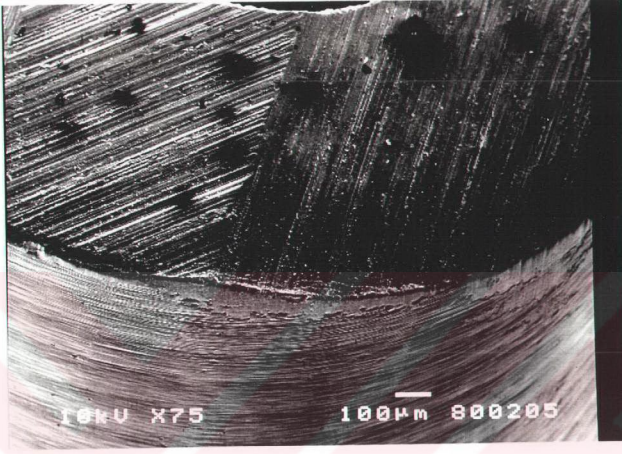
- [37] SCHUMACHER, W., 1978, "Wear Compatibility of Unlubricated Stainless Steel and Other Metal Couples", in Source Book on Wear Control Technology, D.A.RIGNEY, W.A.GLAESER (Eds.); ASM Metals Park, Ohio 44073, USA, pp.170-175.
- [38] WATERHOUSE, R.B., 1972, in Fretting Corrosion, Pergamon Press Ltd., Oxford, England pp.106-130.
- [39] KLAFFKE, D., 1985, "Fretting Wear of Ceramic-Steel: The Importance of Wear Ranking Criteria" Wear, 104 (4), pp.337-343.
- [40] MOHRBACHER, H., BLANPAIN, B., CELLIS, J.P., 1996, "Friction and Wear Mechanisms on CVD and PVD TiN Coatings Under Fretting Conditions", in Effect of Surface Coatings and Treatments on Wear, ASTM STP 1278, S.Bahadur (Ed.), ASTM, pp.76-93.
- [41] VINGSBO, O., SÖDERBERG, S., 1988, "On Fretting Maps" Wear, 126, pp.131-147.
- [42] BRYGGMAN, U., SÖDERBERG, S., 1988, "Contact Conditions and Surface Degradation Mechanisms in Low Amplitude Fretting" Wear, 125, pp.39-52.
- [43] VINCENT, L., BERTHIER, Y., DUBOURGH, M.C., GODET, M., 1992 "Mechanics and Materials Fretting", Wear, 153, pp.135-148.
- [44] BLANPAIN, B., MOHRBACHER, H., CELLIS, J.P., ROOS, J.R., 1994, "Some Aspects of Tribological Behavior of Diamond and Diamondlike Carbon Coatings Under Fretting Wear Conditions" Diamond Films and Technology, Vol.3, No:3, pp.177-188.
- [45] PETIOT, C., VINCENT, L., DANG VAN, K., MAOUCHCE, N., FOULQUIER, J., JOURNET, B., 1995, "An Analysis of Fretting Fatigue Failure Combined With Calculations to Predict Crack Nucleation" Wear, 181-183, pp.101-111.
- [46] FOUVRY, S., KAPSA, PH., VINCENT, L., 1995, "Analysis of Sliding Behavior for Fretting Loadings: Determination of Transition Criteria" Wear, 185, pp.35-46.
- [47] MOHRBACHER, H., CELLIS, J.P., ROOS, J.R., 1995, "Laboratory Testing of Displacement and Load Induced Fretting" Tribology Int., Vol.28, No:5, pp.269-278.
- [48] S.FOUVRY, S., KAPSA, PH., ZAHOUANI, H., VINCENT, L., 1995, "Wear Analysis in Fretting of Hard Coatings through A Dissipated Energy Concept" Wear, 203-204, pp.393-403.

- [49] ZHOU, Z.R., VINCENT, L., 1995 "Mixed Fretting Regime" *Wear*, 181-183, pp.531-536.
- [50] GOODSSELL, D., 1995, *Dictionary of Automotive Engineering*, Second Ed., SAE Warrendale, Pa., USA, p.174.
- [51] LOW, M.B.J., 1985, "Fretting Problems and Some Solution in Power Plant Machinery", *Wear*, 106, pp.315-335.
- [52] ANTLER, M., 1985, "Electrical Effects of Fretting Connector Contact Materials: Review", *Wear*, 106, pp.5-33.
- [53] MILLMAN, R.S., SLEIGHTHOLME, A., PARRY, A.A., 1985, "Sliding Fretting Wear of Mild Steel Fins on Stainless Steel Flat in CO₂ Atmosphere", *Wear*, 106, pp.77-95.
- [54] SATO, J., SHIMA, M., SUGAWARA, T., 1985, "A Fundamental Study of Fretting Damage to Glass Using An Improved Aparatus", *Wear*, 106, pp.53-61.
- [55] WEI, R., WILBUR, P.J., SAMPATH, W.S., WILLIAMSON, N., QU, Y., WANG, L., 1990, "Tribobological Studies of Ion Implanted Steel Constituents Using an Oscillating Pin-on-Disk Wear Tester", *Journal of Tribology*, Vol.112, pp.27-34.
- [56] ZHOU, Z.R., GU, S.R., VINCENT, L., 1997, "An Investigation of Fretting Wear of Two Aluminium Alloys", *Tribology Int.*, Vol.30, No.1, pp.1-7.
- [57] CARTON, J-F, VANNES, A-B., VINCENT, L., 1995, "Basis of A Coating Choice Methodology in Fretting", *Wear*, 185, pp.47-57.
- [58] PODOP, M., RICHTER, J.H., 1992, "CVD and PVD Hardcoatings for Extending the Life of Tools Used in the Stamping Industry" in *Manufacturing Solutions Vol. 2*, Nashville, Tennessee, USA, 23-26 Feb 1992, pp.337-349.
- [59] TEETER, F.J., 1992, "Increase of Forming and Punching Tool Performance Through PVD Thin Film Wear Resistant Coatings" in *Manufacturing Solutions Vol. 2*, Nashville, Tennessee, USA, 23-26 Feb 1992, pp.351-383.
- [60] NAVINSEK, B., PANJAN, P., CVELBAR, 1995, "Characterization of Low Temperature CrN and TiN (PVD) Hard Coatings" *A., Sur. Coat. Technol.*, 74-75, pp.155-161.

