

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PVD KAPLANMIŞ HOTVAR SICAK İŞ TAKIM
ÇELİĞİNİN KURU VE ABRASİV TAKVİYELİ YAĞLI
ŞARTLARDA AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

**Tezi Hazırlayan
Filiz ARAS TUĞRAL**

**Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Eyyup GERÇEKÇİOĞLU**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Kasım 2010
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PVD KAPLANMIŞ HOTVAR SICAK İŞ TAKIM
ÇELİĞİNİN KURU VE ABRASİV TAKVİYELİ YAĞLI
ŞARTLARDA AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

**Tezi Hazırlayan
Filiz ARAS TUĞRAL**

**Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Eyyup GERÇEKÇİOĞLU**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FBY-9-1122 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Kasım 2010
KAYSERİ**

Yrd. Doç. Dr Eyyup GERÇEKÇİOĞLU danışmanlığında Filiz ARAS TUĞRAL tarafından hazırlanan “PVD Kaplanmış Hotvar Sıcak İş Takım Çeliğinin Kuru ve Abrasiv Takviyeli Yağlı Şartlarda Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

05/11/2010

JÜRİ:

Başkan : Doç. Dr. Cem SİNANOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Eyyup GERÇEKÇİOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Recep GÜNEŞ

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ~~05/11/2010~~ tarih ve ~~2010/38~~...08...sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

PVD Kaplanmış Hotvar Sıcak İş Takım Çeliğinin Kuru ve Abrasiv Takviyeli Yağlı Şartlarda Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” isimli tez çalışmamın konu seçiminde ve çalışmamın bütün safhalarında destek ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Eyyup GERÇEKÇİOĞLU’ na teşekkür ederim.

Tez çalışmamın deneysel bulguların toplanması ve hazırlanmasında değerli yardımlarından istifade ettiğim Araş. Gör. Alper CERİT’ e teşekkür ederim.

Numunelerin PVD kaplanmasını yapan Barlok Metal ve Yüzey İşlem San. Tic. Ltd. Şti. sahibi Özgür TOROMAN’ a teşekkür ederim.

Ayrıca bu konuda bana destek veren ve yardımını esirgemeyen eşim Serkan TUĞRAL ve aileme teşekkür ederim.

Filiz ARAS TUĞRAL

Kayseri 2010

**PVD KAPLANMIŞ HOTVAR SICAK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN KURU VE
ABRASİV TAKVİYELİ YAĞLI ŞARTLARDA AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Filiz ARAS TUĞRAL

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Kasım 2010

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Eyyup GERÇEKÇİOĞLU

ÖZET

PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) yöntemi özellikle çeliklere uygulanan, yaygın kullanımlı yüzey sertleştirme yöntemidir. Kesici takımlarda, cerrahi aletlerde, gıda ve dekoratif amaçlı kullanılmaktadır. Bu çalışmada HOTVAR sıcak iş takım çeliğinin kuru ve abrasiv takviyeli yağlı olmak üzere iki ayrı şartta 1,79, 5.15, 8.70, 18.18, 22.22 kayma oranlarında 100 N, 125 N, 150N, 175N' luk ağırlık kuvveti etkisi altındaki aşınma davranışları incelenmiş; kayma yoluna bağlı olarak ağırlık kayıpları grafikleri ve aşınma sonucu malzeme kaybı bilgisi elde edilmiştir. Bu deneyler için 2' nci Ana Bakım Merkez Komutanlığında hazırlanan HOTVAR çeliği numuneleri, Assab Korkmaz Çelik Tic.ve San.A.Ş' de ısıl işleme tabi tutulmuş; ısıl işlem gören numuneler Barlok Metal ve Yüzey İşlem San. Tic. Ltd. Şti firmasında PVD kaplanmıştır. Aşınma testleri Erciyes Üniversitesi Malzeme laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak; kuru koşullarda değişen yük ve kayma oranlarında aşınma kayıplarında artış gözlenmiştir. Abrasiv takviyeli yağlı koşullarda değişen yük ve kayma oranlarında ise başlangıçta aşınma kayıpları yüksek iken yük ve kayma oranları arttıkça azalma eğilimi göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: HOTVAR, PVD, Aşınma.

**AN INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOUR OF PVD COATED HOTVAR
DRY AND OILED CONDITIONS TOOL STEEL**

Filiz ARAS TUĞRAL

Erciyes University, Graduate School of Natural and Sciences

M.Sc. Thesis, September 2010

Thesis Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Eyyup GERÇEKÇİOĞLU

ABSTRACT

Physical vapor deposition method is a widespread surface hardening method which is especially applied to steels. In this study, the depreciation behaviour of HOTVAR hot work tool steel is investigated in two different conditions which are dry and abrasive reinforced oiled at 1.79, 5.15, 8.70, 18.18, 22.22 sliding ratios and under 100 N, 125 N, 150N, 175 N force of gravity effect; depending on the sliding way, the weight loss graphics and the loss of material as a result of corrosion data are obtained. For these experiments, the HOTVAR steel samples which are prepared at 2. ABMK are subjected to thermal processing at ASSAB Co.

The thermal processed samples are coated with PVD at BARLOK Metal Co. . Corrosion tests are made in material laboratory of Erciyes University.

Consequently, increase in abrasion loss is observed in changing weight and sliding ratio under dry conditions. in the case of changing weight and sliding ratios under abrasive reinforced oiled conditions, while abrasion loss is high at the beginning, a roll-off rate is observed as the weight and sliding ratios are increased.

Keywords: PVD, HOTVAR, Wear.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
TABLOLAR LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
RESİM LİSTESİ	xiii
1. BÖLÜM.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Konusu	1
1.2 Konunun Önemi	1
1.3 Tezin Amacı	2
2. BÖLÜM.....	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 Giriş.....	3
2.2 Yapılan Çalışmalar	3
3.BÖLÜM.....	13
TRİBOLOJİ ve YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ.....	13
3.1 Tribolojinin Tanımı	13
3.1.1 Sürtünme	14
3.1.2 Aşınma ve Aşınma Mekanizmaları	17
3.1.3 Adezyon Aşınması.....	19
3.1.4 Abrasiv Aşınma.....	21
3.1.5 Erozyon Aşınması	24

3.1.6 Yorulma Aşınması	26
3.1.7 Korozyon	28
3.2. Yüzey Kaplama Yöntemleri ve PVD Metodu	30
3.2.1 Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD).....	33
3.2.2 İyon Demeti Destekli Biriktirme (IBAD)	35
3.2.3 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD).....	35
3.2.4 Buharlaştırma ile PVD Kaplama Yöntemleri.....	37
3.2.4.1 Rezistans ve Endüktif Buharlaştırma Yöntemleri.....	37
3.2.4.2 Elektron Demeti ile Buharlaştırma Yöntemi.....	38
3.2.4.3 Katodik Ark Yöntemi ile Buharlaştırma	39
3.2.5 Sıçratma İle PVD Kaplama Yöntemleri.....	40
3.2.5.1 Diyot Sıçratma	42
3.2.5.2 Triyot Sıçratma	43
3.2.5.3 Manyetik Sıçratma	43
3.2.6 Buharın Taşınması	44
3.2.7 Yoğuşma ve Film Büyümesi	45
3.2.8 PVD Kaplama Uygulamaları.....	48
3.2.8.1 TiN (Titanyum Nitrür) Kaplama	48
3.2.8.2 TiAlN (Titan Alüminyum Nitrür) Kaplama	49
3.2.8.3 CrN (Krom Nitrür) Kaplama	50
3.2.8.4 ZrN (Zirkonyum Nitrür) Kaplama	51
3.3 Katodik Ark Metodu ve Sistemleri.....	51
3.3.1 Makro Partiküller.....	60
3.3.2 Katot Spotlarında Partikül Oluşumu	62
3.3.3 Partikül-Plazma ve Partikül-Ana Malzeme Etkileşimi	62

3.3.4 Partikül Filtreleme.....	63
3.4 TiN Kaplamaların Özellikleri.....	66
3.4.1 Taban Malzemesine Yapışma.....	70
3.4.2 Sürtünme ve Aşınma Özellikleri.....	73
4. BÖLÜM.....	83
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	83
4.1 Giriş.....	83
4.2. Deney Malzemesi.....	83
4.3. Isıl İşlem Aşamaları.....	85
4.4 TiN Kaplama İşlemi.....	85
4.5. Deney Düzeneği.....	88
4.6. Metalografik Numune Hazırlama ve İnceleme.....	92
4.7 Deneysel Çalışma.....	93
4.8 Kuru Şartlarda HOTVAR Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi.....	94
4.8.1 Yüke Bağlı Olarak Ağırlık Kaybı Değişimi.....	94
4.8.2 Yüke Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğünün Değişimi.....	95
4.8.3 Yüke Bağlı Olarak Sürtünme Katsayısının Değişimi.....	96
4.8.4 Ağırlık Kaybının Uygulanan Devire Göre Değişimi.....	97
4.8.5 Yüzey Pürüzlülüğünün Uygulanan Devire Göre Değişimi.....	98
4.8.6 Ağırlık Kaybının Uygulanan Kayma Oranına Göre Değişimi.....	99
4.9 Abrasiv Takviyeli Yağlı Şartlarda HOTVAR Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi.....	99
4.9.1 Yüke Bağlı Olarak Ağırlık Kaybının Değişimi.....	100
4.9.2 Yüke Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğünün Değişimi.....	100
4.9.3 Ağırlık Kaybının Uygulanan Devire Göre Değişimi.....	101

4.9.4 Pürüzlülüğün Uygulanan Devir Sayısına Göre Değişimi.....	102
4.9.5 Ağırlık Kaybının Uygulanan Kayma Oranına Göre Değişimi	103
5.BÖLÜM.....	104
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	104
5.1. Sonuçlar.....	104
5.2. Öneriler.....	105
KAYNAKLAR.....	106
EKLER	111
ÖZGEÇMİŞ.....	114

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Bazı ince sert film kaplamaları ve özellikleri	32
Tablo 3.2. Titanyum nitrür kaplamanın özellikleri	49
Tablo 3.3. Titan karbo nitrür kaplamanın özellikleri	49
Tablo 3.4. Titan alüminyum nitrür kaplamanın özellikleri.....	50
Tablo 3.5. Krom nitrür kaplamanın özellikleri.....	51
Tablo 3.6. Zirkonyum Nitrür kaplamanın özellikleri.....	51
Tablo 3.7. PVD metodu ile üretilen TiN kaplamaların fiziksel özellikleri.	68
Tablo 4.1. HOTVAR özel alaşımlı çeliğinin mekanik özellikleri.....	84
Tablo 4.2. HOTVAR özel alaşımlı çeliğinin fiziksel özellikleri.....	84
Tablo 4.3. HOTVAR özel alaşımlı çeliğinin elementel analizi.	84
Tablo 4.4. TiN kaplama parametreleri.....	88
Tablo 4.5. Deney sistematığı.	93

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Sürtünme esnasındaki gerçek temas noktaları.	15
Şekil 3.2. Atomik boyutta sürtünme.	16
Şekil 3.3. Sürtünmenin çeşitleri.	16
Şekil 3.4. Aşınma safhaları.	18
Şekil 3.5. Adezyon aşınması.	20
Şekil 3.6. Adezyon sırasındaki metal transferi.	20
Şekil 3.7. Malzeme yüzeyindeki adezyon çizikleri.	20
Şekil 3.8. Abrasiv aşınma.	21
Şekil 3.9. Abrasiv aşınma.	22
Şekil 3.10. İki yüzeyli ve üç yüzeyli aşınma.	21
Şekil 3.11. Abrasiv aşınma mekanizmaları.	22
Şekil 3.12. Erozyon aşınması.	24
Şekil 3.13. Erozyon aşınma mekanizmaları.	25
Şekil 3.14. Malzeme karakteristikleri ve erozyon parametrelerinin erozyona etkisi.	26
Şekil 3.15. Sonsuz dişlideki yorulma aşınması.	27
Şekil 3.16. Yorulma sonucu yüzeyde çatlak oluşumu ve büyümesi.	27
Şekil 3.17. Korozyon aşınmasının gelişimi.	29
Şekil 3.18. Kaplanacak malzemenin bulunduğu fiziksel hale göre kaplamaların sınıflandırılması.	31
Şekil 3.19. Değişik yüzey kaplama yöntemlerinin uygulama kalınlıkları.	32
Şekil 3.20. Şematik olarak buhar fazdan yapılan kaplama prosesi.	33
Şekil 3.21. CVD kaplama yönteminin şematik gösterimi.	34
Şekil 3.22. IBAD yönteminin şematik gösterimi.	35
Şekil 3.23. PVD kaplama yönteminin sınıflandırılması.	36
Şekil 3.24. Rezistanslı ısıtıcı sistemli PVD sistemi.	37

Şekil 3.25. Oyuk katot tabancası kullanan PVD sistemi.....	38
Şekil 3.26. Katodik ark PVD sistemi.	39
Şekil 3.27. Sıçratma mekanizması.....	41
Şekil 3.28. Diyot sıçratma mekanizması.....	42
Şekil 3.29. Triyot sıçratma mekanizması.	43
Şekil 3.30. Manyetik sıçratma mekanizması.....	43
Şekil 3.31. Film büyüme mekanizması.....	45
Şekil 3.32. Film büyüme modelleri.....	45
Şekil 3.33. Thornton kaplama morfolojisi modeli.	46
Şekil 3.34. Thornton modelindeki Zonel ve ZoneT bölgeleri.	47
Şekil 3.35. Thornton modelindeki Zone2 ve Zone3 bölgeleri.....	48
Şekil 3.36. Katodik ark sisteminin şematik gösterimi.	52
Şekil 3.37. Katodik ark yığma sistemi.....	55
Şekil 3.38. LAFAD sisteminin şematik gösterimi.	56
Şekil 3.39. Ark akımı, Biriktirme süresi, Kaynak - taban malzemesi arası mesafe, Azot kısmi basıncı, Bias voltajının makropartikül sayısı üzerine etkisi.	61
Şekil 3.40. Makropartiküllerin katot spotlarında oluşumu.....	65
Şekil 3.41. Çeşitli biriktirme sıcaklıklarında kaplama taban malzemesi ara yüzeyinin yapısı.....	72
Şekil 3.42. Daha yumuşak taban malzemeleri üzerindeki sert kaplamalar için; İnce kaplamalarda taban malzemesinin elastik olarak deforme oluşu, Sağlam kaplamalarda kaplamanın yükü taşıyarak deformasyonu önleyişi.....	74
Şekil 3.43. TiN kaplanmış çeliğin çeliğe karşı kayması durumundaki tipik bir aşınma prosesinde görülen dört değişik aşınma bölgesinin şematik gösterimi.	76
Şekil 3.44. TiN kaplama ve çelik arasındaki kayma temaslarında değişik kayma hızları için elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.....	78

Şekil 3.45. TiN kaplanmış M2 takım çeliği üzerinde kayan sertleştirilmiş bir çelik bilyanın geçiş sayısının fonksiyonu olarak sürtünme katsayısının değişimi....	79
Şekil 3.46. İyon kaplama ile TiN ve TiC kaplanmış ve kaplanmamış çelik pin ve disklerle yapılan Disk-Disk deneylerinden elde edilen; Sürtünme katsayısı eğrileri, Pin ve diskin aşınma miktarları (F=5 N, V=0.2 m/s).....	81
Şekil 4.1. Sıcak iş takım çeliklerinin ısıl işlem aşamaları.....	85
Şekil 4.2. Aşınan ve aşındıran deney numunelerinin geometrisi.....	86
Şekil 4.3. TiN kaplı numunenin SEM görüntüsü.....	87
Şekil 4.4. Deney düzeneği.....	89
Şekil 4.5. TiN kaplanmış HOTVAR çeliğinin mikro sertlik değerleri.....	93
Şekil 4.6. Ağırlık kaybının uygulanan kuvvete göre değişimi (kuru koşullar).....	95
Şekil 4.7. Uygulanan kuvvete göre yüzey pürüzlülüğünün değişimi (kuru koşullar).....	96
Şekil 4.8. Sürtünme katsayısının uygulanan kuvvete göre değişimi (kuru koşullar).....	96
Şekil 4.9. Ağırlık kaybının uygulanan devire göre değişimi (F=100 N kuru koşullar)...	97
Şekil 4.10. Yüzey pürüzlülüğünün uygulanan devire göre değişimi (F=100 N kuru koşullar).....	98
Şekil 4.11. Ağırlık kaybının kayma oranına göre değişimi (kuru koşullar).....	99
Şekil 4.12. Ağırlık kaybının uygulanan kuvvete göre değişimi(Abrasiv takviyeli).....	100
Şekil 4.13. Uygulanan kuvvete göre yüzey pürüzlülüğünün değişimi (Abrasiv takviyeli).....	101
Şekil 4.14. Ağırlık kaybının uygulanan devir sayısına göre değişimi (F=100 N, Abrasiv takviyeli).....	101
Şekil 4.15. Yüzey pürüzlülüğünün uygulanan devire göre değişimi (F=100 N Abrasiv takviyeli).....	102
Şekil 4.16. Ağırlık kaybının kayma Oranına göre değişim (Abrasiv takviyeli).....	103

RESİM LİSTESİ

Resim 1. Aşındıran disk.....	89
Resim 2. Aşınan disk.....	90
Resim 3. Kuru koşulda aşınan diskler.....	90
Resim 4. Aşınma deney düzeneğinin kuru koşullardaki genel görünümü.	91
Resim 5. Abrasiv takviyeli yağlı koşullardaki deney düzeneği.	91

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1 Tezin Konusu

Günümüzde hemen hemen tüm mühendislik uygulamalarında sürtünme ve dolayısıyla da aşınma ortak bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Aşınma hem malzeme masrafı olarak hem de bakım, onarım, işçilik, yedek parça vs. gibi maliyetlere sebep olmaktadır. Bu sebeple triboloji alanındaki çalışmalar gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Sürtünme, aşınma, korozyon gibi malzemenin ömrünü azaltan etkenler ile mücadelede kullanılan yöntemlerden biri de ince film kaplamalardır. Bu kaplamalar sayesinde malzemeye sahip olmadığı özellikler tüm malzemenin değiştirilmesinden çok daha ucuza kazandırılmaktadır.

Aşınma dirençli tabakaların elde edilmesinde kullanılan yüzey kaplama tekniklerinden birisi de PVD olarak isimlendirilen modern kaplama metodudur. Özellikle Ti esaslı ince ve sert kaplamalar takım sanayindeki kesici elemanlarda kullanılmakta olup, takım ömrünü arttırmalarının yanında yüksek kesme hızlarına da müsaade ederek zaman tasarrufu ve ekonomi sağlamaktadırlar. Bu çalışmada ise PVD kaplanmış HOTWAR sıcak iş takım çeliğinin kuru ve abrasiv takviyeli yağlı şartlarda aşınma davranışları incelenecektir.

1.2 Konunun Önemi

PVD metodu ile kesici takımlar üzerinde üretilen TiN kaplamaların aşınma dayanımları ve mekanizmaları, kaplama prosesi ve parametrelerine bağlı olan kaplama özellikleri,

taban malzemesi özellikleri ve temas şartlarının meydana getirdiği makro ve mikro mekaniksel tribolojik mekanizmalara göre değişir. Kaplama proses parametrelerinin optimizasyonu ile TiN kaplama özelliklerinin geliştirilmesi temas şartlarının sistem özellikleri üzerindeki etkilerinin iyi bilinmesine bağlıdır. Bu etkilerin iyi anlaşılması optimum özelliklere sahip kaplamaların üretilmesinde faydalı olacaktır.

1.3 Tezin Amacı

Malzemelerin servis ömürlerinin iyileştirilmesi amacıyla farklı ısıl işlemler veya yüzey kaplama teknikleri uygulanmaktadır. Bu işlemlerin temel amacı malzemelerin kullanım amaçları doğrultusunda mekanik, kimyasal ve tribolojik v.b. özelliklerini iyileştirmektir. Gerekli yüzey kalitesinin elde edilememesi halinde malzemelerin servis ömrü kısaltmakta ve tonlarca malzeme kaybı ortaya çıkmaktadır. Özellikle bu kayıplar birbiri ile sürtünmeli halde çalışan makine elemanlarında aşınma ve bunun sonucu olarak da hasara uğramasıyla milyonlarca mali kayıplar ortaya çıkmaktadır.

PVD yöntemi ile TiN kaplanmış özel alaşımlı HOTVAR çeliğinin kuru ve abrasiv takviyeli yağlı ortam şartlarında farklı parametrelere bağlı olarak da birbirine göre izafi dönme hareketi yapan malzemelerin optimum çalışma şartlarını belirlemektir.

2. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Giriş

PVD metodu ile üretilen TiN kaplamalar, sağladıkları önemli avantajlar nedeniyle üzerinde en çok araştırma yapılan kaplamalardan birisidir ve literatürde bu konuda çok sayıda çalışmaya ulaşılabilir. Bu çalışmalar daha çok TiN kaplamaları spesifik özelliklerinin geliştirilmesi için proses parametrelerinin optimizasyonunu, yeni üretim yöntemleri ile uygulama alanlarının genişletilmesini ve TiN kaplamayı içeren veya içermeyen multi veya tek tabakalı alternatif kaplamalar üzerine yapılan araştırmaları içerir. Yapılan literatür araştırmasında; katodik ark metodu ve en son gelişmeler ile bu metotla üretilen TiN kaplamaları özellikleri ve kayma temaslarındaki aşınma davranışları üzerine odaklanılmıştır.

2.2 Yapılan Çalışmalar

Katodik ark metodu, sistem özellikleri ve bu metotla üretilen kaplamalarla ilgili çok sayıda çalışma vardır. Sanders ve arkadaşları [1], katodik ark yığıma teknolojisini incelemişler, makro partikül filtreleme, ark kontrolü ve katodik ark metodunun uygulama alanları konularındaki en son gelişmeler hakkında ayrıntılı bilgiler vermişlerdir.

Martin ve arkadaşları da [2] filtreli vakum ark prosesini incelemişler, farklı filtreleme sistemleri ve bu sistemler ile üretilen yeni filmlerin özellikleri hakkında bilgiler vermişlerdir. Anders [3], enerjistik film yığıma teknikleri, film özellikleri ve bazı

uygulamaları özet olarak incelemiş ve çalışmasında filtreli katodik ark plazmaların üretimi, özellikleri ve kullanımı üzerine odaklanmıştır. Martin ve arkadaşları [4], katodik ark sisteminde iki ark kaynağını beraber kullanarak ürettikleri bileşik kaplamaların özelliklerinin magnetron sıçratma ve CVD metotları ile üretilenlerinki ile benzer olduğunu ve bileşik kaplamalar ile sertliğin arttırılabileceğini tespit etmişlerdir.

Fuchs ve arkadaşları [5], pulslu katodik ark prosesinde ki, iyon akım yoğunluğu, yığma oranı ve film kalınlığı üniformluğu üzerine incelemeler yapmışlar ve DC çalışma tarzına göre dikkate değer farklılıkların olduğunu tespit etmişlerdir. Özellikle, yüksek puls akımlarının iyon yayılmasının açısız dağılımını ve tabaka oluşumunu etkilediğini, puls frekansının tabaka kalınlığı dağılımı üzerinde hiçbir etkisi olmadığından dolayı, bu parametrenin maksimum hedef kullanımına ulaşmak için seçilebileceğini ve sonuç olarak da puls formu ve frekansının ark prosesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi gereken bir konu olduğunu ortaya koymuşlardır. Tarrant ve arkadaşları [6], filtreli katodik arkta kombine edilmiş yığma ve implantasyon prosesini kullanmışlar, 20 keV'luk yüksek enerjili pulslu iyon bombardımanı ile üretilen filmlerde ana malzeme içerisine implantasyonun meydana geldiğini, üretilen kalın karbon filmlerinde gerilmenin azalarak film yapışmasının arttığını tespit etmişlerdir.

Tay ve arkadaşları [7], 4 inç çaplı klasik 90° kanal filtre ile 4 ve 6 inç çaplı filtreleri karşılaştırmışlar. Bunun sonucunda filtrelerin plazma taşıma veriminin daha yüksek olduğunu ve büyük çapta bu oranın arttığını, maksimum verim için ark akımının ise sırayla; 60, 90 ve 120 A olduğunu tespit etmişlerdir.

Keleş [8], katodik ark metodu ile yüksek hız çeliği matkap uçları üzerinde üretilen TiN kaplamaların sertlik, kalınlık, yüzey pürüzlülüğü ve taban malzemesine yapışma mukavemeti özellikleri üzerine katot akımı, gaz basıncı ve bias voltajının etkilerini incelemiş ve proses parametrelerinin Taguchi metodu ile optimizasyonunu gerçekleştirmiştir.

Sonuç olarak da katodik ark metodunun, istenilen özelliklere sahip Ti kaplamaların üretilmesinde başarıyla kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Kaya da [9], katodik ark metodu ile takım çeliği üzerinde üretilen TiN kaplamaların kalınlıklarının artan bias voltajı ile azaldığını tespit etmiştir.

Cheng [10], düzlem dışı çift kıvrımlı bir filtreye sahip katodik vakum ark tekniği ile üretilen TiN filmlerinin yapısını XRD ile analiz etmiştir. Bunun sonucunda yığılma basıncı, ana malzeme biası ve yığılma sıcaklığının filmlerin yapısı üzerindeki etkisini incelemiş ve yapının gelişimini etkileyen temel faktörlerin; iç gerilmeler ve yüzey pürüzlülüğü olduğunu ortaya koymuştur.

Zhengyang ve arkadaşları [11], katodik ark metodu ile yüksek hız çeliği ana malzemeler üzerinde üretilen TiN kaplamaların özelliklerine DC biası üzerine uygulanan puls biasının etkilerini araştırmışlardır. Bunun için, puls piki voltajı, frekans ve görev çevrimi puls güç kaynağı faktörlerini ve basınç, ark akımı ve DC bias voltajını değiştirmişler ve kaplamaların yüzey pürüzlülüğü, kalınlık ve mikro sertlik değişimlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak DC+puls bias voltajı kullanılarak üretilen filmlerin makro partikül yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığını, film yapışması ve üniformluluğunun ise arttığını tespit etmişlerdir.

Lim ve arkadaşları ise [12], katodik ark metodu ile silisyum ana malzemeler üzerinde PIII (plasma immersion ion implantation)'lı ve PIII'sız ürettikleri TiN filmlerinin özelliklerini karşılaştırmışlardır. PIII sistemi için; 20 kV'luk yüksek pulslu bias voltajı, 20 us'lık puls sürekliliği ve 250 Hz'lik tekrarlanma oranını kullanmışlardır. Lim ve arkadaşları, her iki kaplamanın da benzer bir stokiyometriye sahip olduğunu ve kaplama-ana malzeme ara yüzeyinde kompleks ince tabakaların oluştuğunu tespit etmişlerdir. Farklılığın ise, PIII' nin kullanımı ile kaplama rengindeki altın sarısından morumsu bir renge ve tercihli yönelmedeki (III)'den (200) düzlemine olan değişimde olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak da, katodik ark metodu ile PIII'nin kombinesinin, TiN ince filmlerinin yönelmesini kontrol etmek için kullanılabileceğini

ve ayrıca film yapısındaki gerilme seviyesini azaltmada faydalı olabileceğini ortaya koymuşlardır.

İyon implantasyonunun kaplama yüzeyine uygulandığı çalışmalar da vardır. Wang ve arkadaşları [13], katodik ark metodu ile yüksek hız çeliği ana malzemeler üzerinde ürettikleri TiN kaplamalar (3 µm) üzerine MPlI (metal plasma ion implantation) prosesi ile Al iyon implantasyonunu gerçekleştirmişler ve kaplamaların aşınma ve oksidasyon dirençlerini incelemişlerdir. Wang ve arkadaşları, implante edilen Al'un TiN kafesinde Ti'un yerine geçerek AlN ve TiAlN bileşiklerini oluşturduğunu, Al iyon implantasyonunun AlN/TiAlN fazının oluşumundan dolayı gerilmeyi azaltarak aşınma direncini arttırdığını ve TiO₂ nin oluşumunu önleyerek TiN'ün oksidasyon direncini geliştirdiğini tespit etmişlerdir.

Mustapha ve arkadaşları [14], filtreli katodik ark buharlaştırma ile ürettikleri TiN ve Al₂O₃ filmlerinin iyi yapısal özelliklere sahip olduklarını ve prosesin oksit filmlerinin yığılmasında ümit verici bir teknik olduğunu ortaya koymuşlardır. Niyomsoan ve arkadaşları ise [15], katodik ark buharlaştırma ile üretilen TiN ve ZrN ince filmlerinin renk değişimini, azot ile geçiş metalleri arasındaki atomik oran ve oksijen kirliliğine göre incelemişlerdir. Azotun geçiş metallere atomik oranının artmasının altın tarzi renk yansıtıcılığının azalmasına ve sarılığın artmasına sebep olduğunu, önemsenmeye değer bir renk değişimi olmaksızın stokiyometri değişiminin TiN için ZrN'den daha büyük olduğunu ve oksijen içeriğindeki değişimin azotunki ile ayrı yönde renk değişimi ile sonuçlandığını tespit etmişlerdir. Katodik arkın diğer metotlar ile kombine edilmesine dayanan yeni metotlar da geliştirilmiştir.

Martin ve arkadaşları [16], Ti_{1-x}Si_xNy ince filmlerinin üretiminde, titanyum iyon akışı için bir katodik ark buharlaştırma kaynağının, silisyum atom akışı için ise bir DC magnetron sıçratma kaynağının aynı anda kullanıldığı kombine bir teknik tanımlamışlardır. Martin ve arkadaşları, prosesin önemli avantajlara sahip olduğunu ve üretilen Ti_{1-x}Si_xNy filmlerinin TiN'den daha yüksek bir sertliğe ve üstün termal

özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. TiN kaplamaların aşınma davranışlarının laboratuvar ortamındaki aşınma deneyleriyle, kesme performansına ve takım ömrüne etkilerinin ise kesici takımlardaki gerçek performans deneyleriyle incelendiği çok sayıda çalışma literatürde mevcuttur.

He ve arkadaşları [17], katodik ark metoduyla yüksek hız çeliği ana malzemeler üzerinde üretilen TiN kaplamaların, kuru kayma koşullarındaki aşınma davranışlarını, karşı malzeme olarak Cr çeliğinin kullanıldığı ball-on-disc deneyi ile incelemiştir. Deneylerde 9.8-88.2 N aralığındaki yükler ile 0.12-0.62 m/s aralığındaki hız değerlerini değişken parametreler olarak kullanmışlar, kayma mesafesini 600 m'de sabit tutmuşlardır. He ve arkadaşları, yükün artmasıyla numunelerdeki ağırlık kaybının da lineer bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Her yük değerinde karşı malzemeden kaplama yüzeyine malzeme transferinin meydana geldiğini, artan yükte birlikte sürtünme katsayısında kuvvetli bir değişim gözlenmemekle birlikte, geniş temas alanından dolayı yüksek yüklerde sürtünme katsayısının biraz arttığını, kayma hızının artmasıyla aşınma kaybının arttığı, yüksek hızlarda meydana gelen sürtünme ısısının oluşturduğu oksidasyonun ise sürtünme katsayısını azalttığını tespit etmişlerdir.

Wilson ve arkadaşları [18], katodik ark metoduyla TiN kaplanmış M2 yüksek hız çeliği disklerin kuru kayma koşullarındaki aşınma davranışlarını, karşı malzeme olarak M2 yüksek hız çeliği pinlerin kullanıldığı pin-on-disc metoduyla, 20-250 N arasında değişen yüklerde ve 0.7 m/s sabit kayma hızında incelemişler ve üç aşınma rejimi belirlemişlerdir.

Hogmark ve arkadaşları [19], PVD metoduyla yüksek hız çeliği pinler üzerinde üretilen TiN ve çeşitli kaplamaların karbon çeliğine karşı kuru kayma koşullarındaki aşınma davranışlarını 0.5, 1, 1.5 m/s kayma hızlarında incelemişler, orta seviyedeki temas koşullarında kaplamalarda hafif abrasiv aşınma ve parlamanın meydana geldiğini, yüksek kayma hızlarında ise temas yüzeyinde gerilmenin arttığını ve kaplama yüzeyinde kayma yönüne dik yönde çatlakların meydana geldiğini ve kesişen çatlakların

ise birleşerek kaplamanın parçalar halinde kaldırılmasına sebep olduğunu, hızın daha fazla artırılması ile de bu mekanizmanın hızlandığını tespit etmişlerdir.

Skoric ve arkadaşları da [20], yüksek hız çeliği (DIN S 6-5-2) ana malzemelere, PVD metoduyla TiN ve (Ti,Al)N kaplamadan önce uygulanan plazma nitrürlemenin aşınma davranışına olan etkilerini inceledikleri pin-on-ring deneyinde, sabit 50 N'luk normal yük ve 1.33 m/s' lik kayma hızını kullanmışlar, üretilen kompozit kaplamaların aşınma dirençlerinin yüksek olduğunu, düşük sürtünme katsayısı ve temas sıcaklığı sağladığını tespit etmişlerdir.

Popescu ve arkadaşları [21], 8 mm çaplı HSS matkapları katodik ark metodunu kullanarak TiN ile kaplamışlar ve karbon çeliği (Brinell sertliği 210 daN/mm²) levhalar üzerinde kuru şartlarda delme testleri gerçekleştirmişlerdir (dönme hızı 900 dev/dak, ilerleme miktarı 0.1 mm/dev, delme derinliği 45 mm). TiN kaplı matkapların, kaplanmamışlara kıyasla, delme mesafelerinde yaklaşık %55'lik bir artış olduğunu ve aksenal kuvvet ile burulma momentlerinin de önemli derecede düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Türküz [22], katodik ark buharlaştırma metodu ile TiN kaplanmış ve kaplanmamış yüksek hız çeliği kesici takımların ömürlerini GG-25 dökme demir iş parçasının işlenmesi ile araştırmış ve sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışmasında, 0.4 mm serbest yüzey aşınma şerit genişliğine ulaşıncaya kadar takımın katettiği toplam kesme mesafesini aşınma direnci kriteri olarak kabul etmiştir. Sonuç olarak, TiN kaplanmış DIN 1.3243 takımların, kaplanmamış DIN 1.3243 ve DIN 1.3343 takımlardan daha yüksek takım ömrüne sahip oldukları, daha düşük taban malzemesi yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığı ve daha yüksek kaplama sertliği ve taban malzemesine yapışma mukavemetiyle de bu oranın artırılabilceğini tespit etmiştir.

Karagöz de [23] yüksek hız çeliği kesici takımlar üzerinde üretilen TiN kaplamaların sürtünmeyi azalttığını ve takım ömrünü arttırdığını tespit etmiştir.

Akkaş [24], katodik ark buharlaştırma metodu ile yüksek hız çeliği numuneler üzerinde üretilen TiN kaplamaların aşınma davranışları üzerine proses parametrelerinin etkisini incelemiş ve aşınma deneylerinde 5 mm çaplı alümina bilyalı ball-on-disc sistemini kullanmıştır. Akkaş, uygulanan bias voltajının artmasıyla aşınma miktarının azaldığını, daha düşük kalınlığa, daha yüksek sertliğe sahip olan ve taban malzemesine yapışma mukavemeti daha yüksek olan kaplamaların aşınma dirençlerinin daha yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Prengel ve arkadaşları [25], karbür kesici takımlar üzerinde, katodik ark ve magnetron sıçratma metodları ile ürettikleri TiN, TiAlN, TiB₂ tek tabaka ve TiN, TiCN, TiAlN esasına dayanan multi tabaka kaplamaların kesme performansı ve takım ömrüne etkilerini incelemişlerdir. TiAlN multi tabaka kaplamasının kır dökme demirin kuru frezelenmesinde, TiAlN tek tabaka kaplamanın ise soğutucu sıvı ile işlemede en yüksek performansı gösterdiğini, Inconel 718'in tornalanmasında TiAlN multi tabaka kaplamanın TiAlN tek tabaka kaplamadan özellikle yüksek hızlarda daha iyi performans gösterdiğini, en sert kaplama olan TiN/TiCN/TiAlN multi tabaka kaplamanın yüksek iç gerilme ve erken bağ bozulmasından dolayı en kısa ömre sahip olduğunu ve A390 alüminyum alaşımının tornalanmasında TiB₂ kaplamanın yüksek sertliğinden dolayı TiN ve TiAlN kaplamalardan daha iyi abrasiv aşınma direnci sağladığını tespit etmişlerdir.

