



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

**SERT KROM KAPLANAN SİLİNDİRİK NUMUNELERDE
KAPLAMA PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

HASAN KIR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. SERKAN APAY**

DÜZCE, 2017

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SERT KROM KAPLANAN SİLİNDİRİK NUMUNELERDE
KAPLAMA PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ

Hasan KIR tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Serkan APAY
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Serkan APAY
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. İlyas UYGUR
Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ
Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 03/04/2017

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

03 Nisan 2017

Hasan KIR



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin hazırlanma süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Yrd. Doç .Dr. Serkan APAY' a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Düzce Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'ndaki saygıdeğer hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini hiç bir zaman esirgemeyen, her zaman ve her koşulda yanımda olan ailem; annem Hanife KIR, babam Ahmet KIR, kardeşlerim Yıldıray KIR, Havva KIR ve yengem Melahat KIR' a gönül dolusu teşekkür ederim.

Kaplama süreci boyunca bilgilerini ve desteklerini benden esirgemeyen başta Ataman GÖKTAŞ, Ahmet GÜMÜŞ ve büyük emeği olan Ahmet EROL' a teşekkürü borç bilirim.

Tez süreci boyunca her zaman yanımda olup destek veren başta Sinem PANCAR ve tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP 2015.07.04.392 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

03 Nisan 2017

Hasan KIR

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ.....	X
ÇİZELGE LİSTESİ.....	XII
KISALTMALAR.....	XIII
SİMGELER	XIV
ÖZET.....	XV
ABSTRACT	XVI
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇELİK MALZEMELER	4
2.1. GİRİŞ	4
2.2. ÇELİK MALZEMELER	4
2.3. DEMİR-SEMENTİT (FE-FE ₃ C) FAZ DİYAGRAMI.....	5
2.3.1. Demir-Sementit Denge Diyagramındaki Fazlar	6
2.3.2. Demir-Sementit Sistemindeki Faz Dönüşümleri.....	7
2.3.3. Çeliklerde Soğuma Sırasında Oluşan İç Yapılar	7
2.4. DEMİR EŞLİK ELEMENTLERİNİN ÇELİĞİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ.....	9
2.4.1. Karbonun Etkisi.....	9
2.4.2. Kükürdün Etkisi	9
2.4.3. Manganın Etkisi.....	10
2.4.4. Fosforun Etkisi.....	10
2.4.5. Silisyumun Etkisi	10
2.4.6. Azotun Etkisi.....	10

2.5. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ÇELİĞİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ ...	11
2.5.1. Nikelin Etkisi.....	11
2.5.2. Kromun Etkisi.....	11
2.5.3. Molibdenin Etkisi.....	11
2.5.4. Vanadyumun Etkisi	12
2.5.5. Volframın Etkisi.....	12
2.5.6. Kobaltın Etkisi	12
2.5.7. Alüminyumun Etkisi	12
2.5.8. Borun Etkisi.....	13
2.5.9. Bakırın Etkisi	13
2.5.10. Kurşunun Etkisi.....	13
2.6. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	13
2.6.1. Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması	13
2.6.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler	14
2.6.1.2. Orta Karbonlu Çelikler.....	14
2.6.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler	14
2.6.1.4. Yüksek Karbonlu Takım Çelikleri	14
2.6.2. Çeliklerin Alaşım Elementi Miktarına Göre Sınıflandırılması	15
2.6.3. Bazı Çeliklerin Kullanım Alanına Göre Sınıflandırılması.....	15
2.6.3.1. Konstrüksiyon Çelikleri	15
2.6.3.2. Yay Çelikleri	16
2.6.3.3. Otomat Çelikleri	16
2.6.3.4. Karbon Çelikleri	16
2.6.3.5. Sementasyon Çelikleri.....	17
2.6.3.6. Islah Çelikleri	17
2.6.3.7. Rulman Çelikleri	17
2.6.3.8. Takım Çelikleri	17
2.6.3.9. Paslanmaz Çelikler	18
2.7. ÇELİKLERİN TÜRK STANDARTLARINA GÖRE GÖSTERİMİ	18
3. YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ	19
3.1. KİMYASAL BUHAR YOĞUŞTURMA (CVD)	19
3.1.1. Giriş.....	19
3.1.2. CVD Reaksiyonlarının Termodinamiği.....	20

3.1.3. Yoğuşma Kinetiği ve Madde Hareketleri	22
3.2 FİZİKSEL BUHAR YOĞUŞTURMA (PVD).....	22
3.2.1. Giriş.....	22
3.2.2. PVD Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....	23
3.2.3. Buharlaştırma	24
3.2.4. Sıçratma	24
3.2.5. Plazmayla Parçalama	24
3.3. YOĞUŞMA.....	25
3.2.1. Giriş.....	25
3.2.2. Parçacık Yüzey Etkileşimi	25
5.2.3. Çekirdeklenme ve Çekirdek Büyümesi	26
3.2.4. Kaplama Büyümesi.....	26
3.4. İYON BOMBARDIMANI	27
3.4.1. Giriş.....	27
3.4.2. Bombardmanın Yüzey ve Kaplama Bünyesine Etkileri	27
3.4.2.1. Kaplama Morfolojisi.....	27
3.4.2.2. Kafes Kusurları.....	28
3.4.2.3. Kristalografik Yönlenme	28
3.4.2.4. Kaplama Bünyesi Gaz Sıkışması.....	28
3.4.2.5. İç Gerilmeler.....	29
3.4.2.6. Yapışma.....	29
3.4.2.7. Sertlik.....	29
3.5. SERT KAPLAMALAR.....	29
3.5.1. Giriş.....	29
3.5.2. Sert Malzemelerin Temel Özellikleri	30
3.5.2.1. Metalik Sert Malzemeler	32
3.5.2.2. Metalik Olmayan Sert Malzemeler	33
3.5.3. Sert Kaplamaların Tasarımı.....	35
3.5.4. Sert Kaplamaların Uygulama Alanları.....	36
3.5.4.1. Kesici Takımlar.....	37
3.5.4.2. Diğer Takımlar	37
3.5.4.3. Makine Elemanları	38
3.5.4.4. Erozyon ve Korozyon	39
3.5.4.5. Dekoratif Kaplamalar.....	39

3.6. METALİK KAPLAMALAR	39
3.6.1. Sıcak Daldırma.....	40
3.6.2. Sıcak Püskürtme	40
3.6.3. Difüzyonla Kaplama	41
3.6.4. Akımsız Kaplama.....	41
3.6.5. Elektrokimyasal Hücreler	42
4. ELEKTROLİTİK KROM KAPLAMA UYGULAMALARI.....	44
4.1 GİRİŞ	44
4.2. ELEKTROLİTİK KAPLAMA	45
4.2.1. Elektroliz.....	47
4.3 KROM KAPLAMA	48
4.3.1. Yüzey Temizleme İşlemi.....	52
4.3.2. Krom Kaplama Koşulları	52
4.3.3. Krom Kaplama Banyoları	53
4.4 KROM KAPLAMA ÇEŞİTLERİ	54
4.4.1. Dekoratif Krom Kaplama	54
4.4.2. Sert Krom Kaplama	54
4.4.3. Diğer Krom Kaplama Çeşitleri	55
5. SÜRTÜNME VE AŞINMA	56
5.1 SÜRTÜNME.....	56
5.1.1. Kayma Sürtünmesi	57
5.1.2. Yuvarlanma Sürtünmesi	58
5.2 SÜRTÜNME MEKANİZMALARI	58
5.2.1. Kuru Sürtünme	58
5.2.2. Sınır (Yarı Sıvı) Sürtünme	59
5.2.3. Sıvı (Film) Sürtünme	59
5.3. SÜRTÜNME KATSAYISI DEĞERLERİ.....	59
5.4. SÜRTÜNME KANUNLARI.....	60
5.5. AŞINMA	60
5.5.1. Aşınma Türleri.....	61
5.5.1.1 Adheziy Aşınma (Yapışma Aşınması)	61
5.5.1.2. Abrasif Aşınma.....	63

5.5.1.3. Oyuklanma ve Kalkma Aşınması	66
5.5.1.4 Kazıma Aşınması (Mekanik Korozyon Aşınması)	66
5.5.2. Aşınma Deneyleri Ve Ölçüm Yöntemleri	67
5.5.2.1. Ağırlık Farkı Metodu	68
5.5.2.2. Kalınlık Farkı Metodu	69
5.5.2.3. İz Değişimi Metodu	70
5.5.2.4. Radyoizotop Metodu	70
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	71
6.1. KAPLAMA DENEYİNDE KULLANILAN ARAÇ GEREÇLER VE UYGULANAN İŞLEMLER	71
6.1.1. Malzeme Seçimi Ve Numune Hazırlama İşlemi.....	71
6.1.2. Mekanik Ve Diğer Temizleme İşlemleri	72
6.1.3. Elektrolitik Yağ Alma Ve Aside Daldırma İşlemi	72
6.1.4.Elektrolitik Sert Krom Kaplama İşlemi Ve Kullanılan Araç Ve Gereçler	73
6.1.5. Kaplanan Numunelerin Metalografik İşlemler İçin Hazırlanışı.....	74
6.1.6. SEM/EDS Analizleri Ve Mikro Sertlik Ölçümleri	76
6.1.7. Aşınma Testi.....	77
6.1.8. Termal Şok Testi.....	78
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	79
7.1. MİKROYAPI GÖRÜNTÜLERİ VE SEM/EDS ANALİZLERİ.....	79
7.2. MİKRO SERTLİK DENEYİ.....	87
7.3. AŞINMA DENEYİ.....	88
7.4. TERMAL ŞOK DENEYİ.....	92
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	96
8.1. SONUÇLAR	96
8.2. ÖNERİLER	98
KAYNAKLAR.....	100
ÖZGEÇMİŞ	106

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Aşınmış turboşarj mili yüzey görüntüsü.....	3
Şekil 2.1. Saf demir soğuma eğrisi	5
Şekil 2.2. Demir (Fe) - sementit (Fe ₃ C) denge diyagramı	6
Şekil 2.3. Fe-Fe ₃ C denge diyagramının çeliklere ait kısmı ve soğuma sırasındaki oluşan iç yapılar.	8
Şekil 3.1. Bir CVD ünitesinin prensip şeması, reaksiyon: $A+B \rightarrow C+D$	20
Şekil 3.2. İşlem sıcaklığına ($1/T$) bağlı olarak yoğunlaşma hızının, R, değişimi ve CVD işleminde altlık yüzeyindeki difüzyon ve laminer akışın şematik gösterimi .	22
Şekil 3.3. Fiziksel buhar yoğunlaştırma yöntemlerinin sınıflandırılması	23
Şekil 3.4. Yüzeye çarpan parçacığın enerjisine bağlı olarak ortaya çıkabilecek oluşumların olasılıkları.....	25
Şekil 3.5. Altlık yüzeyinde ortaya çıkan oluşumlar.....	26
Şekil 3.6. Altlık gerilimi sonucu elde edilen iyon bombardımanı ile TiN kaplama morfolojisinin değişimi ve bu morfolojilerin messier diyagramındaki konumu	28
Şekil 3.7. KYM TiC kafesinde atomların yerleri.....	32
Şekil 3.8. Altlık / kaplama kompozitinin seçimi için önemli kıstaslar	35
Şekil 3.9. Kaplanmış malzemenin özelliklerini belirleyen temel etmenler.	35
Şekil 3.10. Kaplamalarda ortaya çıkan üç ana ara yüzey türü.	36
Şekil 3.11. Dökme demir ve Al-Si alaşımlarının delinmesinde kullanılan takımlarda kaplamayla ömür artışı	37
Şekil 3.12. Alüminyumun basınçlı döküm maçalarında kaplama kullanılmasıyla elde edilen ömür artışı.....	38
Şekil 3.13. Elektrokimyasal bir hücrenin şematik görünümü.....	42
Şekil 4.1. Elektroliz hücresi	47
Şekil 5.1. Tribolojik sistemlerin kinematikleri	56
Şekil 5.2. Statik dinamik sürtünme esnasında cisme etki eden kuvvetler.	57
Şekil 5.3. Kuru, sıvı ve yarı sıvı sürtünmeleri	59
Şekil 5.4. Tribolojik bir sistemin şematik olarak gösterimi.....	61
Şekil 5.5. Adhesiv aşınmada oluşan kaynak bağı.....	62
Şekil 5.6. Kaynak bağlarının kopması ve malzeme transferi.	63
Şekil 5.7. Üç cisimli abrasiv aşınma mekanizması.....	64
Şekil 5.8. Abrasiv tane boyutunun fonksiyonu olarak iki metalin aşınma oranı	64
Şekil 5.9. Kazımadan kaynaklanan toplam ağırlık kaybında, toplam yer değiştirme miktarının etkisi.....	67
Şekil 5.10. Yağlamalı ve yağlamasız adhesiv aşınma deney yöntemleri.	68
Şekil 5.11. Abrasiv aşınma deneylerinde kullanılan yöntemler	69
Şekil 6.1. Kaplanan malzeme.	71
Şekil 6.2. Kaplama bağlantı aparatı	72
Şekil 6.3. Kaplama banyosu.	73
Şekil 6.4. Kaba ve hassas numune kesme cihazı.	75
Şekil 6.5. Bakalit alma cihazı	75
Şekil 6.6. Parlatma ve zımparalama cihazı	75
Şekil 6.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	76
Şekil 6.8. Dijital mikro sertlik test cihazı	76

Şekil 6.9. Aşınma test cihazı.....	77
Şekil 6.10. Analitik hassas terazi.....	77
Şekil 6.11. Termal şok işlem grafiği.....	78
Şekil 6.12. Termal şok fırını	78
Şekil 7.1. Yapı çeliği malzemesi içyapısı.....	79
Şekil 7.2. Numunelere ait genel nokta ve çizgi analizleri.	80
Şekil 7.3. 1 Numaralı nokta (EDS) analizi.	81
Şekil 7.4. 2 Numaralı nokta (EDS) analizi.	81
Şekil 7.5. 3 Numaralı nokta (EDS) analizi	82
Şekil 7.6. 4 Numaralı nokta (EDS) analizi	83
Şekil 7.7. Genel çizgi analizleri	83
Şekil 7.8. Deney numunelerine ait kaplama kalınlık görüntüleri.	86
Şekil 7.9. Deney numunelerine ait mikro çatlak görüntüleri.....	86
Şekil 7.10. Numunelerde mikro sertlik ölçüm sonuçları	87
Şekil 7.11. Deney numunelerinde aşınma değerleri	89
Şekil 7.12. 11 Nolu numunenin aşınan yüzey grafiği.....	90
Şekil 7.13. 11 Nolu numunenin aşınan yüzeyinin mat alan görüntüsü.....	90
Şekil 7.14. 2 Nolu numunenin aşınan yüzey grafiği.....	91
Şekil 7.15. 2 Nolu numunenin aşınan yüzeyinin mat alan görüntüsü.....	91
Şekil 7.16 Karşılaştırmalı termal şok deney görüntüleri	92

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1.1. Krom metali hakkında genel bilgiler.	2
Çizelge 2.1. Çeliklerin alaşım elementi miktarına göre sınıflandırılması.	15
Çizelge 2.2. Malzeme türlerinin standart sembolleri.....	18
Çizelge 3.1. Değişik kaplama türleri için uygun reaksiyon bileşenleri ve reaksiyon sıcaklıkları.	21
Çizelge 3.2. Sert malzemelerin gruplandırılması.....	30
Çizelge 3.3. Sert kaplama malzemelerinde özelliklerdeki genel eğilimler.....	31
Çizelge 3.4. Metalik sert malzemelerin fiziksel özellikleri.	31
Çizelge 3.5. Çeşitli metal ve sert metallerin kafes yapıları ve atom dizilimleri.	33
Çizelge 3.6. Kovalent sert malzemelerin fiziksel özellikleri.	34
Çizelge 3.7. İyonik sert malzemelerin fiziksel özellikleri.	34
Çizelge 3.8. Dekoratif sert kaplamaların renkleri.....	39
Çizelge 4.1. Düşük ve yüksek konsantrasyonlu çözeltiler ile çalışma koşulları.	53
Çizelge 5.1. Abrasiv aşınma prosesinin içerdiği tipik aşınma hızları.....	65
Çizelge 6.1. Yapı çeliğinin kimyasal analizi.	71
Çizelge 6.2. Numune sıralaması ve deneysel parametreler	74
Çizelge 7.1. Deney numunelerin kaplama kalınlıkları.	85

KISALTMALAR

ASTM	Uluslar Arası Standart
CNC	Bilgisayar Sayımlı Yönetim
CVD	Kimyasal Buhar Yoğuşturma
DIN	Alman Standardı Enstitüsü
EURONORM	Avrupa Standardı
GSMH	Gayri Safi Milli Hasıla
HMK	Hacim Merkezi Kübik Yapı
HV	Vickers Sertlik
KYM	Kübik Yüzey Merkezli
PVC	Polivinil Klorür
PVD	Fiziksel Buhar Yoğuşturma
RSD-B	Brinell Sertlik Değeri
RSD-C	Rockwell Sertlik Değeri
SEM/ EDS	Taramalı elektron mikroskobu
SY	Yan Sakinleştirilmiş
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
YMK	Yüzey Merkezi Kübik Yapı

