

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## PVD YÖNTEMİ İLE TiN, CrN ve TiN /CrN KAPLANMIŞ SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN AŞINMA PERFORMANSLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ

NUSRETTİN KALKAN

Selçuk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Eğitimi Anabilim Dalı

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU**

**2008, 102 Sayfa**

**Juri: Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR**

**Yrd. Doç. Dr. İlhan ASİLTÜRK**

**Yrd. Doç. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU**

Bu çalışmada; PVD – Kadodik Ark metodu ile TiN, CrN ve CrN/TiN kaplanmış, plazma nitrasyon yapılmış ve kaplanmamış DIN 1.2379 Soğuk İş Takım çeliğinin aşınma performansları pin-on disk test cihazında, kuru sürtünme çalışma şartlarında incelenmiştir. Ayrıca gerçek üretim ortamında alüminyum soğuk ekstrüzyon erkek kalıbı PVD yöntemi ile CrN kaplanarak, hali hazırda kullanılan sertleştirilmiş erkek kalıp ile aşınma ve üretim performansları kıyaslanmıştır.

Sonuç olarak, pin-on disk deney test cihazında çalışma şartlarında yapılan deneylerde, PVD yöntemi ile kaplanmış numunelerin diğer numunelere göre aşınma miktarı ve aşınma oranlarında azalma, numunelerin yüzeyinde oluşan abraziv çizilmelerin azaldığı tespit edilmiştir. Konaltaş Alüminyum A.Ş’ de yapılan alüminyum soğuk ekstrüzyon tüp imalatında kullanılan erkek kalıp PVD yöntemi ile CrN kaplama yapılmış ve hali hazırda kullanılan 60 HRC sertliği sahip erkek kalıba göre vuruş adedi 9-10 kat artırılmış, numunede oluşan abraziv çiziklerin azaldığı ve erkek kalıbın çalışma zırh ölçüsünde hemen hemen hiç değişim olmadığı gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** PVD, CrN, TiN, CrN/TiN, İnce Sert Kaplama

**ABSTRACT****Master Thesis****INVESTIGATION OF WEAR PERFORMANCE OF TiN, CrN AND  
TiN /CrN COATED COLD WORK STEEL BY USING PHYSICAL VAPOUR  
DEPOSITION (PVD)METHOD****NUSRETTİN KALKAN****Selçuk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Machine Education****Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU****2008, 102 Pages****Juri: Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR****Yrd. Doç. Dr. İlhan ASİLTÜRK****Yrd. Doç. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU**

In this study, the wear performance of TiN,CrN and CrN/TiN coated DIN1.2379 cold work steel has been investigated by using pin on disk test under dry sliding condition. The wear behaviors have been compared with plasma nitrided and uncoated DIN1.2379 steel. The coating has been performed by using PVD method. Besides, male part of an aluminum extrusion die has been in-situ coated by CrN via PVD method and its production performance has been compared with conventionally hardened extrusion die.

As results of these tests, it was found that the wear rates of coated specimens have reduced in comparison with uncoated ones. It was also observed that the abrasion scratches have also decreased. Theworking capacity of the male die part which is used for cold extrusion of aluminum in Konaltaş Co. has been increased as much as ten times with respect to the present conventional 60 HRC die part. Besides, it was observed that abrasive scratches on the die part have decreased and no considerable dimensional change has been observed.

Key words: PVD, CrN, TiN, CrN/TiN, Thin hard coating

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardımlarını esirgemeyen ve beni yönlendiren hocam Yrd. Doç. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOğLU' na, Konaltaş Alüminyum A.ő Genel Müdürü Sayın Arif GÖKYILDIZ' a, Teknik Isıl İşlem firmasına, İonBond Tinkap firmasına, Assab çelik firmasına, her zaman desteklerini esirgemeyen eşime, çocuklarıma ve mesai arkadaşlarıma őükranlarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>III</b>
<b>TABLoların LİSTESİ</b> .....	<b>VII</b>
<b>ŞEKİLLERİN LİSTESİ</b> .....	<b>VIII</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.2. Literatür Taraması .....	3
<b>2. İNCE FİLM KAPLAMA YÖNTEMLERİ</b> .....	<b>10</b>
2.1. PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) .....	10
2.1.1. PVD İle Yapılan Kaplamalara Sistem Değişkenlerinin Etkisi .....	13
2.1.2. Ark PVD Yönteminde Sıvı Damlacık Oluşum Ve Taşınım Mekanizmaları .....	16
2.1.2.1. Sabit Veya Yarı Sabit Model .....	16
2.1.2.2. Patlama Modeli .....	17
2.1.4. PVD Ark Buharlaştırma Tekniği .....	18
<b>3. BAŞLICA KAPLAMA MALZEMELERİ</b> .....	<b>19</b>
3.1. Titanyum Nitrür (TiN) .....	19
3.2. Titanyum-Alüminyum Nitrür (Ti,Al)N .....	21
3.3. Krom Nitrür (CrN) .....	21
3.4. Titanyum Karbonitrür (TiCN) .....	22
3.5. Zirkonyum Nitrür (ZrN) .....	23
3.6. Dupleks (CrN/TiN-TiN/CrN) Kaplama Yöntemleri .....	23
<b>4. KAPLAMANIN İMALATA GETİRDİĞİ AVANTAJLAR</b> .....	<b>24</b>
4.1. Talaşlı İmalat İşlemlerinde Kullanım Avantajları .....	24
4.2. Kalıplarda Kullanım Avantajları .....	25

4.3. Metal Enjeksiyonunda Kullanım Avantajları .....	25
4.4. Plastik Enjeksiyonda Kullanım Avantajları.....	26
4.5. Tekstil Sanayinde Kullanım Avantajları .....	27
<b>5. PVD TEKNİĞİNİN UYGULAMA ALANLARI .....</b>	<b>28</b>
5.1. Dekoratif Amaçlı Kaplamalar .....	28
5.2. Optik Olarak Fonksiyonel Kaplamalar .....	28
5.3. Elektriksel Olarak Fonksiyonel Kaplamalar .....	29
5.4. Mekanik Olarak Fonksiyonel Kaplamalar .....	29
5.5. Kimyasal Olarak Fonksiyonel Kaplamalar .....	30
5.6. Potansiyel Uygulamalar .....	30
5.7. Motorlarda Seramik Kullanımı .....	31
<b>6. SÜRTÜNME ve AŞINMA.....</b>	<b>33</b>
6.1. Hasar Mekanizmaları .....	34
6.2. Sürtünme .....	35
6.3. Aşınma .....	39
6.3.1. Adhesif Aşınma .....	39
6.3.2. Abrazif Aşınma .....	40
6.3.3. Korozif Aşınma .....	41
6.3.4. Yüzey Yorulması .....	42
6.3.5. Aşınma Oranı.....	43
6.3.6. Aşırı Aşınma .....	43
6.3.7. Oksitlenme Aşınması .....	44
6.4. Yüzey Pürüzlülüğü.....	45
<b>7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>47</b>
7.1. Amaç .....	47
7.2. Materyal .....	47
7.3. Metod.....	55
<b>8. DENEY SONUÇLARI.....</b>	<b>59</b>
8.1. Aşınma Deneylerinde Elde Edilen Veriler ve Aşınma Grafikleri .....	59
8.2. Sabit Kayma Hızlarının Aşınma Oranına Etkisi .....	60

8.3. Kayma Hızı-Uygulanan Aşındırma Kuvveti Etkisinde Kayma Mesafesinin Sürtünme Katsayısına Etkisi .....	66
8.4. Kayma Hızı-Uygulanan Aşındırma Kuvveti Etkisinde Kayma Mesafesinin Sıcaklık Artışına Etkisi .....	74
8.5. İkinci Deney Ortamında Yapılan Deney Sonuçları.....	82
<b>9. SONUÇ ve ÖNERİLER .....</b>	<b>86</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>88</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>92</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>93</b>

## TABLOLARIN LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 2.1.</b> Plazma bölgesinde oluşan temel reaksiyonlar.....	16
<b>Tablo 3.1.</b> TiN ile kaplanmış ve kaplanmamış malzemelerin sonuçları .....	20
<b>Tablo 3.2.</b> TiN kaplamaların kullanım alanları ve performansları .....	20
<b>Tablo 3.3.</b> CrN ile kaplanmış ve kaplanmamış malzemelerin sonuçları .....	22
<b>Tablo 3.4.</b> CrN kaplamaların kullanım alanları ve performansları .....	22
<b>Tablo 6.1.</b> Yüzey pürüzlülük değerleri ve sınıf numaraları .....	46
<b>Tablo 7.1.</b> DIN 1.2379 Soğuk iş takım çeliğinin kimyasal analizi.....	49
<b>Tablo 7.2.</b> DIN 1,2379 Soğuk iş takım çeliğinin fiziksel özellikleri.....	49
<b>Tablo 7.3.</b> Vanadis 23 Toz Metal Malzemenin Kimyasal Analizi.....	52
<b>Tablo 7.4.</b> Vanadis 23 Toz metal malzemenin fiziksel özellikleri.....	53
<b>Tablo 8.1.</b> Kayma hızı ve uygulanan kuvvete göre kütle kaybı.....	59
<b>Tablo 8.2.</b> Kayma hızı ve uygulanan kuvvete göre aşınma oranları [Aşınma oranı x 10 <sup>-6</sup> (mm <sup>3</sup> N <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )]......	60
<b>Tablo 8.3.</b> Deney numuneleri ortalama sürtünme kuvvetleri.....	74
<b>Tablo 8.4.</b> Deney numuneleri ortalama sürtünme kuvvetleri.....	82
<b>Tablo 8.5.</b> Alüminyum soğuk ekstürüzyon tüp omuz ölçüleri (mm) .....	85
<b>Tablo 8.5.</b> Alüminyum soğuk ekstürüzyon tüp boy ölçüleri (mm).....	85

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1.	Çeşitli kaplama yöntemleri .....10
Şekil 2.2.	Fiziksel buhar biriktirme (PVD) metotları.....13
Şekil 2.3.	BIAS voltajının kaplama yapısına etkisi .....15
Şekil 2.4.	a) Sabit katot spot modeli, b) Sıvı metal damlacıkların katot yüzeyinden kopma mekanizması.....17
Şekil 5.1.	PVD ile kaplanmış takımların kullanım ömürleri.....30
Şekil 6.1.	Çeşitli takım malzemelerinin ortalama eğme mukavemeti değerleri.....34
Şekil 6.2.	Çeşitli takım malzemelerinin ortalama sertlik değerleri.....34
Şekil 6.3.	Hasar mekanizmaları.....35
Şekil 6.4.	Statik ve kinetik sürtünme katsayıları.....38
Şekil 6.5.	Metal yüzeyindeki pürüzlerin birbirine teması.....38
Şekil 6.6.	Adheziv aşınma.....40
Şekil 6.7.	Abraziv aşınma.....41
Şekil 7.1.	DIN 1,2379 deney numunesi.....48
Şekil 7.2.	MHT 2 mikrosertlik ölçüm cihazı.....48
Şekil 7.3.	PVD – Katodik ark yönteminin şematik gösterimi.....49
Şekil 7.4.	CrN kaplanmış deney numunesi kaplama kalınlığı.....50
Şekil 7.5.	TiN kaplanmış deney numunesi kaplama kalınlığı.....50
Şekil 7.6.	CrN/TiN dubleks kaplanmış deney numunesi kaplama kalınlığı.....50
Şekil 7.7.	TiN kaplanmış deney numunesi XRD görüntüsü .....51
Şekil 7.8.	CrN kaplanmış deney numunesi XRD görüntüsü.....51
Şekil 7.9.	CrN/TiN dubleks kaplanmış deney numunesi XRD görüntüsü .....51
Şekil 7.10.	Aşındırıcı disk.....52
Şekil 7.11.	Alüminyum ekstrüzyon tüp erkek kalıp.....54
Şekil 7.12.	Alüminyum ekstrüzyon tüp imalatında kullanılan alüminyum pul.....55
Şekil 7.13.	Alüminyum ekstrüzyon tüp imalat kullanılan yatay eksantrik pres.....55
Şekil 7.14.	Pin-on disk deney cihazı.....56
Şekil 7.15.	Kurutma fırını.....57
Şekil 7.16.	10 <sup>-4</sup> gr hassasiyetli dijital göstergeli tartı cihazı.....57
Şekil 7.17.	Metal mikroskobu.....58
Şekil 7.18.	Alüminyum ekstürüzyon tüp.....58



<b>Şekil 8.1.</b>	Kayma hızı 0,6 m/sn için aşındırma kuvvetine göre aşınma miktarlarının karşılaştırılması.....	61
<b>Şekil 8.2.</b>	Kayma hızı 1 m/sn için aşındırma kuvvetine göre aşınma miktarlarının karşılaştırılması.....	62
<b>Şekil 8.3.</b>	Kayma hızı 1,4 m/sn için aşındırma kuvvetine göre aşınma miktarlarının karşılaştırılması.....	62
<b>Şekil 8.4.</b>	0,6 m/s kayma hızında 40 N uygulama yükte disk üzerinde oluşan aşınma izleri (x250), a) TiN kaplama, b) CrN/TiN dubleks kaplama c) CrN kaplama d) Plazma nitrasyon e) Sertleştirilmemiş.....	63
<b>Şekil 8.5.</b>	1,4 m/sn kayma hızında 55 N yük altında pim yüzeyinde oluşan aşınma izleri (X400), a) Sertleştirilmemiş numune, b) Plazma nitrasyon numune, c) CrN/TiN dubleks kaplama, d)CrN numune, e)TiN numune.....	64
<b>Şekil 8.6.</b>	1,4 m/sn kayma hızında 55 N yük altında pim yüzeyinde oluşan aşınma izleri, a) Sertleştirilmemiş numune, b) Plazma nitrasyon numune, c) CrN/TiN dubleks kaplama, d)CrN numune, e)TiN numune.....	65
<b>Şekil 8.7.</b>	Sertleştirilmemiş deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....	66
<b>Şekil 8.8.</b>	Sertleştirilmemiş deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....	67
<b>Şekil 8.9.</b>	Sertleştirilmemiş deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....	67
<b>Şekil 8.10.</b>	Nitrülenmiş deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....	68
<b>Şekil 8.11.</b>	Nitrülenmiş deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....	68
<b>Şekil 8.12.</b>	Nitrülenmiş deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....	69
<b>Şekil 8.13.</b>	TiN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi .....	69
<b>Şekil 8.14.</b>	TiN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....	70
<b>Şekil 8.15.</b>	TiN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....	70
<b>Şekil 8.16.</b>	CrN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....	71

- Şekil 8.17.** CrN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....71
- Şekil 8.18.** CrN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....72
- Şekil 8.19.** CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....72
- Şekil 8.20.** CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....73
- Şekil 8.21.** CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi.....73
- Şekil 8.22.** Sertleştirilmemiş deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....75
- Şekil 8.23.** Sertleştirilmemiş deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....75
- Şekil 8.24.** Sertleştirilmemiş Deney Numunesinde 1,4 m/sn Kayma Hızı-Aşındırma Kuvveti Etkisinde Kayma Mesafesinin Sıcaklık Artışına Etkisi.....76
- Şekil 8.25.** Nitrürlenmiş deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....76
- Şekil 8.26.** Nitrürlenmiş deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....77
- Şekil 8.27.** Nitrürlenmiş deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....77
- Şekil 8.28.** TiN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....78
- Şekil 8.29.** TiN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....78
- Şekil 8.30.** TiN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....79
- Şekil 8.31.** CrN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....79
- Şekil 8.32.** CrN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....80
- Şekil 8.33.** CrN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....80

<b>Şekil 8.34.</b>	CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....	81
<b>Şekil 8.35.</b>	CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....	81
<b>Şekil 8.36.</b>	CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi.....	82
<b>Şekil 8.37</b>	a) Sertleştirilmemiş erkek kalıbın zırh bölgesindeki aşınma, b) Elde edilen tüplerde oluşan abraziv aşınma.....	84
<b>Şekil 8.38.</b>	Kaplanmış erkek kalıp abraziv aşınma görüntüleri.....	84
<b>Şekil 8.39.</b>	Kaplanmış erkek kalıpla üretilen alüminyum tüp.....	85
<b>Ek-1.1.</b>	0,6 m/sn 25 N sertleştirilmemiş deney numunesi yüzey görüntüsü (X400).....	93
<b>Ek-1.2.</b>	1,4 m/sn 55 N sertleştirilmemiş deney numunesi yüzey görüntüsü (X400) ...	93
<b>Ek-1.3.</b>	0,6 m/sn 25 N plazma nitrasyon deney numunesi yüzey görüntüsü (X400) ...	93
<b>Ek-1.4.</b>	1,4 m/sn 55 N plazma nitrasyon deney numunesi yüzey görüntüsü (X400) ...	94
<b>Ek-1.5.</b>	0,6 m/sn 25 N CrN/TiN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400) .....	94
<b>Ek-1.6.</b>	1,4 m/sn 55 N CrN/TiN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400) .....	94
<b>Ek-1.7.</b>	0,6 m/sn 25 N TiN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400).....	95
<b>Ek-1.8.</b>	1,4 m/sn 55 N TiN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400) .....	95
<b>Ek-1.9.</b>	0,6 m/sn 25 N CrN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400) .....	95
<b>Ek-1.10.</b>	1,4 m/sn 25 N CrN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400) .....	96
<b>Ek-2.1.</b>	Aşındırma kuvveti 25 N için kayma hızlarına göre aşınma oranının karşılaştırılması.....	96
<b>Ek-2.2.</b>	Aşındırma kuvveti 40 N için kayma hızlarına göre aşınma oranının karşılaştırılması.....	96
<b>Ek-2.3.</b>	Aşındırma kuvveti 55 N için kayma hızlarına göre aşınma oranının karşılaştırılması.....	97
<b>EK-3.1.</b>	0,6 m/sn 25 N sertleştirilmemiş pimin aşındırıcı diskteki izi (X400).....	98
<b>EK-3.2.</b>	0,6 m/sn 25 N plazma nitrülenmiş pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	98
<b>EK-3.3.</b>	0,6 m/sn 25 N TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	98
<b>EK-3.4.</b>	0,6 m/sn 25 N CrN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	99

<b>EK-3.5.</b>	0,6 m/sn 25 N CrN/TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	99
<b>EK-3.6.</b>	1,4 m/sn 40 N Sertleştirilmemiş pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	99
<b>EK-3.7.</b>	1,4 m/sn 40 N Plazma nitrülenmiş pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	100
<b>EK-3.9.</b>	1,4 m/sn 40 N CrN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	100
<b>EK-3.8.</b>	1,4 m/sn 40 N TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	100
<b>EK-3.10.</b>	1,4 m/sn 40 N CrN/TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	101
<b>EK-3.11.</b>	1 m/sn 55 N Sertleştirilmemiş pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	101
<b>EK-3.12.</b>	1 m/sn 55 N Plazma nitrülenmiş pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	101
<b>EK-3.14.</b>	1 m/sn 55 N CrN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	102
<b>EK-3.13.</b>	1 m/sn 55 N TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	102
<b>EK-3.15.</b>	1 m/sn 55 N CrN/TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400) .....	102

## SİMGELER ve KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar açıklamaları ile birlikte aşağıda belirtilmiştir.

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
Mpa	Megapaskal
°A	Angstrom ( $1^{\circ}A=10^{-10} m=10^{-4}\mu m$ )
°C	Santigrat Derece
G <sup>+</sup>	İyon
M	Kaplanacak Malzeme Atomu
Sn	Saniye
HW	Vickers Sertliği (HV)
mm	Milimetre
m	Metre
N	Newton
dk	Dakika
F <sub>s</sub>	Statik Sürtünme Kuvveti
F <sub>N</sub>	Normal Kuvvet
T <sub>K</sub>	Kayma Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )
A <sub>g</sub>	Gerçek Temas Alanı (mm <sup>2</sup> )
cr <sub>a</sub>	Akma Mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )
μ <sub>s</sub>	Statik Sürtünme Katsayısı
μ <sub>K</sub>	Kinetik Sürtünme Katsayısı
F <sub>K</sub>	Kinetik Sürtünme Katsayısı
τ <sub>a</sub>	Kayma Gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )
a	Temas Alanı
A <sub>r</sub>	Temas Eden İki Gerçek Yüzey Alanı
A <sub>a</sub>	Temas Eden Görünür Yüzey Alanı
U <sub>ab</sub>	Abrasif Aşınma
k	Karakteristik Katsayı Değeri
P	Basınç
V <sub>g</sub>	Kayma Hızı

V	Hacimsel Aşınma Miktarı
L	Kayma Yolu Uzunluğu
R <sub>a</sub>	Yüzey Pürüzlülük Parametresi
s	İlerleme
r	Yarıçap
v	Kesme Hızı
a	Talaş Derinliği
C	Karbon
Mn	Mangan
Cr	Krom
Mo	Molipten
Si	Silisyum
KW	Kilowat
n	Devir
V	Kayma Hızı
d	Çap
WC	Volfram Karbür
µm	Mikron (1µm=10 <sup>-6</sup> m)

**Kısaltmalar**

BİAS  
 DIN  
 PVD  
 CVD  
 DVD  
 TiN  
 CrN  
 TiCN  
 TiC  
 ZrN  
 TiAlN  
 TiAlVN  
 TiHfN  
 TiNbN  
 TiSiN  
 HfN  
 HRC  
 HV  
 KGDD  
 AISI  
 HSS  
 HWS  
 SEM  
 CNC  
 A  
 V  
 mBar  
 XRD  
 MoV  
 AlTiN  
 HIPIMS  
 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 Cu

**Açıklama**

Hızlandırma Voltajı  
 Alman Çelik Normu  
 Fiziksel Buhar Biriktirme  
 Kimyasal Buhar Biriktirme  
 Doğrudan Buhar Biriktirme  
 Titanyum Nitrür  
 Krom Nitrür  
 Titanyum Karbonitrür  
 Titanyum Karbür  
 Zirkonyum Nitrür  
 Titanyum Alüminyum Nitrür  
 Titanyum Alüminyum Volfram Nitrür  
 Titanyum Hafniyum Nitrür  
 Titanyum Niyobyum Nitrür  
 Titanyum Silisyum Nitrür  
 Hafniyum Nitrür  
 Rockwel Sertlik  
 Vickers Sertlik  
 Küresel Grafitli Dökme Demir  
 Amerikan Demir Çelik Enstitüsü  
 Yüksek Hız Çeliği  
 Sıcak İş Çeliği  
 Taramalı Elektron Mikroskobu  
 Bilgisayarlı Sayısal Kontrol  
 Amper  
 Volt  
 Milibar  
 X-Işını Difraksiyonu  
 Molibden Volfram  
 Alüminyum Titanyum Nitrür  
 Ion Bombardmanı  
 Alüminyum Oksit  
 Bakır

## 1. GİRİŞ

Günümüzde imalat sektöründe kullanılan makine ekipmanları ve kalıp malzemelerinin aşınması ve kırılması imalatları olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuzlukları en aza indirmek için kullanılan malzemelerin kaliteleri, yüzey pürüzlülükleri ve ısıl işlemlerinde farklı yöntemler uygulanmaktadır. Üretimde kullanılacak malzemeler çalışma şartları, işlevi ve ekonomikliğine göre belirlenmelidir. Bu çalışmalar doğrultusunda malzemelerin dayanımlarının, sertliklerinin ve yüzey kalitelerinin artırılması için ince sert kaplamalar yapılmaktadır.

Yüzey kaplama işlemleri son yüzyılımızda sağladığı ekonomik ve teknik avantajlar sayesinde birçok çalışmanın konusunu oluşturmuştur. Yüzey enerjisi, yüzey gerilmesi, yüzeyin aktivitesi, aşınma, korozyon ve yüzeye ilgili problemler dünyada her yıl önemli maddi kayıplara neden olmaktadır. Bu sebeple bu problemler bilimsel alanda büyük bir önem kazanmıştır. Metal ve alaşımlarının, kütle ve yüzeysel özellikleri arasındaki ilişki uzun yıllardan beri araştırılmaktadır. İşte bu araştırmalar sonunda geliştirilen modern kaplama tekniklerinden; PVD, CVD, spreyleme ve difüzyon esaslı kaplama teknikleri; aşınma, korozyon ve oksidasyona karşı dirençli karbür, nitrür ve bor kaplamaların gerçekleştirilmesinde uygulanmaktadır [1].

Bu tez çalışması iki farklı deney ortamında yapılmıştır. Birinci deney ortamında DIN 1,2379 Soğuk İş Takım çeliğinden yapılan numunelerin, aynı geometrik özelliğe sahip deney numuneleri PVD yöntemi ile değişik kaplama (TiN, CrN ve CrN/TiN dubleks kaplama), plazma nitrasyon yapılmış ve herhangi bir ısıl işlem yapılmamış numuneler pin-on disk test cihazında kuru ortamda ve oda sıcaklığında sabit kayma mesafesinde üç farklı çevre hızı ve yükte aşınma performansları kıyas edilmiştir.

İkinci deney ortamı ise Konaltaş Alüminyum A.Ş de alüminyum soğuk ekstürüzyon tüp imalatında kullanılan erkek kalıbın gerçek üretim ortamında PVD yöntemi ile kaplama yapılmış erkek kalıp ile Vakum fırınında yüksek sıcaklığa ulaştırılıp yüksek basınçlı gazla soğutulmuş sertleştirilmiş erkek kalıbın üretim performansı ve aşınma performansları kıyas edilmiştir.



Her iki deney ortamında elde edilen aşınma izleri optik mikroskop ve SEM görüntüleri elde edilerek abraziv aşınma izleri kıyas edilmiştir.

Sonuç olarak PV-Katodik Ark yöntemi ile kaplanmış numunelerin diğer numunelere göre aşınma miktarı ve aşınan yüzeydeki abraziv çizilmelerin azaldığı tespit edilmiştir.

Alüminyum ekstürüzyon imalatında kalıp maliyeti ve kalıp değişim süreleri çıkan ürünleri maliyetini yüksek oranda etkilemektedir. Yapılan çalışmada aşınma oranı daha fazla olan erkek kalıbın iyileştirilmesi, kalıp değişim süresi (ortalama 45 dk) ve malzeme kaybını önemli ölçüde azaltmaktadır. Sertleştirme yöntemleri ile yapılan erkek kalıbın çalışma ömrü 9-10 kat artırılmıştır. Ömür artışı kalıp değişiminden kaynaklanan zaman kaybının azalmasından dolayı işletmeye büyük kazanç sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, DIN 1,2379 Soğuk İş Takım çeliği PVD yöntemi ile farklı kaplama yapılmış (TiN, CrN, CrN/TiN) numunelerin, plazma nitrasyon ve herhangi bir ısıtma işlemi yapılmamış numunelerin aşınma performansları kıyas edilmiştir. Aynı zamanda PVD yöntemi ile CrN kaplanmış alüminyum soğuk ekstürüzyon erkek kalıbın tüp imalatı gerçek üretim ortamında normal sertleştirilmiş erkek kalıpla aşınma ve vuruş adedi kıyas edilmiştir. CrN kaplanmış erkek kalıpların hemen hemen hiç aşınmadığı ve kalıbın servis ömrünün 9-10 kat arttığı tespit edilmiştir. Böylece özellikle darbeli ortamda çalışan bu tip makine elemanlarında PVD yöntemi ile kaplama yapılarak, servis ömrünün artırılması ve makinanın durma süreleri azaltılarak bu yöntemin yaygınlaştırılması hedeflenmektedir.

## 1.2. Literatür Taraması

Birbiri ile sürtünerek çalışan makine elemanlarında aşınma çok önemli bir problemdir. Bu problemin çözümü için sürdürülen çalışmalar her geçen gün biraz daha artmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda kullanılan malzemelerin ekonomik ömürlerinin artırılması ve geri dönüşümleri hedeflenmektedir. Bu bağlamda malzeme yüzey kalitesinin artırılması ve kaplamalarla ilgili bir kısım çalışmalar aşağıdaki gibidir.

Sert, PVD imalat sektöründe kullanılan kalıp malzemelerine uygulanarak, kalıp ömürleri 10–30 kat artırılmıştır. Özellikle ekstürüzyon, sıvama ve kam düzeneklerinde kullanılan kaplamalar imalat sektöründe önemli bir ilerleme sağlamıştır [1].

Solak, yüzey kaplama bir metalin veya ametalin yüzeyini bir metal, ametal veya bir organik madde ile kaplayarak, malzemeyi hem görünüş hem de fiziksel ve kimyasal (korozyon) bakımdan daha dayanıklı hale getirmek amacıyla yapılan işlemdir. Kaplama esnasında ana malzemenin sadece yüzey özellikleri değiştirilir. Malzemenin kütle özelliklerinin değişmemesine dikkat edilir [2].

Eryılmaz ve Tönshoff, PVD yöntemi yüksek sıcaklıkta, vakum altında bulundurulmuş kaplama malzemesi yüzeyindeki atomların buharlaştırılarak (atomlaştırılarak) kaplama yapılacak yüzeyde atomik veya iyonik bileşikler şeklinde biriktirilmesi esasına dayanmaktadır [3,4].

Malzemeler ince film olarak çelikler ve sert metaller üzerine kaplandıklarında gevrekliklerini kaybederler ve kaplandıkları malzemeye yüksek aşınma mukavemeti sağlarlar. Bu çeliklerin ultra sert olan TiN gibi seramik malzemelerle kaplama teknikleri araştırılmıştır. Bu araştırmalar neticesinde 1960' lı yıllarda CVD kimyasal buhar çöktürme adı altında bir teknik geliştirilmiş, fakat 200- 400°C sıcaklıklar arasında sertliğini kaybeden takım çeliklerini kaplamak mümkün olmamıştır. Çünkü bu teknik ile 1100-1200°C civarında kaplama sıcaklıkları gerekmektedir. Bu teknik sadece sert metal tabir edilen WC malzemeler üzerine kaplama yapabilmektedir. Araştırmalar sonucunda 1970"li yıllarda PVD fiziksel buhar çöktürme tekniğinin bir dalı olan iyon kaplama adlı bir metot geliştirilmiştir. Bu metot ile HSS ve HWS adı verilen yüksek hız ve sıcak iş çeliklerini kaplamak mümkün olmuştur. Dünyada bu teknik ile yapılan kaplamalar ve araştırmalar büyük bir hızla ilerleyerek

artmaktadır. Kesici takım kullanan firmalar kesici takımlarına bu tür sert kaplamalar uygulayarak, % 200-800 arasında takım ömründe ekonomi sağlamaktadırlar [5].

Scoles, yaptığı çalışmada PVD ve CVD yöntemlerini incelediği zaman DVD'den farklı yönleri olduğu açıkça görülmektedir. CVD yöntemini incelendiği zaman kaplanacak olan parçalar 1000-1200 °C sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Bu da sertleştirilmiş parçalar için istenilmeyen bir olaydır. Çünkü bu sıcaklıklarda malzemelerin içyapıları değişebilmektedir. Böyle olumsuz bir yönü olmasına rağmen CVD yöntemi küresel özellikteki parçalar (bilye) için tartışılmaz kolay kaplama yöntemidir. Ayrıca CVD yöntemi ile uzun malzemelerin kaplanması (tel, mil ve diğerleri) kolaylıkla yapılabilmektedir. Ancak elektronik alanda kullanılan özellikle fiber optik ve bakır özellikteki kabloların kaplanmasında ortalama sıcaklık 350-650 °C arasında olmalıdır. Bu nedenle CVD yöntemi bu tip kaplamalarda kullanıma uygun değildir. DVD yönteminde sistemin uzun ebatlı parçalara ayarlanması oldukça kolaydır ve işlem odasının sıcaklığı 600°C yi geçmemektedir [6].

Reichelt ve Jiang, yaptıkları çalışmalarda ana malzeme yüzeylerinin ince sert filmlerle kaplanmasıyla yüzey özelliklerinin geliştirildiğini tespit etmişlerdir. Bu tür kaplamalarda genellikle CVD ve PVD yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle üretilen ince filmlerin üstün özellikleri malzemenin yüzey özelliklerini önemli derecede geliştirmektedir. Kaplanan malzemenin yüzeyindeki bu önemli gelişmeler; yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci, kimyasal kararlılık ve kavitasyon ve erozyon aşınmalarına direnç olarak tanımlanabilir [7].

Sert ve Meriç, çalışmalarında kalın sert kaplamalar, 5-110 µm çaplarındaki değişik metal tozlarının oksiasetilen alevi veya plazma arkı arasından basınçla geçirilirken ergitilerek kaplanacak metalin yüzeyine hızla etki ettirilen (1- 6 mm) ye kadar kalınlıkta ana metalden daha farklı nitelikleri olan, ikinci bir metal ile kaplanmasıdır. Soğuk ve sıcak püskürtmede özel hazırlanmış ana malzemenin yüzeyine basınçla gönderilen çelik tozların iyi yapışması için ön ısıtmaya ihtiyaç vardır. Plazma arkında da ana malzeme ön ısıtmaya tabii tutulur. Toz partikülleri elektrik arkı arasından geçirilir. Ana malzeme aynı zamanda koruyucu gaz olarak argonun etkisi altında bırakılarak daha temiz daha gözeneksiz ve daha başarılı bir kaplama yapılmış olur. Bu sayede ince film kaplamalar malzeme yüzeyine daha homojen kaplanmış olur [8].

Karagöz yaptığı çalışmada, PVD yöntemiyle elde edilen kaplamaların performansını iş parçası malzemesi ve kesme parametreleri belirler. TiN kaplamalarda her uygulama için optimum kaplama olmadığından PVD yöntemiyle yeni kaplama bileşimleri geliştirmesine çalışılmaktadır. TiN yerine, HfN ve TiC gibi tabakaların uygulama alanı bulamaması sonucu çalışmalar üçlü ve dörtlü kaplamalar ile geçiş katmanlı kaplamalar yönünde yoğunlaşmıştır. Üçlü ve dörtlü kaplamalara TiAlN, TiNbN, TiAlVN ve TiHfN örnek olarak verilebilir. Bu kaplamalar içerisinde en iyi performans TiAlN kaplamalarda gözlenmiştir [9].

Eryılmaz, sert kaplamaların kesici takım yüzeylerine başarıyla uygulandığı yöntemlerden bir tanesi de PVD yöntemidir. Bu yöntem vakum altında bulundurulan malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomların yüzeyden koparılması ve kaplama yapılacak yüzeyde atomsal veya iyonsal olarak biriktirilmesi esasına dayanmaktadır [3].

Sert yaptığı çalışmada, profil şeklindeki metalse mamullerin üretildiği ekstrüzyon işleminde kullanılan kalıpların aşınma dirençlerinin artırılması amaçlanmış ve bu amaçla yüzey kaplama uygulanmıştır. Yüzey kaplama işlemi olarak, PVD yöntemiyle, H13 çeliğinden yapılmış, sertleştirilmiş ve nitrürlenmiş kalıp ve inceleme numuneleri üzerine TiN kaplanmıştır. İstanbul Titanit firmasında gerçekleştirilen kaplama işlemlerinden sonra numuneler üzerinde metalografik incelemeler yapılmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız kalıpların işletme şartlarında denenmesi suretiyle aşınma performansları belirlenmiştir Eşit şartlarda kaplamalı ve kaplamasız kalıplardan ekstrüze edilen alüminyum profillerin belirli periyotlar içinde çeşitli bölgelerinden kalınlıklarının ve yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi ve kalınlık artışlarının tespiti şeklinde yürütülen testler sonucunda kaplamanın aşınmayı geciktirdiği ve dolayısıyla profillerdeki kalınlık artışlarının bu kalıplarda daha yavaş seyrettiği tespit edilmiştir. Ancak yüzey pürüzlülüğü açısından başlangıçta daha pürüzlü yüzeyler veren kaplamalı kalıplar belirli bir süre sonra kaplamasız kalıplara göre daha az pürüz oluşturmuştur [1].

Sert yaptığı çalışmada, PVD kaplamalarda işlem 350-550 °C' ler arasında gerçekleştirildiği için çelik türü malzemelerde başarıyla uygulanabilmektedir. Ayrıca PVD kaplamaların TiN ile nitrürlenmesi sonucu parçaların yüzey aşınma mukavemetleri artırılabilir. Yüzey mühendisliği teknikleri ince sert kaplamaların yüzey özelliklerini her geçen gün biraz daha geliştirmektedir. Bu kaplamalar AISI 304 çeliğine uygulanıp alüminyum ekstrüzyon kalıplarının ömürleri artırılmıştır [1].