Çınar [26], katodik ark metodu ile yüksek hız çeliği üzerinde üretilen TiAlN-TiN esaslı multi tabakalı kaplamalardaki (ilk tabaka TiN, ara tabakalar TiAlN-TiN ve üst tabaka TiAlN olmak üzere 6 tabaka) TiN ara tabakalarının kaplamanın yapışma özelliğini arttırdığını, sertliğini ise bir miktar azalttığını gözlemlemiştir.

Tuck ve arkadaşları da [27], filtreli katodik ark metodu ile M2 takım çeliği ana malzemeler üzerinde ürettikleri ince ve sert nitrür kaplamaların sertliklerini mikro ve makro sertlik ölçme metodları ile tespit etmişler ve sonuçları yeni bir model olan "work-of-indentation" modeli ile analiz etmişler ve yorumlamışlardır. Tuck ve arkadaşları

model için iki yeni parametre önermişler ve yalnız mikrosertlik sonuçlarından kapalı sistem hakkında daha fazla bilginin çıkarılmasına imkân sağlamışlardır.

Harlin ve diğerleri [28], TiN ve WC/C PVD kaplamalarının ve yüzey pürüzlülüğünün tribolojik performansa etkilerini, kayma temasını simule eden 2 farklı laboratuvar aşınma test cihazında incelemişlerdir. Yüzey analizinde SEM mikroskobu, Atomik elektron spektroskopisi, X ışınları spektroskopisi, Auger elektron spektroskopisi, X ışınları fotoelektron spektroskopisi ve ikincil iyon kütle spektroskopisi kullanılmıştır. Sürtünme katsayısı, aşınan kütle hacmi ve yüzey analizleri sonucunda WC/C kaplamada, kayma yüzeyinde TiN kaplamaya göre daha düşük sürtünme katsayıları elde edilmiştir.

Bressan, Hesse ve Silva [29], M2 yüksek hız çeliğine ve WC sert metaline PVD yöntemiyle TiAlN ve TiCN kaplama uygulamış ve bu kaplamaların tribolojik performansını Pim-disk aşınma cihazı ile karşılaştırmışlardır. Aşınma miktarları SEM mikroskobuyla ölçülmüş ve kaplamalı malzemelerde ana malzemeye oranla aşınma davranışında çok büyük iyileşme görülmüştür. İki kaplama arasında ise TiAlN kaplamanın TiCN kaplamaya oranla aşınma davranışında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Essen ve diğerleri [30], M2 yüksek hız çeliğine PVD yöntemiyle uygulanan CrNx kaplamadaki azot miktarının aşınma davranışına etkisini incelemişlerdir. Öncelikle çizik testi uygulanarak her bir kaplamanın kritik yükü hesaplanmıştır, ikinci aşamada pim-disk aşınma testi uygulanmış, aşınma izinin profilinden yararlanarak aşınma hacmi hesaplanmıştır.

Khrais ve Lin [31], PVD yöntemiyle TiAlN kaplanmış takım çeliğinin AISI 4140 malzemesini farklı hızlarda kuru ve yağlamalı kesme koşullarında test etmiştir. Mikro aşınma, mikro yorulma, mikro termal aşınma sonuçlarına göre TiAlN kaplama için uygun kesme hızı ve koşullarını belirlemişlerdir.

Alberdi ve diğeri [32], PVD yöntemiyle uygulanan, TiAlN ve CrN kaplamalarına alternatif olarak ortaya çıkan ve kompozit kaplama kalınlığı 1-3 µm olan TiAlCrN nano kompozit ince film kaplamanın aşınma davranışını Pim-disk aşınma cihazında aşınma testleri uygulayarak incelemişlerdir.

Sonuçlar bu kaplamanın AlTiN kaplamadan birkaç kat daha iyi aşınma dayanımına sahip olduğunu göstermiştir.

Kanlıdağ ve Kurt [33], toz metalürjisi ile üretilen parçaların PVD yöntemiyle kaplanabilirliğini incelemişlerdir. PVD yöntemi ile numunelere TiN kaplanmış, kaplama ara yüzeyi elektron mikroskopunda incelenmiş, kaplama şartlarına ve malzeme türüne göre kaplama kalınlığı ölçülmüştür. Kaplama ağırlığının toz metal parçalarda yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak artan yüzey alanından dolayı daha fazla olduğu görülmüştür.

Demirler ve Taptık [34], PVD yöntemiyle yapılan kaplamalarda taban malzemenin, kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kalıntı gerilmeler kaplamanın malzemeye yapışması ve sertliği üzerinde çok etkili olduğundan, PVD yöntemiyle TiN kaplanmış farklı malzemelerdeki kalıntı gerilmeler XRD yöntemiyle ölçülmüştür. AISI 304 çeliği üzerine kaplanan kaplamaların kalıntı gerilmesi AISI M4 çeliği üzerine kaplananlarınkinden daha yüksek olmuştur.

Çakan ve Yıldırım [35], AISI 1070 çeliğinden üretilen işlemsiz ve PVD yöntemiyle TiN kaplanmış kesici takımların kesme performansını ve takım ömrünü karşılaştırmalı olarak incelemiş, uçların aşınma kayıplarını on-line izleme sistemi kullanılarak deneysel olarak izlemişlerdir. TiN kaplanan takımların aşınma direncinin yüzey işlemsiz olarak üretilen takımlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Yalçın [36], kesici takımlar üzerine yapılan Titanyum Nitrür kaplamanın kesici takım performansına etkilerini incelemiştir. Çeşitli takım malzemelerinin yüzeyleri, Ark PVD yöntemiyle TiN kaplanmış, yüzey işlemlisi ve yüzey işlemsiz kesici takımların kesme performansları analiz edilmiştir. Sonuçta kaplanmış takımların, işleme kalitelerinin

yanında kaplanmamış takımlara göre 3-10 kat daha fazla ömre sahip olduğu tespit edilmiştir.

Batista ve diğerleri [37], H13 çeliğinin ısıtılmamış, TiN kaplamalı ve Plazma Nitrür + TiN kaplamalı olarak bilye - krater tekniğiyle mikro - abrasiv aşınma testi uygulamış, "Dubleks" olarak nitelendirilen Plazma + TiN kaplamanın, sadece TiN kaplamaya göre daha iyi sonucu verdiğini ortaya koymuşlardır.

Liscano ve diğerleri [38], AISI H13 paslanmaz çeliğine Plazma Nitrürleme üzerine TiAlN plazma destekli PVD kaplama uygulamış ve korozyon direncinin Nitrasyon tabakasının artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir.

3. BÖLÜM

TRIBOLOJİ ve YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ

3.1 Tribolojinin Tanımı

Triboloji, birbirlerine göre hareket eden ve birbirleriyle etkileşim halinde olan yüzeyleri inceleyen bilim dalıdır. Triboloji sözcüğü Yunan dilinde sürtünme veya kayma anlamına gelen "tribos" kelimesinden türetilmiştir.

Triboloji biliminin ana konusu, bağıl hareket halinde olan iki yüzeyin etkileşimi esnasında ortaya çıkan sürtünme, aşınma ve bunların etkilerinin azaltılmasına yardımcı olan yağlama ve mühendislik malzemeleridir.

Herhangi bir makinede birbirleriyle sürtünerek iş gören birçok parça vardır. Dişliler, rulmanlar, kamlar, miller, pistonlar, teker lastikleri, fren balataları bunlara örnek gösterilebilir. Tüm bu örneklerde iki yüzey birbirleriyle etkileşim halinde ve birbirine göre bağıl hareket etmektedir [39].

Makine elemanlarının ortalama %70'inin hurdaya ayrılma sebebi aşınmadır. Bunun sonucu olarak meydana gelen malzeme kayıpları, aşınan parçaların yenileriyle değiştirilmesi zorunluluğu, makinelerin bakım-onarım faaliyetleri için harcanan zaman ve emek ve bu faaliyetler için istihdam edilen teknik personel, sürtünme sonucu oluşan enerji kayıpları göz önüne alındığında tribolojinin önemi anlaşılmaktadır.

Triboloji alanında yapılan araştırmalar genellikle malzemelerin sürtünme katsayısının ve aşınma mekanizmalarının belirlenmesi, sürtünme ve aşınmaya sebep olan yüzeylerin birbirleriyle temaslarını kesecek ince film malzemelerin veya endüstriyel yağlarının

bulunması gibi konuları içerir. Ancak her zaman sürtünmenin ve aşınmanın azaltılması istenmeyebilir; fren balatalarında sürtünme katsayısının yüksek olması ile silgilerde aşınmanın yüksek tutulması buna örnektir [40].

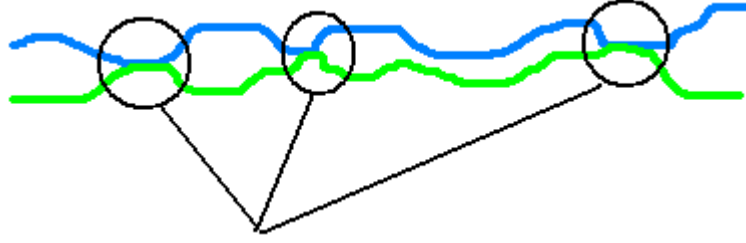
3.1.1 Sürtünme

Sürtünme birbirine yüzeysel olarak temas halinde olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan ya da yapma eğiliminde olan iki cismin harekete karşı gösterdikleri dirençtir.

Sürtünme kuvveti cisimler hareket ederken temas ettikleri yüzeylerin sürtünmesinden kaynaklanan ve yer değiştirmeye zıt yönde ortaya çıkan kuvvete denir. Bir zemin üzerinde bulunan bir cismi harekete geçirmek için, yüzeyin cisme uygulanan hareketin zıt yönünde oluşan sürtünme kuvvetinden daha büyük bir kuvvete gereksinim vardır. Aksi halde uygulanan kuvvet cismin sürtünme kuvvetinden daha küçük veya eşitse cisim harekete geçmez [41].

Yüzeyler ne kadar düz görünürse görünsün, mikroskobik boyutta girinti ve çıkıntılara sahiptir. İki yüzey üst üste geldiğinde, yüzeyler arasındaki temas her iki yüzeyin tepe noktaları arasında olur. Böylelikle gerçek temas alanı görüldüğünden çok daha küçük olur. Bu küçük temas noktalarına uygulanan yükten dolayı bu noktalarda yapışma ve bölgesel kaynaklar oluşur. Cisimler birbiri üzerinde hareket ettirilmeye çalışıldığında önce bu bölgesel kaynakları koparmak gerekecektir. Bu nedenle cisimlerin yüzeyleri ne kadar pürüzlü ise sürtünme kuvveti de o kadar fazla olacaktır (Şekil 3.1.)

Aynı şekilde cismin ağırlığı arttığında cismin ve yüzeyin girinti çıkıntıları daha fazla birbiri içine gireceğinden sürtünme de artar. Yani cismin hareketini engelleyen kuvvetin büyüklüğü de artar. Cismin hareket etmesini engelleyen bu kuvveti yenmek için, bu kuvvetten daha büyük bir kuvveti cisme uygulamak gerekir [41].



Gerçek Temas Noktaları

Şekil 3.1. Sürtünme esnasındaki gerçek temas noktaları.

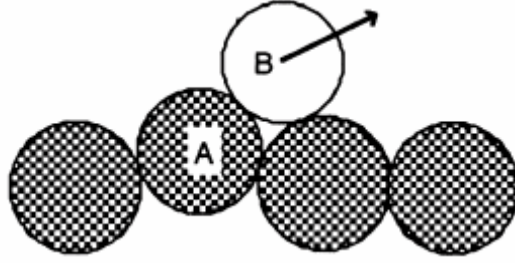
Sürtünme genel olarak statik ve dinamik olmak üzere ikiye ayrılır. Birbirlerine temas eden yüzeyler arasında bağıl hareket yoksa statik sürtünmeden söz edilir. [42].

Eğer temas eden yüzeyler arasında bağıl hareket mevcutsa bu durumdaki sürtünmeye dinamik veya kinetik sürtünme denir.

Bu durumda sürtünme kuvveti temas halindeki yüzeyleri oluşturan atom veya moleküllerdeki, zıt işaretli yerel elektrostatik yük dengesizliklerinin birbirini çekmesinden kaynaklanır. Dinamik sürtünmede yüzeyler öteleme hareketi yapıyor ve birbiri üstünde kayıyorsa kayma sürtünmesinden, birbirleriyle nokta ya da çizgisel temaslı olup birbirleri üzerinde yuvarlanıyorsa yuvarlanma sürtünmesinden bahsedilir. Eğer yüzeyler birbiri üzerinde aynı zamanda hem dönme hem de kayma hareketi yapıyorsa bu da kayma ve yuvarlanmanın kombinasyonudur. Yuvarlanma sırasında iç içe giren kısımların ayrılması daha kolay olacağından, sürtünme katsayısı genellikle yuvarlanma halinde kayma halindekiinden daha küçüktür. Bunun bir sonucu olarak da yüzeyi iyi temizlenmiş metal yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti, iyi temizlenmemiş yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetinden fazladır [42].

Sürtünme kuvveti tamamen malzemelerin özelliklerine bağlı değildir. Nem, sıcaklık, kayma hızı, temas basıncı gibi etkenlerle değişmektedir. Farklı yağlayıcılar, farklı temas bölgeleri ve farklı yüzey pürüzlülükleri için sürtünme katsayısı farklılık gösterir [43].

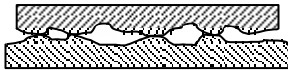
Sürtünme Şekil 3.2'de atomik boyutta incelenmiştir. B atomu hareket ettiğinde kendisine yapışmış haldeki A atomu da onu takip etmek isteyecektir. B atomu hareketine devam ettikçe, birlikte yapılan bu hareket, A atomunun komşuları tarafından A' ya uygulanan ve onu eski pozisyonuna doğru çeken kuvvetler, B atomunun uyguladığı kuvveti aşana kadar devam edecektir. Bu noktada A ve B atomu ayrılacaklardır. A atomu aniden yerine doğru dönecek ve bu esnada çarpıştığı komşu atomlarının titreşimine sebep olacaktır. Bu titreşim de sürtünme sırasında oluşan ısıyı meydana getirmektedir [43].



Şekil 3.2. Atomik boyutta sürtünme.

Sünek malzemelerde atomlar plastik akış sebebiyle orijinal pozisyonundan çok daha uzağa çekilebilirler. Bunun sonucu olarak da sünek malzemelerin sürtünme katsayılarının, kırılgan malzemelere oranla daha fazla olduğu söylenebilir [43].

Sürtünme yüzeyler arasındaki temas noktalarıyla ilişkili olduğundan yüzeyler arasındaki teması kesmek ya da azaltmak için yağlayıcı kullanmak sürtünmenin azaltılmasında kullanılan en yaygın yöntemdir.



a) Kuru



b) Sıvı



c) Yarı Sıvı

Şekil 3.3. Sürtünmenin çeşitleri.

Sürtünmenin kuru, sıvı ve yarı sıvı olmak üzere üç hali vardır.

Kuru sürtünme (Şekil 3.3.a) yağlanmamış iki katı cisim arasındaki sürtünmedir. En hassas işlemede bile yüzeyde pürüzlülük olacağından, yüzeyler arasındaki temas noktalarında oluşan yüksek basınç kaynak bağlantısı oluşmasına sebep olacak ve bu sebeple ortaya çıkan sürtünme kuvveti oldukça fazla olacaktır [42].

Sıvı sürtünmede (Şekil 3.3.b) iki yüzey arasındaki yüzey pürüzlülükleri karşı tarafa temas etmeyecek şekilde yüzeyler arasında yağ filmi oluşturulmuştur. Bu durumda sürtünmeyi oluşturan faktör yağın viskozitesidir. [42].

Yüzeyler arasındaki yağ filmi yeterli kalınlıkta oluşmadıysa bazı pürüz tepelikleri birbirlerine temas edebilir (Şekil 3.3.c), bu durum da yarı sıvı sürtünmedir. [42].

3.1.2 Aşınma ve Aşınma Mekanizmaları

Aşınma, birbirine temas eden ve birbirine göre bağlı hareket yapan sürtünme halindeki cisimlerin yüzeylerinde sürtünme etkisiyle oluşan ve istenilmeyen malzeme kaybıdır. Bunun sonucu olarak makine elemanları giderek aşınır ve fonksiyonlarını sağlıklı olarak yerine getiremez hale gelir.

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

Aşınma, oluşma hızı ve biçimi açısından zamanla gelişen ve aniden meydana gelen aşınma olmak üzere ikiye ayrılır. Zamanla gelişen aşınmada makine elemanı üç aşamada aşınır ve normal çalışma ömrünü tamamlar. Zamanla gelişen aşınmanın kademeleri şu şekildedir:

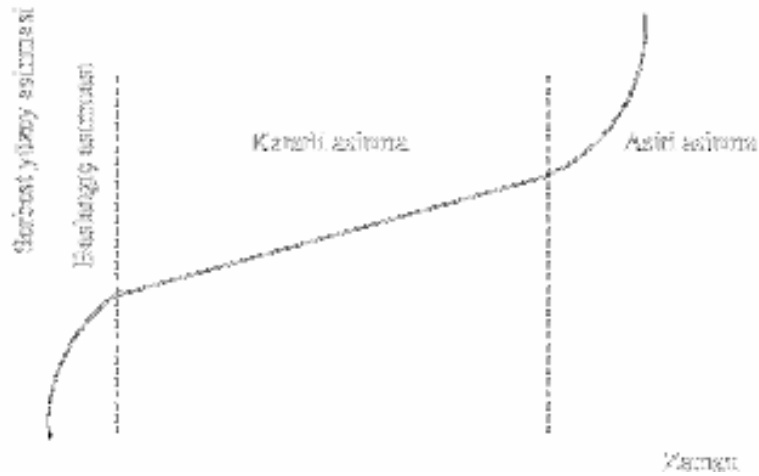
Başlangıç aşınması: zamanla gelişen aşınmanın ilk safhası makine elemanlarının alışma safhasıdır (Şekil 3.4.). Bu safhada hızlı ve şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu ilk

aşınmaya rodaj aşınması denir. Makine elemanlarının ömürlerinin uzun olması için rodaj aşınması mümkün olan en kısa zamanda, en az yükte ve normal hızdan daha düşük hızlarda tamamlanmalıdır. Bunu sağlamak için makine elemanları rodaj için özel üretilmiş özel katkılı yağlayıcılarla yağlanırlar.

Asıl (kararlı) aşınma safhası: Rodajdan sonraki aşama (Şekil 3.4.), makine elemanının ömrünü belirleyen asıl aşınma safhasıdır. Bu safhada aşınma hızı çok azdır. Rodaj ne kadar uygun yapılmışsa bu aşama, dolayısıyla makine elemanı ömrü o kadar uzun olur.

Aşırı (şiddetli) aşınma safhası: Makine elemanı önceden belirlenen bir aşınma sınırına kadar aşındığı zaman normal çalışma ömrünü tamamlamış demektir (Şekil 3.4). Bu aşınma safhasında aşınma hızı oldukça artmıştır ve makine elemanı değiştirilmelidir.

Aniden meydana gelen aşınma, parçalar üzerinde olaydan önce herhangi bir aşınma yokken; yanlış malzeme seçimi, yağlamanın uygun yapılamaması, sürtünme dolayısıyla meydana çıkan ısı enerjisinin dış ortama aktarılamaması gibi sebeplerden dolayı aşınmanın aniden ortaya çıkmasıdır. Birbiriyle eş çalışan makine elemanları bu durumda kilitlenebilirler ve çalışamaz duruma gelirler. Yatak sarması bu olaya örnek gösterilebilir [44].



Şekil 3.4. Aşınma safhaları.

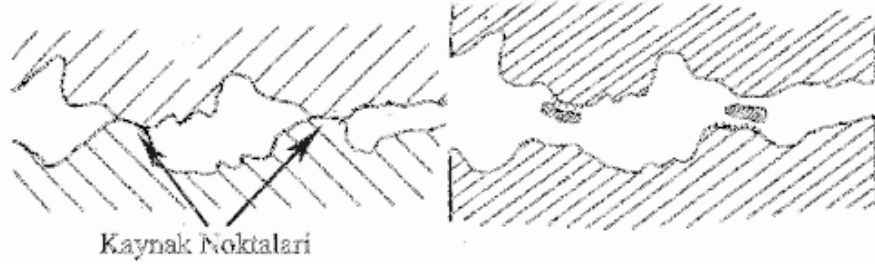
Aşınmanın azaltılması için tasarım esnasında dikkat edilmesi gereken bazı kriterler şöyledir:

1. Temas basıncının düşük tutulması
2. Kayma hızının düşük tutulması
3. Az pürüzlü yataklama yüzeylerinin seçilmesi
4. Yüksek sıcaklıklardan kaçınılması
5. Sert malzemelerin kullanılması
6. Düşük sürtünme katsayılı malzemelerin kullanılması
7. Yağlayıcı kullanılması

Aşınma, dış etkiler altında oluşan fiziksel ve kimyasal değişikliklerin sonucu olarak ortaya çıktığından, pratikte bir aşınma hali değil, birçok aşınma halleri veya başka bir deyişle aşınma mekanizmaları vardır. Bunlar adezyon, Abrasiv aşınma, erozyon, yorulma aşınması, mekanik korozyon olmak üzere sıralanabilirler [45]. Bu mekanizmalar, aşınan yüzeylere uygulanan yük, aşındırıcı parçacığın boyutu ve türü, temas şekli ve temas geometrisi gibi etkenler dikkate alınarak sınıflandırılmıştır.

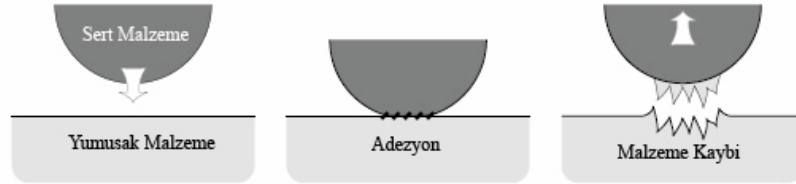
3.1.3 Adezyon Aşınması

Adezyon aşınması en yaygın aşınma çeşididir ve yüksek aşınma oranları ile sürtünme katsayısında kararsızlıklar doğurur. Özellikle kayan mekanizmalar adezyon aşınması sonucu çok hızlı bir şekilde hasara uğrar. Birbirine temas eden yüzeylerdeki temas alanları çok küçük olduğundan bu noktalarda çok yüksek basınçlar oluşmaktadır. Bu yüksek basınç nedeniyle temas noktalarında malzemeler akma sınırına ulaşır ve bölgesel mikro kaynaklar oluşur. Bu sırada iki cisim arasında devam eden bağıl hareket sonucu kaynak bağı kopar ve sonuçta cismin birinden malzeme eksilmesi oluşur (Şekil 3.5.). Bu malzeme kaybı adezyon aşınmasını oluşturur [45].



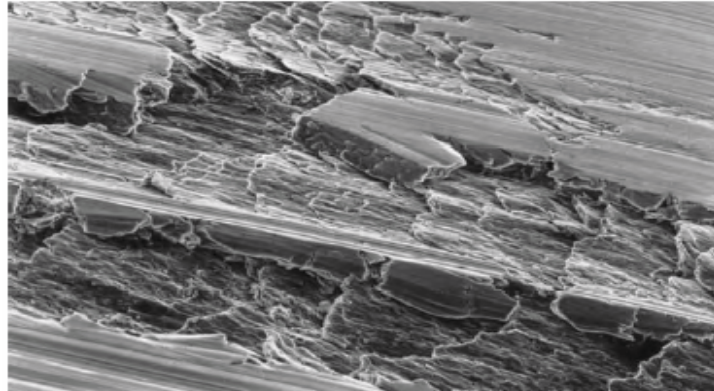
Şekil 3.5. Adezyon aşınması.

Malzeme çiftleri arasında özellikle metalik malzemelerde büyük adezyon aşınmaları meydana gelir. Çeşitli metal kombinasyonlarında yapılan aşınma testleri sonucunda metallerde adeziv aşınmanın malzeme çiftindeki yumuşak malzemedan sert malzemeye kaynak noktasında transfer olduğunu göstermektedir. Bu transfer sonucunda yumuşak malzemedan kopan parçaların bir kısmı sert malzemeye transfer olmakta, bir kısmı ise sürtünme yüzeyinde kalmakta ve yüzeyleri aşındırmaya devam etmektedir (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Adezyon sırasındaki metal transferi.

Adezyon aşınması, yüzeylerde birtakım çizikler şeklinde (Şekil 3.7.) veya tam tersine yüzeyleri parlatmış gibi görülmektedir [45].



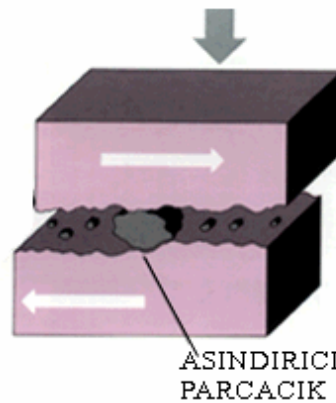
Şekil 3.7. Malzeme yüzeyindeki adezyon çizikleri.

Adezyon aşınmasını önlemek için malzemenin diğer mühendislik özelliklerini bozmayacak şekilde mümkün olduğunca sert olması gerekmektedir. Genellikle sert metaller çok zor plastik davranış gösterirler ve daha düşük sürtünme katsayısına sahiptirler. Adezyon aşınması benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir.

Bu sebeple malzeme çiftlerinden birisi sert ise, diğeri yumuşak olacak şekilde seçilmelidir. Yüzey topografyasının iyileştirilmesi, temas yüzeyinin arttırılarak yüzey basınçlarının düşürülmesi ve yüzeyin güçlendirilmesi adezyon aşınmasını azaltmaktadır. Adezyon aşınmasını önlemek için alınabilecek bir diğer tedbir yağlamadır. Yüzeyle yapışmış yağ tabakası adezyonu büyük ölçüde önlemektedir [45].

3.1.4 Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınmada yüzey hasarı, birbirine göre bağıl hareket yapan iki cismin temas yüzeyleri arasında ortam şartları dolayısıyla giren toz, talaş veya malzeme yüzeylerindeki oksidasyon gibi etkenler sonucu oluşan sert parçacıkların etkisi sonucu oluşur (Şekil 3.8.). Bu sert parçacıklar yüzeyler arasında kazıma etkisi yaparak taşlamaya benzer malzeme kaybının oluşmasına sebep olurlar. Bu aşınma zamanla artar ve makine elemanları yüzeyinde hareket yönünde malzeme kaybindan ötürü büyük çizikler ve oyuklar oluşur. Aşınma sonucunda kopan parçalar da bu mekanizmaya dâhil olurlar ve aşınma artarak devam eder [45].



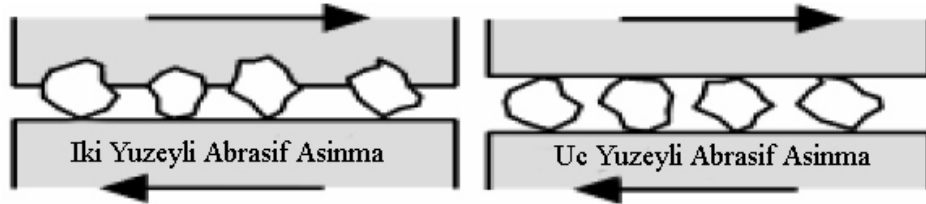
Şekil 3.8. Abrasiv aşınma mekanizması.

Çok hızlı meydana gelen ve etkisini çok çabuk gösteren bir aşınma türü olduğundan eğer önlem alınmazsa büyük hasarlara ve maddi kayıplara sebep olur (Şekil 3.9.).



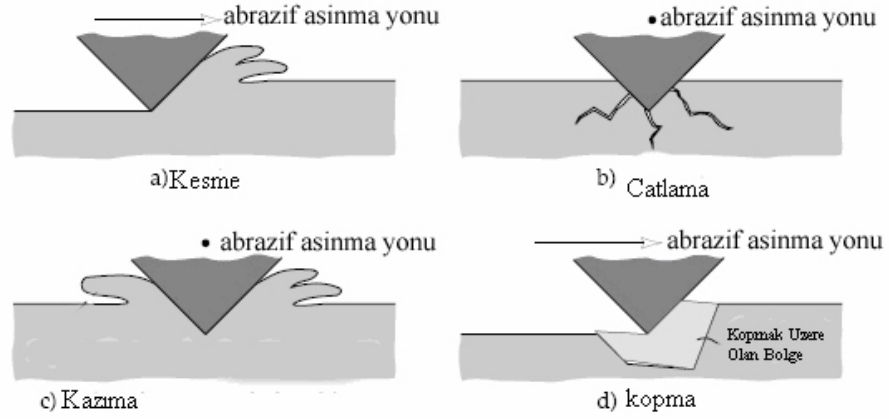
Şekil 3.9. Abrasiv aşınma.

Aşınma sistemi araya giren aşındırıcı malzemenin yüzeylerden birine gömülü olup olmamasına göre iki yüzeyli ve üç yüzeyli Abrasiv aşınma olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. İki yüzeyli ve üç yüzeyli aşınma.

Aşındırıcı malzemenin yüzeye gömülü olması, bir yüzeyi zımparalama işlemine benzer ve yüzeyden aynen bir kesme takımıyla talaş kaldırılması şeklinde aşınma işlemi gerçekleşir. Üç yüzeyli Abrasiv aşınmada ise aşındırıcı tanecikler serbest halde yuvarlanmakta ve yüzeylerin üzerinde kaymaktadır. İki yüzeyli Abrasiv aşınma, adezyon aşınması ile birlikte meydana gelmektedir ve bu sebeple üç yüzeyli Abrasiv aşınmaya göre kat kat daha fazla aşınma meydana gelmektedir. Abrasiv aşınma mekanizmaları genel olarak malzemenin cinsine ve yüzey yapısına bağlı olarak dört başlıkta toplanabilir (3.11.). Bunlar; kesme, çatlama, kazıma (sürtme), kopma olarak sınıflandırılır [46].



Şekil 3.11. Abrasiv aşınma mekanizmaları.

Kesme (Şekil 3.11.a) aşınmasında keskin şekilli veya yüksek sertlikli abrasif uç veya parçacıklar kendine göre daha yumuşak olan yüzeyden talaş halinde malzeme kaldırır. Aşınan malzemenin kırılkan yapıda olması durumunda (Seramik vb.) ise çatlama (Şekil 3.11. b) meydana gelir. Eğer aşındırılan malzeme yumuşak bir malzemeyse ve keskin köşeli olmayan aşındırıcılarla aşındırılıyorsa, kesme olayı gerçekleşmez ve aşınma yüzeyi defalarca deforme olur. Bu durum kazıma (Şekil 3.11.c) ya da sürtme olarak adlandırılır ve bu durumda aşınma atığı metal yorulması sonucu oluşur. (Şekil 3.11.d) resminde görülen durum ise tane ayrılmasını göstermektedir. Bu mekanizma daha çok taneler arasındaki sınırların zayıf olduğu ve tane boyutlarının büyük olduğu seramiklerde görülür ve kopan tane aşınma atığını oluşturur [46].

Abrasiv aşınmanın azaltılması için aşınmayı oluşturan taneciklerin ve partiküllerin sistem içine girmemesini sağlayacak şekilde sızdırmazlık sağlanması ve yüzeylerin sık sık temizlenmesi gerekmektedir. Ayrıca Abrasiv aşınma malzemelerin sertliğiyle doğrudan ilişkili olduğundan, Abrasiv aşınmanın önlenmesi için de yine sertlikten yararlanır. Bu sebeple Abrasiv aşınmayı önlemeye yönelik olarak sert malzeme kullanılmalı veya yüzeylerin sertliği ısıtılma, elektro-kaplama, alev püskürtme, nitrasyon, plazma sprey, borlama, CVD, PVD gibi yüzey kaplama yöntemleriyle artırılmalıdır [45].

Malzemenin tümüyle değiştirilmesi yerine sert yüzey kaplaması uygulanması günümüzde gittikçe yaygınlaşmaktadır. Aşınmaya karşı dirençli ama pahalı malzeme kullanmak yerine, yüzey üzerine uygulanan ince kaplama tabakaları ekonomik bir çözüm olarak kullanılmaktadır [46].

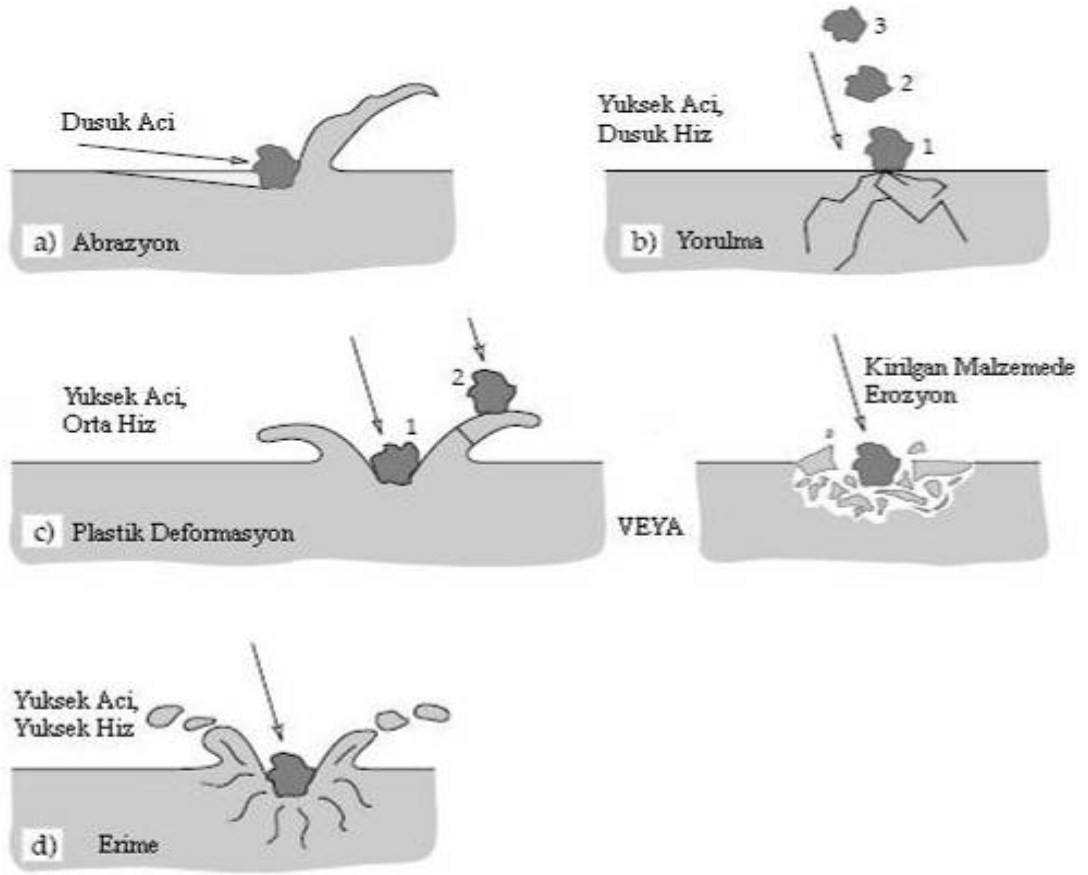
3.1.5 Erozyon Aşınması

Erozyon, bir yüzeye hızla püskürtülen katı parçacıklarının, sıvı veya gaz jetlerinin o yüzeyi aşındırarak malzeme yüzeyinden (Şekil 3.12.) küçük parçaların ayrılması sonucunda kütle kaybetmesine yol açmasıdır.



Şekil 3.12. Erozyon aşınması.

Erozyon aşınması; malzeme türü, çarpma açısı, çarpma hızı ve parçacık büyüklüğüne bağlı olarak farklı mekanizmalarla ortaya çıkar (Şekil 3.13.).