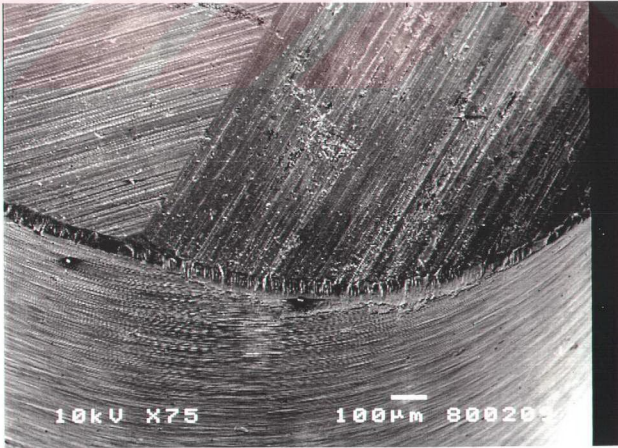
- [61] NAVINSEK, B., HANZEL, D., MEISEL, W., 1992, "Surface and Interface Analysis of Worn TiN (PVD) Coated Cold Forging Tools" Vacuum 43, No:4, pp.325-330.
- [62] NILSSON, B., 1996, "Punching in Stainless Steel Plate", in Progress in Tool Steels, 4th International Conference on Tooling, Bochum, Germany, 11-13 Sept. 1996, pp.93-102.
- [63] Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 1985, Forming, 4th Ed., Vol 2, C.WICK, R.F.VEILLEUX, (Eds.), Society of Manufacturing Engineers (SME), One SME Drive, P.O.Box 930, Dearborn, Michigan 48121, USA, pp.12/1-12/24.
- [64] ASM Handbook, 1987, Forming and Forging; Vol 14, 9th Ed., ASM International, Metals Park, Ohio, 44073, USA, pp.464.
- [65] HEINKE, W, LEYLAND, A, MATTHEWS, A, BERG, G, FRIEDRICH, C, BROSZEIT, E, 1995, "Evaluation of PVD Nitride Coatings, Using Impact, Scratch and Rockwell-C Adhesion Tests" Thin Solid Film, 270, pp.431-438.
- [66] WEGST, C.W., 1992, Stahlschlüssel, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH D 71672, Marbach, Germany, pp.234-235, 326-328.
- [67] ASM Handbook, 1990, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, 1st Printing, Vol.1, ASM International, Materials Park, Ohio 44073, USA, pp.871.
- [68] ASTM E 8M-89, 1989, Standard Test Method for Tension testing of Metallic Materials [Metric], Vol.03.01, ASTM, Philadelphia, USA.
- [69] ASTM G 77-83, 1989, Standard Practice for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test, Vol.03.02, ASTM, Philadelphia, USA.
- [70] GERVAIS, E., MCQUEEN, H.J., 1976, "Stress Amplitudes and Fatigue Damage Resulting From Cyclic Hertzian Compression", Can. Met. Qua., Vol.15, No:2, pp. 97-101
- [71] DIETER, G.E., 1988, Mechanical Metallurgy, SI Metric Ed., McGraw-Hill Book Co., UK, pp.49.
- [72] Automotive Handbook, 1996, Robert Bosch GmbH, 4th Ed., Germany, pp.214.
- [73] Smithells Metals Reference Book, 1992, Seventh Ed., E.A.BRANDES, G.B.BROOK (Eds.), Butterworth-Heinemann Ltd., Great Britainp, p.12-7.

- [74] ASM Handbook, 1987, Fractography, Vol.12, 9th Ed., ASM International, Metals Park, Ohio 44073, USA, pp.374.
- [75] WATERHOUSE, R.B., 1985, "Introduction", Wear, 106, pp.1-4.
- [76] HUANG, Z.P., SUN, Y., BELL, T., 1994, "Friction Behaviour of TiN, CrN and (TiAl)N Coatings", Wear, 173, pp.13-20.
- [77] HOGMARK, S., HEDENQVIST, P., 1994, "Tribological Characterization of Thin, Hard Coatings", Wear, 179, pp.147-154.
- [78] BIENKE, E.J., REITZ, H., MIKKELSEN, N.J., 1995, "Wear and Friction Properties of Hard PVD Coatings", in The International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, San Diego, USA, pp.1-9.
- [79] COLL, B.F., SATHRUM, P., FONTANA, R., PEYRE, J.P., DUCHATEAU, D., BENMALEK, M., 1992, "Optimization of Arc Evaporated (Ti,Al)N Film Composition for Cutting Tool Applications", Surface and Coatings Technology, 52, pp.57-94.
- [80] GIRAUD, H., BAROUX, B., 1993, "Deep Drawing Properties of Stainless Steel", in Stainless Steel, Eds. LACOMBE, P., BAROUX, B., BERANGER, G., France, pp.697-718.
- [81] BROWN, J.E., 1990, Statistical Methods in Engineering and Manufacturing, Quality Press, American Society for Quality Control, Milwaukee, Wisconsin, USA, pp.117-124.
- [82] DIETER, G.E., 1983, Engineering Design, A Materials and Processing Approach, McGraw-Hill Book Co. Japan, pp.426