Miao ve arkadaşları tarafından, CrN/TiN çoklu kaplamanın aşınma direncini artırmak için magnezyum alaşımlı AZ91 malzemenin üzerine kaplama yapılmıştır. Kaplamanın toplam kalınlığı CrN ve TiN tabakasının yaklaşık olarak 2 µm ile 12 µm kalınlığı arasında değişmiştir. Elde edilen bu bileşim ve mikro yapı XRD ve GDS (glow discharge spectrum) vasıtası ile analiz edilmiştir. Yüzey ve morfolojisi SEM yöntemi ile inceleme yapılmıştır. Kaplamalar arasındaki ve alt parçanın yapışma direnci çizik testi uygulanmıştır. Aşınma deneyi ball on disk deney test cihazında değerlendirilmiştir. AZ91 numunesi ayrıca korozyon testine (tuz püskürtme testi) tabi tutulmuştur. Sonuçta, magnezyum alaşımlı AZ91 malzemenin üzerine yapılan CrN/TiN kaplamanın hem korozyon hem de aşınma direncini iyileştirme gözlenmiştir [10].

Baragetti yaptığı çalışmada, düz dişli çarkların PVD yöntemi ile CrN kaplama yapılarak dişli çarkın yorulma direncini artırmak mümkün olduğunu göstermiştir. PVD kaplı dişli çarklar çatlak oluşumu nümerik bir simülasyon yöntemi ve deneyler yapılarak gerçekleştirilmiştir. CrN kaplama tabakasının mikro sertliği ve artık gerilme karakteristiği yüzeyden elde edilmiştir. Çalışmalar sonucunda, otomotiv güç aktarma organında kullanılan CrN kaplama düz dişli çarkın yorulma ömrü nümerik bir model ile tahmin edilebilmektedir. Bu çalışmanın ana hedefi PVD ince yüzey kaplamanın yüksek hız yarış arabalarında kullanılan çelik ve titanyum düz dişli çarkların yorulma direnci artırıp artırmadığını araştırmaktır. Sonuç olarak eğer TiN PVD kaplama derinliği 5µm kalınlığında elde edilirse titanyum düz dişli çarkın diş kökünde yorulma direncinin artırdığını görülmüştür [11].

Park ve Kim yaptıkları çalışmalarında, çelik ana malzeme üzerine TiN, TiAlN ve TiSiN gibi kaplama malzemesi kullanılarak CVD yöntemiyle yapılan sert kaplamaların, mikro sertlikleri, mikro yapıları ve oksidasyon davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. Az miktarda olsa Alüminyum ve Silisyumun TiN' e ilavesinin, mikro sertlik ve oksidasyon direncine büyük miktarda etki etmektedir. TiAlN ve TiSiN deki aşırı mikro sertlik artışı TiN ile karşılaştırılmış ve bunun sebebi mikro yapıdaki değişiklikten kaynaklandığı anlaşılmıştır. TiN' in oksidasyon sıcaklığı 500 °C olarak belirlenirken TiAlN ve TiSiN 700 °C' de oksitlenmeye başladığı anlaşılmıştır [12].

Beşman yaptığı çalışmada, TiN kaplanmış GGG 40 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin yorulma davranışlarını incelemiş ve kaplamasız KGDD' in yorulma dayanım sınırı

285 Mpa iken TiN kaplanmış KGDD' de bu sınırın 305 Mpa gerilme genliğine ulaştığını tespit etmiştir [13].

Beşman ve Kayalı yaptıkları çalışmada, PVD ve CVD yöntemleriyle ince filmle kaplanmış malzemelerin yorulma dayanımının artırdığını belirtmişlerdir. Makine parçaları ve yapı elemanlarından çoğu çevrimsel yüklemeler ve titreşimler yüzünden yorulma hasarına uğramaktadır. Genelde yorulma hasarında çatlak başlangıcı yüzeyden başlar. Bu nedenle malzemelerin yorulma dayanımını artırmak için yüzey özellikleri geliştirilmiştir. İstenilen yüzey özellikleri iki temel prensipte geliştirilir. Birincisi ana (taban) malzemenin yüzey özellikleri kimyasal, termokimyasal, ısı ve mekanik işlemle değiştirilir. Diğeri ise ana malzemenin yüzeyine PVD veya CVD yöntemiyle ince film kaplanmasıdır. Bu kaplamalarla malzeme yüzeyinde oluşturulan ince film kaplamalarla malzeme yüzeyinde sert tabaka oluşturulup yüzeyin aşınması ve darbe karşısında çatlama engellenmiştir [14].

Feng ve arkadaşları, PVD ile TiN ve TiCN kaplanmış östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin yüzey özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada kaplamasız numunelerin mikro yapı olarak incelendiğinde mikro yapının ösferritik yapıdan oluştuğu tespit edilmiştir. Kaplamalı numunelerin mekanik özellikler bakımından daha iyi sonuçlar sergilediği belirtilmektedir. Çekme dayanımı bakımından incelendiğinde TiN kaplamalı numunelerin % 16, TiCN numunelerin ise % 22 daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Yapılan çok katmanlı kaplamanın (TiCN) bütün deney sonuçları incelendiğinde daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir [15].

Tönshoff ve arkadaşları, PVD yöntemi ile tek katlı TiN ve çok katlı TiAlN kaplamaların çelikler üzerine uygulanabildiğini belirtmişlerdir. Korozyona karşı TiAlN kaplamalar TiN kaplamalara göre daha koruyucudur. TiAlN kaplamaların aşınma davranışları kuru kesme şartlarında tabakalar arasındaki gerilmeyi dağıtıcı etki yapmaktadır [16].

Prengel ve arkadaşları, sert metal üzerine PVD yöntemiyle tek katlı TiN, TiAlN, TiB<sub>2</sub> ve çok katlı TiAlN kaplamalı takımların kesme işlemlerinde aşınma davranışları ve takım ömürleri incelenmiştir. Takım ömürleri, gri dökme demirin frezelenmesi, Inconel 718 ve A390 alüminyum alaşımının tornalanması ile elde edilmiştir. Gri dökme demirin işlenmesinde tek katlı TiAlN, çok katlı TiAlN kaplı sert metal ve çok katlı TiN/TiCN/TiAlN kaplı sert metal uca oranla daha yüksek takım ömrüne sahip olduğu anlaşılmaktadır. Inconel

718 alaşımının işlenmesinde, çok katlı TiAlN kaplı sert metal uç, tek katlı TiAlN kaplı sert metal uca ve çok katlı TiN/TiCN/TiAlN kaplı sert metal uca oranla daha yüksek takım ömrüne sahip olduğu anlaşılmaktadır [17].

Ranea, ince sert kaplamaların aşınma hızları ile ilgili deneysel çalışmasında, yüksek hız çelikleri üzerine TiC, TiCN, TiAlN ve TiN kaplama yaparak pin-disk üzerinde kuru sürtünme ortamında aşınma hızlarını tespit etmiştir. En düşük aşınma hızını TiAlN kaplı numunelerde gözlemlemiştir. TiAlN' den sonra en düşük aşınma hızına sahip numuneler ise sırasıyla TiC, TiCN ve TiN olduğunu belirtmiştir. TiAlN kaplamanın sertliği ve sürtünme katsayısı düşük olduğundan diğer kaplamalara göre daha düşük aşınma hızına sahiptir. İnce film kaplamaların sertlik ve sürtünme katsayıları aşınmalarında önemli faktördür [18].

Toprak çalışmasında, borlanmış ve PVD yöntemiyle TiN kaplanmış KGDD kam milleri ile kaplamasız ve sertleştirilmiş dövme kam millerinin çalışma performansını incelemiştir. Deneyleri sonucunda bor ve TiN kaplanmış numunelerin diğer numunelere göre daha iyi sonuçlar verdiğini görmüştür. Aşındırma işlemi sonunda numunelerin yüzeyinde oksitlenmelerin olduğunu gözlemlemiştir. Küresel grafitli dökme demirlere TiN kaplamaların yapılabileceği sonucuna varmıştır [19].

Janoss yaptığı çalışmalarda, kaplama yöntemi ve kaplama malzemesinin, yüzeyin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi incelenerek sertlik, sürtünme katsayısı, oksidasyon sıcaklığı, korozyon dayanımı gibi özellikleri karşılaştırılmıştır. En yüksek sertlik değeri PVD ile TiAlN kaplanmış malzemede 4500 HV olarak ölçülürken en iyi korozyon direnci CrN olarak tespit edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise CrN PVD yöntemiyle kaplanmasında elde edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısına sahip kaplama materyali ise PVD yöntemiyle TiAlN kaplanmış numuneler olarak görülmektedir [20].

Öztürk ve arkadaşları, TiN, CrN ve MoV kaplamaların değişik kayma şartları altında tribolojik davranışları arasında kaplamalar arasında kıyaslama yapılmıştır. TiN ve CrN kaplamalar endüstride triboloji uygulamada çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların aksine, MoV kaplamaların tribolojik bir kaplama olarak hem TiN ve hem de CrN' den daha fazla sertliğe sahip olmasına rağmen yaygın değildir. Yapılan bu çalışmada kaplamaların içine bakır katılarak bir çalışma yapılmıştır. Ancak bu yöntem hala geliştirme safhasındadır. Bu çalışmanın sonucunda TiN, CrN ve MoV kaplamanın içine Cu ekleyerek tane büyüklüğü

ve morfolojisini değiştirmiştir. Ancak bu metot ile yalnızca MoN kaplamanın aşınma davranışı ve sürtünme üzerinde faydalı etkiye sahip olmuştur. CrN kaplamanın tribolojik davranışı Cu eklendikten sonra çok fazla değiştirmediği ancak TiN kaplamanın içine Cu eklendiği durumda olumsuz etkisi olduğunu bulmuşlardır. Aşınan yüzeyler 3 boyutlu yüzey profili ve SEM görüntüleri ile incelemişlerdir [21].

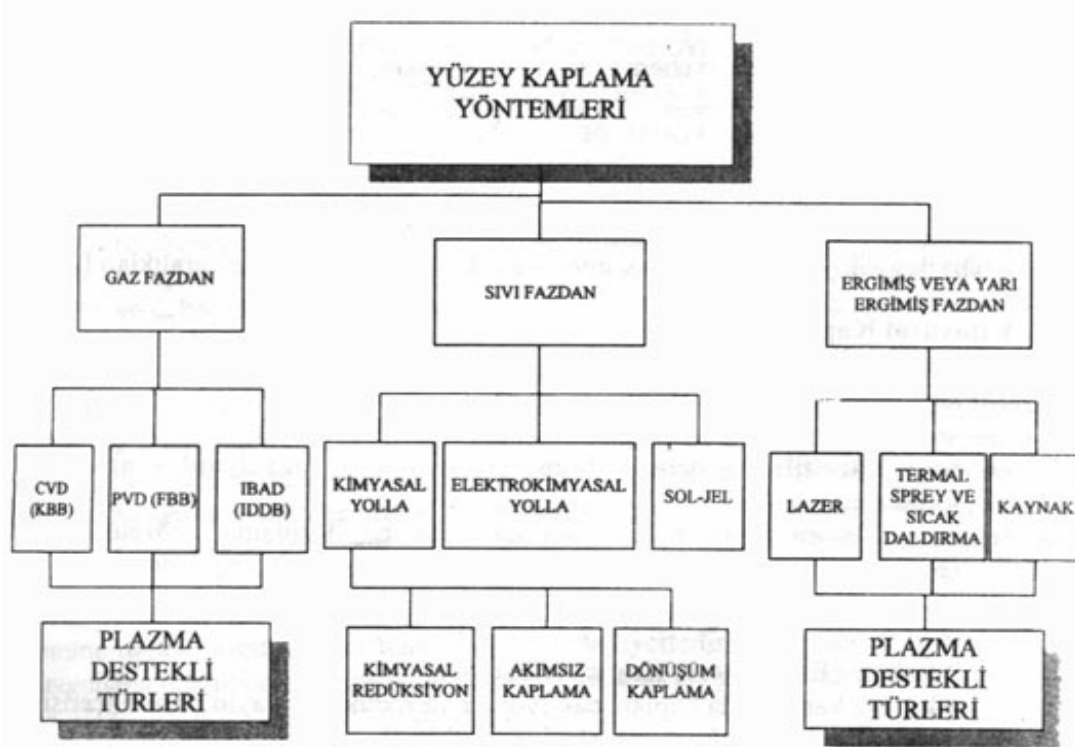
Özgür tarafından yapılan çalışmada, M41 yüksek hız çeliğine 5 farklı PVD kaplama (TiN, TiAlN, CrN, AlTiN ve TiCN ) yapılarak pin on ring test cihazında kuru şartlar altında aşınma performansı araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmada, TiAlN ve AlTiN kaplama diğer kaplamalara nazaran daha iyi aşınma performansı sahip olduğunu saptamışlardır. Diğer kaplamalarda ise hemen hemen benzer aşınma performansına sahip olduğu görölmüştür. PVD kaplama yapılan numunelerin mikro sertlik değerinin artışı ile birlikte aşınma hacminde azalma görölmüştür [22].

Paulitscha ve arkadaşları, CrN ve TiN kaplamalar yüksek sertlik değeri ve yüksek aşınma direncine sahip olması nedeni ile sanayide çok yaygın olarak kullanılan bu kaplamaların mekanik özelliklerini ve yapısını iyileştirebilmek için kaplama esnasında ion bombardımanı (high power impulse magnetron sputtering) HIPIMS yöntemi ile artırarak iyileştirme yapılabileceğini öne sürmüşlerdir. alışmalarında göstermiştir ki HIPIMS yöntemi ile CrN ve TiN tek kaplamalarında da mükemmel sonuç vermiştir ve hem mekanik özelliklerini hem de tribolojik özelliklerinde artışlar gözlenmiştir [23].



## 2. İNCE FİLM KAPLAMA YÖNTEMLERİ

İmalat endüstrisinde kullanılan ince film kaplama yöntemleri Şekil 2.1. de gösterildiği gibi farklı yöntemlerle yapılmaktadır.



Şekil 2.1. Çeşitli kaplama yöntemleri [24].

### 2.1. PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme)

PVD yöntemi yüksek sıcaklıkta, vakum altında bulundurulmuş kaplama malzemesi yüzeyindeki atomların buharlaştırılarak kaplama yapılacak yüzeyde atomik veya iyonik bileşikler şeklinde biriktirilmesi esasına dayanmaktadır.

Makine parçalarının ömürleri ve takımların kullanım süreleri, aşınma nedeni ile sınırlıdır. Günümüzde aynı parçanın gittikçe daha büyük sayıda üretilme talepleri yaygınlaşan otomasyona karşılık aşınma nedeni ile metal işleme makinelerinin durma süreleri, fiyat faktörünü devamlı arttırmaktadır. Takım ömürlerini uzatma için yeni nesil takım çelikleri üretilmektedir. Takımlarda kullanılan malzemeleri, daha pahalı yenileri ile değiştirme yerine, yalnız yüzeyin aşınma özelliklerini geliştirmek ise soruna ekonomik ve pratik bir yaklaşımdır.

Bu alanda sert seramik film kaplamalar ile son yıllarda büyük aşamalar sağlanmıştır. Bu teknolojilerde kullanılan nitrür, karbür, oksit, bor vb. gibi sert seramik kaplamaların, aşınmaya karşı dayanıklı oldukları uzun zamandır bilinmektedir. Bu malzemelerin gevrek ve çok kırılğan oluşları, dolu malzemedeki kullanılmalarını engellemektedir. Ayrıca fiyatları da oldukça yüksektir. Bu tür malzemeler ince seramik film olarak çelikler ve sert metaller üzerine kaplandıklarında yüzey sertliği çok yüksek, kütleli olarak tokluğu yeterli kesici takımların ve kalıpların üretilmesi mümkün olmaktadır [25].

PVD, sac, boru, tüp şekli verilmiş boru tipi parçalar gibi kendini destekleyen şekiller veya filmler ve kaplamaları çökeltmek için kullanılır. Çökeltilerin kalınlığı, angström seviyelerinden milimetre seviyelerine kadar değişebilir. Uygulanan bu tekniklerin, mühendisliğin belirli alanları, kimya, nükleer, mikro elektronik ve bağlı endüstrilerde, dekoratif kullanım amaçlı, çok geniş uygulamaları vardır. Bu tekniklerin kullanımı, modern teknolojinin birçok isteğinden dolayı, çok hızlı bir şekilde artmıştır ve yüksek sıcaklık mukavemeti, darbe mukavemeti, açık görüntü, elektriksel veya magnetik özellikler, aşınma dayanımı, karmaşık şekillerin imal edilebilirliği, yaşam şartlarına uygunluk, fiyat vb. gibi çoğunlukla birbirine uymayan iki veya daha fazla kombinasyonlu özellikler mühendislik malzemelerinden istenmektedir. Tek başına ve tek sütun halindeki malzeme, ileri teknoloji uygulamalarındaki bu gibi istekleri karşılayamaz. Bundan dolayı, meydana gelen çözüm kompozit bir malzemedir, yani, bir çekirdek malzeme ve her bir karakteristiği yerine getirmeyi gerektiren özelliklere sahip bir kaplamadır [19].

PVD, bazı organik malzemeler kadar iyi özelliklere sahip, metaller, alaşımlar, bileşikler ve onların karışımları ve her tip inorganik malzemenin kendiliğinden çökmesini mümkün kılan çok değişik bir teknolojidir. Çökme hızları, dakikada 10-750 000 Å arasında değişebilir. Daha yüksek çökme hızları aşağı yukarı son 20 yılda elektron ışın ısıtıcı kaynakların geliştirilmesi ile elde edilebilmiştir. İnce ve kalın filmler arasındaki kalınlık sınırları, bir dereceye kadar serbest alınabilir. Çoğunlukla 1000 Å (µm) bir kalınlık, ince ve kalın filmler arasındaki sınır olarak kabul edilmektedir. Filmin kalın veya ince olduğunu belirleyen en son bakış açısı, filmin yüzeysel özelliklerinin mi yoksa hacimsel özelliklerinin mi ortaya çıktığına bağlı olmaktadır [26].

Genelde, çökeltme işlemleri iki kısımda incelenebilir.

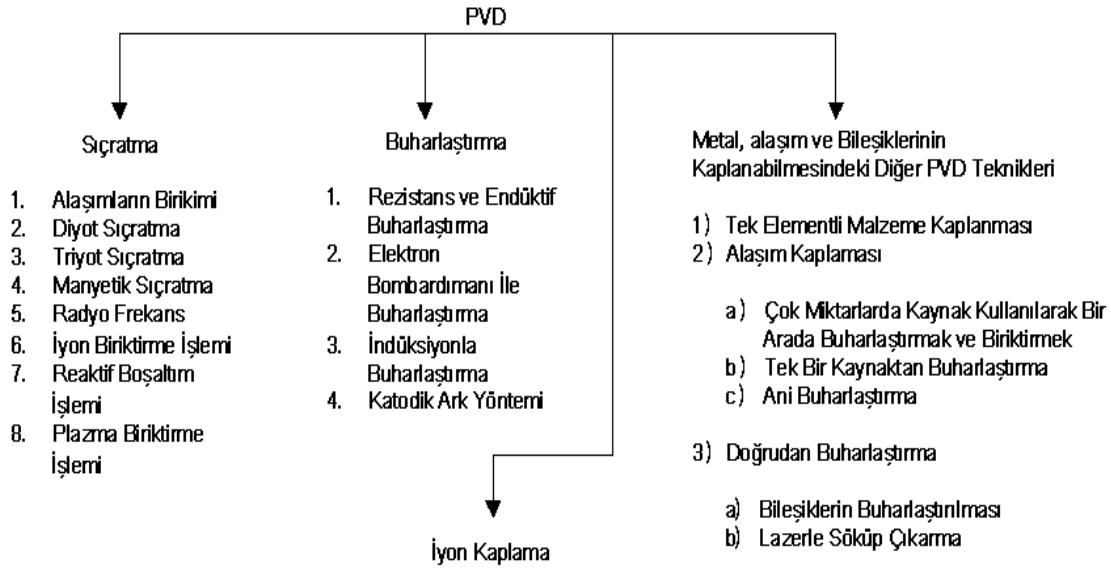
- 1) Plazma spreyleme, ark spreyleme, tel infilaklı spreyleme, patlama tabancalı kaplamadaki gibi damlacık transferini kapsayan işlemler,
- 2) Buharlaştırma, iyon kaplama ve püskürtme gibi PVD, CVD ve elektro-çökeltme de olduğu gibi atomlar arası transferi kapsayan işlemler.

Damlacık transferi işlemlerinin en büyük dezavantajı son buhar biriktirme özellikleri etkileyen gözeneklilik oluşumudur. Herhangi bir çökeltme oluşumunda üç aşama vardır.

- 1) Birikmiş olan malzemenin analizi,
  - Yoğuşma fazından (katı ve sıvı) buhar fazına geçiş,
  - Bileşiklerin birikmesi için, vakum odası içine buhar veya gaz olarak girebilen bazı bileşiklerin elemanları arasındaki reaksiyon.
- 2) Kaplama malzemesi ve kaplanacak malzeme arasındaki buharların taşınması,
- 3) Film çekirdeklenmesi ve büyümesini takiben buharların (ve gazların) yoğuşması,

Çeşitli atom transferi işlemleri arasında belirli farklılıklar vardır. Elektro-çökeltme ve kimyasal buhar biriktirme işlemlerinde, yukarıda bahsedilen üç aşamanın hepsi birlikte kaplanacak malzeme de meydana gelir ve bu adımlar birbirinden bağımsız olarak kontrol edilemez. Bu durumda, kaplanacak malzeme sıcaklığı (CVD' de biriktirme hızı sabit tutulduğunda) gibi bir işlem parametresi seçimi yapılırsa, diğer parametrede meydana gelen mikro yapı ve özellikler belirlenir. Diğer yandan, PVD işlemlerinde bu aşamalar (özellikle 1. ve 3. adımlar) birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir ve bundan dolayı içyapı ve özellikler veya çökeltme hızı kontrolünde çok daha büyük esneklik derecelerine sahiptirler. Bu göz önünde bulundurulması gereken çok önemli bir özelliktir [27].

Fiziksel buhar biriktirme yöntemleri 3 ana başlıkta incelenmektedir. Bu başlıklar doğrultusunda kaplama yöntemleri Şekil 2.2. de şematik olarak belirtilmiştir.



**Şekil 2.2.** Fiziksel buhar biriktirme (PVD) metotları [3,1].

### 2.1.1. PVD İle Yapılan Kaplamalara Sistem Değişkenlerinin Etkisi

PVD yöntemi ile yapılan kaplamalar belli bir kristal yapısına sahiptirler. Kaplamanın gelişimi üç boyutlu bir büyüme şeklindedir [28].

Kaplamanın yapısını etkileyen temel değişkenler ise;

- Kaplanacak parçanın yapısı,
- Kaplama sıcaklığı,
- İyon kaplama yönteminde atom enerjileri,
- Kaplama kalınlığı,
- Uygulama basıncıdır.

Kaplama tek bir tabaka üzerine oluşmaya başlayıp devamlı büyüyen bir yapıya sahiptir. Film oluşumu, yüzeydeki bazı bölgelerde çekirdek oluşumu, gelişimi ve bu olayın tekrarı şeklinde gerçekleşmektedir.

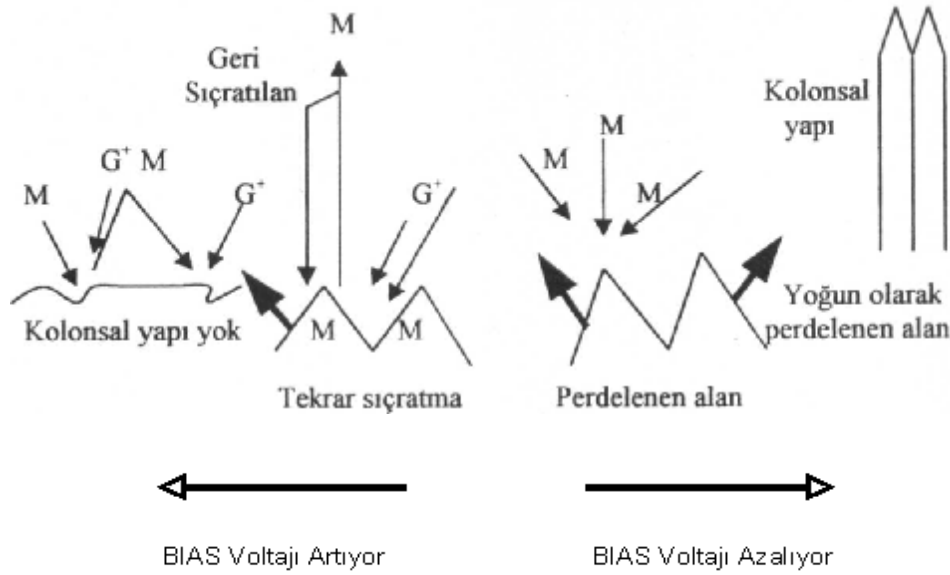
Bu teknikle elde edilen birçok metal, alaşım ve seramik kaplamaların mikro yapıları hakkında birçok çalışma yapılmıştır. İlk yapısal model Movchan ve Demchyhishin tarafından oluşturulmuştur [26].

Bu model daha sonra Thornton tarafından geliştirilmiştir. Movchan ve Demcyhishin yaptıkları tek metal kaplama çalışmaları sonuçlarından yola çıkarak bu modeli oluşturmuşlardır. Thornton modelindeki geçiş bölgeleri yoktur. Thornton modelinde sıçratma yöntemindeki Argon basıncı ve sıcaklığın etkisi ile kaplama yapısındaki değişim sembolize edilmiştir. Bu model sıçratma yöntemi dışındaki yöntemlere de Argon basıncı dikkate alınmadan ya da atom enerjilerinin de etkisi ele alınarak oluşturulan bir model yardımı ile uygulanabilir.

Düşük sıcaklıklarda film az yoğunlukta oluşan çekirdeklerin incelik büyümesi şeklinde olmaktadır ve oluşan çekirdekler oluşacak diğer çekirdeklere perdeleme etkisi yapmaktadır. Bu yüzden meydana gelen porozitenin dışında, kaplama yüksek dislokasyon yoğunluklarına ve yüksek kalıcı gerilmelere sahiptir. Bu tip yapı " Botryoidal " olarak da anılmaktadır [28].

İyon kaplamada kullanılan BIAS voltajı, kaplamanın oluşumu sırasında çok önemli yapı değişmelerine yol açmaktadır. Uygulanan BIAS voltajı sayesinde gelişen kolonsal yapının sivri bölgeleri iyon bombardımanı sayesinde sıçratılmakta ve bu sivri bölgelerin sebep olduğu perdeleme etkisini yok etmektedir. Bu sayede daha yoğun bir kaplama yapısı elde edilmektedir. Şekil 2.3.' de BIAS voltajının kaplama yapısına etkisi gösterilmiştir [26].

Kaplanacak malzeme atomlarının iyonizasyonu ve atomların iç enerjilerinin yükseltilmesinin kaplama yapısı ve kaplama koşullarını olumlu etkilediği bilinmektedir. Bu sayede daha yoğun bir kaplama elde edilebilmekte ve daha düşük kaplama sıcaklıklarında çalışılabilmektedir. Atomların iyonizasyonu ve iç enerjilerinin artırılması atomların parça yüzeyine ulaşırken izledikleri yol üzerinde plazma alanı oluşturması ile gerçekleşmektedir. Plazma oluşturma koşulları ve plazma alanında gerçekleşen olaylar kaplama kalitesini ve yeni kaplamalar geliştirmesi açısından faydalı olabilmektedir.



$G^+$  : iyon

M: Kaplanacak Malzeme Atomu

**Şekil 2.3.** BIAS voltajının kaplama yapısına etkisi [3]

Plazma ancak belirli basınç değerleri aralığında oluşturulabilmektedir ki bu basınç değerleri PVD ve CVD yöntemlerinde plazma alanının kullanılmasını mümkün kılar. Karşılıklı yerleştirilmiş iki elektrot arasında uygulanan potansiyel sayesinde iki elektrot arasında sağlanan elektron akışı ve bu ortamdaki atomlar plazma alanını oluşturmaktadırlar. Etkili bir plazma alanı oluşturmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [5].

Plazma alanında ilerleyen elektronlar ile atomların çarpışmaları sonucu atomlar enerji yüklenmeye başlarlar, bu enerji birikimi belirli bir değeri aşınca bu atomdan bir elektron fırlar ve atom pozitif yüklü hale geçer. İyonize olmuş atomlar en yüksek iç enerji değerlerine sahiptirler. Plazma alanında sadece elektron - atom çarpışmaları değil atom - atom çarpışmaları da olmakta ve enerji transferi değişik şekillerde gerçekleşebilmektedir. Plazma alanında gerçekleşen temel reaksiyonlar aşağıdaki Tablo 2.1 'de gösterilmiştir [26].

**Tablo 2.1.** Plazma bölgesinde oluşan temel reaksiyonlar [26].

Uyarma	$A_2 + e^- \rightleftharpoons A_2^\pm + e^-$
Dissosiasyon (ayrışma)	$A_2 + e^- \rightleftharpoons 2A + e^-$
Elektron Bağı	$A_2 + e^- \rightleftharpoons A_2$
Ayrışma Bağı	$A_2 + e^- \rightleftharpoons A + A^-$
İyonizasyon	$A_2 + e^- \rightleftharpoons A_2 + 2e^-$
Foto emisyon	$A_2^\pm \rightleftharpoons A_2$
Ayrılma	$A + B_2 \rightleftharpoons AB + B$

### 2.1.2. Ark PVD Yönteminde Sıvı Damlacık Oluşum ve Taşınım Mekanizmaları

Droplet oluşumunda kaplama yapılacak malzemenin yüzey gerginliklerini etkilemektedir. Ark PVD yönteminde, kaplama sırasında sıvı damlacıkların (droplet) oluşumu ve bu damlacıkların kaplanacak parça yüzeyine yapıştıkları bilinmektedir. Bu sıvı damlacıklar kaplama kalitesini birçok açıdan olumsuz etkilemektedir. Sonuçta droplet oluşum ve taşınım mekanizmalarının bilinmesi kaplama kalitesini geliştirmek açısından önemlidir.

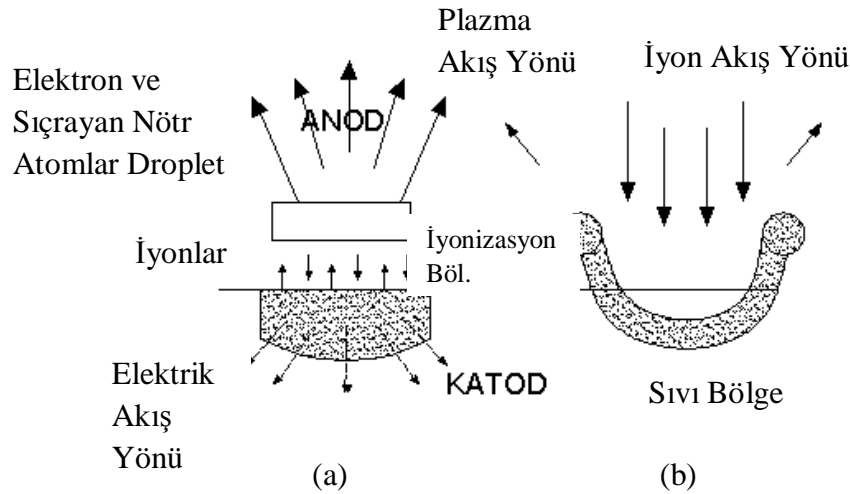
Droplet oluşumu ark izi (spotu) ile katot yüzeyinde buharlaştırma işlemi sırasında oluşmaktadır. Ark spotunun ilerlemesi sırasında droplet oluşumu hakkında iki görüş mevcuttur [26].

1. Sabit veya yan sabit model
2. Patlama modeli.

#### 2.1.2.1. Sabit veya Yarı Sabit Model

Bu modele göre ark spotunda Şekil 2.4.' de görüldüğü gibi ayrı bölgeler mevcuttur katot yüzeyinde çok küçük bir alan ergimektedir. Bu bölgede çok güçlü bir buharlaşma ve elektron yayını oluşmaktadır. Ergiyen yüzeyin üzerinden ise elektrik alanı ile katodun ters yönüne yönelen elektronların bulunduğu kısa bir bölge bulunmaktadır. Bu bölgenin üzerinde ise elektronların metal atomları ile çarpışarak enerji yüklendiği ve iyonize olduğu iyonizasyon bölgesi bulunmaktadır.

İyonizasyon bölgesinden metal iyonlarının bir kısmı kaplanacak parça üzerine yönlendirken küçük bir kısmı ise katot üzerine yönlenebilirler. McClure' a göre bu iyonlar katot yüzeyindeki sıvı bölgeye çarptıklarında Şekil 2.4.' de görüldüğü gibi merkezden dışarı doğru azalan bir basınç farkı oluşmaktadır. Oluşan bu basınç farkı sonucunda sıvı metal damlacıkları metal katot yüzeyinden kopmaktadır [26].



**Şekil 2.4. a) Sabit katot spot modeli, b) Sıvı metal damlacıkların katot yüzeyinden kopma mekanizması [3].**

Diğer bir görüşe göre, malzemede oluşan çok yüksek termoelastik gerilmeler sonucu ark spotunun yakınlığında çok yüksek ( $10^5$  K/cm) sıcaklıklar oluşmakta ve yüzeyde ergime gerçekleşmekte ve sıvı metal damlacıkları yüzeyden kopmaktadır. Bu mekanizma yüksek ergime sıcaklıklarına sahip katot kullanımı sırasında meydana gelen droplet oluşumunu açıklayabilmektedir.

### 2.1.2.2. Patlama Modeli

Bu modelde katot yüzeyinde elektron yayılımının arttığı çok az sayıda da olsa yükseltilerin mutlaka bulunduğu varsayılmaktadır. Bu bölgelerde elektron geçişinin çok yüksek olması bölgenin hemen ısınmasına ve aniden genişleyerek patlamasına yol açmaktadır. Bu patlamalar yüzeyde yeni yükseltilerin ve patlamaların oluşumuna öncülük etmektedirler. Modele göre oluşan dropletler bu yükseltilerden veya patlama merkezine yakın bölgelerden kopmaktadır [25].



### 2.1.3. PVD Ark Buharlaştırma Tekniği

Alçak gerilim ve yüksek akımda negatif kutuplu katot ve pozitif kutuplu anot arasında gaz ortamında ve magnetik alanda oluşturulan ark elektrik özelliklerini kaybetmeksizin vakum ortamında katot üzerine yönlendirilir. Bu ark katot üzerinde mikron mertebesindeki bir noktaya odaklanır ve bu noktanın buharlaşması sağlanır. Bu nokta buharlaştırıldıktan sonra ark başka bir noktaya sıçratılır ve 200 sn civarında bir sürede ark spotu tekrar oluşturulur. Katot üzerinde yüksek hızda oluşan bir ark ışığı gözlenir. Böylece kati haldeki katot metali buharlaştırılarak aynı anda iyonize edilir ve katot önünde plazma içinde (elektrik alan yardımıyla) yüksek hız kazandırılarak kaplanacak malzeme üzerine gönderilir. Ark tekniğinde, katot yüzeyden erozyona uğrar [28].

PVD prosesleri bazı üstün özellikleri sebebiyle kaplama teknolojisinde önemli bir yere sahiptirler. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir [28];

- a) PVD teknolojisiyle teorik olarak tüm metal, alaşım, seramik ve polimer kaplamaları elde etmek mümkündür. Yani hemen hemen her kaplama, her taban malzeme üzerine biriktirilebilir,
- b) PVD teknolojisiyle kaplamaların yanı sıra; sac, folyo, boru gibi parçalar da biriktirilebilir,
- c) Kaplamalar mükemmel yapışma özelliğine sahiptirler,
- d) Biriktirme hızı aralığı oldukça geniştir; bu nedenle yüksek hızda üretim yapılabilir,
- e) Kaplama sonrası yüzey pürüzlülüğü, taban malzemenin yüzey pürüzlülüğüyle yaklaşık aynı olduğu için, kaplama sonrası zımparalama ve parlatma gibi yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulmaz,
- f) PVD proseslerinin hiçbirinde, çevre problemlerine yol açan zehirli atıklar oluşmaz,
- g) Kontrollü vakum ortamı ve saf kaynak malzemelerinin kullanılması nedeniyle yüksek saflıkta birikimler elde edilir.

Bu avantajlarının yanı sıra PVD' nin bazı sınırlamaları da vardır bunlar;

- a) Bazı istisnalar ile polimer malzemelerin çökme yetersizliği,
- b) İşlem ekipmanının yüksek derecede teknolojik olması ve bundan dolayı daha yüksek ilk yatırım maliyeti [27].