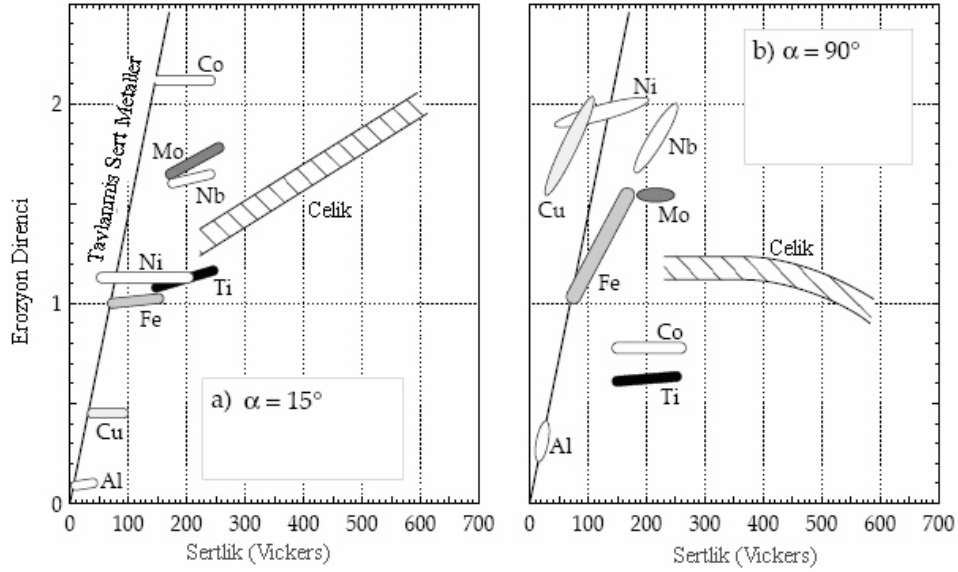
Şekil 3.13. Erozyon aşınma mekanizmaları.

Çarpma açısı küçük olduğunda aşınma prosesi Abrasiv aşınmaya (Şekil 3.13.a), benzer çünkü aşınma parçacıkları çarpma sonrasında aşınma yüzeyi boyunca bir tarama hareketi yaparlar. Açı büyük olduğunda ise tipik erozyon görülür (Şekil 3.13.c).

Aşındırıcı parçacıkların hızı da erozyon üzerinde çok büyük etki eder. Eğer hız çok düşükse çarpma anındaki gerilmeler plastik deformasyon için yetersiz kalır ve aşınma yüzey yorulması şeklinde olur (Şekil 3.13.b).

Hız yükseldiğinde (Şekil 3.13.d) plastik deformasyon meydana gelir. Eğer aşındırıcı parçacıklar küresel veya yuvarlak geometriye sahipse yüksek hızlarda aşırı plastik deformasyon oluşur, parçacıklar köşeli geometriye sahipse kesme veya kırılma meydana gelir [46].

Abrasiv aşınmanın aksine malzemenin mekanik özelliklerinin güçlendirilmesi her zaman malzemenin erozyona karşı direncini arttırmaz. Örneğin aşındırıcı parçacıkların düşük açılı geldiği durumda sertleştirilmiş çelikte, yumuşak çeliğe göre daha az aşınma oluşur. Açı yaklaşık 90 derece olduğunda ise bu durumun tam tersi geçerlidir (Şekil 3.14.) [46].



Şekil 3.14. Malzeme karakteristikleri ve erozyon parametrelerinin erozyona etkisi.

Şekil 3.14'de Kobalt, erozyon açısı 15 derece olduğunda en yüksek erozyon direncine sahip iken, açı 90 derece olduğunda çok düşük bir dirence sahiptir. Bu örnekten de anlaşılacağı üzere erozyon aşınması direncini arttırmak için yapılacak uygulamalarda erozyon parametreleri oldukça önemli yer tutmaktadır [46].

3.1.6 Yorulma Aşınması

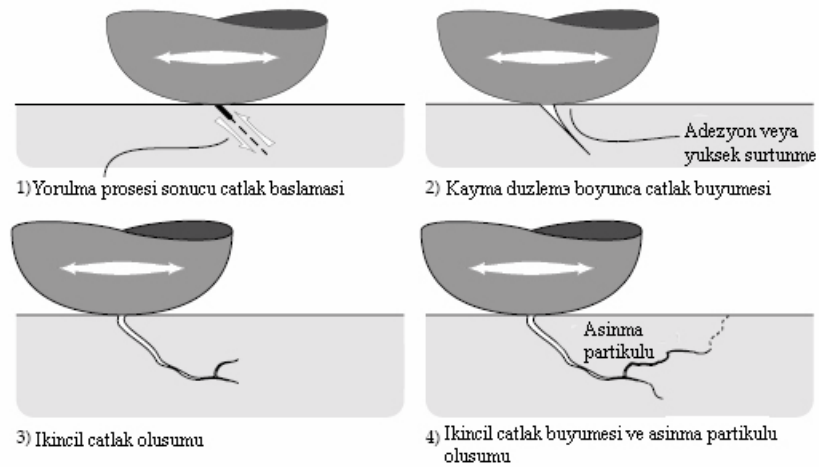
Çok tekrarlı yüklemeler sonucunda, özellikle rulmanlar, dişli çarklar (Şekil 3.15.), kam mekanizmaları gibi makine elemanlarında ortaya çıkan ve temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösteren aşınma türüdür [45].



Şekil 3.15. Sonsuz dişlideki yorulma aşınması.

Bu elemanlarda yüzeylerin birbirlerine temas alanları küçük olduğundan yüzeylerde, yüzey basınçları meydana gelir. Bu basınçlar yüzeyin hemen altında kayma gerilmelerine sebebiyet verir. Değişken zorlanmalara maruz bu elemanlarda yorulma olayı başlamış olur [45].

Birçok aşınma türünde, aşınmış yüzey mikro yapısı incelendiğinde çatlak ve yarıklarla sıkça karşılaşılır. Yorulma sırasında yüzeylerde oluşan çatlak mekanizması da Şekil 3.16' da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Yorulma sonucu yüzeyde çatlak oluşumu ve büyümesi.

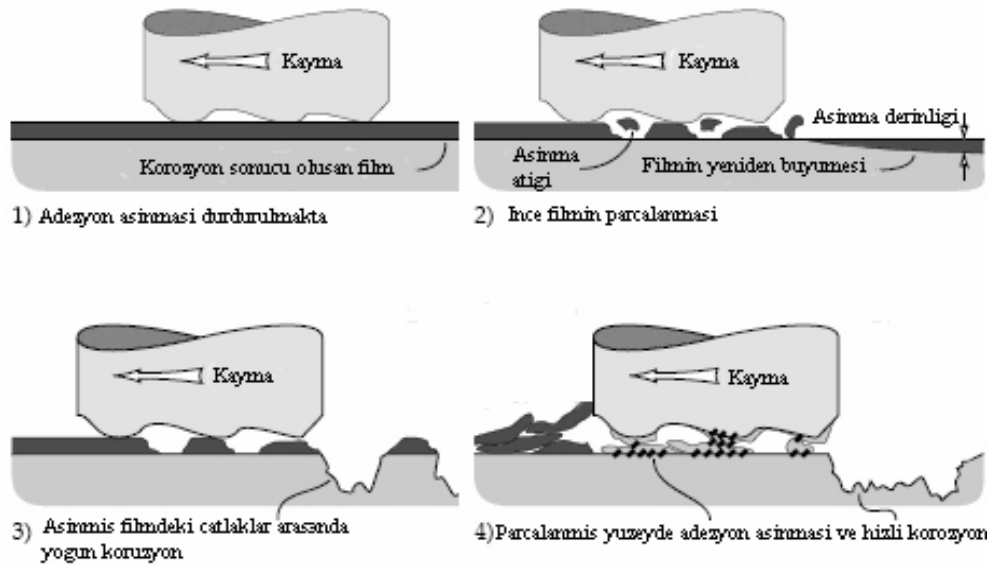
Burada birincil çatlak yüzeyde zayıf bir noktada ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.16.a), ardından kayma düzlemi veya dislokasyon hücre sınırı boyunca büyümektedir (Şekil 3.16.b). İkincil çatlaklar (Şekil 3.16.c) birincil çatlaktan gelişebilir veya mevcut diğer çatlaklarla birincil çatlakla bağlayabilir. Çatlak büyümesi tekrar yüzeye ulaşana kadar devam eder ve yüzeye ulaştıktan sonra aşınma parçacığı (Şekil 3.16.d) kopar [46]. Yorulma esaslı aşınmayı önlemenin en temel yolu etkileşen yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısının azaltılmasıdır. Ancak aynı zamanda yüzeyler arasındaki yağın etkisine de çok dikkat etmek gerekmektedir. Yüksek basınç altında, yağın yüzey çatlaklarına girmesi, bunların büyümesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca yüksek kayma ve basma mukavemetine sahip malzemeler kullanılmalıdır. Pitting denilen yorulma çukurcuklarının oluşumunda sertlik oldukça önemlidir. Yorulma aşınmasını önlemek için yüzeyler sertleştirilmelidir [45].

3.1.7 Korozyon

Metal ve alaşımların kararlı halleri olan bileşik haline dönme eğilimleri yüksektir. Bunun sonucu olarak metaller içinde buldukları ortamın elemanları ile tepkimeye girerek, önce iyonik hale ve oradan da ortamdaki başka elementlerle birleşerek bileşik haline dönmeye çalışırlar; yani kimyasal değişime uğrarlar ve bozunurlar. Sonuçta metal veya alaşımın fiziksel, kimyasal, mekanik veya elektriksel özelliği istenmeyen değişikliklere uğrar. Korozyon, metalik malzemelerin içinde buldukları ortamla reaksiyona girmeleri sonucu, dışarıdan enerji vermeye gerek olmadan, doğal olarak meydana gelen bir olaydır.

Özellikle korozif sıvı ve gazlarla temas halinde bulunan malzemelerde bu kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda malzeme yüzeylerinde reaksiyon ürünleri oluşur. Eğer bu reaksiyon ürünleri yüzeye güçlü bir şekilde bağlanırsa yüzey üzerinde ince ancak sert bir tabaka oluşur ve böylelikle esas malzemenin aşınma mekanizmasında birtakım değişiklikler olur [44].

Değişken yük altında bu sert tabaka parçalanır ve sert parçacıklar kırılarak aşınma parçacıklarını meydana getirirler. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar bir sert tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder [45].



Şekil 3.17. Korozyon aşınmasının gelişimi.

Şekil 3.17'deki ilk resimde dayanıklı bir korozyon filmi görülmektedir. Pratikte çok az korozyon filmi dayanıklı yapı göstermektedir, pek çoğu ikinci resimde gösterildiği gibi kayma temasları sonucunda çok çabuk kırılabilen oksit veya diğer kırılabilir bileşikler içermektedir. Bunun sonucu olarak da korozyon tabakası parçalanmaktadır. Korozyon tabakasının parçalanması sonucu oluşan aşınma atıklarının etkisiyle esas malzeme yüzeyinde Abrasiv aşınma meydana gelir ve son safhada korozyon tabakası tamamen yüzeyden ayrılır [46].

Korozyon aşınmasını önlemek için malzeme yüzeylerine ısı işlem uygulanır ve oksidasyon önleyici özel yağlayıcı maddeler kullanılır [45].

3.2. Yüzey Kaplama Yöntemleri ve PVD Metodu

Kullanım amaçlarına bağlı olarak; yüzeyi sert ve aşınmaya dayanıklı, buna karşılık iç yapılarının sünek olması arzu edilen malzemelerde yüzey kaplama yöntemi uygulanır. Bunun için, malzeme yüzeyinde istenilen derinliğe kadar sertleşme sağlayan, sünek iç yapıyı etkilemeyen değişik yüzey kaplama yöntemleri geliştirilmiştir [48].

Yüzey kaplama yöntemleri ile taban malzemeye sahip olmadığı özellikler kazandırılır, daha kolay ve ucuz üretilen bir malzemenin sadece yüzeyini değiştirerek istenilen özellikler elde edilir. Yüzey kaplama işlemleri malzemelere aşağıda sıralanan özelliklerin kazandırılmasında kullanılır:

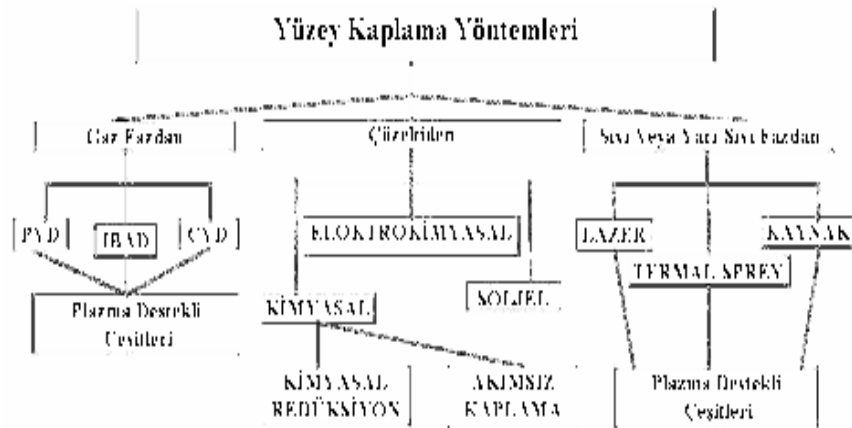
- Elektrik-elektronik amaçlı: yarı iletkenlerde, hibrit devrelerde, kapasitörlerde, dirençlerde, süper iletken kaplama yapımında, piezzo elektrik sürücülerde kullanılmaktadır.
- Manyetik amaçlı: manyetik diskler ve hard disklerde uygulanmaktadır.
- Termal amaçlı: ısı engelleri, elektronik devre elemanı soğutucularında kullanılmaktadır.
- Kimyasal amaçlı: yayılma engellerinde, gaz-sıvı sensörlerinde, katalizörlerde uygulanmaktadır.
- Optik amaçlı: yansıtıcı ve yansıtıcı olmayan camlarda, gözlük camlarında, büyük projektörlerde kamera lenslerinde, optik disklerde kullanılmaktadır.
- Korozyon ve oksidasyon koruma amaçlı: korozyona dayanıklı parça imalatında, deniz araçlarında, gaz türbin motorlarında, yüksek sıcaklık korozyonu engellemeye yönelik kaplamalarda kullanılır [44].
- Dekoratif amaçlı: oyuncak endüstrisinde, otomobil endüstrisinde, beyaz eşya üretiminde, saat ve gözlük çerçevelerinde dekoratif amaçlı kaplamalar kullanılmaktadır [44].

- Tribolojik uygulamalar: sürtünme katsayısı düşük, sürtünme özelliğini geliştirmeye yönelik uygulamalarda, kesici takımlarda, kalıp imalatında uygulanmaktadır [44].

Malzemelerin yüzeylerini sertleştirme işlemi indüksiyonla sertleştirme, sementasyon, nitrasyon, karbonitrasyon gibi kimyasal termik yüzey işlemleri olabileceği gibi, kimyasal, elektrokimyasal, lazer, PVD, CVD, iyon demeti destekli yüzey sertleştirme işlemlerinde olduğu gibi yüzeyin ince film tabakasıyla kaplanması şeklinde de olmaktadır.

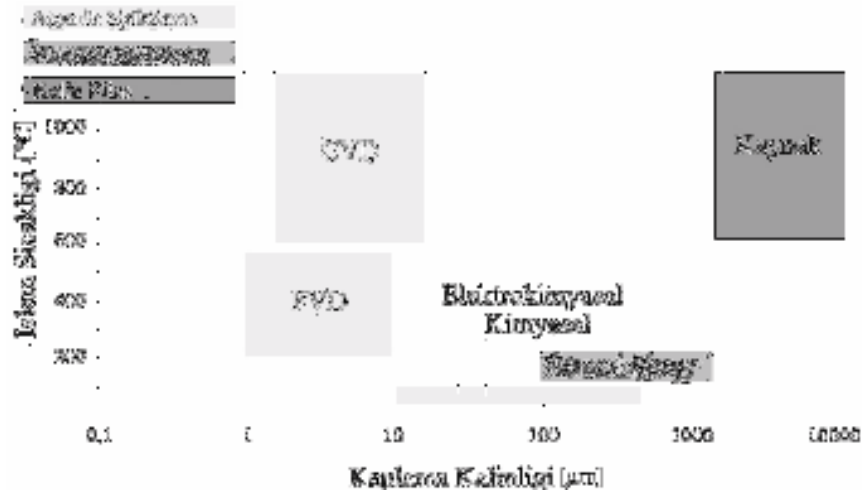
Gelişen teknolojiyle birlikte malzemelerde aranılan özellikler de çok çeşitli hale gelmiştir. Bu özelliklerin bazıları sadece kaplama işlemleri ile yapılabilmektedir veya bu yöntemle ekonomik olarak uygulanabilmektedir.

Kaplama yöntemleri, kaplama malzemesinin bulunduğu fiziksel hale göre; gaz halden, çözültiden, sıvı veya yarı sıvı halden yapılan kaplamalar olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir. Bu başlıklar altında diğer spesifik özelliklerine göre kaplama çeşitleri Şekil 3.18' de gösterilmiştir [48].



Şekil 3.18. Kaplanacak malzemenin bulunduğu fiziksel hale göre kaplamaların sınıflandırılması.

Kaplama yöntemlerinin uygulama alanının belirlenmesinde iki parametre çok büyük önem taşır. Bunlar, kaplama kalınlığı ve uygulama sıcaklığıdır (Şekil 3.19.).



Şekil 3.19. Değişik yüzey kaplama yöntemlerinin uygulama kalınlıkları.

Kaplamanın kalınlığına göre yüzeye uygulanan kaplamalar ince film kaplamalar ve kalın film kaplamalar olarak ikiye ayrılır, ince film kaplamalar kalınlıkları 1-10 μm arasında olan kaplamalardır ve kaplamanın birikmesi atomal düzeyde gerçekleşmektedir, kalın film kaplamalarda ise birikme büyük kütlelerin transferi ile gerçekleşmektedir. Kullanım yerine bağlı olarak çok farklı amaçlara hizmet eden değişik türde ince film kaplamalar kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanları Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Bazı ince sert film kaplamaları ve özellikleri.

Kaplama Özellikleri	Kaplamalar					Özel Kaplamalar			
	TiN	TiCN	TiCN-MP	TiAlN	AlTiN	ZrN	CrN	CBC	TiAlCN
Kaplama Yapısı	Tekli	Çoklu	Çoklu	Tekli	Tekli	Tekli	Tekli	Çoklu	Çoklu
Sertlik (GPa)	24	37	32	35	38	28	18	20	28
Sürtünme Katsayısı	0.55	0.2	0.2	0.5	0.7	0.55	0.3	0.15	0.25
Kaplama Kalınlığı (μm)	1-5	1-4	1-4	1-4	1-3	1-4	1-4	0.5-2	1-4
Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	600	400	400	800	800	600	700	400	500
Kaplama Rengi	Altın Sarısı	Mavi Gri	Parlak Kırmızı	Menekşe	Mavi-Siyah	Açık Sarı	Gümüş	Kömür Grisi	Kırmızimsı Bakır

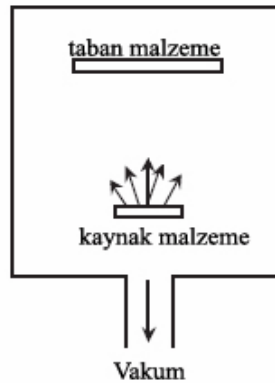
3.2.1 Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

İnce film kaplamalardan en yaygını CVD (kimyasal buhar biriktirme) ve PVD (fiziksel buhar biriktirme) yöntemleridir. Her iki yöntemin prensibi genel olarak şu adımlardan oluşur:

1. Kaplamayı oluşturacak olan malzemenin buharlaştırılması
2. Buharlaşan malzemenin kaplama yapılacak yüzeye taşınması
3. Kaplama malzemesinin, kaplanacak yüzey üzerine yoğuşturulması ve kaplamanın büyümesi [49].

CVD kaplama, farklı gazların kimyasal reaksiyonları ile oluşmaktadır ve işlem 1000°C civarında gerçekleştirilmektedir. CVD kaplama genellikle çok tabakalı kaplama şeklinde uygulanmaktadır. Farklı kaplama tabakaları için aynı ekipmanda farklı gazlar kullanılmaktadır [50].

PVD yönteminde ise uygulama sıcaklığı, CVD uygulamalarının hemen hemen yarısı kadar olup, yaklaşık 500°C civarındadır. Normal olarak PVD kaplama kalınlıkları, CVD kaplama kalınlıklarına göre daha incedir. PVD kaplama yöntemiyle, nano boyutta çok tabakalı kaplamalar da gerçekleştirilmiştir [50].

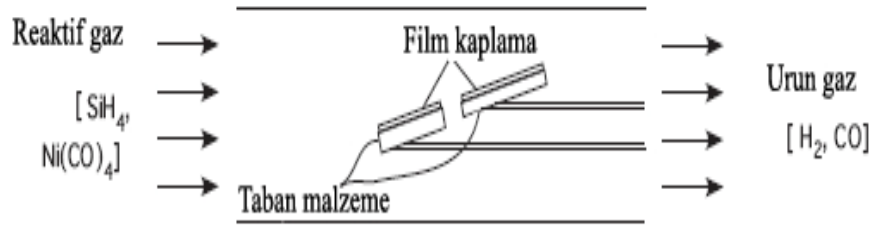


Şekil 3.20. Şematik olarak buhar fazdan yapılan kaplama prosesi.

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi buhar fazından yapılan kaplamalar içerisinde endüstriyel uygulama tarihi en eski olanlarındandır. Bu yöntemin ilk ticari uygulaması 1969 yılında gerçekleştirilmiş ve sinterlenmiş karbür takım ucuna 5 µm kalınlığında TiC kaplanmıştır [50].

CVD yönteminin (Şekil 3.20.) temel prensibi kaplanmak istenen metalin buharlaşabilen bir bileşiğin vakum altındaki bir hazne içerisine taşıyıcı bir asal veya reaktif gaz (Şekil 3.21.) aracılığı ile gönderilmesi ve önceden ısıtılan taban malzeme üzerinde sıcaklığın etkisiyle oluşan kimyasal reaksiyon sonucu metalik veya bileşik olarak kaplanmasıdır.

CVD tekniğinin en büyük dezavantajı kaplama prosesi için parçanın 800-10000 °C gibi yüksek sıcaklıklara ısıtılmasıdır. Yüksek işlem sıcaklığı taban malzeme ile kaplama arasında iyi bir adezyon bağı sağlamaktadır, ancak hassas olarak işlenen, ısıl işlem görmüş malzemelerde bu sıcaklık sertlik kaybına ve ölçülerin değişmesine neden olacağından CVD yöntemi böyle malzemelerde uygulanamamaktadır [50].

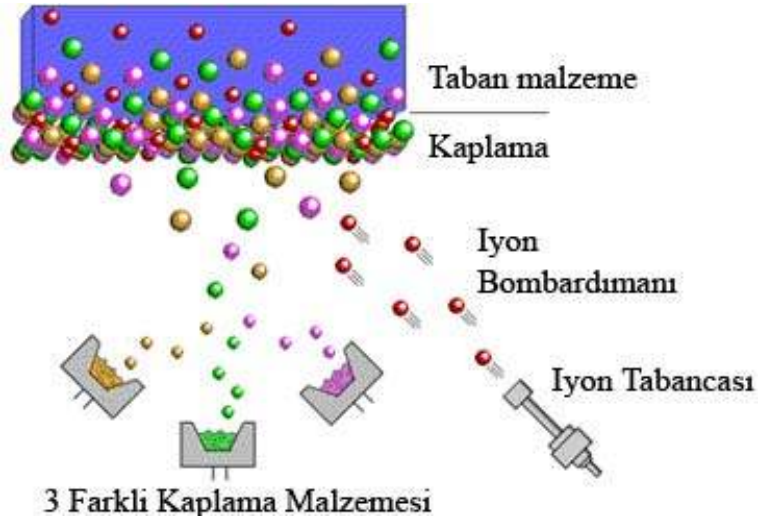


Şekil 3.21. CVD kaplama yönteminin şematik gösterimi.

CVD yönteminin çalışma sıcaklığını düşürmek için birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan biri olan plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PACVD) yönteminde, taban malzemeyi çevreleyen gaza enerji verilerek, gaz iyonlaştırılır ve plazma oluşturulur, böylelikle çok yüksek sıcaklıklara çıkmadan kaplama yapmak mümkün olmaktadır [44].

3.2.2 İyon Demeti Destekli Biriktirme (IBAD)

İyon demeti destekli biriktirme tekniği esas olarak, PVD tekniği ile düşük enerjili bir iyon (Şekil 3.22.) tabancası tarafından yüzeyin bombardıman edilmesinin kombinasyonudur. Bombardıman prosesi kaplamanın alt malzemeye daha kuvvetli bağlarla yapışmasını sağlar [44].



Şekil 3.22. IBAD yönteminin şematik gösterimi.

3.2.3 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği katı bir kaynağın vakum altında buharlaştırılması veya atomsal hale dönüştürülmesi ve taban malzeme üzerine biriktirilmesi ile gerçekleşir.

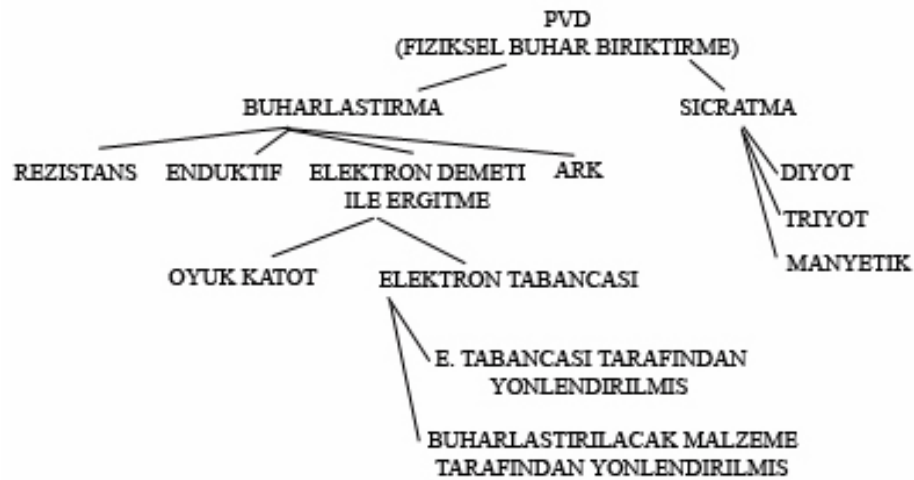
Ticari amaçlı ilk PVD takım kaplama uygulaması Balzers tarafından 1979 yılında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak bir HSS matkap ve kılavuz takımı kaplanmış olup, yöntemin uygulanışı daha sonra diğer takımlara da yaygınlaştırılmıştır. PVD kaplama uygulamaları, 1980'lerin başından beri endüstride yaygın olarak kullanılır [50].

PVD tekniği CVD tekniğine göre çok daha düşük sıcaklıklarda (100-6000 C) kaplama yapma imknı sunar. Bu sebeple takım çeliklerinin kaplanmasında bu yöntem kullanılmaktadır.

PVD tekniği kullanılarak seramik nitelikli sert aşınmaya dayanıklı nitrürler (TiN, CrN, ZrN, TiAlN gibi), karbonitrürler (TiCN gibi), oksitler (Al_2O_3 gibi), borikler (ZrB, TiB_2 gibi), karbürler (TiC gibi) elmas benzeri karbon kaplamalar, sürtünme özelliğini geliştirmeye yönelik MoS_2 , hidrojenli elmas benzeri karbon kaplamalar üretilmektedir [44]. PVD kaplama yönteminin sınıflandırılması Şekil 3.23'deki gibidir. PVD yöntemi gaz fazın elde edilif prensibine göre genel olarak iki grup altında incelenebilir.

1. Buharlaştırma,
2. Sıçratma

Bu teknikler aracılığıyla üretilen metal buharının iyonize edilerek taban malzemeye uygulanan negatif potansiyel aracılığıyla hızlandırılması ile yöntemler plazma destekli (iyon kaplama) haline, bu arada ortama reaktif gaz (azot, oksijen, asetilen gibi) verilmesi ile de reaktif kaplama haline dönüştürülür [50].



Şekil 3.23. PVD kaplama yönteminin sınıflandırılması.

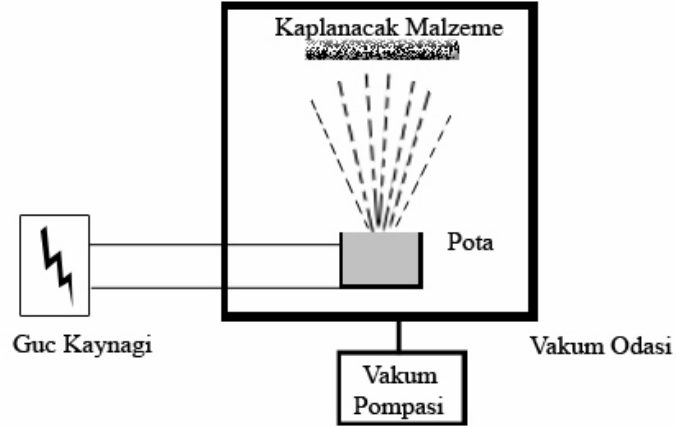
3.2.4 Buharlaştırma ile PVD Kaplama Yöntemleri

Bu yöntem ile yapılan PVD kaplamada, sıvı veya katı fazdaki kaplanacak malzeme rezistanslı, endüktif, elektron bombardımanlı ve katodik arkli sistemler ile buharlaştırılır. Buharlaştırma yöntemlerinde buhar fazı, 10^{-5} — 10^{-6} Torr seviyelerinde vakum yapılmış, vakum odaları içinde üretilir. Vakum işlemi, üretilen buhar fazı atomlarının, kaplanacak yüzeye ulaşması sırasında diğer atomlar veya moleküller ile çarpışarak enerjilerini kaybetmemeleri ve yüzeyde istenilmeyen bileşiklerin oluşmaması amacıyla uygulanır [44].

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

3.2.4.1 Rezistans ve Endüktif Buharlaştırma Yöntemleri

Bu yöntemlerde (Şekil 3.24.) buhar fazının elde edileceği kaplama malzemesi yüksek sıcaklıklara dayanıklı potalar içine yerleştirilir. Rezistanslı sistemde ısıtma, pota çevresine sarılmış rezistanslar yardımıyla sağlanmaktadır. Eğer ısıtma indüksiyon ile sağlanacaksa su soğutmalı bakır tel sarılmış potalara radyo frekansı akımı uygulanır [44].



Şekil 3.24. Rezistanslı ısıtıcı sistemli PVD sistemi.

Bu yöntem günümüzde popülerliğini yavaş yavaş yitirmiştir. Bunda yüzey geometrisinin kaplamada önemli role sahip olması, sadece düşük buharlaşma sıcaklığına sahip malzemeler için kullanılabilmesi, malzemeyle birlikte potasında buharlaşıp kaplamaya karışma riski ve bileşik elementlerinin eşit oranda buharlaştırılmamaları gibi dezavantajları büyük rol oynar.

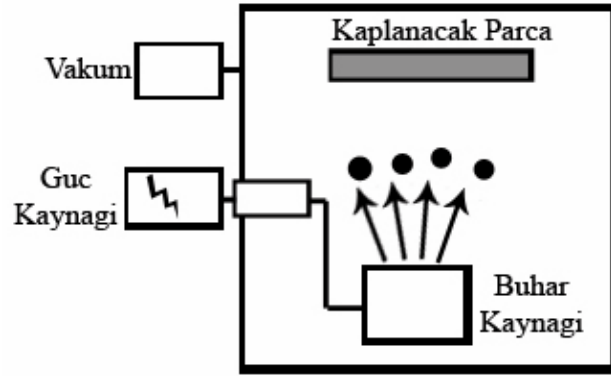
3.2.4.2 Elektron Demeti ile Buharlaştırma Yöntemi

Bir elektron kaynağı tarafından sağlanan elektronların, kaplama malzemesi üzerine bombardıman edilmesi yardımıyla buharlaşmanın sağlanması esasına dayanır. Bu yöntemin en büyük avantajı kaplanacak malzemenin ergitme sıcaklığı ne olursa olsun ergitip buharlaştırabilme yeteneğine sahip olmasıdır [52].

Elektron demeti ile buharlaştırmada gerekli elektronlar iki şekilde sağlanır:

Elektron tabancası: Flaman tel üzerinden akım geçirilmesi neticesinde, telin ısınması ve elektron yayması sağlanır. Üretilen elektronlar oluşturulan manyetik alan yardımıyla veya kaplanacak malzemeye pozitif potansiyel uygulanması ile yönlendirilir.

Oyuk katot: Bu yöntemde oyuk bir silindir içinde inert gazların kullanımı ile oluşturulan plazma sayesinde buharlaşma meydana gelmiş olur (Şekil 3.25.) [44].

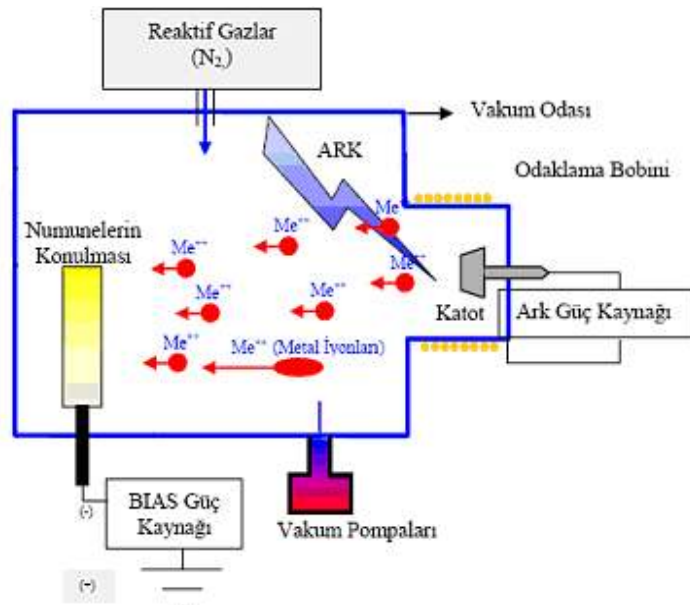


Şekil 3.25. Oyuk katot tabancası kullanan PVD sistemi.

3.2.4.3 Katodik Ark Yöntemi ile Buharlaştırma

Ark PVD malzemenin vakum altında ark etkisi ile buharlaştırılması esasına dayanır. Ark PVD tekniği diğer tekniklere göre daha yeni olan, ancak kullanımı hızla yaygınlaşmakta olan kaplama tekniğidir. En önemli avantajı ark etkisi altında buharlaşan malzemenin oluşan elektriksel alan içerisinde hemen yüksek oranda ve yüksek enerjili olarak iyonlaşmasıdır.

Dezavantajı ise arkla buharlaştırma sırasında oluşan metal damlacıklarının kaplanacak yüzeye yapışarak pürüzlülüğünü artırmasıdır [52].



Şekil 3.26. Katodik ark PVD sistemi.

Bu yöntemde (Şekil 3.26.) kaplama malzemesi vakum odasına katot olarak asılırken, kaplanacak malzemeler de anot olarak asılırlar. Sisteme uygulanan düşük voltajın ve yüksek akımın etkisiyle katot yüzeylerinde ark meydana gelir ve sıcaklığın çok yüksek değerlere ulaşmasıyla ergime ve buharlaşma oluşur. Bu şekilde elde edilen buhar fazı, katot önündeki yüksek elektron yoğunluğu sayesinde iyonize olurlar. Oluşan iyonlar anot üzerine taşınırlar [44].

Katodik ark buharlaştırmalı PVD sistemindeki işlem kademesi şu şekildedir:

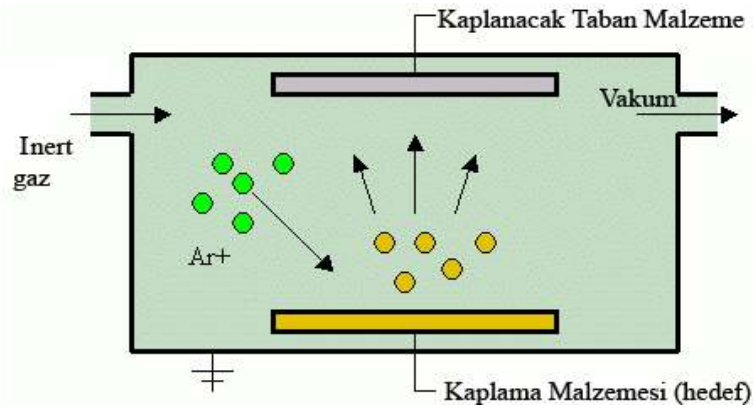
1. Vakum işlemi
2. Alt malzemenin; radyasyon, taban malzeme tutucularından ısı iletimi ve sistemde bulunan hızlandırılmış partiküller aracılığı ile ısıtılması.
3. Taban malzeme yüzeyine çarpan elektronlar neticesinde, taban malzeme yüzeyinden atomların koparılması ve bu sayede yüzeyin temizlenmesi.
4. Film biriktirme işlemi.
5. Soğutma.