SİMGELER

E	Elektrik Ark Ocağı
F	Kuvvet
F_n	Temas Yüzeylerine Etki Eden Normal Kuvvet
Fe_3C :	Sementit
FeS :	Demir Sülfür
$Fe-Fe_3C$:	Demir-Sementit
I	Endüksiyon Ocağı
i	İyonik
K	Kaynar Dökülmüş
k	Kovalent
$K_p(T)$	Denge Sabiti
M	Siemens-Martin Ocağı
m	Metalik
MnS :	Mangan Sülfür
Mn_3C :	Mangan Karbür
O	Oksijen Konverteri
Ra	Yüzey Pürüzlülük Değeri
S	Sakinleştirilmiş
T	Thomas Konverteri
W	Yük
α :	Ferrit
$\alpha+Fe_3C$	Perlit
γ :	Ostenit
δ	Delta Demir
ΔH^0	Standart Entalpi Değişimi
ΔS^0	Reaksiyonun Standart Entropi Değişimi

ÖZET

SERT KROM İLE KAPLANAN SİLİNDİRİK NUMUNELERDE KAPLAMA PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Hasan KIR

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Serkan APAY

Nisan 2017, 106 sayfa

Birbirine temas eden makine parçalarından veya içerisinde bulunduğu ortam şartlarından dolayı malzeme yüzeylerinde kayıp meydana gelmektedir. Yüzeyi bozulmuş bir malzemenin üretimi durdurmaya kadar etkisi olabilir. Malzeme kaybını önlemek ve ana malzemenin kullanılabilirliğini arttırmak için yüzey işlemleri uygulanır. Yüzey işlemlerinin amacı ana malzemenin tokluğu ile oynamadan malzeme yüzeyine sertlik vererek sürtünme, aşınma ve korozyona karşı dayanım sağlamaktır. Bu çalışmada yapılan kaplama, daha önce işlem görmemiş ve yeni olarak kullanılacak bir malzeme üzerine yapılmıştır. Deneylerde mekanik özelliği düşük olan St 37-2 yapısal mil çeliği üzerine elektrolitik kaplama yöntemi ile sert krom kaplama yapılmıştır. Yapılan kaplama işleminde sıcaklık, akım yoğunluğu ve anot katot arası mesafe değişken olarak kullanılmıştır. Farklı akım yoğunluklarında ($25-40-55 \text{ Amp/dm}^2$), farklı sıcaklıklarda ($40-60 \text{ }^\circ\text{C}$) ve farklı anot-katot arası mesafelerde ($100-200 \text{ mm}$) yapılan kaplamalarda, numunelerde kaplama sertliği, sürtünme ve aşınma direnci, kalınlığı, kaplama yapışkanlığı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen numunelerde yapılan laboratuvar çalışmaları sonucunda kaplama kalitesinin, kalınlığının, sertliğinin, aşınma direncinin, kaplama yapışma özelliğinin, kaplama bölgesi ve ana malzeme üzerinde yapılan nokta ve çizgi analizleri sonuçlarının literatüre uygun değerler verdiği gözlenmiştir. Bu değerler kapsamında elde edilen sonuçlar ışığında, düşük karbonlu yapı çeliğine en düşük parametreler dahi uygulandığında malzemenin mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkiler olduğu gözlenmiştir. Kaplama işlemi esnasında akım yoğunluğunun artması ile birlikte numunelerde sertlik, aşınma direnci ve kaplama kalınlıklarının arttığı görülmüştür. Banyo sıcaklığının azalması sonucunda sertlik değerinde azalma olduğu, akım yoğunluğunun 40 Amp/dm^2 sonrasında sertliğin azaldığı tespit edilmiştir. Sertliği en fazla olan numunede aşınma en az değerde tespit edilmiştir. Sıcaklığın artmasıyla aşınma direncinin de arttığı görülmüştür. Yapılan termal şok testleri sonucu numune yüzeyindeki kaplamada, $350 \text{ }^\circ\text{C}$ de değişim gözlenmezken $550 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $750 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklarda renk değişimleri tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda en verimli kaplama 11 numaralı numunede gözlenirken verimi düşük olan kaplama ise 2 numaralı numunede tespit edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Aşınma, Elektrolitik yöntem, Sert krom kaplama.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COATING PARAMETERS IN HARD CHROME COATED CYLINDRICAL SAMPLES

Hasan KIR

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Manufacturing
Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Serkan APAY

April 2017, 106 pages

The machine comes into contact with each other due to the machine parts or the surrounding environment. A damaged surface material can have an effect until it stops production. Surface treatment is applied to prevent material loss and increase the usability of the main material. It provides resistance to abrasion and corrosion by giving hardness to the material surface without playing with the aim of the main material of the surface treatment. In this study, hard chrome plating was performed on the structural shaft steel of St 37-2 with low mechanical properties by electrolytic plating method. Temperature, current density and anode cathode distance were used as variable in the plating process. In coatings made at different current densities (25-40-55 Amp / dm²), at different temperatures (40-60 °C) and at different anode-cathode spacings (100-200mm), coating hardness, friction and abrasion resistance, thickness, coating Adhesiveness and mechanical properties. Experimental studies have shown that the results of the laboratory studies on the samples obtained as a result of the studies yielded appropriate values of coating quality, thickness, hardness, abrasion resistance, coating adherence, coating area and point and line analysis results on the base material. The results obtained under these values are observed to have a positive effect on the mechanical properties of the material when applied to even the lowest parameters of the low carbon structure in the light. It was observed that the hardness, abrasion resistance and coating thicknesses of the samples increased with the increase of the current density during the coating process. It was found that the hardness decreased as the bath temperature decreased, and the hardness decreased after 40 amp / dm² of the current density. At the highest hardness level, wear was determined at least. It has been observed that wear resistance increases with increasing temperature. The thermal shock tests performed showed color changes at 550 °C and 750 °C when no change was observed at 350 °C in the coating on the surface of the resultant sample. As a result of the experimental studies, the most efficient coating was observed at sample number 11 whereas the low yield coating was found at sample number 2.

Keywords: Wear, Electrolytic process, Hard chrome plating.

1. GİRİŞ

Kaplamacılık, günümüz endüstrisinde hızlıca yer edinmiş ve giderek gelişmekte olan bir sektör olmaktadır. Sanayi sektörünün ve artan üretim teknolojilerinin çoğalmasından sonra, malzeme ihtiyaçlarının artması ve var olan rezervlerinin azalmasına neden olmuştur. Bu ihtiyaçlar devamlı şekilde çoğalarak yeni yöntemler ve yeni arayışlar doğurmuştur. Sanayide ana malzemenin öneminin anlaşılması kaplamacığın gelişmesinde ki en büyük etkenlerden olmuştur. Ana malzemenin uzun ömürlü olması ve dış etkenlerden etkilenmemesi adına metal kaplama başarılı olmuştur.

Yapılan yüzey işlemleriyle malzemelerin süneklik, yorulma ve sertlik gibi özellikleri yanı sıra aşınma, sürtünme ve korozyon gibi mekanik özelliklerini de geliştirilip malzemelerin kullanım süreleri ve aşınma, çatlama ya da şekil bozukluğuna uğramış malzemeleri eski hallerine geri dönüşü sağlanmaktadır. Metal ihtiyacı ve kullanımı her yıl artmakta ve bu artış ile birlikte malzeme ömrü, iş gücü, dayanıklılık, kullanılabilirlik ve geri dönüşüm oldukça önem kazanmaktadır. Endüstride kullanılan demir ve çelik malzemeleri korozyona, aşınmaya, sürtünmeye ve dış etkenlere karşı dayanıklı olması istenir.

18. yüzyılda elektriğin bulunması ve uygulanması ile daha az değerli metallerin değerli metaller ile kaplanması düşünülmüştür. 1805 yılında İtalyan "BRUNGNATELLİ" güç kaynağı olarak kullandığı akümülatör yardımıyla altın kaplamayı başarmıştır. 1940nyılında İngiliz "WRIGT" in altın ve gümüş kaplama için siyanürlü elektroliti bulması, insanları doğada oksitlenmeye karşı dayanıklı metallerle, dayanıksız metalleri kaplama imkânı sağlamıştır [1]. 1982 yılında Amerikan Ulusal Teknolojileri Enstitüsü'nün araştırmasına göre korozyon ve aşınmadan dolayı meydana gelen zarar, gayri safi milli hasılanın (GSMH) %7 sini teşkil ettiği görülmüştür ve bu yönde çalışmalara ağırlık verilmesi önerilmiştir [2].

Ülkemizde yapılan benzer bir çalışmada yıllık korozyon ve aşınma kayıplarının GSMH'nin %4,5-5 arasında olduğu ve bunun yaklaşık yarısının önlenabilir nitelikte olduğu bulunmuştur. Korozyon ve aşınma kayıplarının tam olarak ne olduğunun

tanımlanamamasından kaynaklanmaktadır [3].

Endüstride kullanılan parçalar başta krom olmaz üzere alüminyum, bakır, kobalt, nikel, çinko, kadmiyum, kalay ve kurşun gibi saf metallerle ya da bunların alaşımları ile kaplanır. Krom kaplanan parçalar daha çok makine endüstrisinde kullanılır. Mühendislik ve dekoratif amaçlı olmak üzer ikiye ayrılan krom kaplama; kromun korozyon ve aşınma direnci ile sertliğinin yüksek, sürtünme katsayısının düşük olması nedeniyle tercih edilmektedir [4], [5].

Mühendislik amaçlı kaplamalara sert krom kaplama da denilir [6]. Metal kaplamaların endüstriyel uygulamalarında yaygın olarak kullanılması, kaplama endüstrisinde kalite ve ekonomiyi ön plana çıkarmıştır. Buna bağlı olarak, kaplama kalitesi ve hızı ile doğrudan ilgili olan banyo bileşimi ve banyo sıcaklığı, akım yoğunluğu, pH değeri gibi çalışma şartlarının araştırılması giderek önem kazanmıştır [7]. Mühendislik amaçlı kaplamalarda krom doğrudan esas metal üzerine kalın bir tabaka halinde (2,5-500 µm) kaplanır [8].

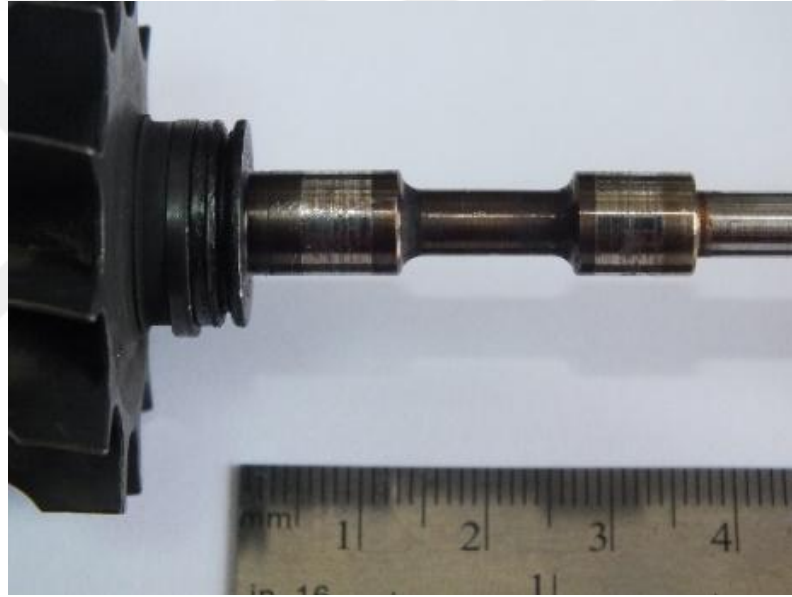
Özellikle, yüksek korozyon ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılan parçalar mühendislik amaçlı krom kaplanır [9]. Çizelge 1.1. 'de krom metali hakkında genel bilgiler sıralı olarak verilmiştir.

Çizelge 1.1. Krom metali hakkında genel bilgiler.

Sembolü	Cr
Atom numarası	24
Atom ağırlığı	51,996
Yoğunluğu	7,19
Erime noktası	1765 °C
Kaynama noktası	2675 °C
Değerlikleri	+2 ; +3 ; +5 ; +6
Elektronları	2 ; 8 ; 12 ; 2
İzotopları	50 (% 4,4) ; 52 (% 83,78) ; 53 (% 9,43) ; 54 (% 2,3)

Buluşu: 1797 yılında Sibirya’ da bir maden yatağında Fransız kimyageri Vauquelin tarafından bulundu. Ancak 1854 yılında Bunsen tarafından elde edilebildi. Krom metali ısıya çok dayanıklıdır ve demirden daha güçlü olarak 1765 °C’ de ergir. Çok sert bir metal olup aşınmaz ve havadan oksitlenmez, parlaklığını korur. Bu metalin bütün tuzları kuvvetli ve renklendirici olduklarından, adı Yunanca’ da renk anlamına gelen chrome’ den gelmektedir [10].

Makinelerde yaygın olarak kullanılan miller, piston segmanları, motor supap itecekleri, içten yanmalı motor silindirleri ile takım tezgâhlarına ait bazı parçalar sert krom kaplanırlar [5]. Ayrıca, ucuz ve kolay bulunan metallerden üretilen ve yüzey özellikleri iyi olmayan parçalar da krom kaplanarak kullanım süreleri arttırılabilir [11]. Sert krom kaplamalar; ölçme aletleri, makine parçaları, eskiyen veya aşınan parçaların yenilenmesi, plastik veya lastik kalıplarında aşınmayı ve yapışmayı önlemek, top namlusu ve motor silindirlerine sürtünme ve aşınma direnci kazandırmak amacıyla uygulanır [12]. Nitekim krom kaplamak suretiyle bir piston segmanının ortalama kullanım ömrünün beş kat arttırılabileceği belirlenmiştir [13]. Şekil 1.1.'de otomobillerde bulunan turboşarj milinin aşınan yüzey resmi görülmektedir. Resimlerde görülen turboşarj milleri aşınma yüzünden kullanılamaz hale gelmiştir.



Şekil 1.1. Aşınmış turboşarj mili yüzey görüntüsü.

Yapılan çalışmalar her ne kadar benzer görünseler de hem malzeme ve uygulandığı hem de kaplama türü ve özellikleri farklılık göstermektedir.

Bu çalışma ile silindirik malzemelere farklı parametreler ile elektrolitik sert krom kaplama yapılarak mekanik özelliklerini incelenip karşılaştırılması amaçlanmıştır. Karşılaştırmalar sonucu, sanayi ortamında uygulanacak en iyi elektrolitik sert krom kaplama parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir.

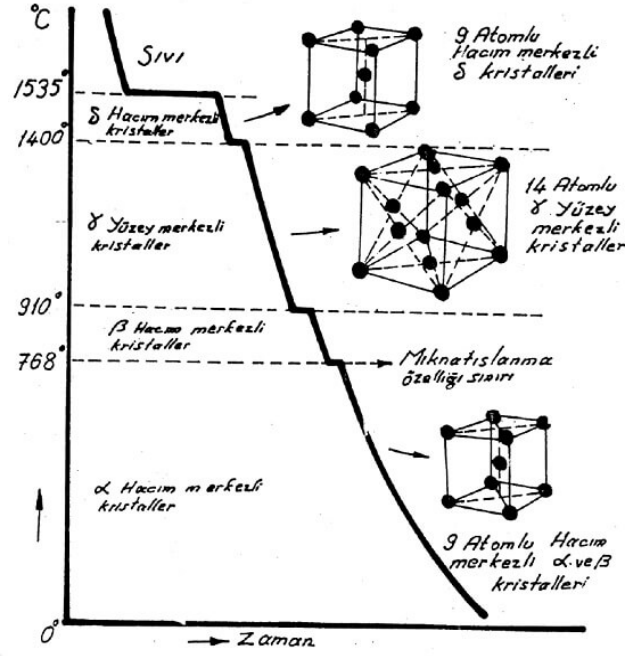
2. ÇELİK MALZEMELER

2.1. GİRİŞ

Metal malzeme kullanımında büyük yer tutan demir malzemeler, pek çok mühendislik alaşımının temelini oluşturan bir metaldir. Külçe demir olarak bilinen ve hemen-hemen saf durumdaki demir, en bol bulunan ve ucuz olan bir malzeme olup çelik çatı, demir döküm işleri, inşaat ve sağlamlık gerektiren yerler gibi bazı uygulamalarda kullanılır. Tipik bir külçe demir %0,012 C, %0,017 Mn, %0,005 P, %0,025 S ve çok az miktarda Si içerir. Saf demirin çekme dayanımı 276 Mpa, kopma uzaması % 40 ve Brinell sertlik değeri (RSD-B) 30 civarındadır. Yer kabuğunun yaklaşık olarak % 5-7 'sinde bulunan demir, elektrik ve ısıyı iyi iletmesi, kolay biçimlendirilebilir olması, farklı alaşım türleri ile kullanılabilir olması adına sıklıkla tercih edilebilir. Ancak, saf demirin sertlik ve mukavemeti pek çok uygulama için yeterli değildir. Saf demir çok yumuşak olduğu için farklı elementlerle karıştırılarak kullanılmaktadır [14].

2.2. ÇELİK MALZEMELER

Çelik, sertliği, dayanımı, ısı iletkenliği ve korozyon direnci çok iyi olan bir malzemedir. Karbon oranı % 2 olan ve farklı elementlerle bileşke kurabilen malzemelere çelik denir. Demir alotropik bir metaldir ve bu durum demirin düşük ergime sıcaklıklarda geçen sürelerde kristal kafes sistemini dönüştürmesi özelliği katmaktadır. Şekil 2.1'de bu durum ve özellikler görülmektedir. Üç türlü alotropik değişim gösteren demir, belirli sıcaklık aralıklarında kararlı bir durum sergiler. Oda sıcaklığına kadar devam eden soğumada son kristal şeklini alarak değişime uğramaz [15].