### 3. BAŞLICA KAPLAMA MALZEMELERİ

#### 3.1. Titanyum Nitrür (TiN)

Dünyada aşınmaya karşı yapılan kaplamaların başında TiN gelmektedir. Bu kaplamanın avantajları ve özellikleri şöyle sıralanabilir.

- Yüksek sertliği 2400-3000 HV ve ısıl geçirgenliği düşük olması nedeniyle talaşın takıma ısı transferini engeller ve takımın ısınarak, yumuşamasını önler. Krater oluşumunu ve serbest yüzey aşınmasını minimuma indirir. Bu sebep ile kesme ve ilerleme hızları % 20 kadar arttırılabilir [29,30,31].
- Kimyasal stabilitesi yüksek bir malzeme olduğundan iş parçasına yapışmaz, kayganlık özellikleri yükselir. Kesme anında uç birikintilerinin büyümesini engelleyerek iş parçası yüzeyinin temiz çıkmasını sağlar.
- Sürtünme katsayısı düşük olduğu için kesme ve sürtünme kuvvetleri azalır ve buna bağlı olarak takımın ısınmasını önleyerek ve plastik deformasyonu geciktirir [29],
- Kimyasal reaksiyonlara girmediğinden iş parçasının çalışma yüzeyleri daha uzun süre aktif kalır. Özellikle paslanmaz çelik iş parçalarında takımdan, iş parçasına demir transferi olmadığı için paslanmayı önler.
- Kaplama yüzeye mükemmel yapıştığından sıvama kenarlarında ve kesici kenarlarda kaplama dökülmesi olmaz. Yüksek tonajlı preslerde dahi yüzeyden dökülmezler [29].
- Kalınlığı 1-4 µm arasında olduğunda takımların toleranslarını değiştirmezler. Kaplama sonrası ilave bir işlem gerektirmeden takım kullanılır.
- Kaplamalar ince olduklarından ısıl genleşme katsayıları takımların ısıl genleşme katsayılarını kadardır. Bu nedenle ısıl genleşme ve eğilme ile takım yüzeyinden dökülmezler.
- Renkleri ana malzeme renklerinden farklı olması nedeniyle takımın aşınma miktarı kolaylıkla görülebilir [25].
- TiN kaplama, takımların, kalıpların ve diğer makine elemanlarının aşınmalarını engellemesine karşın her türlü aşınma probleminin çözümü değildir. PVD teknikleri ile daha başka birçok metal ve metal bileşiği kaplama yapmak mümkündür. Bu kaplamaların TiN' in fiziksel özelliklerini taşıması yanı sıra ayrıca ilave değişik özelliklere de sahiptirler.

Tablo 3.1' de görüldüğü gibi TiN ile kaplanmış ve kaplanmamış malzemelerin özellikleri, kullanım alanları ve performansı gösterilmiştir [26].

**Tablo 3.1.** TiN ile kaplanmış ve kaplanmamış malzemelerin sonuçları [1].

Sertlik	3400±200 HV
Kalınlık	3±0.5 µm
Kaplama Sıcaklığı	250-500°C
Oksidasyon Sıcaklığı	400°C
Renk	Altın Sarısı

**Tablo 3.2.** TiN kaplamaların kullanım alanları ve performansı [1].

Takım veya Kalıp	Takım veya Kalıp Çeliği	İş Parçası	Kaplamasız Sonuç	Kaplamalı Sonuç
Matkap	DIN 1.2343	Döküm	30-40 Delik	300 Delik
Klavuz	DIN 1.2343	Boru	80-100 Delik	3500 Delik
Klavuz	DIN 1.2343	Pik Döküm	1 Vardiyada 3 Değişirme	1 Vardiyada 1 Değişirme
Broş	ASP 30	Çelik Döküm	1250 Broşlama	— 4500Broşlama
Form Kalemi	DIN 1.3207	Otamat Çeliği	1 Vardiyada 2 Değişirme	2 Vardiyada 1 Değişirme
Kanal Freze	DIN 1.2343	Çelik Döküm	% 80 ömür, %40 hız artımı	
Azdırma	M2 DIN 1.3343	D. Çelik	45 Dişli	1357 Dişli
Fellow,Lorenz Çakısı	ASP 30	Çelik Döküm	6-7 Kat ömür artışı	
Azdırma Çakısı	ASP 30	Çelik Döküm	İlk kaplamada 8 kat Bileme ile 3 kat ömür artışı	
Derin Sıvama Kalıbı	DIN 1.2080	DKP Saç	20 Kat ömür artışı	
Sıvama Kalıbı	DIN 1.2080	DKP Saç	Kaplama ile sarma önlendi	
Kesme Zımbası	DIN 1.2343	Paslanmaz	4 Kat ömür artışı	

### 3.2. Titanyum-Alüminyum Nitrid (TiAlN)

Titanyum Nitrid tabakaya alüminyum ilavesi ile sert tabakanın sertliğinin artırılmasının (3600 HV) yanı sıra kaplamanın oksitlenmeye karşı mukavemeti de artar. Bu kaplama ile kesici takımlarda yüksek kesme hızlarında TiN' e oranla daha iyi verim elde edilmektedir. Kaplama tabakasının özellikleri alüminyum katkı miktarına göre değişmektedir. Alüminyum oranı yükseldikçe kaplamanın sertliğinin yanı sıra yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Bu katkı miktarı takım cinsine göre belli bir sınıra kadar arttırılmalıdır. Sürekli kesme işlemlerin de kaplama yüzeyinde oluşan  $Al_2O_3$  tabakası nedeniyle düşük ısı iletkenliği özelliğini almakta ve kesici takımın daha az ısınmasına neden olmaktadır. Bu nedenle kesici takım üzerine transfer olan ısı miktarı azalmaktadır. Buda kesici takımın daha yüksek kesme hızlarında çalıştırılmasını sağlamaktadır. Sürekli talaş kaldıran takımlarda TiN kaplamaya göre % 70 oranında yüksek ömür elde edilmektedir. (TiAl)N kaplamalar, çok katlı (Multilayer) olarak ta yapılmakta ve yüksek performans sağlanmaktadır [32].

### 3.3. Krom Nitrid (CrN)

Kağıt, tekstil, plastik ve metal enjeksiyon endüstrisinde olduğu gibi abrazif aşındırıcı etkiler mevcut ise kaplama kalınlığı önem kazanır. TiN kaplamaların kalınlıkları  $5\mu m$  üstüne çıktığı zaman iç gerilimler artmaktadır. Bu nedenle kalınlıkları maksimum 5-7  $\mu m$  kalınlığa kadar yapılabilmektedir. CrN kaplamalarda ise iç gerilimlerin düşük olması nedeniyle 10  $\mu m$  kalınlığa kadar çıkılabilmektedir. Bu kaplamaların sertlikleri 2400-2800 HV arasındadır. Yüzey kaliteleri ve yüzey pürüzlülüğü TiN kaplamalardan daha iyidir. 700 °C kadar olan çalışma sıcaklıklarında stabilizesini kaybetmez. Kimyasal stabilizesi TiN kaplamadan daha yüksektir, asidik ve bazik ortamlarda kesinlikle çözülme göstermezler. CrN tabakaların tutunma mukavemetleri düşük sıcaklıklarda TiN' e oranla daha düşüktür. Bunun yanında abraziv aşınmaya karşı yüksek mukavemet sergilerler ve kalın kaplanabildiklerinde TiN' e göre daha iyi korozyon mukavemeti gösterirler. Tablo 3.3.' de CrN kaplamanın özellikleri, Tablo3.4. de CrN kaplamaların kullanım alanları ve performansları gösterilmektedir.

CrN kaplamalar özellikle;

- a) Sıvama kalıplarında,

- b) Pirinç, bakır ve demir boruların imalatında kullanılan çekme matrislerinde,  
 c) Metal enjeksiyon kalıplarında,  
 d) Plastik ve kâğıt sanayinde kullanılan bıçak ve makaslarda, kullanılmakta ve yüksek performans göstermektedirler [31].

**Tablo 3.3.** CrN ile kaplanmış ve kaplanmamış malzemelerin sonuçları [1]

Sertlik	2800±200 HV
Kalınlık	4±0.5 µm
Kaplama Sıcaklığı	200-500°C
Oksidasyon Sıcaklığı	700°C
Renk	Gümüş

**Tablo 3.4.** CrN kaplamaların kullanım alanları ve performansı [1].

Takım veya Kalıp	Takım veya Kalıp Çeliği	İş Parçası	Kaplamasız Sonuç	Kaplamalı Sonuç
Metal Enjeksiyon Kovanı	DIN 1.2365	Alüminyum	800 Baskı	2700 Baskı
Metal Enjeksiyon kalıbı	DIN 1.2365	Alüminyum	Kaplama ile yapışma önlendi	
Kalibrasyon Zımbası	DIN 1.2080	Döküm	20 Civarında	2500 Civarında
Kâğıt Kesme Bıçağı	DIN 1.2080	PVC	15 Kat ömür artışı	
Kâğıt Kesme Bıçağı	DIN 1.2080	Karton	4 Kat ömür artışı	
Planya Bıçağı	DIN 1.2080	Ağaç	4 Kat ömür artışı	
Derin Sıvama Kalıbı	DIN 1.2080	DKP Saç	20 Kat ömür artışı	
Sıvama Kalıbı	DIN 1.2080	DKP Saç	15 Kat ömür artışı	
Sıvama ve Form Kalıbı	DIN 1.770	Boru	Kaplama ile sarma ve çizik önlendi, kalıp ömrü 20 kat arttı	

### 3.4. Titanyum Karbonitrür (TiCN)

Metal nitrür yapıya karbon eklendiğinde sertliği yükselir. Bu nedenle değişik uygulamalarda karbonitrür sert seramik filmler başarı ile kullanılırlar. Bunların başında TiCN sert seramik filmler gelmektedir. Bu tabakalar karbon içeren gazların kaplama sırasında azot gazı ile birlikte vakum ortamına gönderilmesi ile elde edilirler. C/N oranı tabakanın özelliğini belirler.

TiCN sert seramik filmlerin sertlikleri 3500 HV değerine kadar çıkar. Yüzey pürüzlülükleri ve sürtünme katsayıları TiN'e göre daha düşüktür. Bu avantajlarına karşın, ısıl iletkenliklerinin TiN'e ve TiAlN'e göre daha yüksek olması dezavantajdır.

TiCN sert seramik filmler yüksek hızda çalışan ve kesikli talaş çıkartan takımlarda yüksek performans sağlarlar. Özellikle parmak frezelerde diğer kaplama çeşitlerinden daha iyi sonuçlar vermektedirler[5].

### **3.5. Zirkonyum Nitrür (ZrN)**

ZrN kaplamalar endüstriyel alanda yaygın uygulaması olan diğer PVD kaplamalar ile kıyaslandığında, düşük sürtünme katsayısına (~0,4) ve yüksek sertliğe (2500-2700 HV) sahip olmakla birlikte ve kötü adhezyon (yapışma) mukavemeti sebebiyle yaygın uygulama alanına sahip değildir. Genel kullanım alanı demir dışı yumuşak metal ve alaşımların (alüminyum, bakır, bronz, pirinç vb.) iyi soğutmalı ortamlarda kesilmesi ve talaşlı şekillendirilmesi prosesleriyle kısıtlıdır [33,34,35,36].

### **3.6. Dupleks Kaplama Yöntemleri**

Bu tür kaplama yöntemleri (CrN/TiN-TiN/CrN) belirlenen malzeme üzerine en az iki kat olmak suretiyle kaplama yapılmaktadır. Bu kaplamalarda kaplama kalınlığı 6 µm ye kadar ulaşabilmektedir. Kaplamanın diğer ince film kaplamalara göre avantajı daha kalın bir film tabakası oluşturularak kullanılan malzeme ömrünün daha fazla artırılmasıdır. Bu tür kaplamalar daha fazla metal enjeksiyon kalıplarında kullanılmaktadır.

Çok katlı kaplama yönteminde film kalınlığı 4-6 µm, sertlik 2800-3200 HV, oksidasyon sıcaklığı 800 °C ve sürtünme katsayısı da 0,55 tir [37].

## 4. KAPLAMANIN İMALATA GETİRDİĞİ AVANTAJLAR

### 4.1. Talaşlı İmalat İşlemlerinde Kullanım Avantajları

Hemen hemen tüm talaşlı imalatta yüzey kaplamalarından faydalanılmaktadır. Delme, kılavuzlama, kesme, diş açma gibi işlemlerde yüksek performanslar elde edilir. Kesme ve ilerleme hızlarındaki artış ise iş parçası malzemesine bağlı olarak % 30-40 artma gösterir. Otomatik tezgâhlarda kullanılan takım ömürlerinin artması, tezgâh durma sürelerini azaltması sonucunda birim zamanda işlenen parça sayısı arttırılabilir. Özellikle CNC tezgâhlarda kullanılan kesici kalemlerin ömür artışı tezgâhin durma süresini minimuma indirmektedir. Kesme ve form kalemlerinde krater oluşumu ve serbest yüzey aşınması önemli bir faktördür. Bu kalemlerde kaplama ile % 150'ye varan ömür artışı sağlanmakta ve bileme sonrası % 70 mertebesinde ömür artışı devam etmektedir. Bu sayede otomat tezgâhlar uzun süre ayar gerektirmeden çalıştırılmaktadır [26].

Kaplama yapılmış takımların verimlerinin düşük olma nedenlerinin başında kaplamadan kaynaklanan droplet gelir. Droplet hemen hemen tüm takımlarda takım kırılmasına neden olabilir.

Kılavuzlarda droplet nedeniyle problem yaşanmaktadır. Kesme yüzeyinin fazla olması ve droplet nedeniyle sürtünmenin fazla olması takımların kırılmalarına neden olmaktadır. Magnetronspattering ve odaklamalı ark teknikleri ile yapılan kılavuz kaplamalarında, iyi bir kaplama ile % 800' lere varan ömür artışları sağlanabilir (özellikle paslanmaz çeliklerde ve çelik dökümlerde) [26].

Azdırma çakılarının ve broşlardaki kırılma ve çalışmama nedenlerinin başında da droplet gelir. İyi bir kaplama ile azdırma çakılarında hız iki katına çıkarılabilir (ilerleme hızı sabit). Kaplanmış azdırmalarda ilk kaplama sonrası 10 kat civarında ömür artışı olur ve bileme sonrası bu artış 3-4 kat arasında gerçekleşir. Broşlarda kaplama ile iş parçasının malzemesine bağlı olarak 3-8 kat oranında ömür artışı sağlanır ve iş parçasının yüzey kalitesi artar.

Dişli çark açılan çakılarda TiN kaplama ile çok iyi bir ömür artışı sağlanmaktadır. Bunun yanında kesme ve ilerleme hızları arttırılabilmektedir. Bu da özellikle otomotiv

sanayinde imal edilen dişlilerde % 40'a varan bir tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca bilinen takımın tekrar kaplanmaları halinde kesme kapasiteleri değişmemekte ve bileme miktarları önemli derecede azalmaktadır [27,38].

#### 4.2. Kalıplarda Kullanım Avantajları

İnce film sert kaplamalar (PVD), kesme kalıplarında dişi kalıbın aşınmasını engellemekte ve zımbaların kırılmalarını % 600 mertebesinde engellemektedir. Çizik ve çapaklar minimuma indirilir, bu sadece mamulün kalitesi artmaktadır.

Bükme, sıvama ve form kalıplarında iyi seçilmiş bir kaplama cinsi ile 80 kata varan ömür artışları sağlanılmaktadır [26].

Kaplama kalıplarının avantajları şöyle sıralanabilir.

- Aşınmaya karşı yüksek bir mukavemet sağlar,
- İşlem sırasında parçanın kalıba yapışmasını ve sarmasını engeller
- Sürtünme katsayısını azaltarak presin daha rahat çalışmasını sağlar,
- Çekme matrislerinde mükemmel yüzey kalitesi verir,
- Kalıbın tolerans dışına çıkma süresini 6-8 kat uzatır [27,38 ].

Alüminyum ekstrüzyon kalıplarında erkek zımbanın kısa sürede aşınması kaplama ile giderilebilir. Aşınmadan kaynaklanan malzeme kaybı ve durma zamanları minimize edilir.

#### 4.3. Metal Enjeksiyonunda Kullanım Avantajları

Günümüzde enjeksiyon metodu ile Alüminyum, Çinko, Bakır, Kurşun ve bunların alaşımları kullanılarak büyük miktarlarda imalatlar yapılmaktadır. Metal enjeksiyonun da iki kritik nokta mevcuttur. Erimiş metalin yüksek hızda kalıba veya matrise gönderilmesi ve metalin sertleşmesi için belli bir süre basınç altında tutulması nedeniyle kalıp yüzeylerinde, kalıp parçalarında ve yolluklarda yanma çatlakları ile birikimler oluşur. Yanma çatlakları ve birikimler nedeniyle kalıbın üst yüzey pürüzlülüğü artar ve enjekte edilen malzeme bu çatlaklara girerek yapışmayı başlatır. Mamul malzeme yüzeyi pürüzlü çıkar. Ultra sert ince film kaplamalar ile bu yapışma minimuma indirilir. Küçük yapışmalar dahi olsa bunlar



çalışma anında silme ile kolaylıkla yok edilir. Kaplama ile erozyon geç başlar ve yapışmaya engel olunur [27].

Özellikle CrN kaplama ile kalıp ve yolluklarda 2-3 kat ömür artışı sağlanmaktadır. Malzemenin kalıba yapışmaması için sürülen yağ periyodu (sürme zamanı) uzatılır. Kalıp yüzeyinde oluşan yağ tabakası çok kolay temizlenir.

Toz metal ve toz seramik preslemelerde kullanılan pres kalıplarında kaplama ile yüksek bir ömür artışı sağlanmaktadır [38].

#### 4.4. Plastik Enjeksiyonda Kullanım Avantajları

Bu alanda kullanılan kalıplarda temel iki problem bulunur. Bunlar;

1. Aşınma
2. Korozyon

Plastiğin içine katılan dolgu maddeleri erozif ve kimyasal abrasif malzemelerdir. Özellikle cam tozu ve kuvarz tozu gibi abrasif dolgu maddeleri kullanıldığında bu pahalı kalıpların kullanım ömürlerini azaltmakta ve kalıp aşınarak çabuk apak yapmaktadır. Nitrasyon ve sert krom kaplama büyük bir fayda sağlamamaktadırlar.

Bakalit enjeksiyon kalıplarında CrN kaplama ile 6 kata varan ömür artışı sağlanmaktadır [26].

Cam, kuvarz, kömür ve mineraller gibi katkı malzemeleri %80 mertebesine kadar katılabilir. Bu durumda çok erozif ve abrazif aşındırıcıdırlar. Bu kalıplarda en büyük aşınma akışta daralan bölgelerde ve itici yuva ağızlarında oluşur.

Termoplastiklere katılan yanmayı engelleyici katkılar, reçineler ve lastikli mamuller kalıp yüzeylerinde korozyonu arttırırlar. Baskı esnasında sıkışan gaz hava tahliye kanallarında yanma nedeni ile aşınmaya neden olur. Basılan parçaların kalıptan çıkarılması büyük problem olabilir, mesela mamul kalıba yapışır [26].

TiN ve CrN kaplamalar bu durumlarda çok iyi neticeler vermektedir. Özellikle sert PVC pencere profili çekme kalıplarında CrN ile yapılan kaplamalarda 3 kat ömür artışı sağlanmakta ve kaplanmış kalibrasyon kalıplarında titreşim olmamaktadır.

#### **4.5. Tekstil Sanayinde Kullanım Avantajları**

Makinelerinde hızların her geçen gün artması tekstil malzeme ile kontak yüzeylerde büyük aşınmalar olabilmektedir. TiN ve CrN kaplamalarla bu aşınmalar büyük ölçüde engellenmektedir. TiN kaplanan iplik kesme bıçaklarında 4-6 kat ömür artışı sağlanmaktadır [39].

## 5. PVD TEKNİĞİNİN UYGULAMA ALANLARI

PVD ile yapılan kaplamalar, kaplamanın geniş sıcaklık aralıklarında yapılabilmesi, kaplanacak parçanın bileşiminin önemli olmaması kompleks şekillerin üniform olarak kaplanabilmesi ve bunun gibi avantajlarından dolayı yaygın kullanım alanları bulmuştur. PVD kaplamalarda kaplama yapılacak malzemelerin istenilen bölgelerine kaplama imkanı mevcuttur.

Bu yöntemle yapılan kaplamaların kullanım alanlarını, kaplamaların kullanım amaçlarına göre şöyle sınıflandırabiliriz.

### 5.1. Dekoratif Amaçlı Kaplamalar

Endüstride dekoratif amaçla yapılan kaplamalar çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Oyuncak endüstrisinde, otomobil endüstrisinde, hediyelik eşyaların üretiminde, beyaz eşyalarda, kalem, saat, gözlük çerçevelerinde; bu kaplamalardan dekoratif amaçla faydalanılmaktadır.

Günümüzde sadece dekoratif amaçlı değil aynı zamanda başka fonksiyonel yararlar sağladığı için de bu kaplamalar tercih edilebilmektedir. Örneğin, saat ve gözlük çerçevelerinin TiN kaplanması bu eşyaların hem altın renginde olmasını sağlaması hem de eşyalara yüksek aşınma dayanıklılığını sağlamasından dolayı tercih edilmektedirler. İnşaat endüstrisinde kullanılan yardımcı ekipmanlar (kapı kolları, banyo – tuvalet aksesuarları vb.) görünümleri ve dayanıklılıkları için kaplanmaktadır.

### 5.2. Optik Olarak Fonksiyonel Kaplamalar

Bu amaçla lazer optiklerinde (yansıtma ve geçirme), ev ve otomobil aynalarında, gözlük camları ve lenslerinde, büyük projektörlerde, kamera lens ve filtrelerinde kullanılmaktadır. Ayrıca saydam ve sert kaplamalarda bu yöntemle yapılabilmektedir. Örneğin, helyum oksit, kalay oksit, inkalayoksit gibi saydam kaplamalar sıvı kristal gösterge uygulamalarında kullanılmaktadır [26].

### 5.3. Elektriksel Olarak Fonksiyonel Kaplamalar

Bu yöntemle yapılan kaplamalar yarı iletkenlerde, hibrit devrelerde, kapasitörlerde, dirençlerde, manyetik ortamlarda (teyp ve diskler), süper iletken kaplama yapımında, kontakt parçalarında ve güneş pillerinde kullanılmaktadır [26].

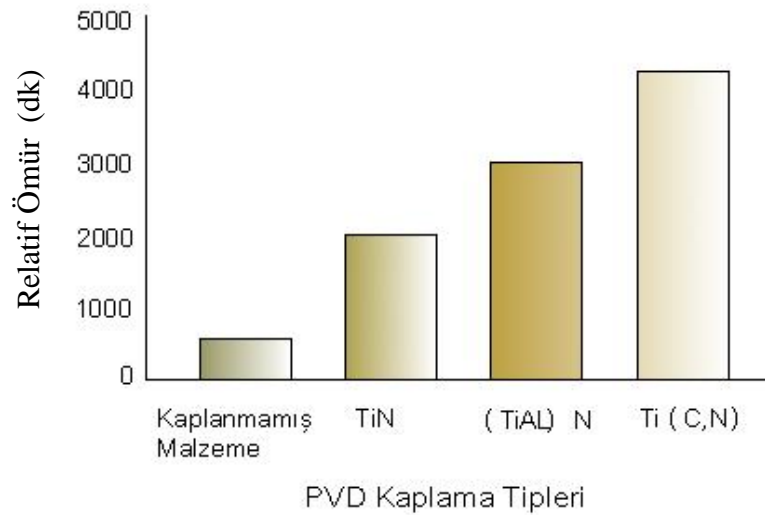
Direnç ve kapasitör gibi elektronik devre elemanları bu kaplama yoluyla plaket üzerine yapılabilir. Elektronik endüstrisinin PVD yöntemi ile yapılan kaplamaları tercih etmesinin en önemli sebepleri;

- Çok ince ve hatasız kaplamalar yapılabilmesi,
- İstenilen yüzeye kaplama yapılabilmesi,
- Çok katlı kaplamalar yapılabilmesidir.

### 5.4. Mekanik Olarak Fonksiyonel Kaplamalar

Jet motorlarının türbinlerinde, askeri amaçla, kesici takımlarında, kalıp parçalarında, kullanılmaktadır.

Kesici uçların bu yöntemle TiN, CrN, TiCN, TiAlN kaplanması sonucunda geliştirilen mekanik özellikler bu parçaların performanslarını çok arttırmaktadırlar (Şekil-5.1). Bu sayede kesici uçlarda, uzun kullanım ömrü dışında uçlar daha yüksek kesme hızlarında çalıştırılabilmekte ve birim zamanda yapılan iş miktarı artmaktadır [26].



Şekil 5.1. PVD ile kaplanmış takımların kullanım ömürleri [26].

### 5.5. Kimyasal Olarak Fonksiyonel Kaplamalar

Korozyon dayanıklı parçaların imalatında, gaz türbin motorlarında, kesici bıçaklarda ve deniz araçlarında bu kaplamalar kullanılmaktadır.

Çeşitli ortamlarda kullanılan kesici uçlar, şekil verme kalıpları, bıçaklar ve deniz araçlarında bu yöntemle yapılan kaplamalar ile bu ortamlardaki korozyon dayanımlarının arttığı belirtilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta, yüksek korozyon dayanımının hatasız ve gözeneksiz bir kaplama yapısı ile elde edilebileceğidir [26].

Elektrolitik kaplamaların mümkün olmadığı durumlarda yüzeye sıçratma ile iletken malzeme kaplamak ve yüzeyi elektrolitik kaplamaya mümkün hale getirmek gibi çok değişik uygulama alanları da vardır

### 5.6. Potansiyel Uygulamalar

PVD yöntemi ile elde edilen laboratuvar aşamasında ve geliştirmekte olan birçok kaplama ve tabii ki uygulama alanları vardır. Bunlar;

- Yüksek mukavemet ve sertliğe sahip malzemeler,
- Düşük maliyetli, korozyon direnci yüksek kaplamalar,
- Çok sert kaplamalar (Diamondlike coatings),

- Yeni süper iletken malzemelerin kaplanması,
- Yeni geliştirilen optik ve elektronik malzemeler,
- Amorf yapıdaki kaplamalardır,
- Metal, alaşım, seramik veya bunların karışımı ince taneli toz malzeme üretimi.
- Çok yoğun ve ince taneli, mukavemeti ve sertliği yüksek kompozit malzemeler [26].

### 5.7. Motorlarda Seramik Kullanımı

Gerek seramik parçalar gerekse seramik kaplı parçalar son zamanlarda motorlarda giderek artan bir şekilde kullanılmaya başlanılmıştır. Bunun esas sebebi seramiğin yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi ve ısı yalıtıcı özelliğidir. Çünkü motorlarda ısı kayıplarının minimuma indirilmesi ve motor sıcaklıklarının arttırılarak en yüksek verimi almak hedeflenmektedir. Özellikle sıcak egzost gazlarının enerjileri de tekrar geri kazanılarak motora verilmesi verimi arttırdığından yakıt tasarrufu sağlamaktadır [26].

Diğer taraftan seramiğin aşınma mukavemetinin yüksek olması, korozyona karşı dayanıklılığı tercih edilme sebebidir. Çünkü bu özelliklerinden dolayı parça ömrü uzun olmakta dolayısıyla bakım, onarım ve yenileme masrafları en aza inmektedir.

Seramiklerin ısı yalıtkanlığı özelliğinden dolayı soğutma sistemi küçülmekte ve hatta tamamen kaldırılması düşünülmektedir. Bu ise motoru hafifletmekte ve maliyeti azaltmaktadır. Soğutma sistemi arızaları da azalmakta ve tamamen ortadan kalkmaktadır.

Yanma odaları seramikle izole edilen motorlarda sıcaklıkların yükselmesi sebebi ile iyi bir yanma sağlanabilecektir. Bu ise motorun termik verimini artıracak ve ağır yakıtların yakılabilmesini de mümkün kılacaktır. Petrol yerine kullanılacak olan sıvılaştırılmış kömür alkol vs. yakıtlar da bu motorlarda kullanılabilir.

Motorlarda seramiklerin kullanılması son yıllarda ileri teknoloji seramikleri alanındaki gelişmelere paralel olarak hızla artmaktadır. Mevcut motorlarda yağlama ve malzeme dayanımı yüzünden konulan sıcaklık sınırlamaları dolayısıyla motor verimi de sınırlanmaktadır. İleri teknoloji seramikleri kullanılarak malzemelerin yüksek sıcaklıklara dayanmaları sağlanarak motor sıcaklıkları, dolayısıyla egzost gazları sıcaklıkları da

arttırılabilmekte ve bu gazların da enerjilerinden istifade edilerek motor verimi arttırılabilecektir.

Çeşitli yollarla yapılan seramik kaplama işlemleri yeteri kadar izolasyon sağlayarak motor parçalarının yüksek sıcaklıklara karşı koruyabilmektedir. Motor yanma odalarında tatminkar bir izolasyon için 5  $\mu\text{m}$ ' lik bir seramik tabakası tavsiye edilmektedir [26].

## 6. SÜRTÜNME ve AŞINMA

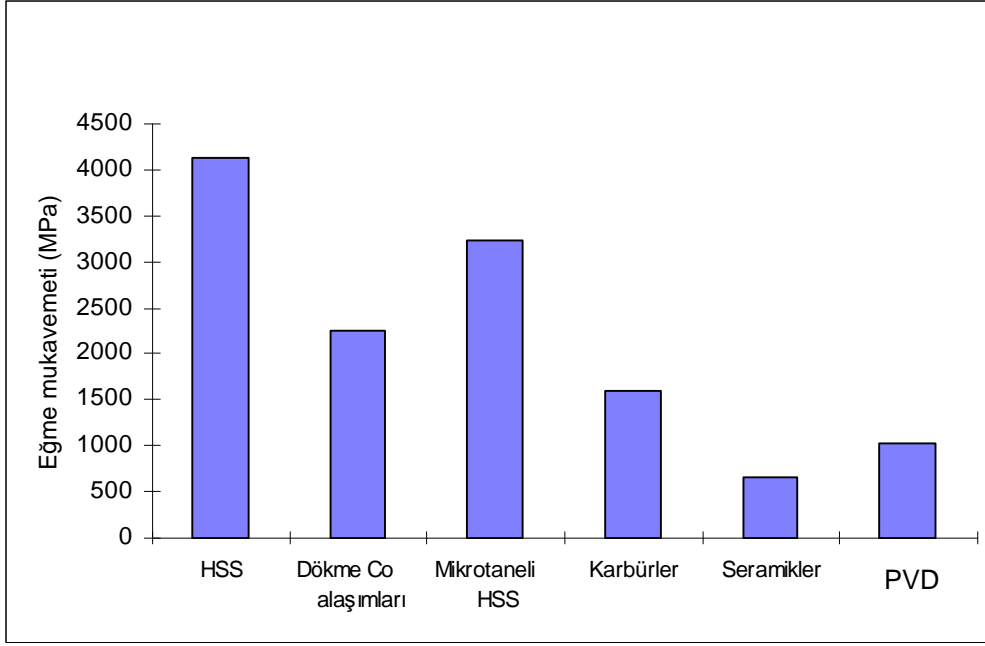
Kesici takımların, kalıp ve makine parçalarının takım ömürleri ve kullanım süreleri aşınma nedeni ile sınırlıdır. Günümüzde aynı parçanın gittikçe daha yüksek miktarlarda üretilme talepleri, yaygınlaşan otomasyona karşılık aşınma nedeni ile metal işleme tezgâh ve makinalarının durma süreleri maliyet faktörünü devamlı arttırmaktadır. Bu nedenle, aşınmanın önlenmesi veya geciktirilebilmesi, her geçen gün ekonomik anlamda daha büyük önem kazanmaktadır. Aşınan bir takımı yenisi ile değiştirmek yerine, takım yüzeyinin aşınma özelliklerini geliştirmek ise, soruna ekonomik ve pratik bir yaklaşımdır. Bu alanda, PVD yöntemleriyle üretilen sert seramik ince film kaplamalar ile son yıllarda büyük aşamalar sağlanmıştır [5,40].

PVD kaplamalar genel olarak, yüksek sertlik (2000-4000 HV), düşük sürtünme katsayısı (yüksek yüzey kayganlığı), düşük ısı iletkenlik, kimyasal reaksiyonlara dayanıklılık, taban malzeme yüzeyine iyi yapışma, düşük kaplama kalınlığı ve kaplama kalınlığının her bölgede homojen olması gibi, aşınmaya dayanım için tercih edilen özelliklere sahiptir [5].

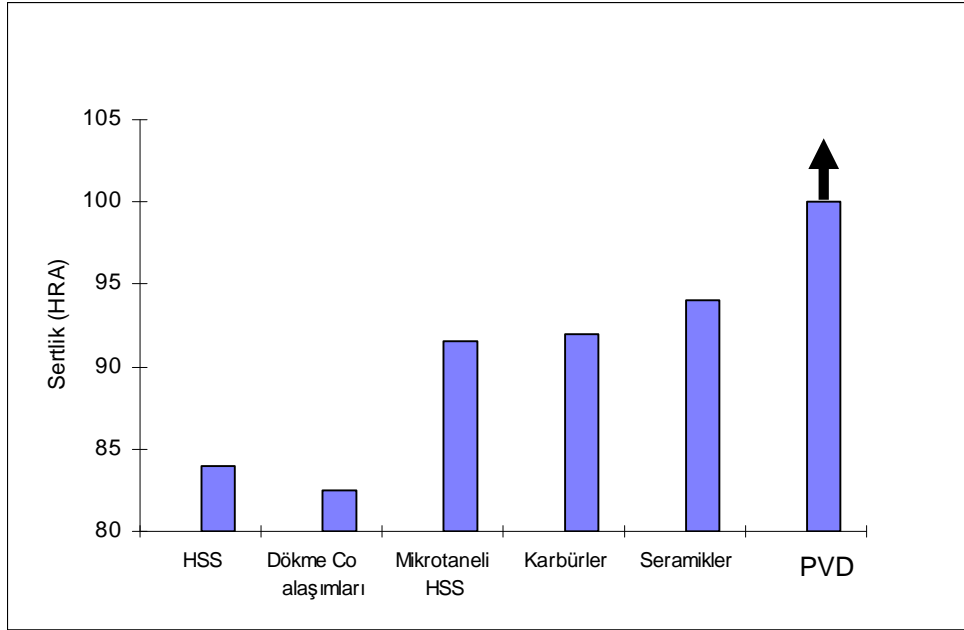
Bir kesici takım veya makina-kalıp parçasından beklenen temel özellik, aşınmaya ve kırılmaya dayanıklı olmasıdır. Yüksek aşınma dayanımının kriteri yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısıdır. Yüksek kırılma dayanımının ise ana kriteri yüksek mukavemet ve tokluktur. Genel olarak bir malzemenin sertlik ve tokluk özellikleri birbiriyle ters orantılıdır; yani malzemenin sertliği arttıkça tokluğu genellikle azalmaktadır. Çeşitli takım malzemeleri için eğme mukavemeti ve sertlik değerleri Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de verilmiştir.

PVD sert kaplamalar gevrek ve düşük tokluğa sahip olmaları sebebiyle kütle malzeme olarak kullanılmamaktadır. Ancak yüksek tokluğa sahip bir taban malzeme yüzeyine ince film olarak biriktirildiğinde, hem yüksek tokluk ve kırılma dayanımı, hem de yüksek sertlik ve aşınma dayanımı bir arada elde edilebilmektedir[25].





**Şekil 6.1.** Çeşitli takım malzemelerinin ortalama eğme mukavemeti değerleri[25].



**Şekil 6.2.** Çeşitli takım malzemelerinin ortalama sertlik değerleri[25].

### 6.1. Hasar Mekanizmaları

Kesici takımların ve kalıp parçalarının kullanıldığı uygulamalarda temel olarak aşağıdaki beş farklı hasar mekanizması oluşmaktadır. Bunlar;

1. Aşınma
  - a) Abrazif aşınma
  - b) Adhesif aşınma

2. Ağızda mikro kırılmalar
3. Plastik deformasyon
4. Kütleli kırılma
5. Yığıntı köşesi oluşumu

Bu hasar mekanizmaları Şekil 6.3' te gösterilmiştir.



**Şekil 6.3.** Hasar mekanizmaları[41].

Kütleli kırılma ve plastik deformasyon, takım malzemesinin mekanik özellikleriyle ilgilidir. Aşınma, mikro kırılmalar ve yığıntı köşesi oluşumu ise takım malzemesinin yüzey özellikleriyle ilgilidir. Yani tokluğu yüksek bir taban malzeme yüzeyine sertliği yüksek ve sürtünmesi düşük bir kaplama uygulandığında, bu hasar mekanizmalarının tümüne karşı bir koruma sağlanabilir.