3.2.5 Sıçratma İle PVD Kaplama Yöntemleri

Sıçratma ile kaplama, PVD kaplama yöntemleri arasında sıkça kullanılan yöntemlerden biridir. Sıçratma ile kaplama yönteminde, vakum ortamında kaplama malzemesini yüzeyi yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilerek, atomların yüzeyinden kopartılması sağlanır. Kopartılan bu atomlar oluşan plazma içerisinde buhar fazına geçer ve taban malzeme yüzeyinde biriktirilir. Sıçratma ile kaplanacak taban malzeme yüzeyi istenen bir metalle kaplanabildiği gibi, reaktif kaplama denilen ve buharlaştırılan malzemenin istenilen bir gazla kaplanacak taban malzeme yüzeyinde bileşik oluşturması sağlanabilir. Böylece sert seramik filmler veya bileşik malzemelerde üretilen kaplamalar yapılabilir.

Sıçratma sistemi, negatif doğru akım veya radyo frekansı potansiyel uygulamalı kaplama malzemesi ile kaplanacak taban malzemenin bulunduğu bir vakum odasından oluşur. Kaplanacak taban malzeme kaplama malzemesi ile karşılıklı yerleştirilir ve topraklama, negatif potansiyel uygulama veya kendi halinde bırakma işlemlerinden birisi uygulanır. Sıçratma işleminde plazma oluşumunu başlatabilmek için diğer malzemeler ile reaksiyona girmeyecek inert gaz iyonları kullanılır. Bunun için en yaygın kullanılan gaz Argon' dur [44].

Hedef (Şekil 3.27.) adı verilen kaplama malzemesine 2-3 kV hık negatif potansiyel uygulanır ve oluşturulan plazmadaki pozitif iyonların hedef yüzeyine çarpmaları sağlanır. Momentum değişim mekanizması ile çarpan iyonlar hedef malzemeden atom kopartırlar. Hedef malzemesinin atomlarının bu şekilde malzemeden uzaklaştırılmasına sıçratma adı verilir [53].



Şekil 3.27. Sıçratma mekanizması.

Sıçratılan iyonların bazıları kaplanacak taban metal yüzeyine giderek orada birikir ve bir film oluşturur. Sıçratma sırasında hedef yüzeyine pozitif yüklü iyonların çarpması ile başka ara etkiler de meydana gelebilir.

Hedef yüzeye çarpan atomlardan bazıları malzeme içine gömülebilir veya enerjilerini malzemeye bırakarak geri saçınabilir. Geri saçınmaları durumunda bıraktıkları enerji malzeme yüzeyinde ısı olarak açığa çıkacaktır. Başka bir durum ise çarpmanın etkisi ile

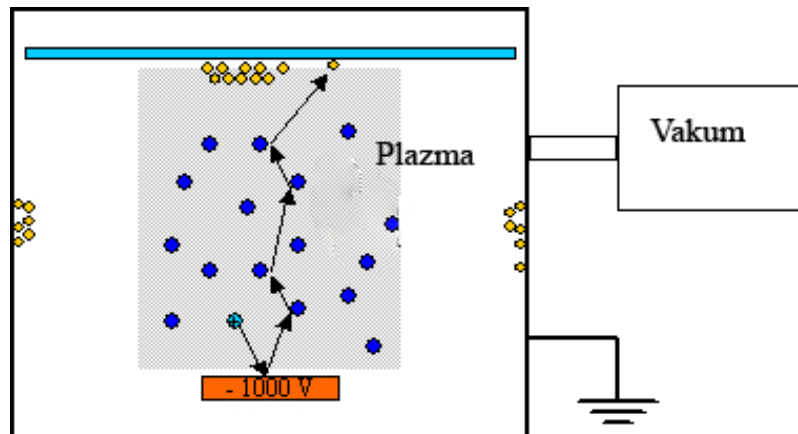
çıkan ikincil elektronların, nötr haldeki sıçratma gazı atomlarının ilave iyonizasyonuna neden olabilmesidir [44].

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

1. Diyot Sıçratma.
2. Triyot Sıçratma.
3. Manyetik Sıçratma [44].

3.2.5.1 Diyot Sıçratma

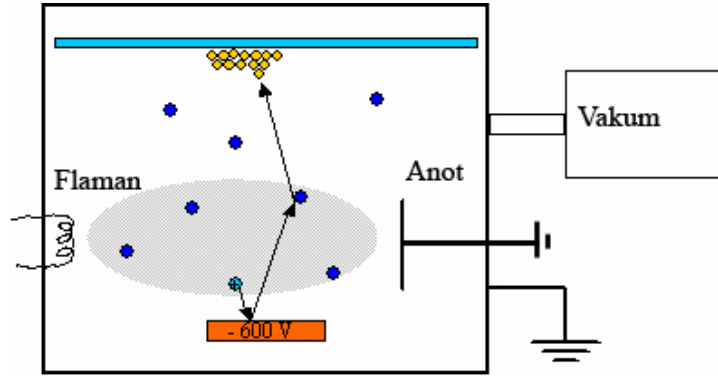
Bu yöntemde sıçratma mekanizmasını oluşturabilmek için, hedef yüzey ile kaplanacak taban yüzey arasına potansiyel uygulanır ve böylece bir elektron akışı elde edilir (Şekil 3.28.). Eğer bu ortama yüksek basınçta (4-15 Pa) inert gaz verilir ise yoğun atom çarpışmaları gerçekleşir. Bu çarpışmalarda iyonlar malzeme yüzeyinden atom kopartır ve böylece sıçratma olayı gerçekleşmiş olur. Diyot sıçratma, sıçratma etkisinin zayıf olması nedeniyle çok kullanılmamaktadır [53].



Şekil 3.28. Diyot sıçratma mekanizması.

3.2.5.2 Triyot Sıçratma

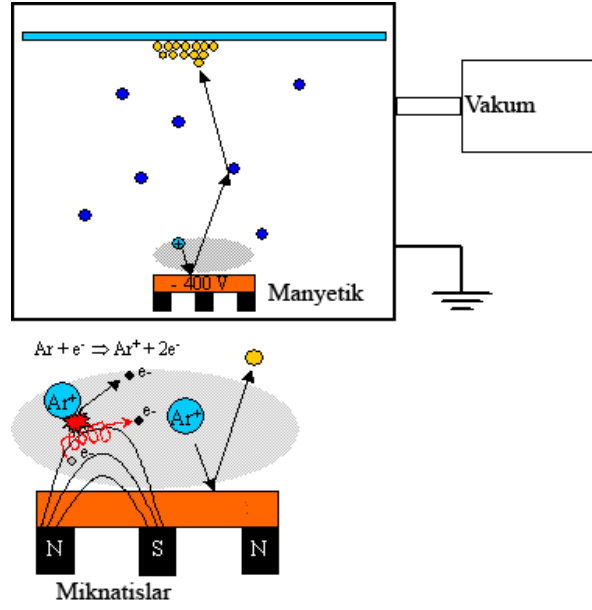
Triyot sıçratma yönteminde, diyot sıçratma yönteminden farklı olarak anot ve katot arasına elektron yayan ince bir tel (flaman) ve elektron toplayıcı ilave edilmiştir (Şekil 3.29.). Bu sayede plazmanın iyon yoğunluğu arttırılmıştır, bunun sonucunda da Argon' un iyonlaşma olasılığı yükseltilmiş ve basıncı düşürülmüştür. Sistemdeki elektron miktarı uygulama potansiyeli ile orantılı olduğundan, bu teknikte uygulama potansiyelide düşürülebilmştir[44].



Şekil 3.29. Triyot sıçratma mekanizması.

3.2.5.3 Manyetik Sıçratma

Bu yöntemde hedef malzeme, su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşan tutucunun üzerine yerleştirilmiştir. Hedefin (Şekil 3.30.) merkez eksenini, mıknatısın bir kutbunu oluşturur. Zıt kutbu ise, hedefin kenarlarına yerleştirilen mıknatıslar tarafından halka şeklinde oluşturulur. Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesi sonucunda oluşan manyetik alan, iyon bombardımanı ile katot yüzeyinden yayılan ikincil elektronların, bu bölgede özellikle tutularak iyonizasyonun artmasına ve plazmanın daha yoğun olmasına neden olur [53].



Şekil 3.30. Manyetik sıçratma mekanizması.

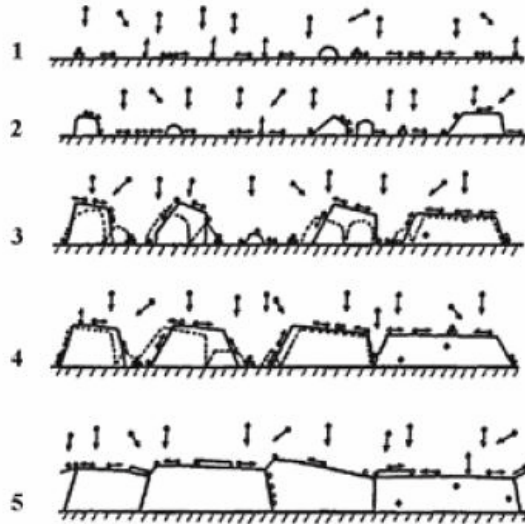
İyonizasyon etkisinin artması, daha düşük çalışma basınçlarında plazma oluşturabilen manyetik alanlar meydana getirir. İyonların geri saçınımı ve hedef malzeme yüzeyinde tekrar birikmeler azalacağından kaplanacak taban malzemeye ulaşan tanecik sayısı artar ve böylelikle birikme hızı da artar. Pratikte birikme hızını kontrol eden faktörler ise, hedef malzemesi, alt metal-hedef mesafesi, hedef bölgesindeki güç yoğunluğu, hedef alanı ve basınçtır [53].

3.2.6 Buharın Taşınması

Yukarıda anlatılan yöntemlerden herhangi biriyle buharlaşan malzeme, düşük basıncın etkisiyle reaktif gaz ile çarpışmalar geçirir vakum odası içerisinde yayılmaya başlar. Kaplanacak taban malzeme yüzeyinde bu buhar ile temas halinde olan yerlerde yoğunlaşma olur ve kaplama gerçekleşir. Bu şekilde sadece temas yüzeylerinde kaplamanın gerçekleşmesi, özellikle karmaşık şekilli parçalar için dezavantaj oluşturur. Daha homojen bir kaplama gerçekleştirilmesi için kaplanacak taban yüzeyini tutan tutucular, malzemenin tüm yüzeyleri buharla karşılaşacak şekilde hareketli ve döner şekilde tasarlanırlar [54].

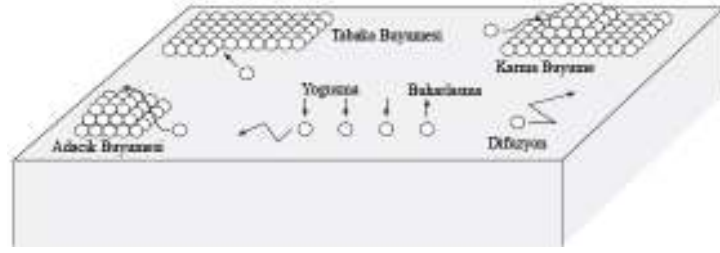
3.2.7 Yoğuşma ve Film Büyümesi

Taban malzemesinin yüzeyine çarpan atom, enerjisinin büyük kısmını bu çarpışma sırasında verir. Çarpışan atomların bazıları yüzey tarafından absorbe edilir, diğerleri ise geri saçılır. Yüzey tarafından absorbe edilen atomlara adatom adı verilir. Adatom yüzeyde hareket halindedir. Bu atomlar ya tekrar buharlaşır ya da yüzeyde enerji seviyesinin uygun olduğu yerde kalırlar ve çekirdek oluşumu başlar. Bu yerler genellikle yüzeyde kristal hatalarının bulunduğu yerlerdir, çünkü bu bölgelerde atomla bağın kurulabilmesi için gerekli aktivasyon enerjisi düşüktür (Şekil 3.31-1) [54].



Şekil 3.31. Film büyüme mekanizması.

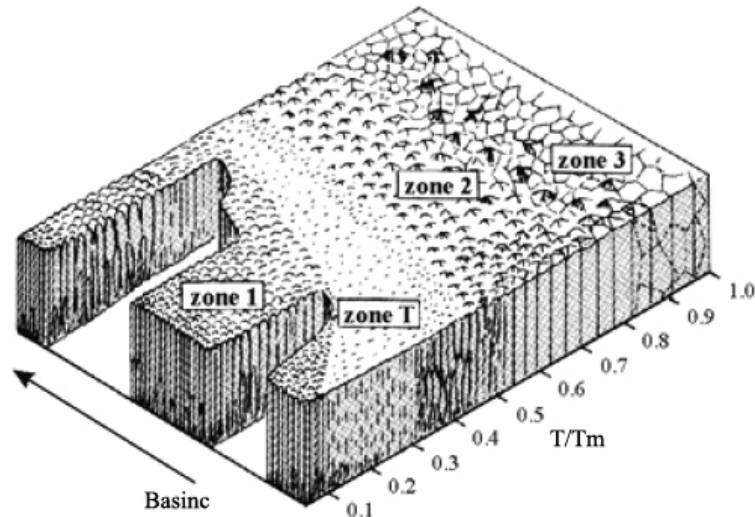
Benzer şekilde yüzeye gelen diğer atomlar da absorbe edilir ve bu adatomlar küme oluştururlar (Şekil 3.31-2). Adatomlar küme oluşturduklarında yüzeyde tekrar hareket etme ve tekrar buharlaşma olasılıkları azalır. Bu kümeler belli bir boyuta geldiğinde yüzeydeki yerleri sabit hale gelir ve adacıklar oluşur. Birbirine yakın olan adacıkların birleşmesi ile serbest enerjisi azalmaya başlar (Şekil 3.31-3). Daha sonraki aşamada adacıklar yüzeyde sürekli bir film oluşturma yönünde birleşerek büyürler, ancak başlangıçta kristal aralarında boşluklar bulunur (Şekil 3.31-4). Yüzeyin adatom absorbe etmesi devam ettikçe, boşluklar yüzey difüzyonu sonucu doldurulur ve sürekli bir film elde edilir (Şekil 3.31-5) [44].



Şekil 3.32. Film büyüme modelleri.

Yüzey difüzyonunun yeterli olduğu durumlarda yüzeydeki atomlar yüzey serbest enerjisini düşürmek için yeniden düzenlenebilir ve farklı modellerde büyüme gerçekleşebilir. Eğer oluşan film ile taban malzemesi arasında güçlü bir bağ varsa film büyümesi tabakalar halinde oluşacaktır. Eğer aradaki bağ güçlü değilse tabaka tabaka büyüme, toplam yüzey enerjisini arttıracığından büyüme adacıklar halinde gerçekleşir. Diğer bir durumda ise büyüme önce tabaka tabaka, daha sonra enerji durumu değişerek adacıklar halinde gelişir (Şekil 3.32.) [44].

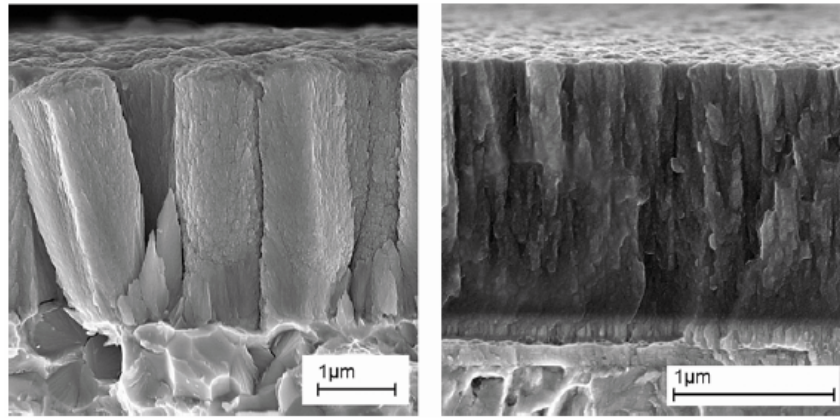
Atom hareketliliği kaplamanın morfolojisi ile doğrudan ilgilidir. Thornton tarafından yapılan çalışmalarda kaplama morfolojisinin, kaplama sıcaklığı (T_s) ve kaplanan malzemenin ergime sıcaklığı (T_m) ile değişimini gösteren bir model geliştirilmiştir. Bu modelde kaplamanın mikro yapısı ya da morfolojisi Zone1, ZoneT, Zone2 ve Zone3 olmak üzere dört bölgeye ayrılmıştır (Şekil 3.33.) [54].



Şekil 3.33. Thornton kaplama morfolojisi modeli.

Z1 bölgesi çok düşük sıcaklıklarda ve çok kısıtlı atom hareketliliğinde ortaya çıkan durumdur. Film büyümesi üç boyutlu adacıklar şeklinde gerçekleşir ve film yüzeyi pürüzlüdür. Film yapısı, aralarında birkaç nanometre boşluklar bulunan kolon şeklindeki kristallerden oluşmuştur. Film kalınlaştıkça yüzey difüzyonu da az olduğundan hatalar büyümektedir (Şekil 3.34.a). ZT bölgesi Z1 ve Z2 arasındaki geçiş bölgesidir. Bu bölgedeki taneler Z1'e göre daha küçük boyutlu silindirik yapıdadır. Tane sınırları birbirine bağlanmaya yeterli yoğunlukta olduğundan tane aralarında boşluk yoktur (Şekil 3.34.b). Alüminyum alaşımları gibi ergime noktaları düşük malzemelerin kaplanması ancak düşük sıcaklıklarda mümkün olduğundan, bu tarz malzemelerin kaplanması sırasında bu yapı gözlenmektedir.

Birikme prosesindeki diğer değişkenlerin optimizasyonu sağlanarak aslında Z1 olan yapıların Zt'ye dönüştürülmesine çalışılmaktadır.



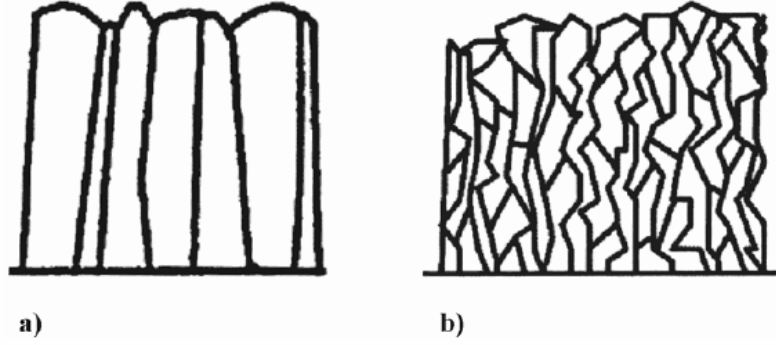
(a)

(b)

Şekil 3.34. Thornton modelindeki Zonel ve ZoneT bölgeleri.

Z2 bölgesinde yüzey difüzyonu düz ve yoğun kaplama yüzeyi elde edecek kadar yüksektir. Z2 bölgesi Z1 ve ZT'ye benzer ancak Z2 bölgesinde silindirik yapıların çapları daha büyüktür ve tane aralarındaki yapışma çok kuvvetlidir (Şekil 3.35.a) [54].

Z3 bölgesinde sıcaklığın çok yüksek olmasından dolayı kütleli difüzyon oldukça fazladır. Taneler kaynaşabilir, tane büyüme yönü değişir ve taneler rastgele yönelir. Film yüzeyi düz ve parlaktır (Şekil 3.35.b) [54].



Şekil 3.35. Thornton modelindeki Zone2 ve Zone3 bölgeleri.

Bu dört bölge arasındaki geçiş kesin bir sıcaklıkta değildir ve malzemeye bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca bölgelerin yüzey topografyaları yüzey enerjisine ve atomların yüzeye geliş açılarına bağlı olarak değişmektedir.

3.2.8 PVD Kaplama Uygulamaları

3.2.8.1 TiN (Titanyum Nitrür) Kaplama

Tüm PVD kaplamalar içinde en eski ve en bilinen kaplama türü olan TiN kaplama demir, çelik vb. metaller, metal işleme, kesme kalıpları, aşınmaya maruz parçalar, tıbbi ve dekoratif parçalar için genel amaçlı bir kaplamadır. Uygulamada çoğunlukla matkap uçları, frezeler, bıçaklar, broşlar, kesme-bükme kalıpları, zımbalar, fellow ve azdırma çakılan gibi birçok takım ve kalıpta kullanılmakta, performans yönünden kaplanan parçaların ömründe 3-30 kat arasında bir artış sağlamaktadır [52].

TiN kaplama yüksek sertliği ve düşük ısıl geçirgenliği sebebiyle ısı transferini engeller, takımların ısınarak sertliğinin düşmesini önler, krater oluşumunu ve serbest yüzey aşınmasını azaltır. Yüzeyin sürtünme katsayısı oldukça düşüktür, bu sebeple sürtünme kuvvetleri azaldığından plastik deformasyonu geciktirir. Kimyasal reaksiyonlara girmediğinden dolayı oksidasyonu ve korozyonu önler. Kaplama yüzeyi mükemmel

yapıştığında sıvama kenarlarında ve kesici kenarlarda kaplama dökülmesi olmaz. Yüksek tonajlı preslerde dahi yüzeyden dökülmez [52].

Tablo 3.2. Titanyum nitrür kaplamanın özellikleri.

Kimyasal Bileşimi	TiN
Sertlik (Hv)	2900 ±200
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	550
Sürtünme Katsayısı k	0.65
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra µm)	0.2
Kalınlık (µm)	2-3
Renk	Altın Sarısı

TiCN kaplama yüksek sertlik gerektiren uygulamalarda, zımbalarda, yüksek hızda çalışan talaş kaldıran takımlarda iyi performans sağlamaktadır. Delme ve talaşlı imalat sırasında daha yüksek makine hızlarının kullanılmasına olanak sağlayarak verimliliği artırır. Bazı uygulama örnekleri; çeşitli zımbalar, matkap uçları, raybalar, broşlar, azdırma bıçakları ve elmas uçlardır.

Tablo 3.3. Titan karbo nitrür kaplamanın özellikleri.

Kimyasal Bileşimi	TiCN
Sertlik (HV 0.05)	4000±400
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	400
Sürtünme katsayısı	0.45
Kalınlık (µm)	2-5
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra µm)	0.18
Renk	Violet

3.2.8.2 TiAlN (Titan Alüminyum Nitrür) Kaplama

TiAlN kaplamalar, TiN kaplamaya alüminyum eklenmesi ile elde edilir. Bu sayede hem sertlik hem de kaplamanın oksitlenmeye karşı direncinde artış elde edilir. Kaplama tabakasının özellikleri alüminyum miktarına göre değişmektedir. Kaplama yüzeyinde oluşan Al₂O₃ tabakası nedeniyle düşük ısı iletkenliği özelliğine sahiptir ve bu sayede özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan kalıp ve takımlar için idealdir. Daha yüksek

hızlarda çalışmaya olanak vererek daha hızlı üretim, daha az bakım, daha az bileme, daha az ayar sağlayarak üretimin daha verimli olmasını ve parça ömrünün uzun olmasını sağlar [52].

TiAlN kaplamalar; titan, nikel alaşımları, paslanmaz çelik ve dökme demir, sıcak dövme malzeme, basınçlı döküm (enjeksiyon) ve ekstrüzyon kökenli malzeme ile yüksek hızda çalışan soğutmasız ve sertleştirilmiş çelik malzemenin işlemlerinde iyi sonuç vermektedir.

Tablo 3.4. Titan alüminyum nitrür kaplamanın özellikleri.

Kimyasal Bileşimi	TiAlN ve AlTiN AlTiN
Sertlik (HV 0.05)	3600±400
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	800
Sürtünme katsayısı	0.42
Kalınlık (µm)	2-5
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra µm)	0.2
Renk	Siyah/Füme

3.2.8.3 CrN (Krom Nitrür) Kaplama

CrN Kaplama, metal şekillendirmede de çok aranan bir kaplamadır. Özellikle sıvama kalıpları, metal ve plastik enjeksiyon kalıpları ve plastik kalıplarında çok iyi sonuçlar alınmaktadır. Plastik enjeksiyon kalıplarında, yolluklardan ürün akışını hızlandırır. Yapışmama özelliğinden dolayı malzeme kalıptan kolay ayrılır. Kaplamanın düşük sıcaklıklarda yapılması nedeniyle kalıplarda çarpılmalar olmaz. Derin çekme ve sıvama kalıplarında kaplamanın yüksek sertliği ve düşük yüzey pürüzlüğünden dolayı sarma yapmaz, parçalarda ve kalıplarda çizilmeleri asgariye indirir [52].

CrN kaplamanın iç gerilmelerinin düşük olması nedeniyle 10 µm kalınlığa kadar yapılabilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü TiN kaplamadan daha iyidir, yüksek mukavemet göstermesinden ve kalın kaplanabilmesinden dolayı TiN'e göre daha iyi korozyon direnci gösterir. CrN kaplama, geleneksel sert krom kaplamadan 2-3 kat daha serttir [52].

Tablo 3.5. Krom nitrür kaplamanın özellikleri.

Kimyasal Bileşimi	CrN
Sertlik (HV 0.05)	2800±400
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	700
Sürtünme katsayısı	0.55
Kalınlık (µm)	3-5
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra µm)	0.2
Renk	Gümüş Grisi

3.2.8.4 ZrN (Zirkonyum Nitrür) Kaplama

TiN kaplama ile benzer özelliklere sahip bir kaplama çeşididir. Rengi TiN kaplamaya göre daha açık olduğundan dekoratif amaçlı olarak da tercih edilir. ZrN kaplamanın en önemli özelliği insan vücuduna biyolojik olarak en uygun kaplama çeşidi oluşudur. Bu sebeple tıbbi implantlarda özellikle tercih sebebidir.

Tablo 3.6. Zirkonyum Nitrür kaplamanın özellikleri.

Kimyasal Bileşimi	ZrN
Sertlik (HV 0.05)	2800±200
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	600
Sürtünme katsayısı	0.61
Kalınlık (µm)	2-3
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra µm)	0.2
Renk	Açık Sarı

3.3 Katodik Ark Metodu ve Sistemleri

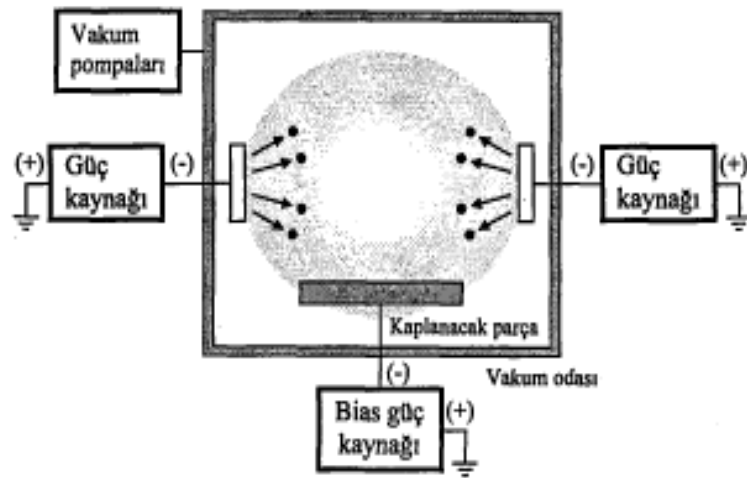
Katodik ark metodu 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren bilinen bir kaplama yöntemidir, ilk olarak Thomas Edison tarafından ortaya konulmuş ve kendisine 1892'de ark plazma yığına üzerine bir patent verilmiştir [1,2]. Katodik ark metodunda, buharlaştırılacak olan malzeme vakum odasına katot, kaplanacak olan taban malzemesi ise anot olarak yerleştirilir. Proseste yüksek akım ve düşük voltaj ile katot üzerinde ark oluşturulur. Bunu sağlamak için katodun ve iş gazlarının iyonizasyon potansiyeline yakın derecede düşük deşarj voltajları (10-30 V) ve katot yüzeyine yüksek akım (100-

200 A) uygulanır [22]. Proseste hedef malzemesinin iletken olma zorunluluğu vardır [3].

Vakum ark, vakum içerisindeki iki metalik elektrot arasında gerçekleşen bir plazma boşalmasıdır. Ark, katot spotları olarak adlandırılan katot yüzeyi üzerindeki 1-10 μm boyutlu alanlarda toplanır. Katot spotlarındaki akım yoğunluğu 10-10 A/cm civarındadır ve spotlar katot yüzeyi boyunca hızlı ve rast gele bir şekilde hareket ederler [2].

Katot yüzeyinde arkın meydana geldiği noktalarda, sıcaklık çok yüksek değerlere (~ 2500 °C) ulaşır ve katodun bu noktaları hemen buharlaşır. Katot üzerinde arkın olduğu noktaların hızla yer değiştirmesi katodun homojen olarak buharlaşmasını sağlar. Oluşan buhar fazı, katodun önündeki yüksek elektron yoğunluğuna sahip bölgede ($\sim 10^{20}/\text{m}^3$) çarpışmalar sonucu iyonize olurlar ve oluşan iyonlar hızla taşınırlar [22].

Ark tarafından üretilen plazma büyük bir metal iyonu konsantrasyonuna sahiptir ve pozitif iyon akımı ile ark akımı arasında $I_{\text{iyon}} = \epsilon \cdot I_{\text{ark}}$ şeklinde sabit bir oran vardır. Burada ϵ , 0.06-0.12 arasında değişir [2]. Katot spotlarında üretilen plazma, hızlı bir şekilde çevreleyen vakum içerisine yayılır. İyon hızları, 1-2.10⁴ m/s sahasındadır [1]. Katodik ark sistemi şematik olarak Şekil 3.36'da gösterilmektedir.



Şekil 3.36. Katodik ark sisteminin şematik gösterimi.

Katodik ark metodunda tamamen iyonize olmuş bir plazma kullanılır ve bombardıman enerjisi yüksektir [1,3,11,14,22]. Filtreleme ile makro partiküller ve nötr metal buharı atomları kaldırılır ve filtreyi terk eden ve ana malzemeye doğru akan plazma yalnızca şarjlı partiküllerden yani iyonlar ve elektronlardan meydana gelir. Ana malzemenin, plazma potansiyeline göre negatif olarak biaslanması ile yüzeye varan bütün plazma partiküllerinin enerjisi ayarlanabilir. Bu, nötr buharları kullanan PVD tekniklerinden (termal ve elektron ışın buharlaştırma) veya kısmen iyonize olmuş plazmalardan (sıçratma) farklı bir anahtardır.

Katodik ark prosesinin önemli bir başka avantajı, katot malzemesinden bol miktarda iyon elde edilmesidir. Bu yine, kaplamayı oluşturan parçacıkların öncelikle nötral atomlar olduğu diğer fiziksel buhar yığıma tekniklerinin, örneğin magnetron sıçratma ve elektron ışın buharlaştırmanın aksinedir [1].

Katodik ark metodunda istenilmeyen olaylar da meydana gelebilir. Mustapha ve arkadaşları [14], katodik ark buharlaştırma ile TiN filmlerinin yığılması esnasında azot gaz basıncının 0.2 Pa'ın üzerine arttırılmasıyla "katot zehirlenmesi" olayının meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Bu, basınçtaki ani bir artış ile ark tarafından katot yüzeyi temizlenmesinin azot gazı tarafından yüzey zehirlenmesine daha fazla baskın olamadığı zaman meydana gelir. Yüzey, titanyumdan daha yüksek ergime noktasına sahip bir nitrüre dönüşür, bu da buharlaşma oranında bir azalmayla sonuçlanır.

Katodik ark sistemleri DC veya pulslu tarzlarda çalıştırılabilir. Nispeten kalın filmlerin geniş alanlar üzerine yığılması DC çalışma tarzını gerektirir. DC sistemleri ile çok yüksek yığıma oranları elde edilebilir. Bu özellikle, makro partikül azalmasını gerektirmediği zaman geçerlidir. Bugün ticari olarak kullanılan katodik ark sistemlerinin tamamı DC tarzında çalışır [55].

Pulslu sistemler ise, küçük görev faktörlerinden dolayı nispeten düşük bir yığıma oranına sahiptirler ($R_{pulsu} = \delta \cdot R_{dc}$, görev faktörü $\delta = t_{on} / (t_{on} + t_{off})$ 5 ton ark zamanı, $t_{on} + t_{off}$ puls çevrimi süresi) [1]. DC kaynakları 30-300 A arasında çalışır, pulslu ark deşarjları

ise 5000 A'e kadar olan kısa süreli pulslar ile karakterize edilir. Puls süresi 100 ns ile 5 ms arasında değişir. Plazma yayılması 80 A DC çalışma tarzı için %95 iken, bir yüksek akım pulslu kaynaktaki plazma yayılması, 5000 A pulslar için %100'dür [2]. Pulslu çalışma tarzının avantajı, soğutma gereksinimlerinde olan önemli ölçüdeki azalmadır [1,2]. Bunun sebebi ise, ortalama gücün düşük (1 kW'tan az) tutulabilmesidir.

Sistemin ortalama yığma oranının, geleneksel DC ark ekipmanının yığma oranına erişebildiği ve hatta geçebildiği ispatlanmıştır.

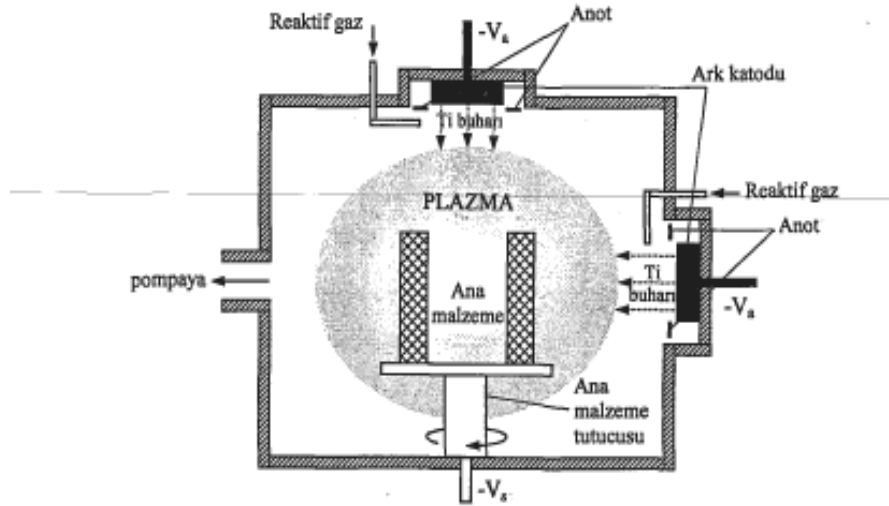
Yüksek akım arkı (HCA) (High Current Arc) ve filtrelenmiş yüksek akım arkı (O-HCA) (Filtered High Current Arc), kiloamper sahasındaki ark akımlarını kullanır ve yüksek puls tekrarlanma oranları ve görev faktörü ile çalışır. Düşük güç özelliği bu sistemlerde geçerli değildir [55].

Pulslu çalışma tarzının bir başka avantajı, film özellikleri ve kontrol edilebilirliklerinin artırılabilmesidir. Fakat, düşük bir görev faktörlü pulslu yığma ile üretilen bazı metal filmlerinde, genelde istenilmeyen oksijen ve hidrojen birleşmeleri gözlenir. Kirleşmenin kaynağı hala araştırılmaktadır, fakat sebeplerden birisinin yüksek vakumda çalışıldığı zaman bile, ark pulsları arasında katot yüzeyi üzerinde oluşan su tabakası olduğu tespit edilmiştir. Pulslu sistemler, ultra ince a-C ve oksit filmlerinin yığılmasında çok avantajlıdır [1].

Fuchs ve arkadaşları [5], pulslu katodik ark prosesindeki, iyon akım yoğunluğu, yığma oranı ve film kalınlığı üniformluğu üzerine incelemeler yapmışlar ve DC çalışma tarzına göre dikkate değer farklılıkların olduğunu tespit etmişlerdir.