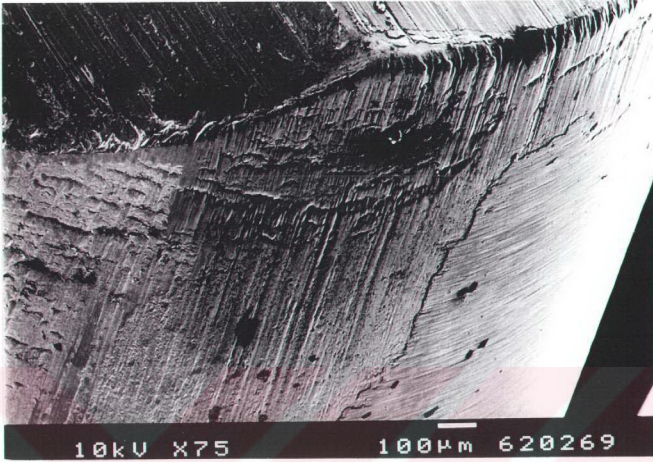
EK A: ELEKTRON MİKROSKOBU FOTOĞRAFLARI



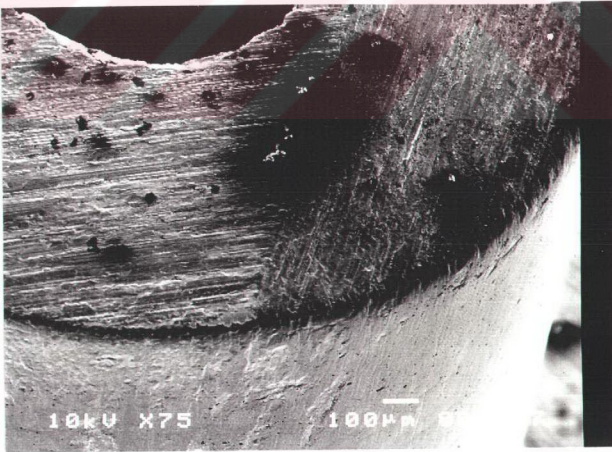
Şekil A.1: CrN kaplamalı zımbanın 45000 delik deldikten sonra alın yüzeyi, kesme kenarı ve prizmatik yüzeyinin görüntüsü.



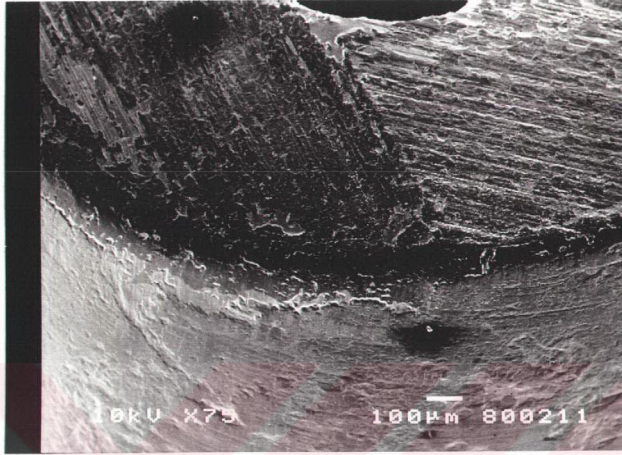
Şekil A.2: CrN kaplamalı zımbanın 120000 delik deldikten sonra elde edilen genel görüntüsü.



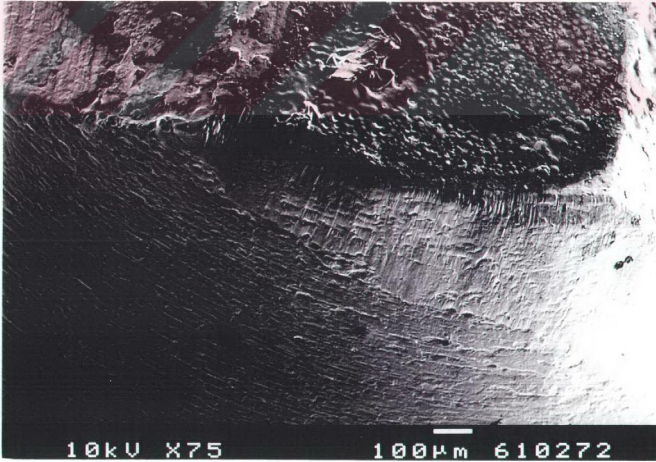
Şekil A.3: CrN kaplamalı zımbanın 150000 delik delme işleminden sonra elde edilen genel görüntüsü.



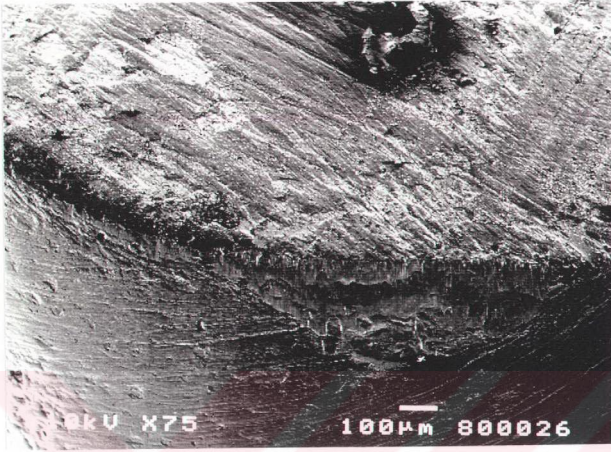
Şekil A.4: TiN kaplamalı zımbanın 45000 delik deldikten sonra alın yüzeyi, kesme kenarı ve prizmatik yüzeyinin görüntüsü.