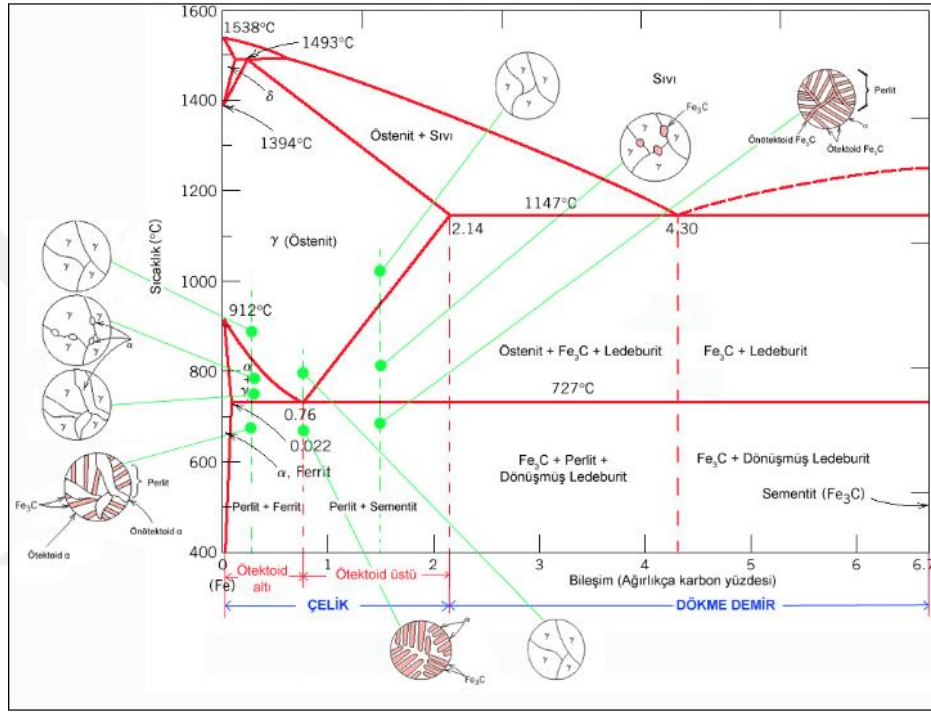
Şekil 2.1. Saf demir soğuma eğrisi [16].

Demirin alotropik yapısını açıklamak için eriyik halden oda sıcaklığına kadar geçen süre içerisinde, demirin değişiklik gösteren yapısını incelemek gerekmektedir. Eriyik haldeki saf demir 1535 °C' nin altına soğutulursa, hacim merkezli kübik kristaller halinde delta demiri olarak katılaştır. Katılaştıran bu yapıdaki her demir atomu üç boyutlu çevresi sekiz komşu demir atomu ile çevrilmiştir. Dolayısı ile de kristal kafesi meydana getiren, dokuz atomlu bir kristal yapı olmuştur. Soğumasını sürdüren saf demir, 1400°C' de atomların birbirlerine daha da yakınlaşması ile aniden yüzey merkezli kübik kristal yapısındaki gama demirine dönüşür. Yeni yapıda 14 atoma sahip bir kristal kafesi olmaktadır. Bu sayede bir önceki yapıya göre daha fazla atom ile daha sıkı bir yapı meydana gelir. Soğutma işlemi devam ettiği takdirde, 910° C' de tekrar bir duraklama noktasıyla karşılaşılır. Bu sıcaklıkta hacim merkezli kübik yeni kristaller oluşur ve oluşan bu yapıya alfa demiri adı verilir. Alfa demiri, oda sıcaklığına kadar devam eden bir soğumada artık bir daha değişime uğramayan son kristal şeklini almış bulunmaktadır [16].

2.3. DEMİR-SEMENTİT (FE-FE₃C) FAZ DİYAGRAMI

Sementit (Fe₃C) bileşiği ağırlık olarak %6,67 oranında karbon içermektedir. Söz konusu bileşiğin meydana gelmesi durumunda, demir-karbon sisteminde Fe-Fe₃C

diyagramı geçerli olur. Fe-Fe₃C denge diyagramı Şekil 2.2' de verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi, söz konusu diyagram peritektik, ötektik ve ötektoid noktaları içermektedir. Karbon oranı %0.8'den az olan çeliklere ötektoid altı çelikler, %0.8'den fazla olanlara da ötektoid üstü çelikler denir. Dökme demirlerde ise demir karbon alaşımlarının sıvı durumdan yavaş soğutulurak karışması durumunda, karbon atomları ile demir atomlarının sementit oluşturmaları engellenerek grafit taneleri oluşumu sağlanabilir [14].



Şekil 2.2. Demir (Fe) - sementit (Fe₃C) denge diyagramı [17].

2.3.1. Demir-Sementit Denge Diyagramındaki Fazlar

Şekil 2.2' de ki Fe-Fe₃C denge diyagramında yer alan fazlar aşağıda açıklanmıştır.

- Ostenit (γ): Ostenit, karbonun yüzey merkezli kübik yapı (YMK) γ-demiri içerisinde çözünmesiyle oluşan bir arayer katı çözeltisidir. Yüzey merkezi bir kübik yapıya sahip olmak ile birlikte, bu faz, 1450°C sıcaklıkta, %2,0 C çözündürür. Çekme mukavemeti 1040 Mpa, kopma uzaman %10 ve Rockwell sertlik değeri (RSD-C) 40 civarında olan ostenitin tokluğu oldukça yüksektir. Oda sıcaklığında kararsız bir faz olmasına karşın, bazı özel durumlarda oda sıcaklığında da ostenit elde edilebilir. İyi derecede şekillendirilebilen yapıya sahip olup manyetik olmamaktadır.
- Ferrit (α): Oda sıcaklığındaki demirdir. Hemen-hemen saf demir halindedir. Hacim merkezli kübik

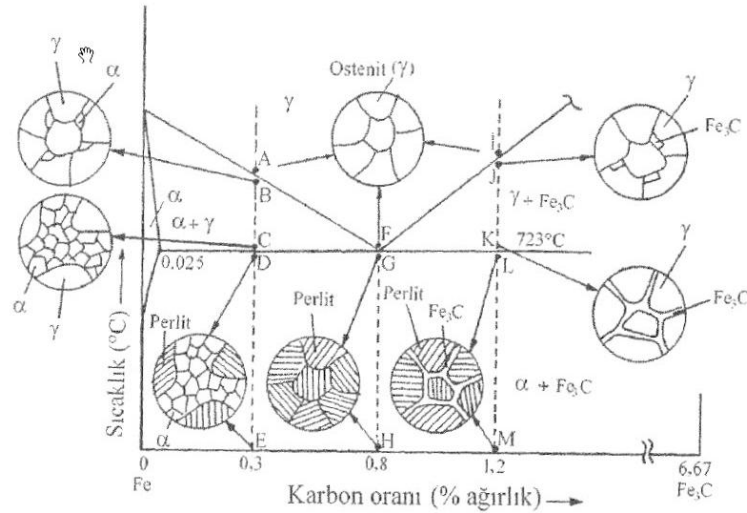
(HMK) yapılı olup içerisinde çok az orandaki karbonun çözülmesiyle oluşan arayer katı çözeltilisidir. Bu faz içerisinde, 732°C sıcaklıkta %0,025 oranında karbon çözünürken, bu oran oda sıcaklığının %0,008 değerine düşmektedir. Ferrit, Fe-C sistemindeki en yumuşak fazdır. İyi şekillendirilebilen ve manyetik yapılıdır. Çekme mukavemeti 270 MPa, kopma uzaması %40 ve sertliği 90 RSD-B civarındadır. c) Sementit (Fe_3C): Kimyasal formülü Fe_3C olan sementit bir ara yer bileşiği olup, %6,67 ağırlık oranında karbon içerir. Sert ve gevrek olan sementit, düşük çekme dayanımına (35 MPa) ve nispeten yüksek basma mukavemetine sahiptir. Fe-C diyagramındaki en sert faz olarak çeliğe sertlik kazandırır ve demir karbit olarak bilinir. d) Perlit ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$): Ötektoid reaksiyon sonrası α -Fe ve Fe_3C tarafından oluşturulan özel yapıya verilen isimdir. %0,8C içeren çeliğin, ostenit bölgesinden yavaş soğutulması sırasında 723°C sıcaklıkta meydana gelen ötektoid dönüşüm sonucunda oluşan bir yapıdır. Perlit, ferrit ve sementit lamellerinden oluşur. C miktarı %0,8'in üzerine çıktıkça, perlit miktarında azalma, sementit miktarında artma görülür. e) Ledeburit: Sementit (Fe_3C) ve ostenit (γ) tanelerinden oluşan ve %4,3 oranında karbon içeren ötektik karışımdır. Östenit ve sementit fazlarını içermektedir. f) Dönüşüm ledeburit: Ötektoid sıcaklığın (723°C) altındaki ledeburit demektir. Sementit ile perlitin yapmış olduğu ötektik karışıma denir. Bu yapıdaki ostenit perlite dönüşmüş durumda bulunur [14].

2.3.2. Demir-Sementit Sistemindeki Faz Dönüşümleri

a) Peritektik dönüşüm ($\text{S} + \delta \rightleftharpoons \gamma$): Bu dönüşüm %0,18C içeren alaşımsız çelikte 1492°C sıcaklıkta meydana gelmektedir. b) Ötektik dönüşüm ($\text{S} \rightleftharpoons \delta + \text{Fe}_3\text{C}$): Bu dönüşüm %4,3C içeren Fe-C alaşımında 1130°C sıcaklıkta meydana gelmektedir. c) Ötektoid dönüşüm ($\gamma \rightleftharpoons \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$): %0,80C içeren çelikte 723°C sıcaklıkta meydana gelmektedir [14].

2.3.3. Çeliklerde Soğuma Sırasında Oluşan İç Yapılar

Şekil 2.3'de Fe- Fe_3C denge diyagramının çeliklere ait kısmı ile bazı çeliklerin ostenit fazından yavaş soğuması sırasında oluşan içyapılar görülmektedir.



Şekil 2.3. Fe-Fe₃C denge diyagramının çeliklere ait kısmı ve soğuma sırasındaki oluşan içyapılar [14].

Yukarıdaki şekilden görüldüğü gibi; %0,3C içeren çelik A noktasında %0,3C oranına sahip ostenit (γ) tanelerinden oluşur. B noktasında karbon atomları yayınarak uzamaya başlar ve demir atomlarının YMK yapıdan HMK yapıya geçmeleri sonucunda, çoğunlukla ostenit tanelerinin sınırlarında karbon oranı düşük olan ferrit (α) taneleri oluşmaya başlar. C noktasında ferrit taneleri çoğalır ve yapıdaki ostenit fazının karbon oranı artarak %0,8 değerine ulaşır. %0,8 karbonlu çelik, östenitik bölgeden 723°C'nin altına soğutulduğunda -perlit ön-ötektoid olarak oluşmaksızın- ferrit ve lamelli sementitin bir karışımı oluşur; bağlantılı oluşan bu iki faz karışımına perlit denir (S noktası). %0,8'den küçük karbon miktarlarında ilk olarak ferrit, A ve F eğrisi boyunca östenitten çökeler (bu faza ön-ötektoid ferrit de denir). D noktasında, ostenit taneleri tamamen perlitte dönüşmüş durumda bulunur. E noktasına kadar soğutulan çelikte önemli bir faz dönüşümü meydana gelmediğinden, içyapı D noktasındaki yapının aynısı olur. %0,8C içeren çeliğin F noktasındaki yapısı ise %0,8C içeren ostenit tanelerinden oluşur. Bu yapı da G noktasında perlitik yapıya dönüşür. Bu dönüşümde, karbon atomları tane sınırlarından başlayıp, içeri doğru büyüyen sementit lamellerini oluşturacak şekilde bir araya gelir ve lamellerin aralarında karbonca fakir ferrit bölgeleri kalır. H noktasındaki yapı G noktasındaki yapının aynısı olur. %1,2 C içeren çelik İ noktasında ostenit tanelerinden oluşur. J noktasında karbon atomlarının tane sınırlarına yayılması ile bu noktalarda sementit çökelmeye başlar. K noktasında soğuma sırasında sürekli artan sementit bütün tane sınırlarını kaplar ve ayrıca ostenit içerisinde çözünen karbon oranı da sürekli azalarak bu noktada %0,8 değerine düşer. L noktasında ise arda

kalan ostenit fazı tamamen perlitik yapıya dönüşmüş durumdadır. M noktasındaki yapı, L noktasındaki yapının aynısı olur. İncelenen bu yapıda daima katıdaki (östenit) karbon difüzyonu nedeniyle meydana gelmektedir. Ferrit karbonca fakir bölgelerde, sementit (demirkarbür) ise karbonca zengin bölgelerde oluşmaktadır [14].

2.4. DEMİR EŞLİK ELEMENTLERİNİN ÇELİĞİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Alaşımsız çelikler demir ve karbondan başka düşük oranlarda safsızlık elementleri de içermektedirler. Çeliklerde kullanılan alaşım elementleri, gerek tür ve gerekse miktar açısından çok çeşitlilik göstererek kimyasal analizi ve içyapı arasında ilişki kurmak çok güç bir duruma gelir. Karbon ile safsızlık elementlerinin alaşımsız çeliğin özelliklerine etkisi aşağıda açıklanmıştır [14].

2.4.1. Karbonun Etkisi

Karbon çeliğin en temel alaşım elementidir. Karbon, çeliğin yapısal ve mekanik özelliklerini en fazla etkileyen alaşım elementidir. Karbonun oranı arttıkça çeliğin sertliği ve mukavemeti artmakta, buna karşılık sünekliği azalmaktadır. Bu durum, çelikteki sementit oranının artan karbon oranı ile artmasından kaynaklanmaktadır. Karbon miktarı arttıkça çelikteki perlit oranı arttığından, çeliğin çekme dayanımı ve akma sınırı artar, yüzde uzamayı, şekillenebilirliği ve kaynak kabiliyetini azaltır. İşlenebilirliği önemli olan çeliklerde karbon oranı düşük tutulmalı, dayanım değerlerinin yüksek olmasının istenmesi durumlarında ise karbon oranının yükselmesi gerekmektedir [14].

2.4.2. Kükürdün Etkisi

Ticari çeliklerde istenilen kükürt oranı genelde %0.05'in altında tutulur. Kükürt, demir ile birleşerek demir sülfür (FeS) fazını oluşturur. Bu faz düşük ergime sıcaklığına sahip olduğundan haddeleme sıcaklığında ergiyerek sıcak kırılabilirliğe neden olmaktadır. Demir sülfür bileşiği demir ile birlikte ergime noktası düşük olan bir ötektik alaşım meydana getirir. Bu alaşım, daha çok tane sınırlarında toplanır. Kükürt içeren çelik, sıcak dövme veya haddeleme işlemine tabi tutulduğunda, tane sınırlarında bulunan ötektik alaşım ergir. Söz konusu alaşımın ergimesiyle taneler arasındaki bağlar kopar ve çelikte çatlama meydana gelir. Bu olumsuz etkilerden kurtulmak için kükürt'ün manganla birleştirmek gerekir [14].

2.4.3. Manganın Etkisi

Bütün ticari alaşımsız çeliklerde %0,03 ile %1,0 oranları arasında mangan bulunur. Manganın önemli yararlarından biri yukarıda belirtildiği gibi kükürdün olumsuz etkisini önlemesidir. Çelikte MnS oluşturacak miktardan daha fazla oranda mangan bulunursa, fazlalık mangan karbon ile reaksiyona girerek mangan karbür (Mn_3C) oluşturur. FeS sıcaklığında kırılganlığa neden olur. Mangan, iyi bir oksijen alıcı (deoksidan) olduğundan çelik dökümlerin kalitesini iyileştirir. Çeliğin dayanımını artırarak sünekliğini azaltır [14].

2.4.4. Fosforun Etkisi

Çeliklerdeki fosfor miktarı, genelde %0,04 oranının altında tutulur. Düşük oranlardaki fosfor ferrit içerisinde çözünerek, çeliğin mukavemet ve sertliğini bir miktar artırır. Ferritin dayanımını en fazla arttıran elementtir. Bazı çeliklerde %0,07 ile %0,12 oranları arasında bulunan fosfor, çeliklerin kesme özelliğini iyileştirir. Ancak yüksek oranlardaki fosfor, çeliklerin sünekliğini azalttığından soğuk şekillendirme sırasında çeliğin çatlamasına veya kırılmasına neden olur. Bu olaya da "soğuk yırtılma" adı verilir. Çeliğin korozyon mukavemetini iyileştirmesine karşın, çelik içerisinde kükürt ile az miktarda bulunması çeliğin kaliteliliğini ön plana çıkarır [14].

2.4.5. Silisyumun Etkisi

Silisyum, çeliğin dayanımını ve sertliğini artırır. Ticari çeliklerin çoğu %0,05 ile %0,3 oranları arasında silisyum içermektedir. Silisyum, ferrit içerisinde çözünerek çeliğin sünekliğini fazla azaltmadan mukavemetini artırır. Çelik üretiminde oksijen giderici olarak ta kullanılmaktadır. Yay çelikleri ve düşük alaşımlı çelikler % 2'ye kadar Si içermektedirler. Silisyum miktarı ile çeliğin tane büyüklüğü doğru oranda artmaktadır [14].

2.4.6. Azotun Etkisi

Az miktarda da olsa azot, nitrür teşekkül ettirdiği için önemlidir. Azot, çeliklerde gevrekleşmeye neden olur ve çelikte yaşlanma meydana getirir. Yaşlanmanın sorun olmadığı durumlarda ise çelikte sertliği, korozyona dayanımı ve mekanik mukavemeti artırır. Hava üfleme yöntemiyle üretilen Thomas çeliklerinde %0,03 oranında azot bulunurken, oksijen üfleme yöntemiyle üretilen Siemens-Martin çelikleri %0,01'den daha düşük oranlarda azot içerir [14].