Özellikle, yüksek puls akımlarının iyon yayılmasının açısal dağılımını ve tabaka oluşumunu etkilediğini, puls frekansının tabaka kalınlığı dağılımı üzerinde hiçbir etkisi olmadığından dolayı, bu parametrenin maksimum hedef kullanımına ulaşmak için seçilebileceğini ve sonuç olarak da puls formu ve frekansının ark prosesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi gereken bir konu olduğunu ortaya koymuşlardır [55].

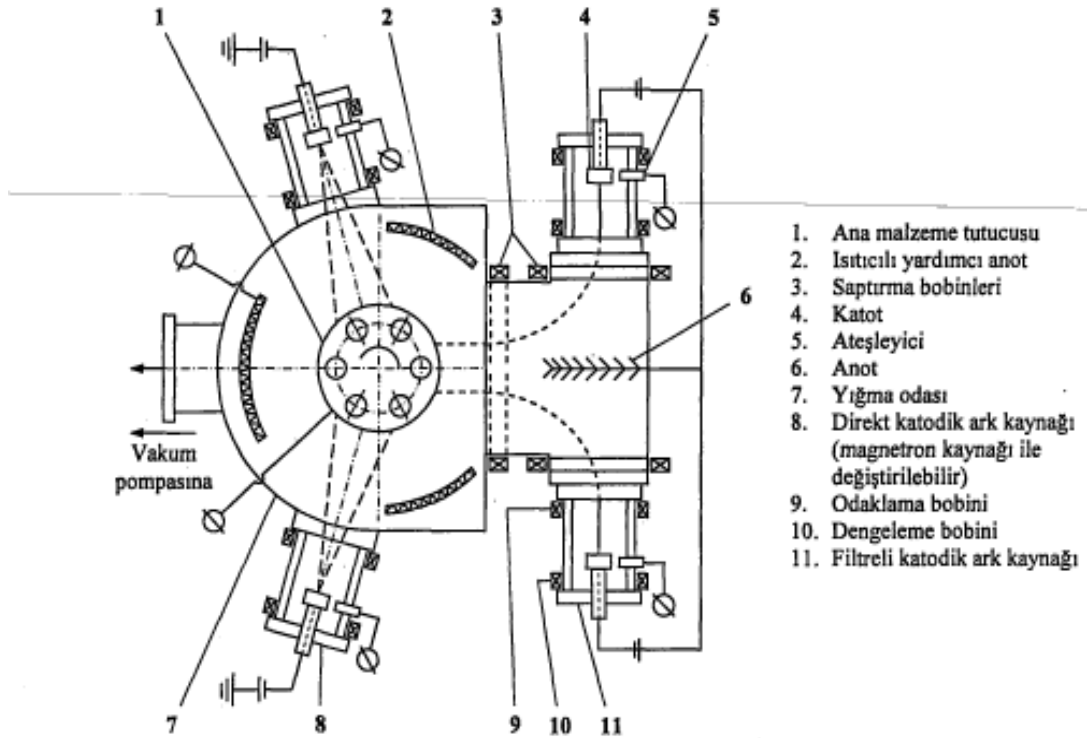
Farklı şekillerde tasarlanmış çeşitli katodik ark sistemleri mevcuttur. Şekil 3.37'de, Popescu ve arkadaşlarının [21]. TiN kaplı yüksek hız çeliği matkapların delme performanslarını inceledikleri bir çalışmada kullandıkları, iki ark kaynaklı katodik ark yığma sistemi gösterilmektedir. Matkaplar, trikloretilen ile ultrasonik olarak temizlendikten sonra yığma odası içerisindeki döner ana malzeme tutucusuna yerleştirilmişler ve kaplamadan önce sıçratma ile Ti iyon bombardımanına (1000 V, 5 dak) maruz bırakılmışlardır. Kullanılan kaplama parametreleri ise şu şekilde özetlenebilir: Azot basıncı $P=2.10^{-1}$ Pa, ark akımı $I_a=90$ A, ana malzeme biası $V_s=225$ V, yığma sıcaklığı $T= 160-250$ °C ve süre $t=60$ dak.



Şekil 3.37. Katodik ark yığma sistemi.

Şekil 3.38'te Dixit ve arkadaşlarının [56], proses parametrelerinin ince AlN filmlerinin mikroyapısal ve optik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için kullandıkları ve Gorokhovsky tarafından geliştirilen LAFAD (large area filtered arc deposition) sisteminin üstten görünüşü gösterilmektedir. Sistem esas olarak; iki direkt ark kaynağı, iki filtreli ark kaynağı ve yardımcı anotlardan meydana gelir [1]. Magnetik bobinler ve yardımcı anotlar kullanılarak idare edilen ark plazma jeti kaplama odası içerisine sevk edilir ve parçaların etrafını saran bir plazma ortamı meydana getirilir [56]. Kaplanacak parçalar, hem kendi eksenleri hem de ana malzeme tutucusunun ekseninde döndürülür. Sistemde direkt ark kaynağı çifti ve filtreli ark kaynağı çifti ayrı ayrı

kullanılabilir, böylece üretilen makropartiküllü ve makropartikülsüz kaplamaların performans karşılaştırmaları yapılabilir [1]. Gorokhovsky, Vetter ve Perry, LAF AD sistemindeki ark kaynaklarının yüksek enerjili iyon ve elektronlar üretebileceğini ve uygun taban malzemesi biası ile yüksek yoğunluklu filmlerin elde edilebileceğini göstermişlerdir.



Şekil 3.38. LAFAD sisteminin şematik gösterimi.

Katodik arkın diğer metotlar ile kombine edilmesine dayanan yeni metotlar da geliştirilmiştir. Martin ve arkadaşları [16], yaptıkları bir çalışmada, $Ti-xSixNy$ ince filmlerinin üretiminde, titanyum iyon akışı için bir katodik ark buharlaştırma kaynağının, silisyum atom akışı için ise bir DC magnetron sıçratma kaynağının aynı anda kullanıldığı kombine bir teknik tanımlamışlardır. $Ti-xSixNy$ filmler, katodik ark buharlaştırma metodu ile sabit bir alaşım bileşimine sahip bir katot kullanılarak üretilir. Fakat bu, mevcut katot bileşiminde Ti/Si oranının hassas bir şekilde kontrol edilmesini gerektirir. Ayrıca silisyumun saf elementer durumda ark buharlaşması nispeten zordur, fakat bir magnetron kaynağı kullanılarak kolay bir şekilde sıçratılabilir.

Martin ve arkadaşları, bu sebeplerden dolayı, TiN'e %1-16 oranında kontrollü silisyum ilavesine müsaade eden bu prosesin önemli avantajlara sahip olduğunu belirtmişler ve üretilen Ti_{1-x}Si_xN_y filmlerinin TiN'den aynı sistemde magnetron kaynağı kullanılmadan üretilen) daha yüksek bir sertliğe ve üstün termal özelliklere sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

Film büyütme esnasında meydana gelen kaplama mikroyapısı için yapılan makroskobik bir tanım, aslen Movchan ve Demchishin tarafından getirilen ve daha sonra Thornton ve Messier tarafından geliştirilen yapı-bölge modelidir. Bu model kaplama mikro yapısının, atomların kaplama yüzeyine varma oranı ile bu atomların yeni atomlar gelmeden önce kendilerini yeniden düzenleyebilme oranları arasındaki bir ilişki ile saptandığını ortaya koyar. Modele göre, daha yoğun kaplamalar daha yavaş yığıma oranları ve daha yüksek ana malzeme sıcaklıklarında meydana gelir.

Çünkü böyle koşullar, kaplama atomlarının difüze olarak hacimsel malzemeye daha çok benzeyen kaplama mikro yapılarını oluşturmaları için daha çok zaman ve enerji sağlar. Hubler ve Sprague ise, kaplama yüzeyinin iyon bombardımanının, örneğin azot gibi gazların yapışma katsayısını arttırdığını tespit etmişlerdir. Bu da, katodik ark prosesinin nitrürlerin ve karbürlerin oluşturulmasında niçin bu kadar verimli olduğunu açıklar [1].

Katodik ark metodunda DC bias voltajı yerine pulslu bias voltajı da kullanılabilir. Bu şekilde değiştirilebilen parametrelerin sayısı artırılmış olur. Zhengyang ve arkadaşları [11], yaptıkları bir çalışmada, katodik ark metodu ile yüksek hız çeliği ana malzemeler üzerinde üretilen TiN kaplamaların özelliklerine DC biası üzerine uygulanan puls biasının etkilerini araştırmışlardır. Bunun için puls piki voltajı, frekans ve güç çevrimi puls güç kaynağı faktörlerini ve basınç, ark akımı ve DC bias voltajını değiştirmişler ve kaplamaların yüzey pürüzlülüğü kalınlık ve mikro sertlik değişimlerini incelemişlerdir.

Zhengyang ve arkadaşları, yüzey pürüzlülüğü için basınç, yığıma oranı için basınç, frekans ve DC bias voltajının önemli parametreler olduğunu, yüzey pürüzlülüğü ve yığıma oranının puls piki voltajından fazla etkilenmediğini, mikro sertliği çok

etkileyebilecek bir parametre olmadığını, önemli sayılabileceklerin ise görev çevrimi ve DC bias voltajı olduğunu ve DC + puls bias voltajı kullanımının yalnızca DC bias voltajına göre yüzey pürüzlülüğünü daha fazla geliştirdiğini tespit etmişlerdir.

Sonuç olarak DC+puls bias voltajı kullanılarak üretilen filmlerin makro partikül yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, film yapışması ve üniformaluluğunun ise arttığı söylenebilir.

Katodik ark metodunda, ana malzemeye yüksek pulslu bias voltajının uygulandığı PIII (plasma immersion ion implantation) sistemleri de son zamanlarda üzerinde çalışılan bir konudur [3,12]. Sistemde, ana malzeme tutucusuna bağlanan PIII güç kaynağı ile ana malzemeye 20 kV'a kadar olan yüksek pulslu bias voltajı uygulanır [12]. Her puls esnasında plazma iyonlarını ana malzemeye doğru hızlandıran bir elektrik muhafazası oluşturulur. Ana malzeme içerisine implantasyon meydana gelir ve bir ara yüzey karışımı sağlanır. Ayrıca yüksek voltaj bias pulsları arasındaki aralıklar esnasında film oluşturulur, bu da kombine olmuş bir yığılma ve implantasyon prosesi anlamına gelir [3,12]. PIII'nın kullanımının birçok avantajı vardır. İlk olarak yüksek kaliteli filmler üretmek için ana malzeme sıcaklığını yükseltme ihtiyacı ortadan kaldırılır ve polimer gibi sıcaklığa duyarlı malzemeler kaplanabilir. Ayrıca, ara yüzey karışım tabakası ile film yapışması artırılır, film yapısındaki gerilmeler azaltılır ve delaminasyon meydana gelmeden üretilebilen kaplama kalınlığı artırılır.

Lim ve arkadaşları [12], yaptıkları bir çalışmada, katodik ark metodu ile silisyum ana malzemeler üzerinde PIII'lı ve PIII'sız ürettikleri TiN filmlerinin özelliklerini karşılaştırmışlardır. PIII sistemi için; 20 kV'luk yüksek pulslu bias voltajı, 20 us'lık puls sürekliliği ve 250 Hz'lık tekrarlanma oranını kullanmışlardır. Lim ve arkadaşları, her iki kaplamanın da benzer bir stokiyometriye sahip olduğunu ve kaplama-ana malzeme ara yüzeyinde karmaşık ince tabakaların oluştuğunu tespit etmişlerdir. Farklılığın ise, PIII'nın kullanımı ile kaplama rengindeki altın sarısından morumsu bir renge ve tercihlili yönelmedeki (111)'den (200)'a olan değişimde olduğunu gözlemlemişlerdir. Yönelmedeki

değişimin, yüksek iyon enerjisi tarafından sağlanan tavlama etkisinin film yapısındaki gerilmeyi azaltmasından kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Sonuç olarak da, katodik ark metodu ile PIII'nın kombinesinin, TiN ince filmlerinin yönelmesini kontrol etmek için kullanılabileceğini ve ayrıca film yapısındaki gerilme seviyesini azaltmada faydalı olabileceğini ortaya koymuşlardır.

Tarrant ve arkadaşları da [6] filtreli katodik arkta kombine edilmiş yığma ve implantasyon prosesini kullanmışlar, 20 keV'luk yüksek enerjili pulslu iyon bombardımanı ile üretilen filmlerde ana malzeme içerisine implantasyonun meydana geldiğini, üretilen kalın karbon filmlerinde gerilmenin azalarak film yapışmasının arttığını tespit etmişlerdir.

Bunun sebebi yine, film-ana malzeme ara yüzeyindeki karışım bölgesinin, atomik türlerdeki ani değişimi (zayıflık hattı) önlemesi ve ara yüzeydeki bir çatlak yayılmasını zorlaştırmasıdır. Ayrıca termal genleşme katsayısı ve elastiklik modülü farklılıklarından kaynaklanan gerilmeler de azaltılmış olur.

İyon implantasyonunun kaplama yüzeyine uygulandığı çalışmalar da vardır. Wang ve arkadaşları [13], yaptıkları bir çalışmada, katodik ark metodu ile yüksek hız çeliği ana malzemeler üzerinde ürettikleri TiN kaplamalar (3 µm) üzerine MPII (metal plasma ion implantation) prosesi ile Al iyon implantasyonunu gerçekleştirmişler ve kaplamaların aşınma ve oksidasyon dirençlerini incelemişlerdir. Wang ve arkadaşları, implante edilen Al'un TiN kafesinde Ti'un yerine geçerek AlN ve TiAlN bileşiklerini oluşturduğunu, Al iyon implantasyonunun AlN/TiAlN fazının oluşumundan dolayı gerilmeyi azaltarak aşınma direncini arttırdığını ve TiCV'nin oluşumunu önleyerek TiN'ün oksidasyon direncini geliştirdiğini tespit etmişlerdir.

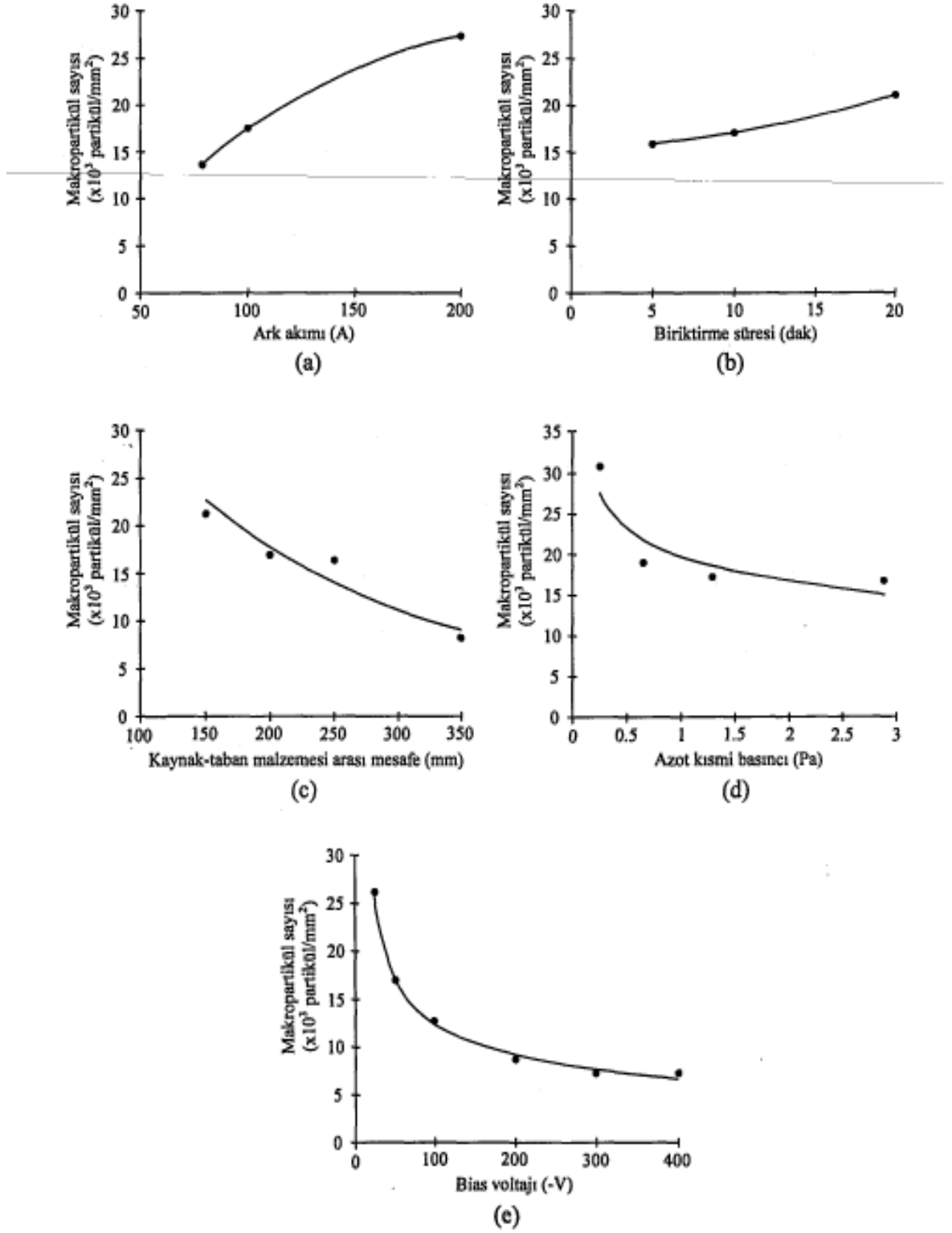
Sanders, katodik ark metodu ile kaplanmış ürünlerin değerinin her yıl 1 milyar dolara yaklaştığını ortaya koymuştur [1]. Katodik ark metodu ile üretilen yaygın kaplamalar; TiN, (Ti,Al)N, Ti(C,N), TiAlSiN, ZrN, CrN, TiC, Al2O3, NbC, NbN, DLC (elmas benzeri karbon) ve TiN+DLC kaplamalar, elektronik endüstrisindeki Si kaplamalar ve

$Al_2O_3+NiCrAlY$ gibi uçak motoru türbin kanatlarında kullanılan termal bariyer kaplamalarıdır [1,3,4]. Bor katot malzemesi kullanılarak üretilen c-BN ve B4C filmlere doğru da bir gelişme vardır [1,3].

3.3.1 Makro Partiküller

Katodik ark metodunun en önemli dezavantajı, film yapısında makro partiküllerin oluşmasıdır. Makro partiküllerin oluşma sebebi, katot üzerinde arkın olduğu noktalarda aşırı ısınmanın meydana gelmesi sonucu "droplet" adı verilen büyük sıvı kütlelerinin de iyonlarla beraber taban malzemesi yüzeyine taşınmasıdır [22]. Makro partikül boyutları genelde 0.1-10 μm arasında değişir, bununla beraber daha düşük boyut kullanılan teşhis metodunun limitleri ile saptanır ve daha küçük partiküller yani nano partiküller de (<100 μm) mevcuttur [1,2]. Makro partikül deyimi, iyonlar ve elektronlara göre kütle halindeki ağır yapılarını vurgulamak için kullandır [1].

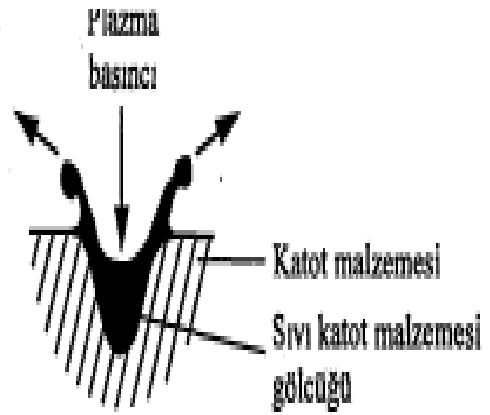
Çeşitli biriktirme parametrelerinin yapıdaki makro partikül sayısı üzerine etkilerini incelemişlerdir. En önemli parametrelerin; ark akımı, biriktirme süresi, kaynak-taban malzemesi arasındaki mesafe, azot kısmı basıncı ve taban malzemesi bias voltajı olduğu tespit edilmiştir. Bu parametrelerinin etkileri, Şekil 3.39'da gösterilmektedir [22]. Ayrıca, kaplama sonrası yüzey pürüzlülüğündeki artışın miktarı, yapıdaki makro partikül sayısı ile doğru orantılıdır denilebilir [30].



Şekil 3.39. a) Ark akımı, b) Biriktirme süresi, c) Kaynak - taban malzemesi arası mesafe d) Azot kısmi basıncı e) Bias voltajının makropartikül sayısı üzerine etkisi.

3.3.2 Katot Spotlarında Partikül Oluşumu

Katodik ark akımı, anlık zamanlarda sabit olmayan katot spotlarında sınırlanır. Spot oluşumu; katot ve anot arasında plazma oluşumu, elektron yayılması ve akım taşınması plazma-katı etkileşiminden meydana gelirler. Jütler katot spotu modelinde, partikül oluşumuna erimiş katot malzemesi üzerindeki plazma basıncının sebep olduğunu belirtmiştir (Şekil 3.40.). Bundan dolayı partiküllerin oluşumu, doğal olarak sabit olmayan katot spotlarının varlığına bağlıdır. Ark diğer katot modlarında, örneğin spotsuz buhar modu (yüksek buhar basıncı malzemesi katodu yüksek sıcaklıkta çalıştırılır) veya bir anodik ark (sıcak, buharlaşma anodu) gibi, çalıştırılmadıkça bundan kaçınılamaz [55].



Şekil 3.40. Makropartiküllerin katot spotlarında oluşumu.

3.3.3 Partikül-Plazma ve Partikül-Ana Malzeme Etkileşimi

Bir partikül katottan ayrıldığı zaman, çevreleyen plazma ile şiddetli bir etkileşime maruz kalır. Partiküller, çok hareketli elektronların ve daha az hareketli iyonların elektrik akımını dengelemek için plazma potansiyeline göre negatif olarak yüklenmiş olacaktır. Ayrıca, partiküllerden termo iyonik olarak elektron çıkarılır ve kütle buharlaşma ve saçılma ile kaybedilir.

Detaylı kütle, enerji ve momentum dengeleri, plazma ile etkileşimin, buharlaşma veya bir partikülün katottan ana malzemeye uçtuğu kısa süre içerisindeki diğer mekanizmalar ile tam partikül yıkımına sebep olamayacağını göstermiştir [55].

Ana malzemeye varan bütün partiküller ana malzemeye yapışmaz. Filtreden yansıyan partiküllerin ana malzeme yüzeyinden de yansıtacağı muhtemeldir. Yapışan partiküller, kaplamanın kalitesini düşürür, yapışmayanlar da çarpmaları ile büyüyen filmde hasara sebep olabilir. Yığma esnasında, ana malzemenin hızlı bir şekilde döndürülmesiyle meydana gelen merkezkaç kuvvet, partikül üzerinde önemli bir rol oynar, partikülün yapışma ihtimalini azaltarak yansımaları kolaylaştırır. Partiküller yansımadan sonra daha yavaşlar ve parçalara bölünebilirler.

3.3.4 Partikül Filtreleme

Katodik ark plazmalar tamamen iyonize edilir ve bundan dolayı elektrik ve manyetik alanlar ile idare edilebilir. Elektrik alanlar iyon enerjisindeki ve böylece yığılan filmlerin yapı ve özelliklerindeki değişimlere izin verirken, manyetik alanlar plazmayı idare etmek ve homojenize etmek için kullanılırlar [55]. Partikül oluşumunun önlenmesi veya plazmadan kaldırılmaları, katodik ark plazma yığmanın geleceği için belki de en önemli tartışma konusudur [1]. Katodik ark plazmadan partikülleri ayırmak ve kaldırmak için partikül filtreleri kullanılır [1]. Partikül filtrelemedeki esas gaye, partiküllerin ana malzemeye ulaşmasını engellemek ve plazmayı verimli bir şekilde ana malzemeye sevk etmektir [2]. Bu görüş ilk kez 1970'lerde Aksenov ve arkadaşları tarafından getirilmiştir [1,3].

Eksensel bir manyetik alanda, elektronların hareketi manyetik alan hattına sınırlandırılır. Elektronlar, bir başka partikül ile çarpışmaya kadar alan hatları etrafında dönerler. Kıvrılmış bir manyetik alanda, örneğin alan içinde bükümlü bir selenoid olması durumunda, elektronlar eğriliği takip ederler. Böyle elektronlara, manyetize olmuş denir. Bunun aksine, iyonlar genelde manyetize olmazlar, çünkü dönme yarıçapları

elektronlarınkinden çok daha büyüktür ve filtrenin karakteristik büyüklüğünü aşar. Yine de iyonlar, elektronlarla aralarında oluşan elektrik alanlardan dolayı manyetik alan hatlarını izlemeye zorlanırlar [55].

Partiküller bir miktar yüklenmiş olabilirler, fakat kütlelerin şarj oranı, elektronlar ve iyonlar için olandan çok daha büyüktür. Bu yüzden partiküller, eylemsizliklerinden dolayı hemen hemen düz yörüngeler boyunca hareket ederler. Eğer plazma (elektronlar ve iyonlar), katot yüzeyinden itibaren düz bir görüş hattının dışında sevk edilirse, partiküller plazmadan ayrılabilir. Bununla birlikte, duvarlardan partikül yansıması, filtredeki önemli plazma kayıpları ve plazma-partikül etkileşimi ile nanopartikül taşınması (plazma rüzgârı) gibi tartışma konularının da mevcuttur [1].

Bir filtrenin en önemli parametresi plazma taşıma verimidir. Bu, filtreden ayrılan iyonların sayısının giren iyonların sayısına oranı olarak tanımlanabilir. Bununla beraber, filtre içerisine iyon akışını belirlemek çoğu kez zordur ve daha belirgin bir değer olarak, filtreli iyon akımının ark akımına bölünmesiyle elde edilen "sistem katsayısı" ($K=I_{i, \text{filtreli}}/I_{\text{ark}}$) değeri kullanılır [2]. Bu değer yalnızca filtreyi değil, ark kaynağı ve filtre sistemini karakterize eder. Filtrenin plazma taşıma verimi (teorik olarak) %100'e ulaşabilirken, sistem katsayısı yüzde birkaç seviyelerindedir. Sistem katsayısı hiçbir zaman %100'e ulaşamaz, çünkü elektronlar ark akımının çoğunu taşırlar.

Partikül filtrelerinin tasarımı en çok ark çalışma tarzına bağlıdır. DC ark plazma kaynakları, genelde büyük boyutlu (3-5 cm çaplı) katotlar ile teçhiz edilirler. Bunun sebebi, tüketilen katot malzemesi miktarının fazla olmasıdır. Plazma üretim noktalarının yanı sıra mikron boyutlu katot spotlarının yeri sürekli olarak katot yüzeyi boyunca değişir. Spotun hareketi rastgele olabilir veya yeri manyetik olarak kontrol edilebilir. Filtre girişinin enine kesiti, farklı spot noktalarını barındıracak kadar geniş olmalıdır. Geniş bir filtre girişi uzunlukta, bundan dolayı da hacim ve ağırlıkta büyük bir filtreyi ifade eder. Aksi takdirde giriş ve çıkış düzlemleri arasında düz bir görüş hattı meydana gelir. Plazmanın yoğunluğu ise filtre boyu ile eksponansiyel olarak azalır. Dolayısıyla

filtrenin kısa ve bundan dolayı da ark kaynağının küçük alanlı sıkı bir katot olması gerekir. Bu sonuçlar bazı uygulamalar (lineer filtre vb.) için geçerli değildir. Kısa bir filtre, küçük katotlu bir kaynak ve açık yapılı alan bobinindeki yüksek akım, pulslu çalışma tarzını gerektirir. Çünkü küçük bir cihaz hacmindeki yüksek güç, termal aşırı yüklenmeye sebep olabilir.

Her ne kadar partikül filtreleme fikri, yirmi beş yıldan uzun bir zaman önce geliştirilmiş olsa da, plazma ve partikül taşıma mekanizmalarındaki çoğu görüş son yıllarda kazanılmış ve birçok yeni yaklaşım önerilerek test edilmiştir. Önemli partikül filtreleri; düz manyetik filtre, klasik 90° kanal filtre, dirsek filtre, kubbe filtre, çift yönlü lineer filtre, iç içe ortak merkezli ve lineer jalûzi filtre, S kanal filtre, stroboskobik filtre ve dönen pervane filtre olarak sıralanabilir.

Partikül filtreleri, mevcut boşluk ve katot boyutuna bağlı olarak, yığılma odası içinde veya dışında olabilirler. Sistem katsayıları, kıvrımlı manyetik kanal cihazları için %2.5'e kadar olabilir. Pulslu yüksek akım kaynakları için bu değer %7'ye kadar çıkabilir. Jalûzi filtre sistemlerinde ise, sistem konfigürasyonuna bağlı olarak %2.5-7 arasında değişir [2].

Partikül filtrelemede, daha yüksek manyetik alan gücünün filtrede daha iyi plazma hapsine sebep olacağı, bunun da kayıpları azaltacağı açıktır. Bununla beraber, manyetik alan katot üzerindeki spot davranışını katot ve anot arasındaki akım naklini etkilediğinden dolayı dikkatli olunmak zorundadır. Çok yüksek manyetik alanlarda plazma kararsızlıklarının meydana geldiği deneysel olarak tespit edilmiştir [8].

Katodik ark metodu ile üretilen (Ti, Al)N filmlerindeki makro partikül yoğunluğu TiN filmlerinden daha fazladır. Bunun sebebi, safmetal Ti hedefi ile karşılaştırıldığında (Ti-Al) hedefinin nispeten daha düşük bir ergime noktasına sahip olmasıdır. Ayrıca, alaşım hedefinin kimyasal bileşimindeki üniformsuzluk da durumu ağırlaştırabilir.

Bunun sebebi, plazmadaki Ti ve Al iyonlarından Al iyonlarının daha hafif kütlelerinden dolayı, manyetik alan etkisi altında orijinal uçuş yörüngelerinden daha çok sapmalar ve oda duvarına çarpmalarıdır. Bu durumda, daha az Al iyonu ana malzemeye ulaşır, bu da daha düşük alüminyumlu kaplamalar ile sonuçlanır. Özet olarak, makro partikülleri azaltmak için manyetik selenoid filtreleme tekniğinin kullanılması, bileşik ark katodunun farklı elementlerinin seçici filtrasyonu yan etkisini meydana getirebilir.

Katodik ark metodu, her ne kadar bilinen en eski plazma teknolojilerinden biriye de, ticari kullanımı genelde makro partiküllerin bir kısmının tolere edilebildiği uygulamalarla sınırlıdır, fakat makro partikül filtrelemedeki gelişmelerin uygulama alanlarını genişleteceği de muhtemeldir [1,3], Katodik ark metodunun uygulama alanları; dekoratif kaplamalar, kesici takım kaplamaları, motor parçaları kaplamaları, tıbbi ve cerrahi takımlar için kaplamalar, optik ve elektronik alanındaki kaplamalar ve örneğin kayıt sistemlerindeki hard disk sürücüler gibi ultra pürüzsüz uygulamalar için tribolojik kaplamalar olarak sıralanabilir [1,3,4]. Ark teknolojisini sürdürmeye zorlayan güç, buharlaştırma ve sıçratma teknolojilerine göre, üretilen filmlerin göze çarpan özellikleri ve reaktif plazma yığmadaki proses parametreleri esnekliğidir. Katodik ark plazmaları tamamen iyonize olduklarından film özellikleri kolayca ayarlanabilir. Plazma yoğunluğu dağılımı ve iyon enerjisi dağılımı, sırasıyla manyetik ve elektrik (bias) alanlar ile idare edilebilir [1].

3.4 TiN Kaplamaların Özellikleri

TiN (titanyum nitrid) kaplamalar, ilk kez CVD metodu ile üretilmiş, günümüzde ise PVD metodu ile üretim hız kazanmıştır [24]. Yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek korozyon direncine sahip olan TiN kaplamalar, genellikle 1-5 µm kalınlık aralığında, kesici takımlardan dekoratif uygulamalara kadar pek çok alanda kullanılırlar. TiN kaplamaların avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Kesici takımlardaki keskin kenar ve köşelerin özelliğini korur.
- Yağlayıcı özelliği vardır, yapışma ve soğuk kaynaklaşmayı önler, sürtünmeyi azaltır.
- Zehirleyici etkisi yoktur, cerrahi aletlerde ve gıda işlemede güvenlidir.
- Hemen hemen bütün kimyasallara ve korozyona dirençlidir.
- Isıl direnci yüksektir, yüksek sıcaklıklara dayanabilir.
- Birçok dekoratif uygulama için çekici olan metalik altın sarısı bir renge sahiptir [14].

Ti esaslı kaplama malzemelerinin (TiN, TiAlN, Ti(C,N), TiB₂, TiC vb.) en önemli özelliği, bütün olumlu özelliklere en uygun düzeyde sahip olmasıdır. Örneğin elmas, mükemmel sertlik ve aşınma direncine sahip olduğu halde, yapışma özelliği ve yüksek sıcaklık direnci oldukça düşüktür.

Krom nitrür (CrN) kaplamaların ise yapışma özelliği iyi, sertlik, yüksek sıcaklık direnci ve aşınma direnci düşük seviyededir. Ti esaslı kaplama malzemelerinde bütün bu özelliklerin orta düzeyde olması, bu kaplamaların birçok uygulama için uygun hale getirir [22]. PVD metodu ile üretilen TiN kaplamaların fiziksel özellikleri Tablo 3.7'de verilmektedir.

Tablo 3.7. PVD metodu ile üretilen TiN kaplamaların fiziksel özellikleri.

Özellik	Açıklaması
Bileşim	%99'dan daha saftır.
Görünüm	Metalik altın sarısı.
Kalınlık	0.25-12 µm arasında değişir. Tipik uygulamalar için 1-5 µm'dir.
Uniformluk	Kaplama taban malzemesine üniform bir şekilde kaplanır.
Sertlik	Knoop veya Vickers mikrosertliği 2000 kg/mm ² den fazladır. Normalde 2500-3000 değerleri arasında olup, bu da yaklaşık 85 Rc'ye karşılık gelir.
Adhezyon	Kaplama taban malzemesine, tabaka ayrılması, kabarma, yontulma veya soyulmanın meydana gelmediği metalurjik bir bağ ile bağlanır. Gerçekte kaplama, taban malzemesi yüzey tabakasının bir miktar içine
Sürtünme katsayısı	Çelikler, karbürler, TiN, seramikler ve kaplamalara karşı genelde düşük sürtünme gösterir. Elde edilen değerler 0.05-0.90 arasındadır. Çeliğe karşı elde edilen tipik değer ise 0.65'tir.
Yapışmama	Birçok malzemeye karşı düşük yapışma gösterir.
Güvenilirlik	Zehirleyici etkisi yoktur. Birçok tıbbi ve cerrahi aletlerde ve gıda sektöründe kullanılır.
Sıcaklık direnci	Havada 600 0C'de oksitlenmeye başlar. İnert bir atmosferde daha dirençlidir.
Erime noktası	2930 °C.
Biriktirme sıcaklığı	200-450 °C arasında değişir. En dayanıklı kaplamanın elde edildiği standart işlem sıcaklığı 400 °C'dir.
Çalışma sıcaklığı	Maksimum çalışma sıcaklığı 600 0C'dir.
Elektriksel direnç	25 µOhm.cm (direnç hesaplanırken uzunlukla çarpılıp kesit alanına bölünür).
Kimyasal direnç	Asitlere, bazlara, çözücülere ve yakıcı maddelere karşı oldukça
Termal genleşme katsayısı	9.4x10 ⁻⁶ /°C.
Termal iletkenlik	0.046 Ca1/s.cm.°C.
Yoğunluk	5.22 R/cm ³ .
Kristal yapı	Yüzey merkezli kübik.
Elastiklik modülü	600 GPa.
Poisson oram	0.25.
Oluşum ısısı	80.750 Cal/mol (3.5 eV/molekül).
Bağ aralığı	3.35-3.45 eV.