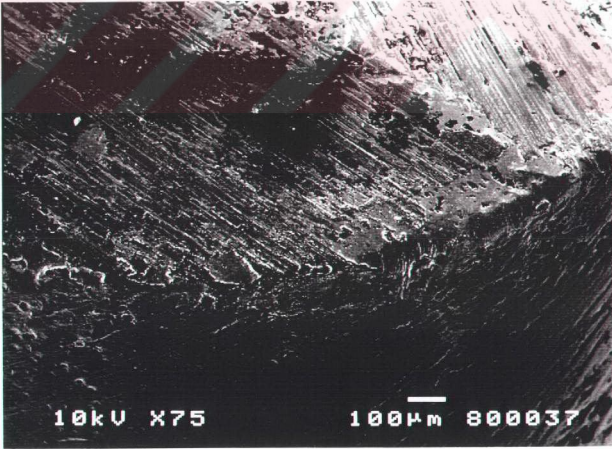
Şekil A.5: TiN kaplamalı zımbanın 120000 delik delme işleminden sonra elde edilen genel görüntüsü.



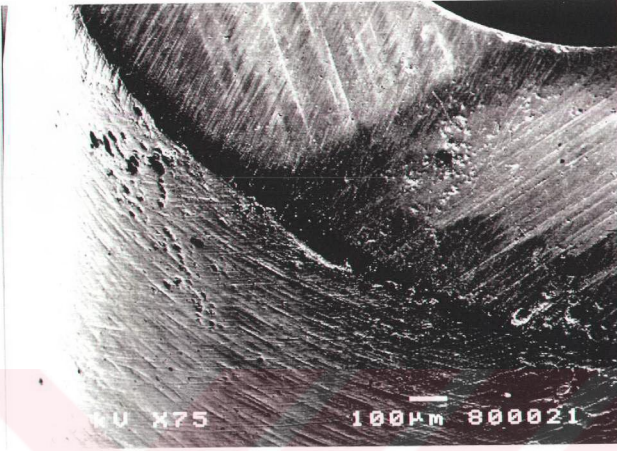
Şekil A.6: TiN kaplamalı zımbanın 150000 delik deldikten sonra alın yüzeyi, kesme kenarı ve prizmatik yüzeyinin görüntüsü.



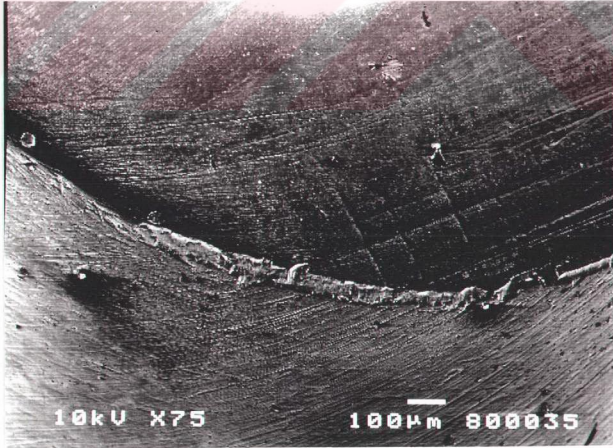
Şekil A.7: TiAlN-T kaplamalı zımbanın 45000 delik delme işleminden sonra elde edilen genel görüntüsü.



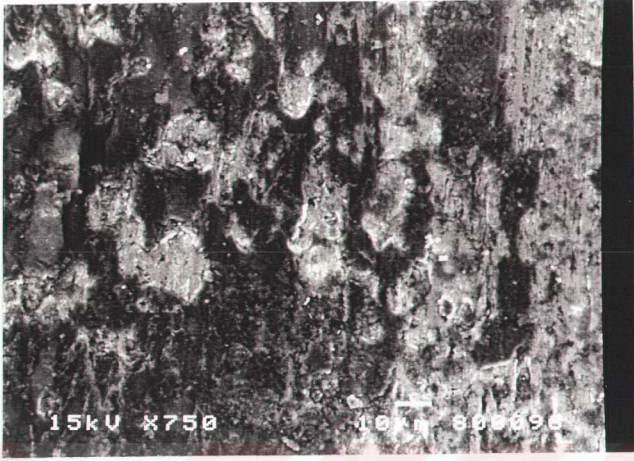
Şekil A.8: TiAlN-T kaplamalı zımbanın 150000 delik deldikten sonra alın yüzeyi, kesme kenarı ve prizmatik yüzeyinin görüntüsü.



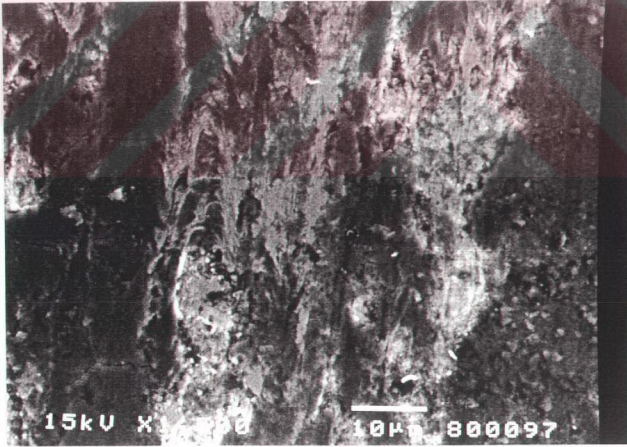
Şekil A.9: TiAlN-D kaplamalı zımbanın 45000 delik delme işleminden sonra elde edilen genel görüntüsü.



Şekil A.10: TiAlN-D kaplamalı zımbanın 150000 delik deldikten sonra alın yüzeyi, kesme kenarı ve prizmatik yüzeyinin görüntüsü.