2.5. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ÇELİĞİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Sade karbonlu çeliklerin, sertleşebilme derinliğini arttırarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, yüksek dayanım ve iyi bir süneklik istenmesi, yüksek temperleme sıcaklıkları istenmesi, düşük ve yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, yüksek sıcaklık oksidasyonunu ve korozyon direncini iyileştirmek istenmesi, aşınma ve yorulma dayanımı gibi özelliklerin iyileştirilmesi için alaşım elementleri çelik içerisine katılmaktadır. Aşağıda çeliğin özelliklerinin iyileştirmek adına kullanılan elementler verilerek çeliğin özelliklerine etkisi açıklanmıştır.

2.5.1. Nikelin Etkisi

Nikel, birçok mekanik parçanın yapımında kullanılmakla birlikte. Çelik içerisine katılıp çeliklere kazandırdığı yüksek ısı dayanımı ve ısı genleşme dayanımı ile elektrik direnç telleri yapımında da kullanılmaktadır. Silisyum ve mangana ile kıyaslayacak olursak çekme dayanımını daha yüksek olup, özgül uzamayı biraz düşürmektedir. Nikel elementi çeliklerin çekirdeğe kadar sertleşebilmelerini sağlar. Krom-Nikel çelikleri korozyona, tufallaşmaya ve sıcağa dayanıklı bir özellik kazandırarak, paslanmaya, korozyona ve kimyasal maddelere karşı koruma sağlar. Özellikle düşük sıcaklıklarda imalat çeliklerinde çentik darbe dayanımı yüksek nikel kaynak kabiliyetini etkilemez. Sementasyon ve ıslah çeliklerinde mukavemeti arttırıcı nitelik taşıyan nikelin çelikte alaşım elementi olarak kullanılmasındaki genel amaç, östenitik bir bünye, korozyon ve tufallaşmaya dayanım elde edilmesidir [14].

2.5.2. Kromun Etkisi

Karbon, çeliğe katıldığında dayanımı yüksek çelik elde edilir. Özgül uzamayı azaltarak, sıcakta dayanımı ve tufallaşma dayanıklılığını yükseltir. Yüksek krom değerleri ile çelik paslanmaz hale gelir ve aşınma dayanımı yükselir. Kaynak edilebilirlik, krom miktarının artması ile azalır. Krom, karbit elemanlarının oluşumuna geniş ölçüde yardımcı olur. Çeliğin çekme dayanımı ve akma sınırını arttırır. Çelikte çentik darbe dayanımını düşürür. Faz dönüşümlerini yavaşlatarak çekirdeğe kadar sertleşmesini sağlar ve ine taneli bir yapı oluşturur [14].

2.5.3. Molibdenin Etkisi

Molibden çelikte tane büyümesini önler. Alaşımli takım çeliklerinde önemli bir alaşım

elementidir ve yüksek miktarlarda katılır, sıcağa ve aşınmaya karşı dayanımını iyileştirir. Paslanmaz çeliklerde korozyon direncini artırır.

%0.5'e kadar molibden ilavesi alaşımsız çeliğin korozyon direncini arttırdığı bilinmektedir. Bu artış lineer bir artış değildir. Yalnız ilave edildiği takdirde % 0.5'lik oranı geçmemesi önemlidir. Alaşımsız çeliğe az miktardaki molibden ilavesi sadece korozyonun çok etkili olduğu başlangıç sürecinde etkilidir [18].

2.5.4. Vanadyumun Etkisi

Çeliğe sertlik ve özlülük kazandırarak, ince taneli bir yapı oluşmasını sağlar. Çelikler böylece darbe ve yüklere karşı yüksek dayanım gösterir. Daha çok kesici takım yapımında kullanılır. Az miktarda vanadyum elementi, çeliğin sıcağa dayanımı yükselterek aşırı ısınmadaki hassasiyeti düşürmektedir. Hız çeliklerinin kesme dayanıklılığını yükseltir. Az miktarda katılan vanadyumun kaynak edilebilirliğe ise hissedilir düzeye değildir. İyi bir karpit oluşturunca olan vanadyum çelikte çekme dayanımını, akma sınırını ve özellikle sıcakta dayanıklılık özelliklerini iyileştirir [14].

2.5.5. Volframın Etkisi

Mukavemeti, sertliği, kesme kabiliyetini ve dayanıklılığı önemli derecede yükseltmektedir. Volframın önemli özelliği sıcakta sertliği muhafaza ettirmesidir. Çeliğin doku dönüşüm hızını düşürerek çekirdeğe kadar sertleşmesini sağlar. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki az miktardaki ilavesinin dahi korozyon hızını azaltıcı etkiye sahiptir [18].

2.5.6. Kobaltın Etkisi

Kobalt, çeliğin sertliğini, yüklere ve ısıya karşı dayanımını artırır. Kuvvetli bir karpit oluşturunca olduğundan meneviş dayanıklılığını ve sıcakta dayanımı fazla artırır. Bu nedenle özellikle hız çeliklerinde sıcağa dayanıklı sert maden imalinde kullanılmaktadır. Manyetik özelliklere sahip olduğundan mıknatıs yapımında sıklıkla kullanılır [14].

2.5.7. Alüminyumun Etkisi

Çelik içerisinde oksitlenmeyi ve pullanmayı önleyen elementtir. Tutum silisyuma benzer ve karbonun grafit şeklinde ayrışmasını kolaylaştırır. Yüksek miktarda kullanıldığı zaman çeliği kaba taneli yapar ve sıcakta tufallaşma dayanımını artırır. Çelikte sıkça kullanılmasının önemli sebeplerinden birisi ise ağırlığının azaltmasıdır.

Ayrıca azota karşı son derece ilgili olduğundan nitrürasyon çelikleri için fayda sağlamaktadır [14].

%1.5 oranına kadar olan alüminyum ilavesi korozyonun başlangıç aşamasında yavaşlatıcı etkiye sahip olsa da, uzun vadede oksijensiz ortamdaki korozyon dikkate alındığında korozyonu hızlandırıcı etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Akma dayanımını ve darbe tokluğunu arttırıcı etki gösterir [18].

2.5.8. Borun Etkisi

Çeliklerde ayrışma serleşmesi söz konusu olan yerlerde ve diğer özel durumlarda kullanılmaktadır. Özellikle östenitik çeliklerde alaşım elemanı olarak görülmektedir [14].

2.5.9. Bakırın Etkisi

Çeliğin çekme dayanımı ve akma sınırını yükseltir. Özgül uzamayı azaltır. Hurda malzemelerin geri dönüşümü sırasında çeliklerin içerisine girer [14].

Korozyonun hızının en yüksek olduğu başlangıç aşamasında önemli bir etkiye sahiptir. Uzun vadede dikkate alındığında ise yine aynı şekilde korozyon hızını arttırıcı etkiye sahiptir. Çeliklerin korozyon direncini ve azda olsa dayanımını arttırır [18].

2.5.10. Kurşunun Etkisi

Kükürtle birlikte çeliği talaş verme kabiliyetini yükselterek, yakım ömrünün artmasını sağlamaktadır. Kurşunun katık miktarı yaklaşık olarak %0,2 - %0,3 civarındadır [14].

2.6. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Çelikler birçok sınıfa ayrılabilirler. Bunlardan bazıları; genel yapım çelikleri, makine yapım çelikleri, otomat çelikleri, yüksek sıcaklığa dayanıklı çelikler v.b. Ancak bu bölümde yaygın olarak kullanılan sınıflandırmalardan bahsedecek olursak; karbon oranlarına göre, alaşım element miktarlarına ve kullanım alanlarına göre ele alınacaktır.

2.6.1. Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması

Karbonlu çeliklerin tüm özellikleri, içerdikleri karbon miktarlarına bağlı olarak, sahip oldukları yapılarla doğrudan ilişkilidir. Çelikler içerdikleri karbon oranına göre düşük karbonlu çelikler, orta karbonlu çelikler, yüksek karbonlu çelikler ve yüksek karbonlu

takım çelikleri olmak üzere başlıca dört sınıfa ayrılırlar. Bu çelikler aşağıda açıklanmaktadır [14].

2.6.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler

Bu sınıfta, %0,20 oranına kadar karbon içerirler ve çok yumuşak ve yumuşak çelikler olmak üzere ve mekanik özellikleri de göz önünde bulundurularak iki gruba ayrılırlar: a) Çok yumuşak çelikler: %0,06 ile %0,15 arasında karbon içerirler ve soğuk şekillendirmeye elverişli çelikler. b) Yumuşak çelikler: %0,13 ile %0,24 oranında karbon içerir. Yaygın olarak kullanılan alaşımsız çeliklerdir. Çok iyi kaynak edilebilirler, ancak su verme yöntemi ile iyi sertleştirilemezler. Düşük karbonlu çelikler dünya çelik üretiminin büyük bir miktarını kapsar [14].

2.6.1.2. Orta Karbonlu Çelikler

Bu sınıftaki çelikler, %0,20 ile %0,60 oranları arasında karbon içeren çeliklerdir. Bu gruptaki çeliklerin en büyük özellikleri, ısıtılıp ısıtılmadan yeterli derecede sertleştirilebilmeleridir. Bu çeliklerin yapı ve özellikleri ısıtılıp ısıtılmadan büyük ölçüde değiştirilebilir. Bu çelikler, karbon oranlarına göre genel dövme çelikleri, mil çelikleri ve aşınmaya dayanıklı çelikler olmak üzere sınıflandırılabilir. a) Genel dövme çelikleri: %0,25 ile %0,35 arasında karbon içerirler. b) Mil çelikleri: %0,35 ile %0,45 oranları arasında karbon içerir. Mil, tel ve dingil yapımı için kullanılırlar. c) Aşınmaya dayanıklı çelikler: %0,45 ile %0,55 arasında karbon içeren çeliklerdir. Ray, ray tekerleği, silindir ve pres kalıplarının, kalıplardaki düşü ve erkek parçalarının yapımında kullanılır [14].

2.6.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler

%0,60-%0,9 arasında karbon oranına sahiptirler. Yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılırlar. Normal durumda yüksek mukavemeti ve sünekliği az olan çelik türüdür. Isıtılıp ısıtılmadan sertleştirilmeleri sayesinde yüksek sertlik kazanırlar. Bu nedenle aşınmaya dayanıklı ve kesici özelliğe sahiptirler [14].

2.6.1.4. Yüksek Karbonlu Takım Çelikleri

Bu sınıftaki çelikler ise %0,9-%1,5 oranları arasında karbon içeren çeliklerdir. Yüksek aşınma direnci ve yüksek mukavemet istenilen durumlarda kullanılırlar. Kullanım yerlerine örnek olarak torna kalem, el aletlerindeki uç kısımlar, frezenin bazı kesici takımları ve matkap uçları vs. verilebilir [14].

2.6.2. Çeliklerin Alaşım Elementi Miktarına Göre Sınıflandırılması

Avrupa standardı (EURONORM) 20-74' e göre, alaşım elementi miktarına göre yapılan sınıflandırmada çelikler; alaşımsız çelikler, düşük alaşımlı çelikler, alaşımlı çelikler olmak üzere üç ana grupta toplanır [14].

Çizelge 2.1. Çeliklerin alaşım elementi miktarına göre sınıflandırılması [14].

Alaşım Elementi	Alaşımsız Çelikler	Düşük Alaşımlı Çelikler	Alaşımlı Çelikler
C	%1,5 en az	%1,5 den az	%2,2 den az
Mn+Si	%1,5 den az	%1,5-%3,0	%3,0 den fazla
P	%0,08 den az	%0,05 den az	%0,04 den az
S	%0,06 dan az	%0,05 den az	%0,04 den az
Al	%0,3 den az	-	%0,3 den fazla
B	-	-	%0,001 den fazla
Co	%0,2 den az	%0,2-0,3	%0,3 den fazla
Cr	%0,3 den az	%0,3-0,5	%0,5 den fazla
Cu	%0,4 den az	-	%0,4 den fazla
Mo	%0,05 den az	%-0,05-0,10	%0,1 den fazla
Ni	%0,05 den az	%0,3-0,5	%0,5 den fazla
Pb	%0,4 den az	-	%0,4 den fazla
V	%0,05 den az	%0,05-0,10	%0,1 den fazla
W	%0,2 den az	%0,2-0,3	%0,3 den fazla

Bir çeliğin düşük alaşımlı ya da alaşımlı sayılması için bu elementlerden herhangi birinin kendisi için belirlenen alt sınırı aşması gerekmektedir.

2.6.3. Bazı Çeliklerin Kullanım Alanına Göre Sınıflandırılması

Endüstrinin gelişimiyle farklı özellik ve farklı kalitelerde çok sayıda çelik geliştirilmekte ve üretilmektedir. Günümüzde daha çok sistematik olmayan fakat çeliklerin karakteristik özelliklerini ve/veya kullanım amaçlarını ön plana çıkaran sınıflandırmalar kullanmaya başlanmıştır. Bunlardan bazı çelik tipleri ve özellikleri aşağıda açıklanmıştır [14].

2.6.3.1. Konstrüksiyon Çelikleri

Kimyasal etkilere dayanıklılık ve imalat sırasında sertleştirme işlemi öngörülmeden genel olarak konstrüksiyon çelikleri olarak düşünülen yapı çelikleri, kullanım yerine göre seçilmelerinde, öncelikle akma gerilmesi değeri göz önünde bulundurulur. Kükürt ve fosfor yüzdeleri %0,050-%0,080 arasında almakla, analizleri ile değil mukavemet değerleri ile bilinirler. Konstrüksiyon çelikleri inşaat demiri, U, T, I profilleri olarak üretilirler. Vinçler, vagonlar, köprüler, makine gövdeleri ve fabrikaların yapımında, çatı

ve iskele gibi alanlarda kullanılırlar [14].

2.6.3.2. Yay Çelikleri

Elastik olarak form değiştirmesi meydana getirebilen, bu sırada mekanik işi potansiyel enerjiye dönüştüren ve tekrar mekanik işe dönüşüm sağlayan konstrüksiyon elemanlarıdır. Bu özelliğinden dolayı yay çeliklerinin çarpma etkisini azaltıcı olarak, titreşim elemanı olarak, kuvvetle kitlenen parçalar için emniyet elemanı olarak, hareketli parçalarda yaylanma ve kumanda düzeni için kullanılırlar. Ayrıca çeşitli kesitlerde olabilen yayların imalatında kullanılan çeliklerdir. Bu çeliklerin karbon oranları yapı çeliklerine göre daha yüksektir ve takım çeliklerinin karbon oranlarına göre düşüktür. "Akma sınırı/ Çekme dayanımı" oranını yüksek ve elastisite modülünün kararlı olması gereken, su alabilen çeliklerdir [19].

2.6.3.3. Otomat Çelikleri

Otomat çelikleri, genellikle hızlı talaş alma işleminde talaşların kırık çıkmasıyla, talaşlı imalat maliyetleri düşük çeliklerdir. Taşıdıkları kolay işlenebilirlik özelliklerinden dolayı, bu çelikler revolver veya çok milli torna tezgâhlarında yapılan boyuna ve alın tornalama, diş açma, matkapla delme ve raybalama gibi talaş kaldırma işlemlerine en uygun çeliklerdir. Kükürt ve Mangan içerikleri normal değerlerin üzerindedir. Daha rahat işlenebilmeleri amacıyla Pb ilave edilen türleri de mevcuttur. Sementelenebilen ve direk sertleştirilebilenler olarak iki grupta toplanır. Kullanım alanları olarak, süratli ve seri üretim yapabilen otomat e torna tezgâhları olarak gösterilebilir [14].

2.6.3.4. Karbon Çelikleri

Çekme dayanımına göre ifade edilen yapı çelikleri öncelikle çekme dayanımları ve akma sınır değerleri göz önünde tutularak, köprü yapımı, taşıt yapımı, çelik konstrüksiyon ve makine konstrüksiyonlarında kullanılan, çoğunlukla haddelenmiş halde, kısmen normal tavlı olarak kullanılan çeliklerdir. Bu çelikler alaşımsız çelik olarak tanımlandıklarından, mekanik özellikleri büyük ölçüde karbon miktarına bağlı olmasına karşılık başta azot ve fosfor olmak üzere üretim hammaddelerinden ve üretim yöntemlerinden kaynaklanan mangan, silisyum, bakır ve kükürt elementleri de önem taşımaktadır. İmalat çelikleri olarak bilinirler. Kullanım alanları olarak makine, cıvata, somun, dingil gemi şaftı, dişli çark, transmisyon mili v.b. makine ve makine parçalarının gerektiği yerlerde kullanılırlar.

2.6.3.5. Sementasyon Çelikleri

Sementasyon çelikleri, yüzeyde sert ve aşırıtmaya dayanıklı, çekirdekte ise daha yumuşak ve tok özelliklerin istendiği, %C oranı 0,10-0,20 olan, değişken ve darbeli zorlamalara dayanıklı parçaların imalinde, kullanılan çeliklerdir. Örneğin, dişli parçaların imalinde, düşük çekirdek dayanımlı ve orta zorlamalı yapı ve makine parçalarında, her türlü aktarma parçası olan aks, mil, pim ve burç gibi alanlarda kullanılırlar [14].

2.6.3.6. Islah Çelikleri

Islah çelikleri, kimyasal birleşimleri özellikle karbon miktarı bakımından, sertleştirilmeye elverişli olan ve ıslah işlemi sonunda belirli bir çekme dayanımında yüksek tokluk özelliği gösteren, alaşımsız ve alaşımlı makine imalat çelikleridir. Bu tür çeliklerin % C oranları % 0,35'den başlar. Genellikle uygun bir sertleştirme ve menevişleme işleminden sonra özellikleri iyileştirilerek kullanılırlar. Bu tür çelikler, makine imalatının büyük bölümünde kullanılmakla beraber alaşımlı olanlar mil, şaft, krank, taşıt, motor ve aparat yapımında, otomobil ve uçak yapımı gibi parçaların imalinde kullanılabilirler [14].