TiN, mükemmel tribolojik özellikleri nedeniyle, araştırmacıların büyük ölçüde ilgisini çekmiş ve tribolojik açıdan üzerinde en fazla araştırma yapılan ince ve sert kaplama olmuştur. 1970'lerin sonlarından bu yana çok sayıda çalışma yayınlanmış, fakat sadece

son 10 yıldır TiN kaplamaların tribolojisi üzerine detaylı ve sistematik analizler yapılabilmektedir. TiN kaplamaların tribolojik açıdan uygunluğu, taban malzemesine yapışması ve aşınma direnci ile belirtilir [24].

Cheng [10], düzlem dışı çift kıvrımlı bir filtreye sahip katodik vakum ark tekniği ile üretilen TiN filmlerinin yapısını XRD ile analiz etmiş ve yığma basıncı, ana malzeme biası ve yığma sıcaklığının filmlerin yapısı üzerindeki etkisini incelemiştir. Cheng deneylerinde, 80 mm çap ve 70 mm kalınlıklı, %99.999 saflıktaki bir Ti hedefi katot, yüksek saflıktaki azotu ise çalışma gazı olarak kullanmıştır. Yığma, silisyum ana malzemeler üzerine yapılmış, 2.10^{-6} Torr basınç, 40 mT manyetik alan ve 145 A'lık ark akımı kullanılmıştır. Film kalınlıkları ise 100-150 μm 'de tutulmuştur. Cheng analizlerinde, yığma basıncının artırılması ile yapının rastgele bir yönelmeden karışık (111) ve (220) tercihli yönelmesine geliştiğini, ana malzeme biasının artırılması ile (-100 V'luk bir değerde) (200) tercihli yönelmesinin karışık (111) ve (220) tercihli yönelmesine değiştiğini, ana malzeme biasının daha fazla artırılmasıyla yapının tekrar (200)'a dönüştüğünü, yığma sıcaklığının ise film yapısının gelişimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını tespit etmiştir. Ayrıca, TiN filmlerindeki yapının gelişimini etkileyen temel faktörlerin; iç gerilmeler ve yüzey pürüzlülüğü olduğunu ortaya koymuştur.

Film yapısında incelenmesi gereken bir başka konu TiN kaplamaların altın sarısı renkleridir, özellikle dekoratif amaçlı uygulamalarda altın kaplamaya alternatif olan bu özellik, maliyetinin düşük ve Abrasiv aşınma direncinin de yüksek olması ile belirgin bir avantaj sunar. TiN kaplamaların altın sarısı renkleri, dördüncü sütun geçiş metali mono nitürlerinin yansıtma spektrası özelliğinden kaynaklanır. Katodik ark buharlaştırma ile üretilen TiN ve ZrN ince filmlerinin renk değişimini, azot ile geçiş metalleri arasındaki atomik oran ve oksijen kirliliğine göre incelemişlerdir [15].

Filmlerin stokiyometrisi; azot gazı akış oranı, toplam basınç ve ark akımındaki değişiklikler ile değiştirilmiş ve film kalınlığı 0.5 μm 'de tutulmuştur. TiN ve ZrN filmlerinin yansıtma spektrası görünebilir spektrum bölgesinde ölçülmüş ve renkleri

L*a*b* renk sisteminde değerlendirilmiştir. Azotun geçiş metallerine atomik oranının artmasının altın tarzı renk yansıtıcılığının azalmasına ve sarılığın artmasına sebep olduğu, önemsenmeye değer bir renk değişimi olmaksızın stokiometri değişiminin TİN için ZrN'den daha büyük olduğu ve oksijen içeriğindeki değişimin azotunki ile aynı yönde renk değişimi ile sonuçlandığı tespit edilmiştir.

İnce film stokiometrisinin değişimi, serbest elektron konsantrasyonu değişimi ile sonuçlanır, bu da nitrürlerin yansıtıcılığını ve rengini etkiler. Geçiş metal atomlarının d yörüngelerindeki serbest elektronlar, geçiş metal nitrürlerini oluşturmak için azot atomlarına transfer olurlar. Azot atomlarının artması, bu nitrürlerdeki serbest elektronların azalmasına sebep olur. Bundan dolayı, daha az elektron gelen ışık ile etkileşir ve nitrür ince filmlerdeki yansıyan ışığı azaltır.

3.4.1 Taban Malzemesine Yapışma

Kaplama ve taban malzemesi arasındaki zayıf yapışma; kimyasal bağlanmanın düşük bir oranda olmasından, zayıf ara yüzey mekaniksel temasından, düşük kırılma tokluğundan veya yüksek iç gerilmelerden kaynaklanabilir. Bu özellikler kaplama prosesine bağlıdır ve bu yüzden de kaplama teknolojisinin geliştirilmesinde, yukarıda belirtilen özelliklerin en uygun kombinasyonunun elde edilebilmesi ve sonuçta da yüksek bir yapışmanın sağlanabilmesi için kaplama prosesinin optimize edilmesine odaklanılmıştır [24]. Kaplama ve taban malzemesi arasındaki yeterli yapışma, tribolojik ortamlarda kullanılan kaplamalar için en önemli ön koşul olarak kabul edilmektedir. Ara yüzey yapışması zayıf olduğunda, kaplamada erken hasarlar meydana gelebilir. Kaplamanın yapışma mukavemeti, kaplama ve taban malzemesi arasındaki kimyasal ve fiziksel etkileşimin derecesiyle ve ara yüzey bölgesinin mikro yapısıyla ilişkilidir.

Daha önce de bahsedildiği gibi, zayıf yapışmanın nedenleri; düşük seviyedeki kimyasal bağlanma, zayıf ara yüzey teması, düşük kırılma tokluğu ve yüksek iç gerilmeler olarak

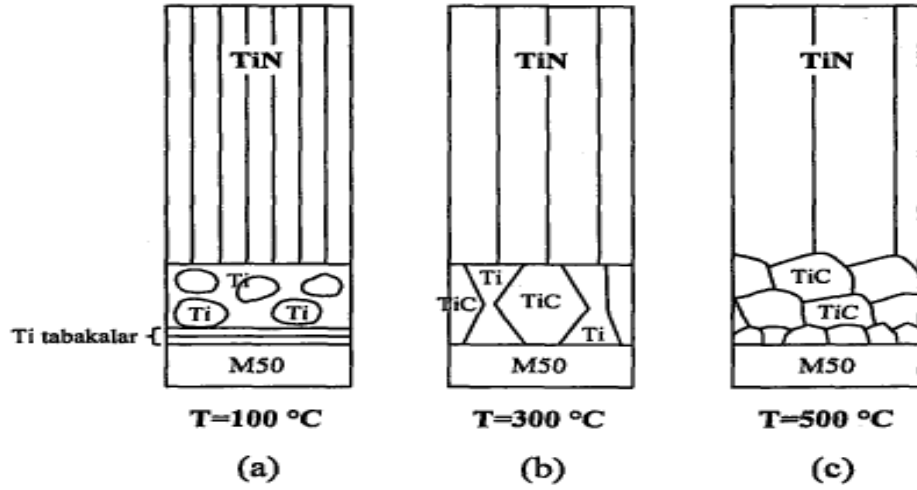
sayılabilir. Ara yüzey yapısı da, kaplamaların yapışma mukavemetinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahiptir [22].

Son yıllarda yapışmayla ilgili yapılan çalışmaların yoğunlaştığı bir nokta, TiN kaplama ve taban malzemesi ara yüzeyinde ince bir titanyum tabakası oluşturmanın faydaları üzerinedir. Bu şekilde, TiN kaplamaların yapışma mukavemetinde önemli gelişmeler sağlanmıştır. HSS taban malzemeler üzerine TiN kaplandığında, titanyum ara tabakası, seramik kaplama ve metalik taban malzemesi ara yüzeyinde ani bileşim değişimini önler ve bir geçiş katmanı oluşturarak ideal ara yüzey davranışı sergiler, ayrıca kaplamadan daha yumuşak olduğundan dolayı termal genleşme kat sayılarındaki farklılıktan kaynaklanan gerilmeleri de barındırır [22]. Fakat titanyum ara tabakasının kalınlığı için sınırlayıcı değerler vardır ve belirli bir kalınlığı geçmemelidir [24].

Bu şekildeki bir üretimde, PVD sistemine azot gazı verilmeden titanyum metali buharlaştırılır ve taban malzemesi üzerine yaklaşık 100 µm kalınlıkta biriktirildikten sonra, sisteme azot gazı verilir ve bu ince titanyum tabakasının üzerinde TiN'ün biriktirilmesi sağlanır. Biriktirme sırasındaki taban malzemesi sıcaklığı, yapışma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin 100 °C taban malzemesi sıcaklığında, titanyum ara tabakası oluşturularak kaplama yapıldığında, ara yüzey tabakası düşük atomik yoğunluğa ve boşluklara sahiptir. Bu sıcaklıkta hacim difüzyonu etkin değildir ve titanyum atomları, titanyumun yüksek yüzey difüzyon kabiliyetine bağlı olarak yüzey üzerinde yanal yönde yayınırlar ve tabakalar halinde büyümeye başlarlar.

Belli bir kalınlıktan sonra titanyum atomları tabaka oluşturamazlar ve birbirleriyle eş eksenli taneler oluşturacak şekilde gruplanırlar. Bu durum, Şekil 3.41a'da gösterilmektedir. Ara yüzeydeki boşluk miktarı fazla ve kimyasal bağ da zayıf olduğu için, yapışma mukavemeti düşüktür. Bir titanyum ara tabakası oluşturulmadığı durumda da, ara yüzeyde boşluklar ve benzer yüzey hataları fazla olduğu için, yapışma mukavemeti düşük olur [55].

500 °C'de, titanyum ara tabakası oluşturularak TiN kaplanması durumunda, hem yüzey hem de hacim difüzyon hızları yüksektir ve tanelerin çeşitli fazlar içinde büyümesi yüzey ve hacim difüzyonlarının kombine etkisiyle kontrol edilir. Titanyum ara tabakasının en önemli faydalarından biri, iç gerilmeleri azaltmasıdır. Kaplama işleminin ilk safhalarında titanyum atomları, çelik taban malzemesinden ara yüzeye difüze olan karbon atomlarıyla reaksiyona girerek, taban malzemesine komşu çok ince TiC taneleri oluşturur. (Şekil 3.41 c) [55].



Şekil 3.41. Çeşitli biriktirme sıcaklıklarında kaplama taban malzemesi ara yüzeyinin yapısı.

Taban malzemesi yüzeyinden uzaklaştıkça ve yeni TiC tabakası kalınlaştıkça, karbon atomlarının titanyum atomlarıyla birleşmeleri için daha uzun mesafe katetmeleri gerekir ve difüzyon zorlaşır. TiC tabakası belli bir kalınlığa eriştikten sonra, karbonun difüzyonu imkânsız hale gelir ve yüzeydeki TiC ile sistemdeki azot gazı reaksiyona girerek TiN'ü oluşturur. Ara yüzeyde TiC tabakası oluşumu, kuvvetli kimyasal bağlar sebebiyle yapışmayı arttırmaktadır. Ayrıca, titanyum ve karbon arasında meydana gelen kuvvetli kimyasal bağ, titanyum atomlarının yüzey hareketliliğini engelleyerek TiN tabakasının büyümesi için çok elverişli çekirdeklenme bölgeleri oluşturur. Buna ilave olarak, 500 °C taban malzemesi sıcaklığında kaplama yapıldığında, kaplama yapısındaki porozite düşüktür ve yoğun ve kolonsal bir film yapısı elde edilebilir. Fakat 500 °C gibi yüksek bir sıcaklıkta taban malzemesinin yumuşaması önemli bir

problemdir ve bu da yapışmayı azaltıcı bir etkiye sahiptir. Ayrıca, özellikle bir titanyum ara tabakası oluşturulmadığı durumlarda, yapıdaki ısıl iç gerilme miktarı yüksektir ve bu da yapışmayı azaltır [55].

Kaplama işlemi 300 °C taban malzemesi sıcaklığında yapıldığında, ara yüzey yine çok iyi özelliklere sahiptir (Şekil 3.41b). Ayrıca, taban malzemesinin yumuşaması probleminden de kaçınılmış olur. Yapıdaki iç gerilme miktarı oldukça düşüktür ve çok yüksek yapışma mukavemetleri elde edilebilir [22].

3.4.2 Sürtünme ve Aşınma Özellikleri

TiN kaplamalar düşük sürtünme katsayısı ve yüksek sertlik değerlerine sahiptirler ve yüksek aşınma direnci özelliğiyle karakterize edilirler. Çelik parçalarının Abrasiv aşınma direnci, yüzeye 4-6 µm kalınlığında bir TiN kaplama uygulanmasıyla önemli oranda artırılabilir. Aynı zamanda yüksek sertlik de, Abrasiv aşınma direncini geliştiren bir başka parametredir. İlk yüzey pürüzlülüğü aşınma direncini etkilediği için, daha düzgün yüzeyler daha az aşınma meydana getirir. Çok katlı titanyum ve titanyum nitrür tabakalarıyla daha pürüzsüz ve Abrasiv aşınma direnci yüksek daha sağlam filmler üretilebilir [55].

Kaplama / taban malzemesi sisteminin yük taşıma kapasitesi de önemlidir. Hafif Abrasiv aşınma durumunda, ince kaplamaların Abrasiv partiküller tarafından oluşturulan plastik oyukların kesişme noktalarında, filmin bölgesel olarak ayrılmasıyla hasara uğradığı tespit edilmiştir. Ayrıca, daha sağlam kaplamalar temas gerilmelerine elastik olarak dayanabilme kabiliyetine sahiptirler ve Şekil 3.42'de gösterildiği gibi altta bulunan taban malzemesinde çok az deformasyon meydana getirerek veya hiç getirmeyerek bir mikro yontulma veya parlatılma mekanizmasıyla inceliyorlar. Fakat daha mukavim TiN kaplamalarda, mikro yapısal etkilerle ilişkili olarak aşınma hızında farklılıklar gözlenmiştir. Bu durum, kaplama yoğunluğundaki bir azalmaya ve artan kalınlıkla büyüyen tane boyutuna dayandırılabilir.



- Şekil 3.42. Daha yumuşak taban malzemeleri üzerindeki sert kaplamalar için;
- İnce kaplamalarda taban malzemesinin elastik olarak deforme oluşu,
 - Sağlam kaplamalarda kaplamanın yükü taşıyarak deformasyonu önleyişi.

Şiddetli Abrasiv aşınma durumunda ise, sağlam kaplamalar genelde kohezif bir kırılma mekanizmasıyla hasara uğrarlar. Daha önce de belirtildiği gibi, TiN kaplamaların taban malzemesine yapışma mukavemeti ve aşınma direnci, titanyumun bir ara tabaka olarak uygulanması veya kaplama tozunun içine disperse edilmesiyle artırılabilir.

TiN kaplamaların Abrasiv aşınma direnci, kaplama yöntemine büyük ölçüde bağlıdır. Ark buharlaştırma gibi bazı teknikler, film içinde titanyum damlacıkları meydana getirirler. Düşük gerilmelerde metalik titanyumun varlığının iç gerilmeleri azaltma ve tokluğu iyileştirme gibi yararlı etkileri olabilir. Daha yüksek temas gerilmelerinde ise, Abrasiv partiküller tarafından metalik titanyum damlacıklarının kaplama içine nüfuz ettirilmesi Abrasiv aşınmayı artırır, rf diod sıçratma, DC magnetron sıçratma, vakum ark biriktirme ve iyon kaplama ile üretilen TiN kaplamaların Abrasiv aşınma dirençlerini karşılaştırılmış olup yüksek seviyelerde iyonizasyon verimliliği sağlayan proses karakteristikleri nedeniyle iyon kaplama yönteminin en üstün olduğu görülmüştür.

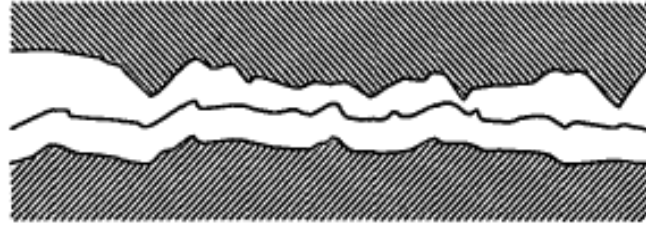
TiN kaplama ve çelik arasındaki kayma temaslarında, geometri, hız, yük ve yüzey pürüzlülüğü gibi temas parametrelerine bağlı olarak, temas mekanizmasında ve aşınma prosesinde farklılıklar meydana gelir. Fakat geniş bir aralıktaki temas koşulları için, aşınma prosesinde genel olarak dört farklı aşınma mekanizması bölgesi tanımlanabilir. Bu bölgeler Şekil 3.43'te gösterilmekte olup, şu şekilde sıralanabilir:

- Sürtünme ve aşınmanın artmasıyla; başlangıç aşınması,

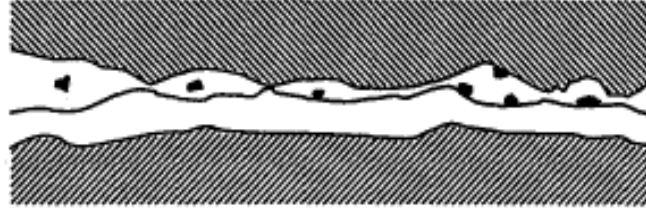
- Yüksek sürtünme ve aşınmayla; tabaka oluşumu,
- Düşük sürtünme ve aşınmayla; kararlı hal aşınması,
- Yüksek sürtünme ve aşınmayla; tabakanın parçalanması.

Başlangıç aşınması mekanizması, daha önce hiç temasta bulunmayan iki yüzey arasındaki ilk temas durumunda ortaya çıkar. Çelik ve TiN çikintıları arasındaki çarpışmalarda, çok küçük aşınma parçacıkları meydana gelir. TiN'den daha yumuşak olduğundan dolayı çelik yüzeyinde aşınma hızı daha yüksektir ve bu yüzden de aşınma ürünlerindeki demir miktarı fazladır. Aşınma parçaları, yamalar ve tabakalar oluşturarak öncelikle çelik yüzeyine yapışır.

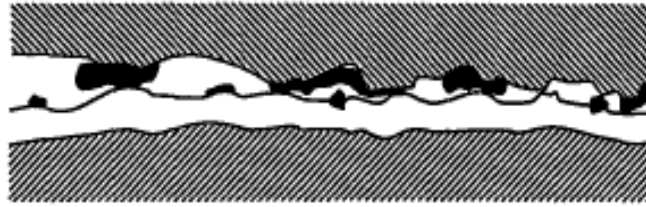
Transfer edilen malzeme temasta aktif durumdadır, yükün bir bölümünü taşır ve hem plastik deformasyona hem de deformasyon sertleşmesine uğrar. Yüzeyler daha pürüzlü hale gelir ve sürtünme katsayısı da devamlı olarak artar.



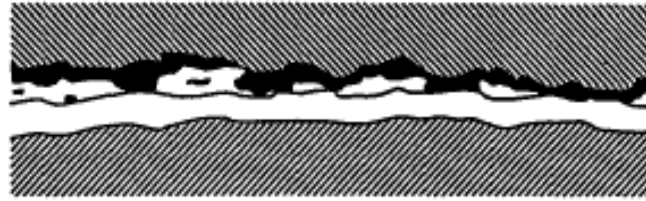
İlk yüzeyler



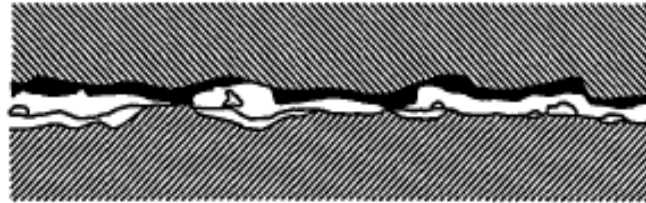
Başlangıç aşınması



Tabaka oluşumu



Kararlı hal aşınması



Tabakanın parçalanması

Şekil 3.43. TiN kaplanmış çeliğin çeliğe karşı kayması durumdaki tipik bir aşınma prosesinde görülen dört değişik aşınma bölgesinin şematik gösterimi.

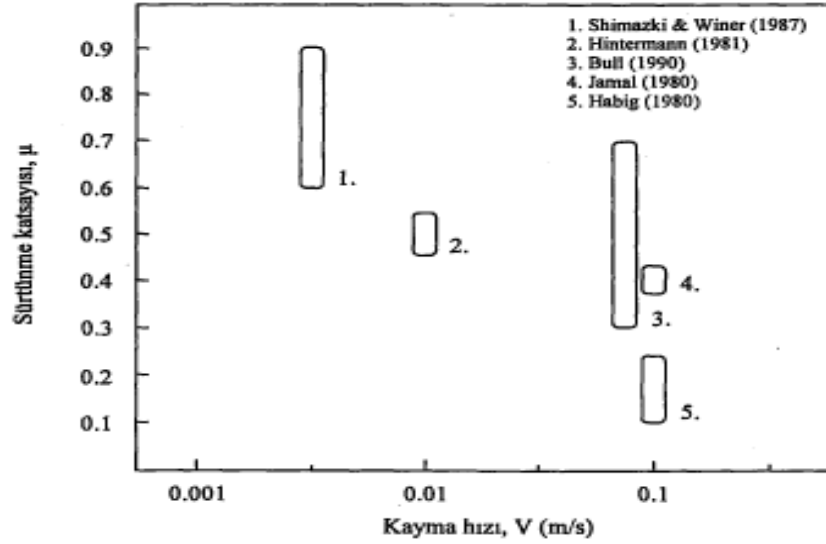
Tabaka oluşumu bölgesinde, çelik yüzeyinde, aglomerasyona uğramış malzemeli daha kararlı bir yüzey tabakası birikir. Temas sırasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısı, tabakanın ve yüzeylerin oksidasyonuna neden olur. Tabakalarda çatlaklar meydana gelir ve tabaka katmanları yüzeyler arasında hareket edebilir, yüzeye yeniden yapışabilir veya temastan uzak bir yere taşınabilir. Daha büyük malzeme katmanları yüzeyler arasında yuvarlanabilir veya sürüklenebilir ve Abrasiv aşınmaya neden olabilir. Bu aşamada, sürtünme katsayısı yüksek bir seviyededir ve düzensiz bir değişim içindedir. Aşınma da aynı şekilde yüksektir.

Kararlı hal aşınması, çelik yüzeyi üzerinde kararlı bir tabaka veya ince bir filmin oluştuğu üçüncü bölgeyi gösterir. Aynı zamanda TiN yüzeyi üzerinde de bazı aşınma ürünleri mevcut olabilir. Transfer edilen malzeme ağırlıklı olarak Fe_2O_3 ve düşük miktarlarda da TiO_2 içerir. Hem sürtünme katsayısı hem de aşınma, daha düşük ve kararlı değerlere düşer. Düşük sürtünme, ince oksit yüzey tabakasının çelik ve TiN arasındaki direkt yapışmayı önlemesi, büyük aşınma partiküllerinin bulunmaması ve düzgün hale gelen yüzeyler nedeniyle süpürme etkisinin önemsiz seviyede olmasından dolayıdır. Mevcut aşınma mekanizmaları; oksidatif aşınma ve delaminasyon aşınmasıdır, fakat aşınma hızı düşüktür. Tribolojik olarak iyi tasarlanmış temaslarda, kararlı hal aşınma bölgesi çok uzun sürer ve bu da parça için uzun bir kullanım ömrü anlamına gelir. Fakat aşınma düşük seviyede olmasına rağmen, TiN kaplama giderek incelik ve belli bir seviyeden sonra taban malzemesini aşınmadan koruyamaz hale gelir [55].

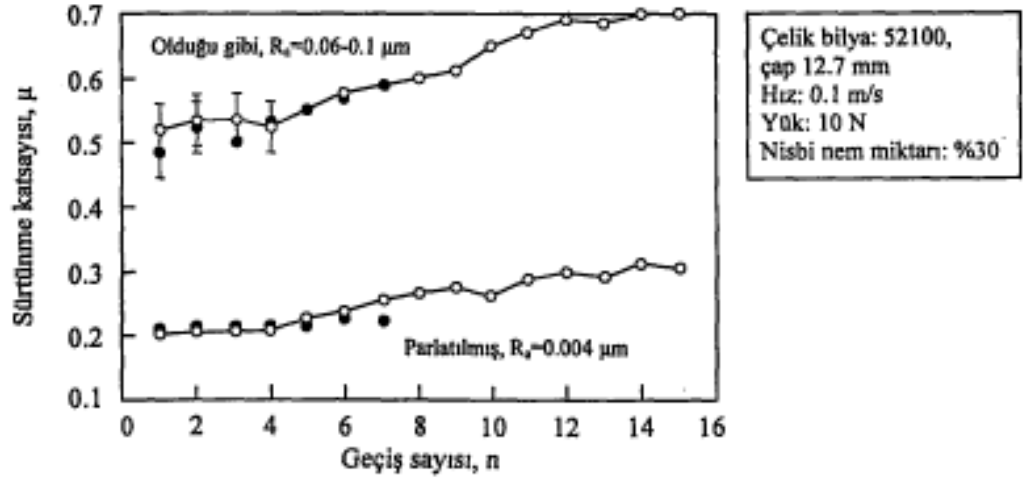
Tabakanın parçalanması bölgesinde, üç elemanlı Abrasiv aşınmaya neden olan daha büyük aşınma partikülleri meydana gelir ve ince TiN tabakasında kırılma ve yontulma gözlenir. İnce koruyucu oksit tabakaları parçalanır ve çelik yüzeyi ile TiN tabakası altında bulunan çelik taban malzemesi arasında doğrudan temas meydana gelir, bu da sürtünme ve aşınmayı artırır. Fakat TiN tabakasının tamamen aşınmasından sonra bile, sürtünme ve aşınmanın benzer çelik-çelik temaslarınınkinden daha düşük değerlerde kaldığına dair bazı gözlemler vardır.

Bu durum, büyük ihtimalle hala temasta bulunan TiN tabakası aşınma ürünlerinin yağlayıcı ve yapışmayı önleyici etkisinden kaynaklanır. TiN ve çelik arasındaki kayma temaslarında kararlı hal sürtünme katsayısı, çelik-çelik temaslarında görülen 0.6 seviyesindeki sürtünme katsayısı değeriyle yaklaşık olarak aynıdır, hatta bazen daha da yüksek olabilir. Öte yandan, benzer temas şartlarında ve yüksek hızlarda, 0.17 seviyesine kadar düşük sürtünme katsayısı değerleri de elde edilmiştir.

Şekil 3.44'te, daha önce yapılmış çeşitli deneylerden değişik kayma hızları için elde edilen sürtünme katsayısı değerleri gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, yüksek kayma hızı, düşük sürtünme katsayısı değerleri vermektedir. Fakat yük, temas geometrisi, malzeme ve ortamdaki değişikliklerden kaynaklanan bir dağılım durumu söz konusudur. Örneğin, 0.2 m/s'nin üzerindeki hızlarda bile, 1.15 gibi oldukça yüksek sürtünme katsayısı değerleri gözlemlenmiştir. Şekil 3.45'te ise yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.44. TiN kaplama ve çelik arasındaki kayma temaslarında değişik kayma hızları için elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.

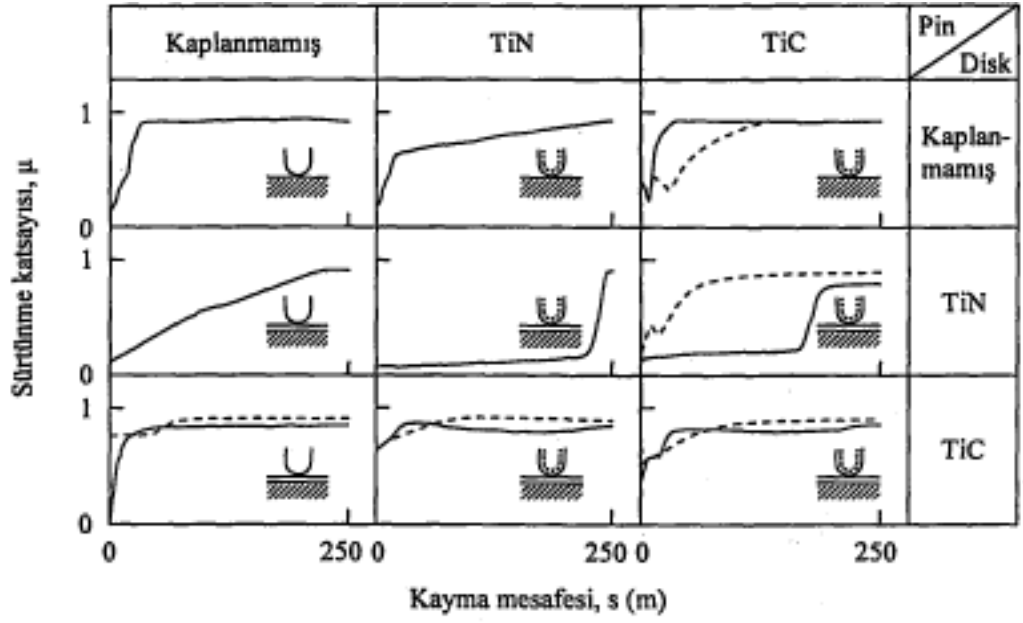


Şekil 3.45. TiN kaplanmış M2 takım çeliği üzerinde kayan sertleştirilmiş bir çelik bilyanın geçiş sayısının fonksiyonu olarak sürtünme katsayısının değişimi.

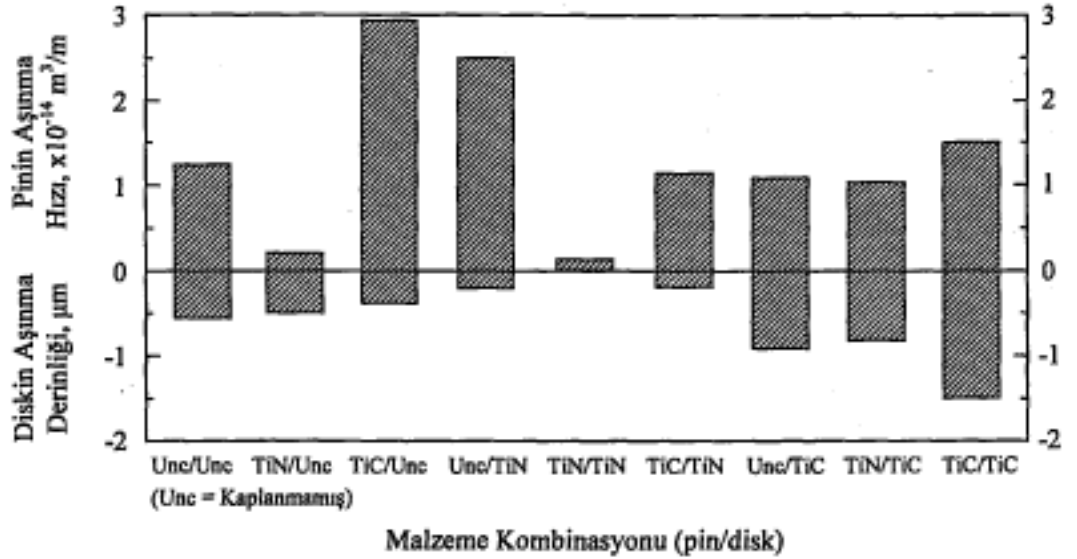
Magnetron sıçratma ile TiN kaplanmış, $R_a=0.06-0.1 \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğüne sahip bir takım çeliği üzerinde kayan sertleştirilmiş bir çelik bilye için, sürtünme katsayısı değerleri 0.5-0.7 aralığı içinde bulunmuştur. TiN kaplama, $R_a=0.004 \mu\text{m}$ 'ye parlatıldığı zaman, malzeme transferi azalmış ve ilk sürtünme katsayısı aralığı 0.15-0.2'ye kadar düşmüştür (Şekil 3.45.). Sürtünme ve aşınma özellikleri ayrıca, yüzeylerden hangisinin kaplandığına da bağlıdır. Sürtünmenin, disk-disk cihazında bulunan pindeki gibi devamlı bir temas durumunda ve yüzeyde bulunan her noktanın çevrim basma sadece bir kere temasta bulunduğu dönmenin ya da karşılıklı yer değiştirmenin olduğu bir durumda değişiklik göstereceği açıktır. Şekil 3.46'da triod iyon kaplama ile üretilen TiN ve TiC kaplamaların sürtünme ve aşınma karakteristikleri gösterilmektedir. Bu deneyler, bir pin-on-disc cihazında, kuru şartlar altında, kaplanmış ve kaplanmamış pin ve disklerin çeşitli kombinasyonları için yapılmıştır. Sürtünme katsayısı ve aşınma hızı, yüzeylerin yanı sıra pin ve diskin her ikisinin de TiN ile kaplanması durumunda en düşük seviyededir (sürtünme katsayısı; 0.1). Büyük yükler altında, film kalınlığının sürtünme katsayısı üzerinde herhangi bir etkisi yoktur, fakat düşük yüklerde film kalınlığıyla sürtünmenin arttığı gözlenmiştir [24].

Katodik ark metoduyla yüksek hız çeliği ana malzemeler üzerinde üretilen TiN kaplamaların, kuru kayma koşullarındaki aşınma davranışlarını, karşı malzeme olarak Cr çeliğinin kullanıldığı ball-on-disc deneyi ile incelemişlerdir [17]. Deneylerde 9.8-88.2 N aralığındaki yükler ile 0.12-0.62 m/s aralığındaki hız değerlerini değişken parametreler olarak kullanmışlar, kayma mesafesini 600 m'de sabit tutmuşlardır. He ve arkadaşları, yükün artmasıyla numunelerdeki ağırlık kaybının da lineer bir şekilde arttığını tespit etmişlerdir. Her yük değerinde karşı malzemedeki kaplama yüzeyine malzeme transferinin meydana geldiğini, artan yüklerle birlikte sürtünme katsayısında kuvvetli bir değişim gözlenmemekle birlikte, geniş temas alanından dolayı yüksek yüklerde sürtünme katsayısının biraz arttığını belirlemişlerdir.

Kayma hızının artmasıyla aşınma kaybının arttığını, yüksek hızlarda meydana gelen sürtünme ısısının oluşturduğu oksidasyonun ise sürtünme katsayısını azalttığını tespit etmişlerdir.



(a)



(b)

Şekil 3.46. İyon kaplama ile TiN ve TiC kaplanmış ve kaplanmamış çelik pin ve disklerle yapılan Disk-Disk deneylerinden elde edilen; a) Sürtünme katsayısı eğrileri, b) Pin ve diskin aşınma miktarları ($F=5 \text{ N}$, $V=0.2 \text{ m/s}$).

Transfer edilen malzeme, parlamanın sebep olduğu kaplama kaybından daha fazla olduğu için bu yükte kütle artışı meydana gelmiştir. 2. 50-100 N yük aralığında kaplamada meydana gelen parlamanın arttığını ve ana malzemenin ortaya çıkmaya başladığını tespit etmişlerdir. Aşınma ürünleri de aynı bileşime sahiptir. Bu rejimde TiN kaplamadaki ve pindeki aşınma oranları, yükte birlikte lineer bir artışın olduğunu göstermiştir. Kararlı hal sürtünme katsayısı ise yükte birlikte azalmıştır. 3. 150-250 N yük aralığında ise plastik deformasyonun meydana geldiğini ve TiN tabakası aşınmasının hızlandığını tespit etmişlerdir.

4. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Giriş

Özel alaşımli sıcak iş takım çeliği (HOTVAR) malzemesinden hazırlanan deney numuneleri, PVD kaplama yöntemi ile TiN kaplanmış ve aşınma davranışları PLINT marka sürtünme ve aşınma deney cihazında disk-disk sistemine uyarlanmış aşınma test cihazında yapılmıştır. Deneylerde kaplanmış ve kaplanmamış numuneler kullanılarak ve farklı aşınma deney şartlarında testler gerçekleştirilmiştir.

4.2. Deney Malzemesi

HOTVAR özel alaşımli çeliği, sıcak aşınma ve plastik deformasyonun (çökme/ezilme/şişme) gözlendiği her türlü sıcak iş uygulamasına çözüm olabilen bir takım çeliğidir. Özellikle 650 °C'ye kadar olan uygulamalarda kullanılmaktadır. Sıcak dövme, orta dövme kalıpları, sıcak şişirme kalıpları, sıcak ezme, sıcak kalibrasyon ve doğrultma alüminyum ekstrüzyon kalıp ve takımları, sıcak zımbalamada kullanılır.