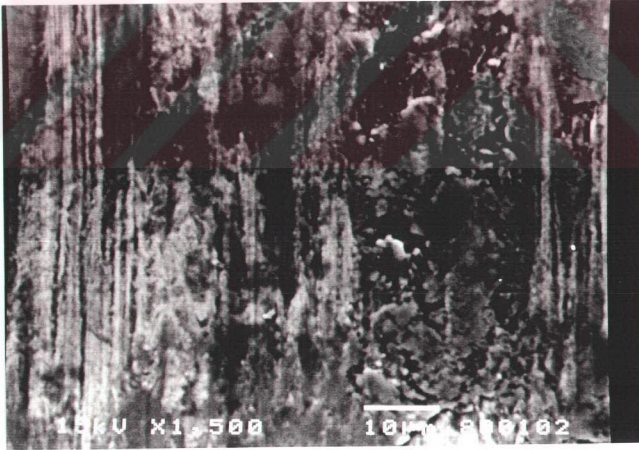
Şekil A.11: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (1N normal yük-5Hz frekans).



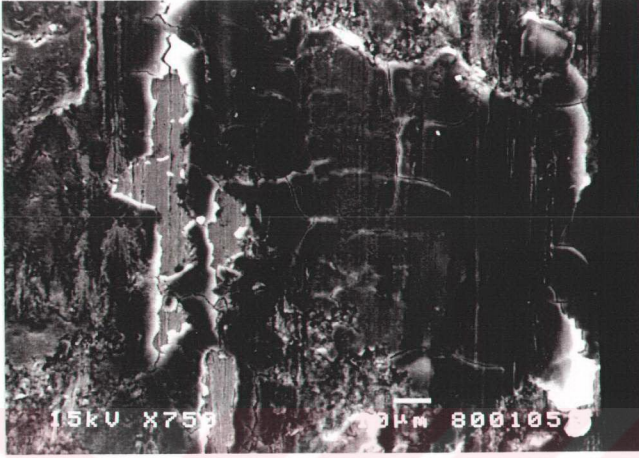
Şekil A.12: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 83.42Fe-15.85Cr-0.73Si (% Ağ.), koyu renkli bölge: 84.2Fe-14.96Cr-0.84Si (% Ağ.) (1N normal yük-5Hz frekans).



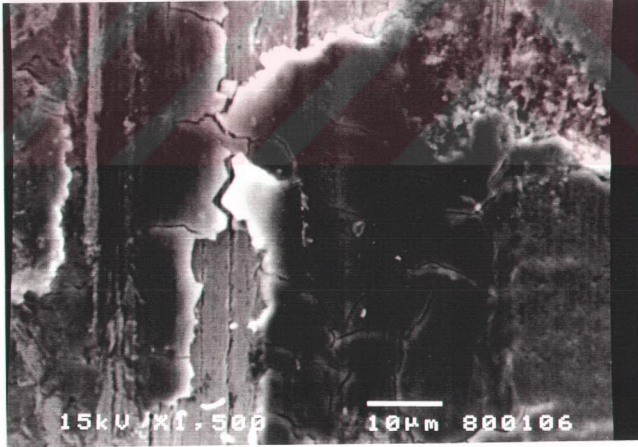
Şekil A.13: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (1.5N normal yük-5Hz frekans).



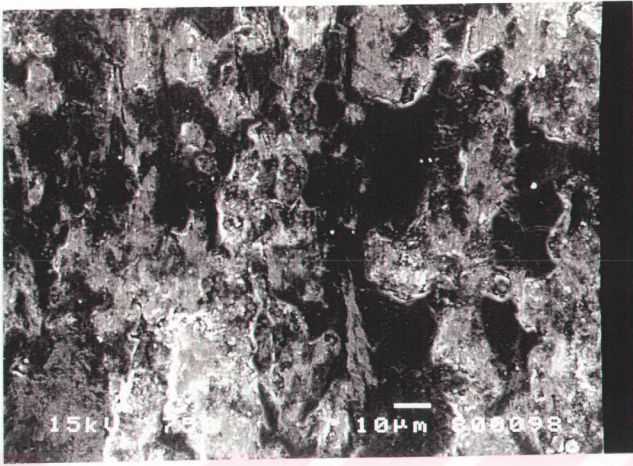
Şekil A.14: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 77.16Fe-16.06Cr-0.53Si-0.17Ti-6.08N (% Ağ.), koyu renkli bölge: 43.31Fe-8.17Cr-1.27Si-32.4Ti-14.85N (% Ağ.) (1.5N normal yük-5Hz frekans).



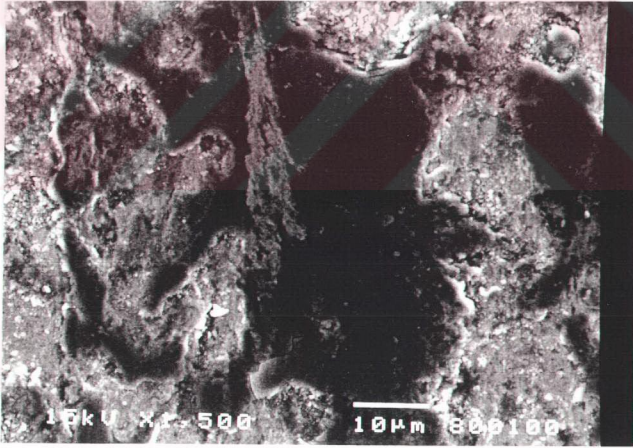
Şekil A.15: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (2N normal yük-5Hz frekans).



Şekil A.16: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 79.45Fe-16.07Cr-0.45Si-0.28Ti-3.75N (% Ağ.), koyu renkli bölge: 19.96Fe-2.46Cr-0.71Si-59.83Ti-17.04N (% Ağ.) (2N normal yük-5Hz frekans).



Şekil A.17: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (2.5N normal yük-5Hz frekans).



Şekil A.18: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 75.64Fe-15.20Cr-0.39Si-3.21Ti-5.56N (% Ağ.), koyu renkli bölge: 47.24Fe-10.51Cr-0.39Si-27.57Ti-14.29N (% Ağ.) (2.5N normal yük-5Hz frekans).