## 6.2. Sürtünme

Sürtünme, DIN 50281'e göre "Birbiri üzerinde kayan, yuvarlanan ve kaymalı yuvarlanan elemanların izafi hareketlerini yavaşlatan (dinamik sürtünme) veya engelleyen (statik sürtünme) mekanik direnç" olarak tanımlanmaktadır. Hareketin tersi yönünde meydana gelen direnç kuvvetine ise sürtünme kuvveti adı verilmektedir. Amontons' tan günümüze

kadar sürtünme konusunda modern fikirlerin gelişmesine ışık tutan pek çok teorik ve deneysel araştırma yapılmıştır. İlk mekanik sürtünme teorisini kuran Amontons ve Coulomb' un buldukları temel sürtünme kanunları şunlardır:

1. Katı cisimler arasındaki sürtünme görünen temas alanından bağımsızdır.
2. Kinetik sürtünme kayma hızından bağımsızdır.
3. Sürtünme kuvveti malzeme çiftine bağlıdır.
4. Sürtünme kuvveti  $F_s$  ile normal kuvvet  $F_N$  doğru orantılıdır.

Coulomb'a göre sürtünmede en önemli faktör pürüzlerin mekanik etkileşmesidir. Buna göre sürtünme rijit, yani deformasyona uğramayan pürüzlerin teması sonucu meydana gelir. Bir pürüzün diğer pürüz üzerindeki hareketi eğik bir düzlem üzerindeki kayma hareketine benzetilerek statik sürtünme katsayısı  $\mu_s = \tan\theta$  olarak ifade edilmiştir. Pürüzlerin taban açısı  $\theta$  arttıkça, sürtünme katsayısının da arttığı deneysel olarak tespit edilmiştir.

Tabor'a göre katı cisimler arasındaki kuru sürtünmede üç ana faktör rol oynar;

1. Gerçek temas alanı,
2. Temas noktalarında meydana gelen adhezyon bağları,
3. Temas bölgesindeki malzeme hareketi ve bağların kopma şekli.

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

Adhezyon teorisine göre temas bölgelerinde oluşan mikro kaynak bağlarının kopması için gereken kuvvet bir sürtünme direnci meydana getirmekte ve bu kuvvet:

$$F_s = A_g \cdot T_k \text{ (N)} \quad (6.1)$$

olarak ifade edilmektedir. Diğer yandan gerçek temas alanı:

$$A_g = F_N / cr_a = F_N / H \quad (\text{mm}^2) \quad (6.2)$$

ile hesaplanmaktadır. Sürtünme çiftlerinden yumuşak olan malzeme;

$T_K$ : kayma mukavemeti ( $\text{N/mm}^2$ ),

$cr_a$ : akma mukavemeti ( $\text{N/mm}^2$ ),

H: sertliğe (HV) karşılık gelmektedir ( $\text{N/mm}^2$ )

İki malzeme birbirleriyle temas haline getirildiğinde, malzemelerden birinin diğeri üzerinde hareketine karşı sürtünme kuvvetleri direnç gösterir. Kaymayı başlatan kuvvet ( $F_S$ ) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet ( $F_N$ ) arasında şu bağıntı mevcuttur[42,43]:

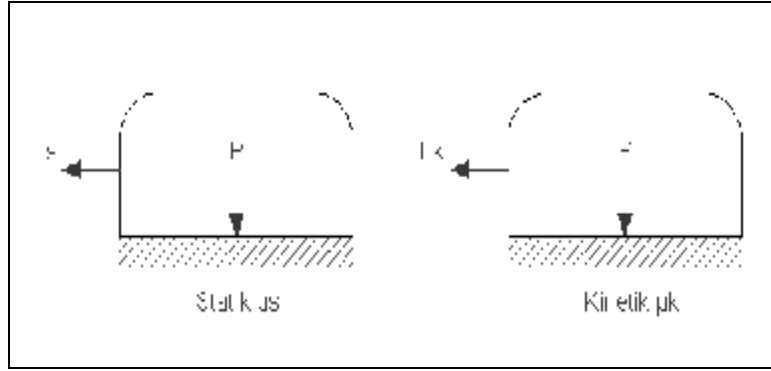
$$F_S = \mu_s \cdot F_N \quad (6.3)$$

Burada  $\mu_s$  statik sürtünme katsayısıdır. Kayma başladıktan sonra sürtünme kuvvetinde bir azalma olur ve bu durumda şu bağıntı yazılabilir:

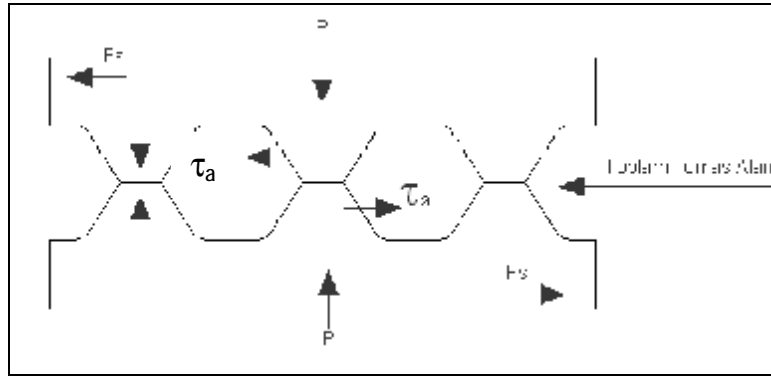
$$F_K = \mu_k \cdot F_N \quad (6.4)$$

Burada  $\mu_k$  kinetik sürtünme katsayısı olup değeri  $\mu_s$  'den daha düşüktür [42,43]. Bu durum Şekil 6.4'te gösterilmiştir.

Metalik bir malzemenin yüzeyi çok hassas işlense ya da parlatılsa bile, yüzeydeki girinti ve çıkıntılar, yani pürüzler tamamen giderilemez. İki yüzey birbiriyle temas ettiğinde, gerçek temas bir takım pürüzlerin birbirine dokunduğu noktalarda olur. Bu durumda yüzeye etki eden yük, sadece pürüzlerin birbirlerine temas ettiği noktalardan desteklenir ve yüzey alanının çok küçük bir kısmı yükü taşır (Şekil 6.5).



Şekil 6.4. Statik ve kinetik sürtünme katsayıları [43].



Şekil 6.5. Metal yüzeyindeki pürüzlerin birbirine teması [43].

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

$$F_s = A \cdot \tau_a \quad (6.5)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir [43].

Yani temas alanı (A) azaldığında, kaymanın gerçekleşmesi için gerekli kuvvet de azalacaktır. Kinetik temas durumunda, temas alanında atomlar arası bağlar oluşmadığı için

temas alanı önemli ölçüde azalır; bunun sonucunda sürtünme kuvveti ve dolayısıyla da sürtünme katsayısı azalır. Kayma durunca, atomlar arası bağlar oluşur ve sonuçta sürtünme katsayısı  $\mu_s$  değerine yükselir [44].

### 6.3. Aşınma

DIN 50320'ye göre aşınma "katı cismin yüzey bölgesinden tribolojik zorlanma sonucu sürekli ilerleyen malzeme kaybı" olarak tanımlanmıştır. Aşınma, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi veya aşınma parçalarının oluşumu neticesinde ortaya çıkan malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Birbiriyle temas halinde olan malzeme yüzeyleri, oksit filmleri veya yağlayıcılar ile korunsa bile, mekanik yüklemeler altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması, iki yüzeyin birbiriyle doğrudan temasına sebebiyet verebilir. Bu temas, malzemenin çalışma koşullarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya neden olur [4].

Malzeme geometrisi, malzeme sertliği ve aşınmanın meydana geldiği ortam koşulları, aşınma hızı üzerinde önemli etkiye sahiptir [25].

Malzeme kaybına neden olan başlıca dört tür aşınma vardır. Bunlar; adhesif aşınma, abrazif aşınma, korozyon aşınması ve yüzey yorulmasıdır[44].

#### 6.3.1. Adheziv Aşınma

Adheziv aşınma: Sözlük anlamı yapışıcı veya yapıştırıcı olan bu tür aşınma, yüzeyden diğer bir yüzeye metal transferi şeklinde gerçekleşir. Burwell ve Strang deklemlerine göre sürtünen iki yüzey arasında.

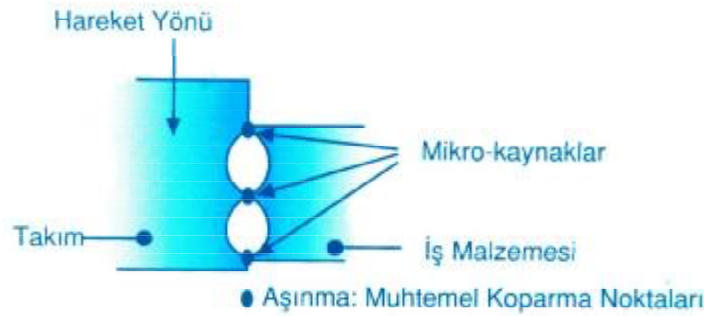
$$A_r / A_a = 10^{-5} \quad (6.6)$$

bağıntısı vardır. Burada:

$A_r$ : Temas eden iki gerçek yüzey alanı (mm),

$A_a$ : Temas eden görünür yüzey alanı (mm) anlamındadır

Yapışma aşınması olarak da isimlendirilen adheziv aşınma, bir metal yüzeyinin bir başka metal yüzeyinde bağlı hareketi sırasında, birbirlerine kaynaklanmış (veya yapışmış) yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar (Şekil 6.6). Uygulamada adheziv aşınma, özellikle metaller arasındaki kayma sürtünmesi nedeniyle meydana gelir ve aşınma parçaları yumuşak olan metalden kopar. Eğer iki metal aynı sertlikte ise, aşınma her iki yüzeyde de oluşur. Metaller arasındaki yağlanmanın mükemmel olması, yüzeye etki eden yükün azaltılması ve malzemenin sertliğinin artırılması ile adheziv aşınma azaltılabilir [25].



Şekil 6.6. Adheziv aşınma [41].

### 6.3.2. Abraziv Aşınma

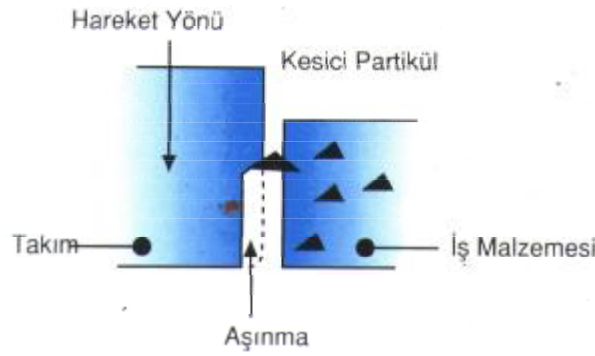
Abraziv aşınma, sürtünen iki yüzeyin, birbirini zımpara etkisiyle aşındırma esasına dayanır. Yüzeylerin birbiri üzerindeki hareketleri, yüzeydeki çıkıntıların kopmasına ve yüzeyin kalıcı biçim değişikliğine sebep olur. Abraziv aşınmanın matematiksel olarak ifadesi Burvvel ve Strang'a göre aşağıdaki gibi yapılmıştır. Üçlü abraziv aşındırıcı disk ve aşınan malzemedan parçacıkların kopması sonucu, araya giren parçacıklar aşındırıcı yüzeyine yapışarak çizilmeler meydana getirir.

$$W_{ab} = k \cdot P \cdot \mu \cdot V_g \quad (6.7)$$

olur.

Yırılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abraziv aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abraziv aşınma, biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbiriyle temas halindeyken kayması sırasında meydana

gelir. Şekil 6.7' de sert bir malzemenin, yumuşak bir malzemedan çapak şeklinde abrazif aşınma parçaları alışı gösterilmiştir. Sert parçaların yumuşak metale batması da abrazif aşınmaya neden olabilmektedir. Abraziv aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden yük azaltılarak düşürülebilir; bu durumda sert parçacıklar metal içine daha az dalarlar ve böylece daha az malzeme kaybı meydana gelir. Malzeme açısından da daha sert alaşım kullanarak, sertlik arttırmak amacıyla ısıtım işlemi uygulayarak ve malzeme yüzeyini sert bir tabaka ile kaplayarak, abraziv aşınma hızını azaltmak mümkündür[25].



Şekil 6.7. Abraziv aşınma[41].

### 6.3.3. Korozyon Aşınma

Korozyon aşınma, metallerin erozyon yoluyla aşınmasıdır. Değişken gerilmelere maruz kalan malzemelerde görülür. Fiziksel ve kimyasal aşınma korozyon ve difüzyon olaylarından kaynaklanan aşınma türleridir.

Korozyon aşınma, aşağıdaki şekillerde ortaya çıkar.

- Hava ve sıvılarla temas halinde olan metal yüzeylerde görülen bir aşınma çeşididir.
- Kimyasal korozyonun sebep olduğu aşınma, moleküler düzeydedir.
- Elektro-kimyasal aşınma; Buradaki aşınma iyon düzeyindedir [40].

Korozyon aşınmada mekanik etkenlerin yanında çevrenin kimyasal etkisi de olaya karışır. Sürtünen yüzeylerde oluşan korozyon ürünü sert parçacıklar halinde koparsa, şiddetli aşınma görülür[44].



### 6.3.4. Yüzey Yorulması

Birbiri üzerinde yuvarlanan parçalarda yüzey yorulması gözlenir. Temas halindeki yüzeylerde plastik şekil değiştirme sonucu pekleşme meydana gelir ve malzeme gevrekleşir. Gevrekleşen malzeme, üzerinden geçen tekrarlı kuvvet etkisiyle çatlaklar. Metallerde bu çatlama yüzeyden 0.2-0.3 mm derinlikte başlar. Bu çatlaklar zamanla yayılır ve yüzeyden pul şeklinde malzeme kopar. Bu tür yüzey yorulmasını önlemek için yüzeylerin sertleştirilmesi gerekir[44].

Sürtünerek çalışan bütün makine parçalarında görülen ve fakat giderilmesi mümkün olmayan aşınma, teknolojinin ilerlemesiyle önemini gittikçe arttıran bir olaydır. Bu bakımdan üzerinde araştırmalar yapılması ve minimuma indirme çalışmalarının yoğunlaşması, bu konuda yapılacak araştırmaların teşvik ve desteklenmesi gerekmektedir [39].

Sert yüzeydeki pürüzler yumuşak yüzeye teması esnasında, mikro kaynak bağları oluşurken, diğer yandan yüzeye bir miktar nüfuz ederek kayma hareketi esnasında bir aşınma izi oluşturmaya çalışırlar. Abrasiv aşınma, sert taneciklerin veya daha sert olan malzemenin yüzey pürüzlerinin yumuşak malzeme yüzeyine bir miktar nüfuz ederek aşındırılmasıyla meydana gelir. Abrasiv aşınmanın teorik esası son yapılan araştırmalarla aşındırıcı tane ile malzeme yüzeyi arasında meydana geldiği ileri sürülen dört temel fiziksel olaya dayandırılmıştır;

1. Mikro aşınma izi oluşması,
2. Mikro yorulma,
3. Mikro talaş oluşması,
4. Mikro çatlak oluşması,

Mikro aşınma izi oluşmasında aşındırıcı tane malzeme yüzeyine belli bir derinliğe kadar nüfuz ederek, kayma hareketinin de etkisiyle malzemede yer değiştirerek arkasında bir aşınma izi oluşturur. Kayma hareketinin aynı temas noktalarında tekrarlanması durumunda mikro yorulma çatlakları oluşur. Mikro talaş oluşumunda ise aşındırıcı taneler bir kesici takım gibi rol oynayarak yüzeyden talaş kaldırırlar. Meydana gelen aşınma kaybı aşınma izi hacmine eşit olur. Şayet malzemeler gevrek ve üzerine gelen yük de yüksek ise mikro çatlakların oluşması kaçınılmazdır. Sünek malzemelerde mikro aşınma izi teşekkülü mikro

çatlak oluşumu ile birlikte, aşındırıcı tanelerin temas açısı ve sürtünme katsayısına bağlı olarak meydana gelir [45].

### 6.3.5. Aşınma Oranı

Kuru ve yağlama sürtünme şartlarında çelik-çelik sürtünmesinde tespit edilen aşınma mekanizmalarında farklı hız ve yük şartlarında yapılan çok sayıda deneylerden alınan değerler, özgül aşınma oranı olarak bilinen ve;

$$K=k/H = V/FN.L \text{ (mm}^3\text{/Nm)} \quad (6.8)$$

ile ifade edilen denklemde yerine konarak hesaplanan aşınma oranı değerlerinden faydalanılmıştır. Aşınma hacmi deney sonrası numunelerde oluşan aşınma miktarı (gr) ile bu malzemenin yoğunluğu ( $\text{gr/mm}^3$ ) oranı yapılarak bulunur. Burada;

### 6.3.6. Aşırı Aşınma

Kayma hızının veya kuvvetin artması temas yüzeyi sıcaklığını yükselterek, plastik deformasyon oranını artırır. Bunun tabii sonucu olarak da aşınma miktarı hızlı bir artış gösterir. Aşırı aşınmada meydana gelen aşınma tanecikleri tamamen metalik olup, tane boyutları 10  $\mu\text{m}$  civarındadır.

### 6.3.7. Oksitlenme Aşınması

Kayma hızı veya kuvvetin temas noktalarındaki sıcaklığı metalin ergime noktası altında tutacak şekilde artırması halinde, aşınan yüzeylerde plastik deformasyonun yanında bir de kalıcı oksit filmi oluşur. Bu filmin kayma hareketi esnasında kırılmasıyla meydana gelen malzeme kaybına "oksitlenme veya hafif aşınma" adı verilmiştir. [45].

Düşük kuvvet ve kayma hızı şartlarında aşınan yüzeylerde oluşan koruyucu oksit filmleri kırılır ve aşırı aşınma başlar. Kuvvetin ve kayma hızının artması temas yüzeyi sıcaklığını yükseltir, plastik deformasyon oranını arttırır. Bunun sonucunda aşırı aşınma meydana gelir. Uygulanan kuvvetin ve kayma hızının temas noktalarında meydana gelen sıcaklığı malzemenin ergime noktası altında tutacak şekilde artması halinde, plastik

deformasyonla birlikte kararlı oksit filmi oluşur. Bu filmin kırılmasıyla meydana gelen malzeme kaybına oksitlenme aşınması denilmektedir [46,47].

Aşınma olayını etkileyen faktörler

1. Ana malzeme (Aşınan),
2. Karşı malzeme (Aşındıran),
3. Ara malzeme,
4. Kuvvet,
5. Hareket' tir.

Aşınan ve aşındıran malzemeler için "Aşınma çifti" denilir. Aşınma çifti ile ara malzemeye de beraberce "Aşınma kombinasyonu" denilmektedir. Aşınma çifti arasındaki "Ara malzeme" sert taneli, sıvı, gaz ve buhar halinde olabilir. Aşınma sırasında oluşan aşınma parçacıkları da, ara malzeme gibi etki yaparak aşınma olayına katılırlar [48].

Richardson, hacimsel aşınmanın kuvvet ile lineer olarak arttığını, uygulanan kuvvetin artmasıyla birim kuvvet başına düşen aşınmanın azaldığını göstermiştir [49].

Yükün artmasıyla temas alanı da artacaktır. Dolayısıyla gerilme veya basınç artışı pürüzlerin plastik deformasyon miktarına bağlıdır. Yüzeydeki pekleşme ise plastik deformasyonları önleyeceğinden temas alanının artışı yavaşlatacak ve gerilmenin artmasına yardımcı olacaktır [39].

Kayma hızının artırılması yüzeylerdeki temas sıcaklığını artırır. Bunun sonucu olarak aşınan yüzeylerde oksit oluşumu başlar ve kararsız sürtünme süresi daha erken başlar ve kararlı sürtünme süresine daha erken geçilir. Kararsız sürtünme, kayma hareketinin başlangıcından belli bir süreye kadar sürtünme katsayısında çok büyük düzensizliklerin meydana geldiği sürtünme davranışı olarak tanımlanabilir. Düşük kayma hızlarında kararsız sürtünmenin sınırlarını belirlemek zordur. Kararlı sürtünme katsayısı kayma hızına bağlı olarak kararsız sürtünme katsayılarının aksine, kayma hızının artışıyla azalır. Kararlı sürtünme esnasında yüzeylerdeki temas sıcaklığının artışıyla temas yüzeyinde sertleşme ve oksitlenme nedeniyle koruyucu bir tabaka oluşur ve yüzeyler düzgünleşir. Böylece yüzeyler arasında metal transferi azalarak sürtünme kararlı hale gelir. Bu arada zaman zaman

yüzeylerden oksit tabakaları ayrılarak oksit tanecikleri abrazyon etki yapar ve aşınmayı azda olsa devam ettirir [45].

Bu oksit tabakasının parçalanmasına sebep; nominal basınç malzemenin akma mukavemetini geçtiği zaman adhezyon aşınma katsayısının ani olarak yükselmesidir [50].

Bu katsayının artması aşınma miktarının artması demektir. Normal yükün artmasıyla sürtünme katsayısının arttığı çeşitli araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir [47].

Uygulanan kuvvetin ve özellikle kayma hızının artmasıyla meydana gelen aşınmanın azalmasının nedeni yukarıda açıklandığı gibi kuvvet ve kayma hızlarında meydana gelen artış nedeniyle yüzeylerdeki temas sıcaklığının artmasıyla oluşan koruyucu oksit tabakasının varlığıdır. Bu oksit tabakasından zaman zaman ayrılan oksit taneciklerinin abrazyon etkisi aşınmanın az da olsa sürmesine neden olmaktadır.

#### 6.4. Yüzey Pürüzlülüğü

İşlenmiş yüzeylerde, işleme metodu ne olursa olsun yüzey pürüzlülüğünün oluşması kaçınılmazdır. İşleme metodu, kesicinin cinsi ve işlenen malzemeye bağlı olarak, işleme sırasında fiziksel, kimyasal ve ısı faktörleriyle, kesen ve kesilen arasındaki mekanik hareketlerinde etkisiyle işlenmiş yüzeylerde, genellikle istenmediği halde bazı izler oluşur. Nominal yüzey çizgisinin altında ve üstünde düzensiz sapmalar meydana getiren bu duruma "yüzey pürüzlülüğü" denir. Birçok makinanın performansını artırmak için daha hassas işlenmiş yüzeyler gerekir. Bu amaçla, istenen yüzey kalitesinin elde edilmesinde esas alınacak standart yüzey pürüzlülük değeri belirlenir ve bu değer resim üzerinde bir sembol ile gösterilir. Pürüzlülük değerleri, sınıf ve numaraları TS 2040 ile standartlaştırılmıştır. Tablo 6.1' de pürüzlülük değerleri ve sınıf numaraları verilmiştir.

Çoğunlukla son görünüm, bazı partiküllerin sebep olduğu farklı düzensizliklerin bir araya gelmiş halidir. Ancak pürüzlülüğe sebep olan faktörlerin tek tek etkilerini ayırt etmek her zaman mümkün olmayabilir. Lepleme ve honlama gibi aşındırma işlemleri, düzensiz ve çok yönlü yapı meydana getirir. Taşlama en geniş biçimde kullanılan bitirme işlemidir. Genellikle düzensiz fakat tek yönlü bir yüzey yapısı oluşturur. Tornalama, delme, biçimlendirme ve kesme işlemlerinde ise yüzey yapıları eşit aralıklı ve tek yönlüdür.

Pürüzlülük, çok yönlü yüzey yapıları için genellikle ölçüm yönünden bağımsızdır. Aynı cins malzemenin farklı metotlarla aynı yüzey pürüzlülük değerinde işlendiği, bazen bunların korozyon, aşınma, sürtünme ve yorulma dayanımı olarak farklı davrandıkları bilinmektedir. Çünkü yüzeyin pürüzlülüğünden başka; yüzeydeki işleme izlerinin yönleri ve dağılımları da performansı etkiler. Bu sebeple işlenecek parçaların bazısında yüzey pürüzlülük değeri belirtildiği gibi, işleme metodunun belirtilmesi de istenir [51].

**Tablo 6.1.** Yüzey pürüzlülük değerleri ve sınıf numaraları [51]

Pürüzlülük Değeri, Ra		Pürüzlülük Sınıf Numarası
$\mu\text{m}$	$\mu\text{in}$	
50	2000	N12
25	1000	N11
12,5	500	N10
6,3	250	N9
3,2	125	N8
1,6	63	N7
0,8	32	N6
0,4	16	N5
0,2	8	N4
0,1	4	N3
0,05	2	N2
0,025	1	N1

## 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 7.1. Amaç

Yapılan çalışmada iki farklı deney ortamı oluşturulmuştur. Birincisi PVD yöntemi ile farklı üç değişik kaplama yapılmış (TiN, CrN ve CrN/TiN) numuneler ile plazma nitrasyon ve sertleştirilmemiş malzemelerin aşınma karakteristikleri birbirleri ile kıyas edilmiştir. İkinci deney ortamında ise, gerçek üretim ortamında PVD yöntemi ile DIN 1.2379 malzeme üzerine CrN kaplanmış alüminyum soğuk ekstürüzyon tüp erkek kalıp ile hali hazırda kullanılan ve vakum fırınında yüksek sıcaklığa ısıtılıp yüksek basınçlı gaz ile soğutulmuş 60 HRC sertliğinde elde edilen DIN 1.2379 Soğuk İş Takım çeliği ile üretim ve aşınma performansları kıyas edilmiştir.

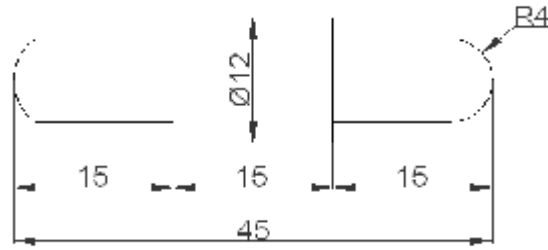
### 7.2. Materyal

Birinci deney şartlarında, deney numuneleri ve aşındırıcı disk Şekil 7.1. de belirlenen ölçülere göre CNC tezgahında üretilmiştir. Tablo 7.1. DIN 1,2379' un kimyasal analizi, Tablo 7.2. de ise fiziksel özellikleri verilmiştir. Üretimi tamamlanan numuneler sertleştirilmemiş, plazma nitrasyon ve PVD yöntemi ile CrN, TiN, CrN/TiN kaplanacak numunelere sınıflandırılmıştır. Sertleştirilmemiş deney numunesi 200-600-1200 Grid zımparalarla yüzey parlatılmış ve yüzey pürüzlülük değeri Ra 0.32-0.45 µm olarak ölçülmüştür.

Plazma nitrasyon yapılacak pimler 200-600-1200 grid zımparalarla yüzey parlatılarak Konya İNS ısıtım firmasında plazma nitrasyon yapılmıştır. Nitrasyon işlemi vakum fırınında 22 saat 1-4 milibar basınç altında gerçekleştirilmiştir. Nitrasyondan alınan pimlerin yüzey temizliği 1200 grid zımpara ile yapılarak Konya Teknik Isıl İşlem firmasında sertliği ölçülmüştür. Plazma nitrasyon yapılan numunelerin yüzey sertliği (Şekil 7.2) 100 gr ağırlık ile 10 sn basma süresinde üç defa ölçüm yapılarak ortalamaları alınmış ve 945 HV olarak ölçülmüştür. Plazma nitrasyon yapılmış pimlerin yüzey pürüzlülük değeri Ra 0.28-0.45 µm arasındadır.

Kaplama yapılacak numuneler vakum fırında 1030 °C ye ısıtılıp yüksek basınçlı gazla soğutulup sertleştirilmiştir. Kaplama yapılacak numuneler 180 °C 2 saat süre ile üçlü meneviş

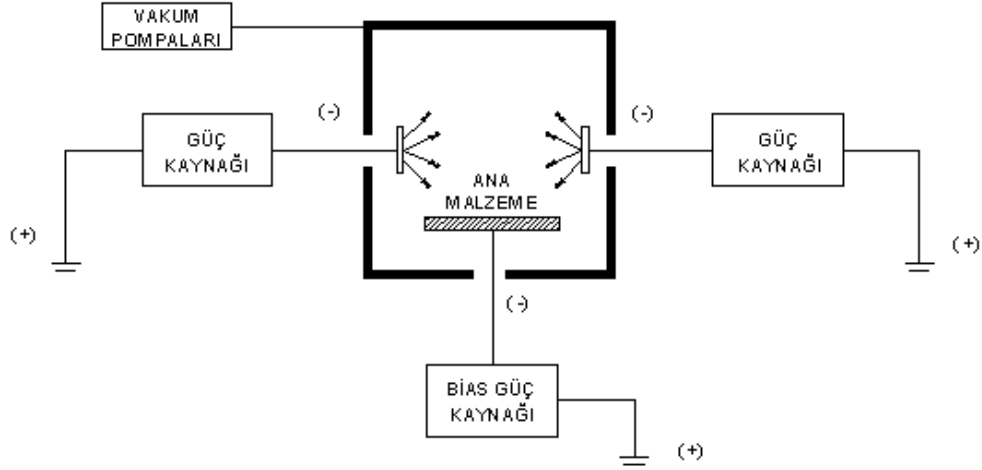
yapılmıştır. Bu numuneler 200-600-1200 grid zımpara ile polisaj yapılmış ve İstanbul İonBond Tinkap Vakum Plazma ve Kaplama firmasında kaplama yapılmıştır. Bu kaplamalar vakum fırınında (Şekil 7.3). 200 V gerilim, 350 °C de  $4 \times 10^{-4}$  mbar, basınç ve 50 A akım altında belirlenen kaplamalar PVD-Katodik Ark yöntemi ile CrN, TiN ve CrN/TiN kaplanmıştır. Kaplanan numunelerin sertlikleri Teknik Isıl işlem firmasında yüzey sertliği 100 gr ağırlık ile 10 sn basma süresinde üç defa ölçüm yapılarak ortalamaları alınmıştır. Ayrıca kaplama kalınlıkları Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM) (Şekil 7.4-7.6) ve X-ışınları difraktometresi (XRD) (Şekil 7.7-7.9) ile piklerin analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar; CrN kaplamalı numunenin sertliği 2500 HV, TiN kaplanmış numunenin sertliği 3500 HV ve CrN/TiN kaplanmış numunenin sertliği 3000 HV olarak ölçülmüştür. CrN kaplanmış deney numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülük değeri Ra 0,12  $\mu\text{m}$ , TiN kaplanmanın yüzey pürüzlülüğü Ra 0.20  $\mu\text{m}$ , CrN/TiN dubleks kaplamanın yüzey pürüzlülüğü Ra 0.31  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.1. DIN 1,2379 deney numunesi



Şekil 7.2. MHT 2 mikrosertlik ölçüm cihazı



**Şekil 7.3.** PVD – Katodik ark yönteminin şematik gösterimi

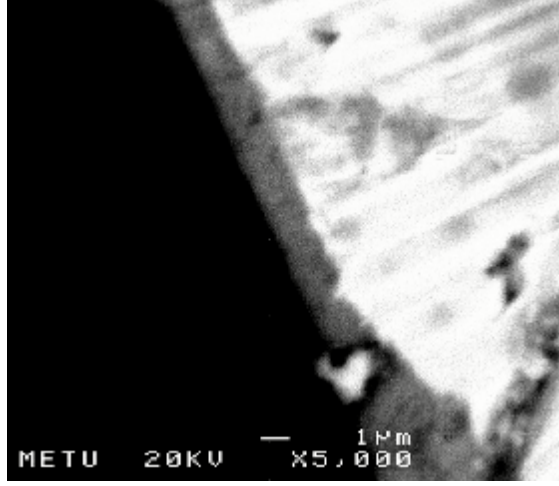
**Tablo 7.1.** DIN 1.2379 Soğuk iş takım çeliğinin kimyasal analizi

ISO/DIN	AISI	C	Mn	Cr	Mo	V	Si
1,2379	D2	1,55	0,4	11,8	0,8	0,8	0,3

**Tablo 7.2.** DIN 1,2379 Soğuk iş takım çeliğinin fiziksel özellikleri

Sıcaklık (°C)	20	200	400
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	7700	7650	7600
Isıl Genleşme Katsayısı	-	12x3x10 <sup>4</sup> 11.2x10 <sup>4</sup>	12*10 <sup>4</sup>
Isıl İletkenlik (W/m°C)	20	21	23
Elastiklik Modülü (MPa)	210000	200000	180000
Özgül Isı (J/kg°C)	460	-	-

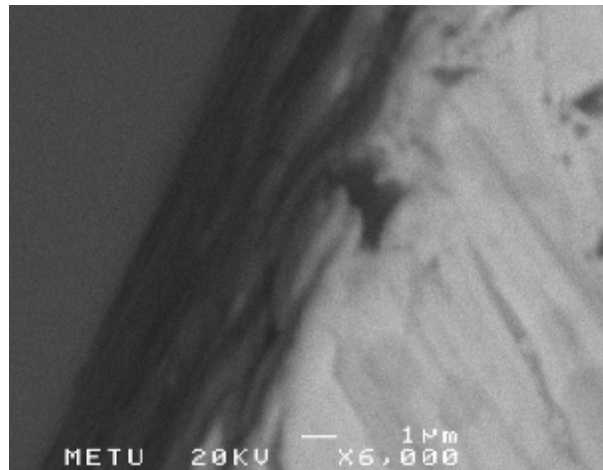




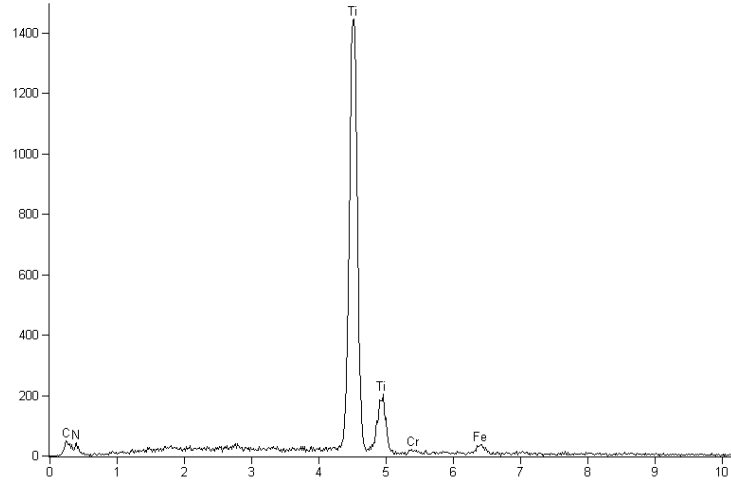
**Şekil 7.4.** CrN kaplanmış deney numunesi kaplama kalınlığı



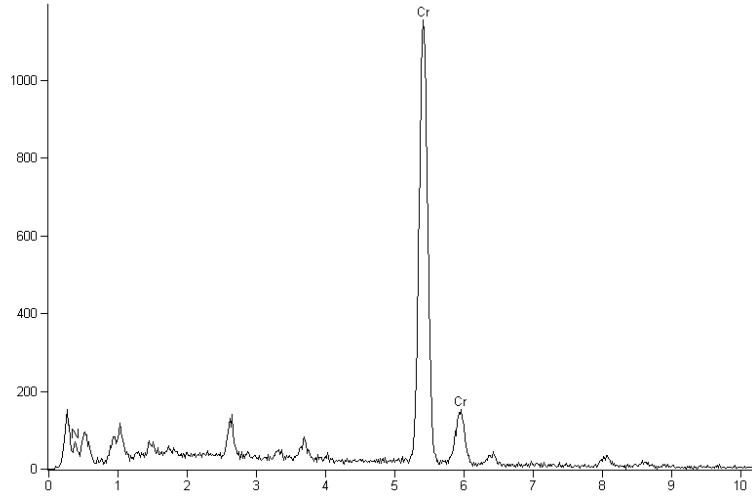
**Şekil 7.5.** TiN kaplanmış deney numunesi kaplama kalınlığı



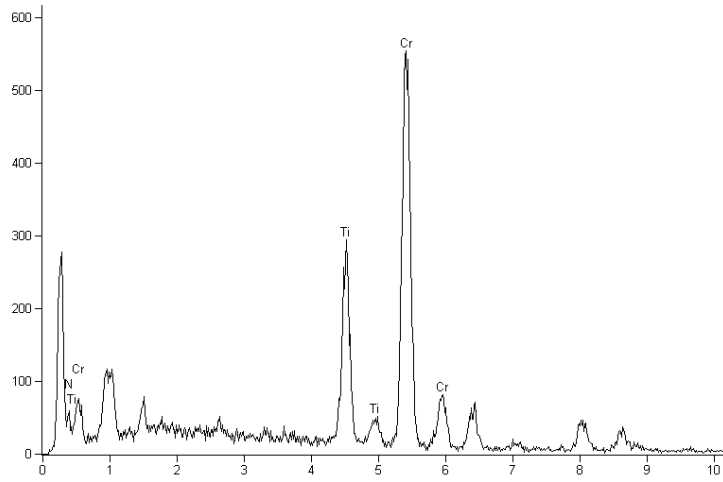
**Şekil 7.6.** CrN/TiN dubleks kaplanmış deney numunesi kaplama kalınlığı



**Şekil 7.7.** TiN kaplanmış deney numunesi XRD görüntüsü

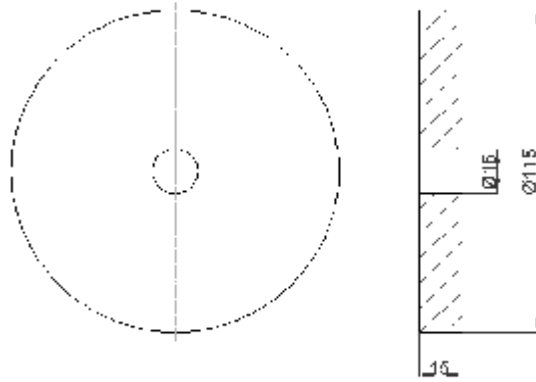


**Şekil 7.8.** CrN kaplanmış deney numunesi XRD görüntüsü



**Şekil 7.9.** CrN/TiN dubleks kaplanmış deney numunesi XRD görüntüsü

DIN 1,2379 malzemedan yapılmış numuneler, aşındırıcı olarak Şekil 7.10. Vanadis 23 toz metal malzemedan yapılmış disk malzeme kullanılmıştır. Vanadis 23 yüksek sıcaklık, sertlik, yüksek tokluk ve yüksek aşınma direnci oldukça iyi, yüksek adheziv ve abraziv aşınma direnci sahiptir. Aynı zamanda kalıptan çok uzun ömür ve yüksek nitelikte parça istenen soğuk iş uygulamalarında kullanılır. Aşındırıcı disk ısıtılma işlemle 60 HRC sertlikte kullanılmıştır. Tablo 7.3' de Vanadis 23 Toz Metal malzemenin kimyasal özellikleri, Tablo 7.4. de ise Vanadis 23' ün fiziksel özellikleri verilmiştir. Vanadis 23 toz metal malzeme Konaltaş Alüminyum A.Ş de alüminyum soğuk ekstürüzyon tüp imalatında dişi kalıp olarak kullanılmaktadır.