HOTVAR özel alaşımli çeliği; çok yüksek sertlik, yüksek mukavemet, sıcak aşınma direnci, yüksek meneviş direnci, yüksek tokluk ve süneklik, yüksek ısıl yorulma direnci, çok iyi ısıl iletkenlik, yüzey işlemlerine uygunluk, yüksek sıcaklık özelliklerine sahiptir. HOTVAR çeliğinin mekanik özellikleri Tablo 4.1'de, fiziksel özellikleri Tablo 4.2'de, elementel analiz değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.1. HOTVAR özel alaşımlı çeliğinin mekanik özellikleri.

SERTLİK(HRc)	AKMA DAYANIMI(MPa)	ÇEKME DAYANIMI(MPa)
54	1800	2100
56	1820	2200
58	1850	2300

Tablo 4.2. HOTVAR özel alaşımlı çeliğinin fiziksel özellikleri.

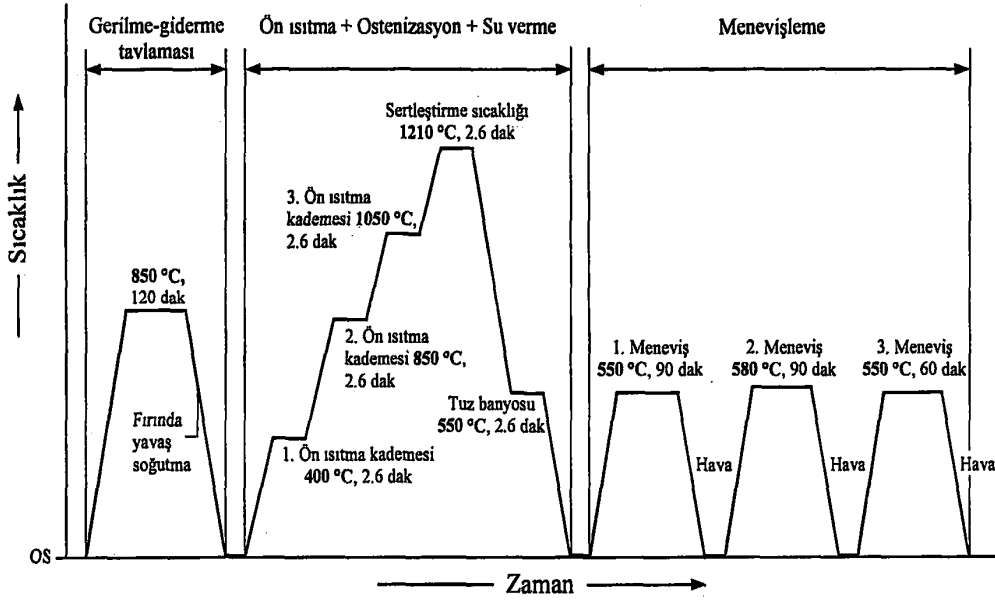
Sıcaklık (°C)	20	400	800
Yoğunluk (g/cm ³)	7.8	7.77	7.6
Isıl Genleşme Katsayısı	-	12.6x10 ⁻⁶	13.2x10 ⁻⁶
Isıl İletkenlik (W/m °C)	31	33	33
Elastiklik Modülü (MPa)	2.1x10 ⁵	1.8x10 ⁵	1.4x10 ⁵

Tablo 4.3. HOTVAR özel alaşımlı çeliğinin elementel analizi.

ISO/DIN	AISI	Sertlik (HB)	C	Si	Mn	Cr	Mo	S
Patent	Patent	210	0.55	1.00	0.75	2.60	2.25	0.85

4.3. Isıl İşlem Aşamaları

Numunelerin ısıl işlemi özel alaşımlı HOTVAR çeliği için kullanılan ısıl işlem aşamaları Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.2’de özel tasarlanmış sırt kısımları % 2 koniklik verilmiş numuneler verilmiştir.

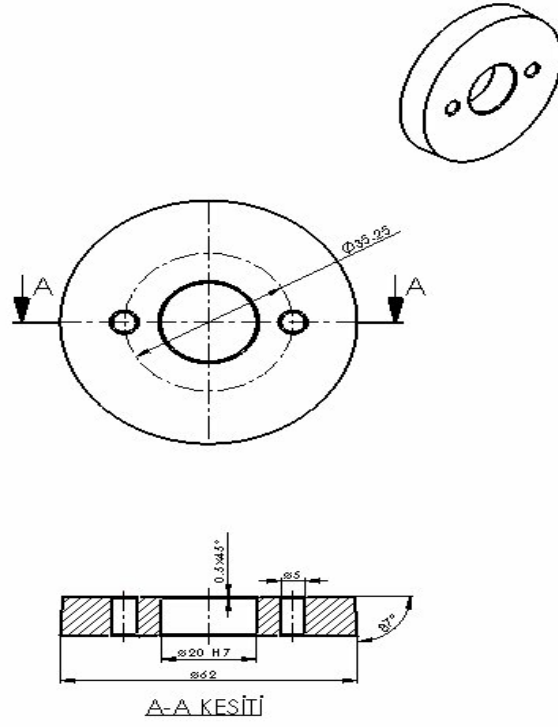


Şekil 4.1. Sıcak iş takım çeliklerinin ısıl işlem aşamaları.

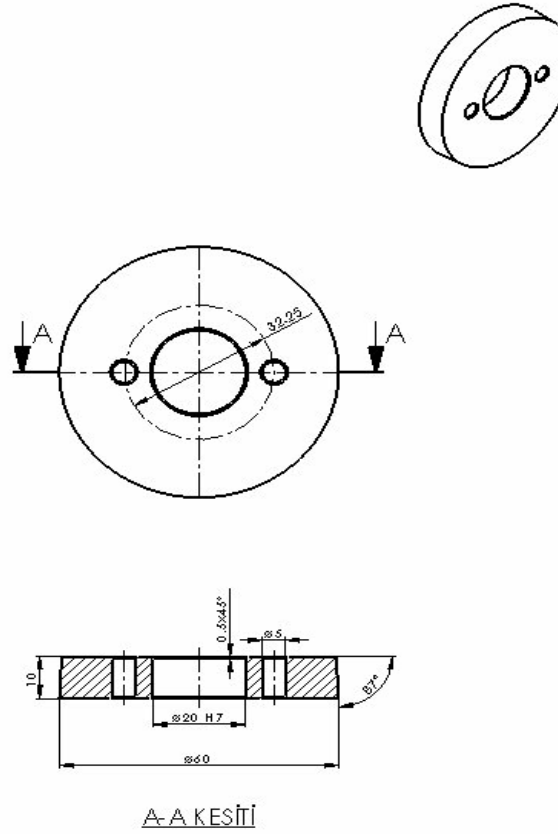
4.4 TiN Kaplama İşlemi

Isıl işlemden sonra numunelerin yüzeyleri 1200 numaralı zımpara ile parlatılmış ve kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan numunelerin bir kısmı BARLOK METAL VE YÜZEY İŞLEM SAN. TİC. LTD. ŞTİ. firması tarafından, PVD- Katodik ark metodu ile TiN kaplanmıştır. Kaplama işlemi sadece disk şeklindeki numunelerin sırt yüzeylerine uygulanmıştır.

Kaplama Puls Bias güç kaynağına sahip AOA 4/500 PVD kaplama ünitesinde gerçekleştirilmiş olup, ünite 4 target, 4 gaz girişi mevcuttur ve etkin kaplama alanı 600x800 mm’dir. Kaplama parametreleri Tablo 4.4’te verilmiştir.



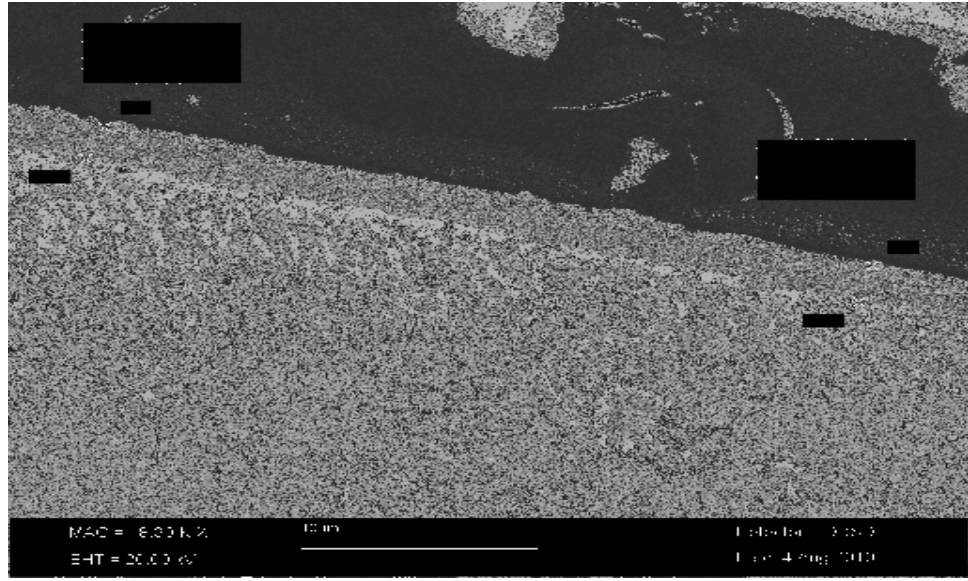
a)



b)

Şekil 4.2. Aşınan (a) ve aşındıran (b) deney numunelerinin geometrisi.

Kaplanacak deney numuneleri infrared ısıtma ile 350 °C' ye ısıtılıp ardından glow discharge yöntemi ile ısıtma ve temizlik işlemine tabi tutulmuştur. Toplam 60 dakika süren glow aşamasından sonra basınç 10^{-5} mbar'a çekilip bombardıman aşamasına geçilmiştir. 2.5 dakika sonra kaplamaya geçilmiştir ve kaplama sırasında basınç: 2.2×10^{-2} mbar'a düşürülmüştür. Kaplama sırasında azot gazı kullanılmış ve TiN tabakası oluşturulmuştur. Şekil 4.3'de kaplama kalınlığı görülmektedir. Resimde de görüldüğü gibi TiN Nitrür tabaka kalınlığı ortalama 1.89 μm değerindedir. TiN kaplama şartları Tablo 4.4'de verilmektedir.



Şekil 4.3. TiN kaplı numunenin SEM görüntüsü.

Tablo 4.4. TiN kaplama parametreleri.

Akor Boşalım
(Glow discharge)

Süre(dk)	Bias		
5		280	Puls
5		320	Puls
15		350	Puls
35		280	Puls

Bombardıman

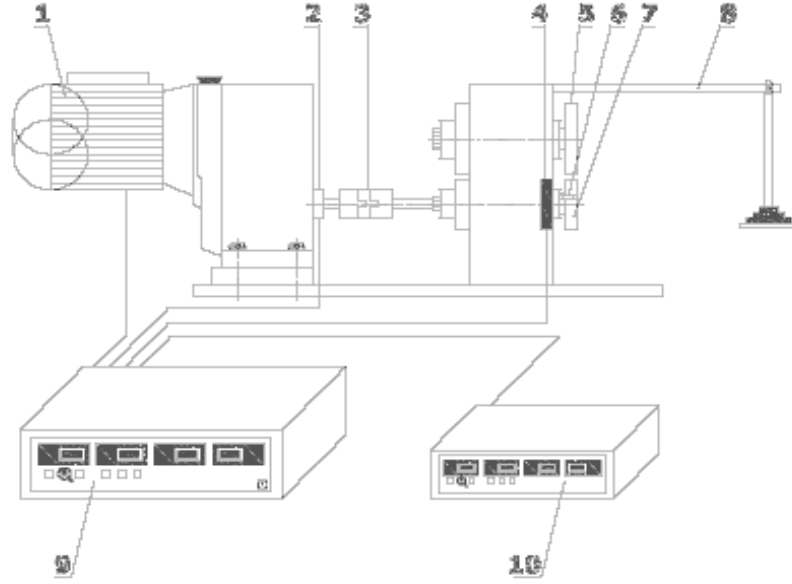
Süre	Bias		
Süre(sn)	Voltaj		Katot Akımı (Amper)
30	600	Puls	60
30	800	DC	60
30	850	DC	60
30	850	DC	60
30	850	DC	60

Kaplama

Süre(dk)	Bias Voltajı	Puls	Gaz Azot (sscm)	Katot Akımları (Amper)
0-2	600	DC	70	65
2-5	400	DC	70	65
5-10	250	DC	70	65
10-30	100	DC	70	65
30-60	100	DC	70	60

4.5. Deney Düzeneği

Deney düzeneği şematik olarak Şekil 4.4.'de verilmiş olup, Plint marka "TE 53 SLIM çok amaçlı sürtünme aşınma test cihazı" disk-disk sisteminde kullanılmıştır. Şekil 4.4'de disk-disk sistemi ve temel yapı elemanlarının şematik gösterimi; 1.Motor, 2.Takometre, 3.Kavrama, 4.Kuvvet Ölçer, 5.Aşındırma elemanı, 6.Numune tutucu, 7.Aşınan eleman, 8.Ağırlık askısı, 9.Kontrol ünitesi, 10.Grafik çizici.



Şekil 4.4. Deney düzeneği.

Deney düzeneğinin çalışma prensibi; birbirine paralel iki milden alınan tahrikle meydana getirilen izafi kayma hızlarında yüzeylerin aşındırılması esasına göre çalışır. Altındaki mil motora bağlı iken, üstteki mil bir dişli mekanizması yardımıyla altındaki milden hareket alır. Farklı çaplardaki dişliler kullanılarak temas yüzeyleri arasındaki kayma hızı ayarlanabilir. Deneylerde kullanılan aşındırıcı (TiN kaplı) ve aşınan numunelerin görünümü Resim 1. ve Resim 2’de verilmiştir.



Resim 1. Aşındırıcı (TiN kaplı) disk.



Resim 2. Aşınan disk.



Resim 3. Kuru koşulda aşınan diskler.



Resim 4. Aşınma deney düzeneğinin kuru koşullardaki genel görünümü.

Abrasiv takviyeli yağlı koşulların gerçekleştirildiği test düzeneği Resim 5.a. ve 5.b’de verilmiştir.



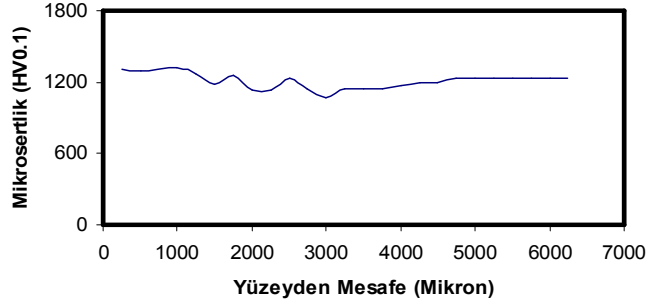
Resim 5. a) Abrasiv takviyeli yağlı koşullardaki deney düzeneği.



Resim 5. b) Abrasiv takviyeli yağlı koşullardaki deney düzeneği.

4.6. Metalografik Numune Hazırlama ve İnceleme

TiN kaplanmış özel alaşımlı HOTVAR çeliğinin sertlik taraması Struers marka Duramin5 model Mikro Sertlik Ölçüm Cihazında 200 gr yük altında değişen mesafelerde ölçümler yapılarak sertlik ölçümü yapılmıştır. Isıl işlem görmüş HOTVAR çeliğinin sertlik değerleri Şekil 4.5'deki grafikte görüldüğü gibi 900-1200 HV0.1 değerleri arasında değişmektedir.



Şekil 4.5. TiN kaplanmış HOTVAR çeliğinin mikro sertlik değerleri.

4.7 Deneysel Çalışma

Tablo 4.5. Deney sistematığı.

Kayma Oranı %	KURU KOŞULLAR				ABRASİV TAKVİYELİ YAĞLI KOŞULLAR				Kayma Oranı %	
	Numune No	F (N)	t (min)	N (d/d)	Numune No	F (N)	t (min)	n (d/d)		
1.79	K1	100	15	500	K18	100	15	500	1.79	
	K2	125	15	500	K19	125	15	500		
	K3	150	15	500	K20	150	15	500		
	K4	175	15	500	K21	175	15	500		
	K5	100	15	600	K22	100	15	600		
	K6	100	15	700	K23	100	15	700		
	K7	100	15	800	K24	100	15	800		
	K8	100	15	900	K25	100	15	900		
	K9	125	15	214	K26	125	15	214		
	K10	125	15	357	K27	125	15	357		
	K11	125	15	500	K28	125	15	500		
	K12	125	15	624	K29	125	15	624		
	K13	125	15	600	K30	125	15	600		
5.13	K14	125	15	600	K31	125	15	700	1.79	
22.22	K15	125	15	600	K32	125	15	800		
18.18	K16	125	15	600	K33	125	15	900		
8.7	K17	125	15	600	K34	100	15	900		
					K35	125	15	800		
					K36	80	15	700		
					K37	125	15	600		5.13
					K38	125	15	600		22.22
					K39	125	15	600		18.18
					K40	125	15	600		8.7

Disk-disk aşınma deneylerinde 40 adet TiN kaplı ve 40 adet sertleştirilmiş TiN kaplanmamış numune kullanılarak 40 adet deney yapılmıştır. Burada kaplanmış numuneler aşındırma elemanı olarak sertleştirilmiş numuneler ise aşınan eleman olarak kullanılmıştır. Her deney için ayrı bir aşındırma elemanı kullanılarak, yüzeyin bozulmasından kaynaklanabilecek hatalar ortadan kaldırılmıştır.

Deneyler genel halde iki farklı deney şartlarında tasarlanmıştır. Bunlar kuru ve abrasiv takviyeli yağlı şartlardır. Bu her bir gruba ait aşınma deneyleri ise değişen yük, devir sayıları ve kayma oranlarında yapılmıştır. Deneylerde kullanılan parametreler Tablo 4.5.'de toplu halde verilmiştir.

Aşınma deneyi öncesi her bir numune ve aşındırma elemanı alkolle temizlenip, test numunelerinin deney öncesi ve sonrasında ağırlık kayıpları ile yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür.

Aşınma miktarı ağırlık kaybına göre belirlendiğinden deneyden önce ve sonra numuneler temizlenmiş 0.1 mg hassasiyetle tartılarak aşınma kayıpları hesaplanmıştır. Sürtünme kuvvetinin kayma mesafesine bağlı değişimi, kuvvet sensörü yardımıyla aşınma test cihazından saniyede bir kaydedilen dataların, datalogger (veri kaydedici) ile toplanması yapıp deney süresi boyunca, X: Kayma Yolu (m), Y: Sürtünme Kuvveti (N) koordinatlarında değişim eğrileri bilgisayara aktarılmıştır.

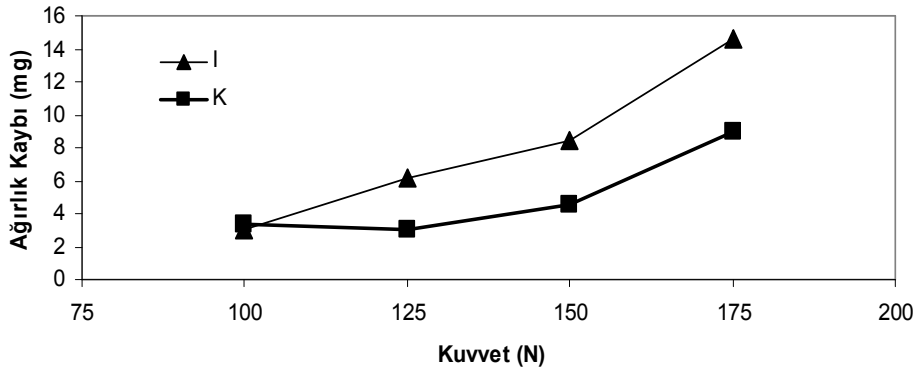
Abrasiv takviyeli yağlı şartlardaki aşınma deneyleri, 0.57 ve 0.75 mesh arasındaki silis kumu katılarak 0.2 litre/dk. debiye karşılık gelen damlacık yağlama tekniği ile (150 ml, 125 g), %95 Shell Premium Hydraulic Tellus 37 marka yağ ile %5 (6.578 g) abrasiv karışımı sürtünme bölgesine özel tasarlanmış metalik orifiz (silindirik ağız) vasıtası ile akıtılarak yapılmıştır.

4.8 Kuru Şartlarda HOTVAR Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

4.8.1 Yüke Bağlı Olarak Ağırlık Kaybı Değişimi

Bu bölümdeki deneylerde devir sayısı ve zaman sabit tutularak, değişken yükler altında oda sıcaklığındaki aşınma davranışları incelenmiştir. Uygulanan yükler ise 100, 125, 150, 175 N olarak seçilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında ölçülen ağırlık kayıpları EK-

1 deneysel çalışma sistematğinde verilmiştir. Uygulanan yük arttıkça yalnız ısıl işlem görmüş numunelerin TiN kaplamalı numunelere göre daha fazla ağırlık kaybı olduğu Şekil 4.6’ da görülmektedir. Gerçekte her iki malzemenin sertlik değerleri aynı olmasına rağmen kaplama sonrasında aşındırıcı görevi yapan malzemenin sertlik değerlerinin yüksek olması neticesinde aşınma miktarları daha düşüktür. Başlangıçta her iki malzemenin ağırlık kayıpları birbirine yakın iken 125 N’luk yük değerinden sonra ağırlık kayıplarında artışlar gözlenmektedir. Şekil 4.6’dan da görüldüğü gibi kaplanmamış malzemedeki kayıplar 14 mg üzerine kadar çıkmıştır.



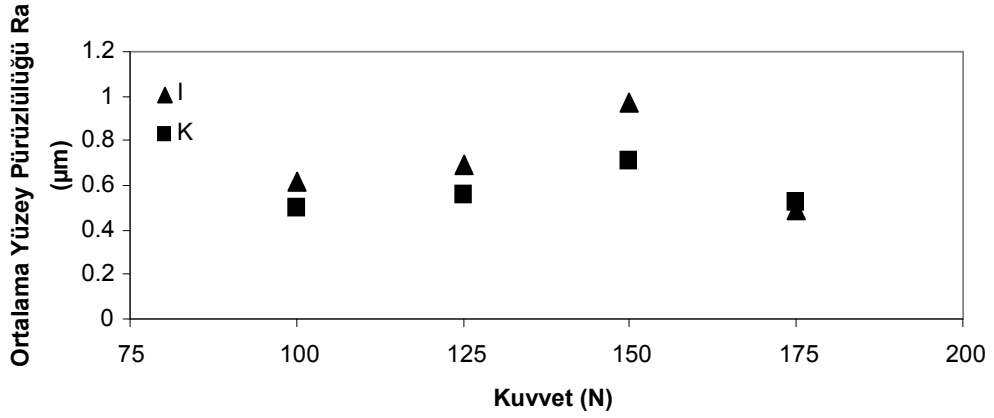
I: Isıl işlem görmüş numune

K: TiN kaplı numune

Şekil 4.6. Ağırlık kaybının uygulanan kuvvete göre değişimi (kuru koşullar).

4.8.2 Yüke Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğünün Değişimi

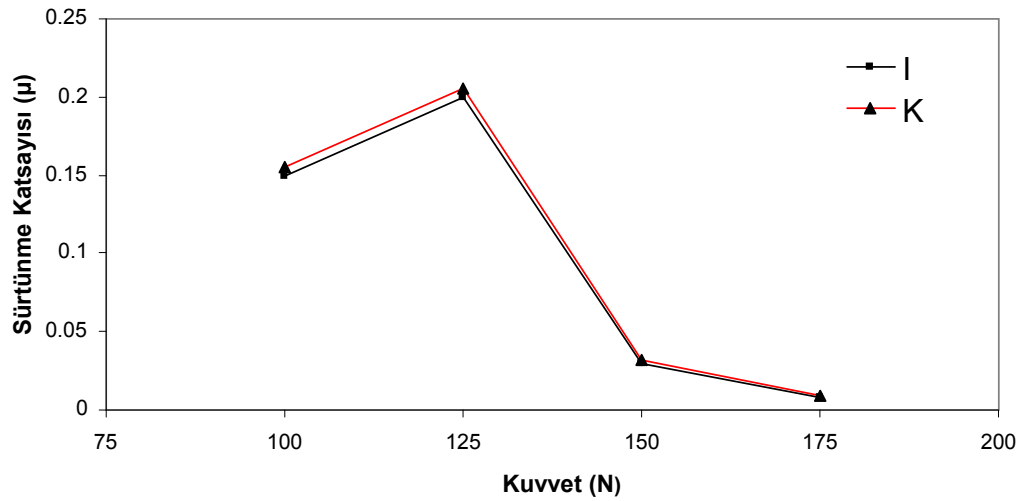
Aşınma sonrası aynı numuneler üzerinde ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri profilometre yardımıyla ölçülmüştür. Başlangıç yük değerlerinde Ra değerleri birbirine yakın iken 125 N’luk yük değerinden sonra kısmi artışların olduğu görülmüştür (Şekil 4.7). Ancak 175 N’luk yük değerinde ise Ra değerleri hem birbirlerine yakın ve hem de düşüşler göstermişlerdir. Ra değerlerinin bu noktada düşüş göstermesine aşındırıcı elemanın TiN tabakasının yüzeyinden aşınıp tükenmesi ve sonrasında ise her iki elemanın aynı özelliğe sahip iki eleman gibi sürtünmeli halde çalışmaya devam etmeleri gösterilebilir. Bir diğer sebepte daha önceden oluşmuş olan aşınma kanallarının artan yüklerle birlikte tekrar plastik deformasyona uğrayarak düzleşme özelliği göstermeleri de olabilir.



Şekil 4.7. Uygulanan kuvvete göre yüzey pürüzlülüğünün değişimi (kuru koşullar).

4.8.3 Yüke Bağlı Olarak Sürtünme Katsayısının Değişimi

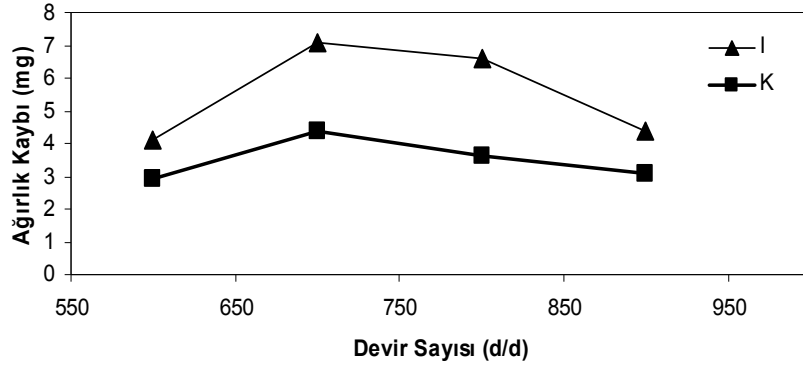
PicoScope bilgisayar programı ve datalogger cihazı kullanılarak deneylere ait sürtünme grafikleri çıkartılmıştır. Bu grafikler üzerinden ortalama sürtünme kuvveti alınıp daha sonra μ katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan μ sürtünme katsayılarından yararlanılarak Şekil 4.8.'de görülen grafik elde edilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi μ değerleri birbirine yakın ölçekte çıkmıştır. Ra değerlerinde olduğu 175 N'luk yük değerlerinde her iki numunenin de μ değerleri aynı ve en düşük değerde çıkmıştır.



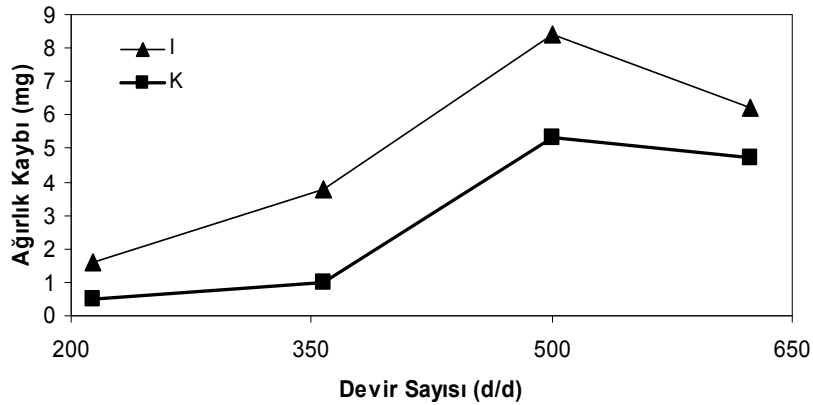
Şekil 4.8. Sürtünme katsayısının uygulanan kuvvete göre değişimi (kuru koşullar).

4.8.4 Ağırlık Kaybının Uygulanan Devire Göre Değişimi

Bu bölümdeki deneylerde zaman ve kuvvet sabit tutularak değişen devir sayılarında HOTVAR çeliğinin aşınma davranışı incelenmiştir. Deney sonucunda 100 N yükte (Şekil 4.9.a.) 600-700 d/d arasında her iki malzemede de ağırlık kaybının arttığı görülmüş ancak 700 d/d'dan sonra ağırlık kaybının artması beklenirken 900 d/d'ya kadar azalma görülmüştür, 125 N yükte ise (Şekil 4.9.b.) 200-350 d/d arasında her iki malzemede de ağırlık kaybındaki artış az olurken 350-500 d/d arasında bu artışın daha fazla olduğu görülmüştür.



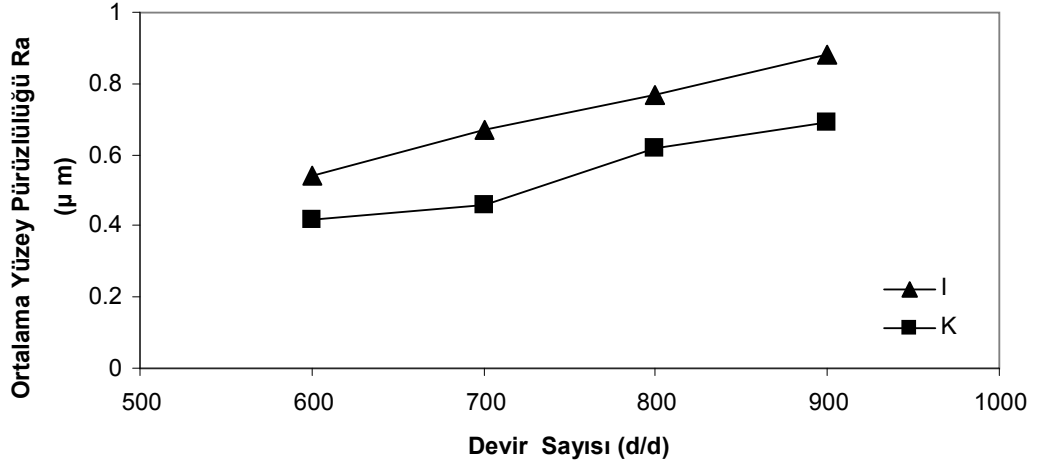
Şekil 4.9. a. Ağırlık kaybının uygulanan devire göre değişimi (F=100 N kuru koşullar).



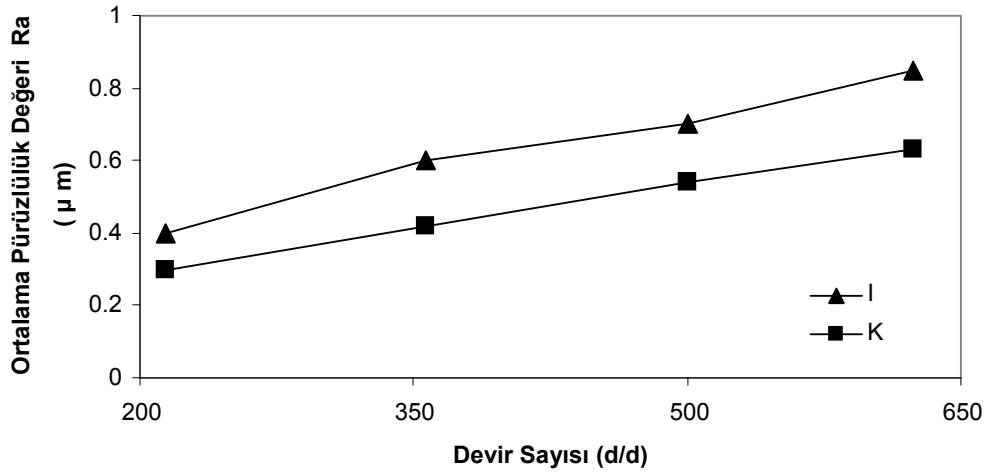
Şekil 4.9. b. Ağırlık kaybının uygulanan devire göre değişimi (F=125 N kuru koşullar).

4.8.5 Yüzey Pürüzlülüğünün Uygulanan Devire Göre Değişimi

100 ve 125 N sabit yükte arttırılan devir ile birlikte her iki numunede de ortalama yüzey pürüzlülüğünün artan devir sayısı ile birlikte arttığı Şekil 4.10. a. ve Şekil 4.10. b.'de görülmektedir.



Şekil 4.10.a. Yüzey pürüzlülüğünün uygulanan devire göre değişimi (F=100 N kuru koşullar).

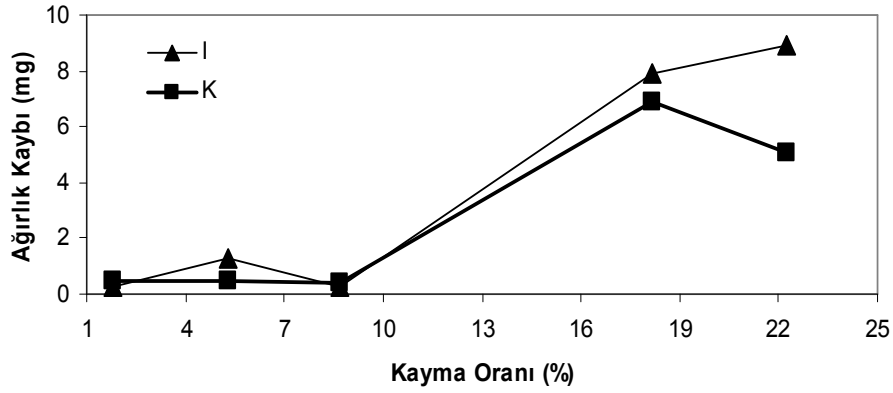


Şekil 4.10.b. Yüzey pürüzlülüğünün uygulanan devire göre değişimi (F=125 N kuru koşullar).

4.8.6 Ağırlık Kaybının Uygulanan Kayma Oranına Göre Değişimi

Deneysel esnasında $F=100$ N, $t=15$ dk, $n=600$ d/d sabit değerlerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.11). Ağırlık kaybının kayma oranlarına göre değişimini incelemek amacıyla %1.79 ile %22 arasında değişen kayma oranlarında aşınma testleri yapılmıştır. Kayma oranı değerlerini tahrik eden ve edilen dişlilerin sayısından gidilerek hesaplanmaktadır çünkü farklı diş sayılarından dolayı aşınan elemanın devir sayısı da doğal olarak değişmektedir. Şekil 4.11'de görüldüğü gibi başlangıç aşınma kaybı değerleri birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.

Ancak dördüncü kayma oranından itibaren aşınan elemanda kayıplarda artış görülürken aşındırıcı (kaplanmış) elemandaki aşınma kaybında düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise yüzey incelemelerinde kaplama tabakasının aşınan yüzeylerde tamamen kaybolmasından kaynaklandığı görülmüştür.



Şekil 4.11. Ağırlık kaybının kayma oranına göre değişimi (kuru koşullar).

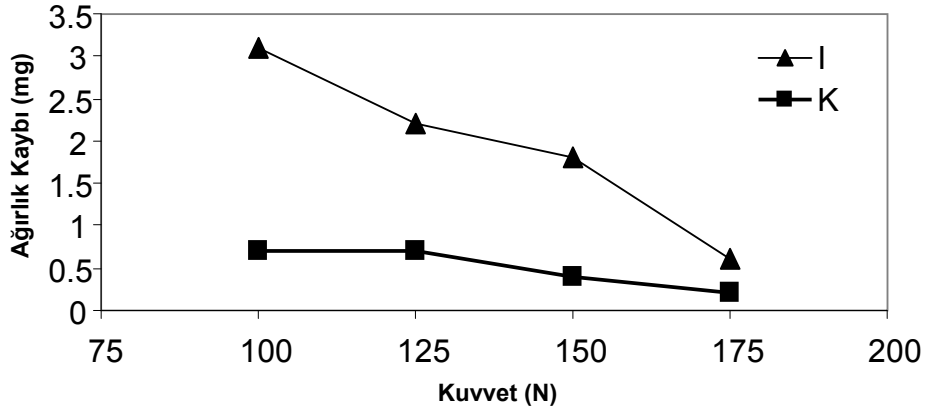
4.9 Abrasiv Takviyeli Yağlı Şartlarda HOTVAR Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

İkinci grup deneyler ise abrasiv takviyeli şartlar altında yapılmıştır. Bu grup deneylerde de değişken parametreler olarak yük, devir sayısı ve kayma oranları kullanılmıştır. Kuru şartlarda elde edilen değerlerde de mukayese etmek amacıyla aynı değişken parametreler kullanılmıştır.