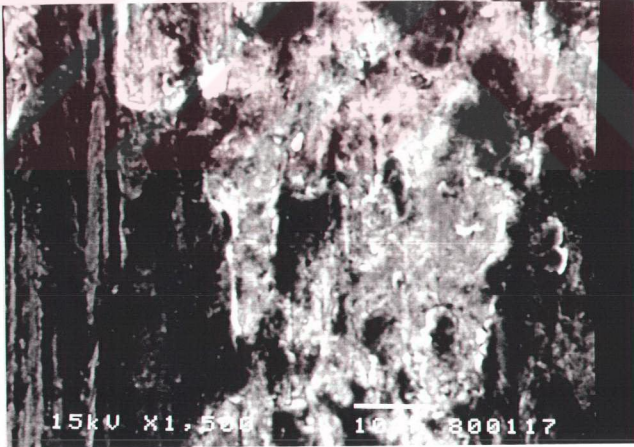
Şekil A.19: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (1.5N normal yük-10Hz frekans).



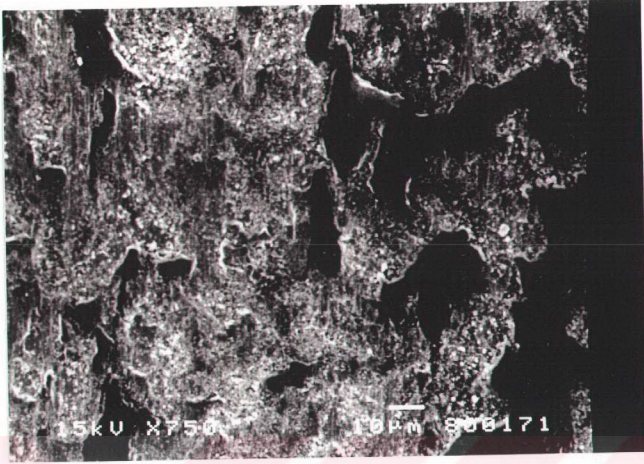
Şekil A.20: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 83.28Fe-15.99Cr-0.73Si (% Ağ.), koyu renkli bölge: 83.42Fe-15.85Cr-0.73Si (% Ağ.) (1.5N normal yük-10Hz frekans).



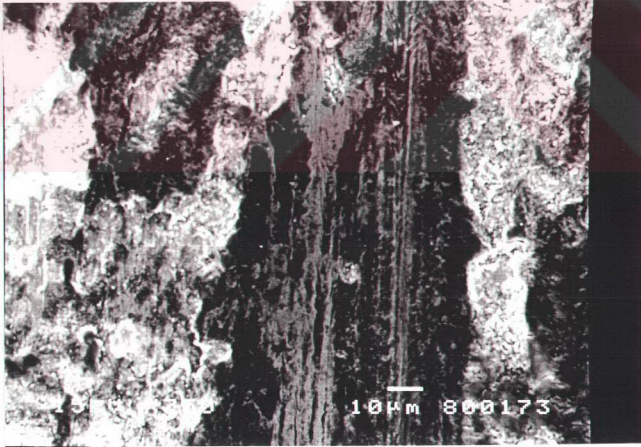
Şekil A.21: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemedeki kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (2N normal yük-10Hz frekans).



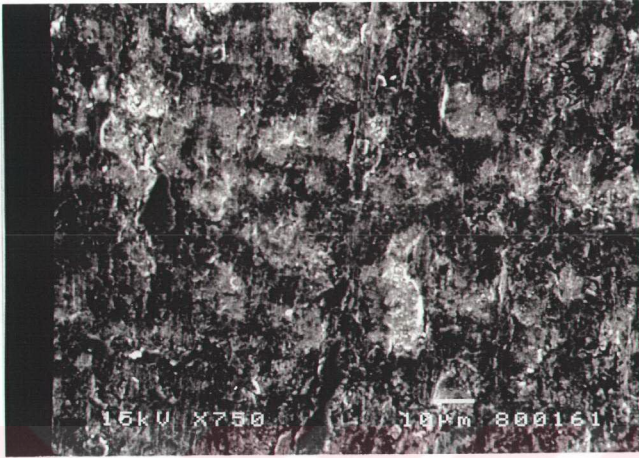
Şekil A.22: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 82.74Fe-16.53Cr-0.73Si (% Ağırlık), koyu renkli bölge: 83.42Fe-15.85Cr-0.73Si (% Ağırlık) (2N normal yük-10Hz frekans).



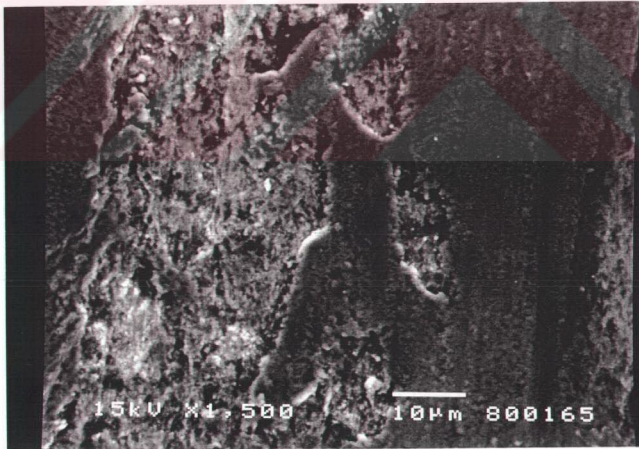
Şekil A.23: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (2.5N normal yük-10Hz frekans).