Şekil 7.10. Aşındırıcı disk

Tablo 7.3. Vanadis 23 Toz Metal Malzemenin Kimyasal Analizi

ISO/DIN	AISI	C	Cr	Mo	V	W
1.3344 PM	M3:2	1,28	4,20	5,00	3,1	6,40

**Tablo 7.4.** Vanadis 23 Toz metal malzemenin fiziksel özellikleri

Sıcaklık	20 °C	400 °C	600 °C
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	7,98	7,87	7,805
Isıl Genleşme Katsayısı	-	12,1x10 <sup>-6</sup>	12,7x10 <sup>-6</sup>
Isıl İletkenlik (W/m°C)	24	28	27
Elastiklik Modülü (MPa)	230.000	205.000	184.000
Özgül Isı (J/kg°C)	4200	510	600

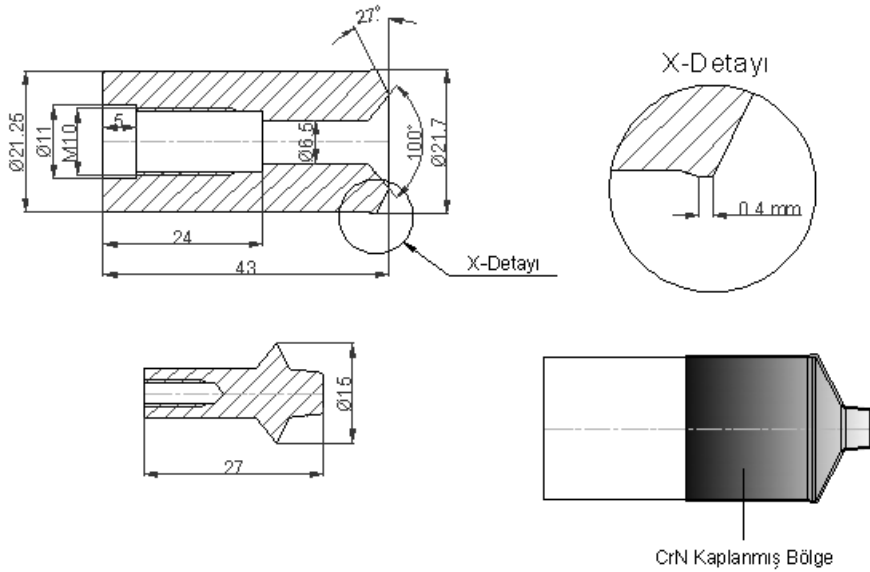
İkinci deney ortamında, deney çalışmalarında kullanılan alüminyum soğuk ekstürüzyon tüp erkek kalıp malzemesi DIN 1,2379 malzemedan iki ayrı kafa ve punta malzemesi olarak Şekil 7.11. de gösterildiği gibi CNC torna tezgâhında 11 adet üretilmiştir.

İkinci deney ortamında PVD yöntemi ile CrN kaplamanın seçilmesinin nedeni, TiN kaplamaların kalınlıkları 5µm üstüne çıktığı zaman iç gerilimler artmaktadır. Bu nedenle kalınlıkları maksimum 5-7 µm kalınlığa kadar yapılabilmektedir. CrN kaplamalarda ise iç gerilimlerin düşük olması nedeniyle daha yüksek kalınlığa kadar çıkılabilmektedir. Bu kaplamaların sertlikleri 2400-2800 HV arasındadır. Yüzey kaliteleri ve yüzey pürüzlülüğü TiN kaplamalardan daha iyidir. 700 °C kadar olan çalışma sıcaklıklarında stabilizesini kaybetmez. Kimyasal stabilizesi TiN kaplamadan daha yüksektir. CrN tabakaların TiN tabakalara oranla abraziv aşınmaya karşı yüksek mukavemet sergilerler ve kalın kaplanabildiklerinde TiN' e göre daha iyi korozyon mukavemeti gösterirler.

Üretimi yapılan erkek kalıp malzemesi İstanbul Assab firmasında vakum fırında 1030 °C de ısıtılıp basınçlı gazla soğutularak 56 HRC sertlik elde edilmiştir. Kaplama yapılacak numuneler 180 °C 2 saat süre ile üçlü meneviş yapılmıştır. “Normal şartlarda DIN 1,2379 soğuk iş takım çeliğine 60 HRC sertlik elde edilirken kaplama yapılacak numunelerde 56-58 HRC sertlik elde edilmiştir. Erkek kalıp yatay eksantrik preste darbeleri çalıştığından dolayı önceki pilot çalışmalarda CrN kaplamalarda kırılmalar gözlenmiştir. Bu olumsuz etkiyi minimize indirebilmek için üçlü menevişleme tercih edilmiştir.” Bunun nedeni kaplama malzemesinin ana malzemeye yapışmasının daha iyi gerçekleşmesini ve kaplama sertliği ile

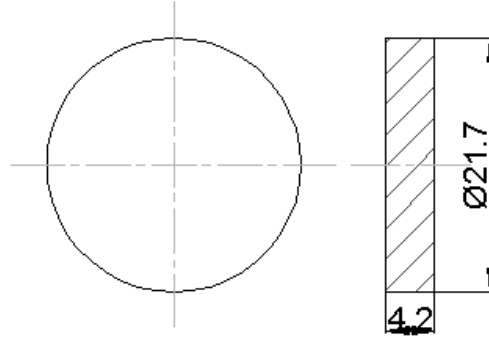
ana malzeme arasındaki sertlik geçişin ani olmaması içindir. Böylece kaplama yüzeyinde oluşabilecek ani sertlik geçişin olumsuz etkileri engellenmesi için üçlü menevişleme yapılmıştır. Isıl işlemi tamamlanan erkek kalıp kalıp malzemenin puntası bağlanarak finiş işlemi işletmenin ihtiyacı olan ölçülerde CNC torna tezgahında yapıp, 200-600-1200 grid zımparalarla polisajlanarak İstanbul İonBond Tinkap firmasında vakum fırınında PVD-Katodik Ark kaplama yöntemi ile CrN kaplanmıştır. Kaplaması yapılan erkek kalıbın sertliği Konya Teknik Isıl İşlem firmasında yüzey sertliği 100 gr ağırlık ile 10 sn basma süresinde üç defa ölçüm yapılarak ortalamaları alınmış ve 2700 HV olarak ölçülmüştür.

Konaltal Alüminyum A.Ş' de hali hazırda kullanılan alüminyum soğuk ekstrüzyon tüp kalıbının imalatı tamamlanıp (Şekil 7.4.) İstanbul Assab firmasında vakum fırında 1030 °C de ısıtılıp basınçlı gazla soğutularak 60 HRC sertlik elde edilmiştir. Finiş operasyonları tamamlanan erkek kalıp 1200 grid zımpara ile polisajlanarak imalata alınmıştır.

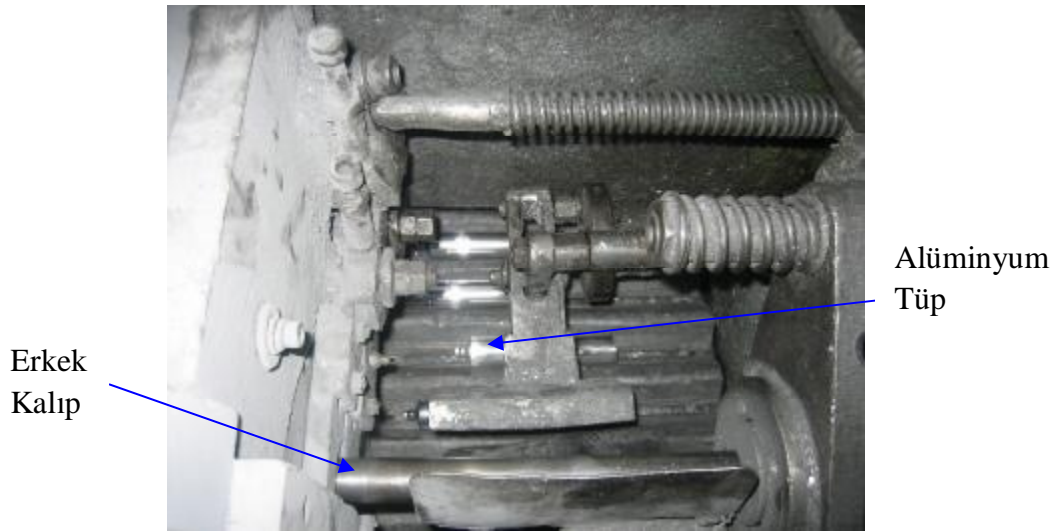


**Şekil 7.11.** Alüminyum ekstrüzyon tüp erkek kalıp

Alüminyum ekstrüzyon tüp imalatında, külçe olarak alınan % 99,7 saflıktaki alüminyumlar ergitme fırınında ergitilip haddelendikten sonra siparişe göre uygun çaplarda Şekil 7.12. deki gibi pul üretimi yapılmaktadır. Üretimi tamamlanan pullar yatay eksantrik preste (Şekil 7.13.) basılarak tüp imalatı yapılmaktadır. Yatay eksantrik presle dakikada ortalama 90 tüp imal edilmektedir.



**Şekil 7.12.** Alüminyum ekstrüzyon tüp imalatında kullanılan alüminyum pul



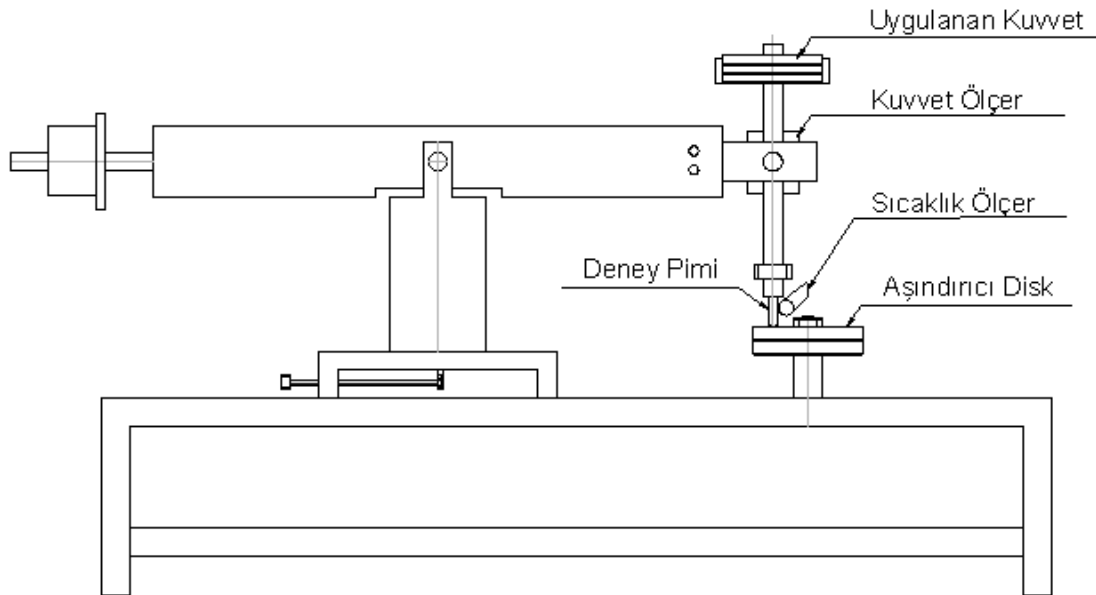
**Şekil 7.13.** Alüminyum ekstrüzyon tüp imalat kullanılan yatay eksantrik pres

### 7.3. Metot

Birinci deney ortamında deney çalışmaları Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde bulunan Pin-on Disk deney cihazında (Şekil 7.14.) yapılmıştır. Aşınma cihazının parçaları; 2,2 kW' lık AC motor, 2,2 kW' lık Delta marka devir ayarlayıcı, numunenin üzerinde sürtüdüğü disk, destekleme kolu, pens mekanizması, tabla, kızak mekanizması, ağırlıkları dengeleme parçası, değişken ağırlıklar, yük hücresi verilerin bilgisayara aktarımını sağlayan karttan oluşmaktadır.

Sıcaklık ölçümleri temassız sıcaklık ölçer (Impact Infratherm Pyrometer 510-N) ile pim ve diskin temas noktasından yaklaşık 3 mm yükseklikte sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu noktada ölçülen sıcaklık değerleri temas esnasında oluşan sıcaklık

değerinden (flash sıcaklık) oldukça düşük bir değerdedir. Pim ile diskin çalışma esnasında oluşan temas sıcaklığını ölçmek oldukça zor bir işlemdir. Ancak tüm numunelerin sıcaklık değeri aynı yükseklik ve uzaklıktan alındığı için, deney esnasında oluşan sıcaklık değişimleri hakkında yorum yapmamızı sağlamaktadır.



**Şekil 7.14.** Pin-on disk deney cihazı

Deney şartları kuru ortamda sabit kayma mesafesinde (2000 m) oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tüm deney numuneleri üç farklı çevre hızlarında (0,6 m/sn, 1 m/sn ve 1,4 m/sn) ve üç farklı yükte (25 N, 40 N ve 55 N), şartlarında farklı çaplarda izler oluşturulmuştur. Oluşan bu izler daha sonra x200 ve x400 kat büyütme yapılarak incelenmiştir.

Deneyden önce deney numuneleri Etanol ile temizlendikten sonra kurutma fırınında (Şekil 7.15.) 60 °C 15 dk kurutulup, 10<sup>-4</sup> gr hassasiyetli elektronik terazi (Şekil 7.16.) ile ağırlıkları ölçülmüştür. Tartılan numuneler Pin-On Disk deney cihazında kuru şartlarda ve 20-23 °C oda sıcaklığında % 45-55 nem çalışma ortamında deneyler yapılmıştır. Çap ve kayma hızına göre hesaplanan devir sayısı sürücünden ayarlanıp bilgisayarda sıcaklık ve sürtünme kuvveti programı başlatılarak deneyler başlatılmıştır. Her deney sonrası disk etanol ile temizlenerek bir sonraki deney parametreleri hazırlanmıştır. Pim disk üzerinde aşındırma deneyi yapılırken sürtünme kuvveti Loadcell tarafından anlık olarak bilgisayar veri tabanına kayıt yapılmaktadır. Isının pim yüksekliğine doğru ısı dağılması sayesinde 3 mm mesafede

pim dış yüzeyinde oluşan sıcaklık ölçümleri de anlık olarak veri tabanına kaydedilmektedir. Her bir deney şartlarında 5 tekrar edilerek deney esnasında oluşan sürtünme ve sıcaklık değişimleri ortalaması alınmıştır.



**Şekil 7.15.** Kurutma fırını



**Şekil 7.16.**  $10^{-4}$  gr hassasiyetli dijital göstergeli tartı cihazı

Elde edilen aşınma yüzeyleri metal mikroskobu (Şekil 7.17.) ile x200 ve x400 büyütme yapılarak yüzeyler incelenmiştir. Ayrıca bu yüzeyler ODTÜ malzeme mühendisliği SEM laboratuvarında JSM-6400 marka SEM mikoskobu ile görüntüler elde edilerek incelenmiştir.

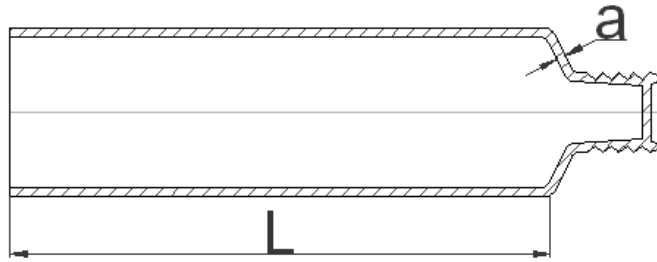




**Şekil 7.17.** Metal mikroskobu

İkinci deney şartlarında ise; Konaltaş Alüminyum A.Ş de alüminyum soğuk ekstrüzyon tüp imalatında kullanılan erkek kalıp üretim performansı incelenmiştir. Gerçek üretim ortamında yapılan deneylerin parametreleri üründe meydana gelen hasarla tespit edilmiştir. Erkek kalıbın servis ömrü iki nedenle sona ermektedir. Birincisi ürünün omuz kalınlığı ve boy uzunluğunda meydana gelen değişiklik, bunun nedeni de erkek kalıbın zırh çapında meydana gelen aşınmadır. Bu nedenle erkek kalıp servis ömrünü tamamlamıştır. İkinci hasar ise erkek kalıp zırhında oluşan abrazyon aşınmadan dolayı dişi kalıp içinde kalan alüminyum partiküller tüp oluşumunu engellediğinden dolayı kalıbın çatlamasına neden olmaktadır. Ayrıca dişi kalıpta kalan alüminyum partiküller delik tüpe neden olduğundan erkek kalıp servis ömrü tamamlanmış olmaktadır.

Hem yüzey sertleştirme yapılmış, hem de PVD yöntemi ile CrN kaplanmış erkek kalıplarla üretilen alüminyum tüplerden iki saatte bir 5'er adet numune ürün alınarak omuz kalınlığı (a) 0,01 mm hassasiyetli komparatör saati ile ve boy uzunluğu (L) kalibrasyonlu çelik metre ile (Şekil 7.18.) ölçümleri yapılmıştır. Üretimi olumsuz etkileyen pul hatalarından (çapaklı pul) kaynaklanan ürün hasarları temizlenerek üretim devam etmiştir. Erkek kalıptan dolayı meydana gelen ürün hasarları görüldüğünde sistem durdurulmuş ve pres üzerindeki numaratoründen vuruş adedi kayıt edilmiştir.



**Şekil 7.18.** Alüminyum ekstrüzyon tüp

## 8. DENEY SONUÇLARI

### 8.1. Aşınma Deneylerinde Elde Edilen Veriler ve Aşınma Grafikleri

Birinci deney ortamında, sabit kayma mesafesi, farklı yük ve farklı çevre hızlarında elde edilen aşınma miktarları Tablo 8.1. de verilmiştir. Tablo 8.1. incelendiği zaman tüm deney şartlarında en fazla aşınma kütlesi ısıl işlem görmemiş numune, plazma nitrasyon, CrN/TiN dubleks kaplama, TiN ve CrN kaplama olarak sıralanmaktadır. Özellikle kaplama yapılmış numunelerin aşınma kütle kaybı birbirlerine oldukça yakındır. CrN kaplamanın en az aşınma kütle kaybının olmasının nedeni yüzey pürüzlülük değerinin diğer kaplamalara göre daha düşük olduğu düşünülmektedir.

**Tablo 8.1.** Kayma hızı ve uygulanan kuvvete göre kütle kaybı

DENEY NUMUNELERİ	0,6 m/sn			1 m/sn			1,4 m/sn		
	25 N	40 N	55 N	25 N	40 N	55 N	25 N	40 N	55 N
SERTLEŞTİRİLMEMİŞ SAF	0.0061	0.0203	0.0370	0.0061	0.0109	0.0065	0.0030	0.0066	0.0059
NİTRÜLENMİŞ	0.0039	0.0069	0.0036	0.0030	0.0032	0.0034	0.0035	0.0015	0.0105
TiN KAPLANMIŞ	0.0003	0.0016	0.0014	0.0000	0.0002	0.0005	0.0001	0.0068	0.0072
CrN KAPLANMIŞ	0.0003	0.0004	0.0009	0.0001	0.0004	0.0001	0.0001	0.0011	0.0007
CrN/TiN KAPLANMIŞ	0.0006	0.0021	0.0012	0.0005	0.0032	0.0028	0.0002	0.0106	0.0056

Elde edilen aşınma kayıplarından, denklem 6.8' e göre aşınma oranları hesap edilmiş ve Tablo 8.2.' de verilmiştir. Elde edilen verilerle aşınma oranı grafikler halinde sunulmuştur.

**Tablo 8.2.** Kayma hızı ve uygulanan kuvvete göre aşınma oranları [Aşınma oranı x 10<sup>-6</sup> (mm<sup>3</sup>N<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>)]

DENEY NUMUNELERİ	0,6 m/sn			1 m/sn			1,4 m/sn		
	25 N	40 N	55 N	25 N	40 N	55 N	25 N	40 N	55 N
SERTLEŞTİRİLMEMİŞ SAF	16	32	43	15	18	20	8	11	7
NİTRÜLENMİŞ	10	11	9	8	5	5	9	10	8
TiN KAPLANMIŞ	1	3	2	1	1	1	1	6	8
CrN KAPLANMIŞ	2	1	1	1	1	1	1	2	1
CrN/TiN KAPLANMIŞ	2	3	1	1	5	6	1	6	7

## 8.2. Sabit Kayma Hızının Aşınma Oranına Etkisi

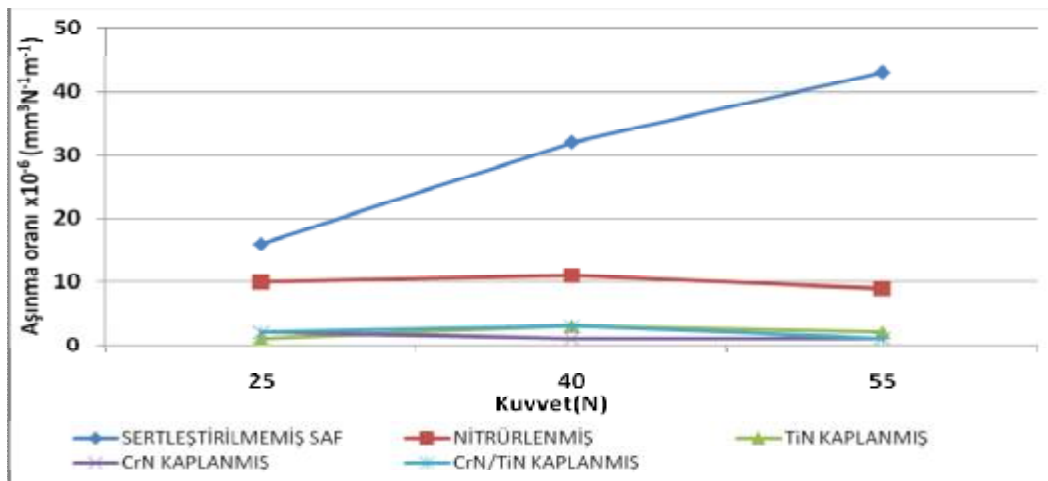
Şekil 8.1, Şekil 8.2 ve Şekil 8.3' de görüldüğü gibi üç farklı kayma hızında aşındırma kuvveti-aşınma oranı değişimleri gösterilmiştir.

Şekil 8.1. de 0,6 m/sn kayma hızında 25 N yükte kaplama yapılmış tüm numunelerin aşınma oranları hemen hemen aynı oranda kalmıştır. Ancak plazma nitrasyon yöntemi ile sertleştirilmiş numunenin aşınma oranı kaplama numunelere göre daha da artmıştır. 40 N uygulama yükünde hemen hemen aynı eğilim göstermektedir. Yük değeri 55 N artırıldığında ısı işlem yapılmamış numune hariç tüm numunelerdeki aşınma oranı azalma eğilimi gösterirken saf numunede ise artış gözlenmiştir. Numunelerdeki sertlik arttıkça aşınma oranı azalma göstermiştir. Plazma nitrürleme yapılmış numunede yükün artışı ile birlikte aşınma miktarı da artış olmuş ancak nitrürlemede oluşan beyaz tabakanın etkisi ile sürtünme kuvvetinde azalma meydana geldiğinden aşınma oranı 55 N luk kuvvetin etkisinde azalma eğilimi göstermiştir. Kaplama yapılmış numunelerin kütle kaybı esnasında kopan partiküller disk pim arasına girerek üçlü abraziv oluşturarak disk üzerinde abraziv çizikler oluşmuştur. (Şekil 8.4.). Şekil 8.4. incelendiğinde disk üzerinde oluşan abraziv kanal genişlikleri deney numunelerinin sertliği ile paralellik göstermiştir. En büyük abraziv kanal genişliği TiN kaplanmış numunede gözlenirken, saf numunenin diskin üzerindeki abraziv etkisi hemen hemen hiç gözlenmemiştir. Diğer deney şartlarında disk yüzeyinde oluşan abraziv aşınmalar Ek-1 de verilmiştir.

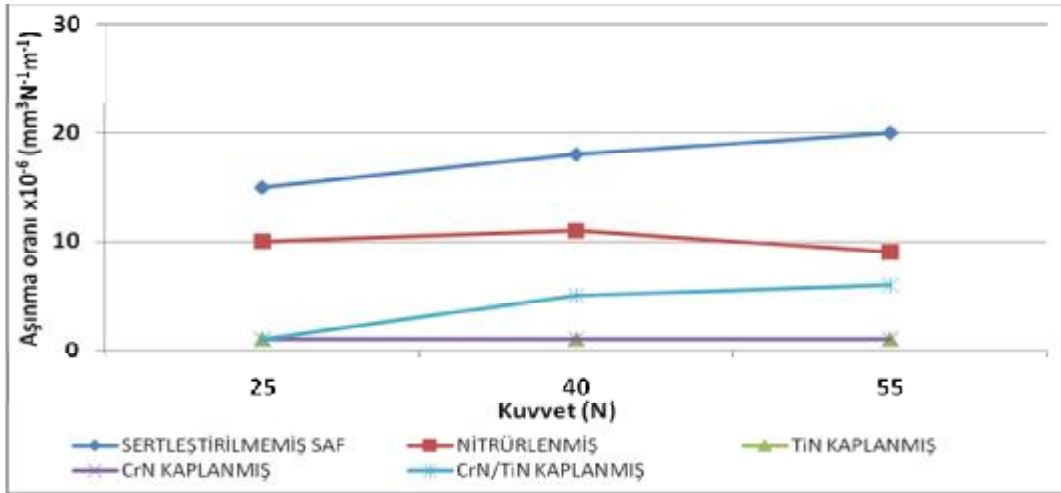
Şekil 8.2. ve Şekil 8.3. deki 1 m/sn, 1,4 m/sn kayma hızındaki aşınma oranı değerleri 0,6 m/sn deki kayma hızındaki aşınma oranı ile paralellik göstermiştir. Tablo 8.2. ve şekiller incelendiğinde kayma hızı ve uygulama yükün artışı ile birlikte aşınma oranında azalma göstermiştir. Bunun nedeni yüzeyde oluşan temas sıcaklığının artması ile koruyucu oksit tabakası oluşmakta buda sürtünme katsayısını azaltarak numunelerdeki kütle kaybı miktarını düşürmektedir. Yüksek hız ve yüklerde kararsız sürtünme süresi daha erken başlar ve kararlı sürtünme süresi kısa zaman içerisinde geçilir. Kararlı sürtünme esnasında yüzeydeki temas sıcaklığının artışı ile temas yüzeyinde sertleşme ve oksitlenme nedeni ile koruyucu bir tabaka oluşur, yüzey düzgünleşir ve aşınma miktarı azalır.

Plazma nitrürlenmiş deney numunesinde aşınmanın kaplama yapılmış numunelere oranla yüksek olması yüzey pürüzlülüğünün fazla olmasından kaynaklanmaktadır. 1 m/sn kayma hızında CrN ve TiN kaplamalar aynı aşınma davranışlarını sergilemektedirler. CrN/TiN kaplamanın aşınma oranındaki artış kaplama prosesinde oluşan dropletten kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Droplet kaplamanın yüzey pürüzlülüğünü artırdığından aşınma daha fazla ve pim yüzeyinde abraziv çizikler meydana gelmiştir.

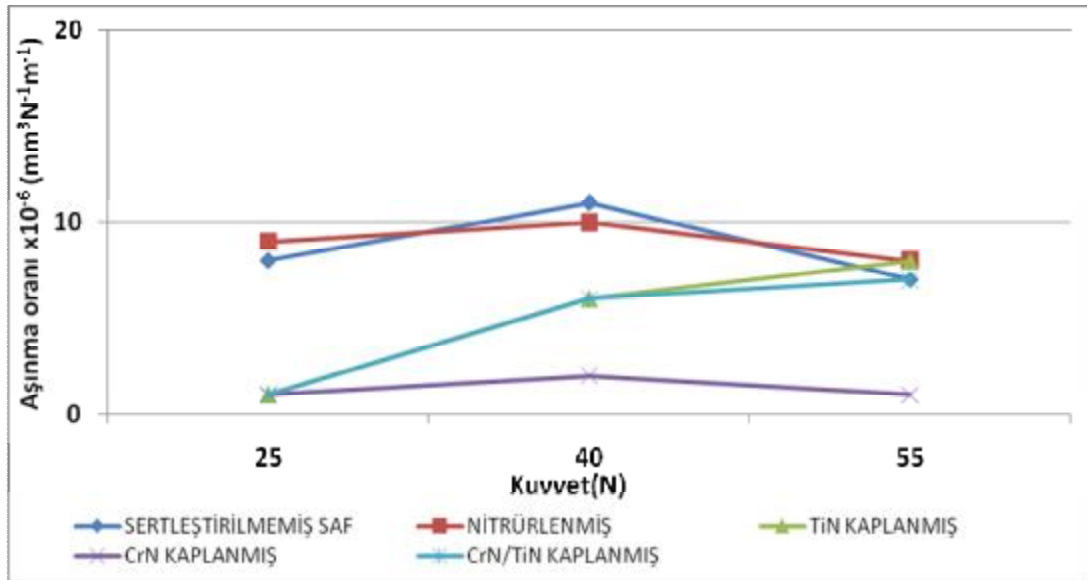
Ek-2 de sabit uygulama kuvveti altında farklı kayma hızlarında aşınma oranlarının etkisi grafiksel olarak verilmiştir.



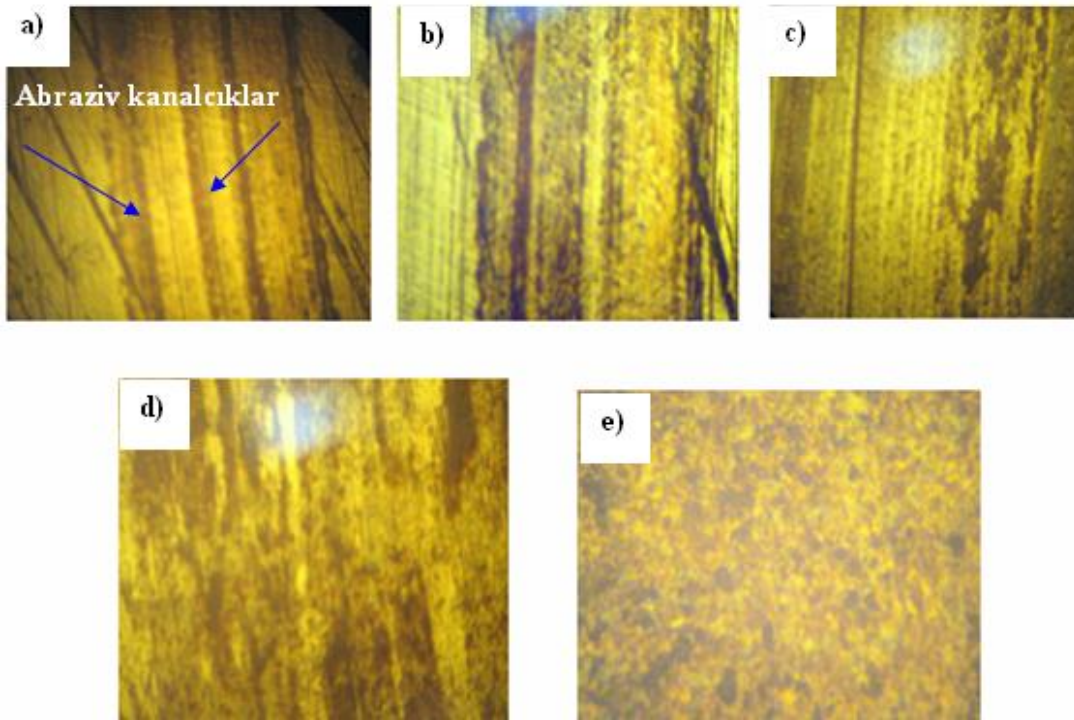
**Şekil 8.1.** Kayma hızı 0,6 m/sn için aşındırma kuvvetine göre aşınma miktarlarının karşılaştırılması



Şekil 8.2. Kayma hızı 1 m/sn için aşındırma kuvvetine göre aşınma miktarlarının karşılaştırılması



Şekil 8.3. Kayma hızı 1,4 m/sn için aşındırma kuvvetine göre aşınma miktarlarının karşılaştırılması



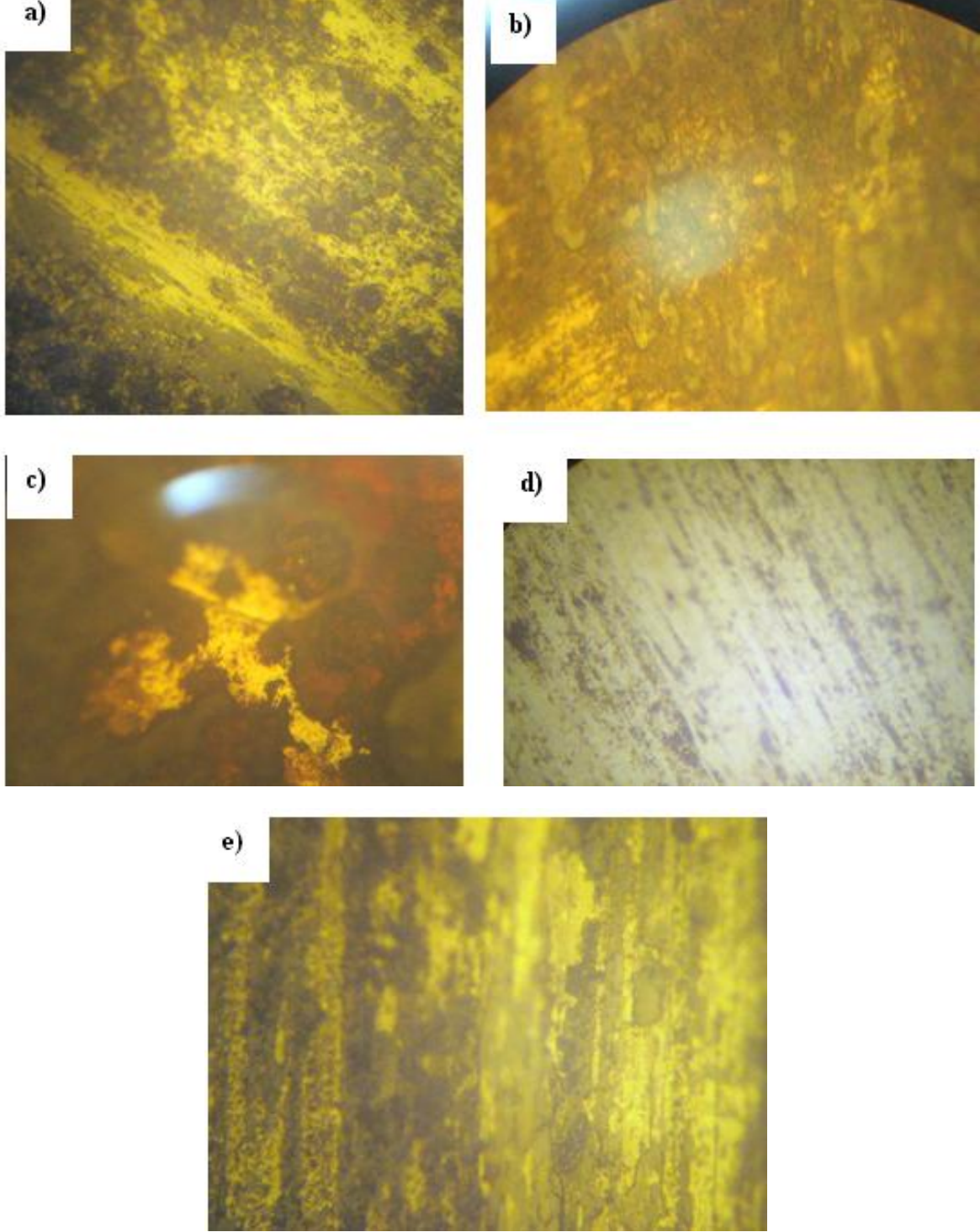
**Şekil 8.4.** 0,6 m/s kayma hızında 40 N uygulama yükte disk üzerinde oluşan aşınma izleri (x250), a) TiN kaplama, b) CrN/TiN dubleks kaplama c) CrN kaplama d) Plazma nitrasyon e) Saf sertleştirilmemiş

Şekil 8.5. de 1,4 m/sn kayma hızı ve 55 N deney yükünde pim üzerinde oluşan aşınma izleri, Şekil 8.6. da SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 8.5a' da herhangi bir ısıl işlem görmemiş numunenin yüksek hız ve yükten dolayı adheziv ve abraziv aşınma görülmektedir. Hızın etkisi ile sıcaklıkta artış meydana gelmiş ve pim yüzeyinde adheziv yapışmalar görülmüştür. Aynı zamanda numuneden ayrılan büyük partiküller (Şekil 8.6a ) pim yüzeyinin yüzey pürüzlülüğünü artırmış, pimde abraziv kanalcıklar oluşmuştur.