2.6.3.7. Rulman Çelikleri

Rulman çelikleri, rulman türlerinin çeşitli kısımlarının yapımında kullanılan çeliklerdir. Bu çelikler, rulmanlarda yer-yer meydana gelen, çok yüksek çekme, basınç, devamlı titreşim ve aşınma etkilerini karşılamak durumundadır. Bu nedenle özel kimyasal bileşim yanında, tam sertleştirme veya yüzey sertleştirme işlemleri de gerekir. Bunların karbon oranları tamamen takım çelikleri seviyesinde ve hatta onların üst seviyelerinde olan çeliklerdir. Sertleşebilen ve aşınma dayanımı yüksek olan çeliklerdir. Kullanım alanı olarak bilyeli yatakları, röleli yatakları, özel makara, rulman, tablalar olarak verilebilir [19].

2.6.3.8. Takım Çelikleri

Takım çeliklerinin birçok çeşidi vardır. Bunlar; alaşımsız, alaşımlı, yüksek hızı, soğuk iş ve sıcak iş takım çelikleri olarak bilinmektedir. Kullanım alanları olarak kesici takımlar, makaslar, kalıplar, sıcak ve soğuk şekil verme kalıpları, darbeli çalışan takımlar, el aletleri, hava tabancaları, ölçü ve kontrol takımları v.b. parçaların imalatında kullanılırlar [14].

2.6.3.9. Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çelikler bileşiminde en az %11 krom içeren çeliklerdir. Paslanmaz çelikler mükemmel korozyona dayanım, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilme, şekil verme kolaylığı gibi özelliklere sahiptir. Paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşim değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilir. Bu yapıyı belirleyen alaşım elementleri ise, önem sırasına göre, krom, nikel molibden ve mangandır. Yapısına göre paslanmaz çelikler 3 ana gruba ayrılır. Bunlar; ferritik, martenzitik, östenitik çeliklerdir. Ferritik paslanmaz çelikler %14-25 Cr ve çok az karbon içeren çeliklerdir. Isıl işleme sertleştirilemezler. Östenitik paslanmaz çelikler, temel bileşeninde % 18 Cr ve % 18 Ni mevcuttur. En büyük özellikleri yumuşak, şekillendirmeye çok uygun korozyona, aside ve ısıya dayanıklıdır. Martenzitik paslanmaz çelikler, karbon yanında %12-17 civarında krom içerirler ve sertleştirilebilirler [14].

2.7. ÇELİKLERİN TÜRK STANDARTLARINA GÖRE GÖSTERİMİ

Çelik ve dökme demirlerin kimyasal bileşimi ve özelliklerine göre kısa gösterilişleri Türk Standartları (TS) 1111' de ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Çelikler ergitme yöntemine göre, T (Thomas konverteri), O (oksijen konverteri), M (Siemens-Martin ocağı), E (elektrik ark ocağı), I (endüksiyon ocağı); döküm şekline göre de S (sakinleştirilmiş), SY (yan sakınleştirilmiş), K (kaynar dökülmüş) işaretleri ile gösterilebilir [14]. Türk Standartları Enstitüsü (TSE) malzeme türleri ile ilgili standartları hazırlarken Alman Standartlar Enstitüsü (DIN) çelik normlarını esas almış ve Çizelge 2.2' de görüldüğü gibi belirlemiştir [20].

Çizelge 2.2. Malzeme türlerinin standart sembolleri [20].

Malzeme Türleri	
Sembol	Açıklaması
0	Ham demir, dökme demir.
1	Çelik ve çelik dökümü.
2	Demir dışındaki ağır metaller.
3	Hafif metaller.
4-8	Metal olmayan malzemeler.
9	İlerideki gelişmeler için boş bırakılmış.

Çizelge 2.2' de verilen çelik ve çelik döküm türündeki malzemelerin sembol gösterimleri TS 1111' de standart duruma getirilmiştir.

3. YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Bir metalin içyapısını bozmadan ve ana malzemeyi en iyi korumanın yolu yüzey kaplamadan geçmektedir. Yüzey, bir maddenin kendi dışındaki ortamla temasta olan bölgesi, çevreyle olan temas sınırı olarak tanımlar. Farklı bir deyişle yüzey, maddeyi saran ve onun geometrisini oluşturan yine maddenin kendisinden meydana gelen bir zarf tabakadır. İçyapıyı çevreleyen dışarıdan görülen kısımdır. Maddenin dış çevreyle olan tüm etkileşimi temas yüzeyi üzerinden oluşmaktadır ve çevresiyle etkileşime yüzeyden başlamaktadır. Bu etkileşimlerin bazısında malzemenin tümüne mal olan özellikleri büyük ölçüde yüzey çevresinde belirlenmektedir ve yüzeye etki etmektedir [21].

Malzemelerin yüzeyi tarafından belirlenen bazı özellikler şu şekilde açıklanabilir; a) Sürtünme ve aşınma özellikleri, b) korozyon davranışları, c) yüzeye bağlı mekanik özellikleri (yorulma), d) dış görünüm ve renkleri, e) optik özellikleri (yansıtma katsayısı vb.), f) fotoelektrik özellikleri (ışığa reaksiyonları), g) komşu maddeye difüzyon özellikleri, k) yapışma özellikleri, l) elektrik kontak özellikleri, m) ısı elektron emisyon özellikleri gibi.

Yukarıda belirlenen özellikler açısından malzemenin davranışı, onun yüzeyinin çevresine olan davranışı tarafından belirlenir. Bu tür özelliklerin istendiği malzemelerde, malzemenin tamamını iyileştirmek yerine sadece yüzeyini iyileştirmek yeterli olarak sayılmaktadır. Buna örnek verecek olursak dış görünüm ve korozyondan koruma amacıyla metal malzemelerin boyanması verilebilir [21].

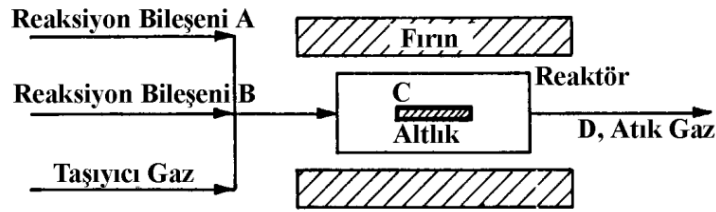
3.1. KİMYASAL BUHAR YOĞUŞTURMA (CVD)

3.1.1. Giriş

CVD (Chemical Vapour Deposition) olarak isimlendirilen kimyasal buhar yoğunlaştırma tekniği ile yüzey kaplamaları üretimi, bir gaz fazdan kimyasal reaksiyonlar sonucu elde oluşan yeni fazın yüzeye çöktürülmesi işlemine dayanmaktadır. Yüzeye çöktürülen yeni fazın yüzeyi koruma özelliğine sahiptir [21].

Kimyasal buhar yoğuşurma tekniklerinin tarihçesi 1915 yılına dayandığı bilinmektedir ve o zamanlarda Langmuir sıcak bir telin üzerine volfram kristalleri çöktürmeyi başarmıştır. Kimyasal olarak buhar yoğuşurma işlemleri henüz akkor lambanın gelişimi sırasında dikkat çekmiştir. A. Van Arkel ve J. de Boer 1924 yılında Philips Laboratuvarlarında volframın yanı sıra titanyum, zirkonyum ve hafniyum gibi metalleri kimyasal olarak çöktürmeyi başarmışlardır. 1925 yılında Weiß tarafından yapılan bir çalışmada zirkonyum klorürden, zirkonyum çöktürüldüğü iddia edilmektedir. Bu çalışmanın ardından titanyum ve zirkonyumun nitrürleri ve karbürlerinin gaz fazdan kimyasal yolla çöktürülmesi işleminin esasları A. Van Arkel tarafından tam olarak ortaya konulmuştur [22].

CVD teknikleriyle metal, oksit, nitrür, karbür, borür ve benzeri kaplamaların üretilmesi mümkündür. Şekil 3.1’de bir CVD ünitesinin temel prensibi verilmektedir.



Şekil 3.1. Bir CVD ünitesinin prensip şeması, reaksiyon: $A+B \rightarrow C+D$ [21].

Çizelge 3.1’de bir CVD ünitesinin prensip şeması ve çeşitli kaplama türleri için uygun reaksiyon bileşenleri sırası verilmiştir. Kaplamayı sağlamak için yeterli derecede buhar için istenilen sıcaklığın etkisi görülmektedir [21].

3.1.2. CVD Reaksiyonlarının Termodinamiği

CVD tekniklerini uygulama açısından için en önemli reaksiyonlardan biridir.



Gaz halindeki bileşenlerden TiCl_4 ve CH_4 yüksek sıcaklıklara çıkıldığında altlık malzemesi üzerine gönderilmektedir. Bu şekilde reaksiyonun istenilen yönde geliştirilmesi için uygun termodinamik koşulların sağlanması gerekmektedir. Reaksiyonun oluşum yönü kütle etki kuralıyla belirlenebilir [21].

$$Kp(T) = \frac{[P_{\text{HCl}_4}]}{[P_{\text{TiCl}_4}][P_{\text{CH}_4}]} \quad (3.2)$$

Şekil 3.1' de verilen reaksiyonun sağa doğru oluşabilmesi için $K_p(T)$ ifadesinin büyük olması gerekmektedir. Denge sabiti $K_p(T)$ değeri standart serbest entalpi kuralına göre;

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (3.3)$$

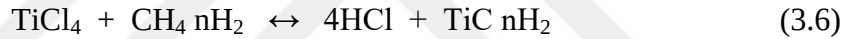
ifadesinden;

$$\log K_{pt}(T) = \frac{-\Delta G^0}{2,303RT} \quad (3.4)$$

olarak bulunur. Burada ΔH^0 standart entalpi değişimi ve ΔS^0 da reaksiyonun standart entropi değişimidir. Bu reaksiyonları incelendiğimizde ΔG^0 değerinin 910°C 'nin üzerinde negatif (-) olduğu ve $\log K_p$ ifadesinin de bu yüzden pozitif (+) değer aldığı görülmektedir. $K_p > 1$ koşulu sağlandığından, reaksiyon sağa doğru gelişecektir. Ancak şekildeki reaksiyon eşitliği uyarınca eğer bu sıcaklığın üzerinde 1 mol TiCl_4 ve 1 Mol CH_4 ortama birlikte yerleştirilmiş olsaydı,



denklemini uyarınca öncelikle karbon ayrışmasını gerçekleştirecekti. Böyle bir metan gazı ayrışması yeterli derecede yüksek hidrojen kısmi basıncı ile önlenebilmektedir [21].



Çizelge 3.1. Değişik kaplama türleri için uygun reaksiyon bileşenleri ve reaksiyon sıcaklıkları [21].

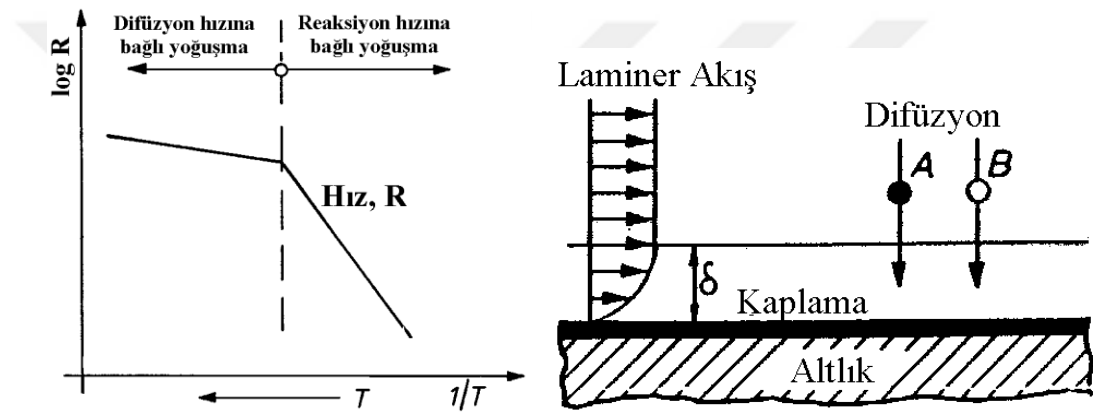
Kaplama Türü	Reaksiyon Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Reaksiyon Bileşenleri
TiC	1000	$\text{CH}_4, \text{H}_2, \text{TiCl}_4$ (30 C)
VS	1050	$\text{CH}_4, \text{H}_2, \text{VCl}_2$ (1050 C)
SiC	800	$\text{CH}_4, \text{H}_2, \text{SiH}_4$ (g)
W_2C	600	$\text{C}_6\text{H}_6, \text{H}_2, \text{WF}_6$ (30 C)
TiN	950	$\text{N}_2, \text{H}_2, \text{TiCl}_4$ (30 C)
Si_3N_4	1200	$\text{NH}_3, \text{H}_2, \text{SiCl}_4$ (g)
HfN	1000	$\text{N}_2, \text{H}_2, \text{HfCl}_4$ (250 C)
TiB_2	1000	$\text{BCl}_3, \text{H}_2, \text{TiCl}_4$ (30 C)
Al_2O_3	1000	$\text{CO}_2, \text{H}_2, \text{AlCl}_3$ (150 C)
Cr	850	$\text{H}_2, \text{CrCl}_2$ (900 C)
W	900	H_2, WF_6 (30 C)
C	1400	C_2H_6 veya C_3H_8

Bu şekilde oluşan yüksek miktardaki gaz akımı aynı zamanda HCl gazının reaksiyon bölgesinden hızlıca uzaklaşmasına etkisi olacaktır. TiC oluşum aşamalarının ayrıntılı bir analizi yapılması halinde çok sayıda reaksiyonun kapsandığı görülebilir. Bu reaksiyonlar arasında TiCl_4 'ün doğrudan indirgenmesi TiCl_4 'ün TiCl_3 'e redüksiyonu TiCl_3 'den TiCl_4 ve Ti parçalanması TiCl_4 'ün C ve H_2 ile reaksiyonu sonucu Ti

oluşumu gibi reaksiyonlar sayılabilir [21].

3.1.3. Yoğuşma Kinetiği ve Madde Hareketleri

Termodinamik değerlendirmeler göz önünde bulundurulduğunda, mevcut bir sistem için denge halinde ne tür kimyasal reaksiyonların oluşabileceği hakkında fikir vermektedir. Termodinamik değerlendirmeye karşılık reaksiyonun oluşum hızı ve buna bağlı olarak kaplama yoğuşma hızı hakkında bu tür değerlendirmelerde bilgi bulunmamaktadır. Difüzyona bağlı oluşumların ortaya çıkması, altlık malzemesinin katalizör etkisinden dolayı yoğuşma hızının önceden yaklaşımlarla belirlenmesi ve akış mekanizmalarının devreye girmesi zordur [21].



Şekil 3.2. İşlem sıcaklığına ($1/T$) bağlı olarak yoğuşma hızının, R , değişimi ve CVD işleminde altlık yüzeyindeki difüzyon ve laminar akışın şematik gösterimi [21].

Şekil 3.2'de işlem sıcaklığına bağlı olarak yoğuşma hızının R değişimi ve CVD işleminde altlık yüzeyindeki difüzyon ve laminar akışın şematiği görülmektedir. Yoğuşma hızının $\ln R = f(1/T)$ tarzındaki Arrhenius ifadesi ile gösterimi sonucunda farklı eğime sahip iki bölge oluşmaktadır [21].

3.2 FİZİKSEL BUHAR YOĞUŞTURMA (PVD)

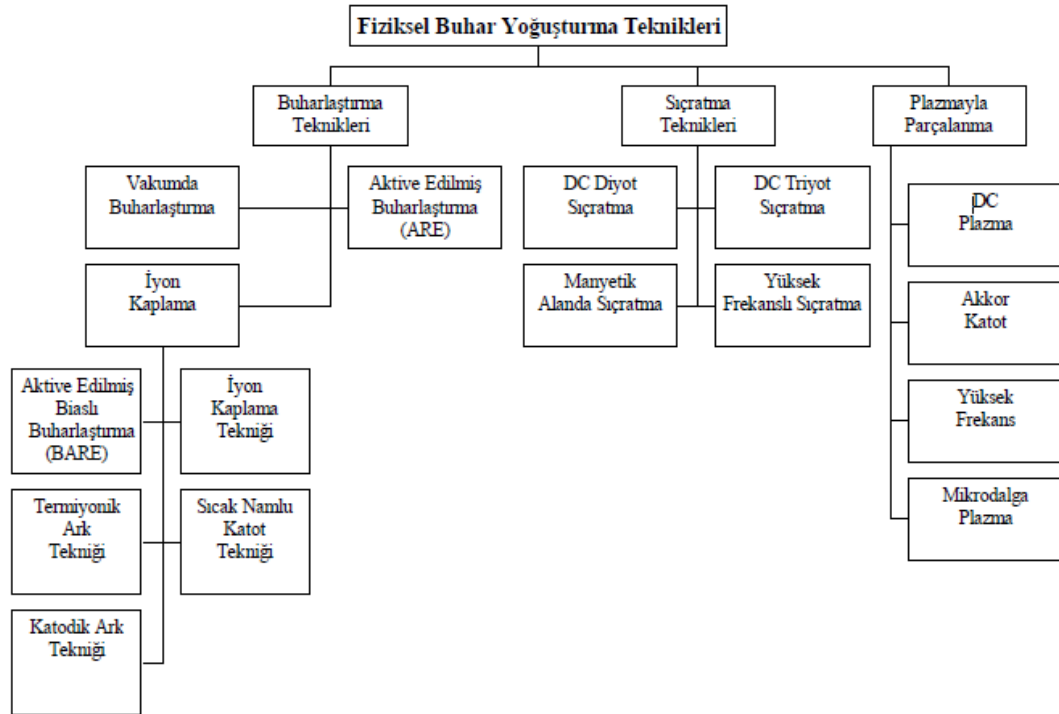
3.2.1. Giriş

Fiziksel buhar biriktirme, katı bir kaynağın vakum altında atomizasyon veya buharlaştırılması ve bu maddenin kaplama oluşturmak için altlık üzerine biriktirilmesi prosesidir. Fiziksel buhar biriktirme tekniği, yüksek güç elektrik ve elektronığında vakum teknolojisinin geliştirilmesinden sonra büyük bir gelişme göstermiştir. Katı

durumdaki kaynak malzemesinin yüzeyinden buhar fazına geçecek parçacıkların yüzeyden ayrılması için gerekli olan enerji buharlaştırma tekniğinde ısı enerjisiyle sıçratma tekniğinde ise bombardıman iyonlarının çarpma enerjisi transferiyle sağlanmaktadır. Kaynağın buharlaştırılması ve bu fazın bir altlık yüzeyinde yoğunlaştırılması faz dönüşümlerini ve kütle transferini içeren fiziksel temel oluşumları kapsayan bir mekanizmadır. PVD teknolojisinin CVD teknolojisine göre en büyük avantajı sert metal ve yüksek hız çeliklerinin özelliklerini etkilemeden düşük sıcaklıklarda kaplama yapılabilmesidir [21].