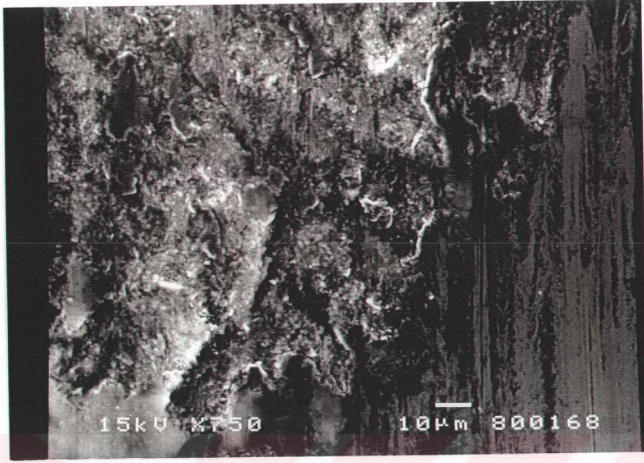
Şekil A.24: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 82.51Fe-16.76Cr-0.73Si (% Ağ.), koyu renkli bölge: 83.42Fe-15.85Cr-0.73Si (% Ağ.) (2.5N normal yük-10Hz frekans).



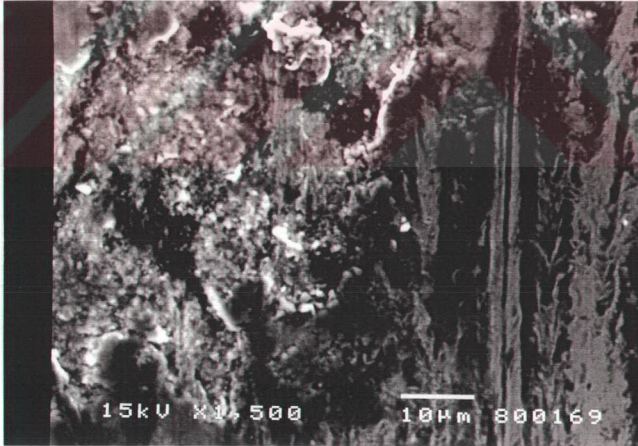
Şekil A.25: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemede kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntü (1N normal yük-20Hz frekans).



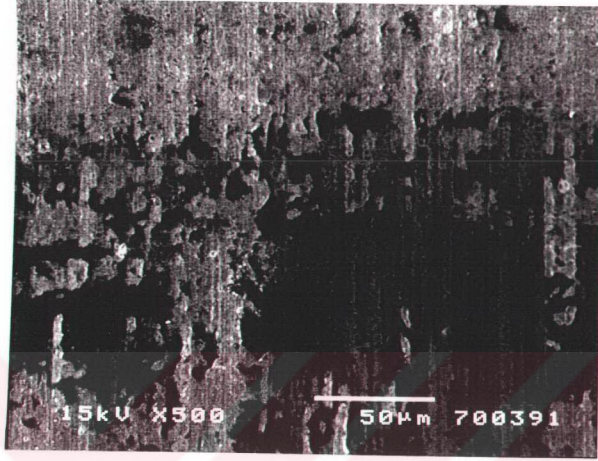
Şekil A.26: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 83.42Fe-15.85Cr-0.73Si (% Ağ.), koyu renkli bölge: 83.35Fe-15.85Cr-0.80Si (% Ağ.) (1N normal yük-20Hz frekans).



Şekil A.27: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemedeki kazımalı aşınma sonrası yüzeyin genel görüntüsü (2.5N normal yük-20Hz frekans).



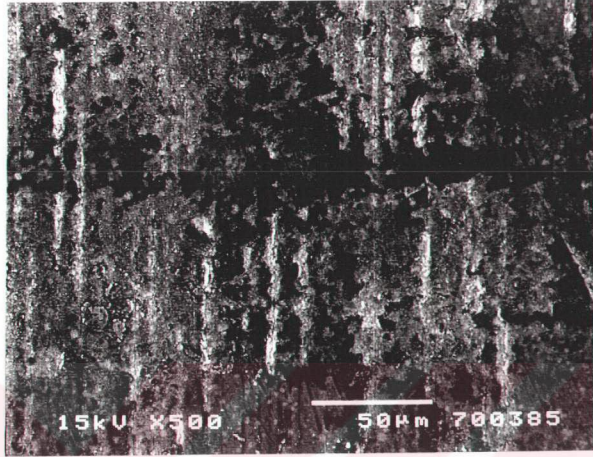
Şekil A.28: TiN kaplamaya karşı çalışmış ferritik paslanmaz çelik karşı malzemenin detay görüntüsü. Açık renkli bölge: 83.11Fe-16.16Cr-0.73Si (% Ağ.), koyu renkli bölge: 82.82Fe-16.35Cr-0.73Si (% Ağ.) (2.5N normal yük-20Hz frekans).



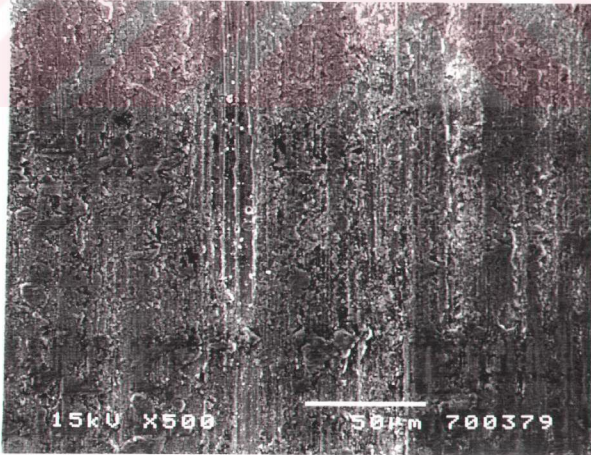
Şekil A.29: CrN kaplamalı yüksek hız takım çeliğinin aşınmış yüzeyinin detay görüntüsü.