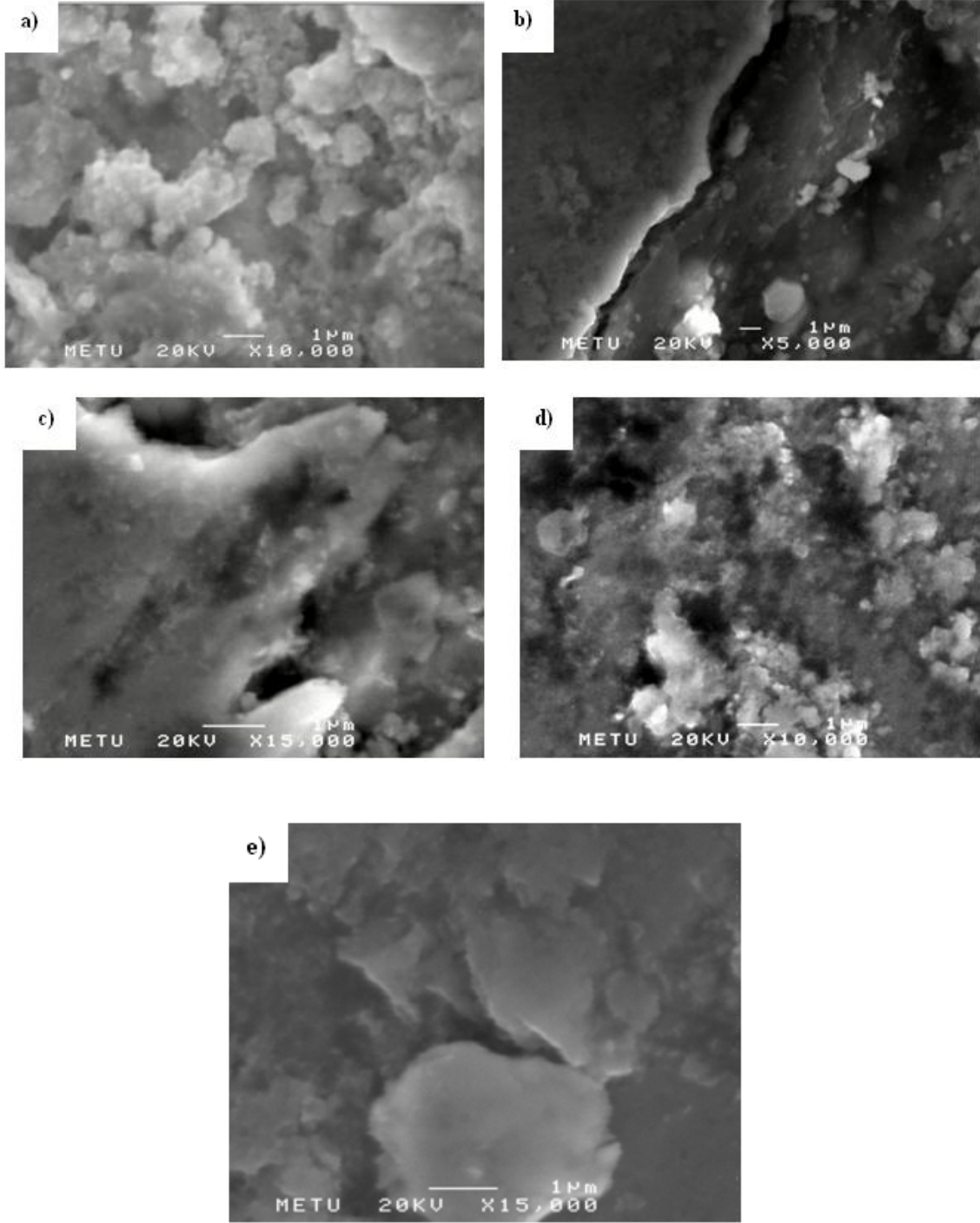
Şekil 8.5b de plazma nitrasyon numunelerde kayma yönünde ince çatlakların olduğu söylenebilir. Bunun nedeni, sürtünmeye bağlı olarak sıcaklığın artması ile temas noktalarında bölgesel erimelerin olduğu şeklinde açıklanabilir. Dolayısı ile kayma yüzeyleri ısıl şoka uğramakta bunun sonucunda bu çatlaklar (Şekil 8.6b) ilerleyerek yüzeyde yeni partiküller oluşturmaktadır. Bu partiküllerin deney süresince pim ve disk arasına girerek yüzeylerdeki çiziklerin oluşmasına sebep olmaktadır.

PVD yöntemi ile kaplama yapılmış numunelerin yüzey sertliğinden dolayı yüzeyde saf ve plazma nitrülendirilmiş numunelere nazaran abraziv kanalcıkların daha az ve daha dar boyutlarda oluştuğu görülmüştür (Şekil 8.5c-e). Temas sıcaklığının artmasından dolayı

yüzeyde oksitlenme oluşmuştur. Özellikle kopan partiküllerin yüksek yük ve hızın etkisi ile tekrar pim yüzeyine yapıştığı ve bu nedenle de adheziv aşınma bazı durumlarda ön plana çıkmıştır. Şekil 8.6c-e de PVD yöntemi ile kaplama yapılmış numunelerin SEM görüntüleri görülmektedir.



**Şekil 8.5.** 1,4 m/sn kayma hızında 55 N yük altında pim yüzeyinde oluşan aşınma izleri (X400), a) Saf numune, b) Plazma nitrasyon numune, c) CrN/TiN dubleks kaplama, d)CrN numune, e)TiN numune



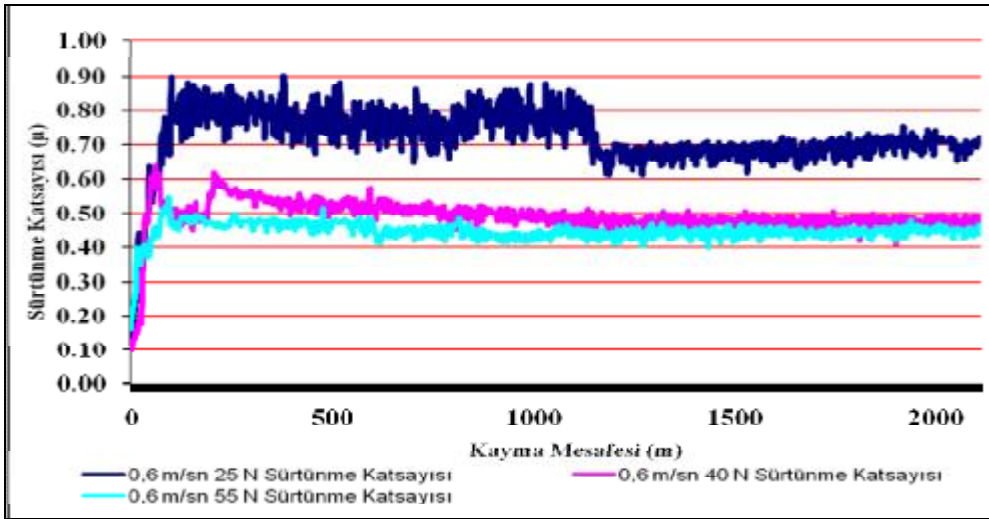
**Şekil 8.6.** 1,4 m/sn kayma hızında 55 N yük altında pim yüzeyinde oluşan aşınma izleri, a) Saf numune, b) Plazma nitrasyon numune, c) CrN/TiN dubleks kaplama, d)CrN numune, e)TiN numune



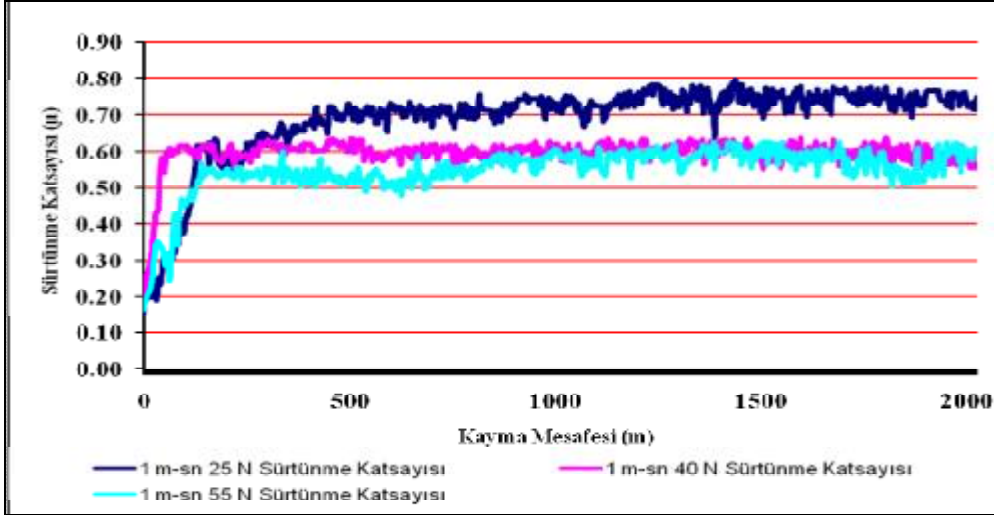
### 8.3. Kayma Hızı-Uygulanan Aşındırma Kuvveti Etkisinde Kayma Mesafesinin Sürtünme Katsayısına Etkisi

Kayma hızı ve uygulanan kuvvetin etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi aşağıda gösterilmiştir.

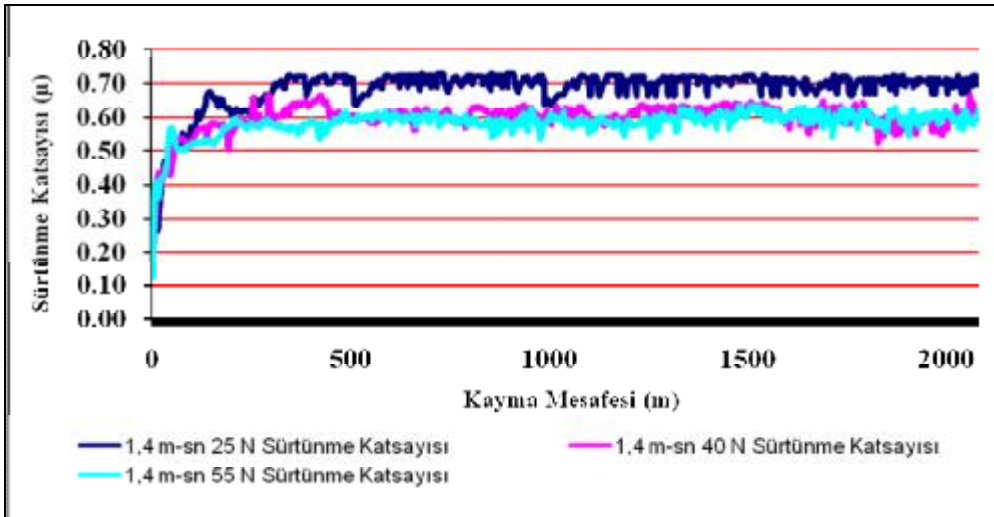
Kuvvetin etkisi ile kayma mesafesi boyunca sürtünme katsayısının saf sertleştirilmemiş deney numunesindeki değişim Şekil 8.7. de 0,6 m/sn kayma hızında kuvvetin düşük olmasından dolayı yükselmiştir. Deney numunesinde aşınma artmış, malzeme kopmaları gerçekleşmiş ve malzeme yüzeyinde yırtılmalar olmuştur. Sürtünme katsayısı sıcaklığın artması ile numune yüzeyinin sertleşmesinden dolayı düşerek sabit değerlerde ilerlemiştir. Sürtünme katsayısı aşındırıcı kuvvetin artması ile düşük değerlerde seyretmiştir. Saf sertleştirilmemiş deney numunesinin bütün şartlardaki Şekil 8.8. ve Şekil 8.9 daki deneylerinde sürtünme katsayısı aynı özellikleri göstermiştir.



Şekil 8.7. Sertleştirilmemiş deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi



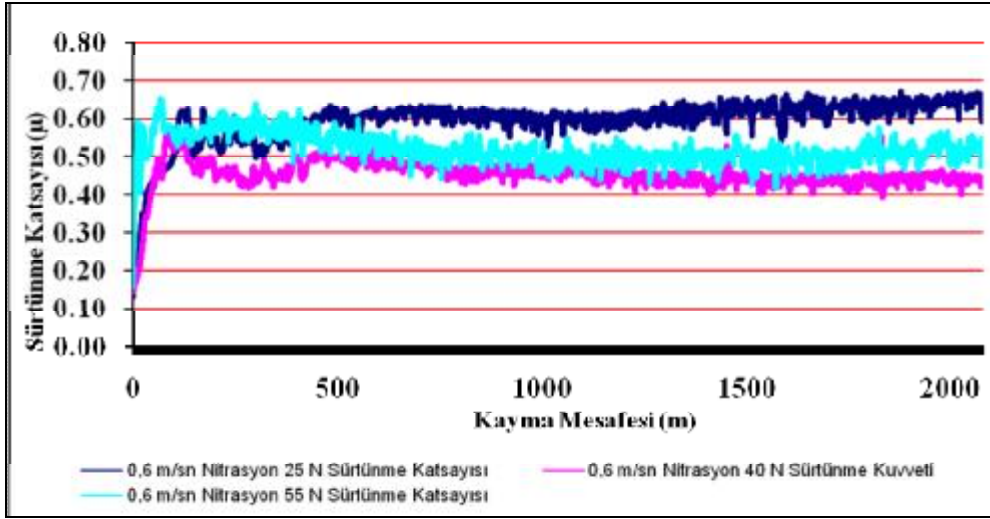
**Şekil 8.8.** Sertleştirilmemiş deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi



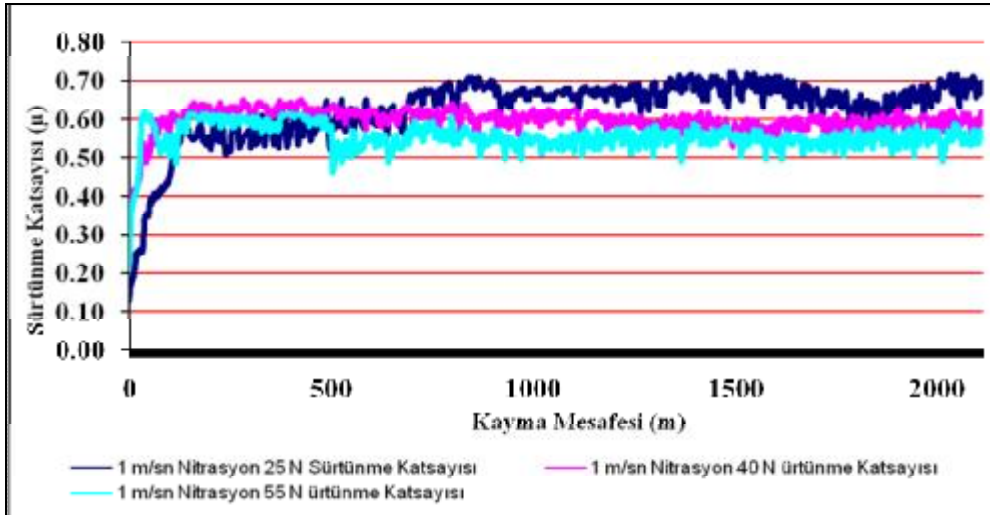
**Şekil 8.9.** Sertleştirilmemiş deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi

Plazma nitrasyonla sertleştirilen deney numuneleri ile yapılan çalışmalarda farklı kayma hızı ve aşındırma kuvvetlerinde, nitrülenmiş deney numunesinin sertleşmiş tabakası azaldıkça sürtünme katsayısında değişimler meydana gelmektedir. Sertleşmiş tabakanın kopmasından sonra sürtünme katsayısında yükselme ve alçalmalar olmaktadır. Sert tabakanın kaybolması ile malzeme yüzeyinde kopmalar ve yırtılmalar gözlenmektedir. Yüksek aşındırma kuvvetinde sürtünme katsayısının düşük çıkması nitrasyonda oluşan sert tabaka ile açıklanabilir. Plazma nitrasyon yapılmış deney numunesinde sertleştirilmiş tabakanın yırtılmasından sonra sürtünme ve sıcaklığın etkisi ile malzeme yüzeyi sertleşmiş olup

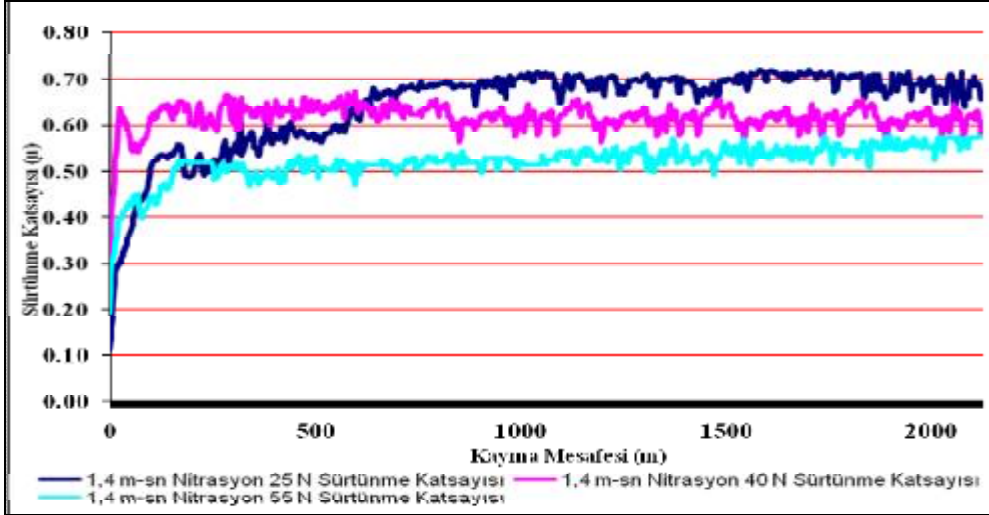
sürtünme katsayısında aşırı değişimler göstermemektedir. 0,6 m/sn kayma hızında oluşan sürtünme katsayısı grafiği Şekil 8.10. ve 1 m/sn kayma hızında oluşan sürtünme katsayısı grafiği Şekil 8.11. benzer özellikler sergilemektedirler. 1,4 m/sn kayma hızındaki sürtünme katsayısı Şekil 8.12. deki ideal bir grafik oluşturmaktadır. Bu da yüksek aşındırma kuvvetinde düşük sürtünme katsayısı olarak açıklanabilir.



**Şekil 8.10.** Plazma nitrasyon deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi

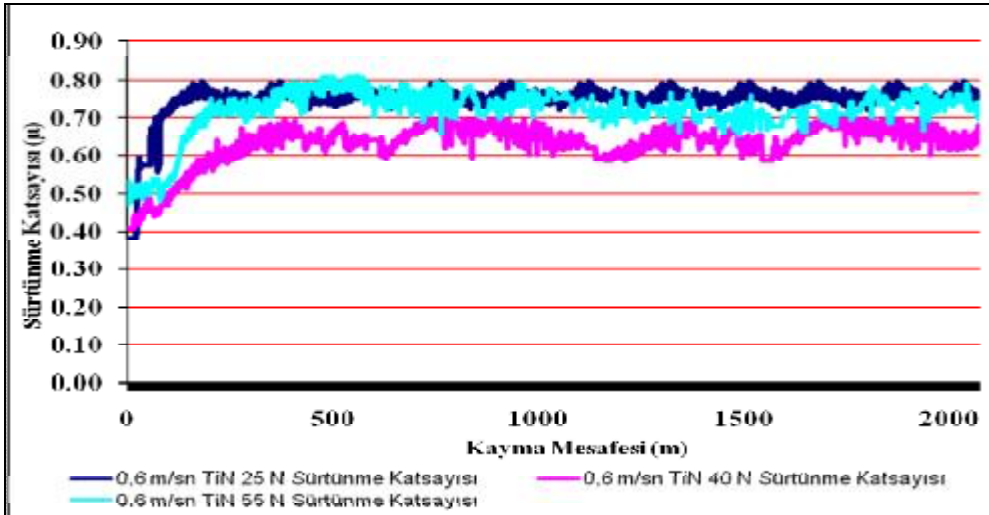


**Şekil 8.11.** Plazma nitrasyon deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi

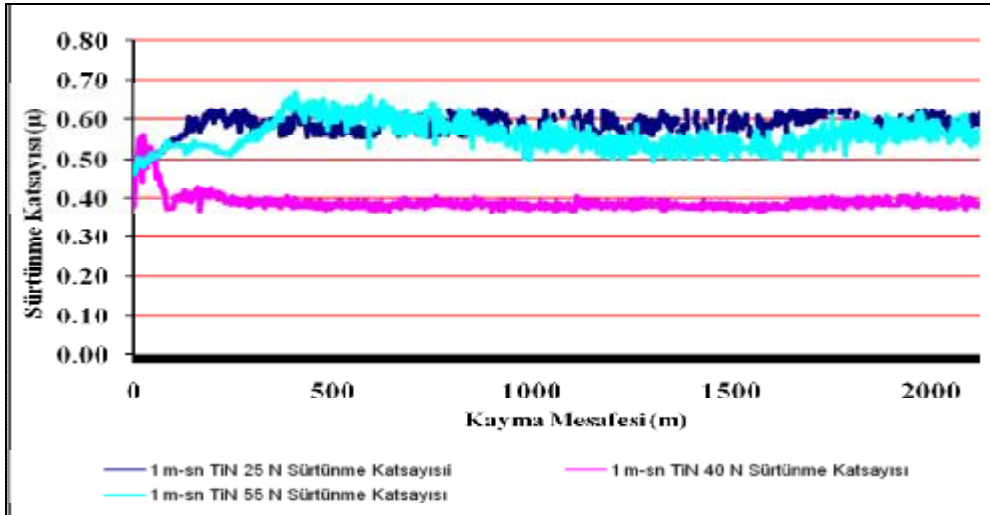


**Şekil 8.12.** Plazma nitrasyon deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi

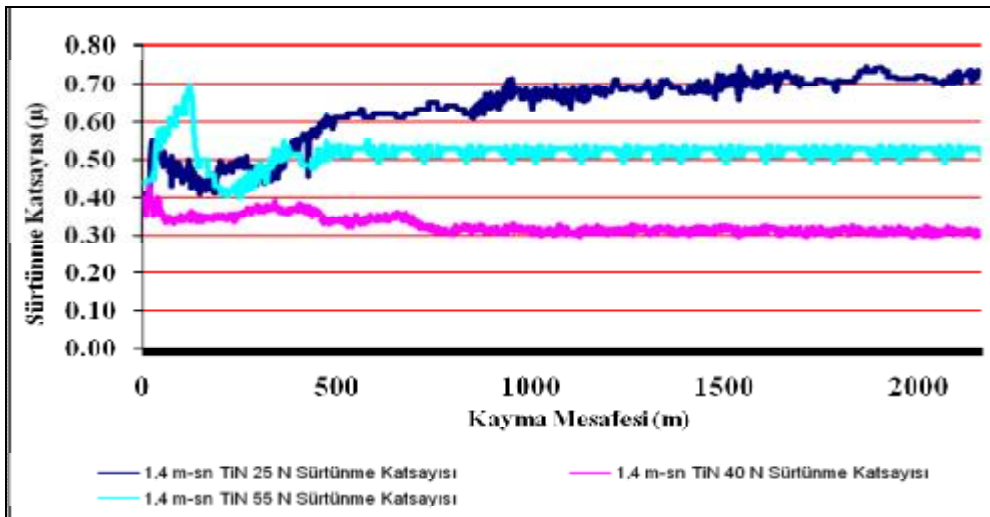
TiN kaplanmış deney numunesinde yapılan çalışmalarda yüksek aşındırma kuvvetinde sürtünme katsayısı düşük çıkması gerekirken diğer kuvvetlere göre daha yüksek olmuştur. Buda TiN kaplamanın sıcaklığı dağıtmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmalarda elde edilen grafikler Şekil 8.13., Şekil 8.14. ve Şekil 8.15. deki resimlerde görüldüğü gibi benzer özellikler sergilemektedir. Kayma hızı arttıkça TiN kaplamanın aşınma direnci artmaktadır. Aşındırma kuvvetinin artması ile aşınma artmaktadır.



**Şekil 8.13.** TiN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi

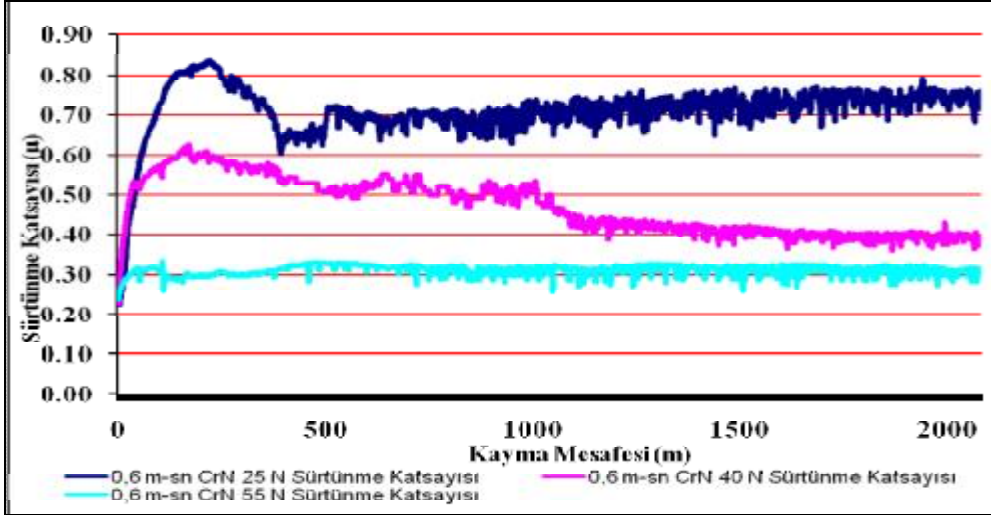


**Şekil 8.14.** TiN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi

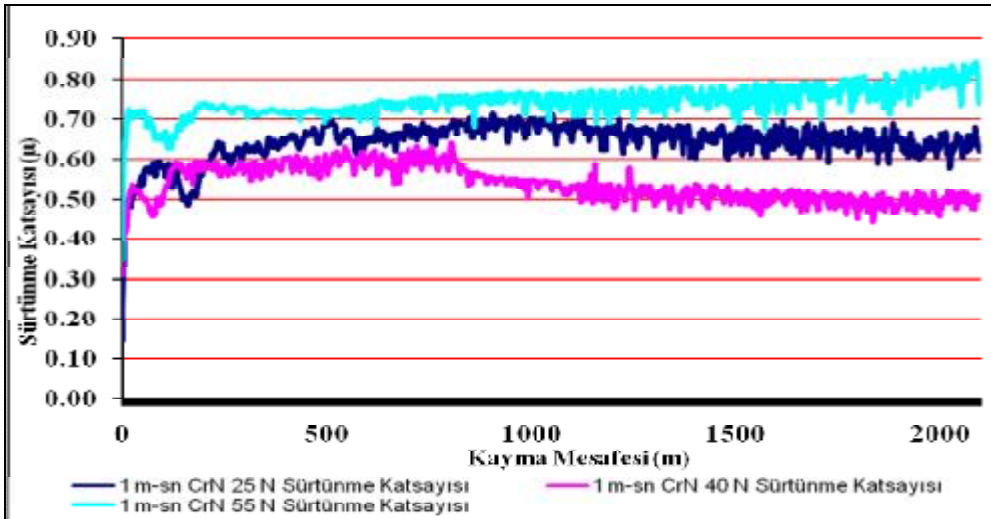


**Şekil 8.15.** TiN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi

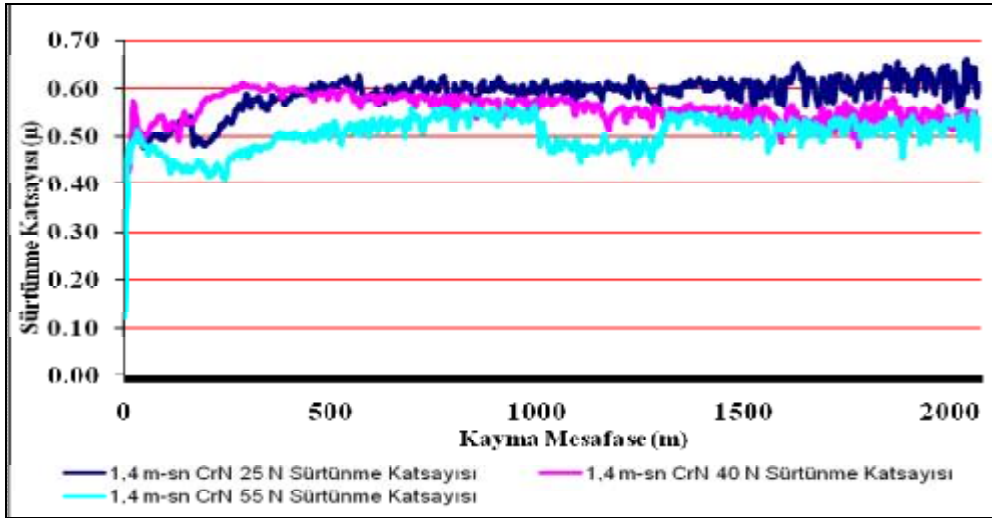
CrN kaplanmış deney numunesinin kaplamadan dolayı yüzey pürüzlülüğünün düşük olmasından dolayı sürtünme katsayısında büyük kuvvetin etkisinde sürtünme katsayısı düşük olmuştur. Ancak CrN kaplama sıcaklığı çevreye dağıtmadığından sürtünme sıcaklığın etkisi ile fazlaşmış, buda sürtünme katsayısının yüksek olmasına neden olmuştur. Yapılan deney çalışmaları sonucunda CrN kaplanmış deney numunesinde farklı kayma hızı ve aşındırma kuvvetlerinde Şekil 8.16. Şekil 8.17. ve Şekil 8.18 deki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 8.16. CrN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi

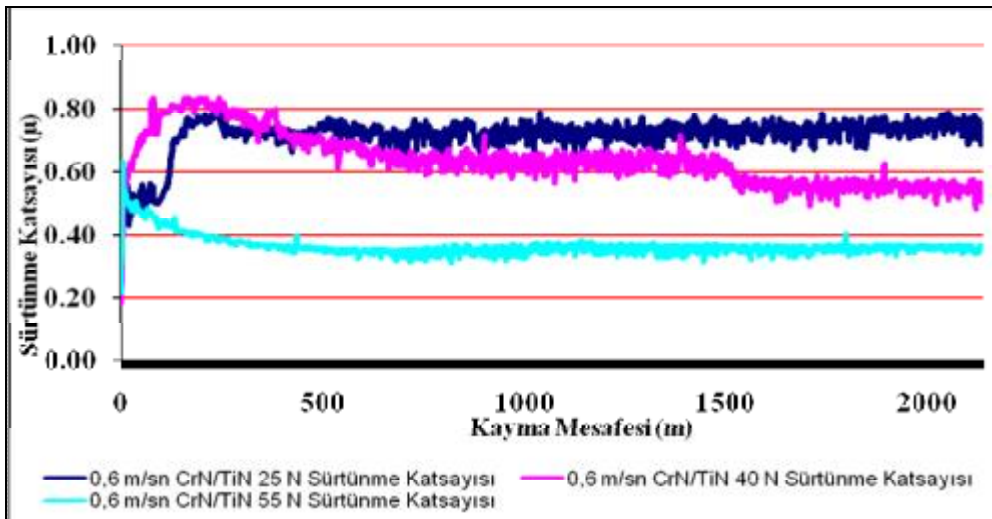


Şekil 8.17. CrN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi

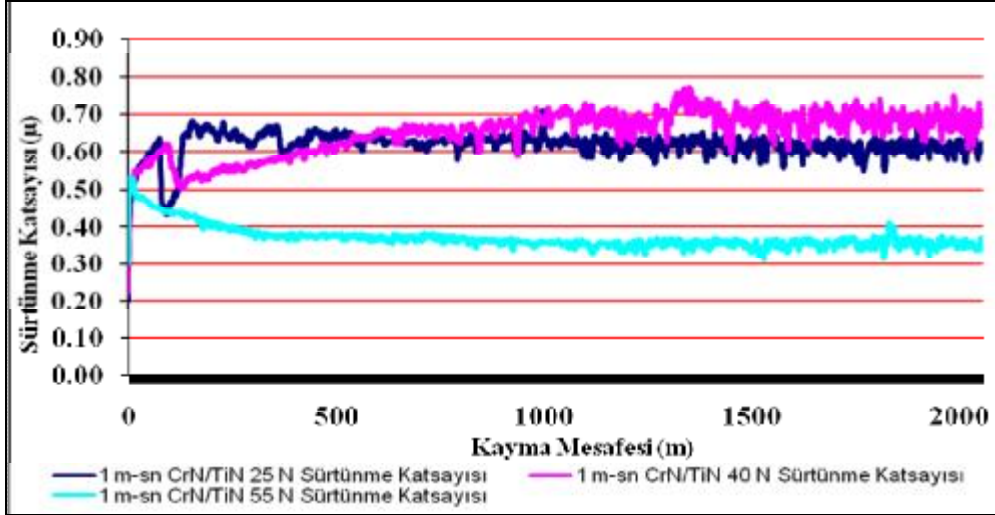


**Şekil 8.18.** CrN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi

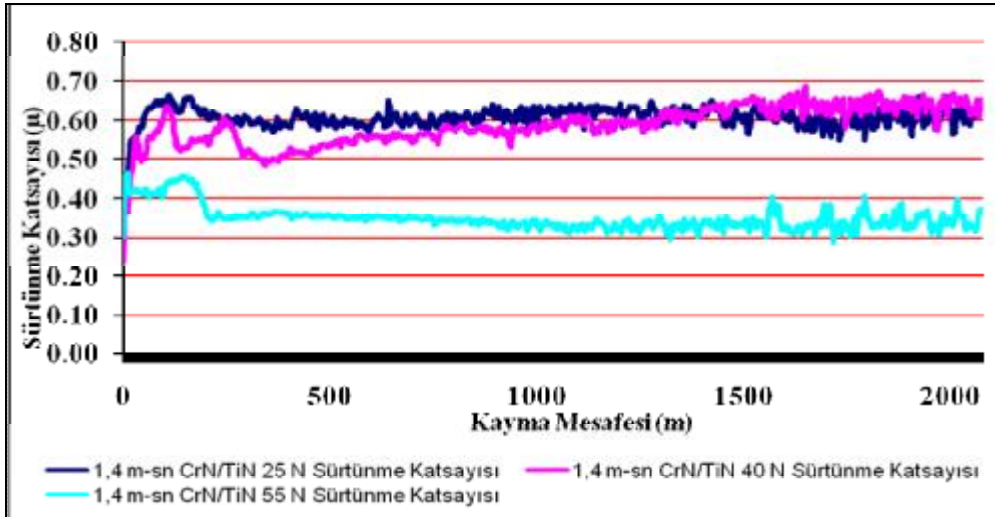
CrN/TiN kaplanmış deney numunelerinde aşındırma kuvvetinin artması ile sürtünme katsayısı azalmıştır. Ancak kaplamayüzeyindeki pürüzlülük sıcaklığın malzeme yüzeyinde toplanması CrN kaplama özelliğini gösterdiğinden sıcaklığın etkisi ile sürtünme katsayısı yüksek olmuştur. CrN/TiN kaplama numuneleri ile yapılan farklı kayma hızı ve aşındırma kuvvetlerinden elde edilen grafikler Şekil 8.19, Şekil 8.20, ve Şekil 8.21, de görülmektedir.