4.9.1 Yüke Bağlı Olarak Ağırlık Kaybının Değişimi

Testler esnasında deney süresi ve devir sayısı sabit tutulmuştur. Yine yük değerleri olarak da 100, 125, 150 ve 175 N seçilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında ağırlık kayıp değerleri EK-1’de verilmiştir. Yüke bağlı ağırlık kaybı değişimi Şekil 4.12’de gösterilmektedir. TiN kaplı numunelerdeki (aşındırıcı) aşınma değişimi 0.6 mg – 0.3 mg (başlangıç ve bitiş) arasında iken sertleştirilmiş (aşındırılan) numunedeki değişimi ise 3.1 mg – 0.6 mg (başlangıç ve bitiş) arasında olduğu görülmektedir. Aşınma miktarlarındaki bu hissedilir fark hem TiN kaplamadan ve hem de abrasiv takviyeli yağlı ortamdan kaynaklanmaktadır.

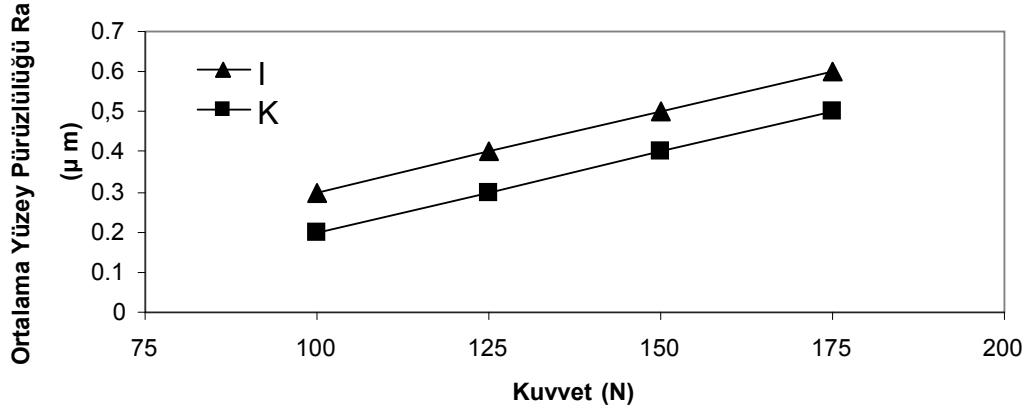
Ancak abrasivlerinde etkisiyle aşındırıcı yüzeyindeki TiN tabakasının yok olmasıyla da aşınma kayıplarındaki değişimin birbirine oldukça yakın değerde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.12. Ağırlık kaybının uygulanan kuvvete göre değişimi(Abrasiv takviyeli).

4.9.2 Yüke Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğünün Değişimi

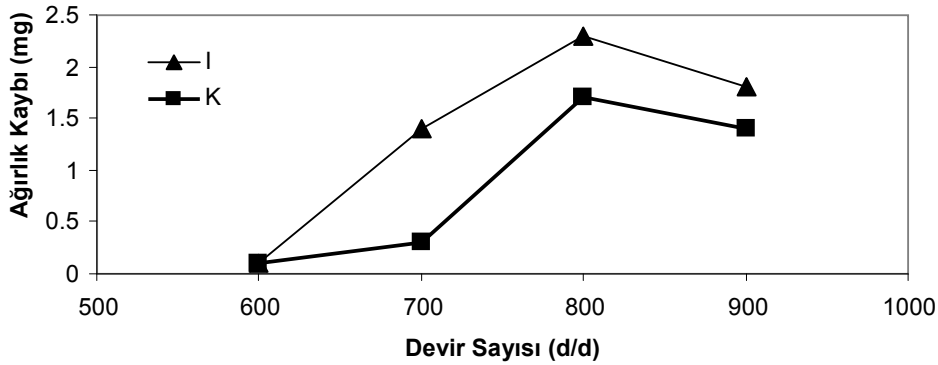
Değişen yük değerleri altında ısıtılmış ve TiN kaplanmış numunelerin pürüzlülük değişimi Şekil 4.13’de verilmiştir. Şekil 4.13’de iki numunede de artan kuvvet ile birlikte yüzey pürüzlülüklerinde paralel bir artış görülmüştür. Ancak ısıtılmış malzemedeki pürüzlülük artışı daha fazladır.



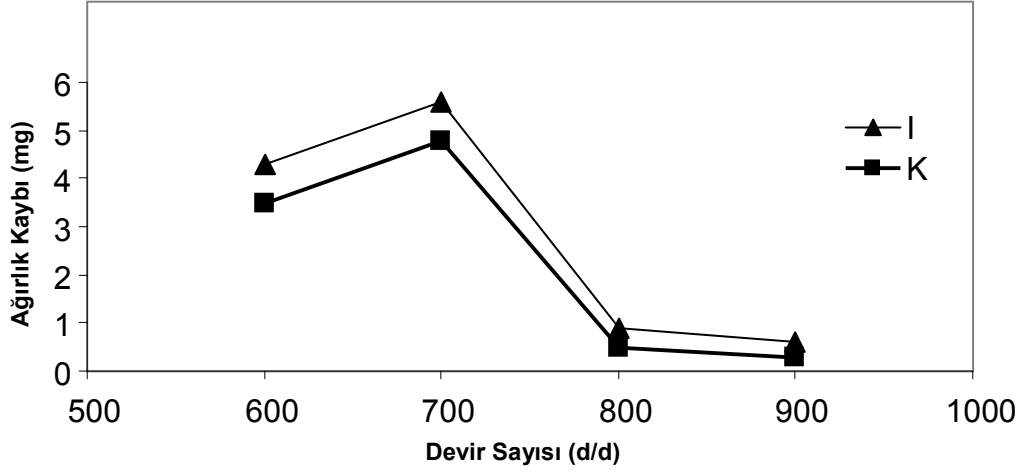
Şekil 4.13. Uygulanan kuvvete göre yüzey pürüzlülüğünün değişimi (Abrasiv takviyeli).

4.9.3 Ağırlık Kaybının Uygulanan Devire Göre Değişimi

Değişen devir sayılarına göre ağırlık kaybındaki değişimler iki farklı yük altında yapılmıştır. Değişimler Şekil 4.14.a. ve Şekil 4.14.b.'de verilmektedir. Deneyler $t=15$ dk'lık sabit deney sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Grafikler incelendiğinde, 100 N'luk sabit yük altında yapılan deneylerde ağırlık kaybındaki değişim 0.1 mg'dan başlayıp gittikçe artarken (Şekil 4.14.a.), 125 N'luk yük değerinde ise başlangıçta ağırlık kaybı yüksek iken artan devir sayılarında azalma eğilimi göstermiştir. Ancak Şekil 4.14.a.'da görülen 100 N'luk sabit yük altında yapılan deneylerde 800 d/d'lık devir sayısı değerinden itibaren de azalma eğilimi göstermiştir. Her iki sabit yük altında değişen devir sayılarına göre ağırlık kayıplarındaki değişimlerin farklı oluşu disklerin arasına giren abrasiv partiküllerin miktarındaki değişimlerden kaynaklanmış olabilir.



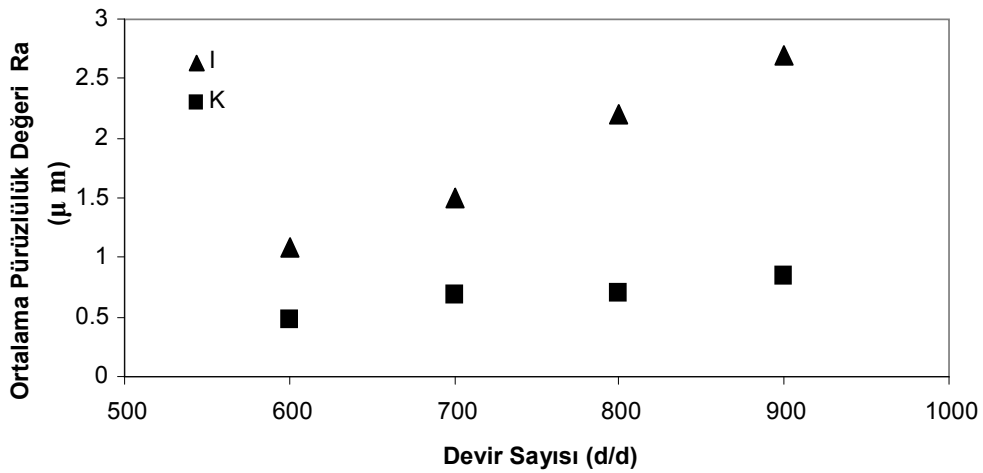
Şekil 4.14.a. Ağırlık kaybının uygulanan devir sayısına göre değişimi ($F=100$ N, abrasiv takviyeli).



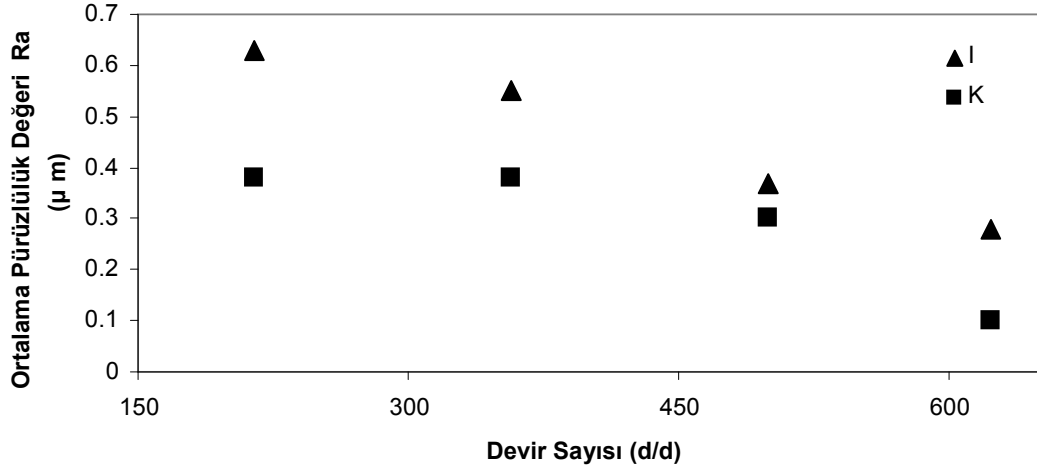
Şekil 4.14.b. Ağırlık kaybının uygulanan devir sayısına göre değişimi ($F=125$ N, Abrasiv takviyeli).

4.9.4 Pürüzlülüğün Uygulanan Devir Sayısına Göre Değişimi

Daha önceki değişkenlerde de görüldüğü değişen devir sayılarına göre de Ra değerlerinde artışlar görülmektedir (Şekil 4.15.). Aşınan numune üzerinde ölçülen Ra değerleri aşındırıcı numuneye göre daha fazla olduğu ölçülmüştür. Abrasivlerin etkisiyle aşındırılan numune yüzeyleri daha fazla etkilenirken abrasivlerin aşındırıcı yüzeylerini biraz daha az etkilediği belirlenmiştir.



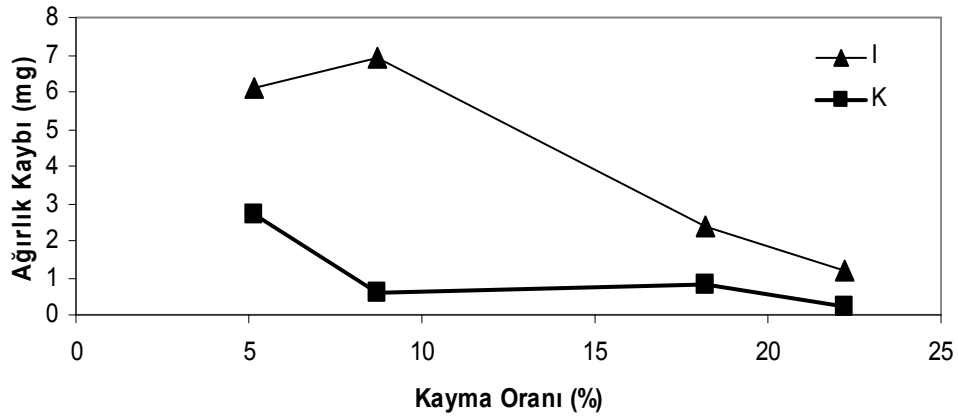
Şekil 4.15. a. Yüzey pürüzlülüğünün uygulanan devire göre değişimi ($F=100$ N Abrasiv takviyeli).



Şekil 4.15.b. Yüzey pürüzlülüğünün uygulanan devire göre değişimi (F=125 N Abrasiv takviyeli).

4.9.5 Ağırlık Kaybının Uygulanan Kayma Oranına Göre Değişimi

Kayma oranlarının, kaplanmış ve kaplanmamış yüzeylerin ağırlık kaybı değişimine olan etkilerini incelemek içinde farklı kayma oranları seçilmiştir. Kayma oranlarına göre testlerde F=125 N, t=15 dk ve n=600 d/d'lık sabit değerler altında gerçekleştirilmiştir. Yine burada da TiN kaplamanın göstermiş olduğu direnç nedeniyle ağırlık kaybı kaplanmamış numunedeki aşınma değerlerinden daha düşük çıkmıştır.



Şekil 4.16. Ağırlık kaybının kayma Oranına göre değişim (Abrasiv takviyeli).

5.BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Sıcak iş takım çeliklerinden olan HOTVAR çeliğinden hazırlanmış olan numunelerin (kaplanmış ve kaplanmamış diskler) disk-disk sistemine uygun olarak kuru ve abrasiv takviyeli yağlı şartlar altında aşınma özellikleri incelenmiştir. Her iki grup deneylerde de değişken parametreler olarak yük, kayma oranı ve devir sayıları seçilmiştir. Yapılan incelemeler sonrasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Kuru şartlar altında değişen yük ve kayma oranlarında aşınma kayıpları bakımından kaplamalı ve kaplamasız her iki numunede de artış gözlenmiştir. Ancak artan devir sayılarında ise belirli bir devir sayısı sonrasında aşınma kaybında azalmalar görülmüştür.
2. Abrasiv takviyeli yağlı şartlarda ise değişken yük ve kayma oranlarında ise başlangıçta aşınma kayıpları yüksek iken yük ve kayma oranları arttıkça azalma eğilimleri göstermişlerdir. Artan devir sayılarında da aşınma kayıplarında belirli azalma eğilimlerinin olduğu tespit edilmiştir.
3. Aşınma kayıpları açısından kaplanmış (aşındırıcı) disklerdeki kayıplar kaplanmamış olanlara göre düşük değerlerde olduğu kaydedilmiştir.
4. Kuru şartlarda yüke bağlı yapılan incelemelerde artan yüke mukabil Ra değerlerinde (kaplanmış ve kaplanmamış numuneler) azalma eğilimleri mevcuttur. Ancak sabit yükte artan devir sayılarında ise Ra değerlerinde de artışlar olmaktadır. Her iki tür numunelerde de Ra değerlerindeki değişimler birbirine yakın ve paralel olarak eğilim göstermişlerdir. Abrasiv takviyeli yağlı şartlarda ise artan yük değerlerine paralel olarak

Ra değerlerinde artışlar gözlenmiştir. İki farklı yük altında ve değişen devir sayılarında ise düşük sabit yükte elde edilen aşındırıcı numunenin Ra değeri yaklaşık sabit kalırken aşındırılmaya çalışılan elemanın Ra değerleri artmaya devam etmiştir. Ancak yüksek olan ikinci sabit yükte ve artan devir sayılarında ise Ra değerlerinin başlangıca göre gittikçe azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalma eğiliminde aşınan ve aşındıran eleman arasına giren abrasivlerin etkisi mevcuttur. Çünkü kuvvetin etkisiyle abrasiv partiküller ufalanarak aşınmaya olan etkileri daha az olmuştur. Bunun sonucu olarak daha küçük aşınma kanalları ortaya çıkmıştır. Sonuç itibariyle Ra değerleri gittikçe azalan bir eğilim göstermiştir.

5.2. Öneriler

1. Aşınmaya dayanıklı sıcak iş takım çelikleri kaplanmış ve kaplanmamış numuneler kullanılarak kuru şartlar altında farklı boyutlarda abrasivler kullanılarak tekrarlanabilir.
2. Aşınma numuneleri üzerinde uygun adaptasyonlar yapılarak değişken sıcaklık değerlerinde ve abrasiv takviyeli kuru/yağlı şartlar altında deneyler tekrarlanarak malzemelerin tribolojik özellikleri incelenebilir.
3. Yukarıdaki deneyler vakum ortamlarında da aynı şartlar kullanılarak tekrarlanıp bu tür çeliklerin tribolojik incelemeleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Sanders, D.M., Anders, A., Review of Cathodic Arc Deposition Technology at the Start of the New Millennium, Surface and Coatings Technology, 133-134, 78-90,2000.
2. Martin, P.J., Bendavid, A., Review of the Filtered Vacuum Arc Process and Materials Deposition, Thin Solid Films, 394,1-15,2001.
3. Anders, A., Energetic Deposition Using Filtered Cathodic Arc Plasmas, Vacuum, 67,673-686,2002.
4. Martin, P.J., Bendavid, A., The Filtered Arc Process and Materials Deposition, Surface and Coatings Technology, 142-144,7-10,2001.
5. Fuchs, FL, Engers, B., Hettkamp, E., Mecke, H., Schultz, J., Deposition Rate and Thickness Uniformity of Thin Films Deposited by A Pulsed Cathodic Arc Process, Surface and Coatings Technology, 142-144, 655-660, 2001.
6. Tarrant, R.N., Montross, C.S., McKenzie, D.R., Combined Deposition and Implantation in the Cathodic Arc for Thick Film Preparation, Surface and Coatings Technology, 136,188-191,2001.
7. Tay, B.K., You, G.F., Lau, S.P., Sheeja, D., Study of Plasma Efficiency As A Function of Arc Current in Filtered Cathodic Vacuum Arc Systems, Diamond and Related Materials, 10, 947-951,2001
8. Keleş, Ö., Matkap Uçlarının Ark PVD ile TiN Kaplanması Proses Parametrelerinin Taguchi Metodları ile Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1996.
9. Kaya, A.U., PVD Kaplama Tekniğiyle Hazırlanan TiN İnce Filmlerin Temel Karakteristiklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 1998.
10. Cheng, Y.H., Tay, B.K., Development of Texture in TiN Films Deposited by Filtered Cathodic Vacuum Arc, Journal of Crystal Growth, 252,257-264,2003.
11. Zhengyang, L., Wubiao, Z., Yong, Z., Guiying, L., Eryan, C, Effects of Superimposed Pulse Bias on TiN Coating in Cathodic Arc Deposition, Surface and Coatings Technology, 131,158-161,2000.

12. Lim, S.H.N., McCulloch, D., Russo, S., Bilek, M.M.M., McKenzie, D.R., Characterisation of Titanium Nitride Thin Films Prepared Using PVD and A Plasma Immersion Ion Implantation System, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 190,723-727,2002.
13. Wang, D.Y., Chiu, M.C., Characterization of TiN Coatings Post-Treated by Metal-Plasma Ion Implantation Process, *Surface and Coatings Technology*, 156, 201-207,2002.
14. Mustapha, N.M., Howson, R.P., Reactive Filtered Arc Evaporation, *Vacuum*, 60, 361-368,2001.
15. Niyomsoan, S., Grant, W., Olson, D.L., Mishra, B., Variation of Color in Titanium and Zirconium Nitride Decorative Thin Films, *Thin Solid Films*, 415,187-194, 2002.
16. Martin, P.J., Bendavid, A., Properties of $Ti_{1-x}Si_xNy$ Films Deposited by Concurrent Cathodic Arc Evaporation and Magnetron Sputtering, *Surface and Coatings Technology*, 163-164, 245-250,2003.
17. He, J.L., Lin, Y.H., Chen, K.C., Wear Performance of CAP-Titanium Nitride-Coated High-Speed Steel in Different Dry Sliding Conditions, *Wear*, 208, 36-41,1997.
18. Wilson, S., Alpas, A.T., TiN Coating Wear Mechanisms in Dry Sliding Contact Against High Speed Steel, *Surface and Coatings Technology*, 108-109,369-376,1998.
19. Hogmark, S., Hedenqvist, P., Jacobson, S., Tribological Properties of Thin Hard Coatings: Demands and Evaluation, *Surface and Coatings Technology*, 90, 247-257, 1997.
20. Skoric, B., Kakas, D., Gredic, T., Influence of Plasma Nitriding on Mechanical and Tribological Properties of Steel with Subsequent PVD Surface Treatments, 317, 486-489,1998.
21. Popescu, A.A., Tudor, I., Balaceanu, M., Braic, V., Braic, M., Rapeanu, R., Tudose, A., Wear Resistance Evaluation of TiN Coated Cutting Tools, Fifth General Conference of the Balkan Physical Union, Vrnjacka Banja, Serbia and Montenegro, 2237-2240, August 25-29, 2003.

22. Türküz, M.C., Ark PVD Yöntemiyle TiN Kaplanmış Kesici Takımların Karakterizasyonu ve Performanslarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1997.
23. Karagöz, H., Kesici Takım Malzemelerinde PVD CVD Tipi Modern Seramik Katmanların Takım Ömrüne Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 1994.
24. Akkaş, O., TiN Kaplama Parametrelerinin, Aşınma Davranışı Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1998.
25. Prengel, H.G., Jindal, P.C., Wendt, K.H., Santhanam, A.T., Hegde, P.L., Penich, R.M., A New Class of High Performance PVD Coatings for Carbide Cutting Tools, Surface and Coatings Technology, 139,25-34,2001.
26. Çınar, O., TiAlN, TiN Tek ve Çok Katlı Kaplamaların Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1998.
27. Tuck, J.R., Korsunsky, A.M., Bhat, D.G., Bull, S.J., Indentation Hardness Evaluation of Cathodic Arc Deposited Thin Hard Coatings, Surface and Coatings Technology, 139, 63-74,2001.
28. P. Harlin, P.Carlsson, U. Bexell, M. Olsson, 2006, Influence of Surface Roughness of PVD Coatings on Tribological Performance in Sliding Contacts, Surface and Coatings Technology, Volume 201, P: 4253-4259, Sweeden
29. J.D. Bressan, R.Hesse, E.M.Silva, Jr., 2001, Abrasive Wear Behavior of High Speed Steel and Hard Metal Coated With TiAlN and TiCN, Wear, Volume 250, P: 561-568, Brazil.
30. P. Van Essen, R.Hoy, J-D. Kamminga, A.P. Ehiasarian, GC.A.M. Janssen, 2006, Scratch Resistance and Wear of CrNx Coatings, Surface and Coatings Technology, Volume 200, P: 3496-3502
31. S.K. Khrais, Y.J. Lin, 2007, Wear Mechanisms And Tool Performance Of TiAlN PVD Coated Inserts During Machining Of AISI4140 Steel, Wear, Volume 262, P: 64-69.
32. A. Alberdia, M. Marin, B. Diaz, O. Sanchez, R.E. Galindo, 2007, Wear Resistance Of Titanium-Aluminium-Chromium-Nitride Nanocomposite Thin Films, Vacuum, Volume 81, P: 1453-1456.
33. Kanlıdağ, M., Kurt A., 2002, Toz Metal Malzemelerin PVD Tekniği İle Kaplanabilirliğinin İncelenmesi, Politeknik Dergisi, Cilt: 4, Özel Sayı 59-64

34. Demirler, U., Taptık, Y., 2005, Fbb Tin Kaplamalarda Taban Malzemenin Kalıntı Gerilme Üzerine Etkisi, İtü dergisi/d,Cilt:4, Sayı: 1,95-102
35. Çakan, A., Yıldırım, M. M., 2006, AISI 1070 Çeliğinden Üretilen İşlemsiz, Yüzey İşlemlili Kesici Takımların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, 11. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
36. Yalçın, B., 2002, Yüksek Hız Çeliği Kesici Takım Üzerine Yapılan Titanyum Nitrür Kaplamanın Kesici Takım Performansına Etkilerinin İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens. Makine Eğitimi A.B.D., Isparta.
37. J.C.A. Batista, M.J. Joseph, C.Godoy, A.Matthews, 2002, Micro-Abrasion Wear Testing Of PVD TiN Coatings On Untreated And Plasma Nitrided AISI H13 Steel, Wear, Volume 249, P: 971-979
38. S.Liscano, L.Gil, O.A.Leon, M. Cruz, M. H. Staia, 2006, Corrosion Performance Of Duplex Treatments Based On Plasma Nitriding And PAPVD TiAlN Coating, Surface and Coatings Technology, Volume 201, P: 4419-4423.
39. Sheffield University, <http://www.shef.ac.uk/mecheng/tribology/teaching/whatistribology.htm>
40. Stachowiak, GW., Batchelor, A.W., 2001, Engineering Tribology, Butterworth Heinemann, Australia.
41. Yaman S., Sürtünme Kuvveti, <http://w3.gazi.edu.tr/web/syaman/hareket9.htm> adresinden.
42. Babalık, F.C., 2000, Makine Elemanları Ve Konstrüksiyon Örnekleri, Vipaş A.Ş., Cilt 2, Uludağ Üniversitesi, Bursa
43. Ludema, K.C., 1996, Friction Wear Lubrication A Textbook in Tribology, Crc Press, Florida
44. Şafak E. 2008, "Yüzeyi PVD Yöntemiyle Kaplanmış Metallerde Tribolojik Özelliklerin Belirlenmesi", Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, 2008.
45. Akkurt M., 2000, Makina Elemanları, Birsen Yayınevi Ltd. Şti., Cilt 1-2, İstanbul.
46. Stachowiak, GW., Batchelor, A.W., 2001, Engineering Tribology, Buttenvorth Heinemann, Australia
47. Hutchings I.M., 1992, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, <http://www.msm.cam.ac.uk/tribo/wear.htm> adresinden.

48. Özdemir, U., Erten, M., 2003, Plazma (İyon) Nitrürleme Yöntemi Ve Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi, Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Cilt 1, Sayı 2 (41-48)
49. Nilsson, D., 2004, Synthesis And Evaluation Of Tac:C Low-Friction Coatings, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala.
50. Kıyak M., Çakır O., Altan E., Eylül 2003, CVD Ve PVD Kaplama Yöntemlerinin Kesici Takımlara Uygulanması, II. Makina Tasarım Ve İmalat Teknolojileri Kongresi., Konya.
51. Freund, L.B., Suresh, S., 2003, Thin Film Materials, Stress, Defect Formation And Surface Evolution.
52. Avuncan, G, 1998, Talaş Kaldırma Ekonomisi Ve Kesici Takımlar, Makine Takım Endüstrisi A.Ş., Gebze
53. Cansever, N., 2001, Manyetik Alanda Sıçratma Yönteminde Son Gelişmeler, Mühendis Ve Makine Dergisi, Sayı 496.
54. Nilsson, D., 2004, Synthesis And Evaluation Of Tac:C Low-Friction Coatings, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala.
55. Savaş S., "PVD Metodu İle TiN Kaplanmış S 6-5-2 Yüksek Hız Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, 2004.
56. Dixit, S.J., Rai, A.K., Bhattacharya, R.S., Guha, S., Wittberg, T., Characterization of Aluminum Nitride Thin Films Deposited by Filtered Cathodic Arc Process, Thin Solid Films, 398-399, 17-23, 2001.

EK-1
DENEYSEL ÇALIŞMA SİSTEMATIĞI

	Ortalama pürüzlülük					ağırlık gr		kayıp	başlangıç	deneydeki	Toplam
		No	F (N)	t (dk)	n (d/d)	önce	sonra	mg	devir	devir	Devir sayısı
1.79	0.62	I1	100	15	500	188.8506	188.8476	3	500	499	7502
	0.5	K1	100	15	500	189.0272	189.0239	3.3	500	499	7502
	0.69	I2	125	15	500	203.1075	203.1013	6.2	500	499	7495
	0.56	K2	125	15	500	188.8213	188.8183	3	500	499	7495
	0.97	I3	150	15	500	202.6216	202.6132	8.4	500	499	15473
	0.71	K3	150	15	500	188.6825	188.678	4.5	500	499	15473
	0.49	I4	175	15	500	203.9835	203.9689	14.6	500	499	7503
	0.52	K4	175	15	500	187.8238	187.8148	9	500	499	7503
	0.54	I5	100	15	600	203.9227	203.9186	4.1	600	599	8747
	0.42	K5	100	15	600	188.8114	188.8085	2.9	600	599	8747
	0.46	I6	100	15	700	203.5067	203.4996	7.1	700	699	19370
	0.67	K6	100	15	700	188.8623	188.8579	4.4	700	699	19370
	0.46	I7	100	15	800	203.3829	203.3763	6.6	800	799	11959
	0.77	K7	100	15	800	188.5748	188.5712	3.6	800	799	11959
	0.62	I8	100	15	900	188.9538	188.9502	3.6	900	901	14141
	0.88	K8	100	15	900	186.341	186.3379	0.7	900	901	14141
	0.4	I9	125	15	214	188.7832	188.7824	2.2	214	216	3264
	0.3	K9	125	15	214	188.1786	188.1781	0.7	214	216	3264
	0.6	I10	125	15	357	203.344	203.3418	1.8	357	355	4176
	0.42	K10	125	15	357	188.8924	188.8914	0.4	357	355	4176
0.7	I11	125	15	500	203.4534	203.4429	0.6	500	499	7496	
0.54	K11	125	15	500	188.4186	188.4133	0.2	500	499	7496	
0.85	I12	125	15	624	202.2148	202.2092	6.2	624	627	9527	
0.63	K12	125	15	624	188.6628	188.6581	4.7	624	627	9527	
0.58	I13	125	15	600	189.0256	189.0253	0.3	600	600	9198	
0.6	K13	125	15	600	188.5736	188.5731	0.5	600	600	9198	
5.13	1.09	I14	125	15	600	189.2346	189.2333	1.3	600	600	9058
	1.14	K14	125	15	600	188.667	188.6665	0.5	600	600	9058
22.22	0.42	I15	125	15	600	203.3995	203.3906	0.3	600	600	9280
	0.83	K15	125	15	600	188.3205	188.3154	0.4	600	600	9280

EK-1

Kayma Oranı %	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜKLERİ	DENEYSEL ÇALIŞMA SİSTEMATIĞI									
		No	F (N)	t (dk)	n (d/d)	ağırlık gr		kayıp	başlangıç	deneyedeki	toplam
						önce	sonra	mg	devir	devir	devir sayısı
18.18	0.66	I16	125	15	600	204.043	204.0351	7.9	600	600	8991
	0.33	K16	125	15	600	188.4077	188.4008	6.9	600	600	8991
8.7	0.28	I17	125	15	600	188.8783	188.878	8.9	600	600	9158
	0.42	K17	125	15	600	188.3619	188.3615	5.1	600	600	9158
1.79	0.3	I18	100	15	500	188.9162	188.9131	3.1	500	499	7552
	0.2	K18	100	15	500	184.601	184.6003	0.7	500	499	7552
	0.4	I19	125	15	500	188.9334	188.933	2.2	500	499	7523
	0.3	K19	125	15	500	188.3923	188.3916	0.7	500	499	7523
	0.5	I20	150	15	500	202.9279	202.927	1.8	500	499	7552
	0.4	K20	150	15	500	189.0297	189.0263	0.4	500	499	7552
	0.6	I21	175	15	500	203.4716	203.471	0.6	500	499	7539
	0.5	K21	175	15	500	188.5682	188.568	0.2	500	499	7539
	0.32	I22	100	15	600	189.1141	189.114	0.1	600	601	9181
	0.21	K22	100	15	600	189.1141	189.114	0.1	600	601	9181
	0.28	I23	100	15	700	203.327	203.3256	1.4	700	699	10673
	0.61	K23	100	15	700	188.6423	188.642	0.3	700	699	10673
	0.49	I24	100	15	800	202.9896	202.9873	2.3	800	802	12259
	0.49	K24	100	15	800	188.5944	188.589	5.39	800	802	12259
	2.67	I25	100	15	900	188.3922	188.3904	1.8	900	902	13710
	0.29	K25	100	15	900	187.9726	187.9712	1.4	900	902	13710
	0.63	I26	125	15	214	203.4835	203.4813	2.2	214	213	4990
	0.38	K26	125	15	214	188.9556	188.9548	0.8	214	213	4990
0.55	I27	125	15	357	188.8367	188.8348	1.9	357	356	5180	
0.38	K27	125	15	357	189.2508	189.2491	1.7	357	356	5180	
0.37	I28	125	15	500	189.0101	189.0072	2.9	500	499	7549	

EK-1

Kayma Oranı %	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜKLERİ	DENEYSEL ÇALIŞMA SİSTEMATİĞİ									
		No	F (N)	t (dk)	n (d/d)	ağırlık gr		kayıp	başlangıç	deneideki	toplam
						önce	sonra	mg	devir	devir	devir sayısı
1.79	0.28	I29	125	15	624	188.821	188.8194	1.6	624	623	9570
	0.1	K29	125	15	624	189.0315	188.029	2.5	624	623	9570
	0.49	I30	125	15	600	189.0271	189.0228	4.3	600	601	9057
	3.38	K30	125	15	600	188.4052	188.4017	3.5	600	601	9057
	2.5	I31	125	15	700	188.8785	188.8729	5.6	700	699	10571
	0.68	K31	125	15	700	188.4186	188.4138	4.8	700	699	10571
	1.08	I32	125	15	800	188.5938	188.5929	0.9	800	801	10666
	0.07	K32	125	15	800	188.9764	188.9759	0.5	800	801	10666
	2.7	I33	125	15	900	188.5798	188.5794	0.4	900	899	12131
	0.84	K33	125	15	900	188.6788	188.6782	0.3	900	899	12131
	0.28	I34	100	15	900	188.9042	188.902	1.4	900	901	13182
	0.28	K34	100	15	900	188.2417	188.2406	1.1	900	901	13182
	0.56	I35	125	15	800	188.864	188.8593	4.7	800	801	12400
	0.48	K35	125	15	800	188.5743	188.5711	3.2	800	801	12400
	0.95	I36	80	15	700	203.6798	203.6725	7.3	700	699	10524
	0.22	K36	80	15	700	188.5652	188.5621	3.1	700	699	10524
5.13	0.51	I37	125	15	600	203.4091	203.403	6.1	600	599	9067
	0.45	K37	125	15	600	188.9279	188.9258	2.7	600	599	9067
22.22	0.69	I38	125	15	600	203.2008	203.2001	6.9	600	601	8981
	0.34	K38	125	15	600	188.2427	188.2425	0.6	600	601	8991
18.18	0.48	I39	125	15	600	188.8054	188.805	2.4	600	601	8891
	0.29	K39	125	15	600	188.8758	188.875	0.8	600	601	8891
8.7	0.27	I40	125	15	600	203.5714	203.5645	1.2	600	601	9097
	0.37	K40	125	15	600	188.7957	188.7951	0.2	600	601	9097

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladıktan sonra Kırıkkale Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü 2000 yılında tamamlamıştır. Altı yıl özel sektörün çeşitli dallarında çalıştıktan sonra 2006 yılında 2'nci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı (Kayseri)'nda çalışmaya başlamıştır, 2009 atamalarında 3'üncü Ana Bakım Merkezi Komutanlığı (Ankara)'na atanmıştır 2010 yılında birliğin lağv edilmesi sebebiyle 4'üncü Ana Bakım Merkezi Komutanlığı (Ankara)'na atanmıştır. Halen bu kurumda çalışmaktadır.

İletişim Bilgileri

Adres : 4'üncü Ana Bakım Merkezi Komutanlığı Etimesgut/ANKARA
Telefon : +903122446668, +905325810758
E-Posta : faras1@mynet.com