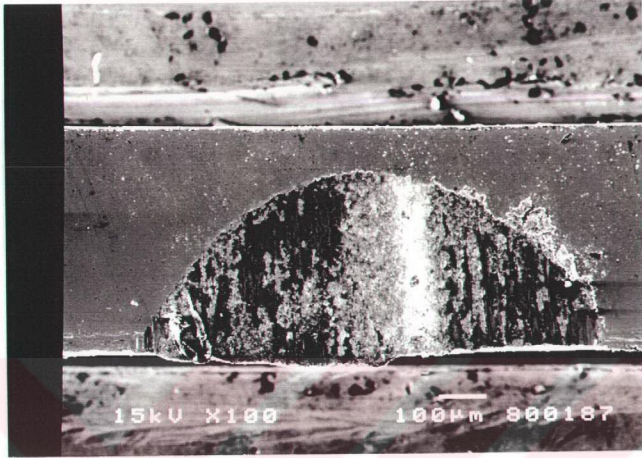
Şekil A.30: TiN kaplamalı yüksek hız takım çeliğinin aşınmış yüzeyinin detay görüntüsü.



Şekil A.31: TiAlN-T kaplamalı yüksek hız takım çeliğinin aşınmış yüzeyinin detay görüntüsü.



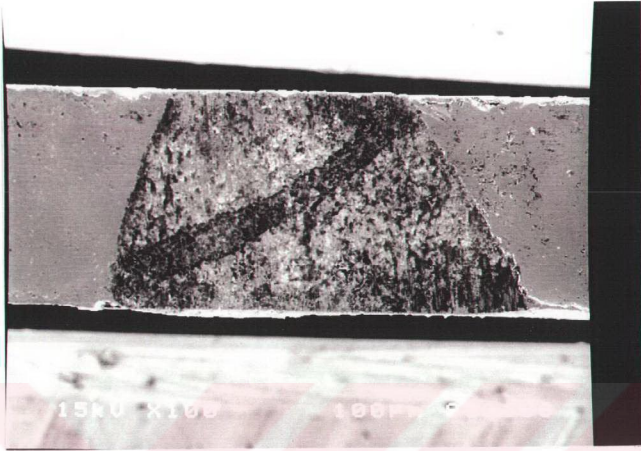
Şekil A.32: TiAlN-D kaplamalı yüksek hız takım çeliğinin aşınmış yüzeyinin detay görüntüsü.



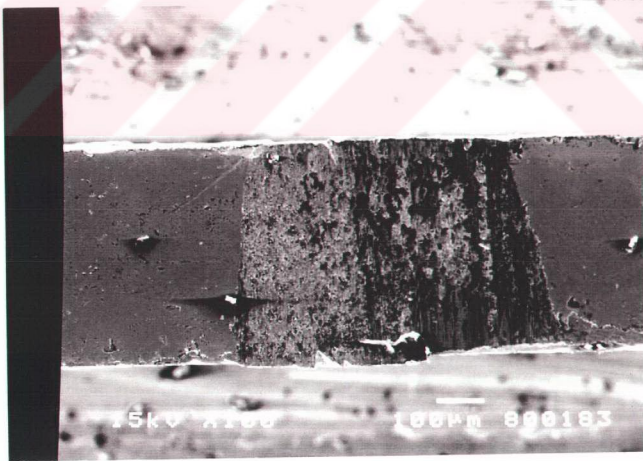
Şekil A.33: CrN kaplamanın karşı malzemesi olan ferritik paslanmaz çeliğin detay görüntüsü.



Şekil A.34: TiN kaplamanın karşı malzemesi olan ferritik paslanmaz çeliğin detay görüntüsü.



Şekil A.35: TiAlN-T kaplamanın karşı malzemesi olan ferritik paslanmaz çeliğin detay görüntüsü.



Şekil A.36: TiAlN-D kaplamanın karşı malzemesi olan ferritik paslanmaz çeliğin detay görüntüsü.

EK A SÖZLÜK

A	Aşınma yığılması/yığıntı	Debris
Ç	Çentik oluşturarak aşındırma Çıkıntı Çizilme Çıkıntılarının çizmesi	Scoring Asperity Scratching Asperity scratching
K	Karşılıklı kazımalı aşınma Karşılıklı kazıma/kayma Kayma aşınması Kazımalı aşınma Kesme aşınması	Reciprocating fretting wear Reciprocating sliding Sliding wear Fretting wear Cutting wear
M	Mikrokaynaklanma	Microjunction, microwelding
O	Oyuk şeklinde aşındırma Oyuklanma aşınması	Gouging Pitting wear
P	Partiküllerin çizmesi	Particle scratching
S	Soyulmaya benzer şekilde aşınma hasarı Sürterek aşındırma Sürerek aşındırma Sürüyerek aşındırma	Flake-like wear debris Galling Ploughing Scuffing
T	Temas alanındaki yorulma Tabakalaşarak aşınma/kalkma (Tabaka halinde kalkarak aşınma)	Contact stress fatigue Delemination wear
Y	Yakalayıp aşındırma Yakalayıp tutunma/yapışma Yapışma sonucunda sürülerek aşınma hasarı Yer değiştirme miktarı	Seizing wear Seizing/gumminess Smearing wear Amplitude, displacement

ÖZGEÇMİŞ

Alev OSMA 1966 yılında Ankara’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 1989 yılında İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimini tamamladı. 1988 yılında Kotekna Gözetim A.Ş.’de başladığı iş yaşamına yüksek lisans eğitimi nedeniyle ara verdi. 1992 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programından Y.Müh. olarak mezun oldu. Mart 1993 yılında Arçelik A.Ş.’nde çalışmaya başladı. Aralıksız beş yıl; önce Ürün Geliştirme Bölümü’nde Malzeme Müh. ve daha sonra da Ar-Ge Merkezi’nde Ar-Ge Müh. olarak çalıştıktan sonra; Şubat 1998 tarihinden beri Ford Otomotiv Sanayi A.Ş.’nde Ürün Geliştirme Müh. olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.