**Şekil 8.19.** CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi



**Şekil 8.20.** CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi



**Şekil 8.21.** CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sürtünme katsayısına etkisi

Yukarıdaki şekiller incelendiğinde tüm deney şartlarında sürtünme katsayısı ortalama değerleri aşağıda Tablo 8.3. de verilmiştir.



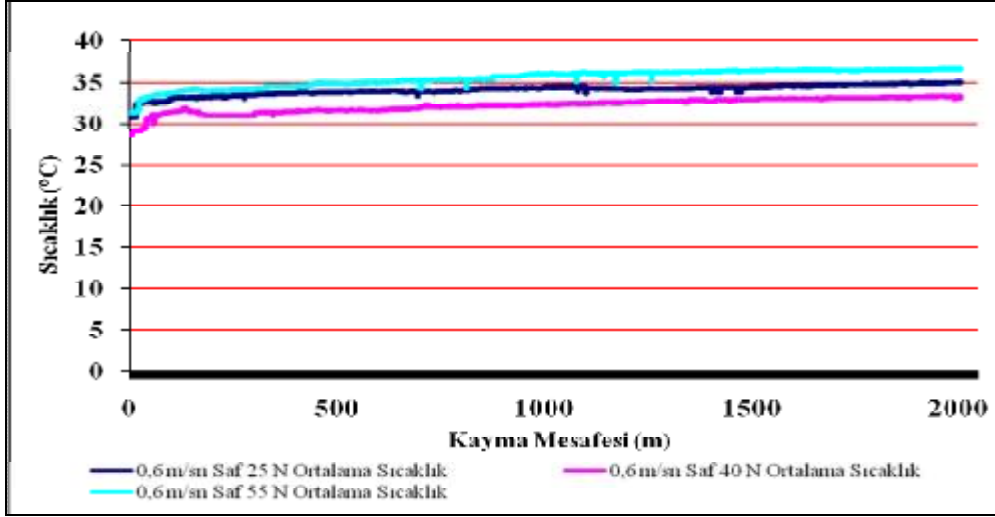
**Tablo 8.3.** Deney numuneleri ortalama sürtünme kuvvetleri

	25 N			40 N			55 N		
	0,6 m/sn	1 m/sn	1,4 m/sn	0,6 m/sn	1 m/sn	1,4 m/sn	0,6 m/sn	1 m/sn	1,4 m/sn
SERTLEŞTİRİLMEMİŞ SAF	0,97	0,93	0,95	0,65	0,80	0,80	0,60	0,74	0,78
PLAZMA NİTRASYON	0,79	0,85	0,87	0,60	0,80	0,83	0,69	0,71	0,70
TiN KAPLANMIŞ	0,82	0,75	0,83	0,69	0,51	0,42	0,94	0,73	0,67
CrN KAPLANMIŞ	0,96	0,85	0,78	0,64	0,72	0,74	0,41	0,99	0,67
CrN/TiN KAPLANMIŞ	0,95	0,82	0,81	0,85	0,87	0,78	0,49	0,49	0,47

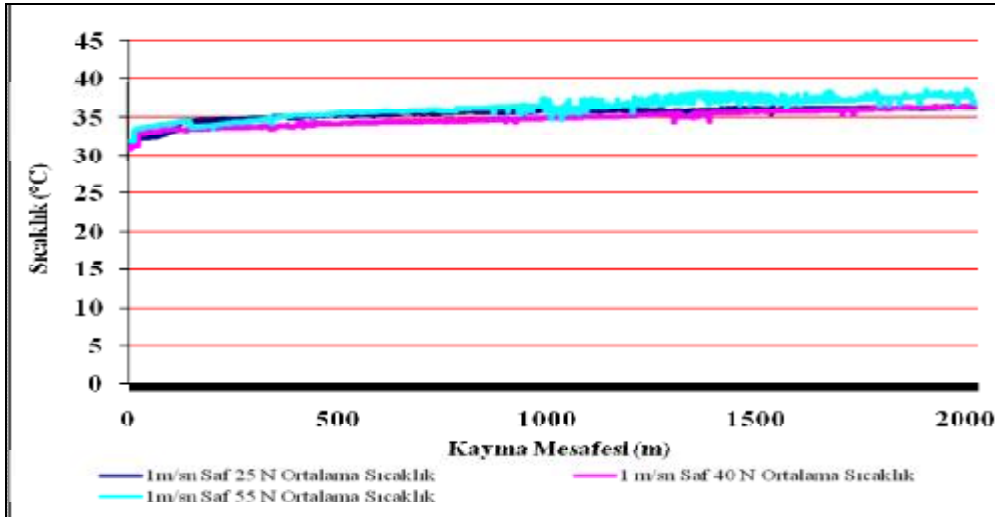
#### 8.4. Kayma Hızı-Uygulanan Aşındırma Kuvveti Etkisinde Kayma Mesafesinin Sıcaklık Artışına Etkisi

Kayma hızı ve uygulanan kuvvetin etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi aşağıda gösterilmiştir.

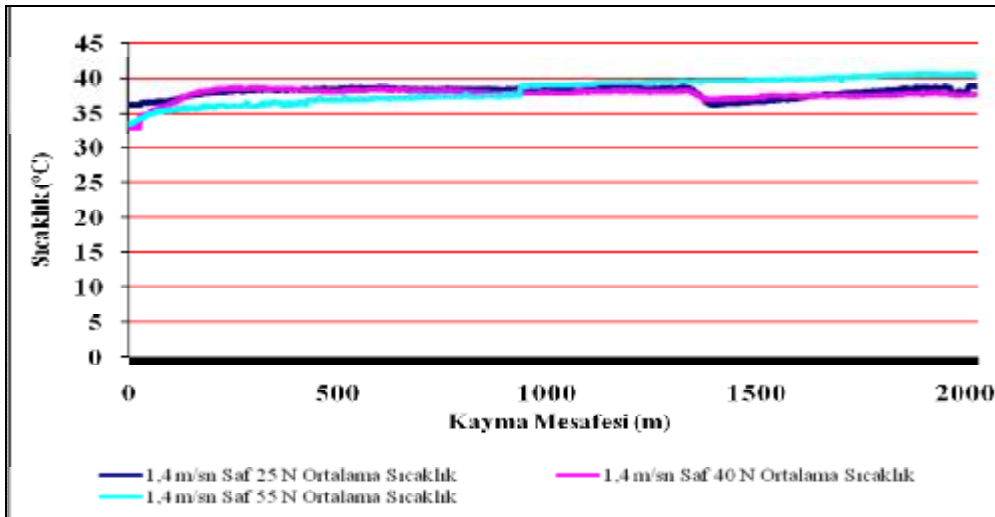
Sertleştirilmemiş deney numunesi ile yapılan çalışmalarda 0,6 m/sn kayma hızında uygulanan kuvvetin etkisi 55 N olduğunda sıcaklık artmaktadır. Abrasiv aşınmaların etkisi ile sıcaklık değişimleri kuvvet ve kayma hızlarına göre değişim göstermektedir. Şekil 8.22., Şekil 8.23., ve Şekil 8.24. de sertleştirilmemiş deney numunesinde farklı kayma hızlarında oluşan sıcaklık değişimleri görülmektedir.



Şekil 8.22. Sertleştirilmemiş deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

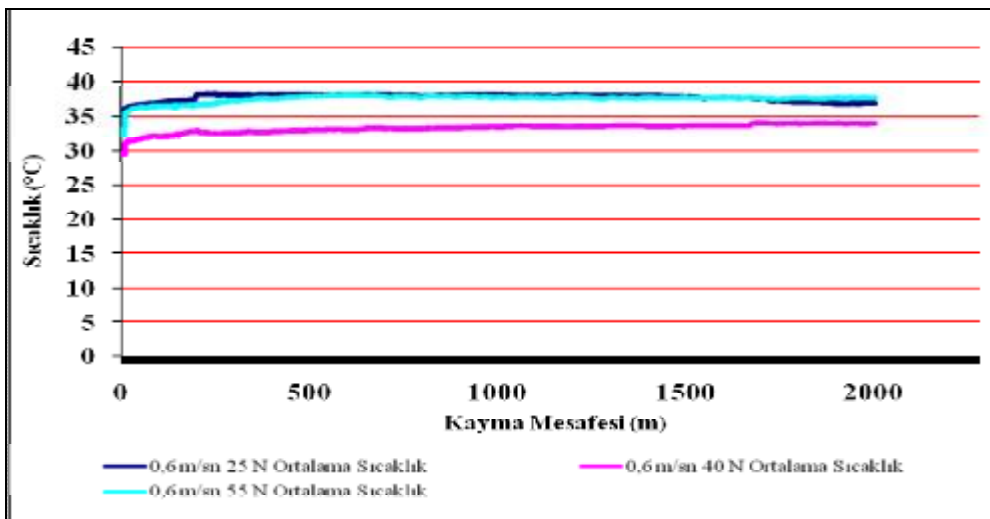


Şekil 8.23. Sertleştirilmemiş deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

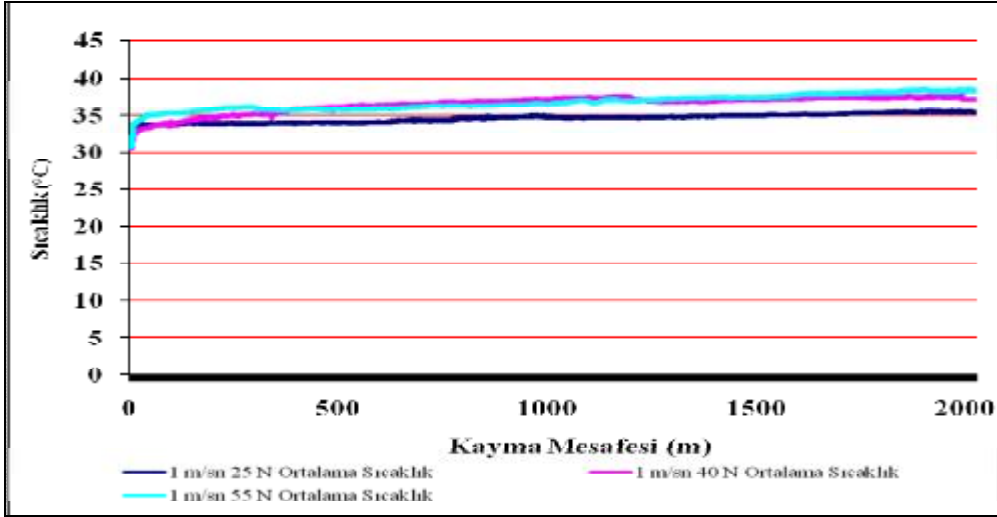


**Şekil 8.24.** Sertleştirilmemiş deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

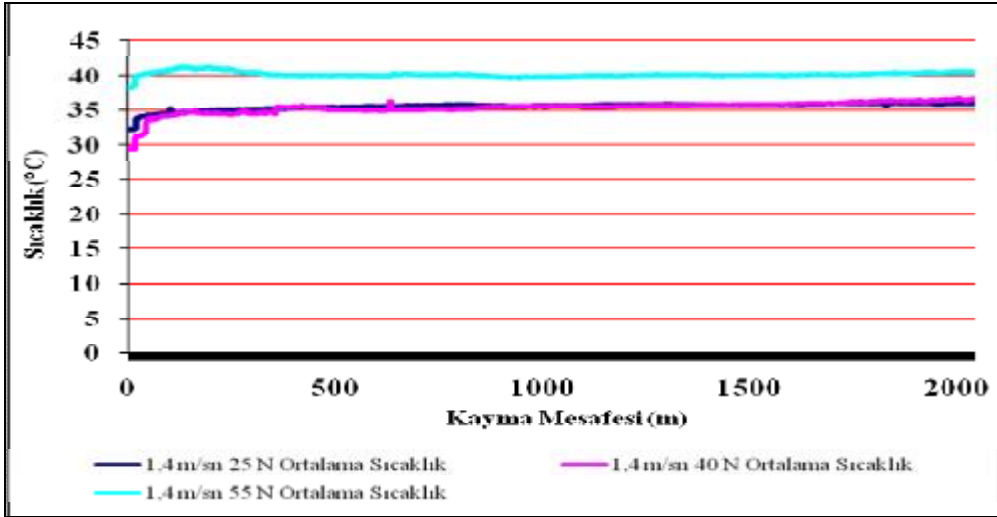
Plazma nitrasyon yapılmış deney numunelerinde Şekil 8.25., Şekil 8.26 ve Şekil 8.27. de sıcaklık değişimi sertleştirilmemiş deney numunesi ile benzerlik göstermektedir. Ancak kayma hızı ve yükün artması ile sıcaklık değerlerinde bir artış söz konusudur. Buda nitrasyon yapılmış tabakanın aşınması ile yüzeyden kopan parçacıkların üçlü abraziv oluşturmasından kaynaklanmaktadır.



**Şekil 8.25.** Plazma nitrasyon deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

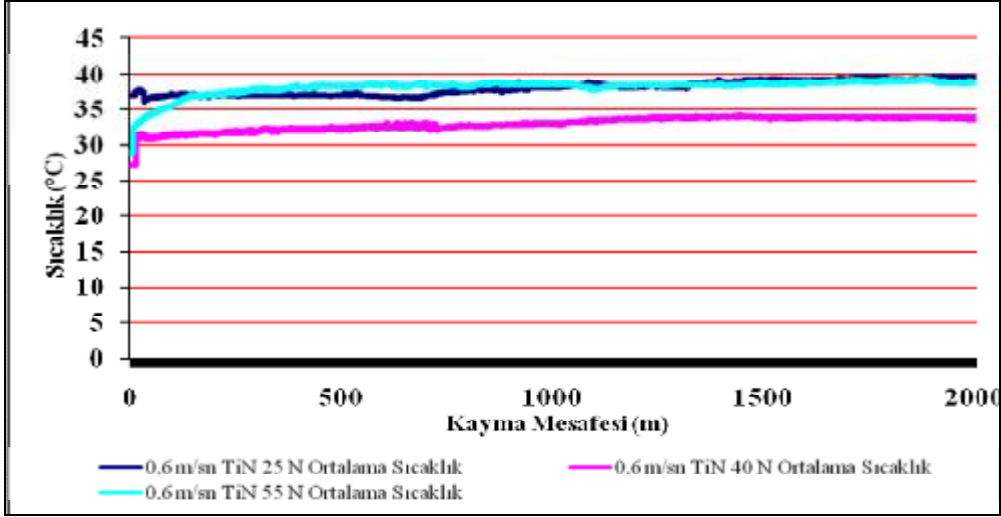


Şekil 8.26. Plazma nitrasyon deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

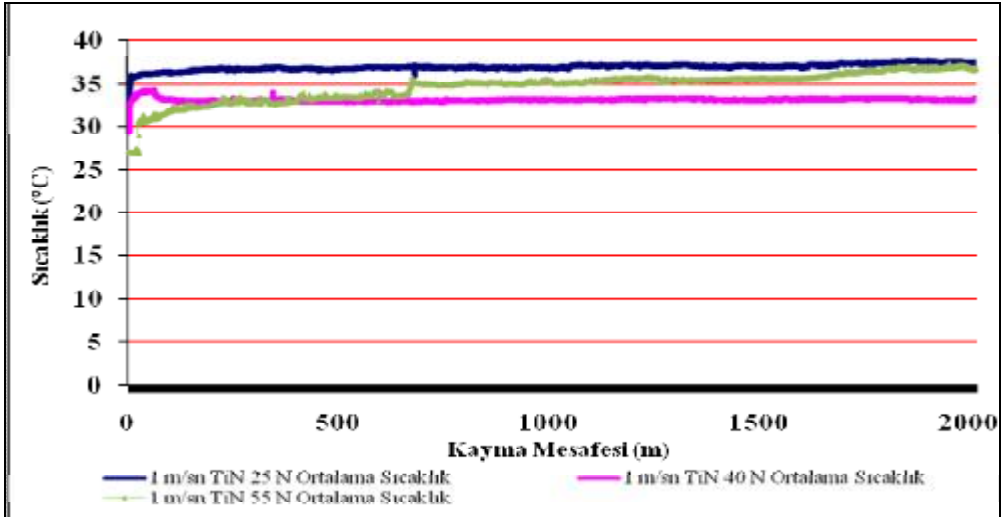


Şekil 8.27. Plazma nitrasyon deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

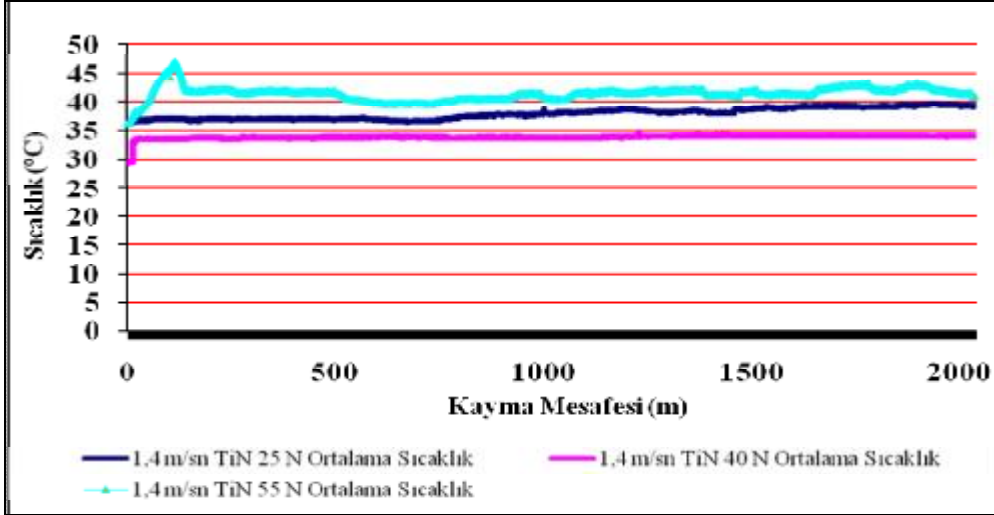
TiN kaplamalanmış deney numunelerindeki sıcaklık değişimleri Şekil 8.28., Şekil 8.29. ve Şekil 8.30 da kaplanmamış deney numunelerine oranla daha düşüktür. TiN kaplamaların sıcaklığı daıtma özelliğide değerlerin düşük çıkmasına etkendir.



Şekil 8.28. TiN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

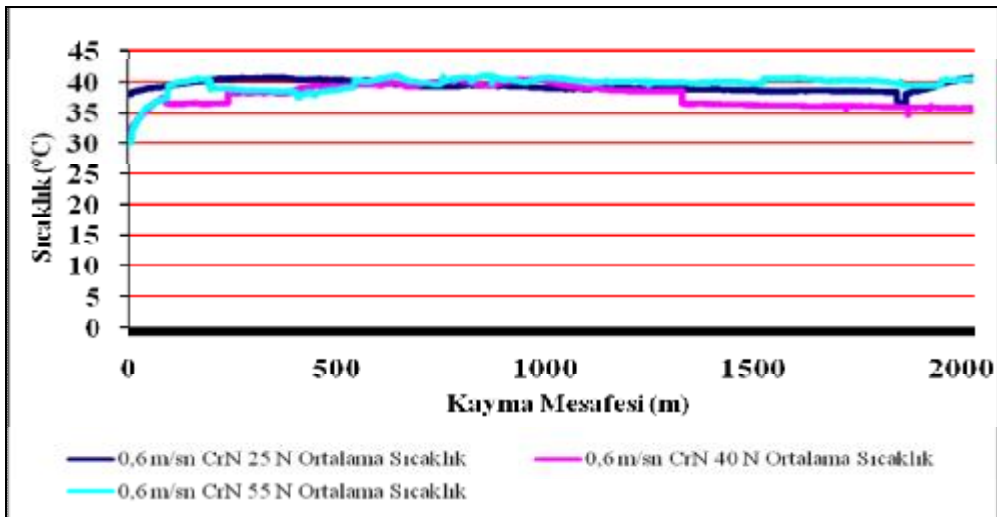


Şekil 8.29. TiN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

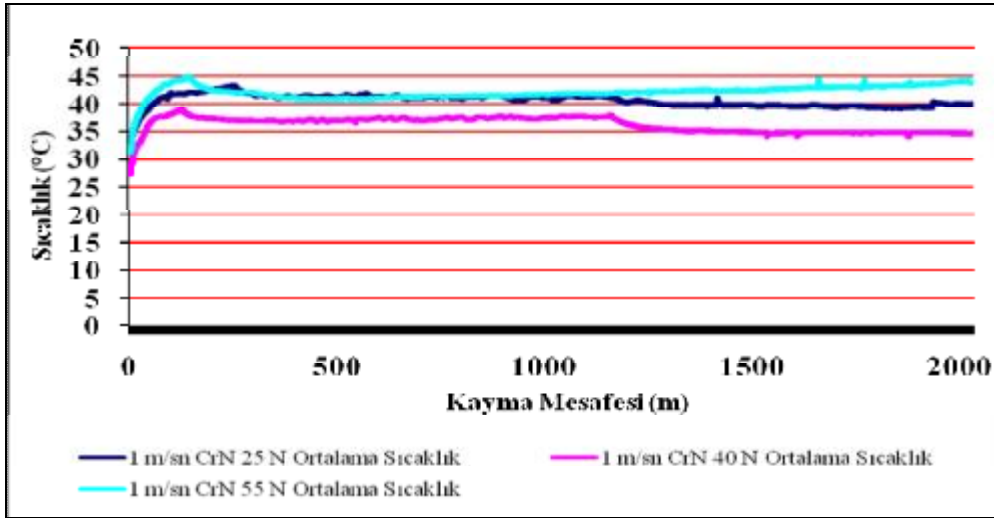


**Şekil 8.30.** TiN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

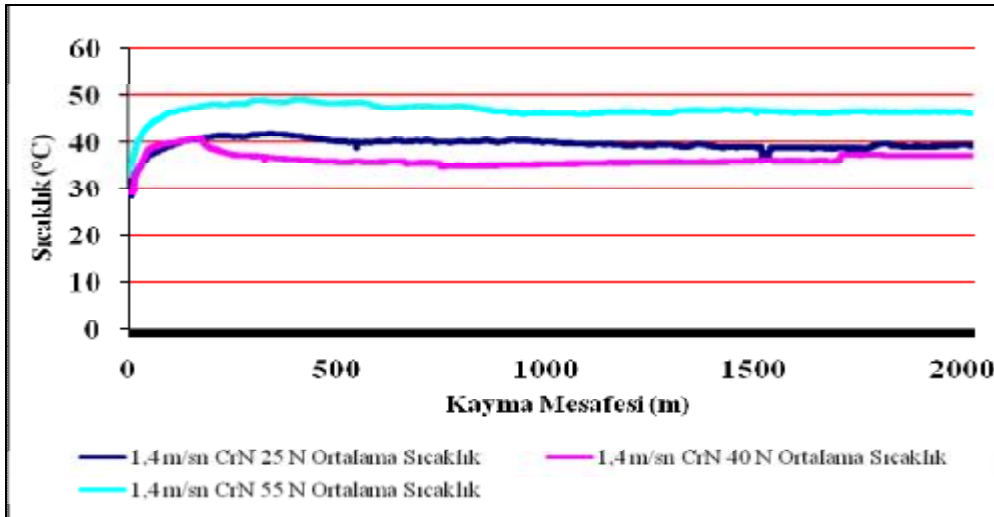
CrN kaplamalanmış deney numunelerindeki sıcaklık değişimleri Şekil 8.31., Şekil 8.32. ve Şekil 8.33. de sıcaklık değerlerinin diğer numunelerden farklı olması, CrN kaplanmış deney numunelerinin aşındırıcı diskten parça koparmasından kaynaklanmaktadır. Kopan parçacıkların oluşturduğu abrazyon aşınmalar aşındırıcı disk ve deney numunesinin sıcaklığını artırmaktadır.



**Şekil 8.31.** CrN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

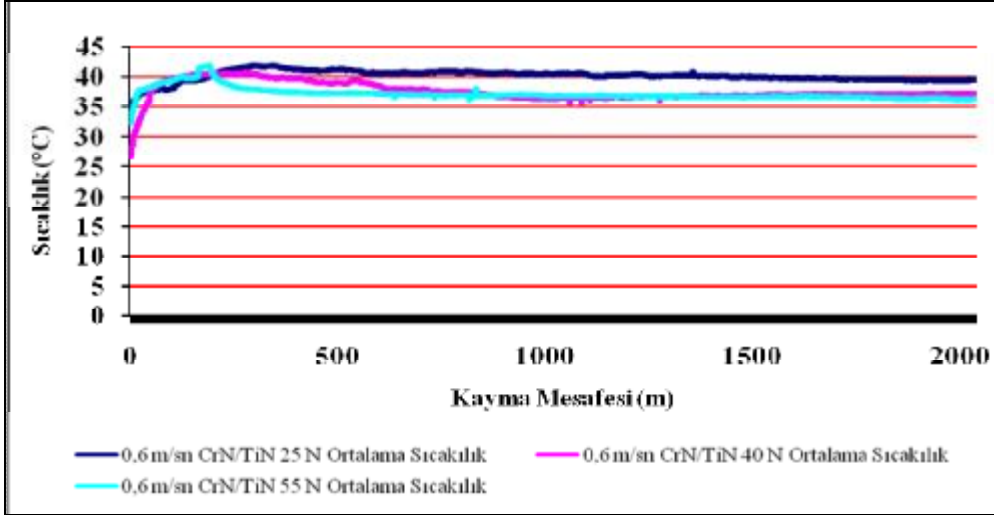


**Şekil 8.32.** CrN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

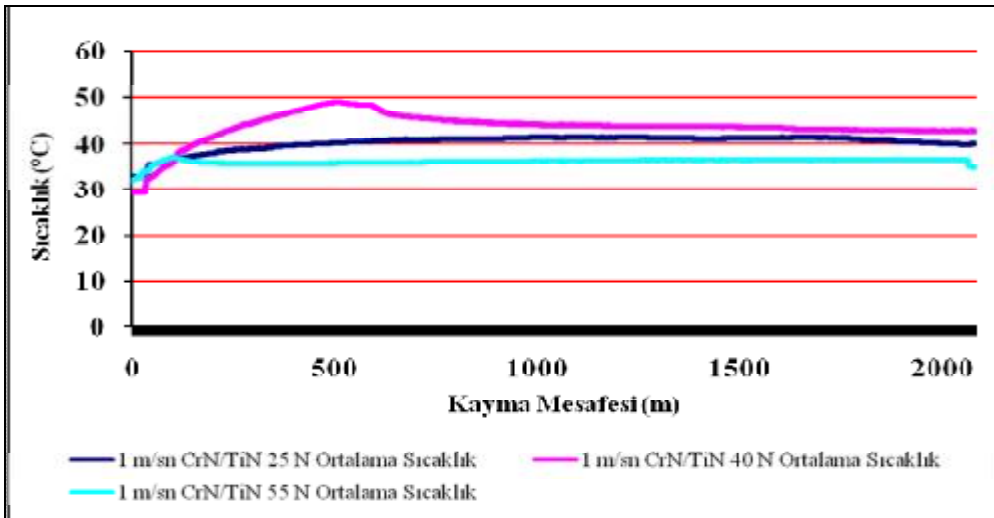


**Şekil 8.33.** CrN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

CrN/TiN kaplamalanmış deney numunelerindeki sıcaklık değişimleri Şekil 8.34., Şekil 8.35. ve Şekil 8.36. da sıcaklık değerlerinin diğer numunelerden farklı olması, CrN/TiN kaplanmış deney numunelerinin aşındırıcı diskten parça koparmasından kaynaklanmaktadır. Kopan parçacıkların oluşturduğu abrazyon aşınmalar aşındırıcı disk ve deney numunesinin sıcaklığını artırmaktadır.

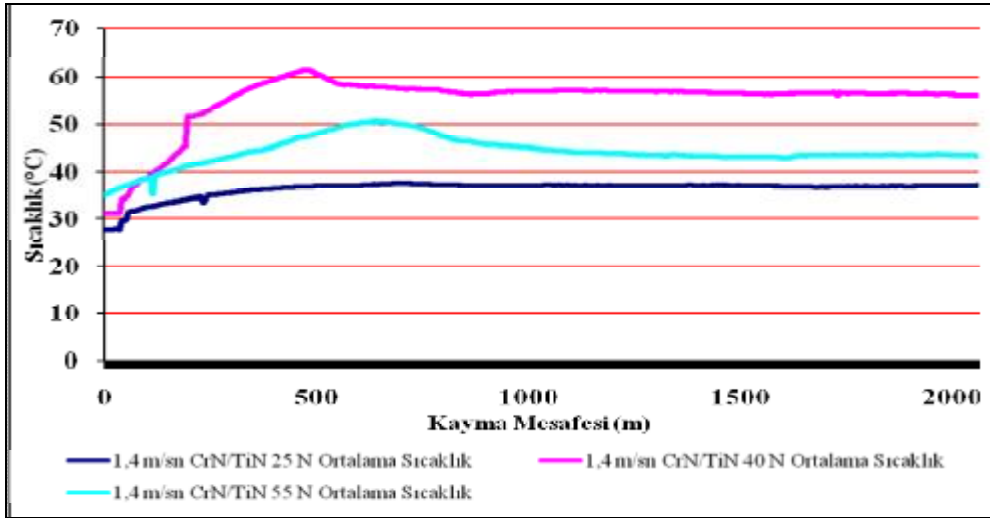


Şekil 8.34. CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 0,6 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi



Şekil 8.35. CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 1 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi





**Şekil 8.36.** CrN/TiN kaplanmış deney numunesinde 1,4 m/sn kayma hızı-aşındırma kuvveti etkisinde kayma mesafesinin sıcaklık artışına etkisi

Yukarıdaki şekiller incelendiğinde tüm deney şartlarında sıcaklık değişimi maksimum değerleri aşağıda Tablo 8.4. de verilmiştir.

**Tablo 8.4.** Deney numuneleri ortalama sıcaklık değerleri

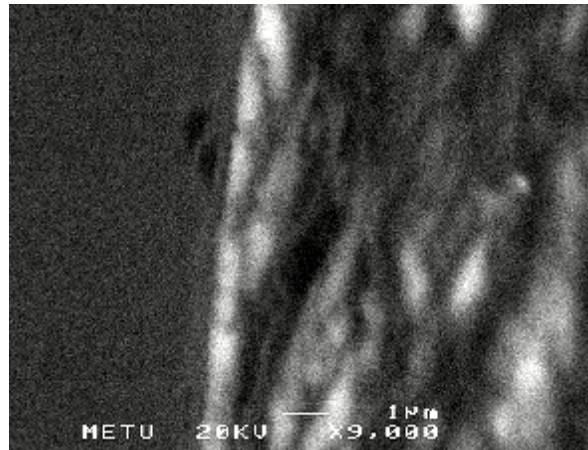
	25 N			40 N			55 N		
	0,6 m/sn	1 m/sn	1,4 m/sn	0,6 m/sn	1 m/sn	1,4 m/sn	0,6 m/sn	1 m/sn	1,4 m/sn
SERTLEŞTİRİLMEMİŞ SAF	35,1	36,5	40,0	33,5	36,8	40,2	38,6	38,6	40,6
PLAZMA NİTRASYON	38,6	35,6	36,1	34,4	37,7	37,3	38,3	38,7	42,1
TiN KAPLANMIŞ	40,2	38,5	39,8	34,2	35,4	34,8	41,4	38,7	47,2
CrN KAPLANMIŞ	43,5	43,3	41,8	40,5	38,9	40,9	41,1	44,8	49,2
CrN/TiN KAPLANMIŞ	42,0	41,5	37,5	40,6	49,0	61,3	41,9	37,2	50,6

### 8.5. İkinci Deney Ortamında Yapılan Deney Sonuçları

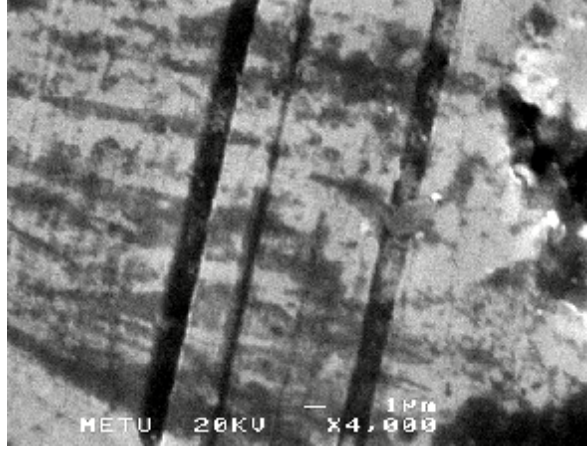
Konaltaş alüminyum A.Ş de yapılan deney sonuçları aşağıda özetlenmiştir. DIN 1,2379 alüminyum soğuk ekstürüzyon erkek kalıbın PVD yöntemi ile CrN kaplama yapılarak gerçek

üretim ortamında normal sertleştirilmiş erkek kalıbın üretim performansı ve aşınma performansları değerlendirilmiştir. Erkek kalıbın servis ömrü iki nedenle sona ermektedir. Birincisi ürünün omuz kalınlığı ve boy uzunluğunda meydana gelen değişiklik, bunun nedeni de erkek kalıbın zırh çapında meydana gelen aşınmadır. Bu nedenle erkek kalıp servis ömrünü tamamlamıştır. Üretim ortamında her iki saatte bir alınan 5 adet numunelerin yapılan ölçümleri Tablo 8.5. de verilmiştir. Üretimi yapılan alüminyum tüpün omuz kalınlığı 0,80 mm, tüp boyu ise 100 mm' dir.

Vakum fırınında yüksek sıcaklıkta yüksek basınçlı gaz ile soğutulmuş sertleştirilen erkek kalıp, ilk iki saatte toplam 10.800 adet tüp bastığında omuz kalınlığında 0,04 mm düşüş, tüp boyunda ise 3 mm düşüş meydana gelmiştir. Dördüncü saatte toplam 21.600 adet tüp bastığında omuz kalınlığında 0,22 mm düşüş, tüp boyunda ise 6 mm düşüş meydana gelmiştir. Altıncı saatin içinde tüpte oluşan omuz ölçüsü ve boy ölçüsünün istenilen standartlar içinde olmamasından dolayı üretim durdurulmuş ve toplamda 11 erkek kalıp için ortalama 60.000 adet tüp üretimi yapılmıştır. Ayrıca erkek kalıp zırhında oluşan abrazyon aşınmadan dolayı dışı kalıp içinde kalan alüminyum partiküller tüp oluşumunu engellediğinden dolayı kalıbın çatlamasına neden olmaktadır. Dışı kalıpta kalan alüminyum partiküller delik tüpe neden olduğundan erkek kalıp servis ömrü tamamlanmış olmaktadır. Yapılan çalışmalarda elde edilen 50-60 binlik üretilen tüplerin içerisinde gözle görülür abrazyon çizilmeler görülmüştür (Şekil 8.37.).