3.2.2. PVD Yöntemlerinin Sınıflandırılması

PVD yöntemlerinin sınıflandırılmasında en anlaşılır gruplama kaynak ya da hedef malzemesinin hangi şekilde buhar haline geçirildiğine göre yapılmaktadır. Buna göre yöntemler, buharlaştırma ve fiziksel sıçratma olarak iki genel gruba bölünmektedir. Bu yöntemler haricinde gaz halindeki bileşiklerin fiziksel olarak parçalanması ile buhar elde edilen yöntemler de vardır. Bu yöntemlerden bazıları aşağıda açıklanmıştır [21].



Şekil 3.3. Fiziksel buhar yoğuşurma yöntemlerinin sınıflandırılması [21].

Şekil 3.3’de fiziksel buhar yoğuşurma yöntemlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir. Kaplama gerçekleşme durumuna göre reaktif olan ya da reaktif olmayan kaplama teknikleri olarak gruplandırma yapılabilir.

3.2.3. Buharlaştırma

Bu yöntem ile yapılan PVD kaplama, sıvı veya katı fazdaki kaplanacak malzeme rezistanslı, endüktif, elektron bombardımanlı ve katodik arkli sistemler ile buharlaştırılır. Buharlaştırma yoluyla kaplama üretimi temel olarak bilinen dört fiziksel adımda gerçekleşmektedir. Bu dört adım; a) kaynağa yerleştirilmiş katı veya sıvı malzemenin buharlaştırılması veya süblimasyonu, b) buhar parçacıklarının (atom molekül veya iyon) kaynaktan altlığa nakli, c) buhar parçacıklarının altlık yüzeyinde yoğunlaşması ve d) yüzeyde yoğunlaşan tabakanın atomlarının yer değiştirmesi, altlık yüzeyiyle kimyasal reaksiyonlar vb. [21].

3.2.4. Sıçratma

“Sputtering” olarak da bilinen sıçratma tekniği enerjik parçacıklarla yüzeyi bombardımana maruz bırakılan bir katı veya sıvı yüzeyinden malzemenin buhar fazına geçirilmesi, bir başka deyişle yüzeyinden malzeme sıçratılmasıdır. Sıçratma ile kaplama, PVD kaplama yöntemleri arasında sıklıkla kullanılan yöntemlerden biridir. Yüzeyin bombardımanında kullanılan parçacıklar genel olarak ağır bir asal gazın iyonlarıdır. Sıçratma ile kaplama yönteminde, vakum ortamında kalma malzemesini yüzeyi yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilerek, atomların yüzeyinden koparılması sağlanır. İyon üretiminde kullanılan kaynak, bir iyon huzmesi ya da ısıtılı boşalma türü bir plazma olabilmektedir. Bombardıman yapılacak malzeme bu ortamın içerisine daldırılarak yapılmaktadır [21].

3.2.5. Plazmayla Parçalama

PVD ve CVD teknikleri arasında bir yere sahip olan plazmayla parçalama yönteminin diğer fiziksel yöntemlerden temel farkı yüzeye kaplanmak istenen bileşenlerin tıpkı kimyasal yöntemler gibi gaz halinde bulunması ve buhar kaynağı veya hedef olarak katı madde içermemesidir. Yöntem, yüksek moleküler bir gaz atmosfer ortamında kararlı bir plazma oluşturulması ve oluşan bu kararlı plazma nedeniyle bu gazın bileşenlerine ve türevlerine parçalanarak altlık yüzeyine yoğunlaşması temeline dayanmaktadır. Yöntemin uygulanma basıncının belirlenmesinde ana kistas serbest gaz parçacıklarının altlık ve kaplama ile çarpışma prosesinin parçacıkların hacimsel çarpışma prosesinden daha etkin olmasıdır [21].

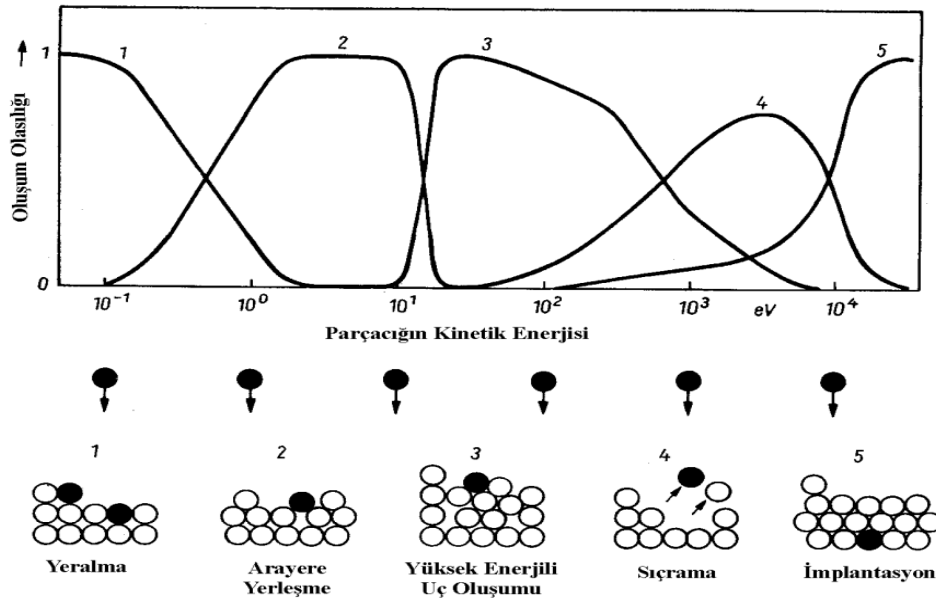
3.3. YOĞUŞMA

3.2.1. Giriş

Buhar fazından katılaştırılan her tür ince kaplamanın mikroyapısı yoğuşma işlemi durumundaki oluşumlara bağlı bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Yoğuşma işlemi iki evreye bölünebilir. Bunlar çekirdeklenme ve tane büyümesi olarak ayrılır. Çekirdeklenme, bir faz dönüşümünde atomların toplanarak yeni fazın çekirdeklerini oluşturması olayı. Literatürde çekirdeklenme aşaması için söz konusu kaplama kalınlığı 2nm olarak verilmektedir [21].

3.2.2. Parçacık Yüzey Etkileşimi

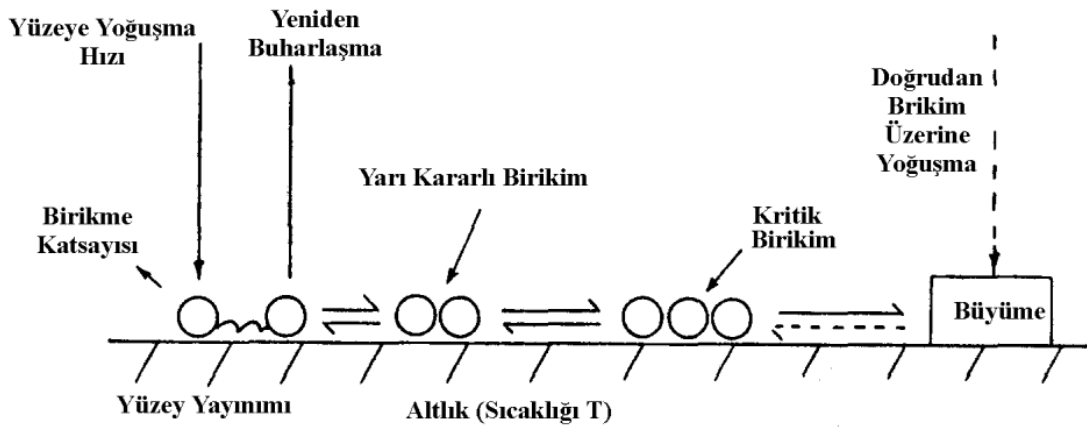
Parçacıkların yüzeye teması halinde yüzeye herhangi bir kimyasal etkileşimin olmadığı durumlarda, yüzey ile parçacık arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkacak oluşumlar parçacığın kinetik enerjisine bağlıdır. Yüzeye çarpan parçacığın enerjisi yükseldikçe açığa çıkacak oluşumların sayısı enerji değerine göre yükselmekte ve aynı anda farklı mekanizmalar harekete geçebilmektedir. Şekil 3.4’de yüzeye çarpan parçacığın enerjisine bağlı olarak ortaya çıkabilecek durumlar ve bunların oluşma olasılıkları gösterilmiştir [23].



Şekil 3.4. Yüzeye çarpan parçacığın enerjisine bağlı olarak ortaya çıkabilecek oluşumların olasılıkları [21].

5.2.3. Çekirdeklenme ve Çekirdek Büyümesi

Yukarıda açıklanan yoğuşma işlemi esnasında yüzeyde meydana gelen ana oluşumlar Şekil 3.5.'de altlık yüzeyinde çıkan oluşumlar olarak gösterilmiştir. Gaz fazdan yüzeye doğru yön alan atomların sayısının az olması durumunda yüzeye adsorbe olan ve yüzeyden ayrılarak gaz faza geri dönen ad-atomların sayıları arasında bir denge oluşabilmektedir. Çok yüksek aşırı doyumluk değerlerinde yüzeydeki yoğuşma hızları o denli büyük olmaktadır ki, kararlı bir çekirdek oluşumu için gerekli kritik çekirdek çapı iki ya da üç atom tarafından sağlanabilmektedir [24].



Şekil 3.5. Altlık yüzeyinde ortaya çıkan oluşumlar [21].

Atomistik çekirdeklenme kuramı açısından difüzyon için gerekli aktivasyon enerjisi, film atomları arasındaki bağ enerjisi ve film-altlık arasındaki bağ enerjisi büyük bir öneme sahiptir. Katı bir yüzeyde yoğuşan bir atom için bu üç bağ enerjisinin birbiriyle etkileşiminin iyi anlaşılması gerekmektedir [25].

3.2.4. Kaplama Büyümesi

Çekirdeklenme ve çekirdek büyümesi evrelerinden sonra kaplamanın büyümesi evresi gelmektedir ki, bu aşama kaplamaların pek çok özelliklerinin belirlendiği bir aşamadır. Yüzeye ulaşan ve burada yoğuşan ad-atomların yaşadığı süreç kaplama büyümesi aşamasında da benzerdir. Kısacası yüzeye varan bir atom, enerjisini yüzeye vererek burada gevşek bir bağla tutunur ve atomsal olarak sakıncalı olan bu durum ileride istenmeyen sorunlar yaratabilir. Ardından bu atom yüzey kafesleriyle ve yüzeye ulaşan diğer parçacıklarla enerji alışverişinde bulunarak yüzeyde dağılma yoluyla hareket eder [21].

3.4. İYON BOMBARDIMANI

3.4.1. Giriş

İyon bombardımanı işleminde ana işlem parametreleri kontrol edilerek atomistik film yoğunlaşma işlemi değiştirilebilmektedir. Bu parametrelerde öncelik olarak (a) altlık malzemenin sıcaklığı, (b) yoğunlaşma hızı, (c) madde akısının yüzeye akış açısı ve (d) yüzeyin enerjik parçacıklarla bombardımanı gelir. Kaplama oluşma aşamaları (a) yüzeyin hazırlanması, (b) ad-atomların yoğunlaşması ve çekirdeklenmesi, (c) ara yüzey oluşumu, (d) kaplama büyümesi ve kimi durumlarda, (e) kaplama sonrası işlemlerden oluşmaktadır [21].

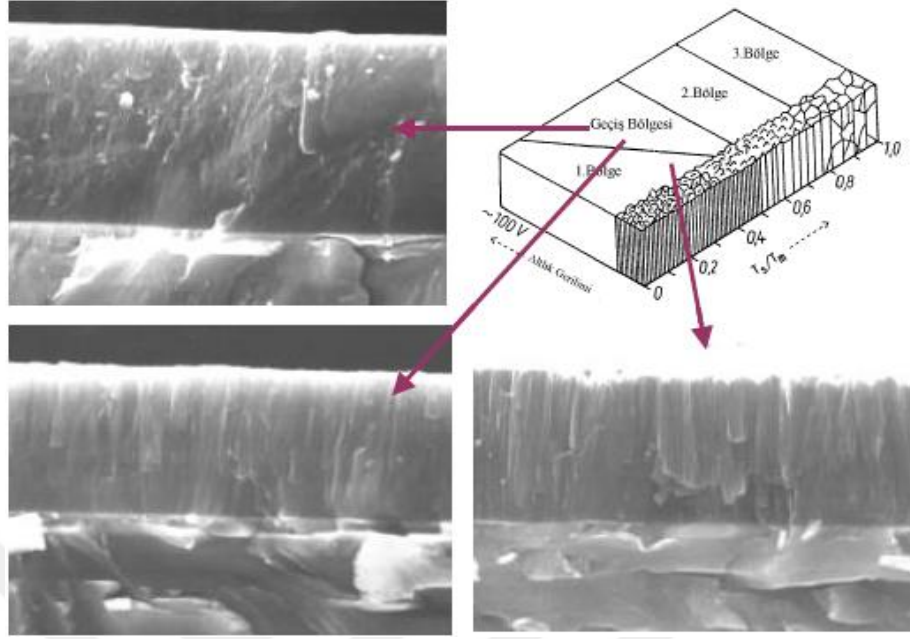
3.4.2. Bombardımanın Yüzey ve Kaplama Bünyesine Etkileri

Altlık yüzeyinin ve büyüyen kaplamanın bombardımanında yararlanılan enerjik parçacıkların fiziksel etkileri parçacık kütlesi, akısı ve enerjisi ile bağlantılıdır. Ayrıca yüzeye yoğunlaşan parçacıklar ve yüzeye yapışmış olan parçacıklar gibi enerjik olmayan parçacıkların da rolleri oldukça önemlidir. Bombardıman sonucu malzeme yüzeyinde bazı oluşumlar meydana gelmektedir. Bu oluşumları açıklayacak olursak; (a) yüzeye zayıf bağlı parçacıkların yüzeyden kopartılarak yeniden ortama geçmesi, (b) yüzeyden ikincil elektron saçılmasıdır. (c) yüksek enerjili parçacıkların enerjik nötraller olarak geri sekmesi, (d) yüzeye çarpan parçacıkların sıçratma yoluyla yüzeyden madde kopartması (fiziksel sıçratma), (e) yüzeyden sıçrayan parçacıkların gaz fazda enerjik parçacıklarla çarpışarak yeniden yüzeye geri dönmesi ve yüzeye tutunmasıdır. (f) ad-atomların yüzeydeki hareketliliklerinin artırılması, (g) ad-atomların yüzeydeki diğer atomlarla kimyasal tepkime yeteneğinin yükseltilmesidir (reaktif kaplama yöntemleri) [21].

3.4.2.1. Kaplama Morfolojisi

Yüzeyde yoğunlaşan tabakaların bombardıman ile geri sıçratılması ve bunların yeniden yüzeye yoğunlaşması, çekirdeklenme yoğunluğunun artması, ad-atomların yüzey hareketliliklerinin artması düşük sıcaklıklarda yapılan yoğunlaştırma işlemlerinde karşılaşılan kolonsu kaplama morfolojisinin bozulması ve yoğunlaştırılması için önemli olabilmektedir. Şekil 3.6.'da Altlık gerilimi sonucu elde edilen iyon bombardımanı ile TiN kaplama morfolojisinin değişimi ve bu morfolojilerin Messier diyagramındaki konumu verilip 300 °C'de yoğunlaştırılan TiN kaplamalarda altlık gerilimi uygulanarak

elde edilen iyon bombardımanı sonucu kaplama morfolojisinin nasıl değiştiği görülmektedir [26].



Şekil 3.6. Altık gerilimi sonucu elde edilen iyon bombardımanı ile TiN kaplama morfolojisinin değişimi ve bu morfolojilerin messier diyagramındaki konumu [21].

3.4.2.2. Kafes Kusurları

Büyümekte olan kaplamaların veya yüzey filmlerinin enerjik parçacıklarla bombardımana maruz bırakılması kafes kusurlarının oluşmasına sebep olabilmektedir. Bu oran atomik olarak %1-20 arasında yer almaktadır. Yüzey ve yüzeye yakın bölgede artan kafes kusuru miktarı ad-atomlar için yeni çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak, çekirdeklenme yoğunluğunu arttırabilmektedir [21].