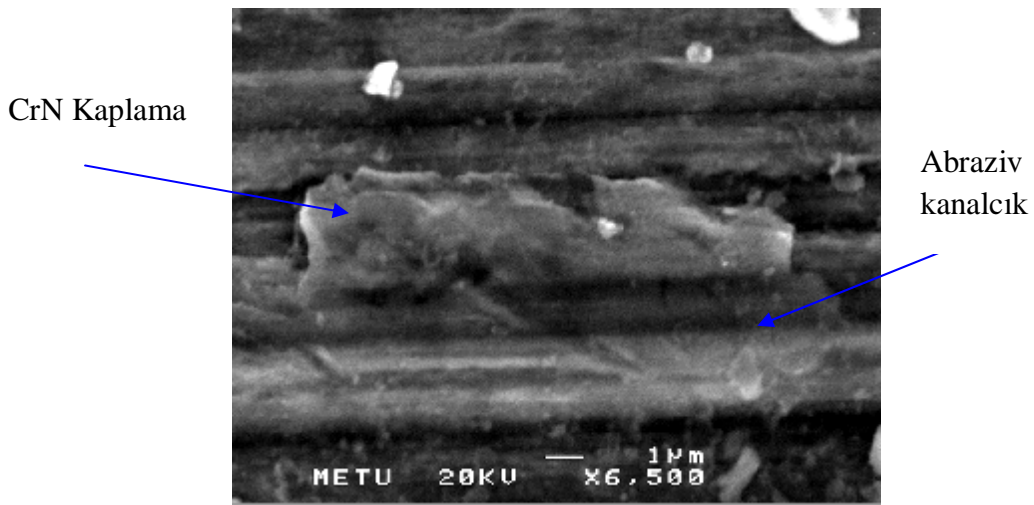
a)



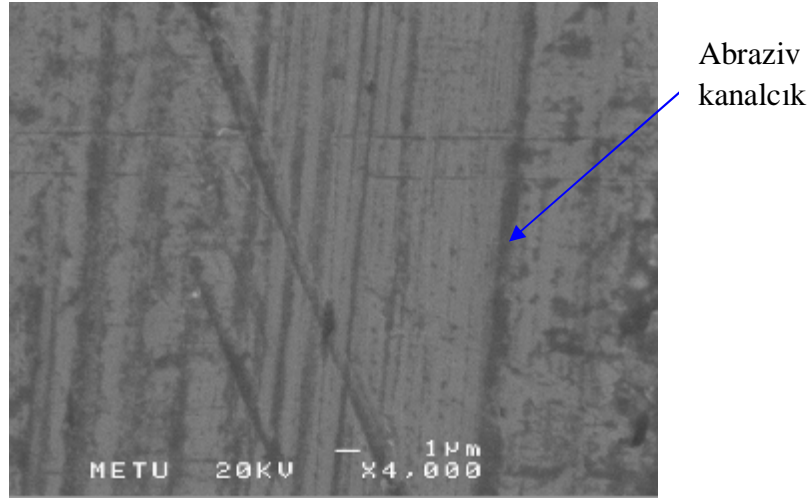
b)

**Şekil 8.37** a) Sertleştirilmemiş erkek kalıbın zırh bölgesindeki aşınma, b) Elde edilen tüplerde oluşan abraziv aşınma

DIN 1,2379 malzemenin PVD yöntemi ile CrN kaplanmış erkek kalıp imalatında her iki saatte alınan numune tüplerin omuz ölçüsünde ve boy ölçüsünde 42 saatlik çalışma sonunda ölçüsel bir değişiklik tespit edilmemiştir. Yapılan 11 adet çalışmanın sonucunda ortalama 42 saat civarında tüpte oluşan hasar ölçüsel değil tüpte delikler meydana gelmiştir. Bunun nenedide erkek kalıpta meydana gelen abraziv aşınmadan dolayı, kalıpta kalan alüminyum partiküller delik tüpe neden olduğundan erkek kalıp servis ömrü tamamlanmış olmaktadır. Şekil 8.39. da kaplanmış erkek kalıptaki abraziv aşınmanın SEM görüntüsü, Şekil 8.38. de kaplanmış erkek kalıptan üretilen alüminyum tüpün SEM görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 8.38.** Kaplanmış erkek kalıp abraziv aşınma görüntüleri



**Şekil 8.39.** Kaplanmış erkek kalıpla üretilen alüminyum tüp

**Tablo 8.5.** Alüminyum soğuk ekstrüzyon tüp omuz ölçüleri (mm)

Süre (saat)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	...	42
CrN Kaplanmış Numune	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Kaplanmamış Numune	0,76	0,58	0,45	Servis Ömrü Sona Ermıştır.							

**Tablo 8.5.** Alüminyum soğuk ekstrüzyon tüp boy ölçüleri (mm)

Süre (saat)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	...	42
CrN Kaplanmış Numune	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98
Kaplanmamış Numune	97	94	88	Servis Ömrü Sona Ermıştır.							

## 9. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada iki farklı deney ortamı kullanılarak DIN 1,2379 Soğuk İş Takım çeliğinin aşınma performansları incelenmiştir. Birinci deney ortamında sertleştirilmemiş, plazma nitrasyon yapılmış, PVD yöntemi ile TiN, CrN ve CrN/TiN kaplanmış deney numuneleri kuru sürtünme şartlarında, oda sıcaklığında, farklı kayma hızı ve kuvvetlerde aşınmaya maruz bırakılmıştır. İkinci deney ortamı Konaltaş Alüminyum A.Ş tüp fabrikasında kullanılan alüminyum soğuk ekstürüzyon tüp imalatında kullanılan erkek kalıp PVD yöntemi ile CrN kaplanarak, vakum fırınında yüksek sıcaklığa ulaştırılıp yüksek basınçlı gaz ile soğutulmuş sertleştirilen erkek kalıbın aşınma ve servis ömrü kıyas edilmiştir.

Birinci deney şartlarında;

1. Elde edilen aşınma kaybı ve aşınma oranları doğrultusunda çizilen grafiklerde en fazla aşınmanın saf sertleştirilmemiş deney numunesinde olduğu tespit edilmiştir.
2. Plazma nitrasyon yapılmış deney numunesinde ise nitrasyonda elde edilen sert tabaka aşınma direnci oluşturmuş, sertlik tabakası aşıldığında sertleştirilmemiş deney numunesine benzer aşınma kayıpları meydana gelmiştir.
3. PVD yöntemi ile yapılan TiN, CrN ve CrN/TiN kaplamalarda aşınma kaybı ve aşınma oranı çok düşük değerlerdedir.

İkinci deney ortamında;

1. Konaltaş Alüminyum tüp fabrikasında yapılan çalışmalarda sertleştirilmiş deney numunelerinin servis ömrü PVD yöntemi ile CrN kaplanmış deney numunesinden 9-10 kat daha az olduğu tespit edilmiştir.
2. CrN kaplanmış erkek kalıpta abraziv aşınmalar daha azdır. Buna bağlı olarak alüminyum tüplerde oluşan çizilmeler minimum seviyededir.
3. CrN kaplanmış erkek kalıbın servis ömrünün uzun olması, üretimde kusurlu tüplerin az çıkması imalat seyrinin daha ekonomik ve verimli olmasını sağlamıştır.

Deney çalışmalarında kullanılan numunelerin SEM görüntülerinde;

1. Kaplanmamış deney numunelerinde abrazyiv aşınmanın yüksek olduğu tespit edilmiştir.
2. Kaplama yapılmış numunelerde abrazyiv aşınmanın daha az oluşmasından dolayı, farklı kayma hızı ve kuvvetlerde sürtünme katsayıları da düşük olmuştur.
3. DIN 1,2379 Soğuk İş Takım çeliğine PVD yöntemi ile TiN, CrN ve CrN/TiN kaplamalar başarı ile uygulanmıştır.
4. Deneyler sonucunda kaplamalı deney numunelerinde meydana gelen aşınma ile kaplamasız deney numunelerinde meydana gelen aşınmalar kıyaslandığında kaplamalı numunelerin aşınma dirençlerinin daha fazla olduğu görülmüştür.
5. SEM incelemeleri sonucunda aşınan yüzeylerde abrazyiv aşınmanın meydana geldiği gözlenmiştir.
6. Aşınan yüzeylerdeki SEM görüntülerinden kuru sürtünmede kayma hızı ve uygulanan aşınma kuvvetine bağlı olarak aşınma taneciklerinin yüzey yorulması sonucu pul şeklinde metalik olarak meydana geldiği anlaşılmaktadır.
7. CrN kaplanmış alüminyum erkek kalıbın servis ömrü 9-10 kat uzatılmıştır.
8. CrN kaplanmış erkek kalıpla yapılan üretimlerde kusurlu tüp imalatı en aza indirgenmiştir.
9. CrN kaplanmış erkek kalıp darbeleri yüklerde başarı ile çalıştırılmıştır.

## ÖNERİLER

1. Sıcaklık değerinin yüksek olduğu sürtünme şartlarında TiN kaplama kullanılmalıdır.
2. Soğuk alüminyum ekstürüzyon tüp imalatında CrN kaplama kullanılmalıdır.
3. Düşük sürtünme kuvveti yüksek kayganlık gerektiren imalatlarda CrN kaplama kullanılmalıdır.
4. Alüminyum ekstürüzyon tüp imalatında kullanılan kalıp malzemeleri, farklı yöntem ve kaplamalar kullanılarak daha verimli çalıştırılabilir.
5. Sıcaklık ölçümleri malzeme yüzeyine daha yakın bölgelerden (2 mm altında) ölçülerek kaplanmış malzemelerin performansları kıyaslanabilir.
6. Alüminyum tüp imalatında kullanılan kalıp malzemeleri kaplama yapılarak daha ekonomik malzemelerden üretilebilir.

**KAYNAKLAR**

- [1] Sert, H., 1997, PVD ile TiN kaplanmış alüminyum ekstürüzyon kalıplarının yüzey özellikleri ve aşınma performanslarının deneysel incelenmesi, EÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.
- [2] Solak, A.O., 2001, İşbir, A.A., "Elektro biriktirme ile metal kaplama teknolojisi", Standard, 470: 67-68.
- [3] Eryılmaz, O.L., 1996 ZrB-ZrBN çok katlı kaplamaların korozyon davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Ün. Fen BİL Ens., İstanbul, 6-32.
- [4] Tönshoff, H.K. Karpushevski, B. Mohlfeld, A. and Seegers, H., 1998, Influence of stress distribution on adhesion strength of sputtered hard coatings, Thin Solid Films, 332, 146-150.
- [5] Tokmanoğlu, K., 1992, PVD - ARK Teknik ile yapılan kaplamalarının özellikleri ve üretim üzerindeki katkıları, Makine ve Metal Teknolojisi
- [6] Scoles, G. (Ed.), 1988, Atomic and Molecular Beam Methods, Oxford University Press, vol. 1, New York.
- [7] Reichelt, K. and Jiang, X., 1990, The preparation of TiN films by physical vapour deposition methods, Thin Solid Films, s 91-92, 110-125, 191.
- [8] Sert, H., Meriç, C., 1992, Aşınan metallerin hayata kazandırılmasında yeni bir yöntem; çelik toz püskürtme mekanik testleri, 5. Ulusal Makine Tasarımı ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara.
- [9] Karagöz, H., 1994, Kesici Takım Malzemelerinde PVD/CVD Tipi modern Seramik Katmanların Takım Ömrüne Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Ün., Fen Bil. Ens., Kocaeli.
- [10] Q. Miao, C.E. Cui, J.D. Pan., 2007, CrN-TiN multilayer coating on magnesium alloy AZ91 by arc-glow plasma depositing process, Surface & Coatings Technology 201 5077-5080
- [11] S. Baragetti, 2007, Fatigue resistance of steel and titanium PVD coated spur gears, International Journal of Fatigue 29 1893-1903
- [12] Park, W. and Kim, K.H., 1998, Coatings material of TiN, TiAlN and TiSiN by plasma enhanced chemical vapour deposition for mechanical applications, Journal Of Material Processing Technology, 130: 254-259.

- [13] Başman, G., 1998, GGG 40 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin yorulma davranışlarına TiN kaplamanın etkisi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [14] Başman, G. Şeşen, M.K. ve Kayalı, E.S., 1998, Seramik ince filmle kaplanmış malzemelerin yorulma davranışı, Metal Dünyası, 66, 61-65.
- [15] Feng, H. P., Lee S. C., Ho, J. M., 1999 Study of high cycle of PVD surface-modified austempered ductile iron, Materials Science and Engineering,
- [16] Tönshoff, H.K. Karpushevski, B. Mohlfeld, A. and Seegers, H., 1998, Influence of stress distribution on adhesion strength of sputtered hard coatings, Thin Solid Films, 332, 146-150.
- [17] Prengel, H.G., Jindal, P.C., and Wendt, K.H., 2001, A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools, Surface and coatings technology, 139: 25-41.
- [18] Ranea. C, 2002 Wear resistance of thin coatings based on titanium, Balkanrib, Kayseri, 783-788.
- [19] Toprak, H., 2002, Borlanmış ve PVD ile TiN kaplanmış KGDD kam milleri ile kaplamasız ve sertleştirilmiş çelik dövme kam millerinin çalışma performanslarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-104.
- [20] Janoss, B., 2003 PVD/CVD coatings enhance Stamping &forming of stainless steels, MultiArc incNJ, 42: 1-9 .
- [21] A.Öztürk, K.V. Ezirmik, K. Kazmanlı, M. Ürgen, O.L. Eryılmaz, A. Erdemir, 2008, Comparative tribological behaviors of TiN-, CrN- and MoN-Cu nanocomposite coatings, Tribology International 41 - 49-59
- [22] A.E. Özgür, B. Yalçın, M. Kuru 2008, Investigation of the wear performance and thermal diffusivity properties of M41 tools steel coated with various film coatings, Materials and Design, online
- [23] J. Paulitscha, P.H. Mayrhofer, W.D. Münz, M. 2008, Schenkel, Structure and mechanical properties of CrN/TiN multilayer coatings prepared by a combined HIPIMS/UBMS deposition technique, Thin Solid Films, online,
- [24] Öncel, S., 1999. Katodik Ark PVD Yönteminde Azot Akışının Kaplama Özelliklerine Etkisi, Lisans Tezi, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- [25] Türküz, M.C., 1997, Ark PVD yöntemiyle TiN kaplanmış kesici takımların karakterizasyonu ve performanslarının incelenmesi, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

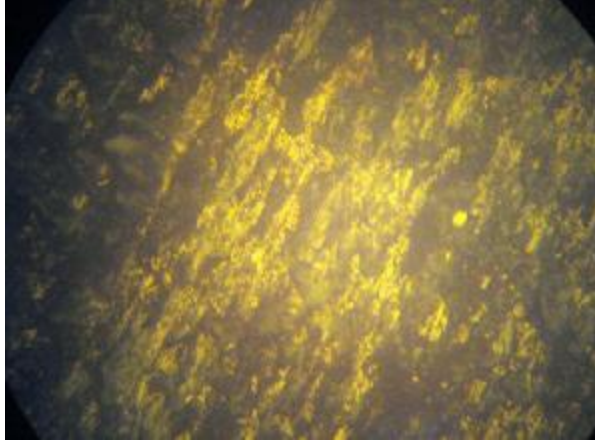
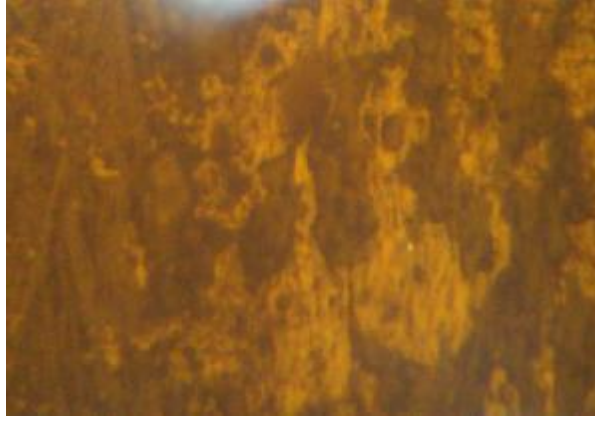
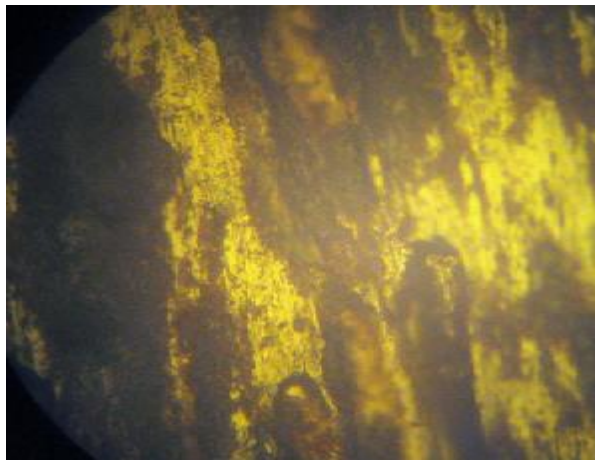


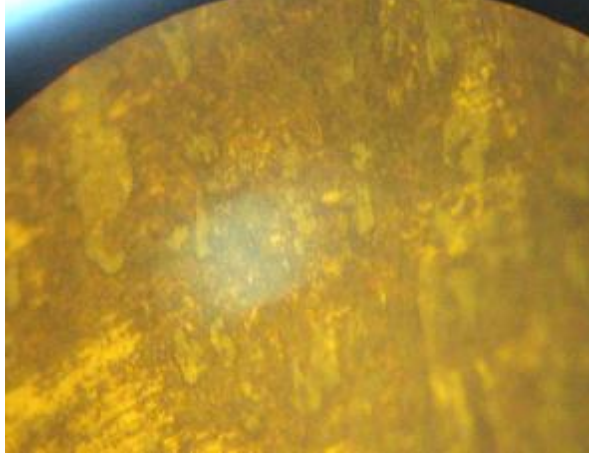
- [26] Kalındağ, M., 2006, CrN, TiN Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Korozyon Özellikleri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- [27] Özcan, A., 1997, PVD kaplamaların sert metallere uygulanması, Kocaeli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli.
- [28] Bunshah, R. F., 1980. High rate PVD processes, AGARD Lecture series no: 106 - Materials Coating Techniques, Harfort House, P 21 /26, London.
- [29] Holmberg, K., Matthews, A., 1998, Coating tribology, Eisevier, p. 351 -370, 258-308.
- [30] W., Fritsch, R., Kammermeier, D., 1991, PVD Coatings on tools: performance and wear phenomena, Surface and Coatings Technology, p. 316-324. Hedenqvist,
- [31] P., Olsson, M., VVallen, P., Kassman, A., Hogmark, S., Jacobson, S., 1990, Hovv TiN coatings improve the performance of high speed steel cutting tools, Surface and Coatings Technology, p. 243-256.
- [32] König, W., Fritsch, R., Kammermeier, D., 1991, PVD Coatings on tools: performance and wear phenomena, Surface and Coatings Technology, p. 316-324.
- [33] Huang, J.H., Hsu, C.Y., Chen, S.S. and Yu, G.P., 2002. Effect of Substrate Bias on the Structure and Properties of Ion-plated ZrN on Si and Stainless Steel Substrates, Materials Chemistry and Physics, 77, 14-21.
- [34] Chou, W.J., Yu, G.P. and Huang, J.H., 2002. Bias Effect of Ion-plated Zirconium Nitride Film on Si(100), *Thin Solid Films*, 405, 162-169.
- [35] Glocker, D.A. and Shah, S.I., 1997. Handbook of Thin Film Process Technology, pp. X1.5:1-X1.5:4, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia.
- [36] Kusano, E., Kitagawa, M., Kuroda, Y., Nanto, H. and Kinbara, A., 1998. Adhesion and Hardness of Compositionally Gradient TiO<sub>2</sub>/Ti/TiN, ZrO<sub>2</sub>/Zr/ZrN and TiO<sub>2</sub>/Ti/Zr/ZrN Coatings, *Thin Solid Films*, 334, 151-155.
- [37] IonBond Tinkap Vakum Plazma ve Kaplama Tic. A.Ş. Ürün Kataloğu, 2007, İstanbul
- [38] Kolaska, II., Pulvermetallurgie der hartmetalle, Fachverband Pulvermetallurgie D-5800 Hagen (Emst), Germany.
- [39] Karamış, M.B., 1986, Abrasiv aşınma mekanizmasında yüzey basıncının Aşınmaya etkisi, 2. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 493-500, ODTÜ, Ankara.
- [40] [www.pvd-coatings.co.uk/theory-of-pvd-coatings-arc-evaporation.htm](http://www.pvd-coatings.co.uk/theory-of-pvd-coatings-arc-evaporation.htm), 2006.
- [41] Hatman, A., 2003. Takım Çelikleri El Kitabı, s. 30-32, Assab Korkmaz Çelik Tic.ve San. A.Ş. Firma Kataloğu, İstanbul.
- [42] Eryürek, İ. B., 1993. Hasar Analizi, s. 154-162, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- [43] Çimenoğlu, H. ve Kayalı, E. S., 1991. Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, s. 236-246, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [44] Onaran, K., 2003. Malzeme Bilimi, s. 287-288, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- [45] Odabaş, D., 1996, Ötektoidaltı çeliklerin iki cisimli kuru abrasiv aşınmasında Karbon oranı ve sürtünme şartlarının sürtünme katsayısı ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerinin deneysel araştırılması, 7. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 241-243, ODTÜ, Ankara.
- [46] Quinn, T.J.F., 1983, The origins of oxidational wear, International Tribology, 805-810
- [47] Ludema, K.S., 1980, Classes of wear, Industrial and Engineering Chemistry Product Research and Development, 19, 335-336.
- [48] Gürleyik, M.Y., 1986, Soğuk deformasyonla aşınma direnci artırılabilir, 2. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 501-503, ODTÜ, Ankara.
- [49] Richardson, R.C.D., 1969, The Wear of Metal Shares in Agricultural Soils, Ph. D. Thesis, London.
- [50] Kragelsky, I.V. and Demkin, N.B., 1960, Contact area of rough surfaces, Wear, 3, 170-187.
- [51] Güllü, A.K., 1998, Yüzey Pürüzlülüğü Ders Notları, 1-3, Gazi Ün., Teknik Eğitim Fak., Ankara.
- [53] Gülyaz, H.A., Abişev, E. ve Kılıç, S.E., 1996, 60HRc sertliğindeki karbonlu çeliklerin CBN ile taşlama kalitesinde ince tornalanmasında oluşan yüzey pürüzlülüğünün tahmini için model oluşturulması, 7. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 212-214, ODTÜ, Ankara.

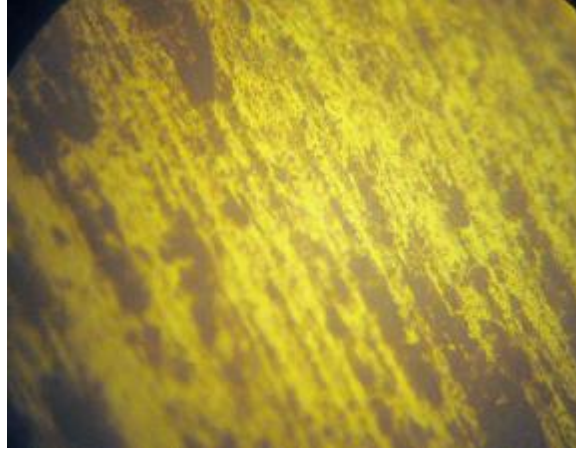
## ÖZGEÇMİŞ

Nusrettin KALKAN 1978 Gümüşhane/Kelkit de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzincanda tamamladı. Lise öğrenimini Konya Selçuklu Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesinde tamamladı. Lisans eğitimini Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Talaşlı Üretim Anabilim Dalında 2002 yılında tamamladı. Yüksek lisans eğitimine Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Talaşlı Üretim Anabilim Dalında 2004 yılında başladı. Halen yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Evli ve iki çocuk babası olup, dili İngilizcedir. Halen Konya' da özel bir şirkette Bakım ve AR-GE sorumlusu olarak çalışmaktadır.

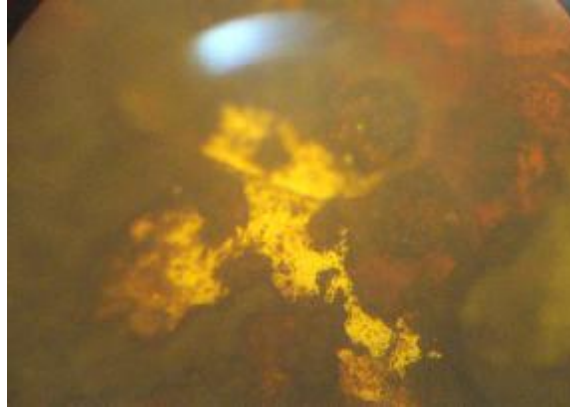
**EKLER****EK-1. Farklı Yük ve Kayma Hızlarında Pim Yüzeylerinin Mikroskop Görüntüsü****Ek-1.1.** 0,6 m/sn 25 N saf deney numunesi yüzey görüntüsü (X400)**Ek-1.2.** 1,4 m/sn 55 N saf deney numunesi yüzey görüntüsü (X400)**Ek-1.3.** 0,6 m/sn 25 N plazma nitrasyon deney numunesi yüzey görüntüsü (X400)



**Ek-1.4.** 1,4 m/sn 55 N plazma nitrasyon deney numunesi yüzey görüntüsü (X400)



**Ek-1.5.** 0,6 m/sn 25 N CrN/TiN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400)



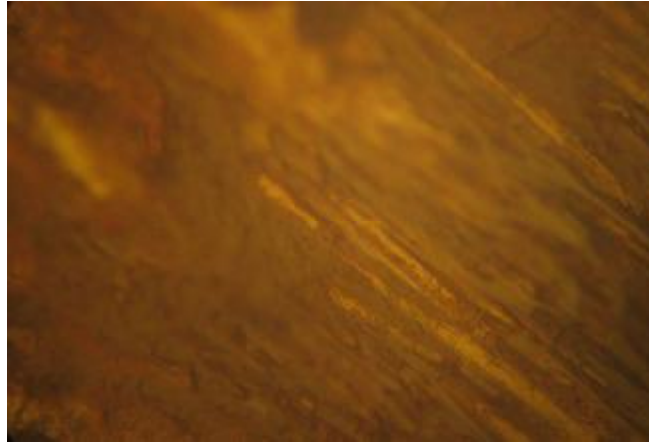
**Ek-1.6.** 1,4 m/sn 55 N CrN/TiN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400)



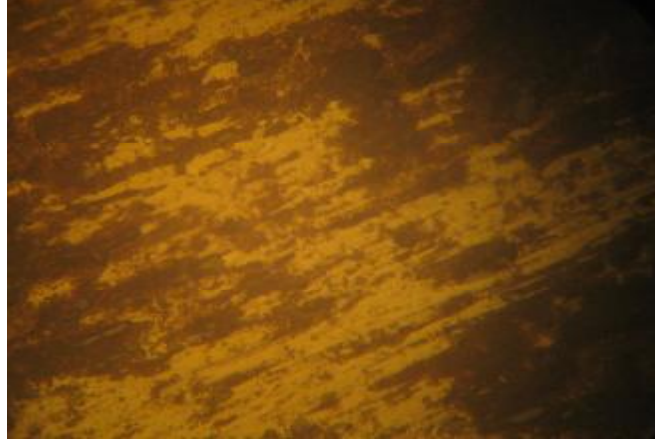
**Ek-1.7.** 0,6 m/sn 25 N TiN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400)



**Ek-1.8.** 1,4 m/sn 55 N TiN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400)

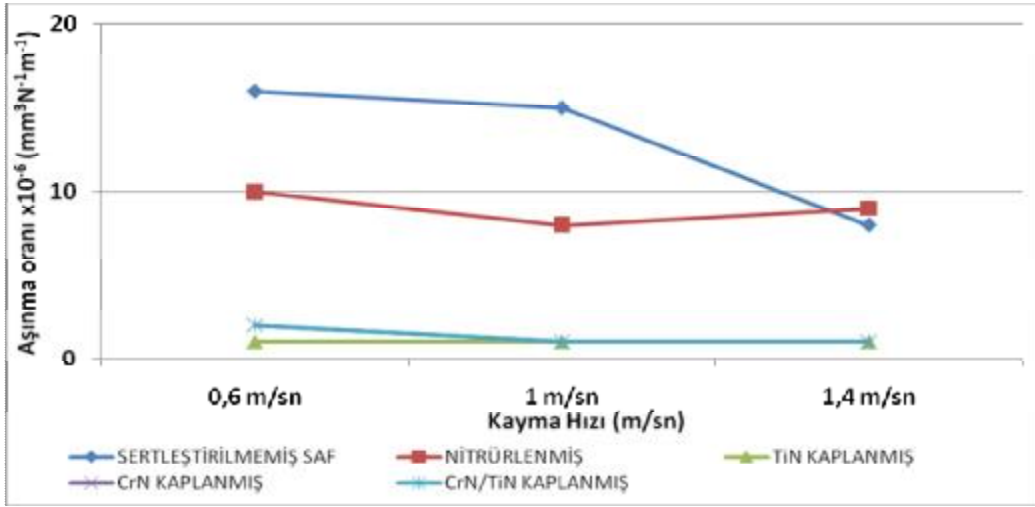


**Ek-1.9.** 0,6 m/sn 25 N CrN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400)

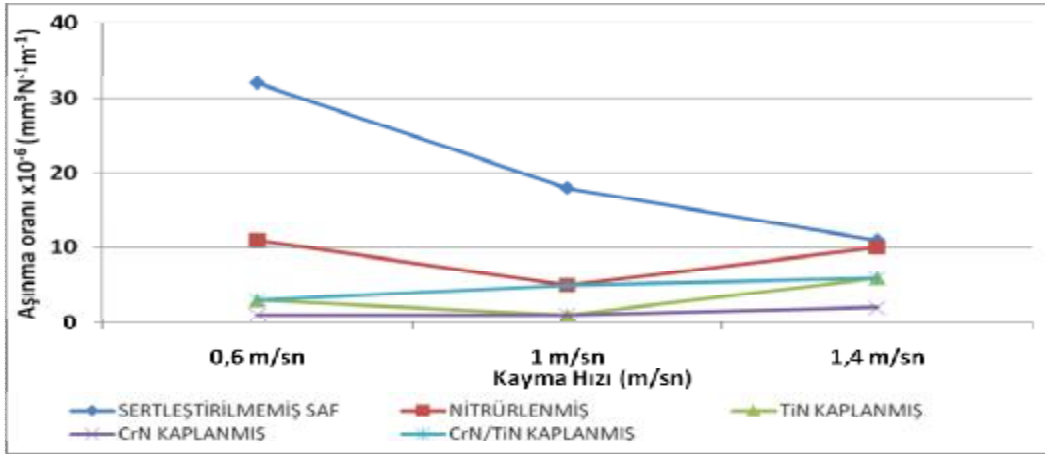


**Ek-1.10.** 1,4 m/sn 25 N CrN deney numunesi yüzey görüntüsü (X400)

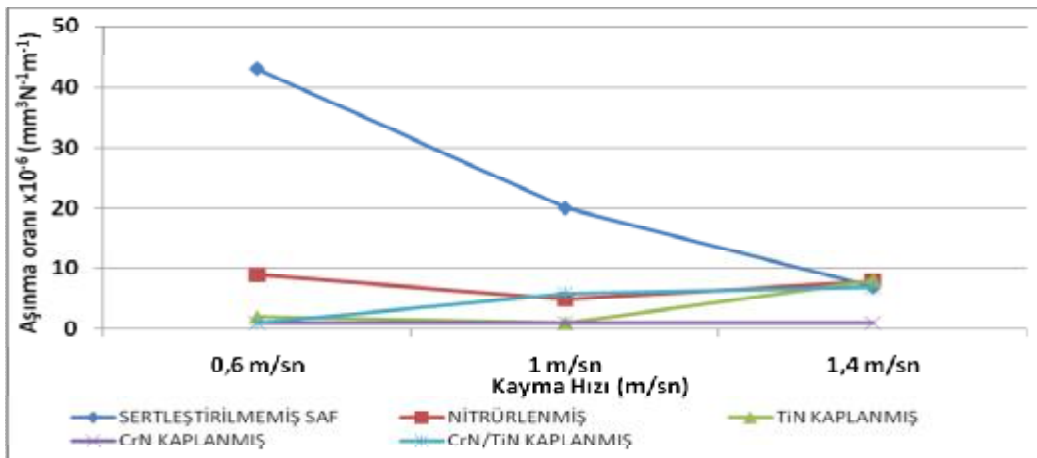
## EK-2. Farklı Aşındırma Kuvvetinde Oluşan Aşınma Oranları



Ek-2.1. Aşındırma kuvveti 25 N için kayma hızlarına göre aşınma oranının karşılaştırılması

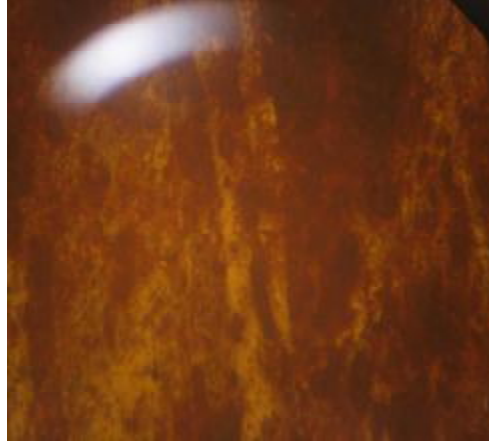


Ek-2.2. Aşındırma kuvveti 40 N için kayma hızlarına göre aşınma oranının karşılaştırılması



Ek-2.3. Aşındırma kuvveti 55 N için kayma hızlarına göre aşınma oranının karşılaştırılması



**EK-3. Aşındırıcı Disk Yüzeyinde Oluşan Aşınmaların Mikroskop Görüntüleri****EK-3.1.** 0,6 m/sn 25 N saf sertleştirilmemiş pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)**EK-3.2.** 0,6 m/sn 25 N plazma nitrülenmiş pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)**EK-3.3.** 0,6 m/sn 25 N TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



**EK-3.4.** 0,6 m/sn 25 N CrN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



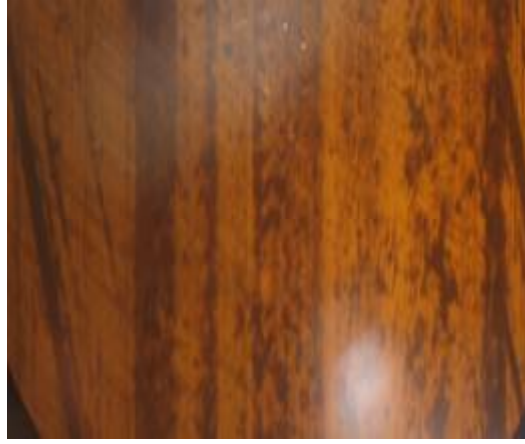
**EK-3.5.** 0,6 m/sn 25 N CrN/TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



**EK-3.6.** 1,4 m/sn 40 N saf sertleştirilmemiş pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



**EK-3.7.** 1,4 m/sn 40 N plazma nitr lenmiŐ pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



**EK-3.8.** 1,4 m/sn 40 N TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



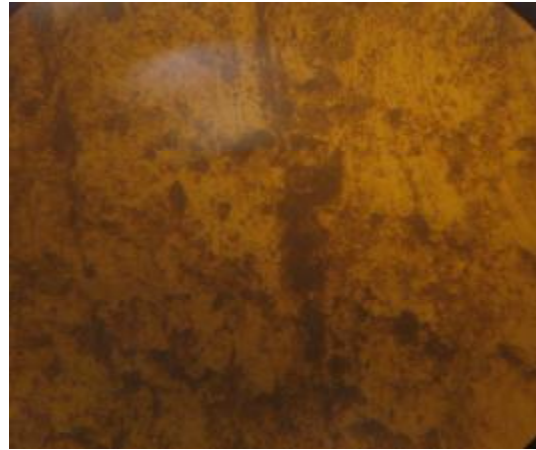
**EK-3.9.** 1,4 m/sn 40 N CrN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



**EK-3.10.** 1,4 m/sn 40 N CrN/TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



**EK-3.11.** 1 m/sn 55 N saf sertleştirilmemiş pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



**EK-3.12.** 1 m/sn 55 N plazma nitrülenmiş pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



**EK-3.13.** 1 m/sn 55 N TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



**EK-3.14.** 1 m/sn 55 N CrN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)



**EK-3.15.** 1 m/sn 55 N CrN/TiN pimin aşındırıcı diskteki izi (X400)