3.4.2.3. Kristalografik Yönlenme

Enerjik iyon bombardımanı, yoğunlaşmakta olan malzemenin belirli kristalografik doğrultularda yönlenmesine de etki edebilmektedir. Genel olarak düşük sıcaklıklarda yapılan yoğunlaştırma işlemlerinde kaplama kristalleri atom yoğunluğu en yüksek düzlemleri altlık yüzeyine paralel olarak büyümeyi tercih ettiği görülmektedir [27].

3.4.2.4. Kaplama Bünyesi Gaz Sıkışması

Yoğunlaşmakta olan bir yüzey filminin enerjik gaz parçacıklarıyla bombardımana tabi tutulması, bombardımanın etkisiyle enerjik gaz parçacıklarının kaplama içerisine sıkışıp kalması ile sonuçlanacağı bilinmektedir. Kaplama içinde sıkışabilecek gaz miktarı parçacıkların enerjilerine, altlık malzemenin sıcaklığına, kaplama malzemesine ve

bombardımanda kullanılan parçacıkların türüne göre değişim göstermektedir [21].

3.4.2.5. İç Gerilmeler

İç gerilmeler, yoğunlaştırma yoluyla yüzeye biriktirilen tüm kaplamalarda görülmektedir. Altlıkta oluşan zıt işaretli gerilmelerle iç gerilmeler dengelenebilmektedir. Kaplama üzerine etkiyen iç gerilmelerin çeki veya bası şeklinde olması kaplama türü, yoğunlaştırma parametreleri, altlık malzemesi gibi çok sayıda parametreye bağlı olduğu bilinmektedir [21].

3.4.2.6. Yapışma

Yoğunlaştırılan bir kaplamanın altlık yüzeyi üzerindeki performansı kaplama sisteminin maruz kaldığı yükleme koşullarına bağlıdır. Kaplama işlemi öncesi ve yoğunlaştırmanın başlangıç aşamasında yapılan enerjik parçacıklarla bombardıman işlemi kaplamanın altlığa yapışmasını değişik mekanizmaları etkin hale getirerek arttırabilir. Mekanizmaların bazılarını değinecek olursak, yüzey kimyasının değiştirilmesi olsun, ara yüzey boşluklarının azaltılması olsun, yüzey üzerinde istenmeyen tabakaların uzaklaştırılması ve mikroskobik yüzey pürüzlülüğünün arttırılması [21].

3.4.2.7. Sertlik

İyon bombardımanının en önemli etkilerinden biri kaplamanın sertliğindeki artıştır. Genellikle düşük sıcaklıklarda yapılan kaplama işlemlerinde kaplama morfolojisinin 1.Bölge yapısından geçiş bölgesi yapısına ya da 2.Bölge yapısına geçişle birlikte kaplamanın yanal dayancı arttığından sertliğinde artış gözlenmektedir. Ayrıca iyon bombardımanı ile birlikte, tane boyutunun küçülmesi, bazı iç gerilmelerinin yükselmesi ve kaplama içindeki kafes kusurlarının artması gibi nedenlerden dolayı kaplama sertliğinde artış gözlemlenebilmektedir [21].

3.5. SERT KAPLAMALAR

3.5.1. Giriş

Sert kaplamaların üretimi PVD ve CVD tekniklerinin etkisiyle laboratuvar ve endüstriyel ölçekli olarak gerçekleştirildiği bilinmektedir. Uygun bir kaplama yönteminin belirlenmesi fiziksel, kimyasal, teknolojik ve ekonomik çok sayıda parametreye bağlı olarak yapılmaktadır. Kaplamanın kalitesi kaplanacak malzemenin yüzey özelliği ve

kullanım yerine göre kaplanma durumunu değiştirebilmektedir. Kullanılacak kaplama tekniğini, özellikle üretilecek kaplamanın türü ve kaplama / altlık özelliklerine bağlı beklentiler, altlık malzemesinin geometrik şekli ve boyutları, ayrıca kaplama işlemi esnasında oluşacak ısı yüklemeleri gibi etkenler göz önüne alınarak belirlenir. İşlem sıcaklığı açısından, CVD işlemlerinde gerekli reaksiyon oluşumları için yaklaşık 1000 C gibi yüksek çalışma sıcaklıklarına çıkılma zorunluluğu vardır. Bu sıcaklıklar kimyasal oluşumların plazma yardımıyla desteklendiği plazma destekli CVD (PACVD) yöntemlerinde bir miktar aşağılara çekilmiştir. PVD tekniklerinde ise oda sıcaklığı ile yaklaşık 500 C arasındaki sıcaklıklarda kaplama işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Böylece yüksek sıcaklığa karşı hassas malzemeler PVD teknikleri yardımıyla kolayca kaplanabilmektedir. Ayrıca istenildiği durumlarda dışarıdan ısıtma ile daha yüksek çalışma sıcaklıklarının kullanılması da mümkündür fakat bu durum pek tercih edilmemektedir [21].

3.5.2. Sert Malzemelerin Temel Özellikleri

Sertlik, daha sert bir malzemeye göre mukayese edilen bir malzeme özelliğidir. Ayrıca malzemenin plastik deformasyona uğrama direncini gösteren bir özellik olup, teknikte malzemelerin yüzeyinden bastırılan, kendisinden daha sert bir cisme birim alanda karşı koydukları kuvvetle ölçülmektedir. Bir malzemenin sertlik değeri, o malzemenin katı hal fizikinde incelen üç ana ölçekteki özelliklerinin bileşkesi olarak ortaya çıkmaktadır. Bunlar: a)Atomik bağ kuvvetleri ve kristal kafes yapısı, b)Kristal kafes hataları, c)Malzemenin morfolojisi ve tekstürüdür [28].

Çizelge 3.2. Sert malzemelerin gruplandırılması [21].

Bağ Türü	Malzeme Grubu	Sertlik
Metalik Sert Malzemeler	Geçiş Metallerinin Nitrür, Karbür ve Borürleri	Orta ↓ Yüksek
İyonik Sert Malzemeler	Al, Ti, Zr ve Y Oksitleri	
Kovalent Sert Malzemeler	Al, Si ve B Nitrür, Karbür ve Borürleri, Elmas	

Bu üç kavram atomlar arası bağ kuvvetlerine göre malzemeleri gruplandırmak için en yaygın sınıflandırma olarak kullanılabilir. Çizelge 3.2.'de Sert malzemelerin gruplandırılması gibi [28]. Sertlik ölçeği atomların doğasından kaynaklanmakta ve dışarıdan değiştirilmesi diğerlerine göre daha zordur.

Çizelge 3.3. Sert kaplama malzeme özelliklerindeki genel eğilimler [21].

	Sertlik	Gevreklik	Ergime Sıcaklığı	Kararlılık	Isıl Genleşme	Metallere Yapışma
Yüksek	k	İ	m	i	i	m
↓	m	k	k	m	m	i
Düşük	i	m	i	k	k	k
m: Metalik, i: İyonik, k: Kovalent						

Çizelge 3.3'de Sert kaplama malzeme özelliklerindeki genel eğilimler verilmiştir. Bu değişimler sert malzemeleri sert bir yüzey kaplama olarak kullanımına, kırılma tokluğu ve altlığa göre ısı genleşme katsayısı gibi özellikler de önem kazanmaktadır [21].

Çizelge 3.4. Metalik sert malzemelerin fiziksel özellikleri [21].

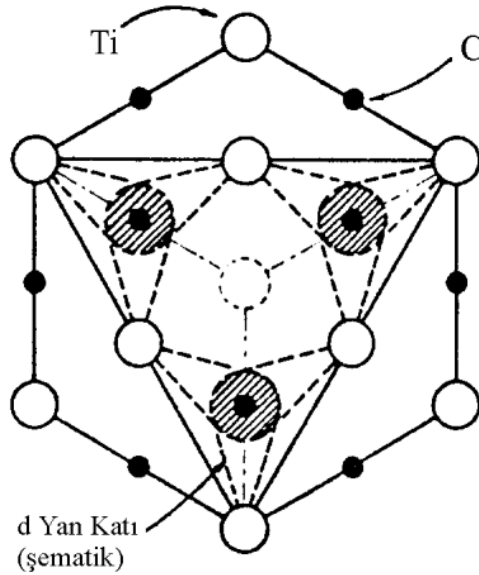
Malzeme	Yoğunluk (g cm ⁻³)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Vickers Sertlik (HV)	Elastiklik Modülü (GPa)	Özgül Elk. Direnci (μΩ cm)	Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Isıl İletkenlik (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
TiB ₂	4,50	3225	3000	560	7	7,8	26 - 39
TiC	4,93	3067	2800	470	52	8 - 8,6	21
TiN	5,40	2950	2100	590	25	9,4	30
ZrB ₂	6,11	3245	2300	540	6	5,9	23
ZrC	6,63	3445	2560	400	42	7,0 - 7,4	42
ZrN	7,32	2982	1600	510	21	7,2	28
VB ₂	5,05	2747	2150	510	13	7,6	-
VC	5,41	2648	2900	430	59	7,3	39
VN	6,11	2177	1560	460	85	9,2	11,3
NbB ₂	6,98	3036	2600	630	12	8,0	-
NbC	7,78	3613	1800	580	19	7,2	18
NbN	8,43	2204	1400	480	58	10,1	3,8
TaB ₂	12,58	3037	2100	680	14	8,2	10,9
TaC	14,48	3985	1550	560	15	7,1	22
CrB ₂	5,58	2188	2250	540	18	10,5	-
Cr ₃ C ₂	6,68	1810	2150	400	75	11,7	19
CrN	6,12	1050	1100	400	640	2,3	11,7
Mo ₂ B ₅	7,45	2140	2350	670	18	8,6	-
Mo ₂ C	9,18	2517	1660	540	57	7,8 - 9,3	-
W ₂ B ₅	13,03	2365	2700	770	19	7,8	-
WC	15,72	2776	2350	720	17	3,8 - 3,9	120
LaB ₆	4,73	2770	2530	400	15	6,4	-

3.5.2.1. Metalik Sert Malzemeler

Çizelge 3.4.' de önemli metalik sert malzemelerin genel özellikleri listelenmiştir. Bu listedeki sert malzemeler metallere özgü yüksek elektrik ve ısı iletkenlikleri, mevcut fazların geniş aralıklarda homojenlik göstermesi ve ısı direnç katsayılarının pozitif olması gibi nedenlerden dolayı intermetalik fazlar olarak değerlendirilmektedir. Metal ve metal dışı bileşenlerinin atom çapları arasındaki oranın Hagg kuralı olarak bilinen $0,41 < r_x/r_{me} < 0,59$ sınırları arasında kaldığı bağlantılar NaCl türü olarak bilinen yığılmalı bir kafes yapısı oluştururlar. Düşük stokiyometriye sahip bağlantılarda kafes yapısı içinde metal dışı atom tarafından doldurulması gereken yerler boş kalmaktadır. Buna karşılık tam bir doluluk da sağlanması mümkün olmayabilir; örneğin titanyum karbürün faz sınırı $TiC_{0,98}$ bileşimidir [29]. Çizelge 3.5.'de metaller ve bunların oluşturdukları sert metallerin kristal yapıları özetlenmektedir [30].

NaCl türü kafes yapısına sahip olan karbür ve nitrürlerin yüksek mekanik özelliklere sahip olmasındaki en önemli unsur kafes yapılarındaki atom dizilimidir. NaCl türü Kübik yüzey merkezli (KYM) kafes yapısına sahip TiC kafesi yukarıda da söz edildiği gibi iç içe geçmiş yüzey merkezli ayrı-ayrı Ti ve C kafesleri görünümüne sahiptir [31].

Şekil 3.7'de KYM TiC kafesinde atomların yerleri gösterilmektedir. KYM TiC yapısı incelendiğinde titanyum atomlarının d yan katlarının KYM titanyum kafesi içindeki oktaedrik boşluklara geldiği görülecektir ki, TiC kafesi içinde bu boşluklarda karbon atomları yer aldığı görülmektedir [21].



Şekil 3.7. KYM TiC kafesinde atomların yerleri [21].

Çizelge 3.5. Çeşitli metal ve sert metallerin kafes yapıları ve atom dizilimleri [21].

Metal ya da Sert Metal	Kafes Yapısı	Atom Dizilimi
Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W	Kübik Hacim Merkezli	W Türü
V ₂ C, Nb ₂ C, TaC, Nb ₂ N, Ta ₂ N, Mo ₂ C, W ₂ C	Basit Hekzagonal	W ₂ C Türü
TiC, ZrC, HfC, VC, NbC, TaC, TiN, ZrN, VN, Mo ₂ N, W ₂ N, HfN	Kübik Yüzey Merkezli	NaCl Türü
WC, NbN	Basit Hekzagonal	WC Türü
TiB ₂ , ZrB ₂	Basit Hekzagonal	AlB ₂ Türü
MoSi ₂ , WSi ₂	Hacim Merkezli Tetagonal	MoSi ₂ Türü
TiSi ₂	Ortorombik	TiSi ₂ Türü
LaB ₆	Basit Küp	CaB ₆ Türü

Çizelge 3.5' de görüldüğü gibi son derece sert malzeme olan volfram karbür (WC) basit hekzagonal kafes yapısında bir dizilim göstermekte ve oldukça yüksek elastik modülüne sahiptir. Bu karbürün kübik karbürlerle olan yakınlığı yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlarda WC_{1-x} kübik yapılı bir faza sahip olmasıdır [21].

3.5.2.2. Metalik Olmayan Sert Malzemeler

Metalik olmayan sert malzemelerde atomlar arası karma bir bağ kuvveti oluşmaktadır. Saf kovalent bağa sahip olan bu malzemeler iyonik bağ oranı ile tam iyonik bağ karakterine sahip Al₂O₃'e kadar uzanan bir yelpazede yer almaktadır. Metalik bağ karakterleri az olan bu malzemelerde elektrik iletkenliği bulunmamaktadır. Fakat bu malzemelerdeki bazı bileşimlerde negatif özgül elektrik direnci katsayısı gibi yarı iletkenlere özgü davranışlar göstermektedir. Bunlara örnek verecek olursak SiC gibi. Bu ve bunun gibi bileşiklerin haricindekilerin tamamı yalıtkan malzemedir. Çizelge 3.6' da Kovalent sert malzemelerin fiziksel özellikleri verilmiştir. Ayrıca Çizelge 3.7' de İyonik sert malzemelerin fiziksel özellikleri verilerek özetlenmiştir. Bu malzemelerin önemli bir özelliği yükselen sıcaklıkla birlikte sertlik değerlerinde metalik sert malzemelerinkinin (özellikle de kübik malzemelerinkinin) aksine yavaş bir azalma görülmesidir [21].

Çizelge 3.6. Kovalent sert malzemelerin fiziksel özellikleri [21].

Malzeme	Yoğunluk (g cm ⁻³)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Sertlik (HV)	Elastiklik Modülü (GPa)	Özgül Elk. Direnci (μΩ cm)	Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Isıl İletkenlik (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
B4C	2,52	2450	3000-4000	441	0,5.10 ⁶	4,5 (5,6)	28
Küb. BN	3,48	2730	~5000	660	10 ¹⁸	2,5-4,7	42
Elmas	3,52	3800	~8000	910	10 ²⁰	1,0	1500
B	2,34	2100	2700	490	10 ¹²	8,3	-
AlB ₁₂	2,58	2150	2600	430	2.10 ¹²	-	-
SiC	3,22	2760	2600	480	10 ⁵	5,3	155
SiB ₆	2,43	1900	2300	330	10 ⁷	5,4	-
Si ₃ N ₄	3,19	1900	1720	210	10 ¹⁸	2,5	20
AlN	3,26	2250	1230	350	10 ¹⁵	5,7	165

Sert malzemeler olarak silisyum ve sonraki elementler (Ge, Sn) kabul edilmemektedir. Bu elementler yüksek koordinasyon sayılarında kristalleştiklerinden metalik karaktere sahiptirler. Yüksek koordinasyon sayılarında kristalleştiklerinden dolayı sertlik değerleri düşüktür [21].

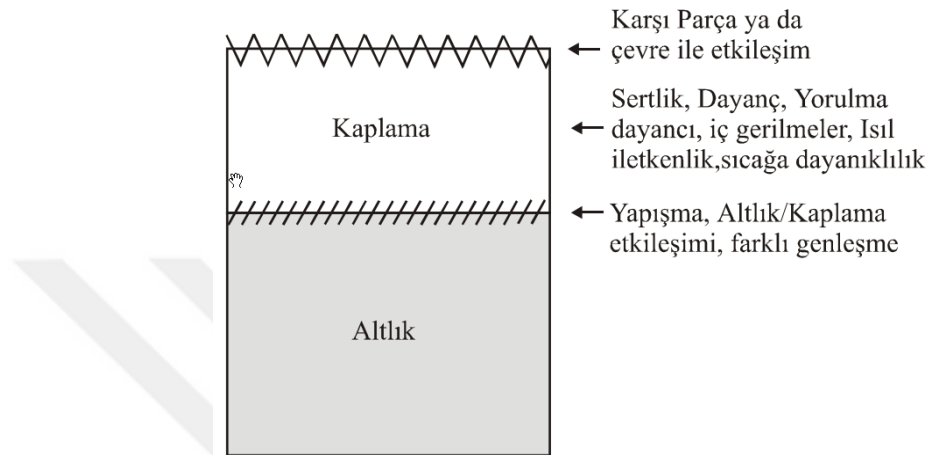
Çizelge 3.7. İyonik sert malzemelerin fiziksel özellikleri [21].

Malzeme	Yoğunluk (g cm ⁻³)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Sertlik (HV)	Elastiklik Modülü (GPa)	Özgül Elk. Direnci (μΩ cm)	Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Isıl İletkenlik (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Al ₂ O ₃	3,58	2047	2100	400	10 ²⁰	7,2 - 8,6	27 - 36
Al ₂ TiO ₅	3,68	1894	-	13	10 ¹⁶	0,8	-
TiO ₂	4,25	1894	1100	205	-	9,0	8,8
ZrO ₂	5,76	2677	1200	190	10 ¹⁴	11	7,5
HfO ₂	10,2	2900	780	-	-	6,5	-
ThO ₂	10,0	3300	950	240	10 ¹⁶	9,3	-
BeO	3,03	2550	1500	390	10 ²³	9,0	220
MgO	3,77	2827	750	320	10 ¹²	13,0	36

Malzemenin sertliğine etki başka özelliklerde vardır. Bu özellikler, yapıda yarı kararlı fazların bulunması, tane boyutu, tane sınırı dayancı ve kalıntıların dağılımı gibi mikroyapı bağlantılı özellikler olarak arttırılabilir. Sertliği belirleyici bu etmenlerin malzemenin genel sertliğindeki katkı payı malzeme türüne ve ilgili sıcaklığa bağlıdır [21].

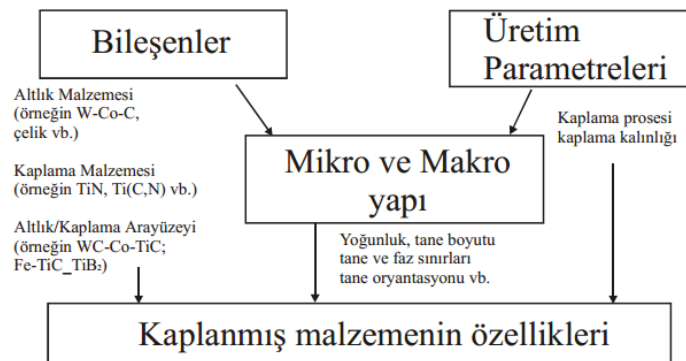
Farklı özelliklere sahip malzemelerden iyi bir şekilde yararlanılması için, malzemeden istenilen özelliklerin iyi bilinmesine bağlıdır. Farklı özellikleri aynı anda taşıyan bir sistemi tasarlamak oldukça zor ve karmaşıktır. Şekil 3.8. bu durumu daha anlaşılır şekilde göstermektedir. Şekilde Altlık / Kaplama kompoziti için bazı önemli kıstaslar şematik olarak verilmektedir [25]. Farklı özellikler üç farklı bölgede görülebilir;

Farklı özelliklere sahip malzemelerden iyi bir şekilde yararlanılması için, malzemeden istenilen özelliklerin iyi bilinmesine bağlıdır. Farklı özellikleri aynı anda taşıyan bir sistemi tasarlamak oldukça zor ve karmaşıktır. Şekil 3.8. bu durumu daha anlaşılır şekilde göstermektedir. Şekilde Altlık / Kaplama kompoziti için bazı önemli kıstaslar şematik olarak verilmektedir [25]. Farklı özellikler üç farklı bölgede görülebilir;



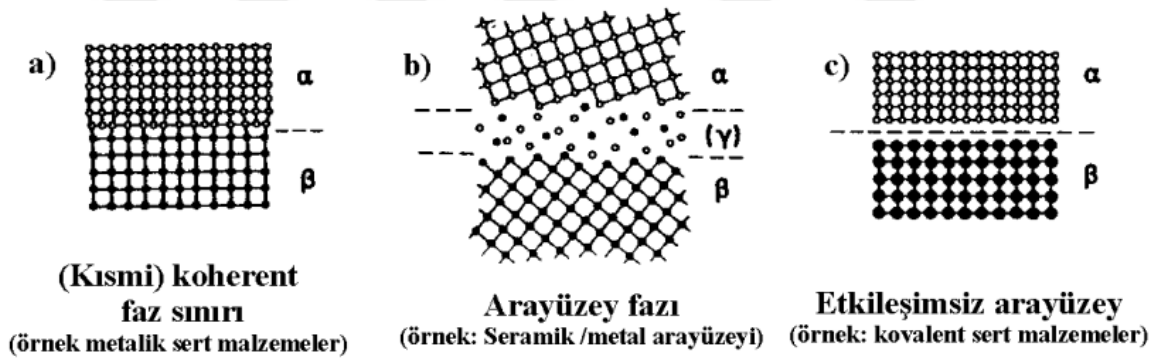
Şekil 3.8. Altlık / kaplama kompozitinin seçimi için önemli kıstaslar [21].

(1) Altlık / Kaplama Ara Yüzeyi: Bu bölgede olan ağırlıklı olaylar yapışma, farklı ısıl genleşme sonucu ortaya çıkan gerilmeler ve etkileşimler kendini göstermektedir. (2) Kaplama Malzemesi: Kaplamanın sertliği, dayancı, yorulma dayancı ve tokluğu, ısıl kararlılığı, iletkenlikle ilgili karakteristik özellikleri bu bölgeyle bağlantılıdır. (3) Kaplama Yüzeyi: Sürtünme katsayısı gibi karşı parçayla etkileşim, yüzey pürüzlülüğü, çevre koşullarına dayanıklılık gibi özellikler bu bölgeyle bağlantılı özelliklerdir. Ayrıca ana malzemeyi koruyan bu bölge korozyon ve aşırı sürtünmelerden oluşa aşınma ve darbe dayanımlarını karşılayan bölgedir. Şekil 3.8'de bu bölgeler sırası ile görülmektedir [21].



Şekil 3.9. Kaplanmış malzemenin özelliklerini belirleyen temel etmenler [21].

Şekil 3.9' da Kaplanmış malzemelerin özelliklerini belirleyen temel etmenler verilmiştir. Herhangi bir kaplama malzemesinin seçiminde karşılaşılabilecek temel sorun kaplamadan beklenen tüm özelliklerin tek bir malzeme tarafından sağlanamayacak olmasıdır. Zaten çoğu zaman kaplamadan beklenen özellikler birbiriyle zıt olan özellikler olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin altlığa iyi yapışma özelliği gösteren bir sert malzeme aynı zamanda çevreye karşı zayıf bir kimyasal kararlılık gösterme eğilimindedir. Ya da yüksek sertliğe sahip olan kaplama aynı derecede daha kırılabilir olmaktadır. Altlık malzemenin kaplama öncesi çok iyi bir şekilde kaplamaya hazırlanmış olması gerekmektedir. İstenilen özelliklerden önce buna dikkat edilmesi önemlidir. Daha sonra ne isteniyorsa ona göre bir kaplama seçilip altlık ile uyumu göz önünde bulundurularak kaplamanın istenilen özelliklerde olması sorgulanır. Kütlesel malzemelerde malzeme dokusunun değiştirilmesiyle malzemenin özelliklerinde değişiklikler ortaya çıktığı bilinmekte olup, bu alan malzeme bilimcilerin temel uğraşı alanı olmaktadır. Şekil 3.10' da Kaplamalarda ortaya çıkan üç ana ara yüzey türü verilmiştir. Buradan da görüldüğü üzere farklı bağ kurabilecek atomların ve farklılık gösterecek fazların kaplama katmanlarını etkilemektedir [21].



Şekil 3.10. Kaplamalarda ortaya çıkan üç ana ara yüzey türü [21].

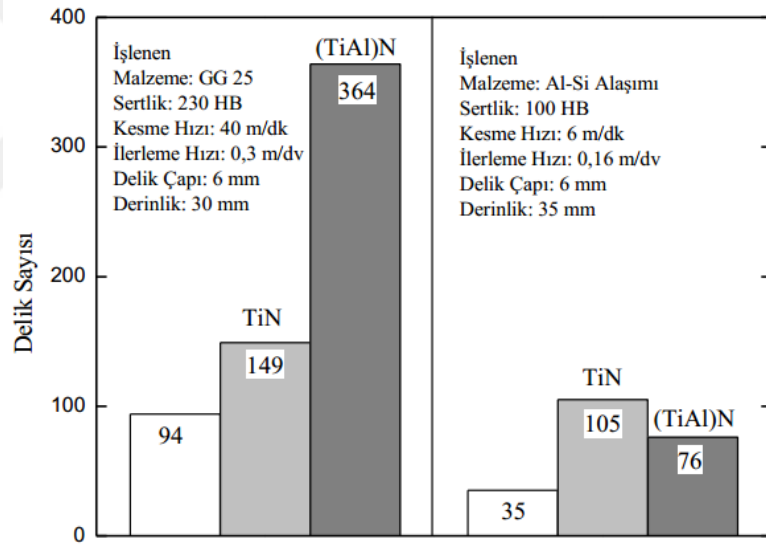
3.5.4. Sert Kaplamaların Uygulama Alanları

Başta tribolojik uygulamalar olmak üzere sürtünme, aşınma, erozyon, kavitasyonu ve korozyon direncini azaltmak için sıklıkla kullanılan kaplama türü sert kaplamalardır. Sertliğinin yanı sıra dekoratif amaçlı olarak kullanılabilen kaplamalar pek çok renk seçenekleriyle kaplama alanında önemli bir yer edinmiştir. Korozyon direncinin, kimyasal kararlılıklarının yükselmesi istenilen durumlarda ve biyomedikal uygulamalar için bu kaplamaları çekici kılmaktadır. Ayrıca kararlı kafes yapıları nedeniyle de pek çok alanda difüzyona karşı bir bariyer olarak kullanılmaktadırlar. Sert

kaplamaların bazı kullanım alanları aşağıda açıklanmıştır [21].

3.5.4.1. Kesici Takımlar

1960'lı yıllarla birlikte yeni alaşımlar yeni malzemeler sanayide makine elemanı imalatında kullanıma girmiştir. Bu malzemelerin yüksek dayanım özelliklerinin yanında, kesileni aşındırma ve onlarla kimyasal reaksiyona girme özellikleri de hayli yüksektir. Bu malzemelerin işlenmesinde karşılaşılabilecek güçlüklerin yenilebilmesi için, kaplanmış kesiciler geliştirilmiştir. Aşınma direncindeki iyileşmeler aşınma miktarı ve aşınma hızındaki düşüşlerle, örneğin delinen delik sayısı, toplam kesme yolu, üretilen parça sayısı, takım bileme süresi gibi malzeme ve işleme koşullarını kapsamayan kavramlarla ölçülmektedir. Ancak aşınmanın Parça / Takım malzemelerine ve işleme koşullarına bağlı (kesme hızı, paso, soğutma yağlama vb.) bir sistem özelliği olduğunu da unutmamak gerekmektedir. Şekil 3.11'de TiN ve (Ti, Al)N kaplanmış matkapların farklı koşullarda çalışma başarıları gösterilmektedir [32].

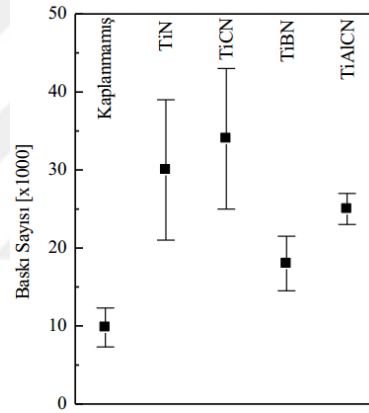


Şekil 3.11. Dökme demir ve Al-Si alaşımlarının delinmesinde kullanılan takımlarda kaplamayla ömür artışı [21].

3.5.4.2. Diğer Takımlar

Takım sadece oda sıcaklığında değil, çalışma sıcaklıklarında da iş parçasının en sert bileşeninden daha sert olmalıdır. Takım geometrisinin bozulmasını önleyen yüksek sertlik, talaş oluşum sırasındaki ağır şartlar altında muhafaza edilmeli ve hatta aşınma direncine yardımcı olmalıdır. Kesme işleminde mekanik şoklara (darbelere karşı) dayanmak için yüksek tokluk özelliğine sahip olmalıdır. Kesme işlemlerinde hızlı ısınma ve soğumalar meydana geldiği için yüksek termal şok direncine karşı dayanıklı

olmalıdır. Takımların sert kaplamalarla kaplanması diğer kaplanmamış takımlara göre yüksek sertlik değerlerine sahip olmaları ve pek çok parçaya karşı düşük sürtünme katsayısından dolayı avantajlı hale gelmektedir. Bunlara örnek olarak dövme kalıplarının kaplanması ve derin çekme ıstampalarının kaplanması verilebilir. Takım malzemeleri çoğunlukla kayma sürtünmesi koşullarına maruz kalmakta ve adhesiv, abrasiv ve erozyon tarzı aşınma mekanizmaları ortaya çıkmaktadır. Kaplamaların türlerinin başarısı uygulama koşulları ve malzeme türlerine bağlı olmakla birlikte kesme zımbalarında ve alüminyumun darbeli ekstrüzyonunda genel olarak TiN ve Ti(CN) türü kaplamalar kullanılmakta, alüminyumun basınçlı döküm kalıplarında ise CrN ve yine TiN türü kaplamalar tercih edilmektedir. Şekil 3.12.'de Alüminyumun basınçlı döküm maçalarında kaplama kullanılmasıyla elde edilen ömür taşı verilmektedir. Alüminyum dökümünde kullanılan H13 sıcak iş takım çeliğinden maçaların farklı tür kaplamalarla ömürlerinde meydana gelen artışlar gösterilmiştir [33].



Şekil 3.12. Alüminyumun basınçlı döküm maçalarında kaplama kullanılmasıyla elde edilen ömür artışı [21].

3.5.4.3. Makine Elemanları

Özellikle karşılıklı çalışan yani birbirine temas halinde olan makine parçalarının yüzeylerine aşınmadan oluşan malzeme kaybı olduğu apaçık bir şekilde bilinmektedir. Ve makine parçalarında aşınmanın önemi büyüktür. Çalışan makine parçalarının hatta temas halinde çalışmadan duran makine parçalarının bile az da olsa aşındığı bilinmektedir. Aşınmada farklı yöntemle bilinmektedir. Bunlar; adhezyon, abrazyon ve kaviteasyondur. Ayrıca korozyon, erozyon ve kaviteasyon da bu oluşumlara eşlik edebilmekte ve malzeme mekanik ve kimyasal etkilerin karşılıklı etkileşimde bulunduğu koşullarda kalabilmektedir. Aşınma durumunu etkileyen bir değişken ise parçaların yüzey nitelikleridir. Aşınmadan etkilenen bazı makine parçalarına örnek

verecek olursak, piston ve silindirler, kamlar, vida ve dokuma sanayiinde kullanılan iplik kılavuzları, turboşarj piston milleri ve kaymalı yataklar v.b. olarak örnek gösterilebilir [21].

3.5.4.4. Erozyon ve Korozyon

Sert kaplamaların korozyon direnci altlık malzemeye kıyasla yüksektir. Ancak fiziksel buhar yoğunlaşmasıyla elde edilen kaplamalar yoğun kaplama morfolojilerine sahip olsalar dahi mikro çatlaklar içermekte ve bu çatlaklar sert kaplamaların korozyon dirençlerini düşürmektedirler. Bazı araştırmalarda bu kılcal boşlukların yağı içerisinde tutarak sürtünmeyi azaltmaya desteğinin olduğu düşünülmektedir [34].

3.5.4.5. Dekoratif Kaplamalar

Sert kaplamalar daha çok mühendislik amaçlı kullanılırken dekoratif kaplamalar ise daha basit malzemeleri kaplanmasında kullanılmaktadır. Sert kaplamanın değişik renk kombinasyonlarının oluşu dekoratif amaçlı olarak kullanılmasında sağlamıştır. Farklı renk seçeneklerinin yanı sıra, aşınma ve korozyon dirençleri çok iyidir. Örnek olarak, elbise düğmeleri, bileklikler, merdiven korkulukları, sandalyeler ve metal masalar gibi çok bir yelpazeye sahiptir. Çizelge 3.8.'de bazı yaygın sert malzemelerin renkleri kullanılan metal dışı bileşene göre ve diğer katkılara bağlı olarak verilmiştir [28].

Çizelge 3.8. Dekoratif sert kaplamaların renkleri [21].

Sert Kaplama Türü	Renk
TiNX	Parlak sarı – altın - kahverengimsi sarı
ZrN, VN, V(C,N)	Parlak sarı
Zr(C,N)	Kırmızımsı mor
(Ti,Zr)N	Altın tonları
TaC	Kahverengimsi altın
CrNX	Metalik
TiCX	Gri-koyu gri
(Ti, Al)NX	Sarımsı kahverengi-grimsi mor- grimsi mavi koyu mavi

3.6. METALİK KAPLAMALAR

Metalik kaplamalar, üzerinde kapladıkları metali ortamın etkisinden iki ayrı şekilde korurlar: a) Kaplama metali ortama daha dayanıklıdır. b) Kaplama metali alt metale tercihli olarak çözünür ve kendisini aşındırıp harcayarak alt metali korur.

Metal ve alaşımların yüzeyini korozyona dayanımlı hale getirmenin en sık başvurulan

yöntemlerinden biri ikinci bir metalle kaplamadır. Elektrokimyasal olarak metal kaplamaları (a) soy kaplamalar ve (b) aktif kaplamalar olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Uygulamada metalik kaplamalar yalnız korozyondan korunma amacı ile yapılmış olsalar bile diğer önemli bazı amaçlara da hizmet ederler. Bunlar; dekoratif görünüşü çekici kırlarlar, yüzeye değişik özellikler kazandırırılar sertlik, elektriksel iletkenlik olarak sıralanabilir. Ayrıca yüzeyin bazı bölümlerini bir başka yüzey işlem sırasında maskeler. Kaplama boşluk veya çatlak türünden hatalar içerirse korozyonun o noktalarda yerleşmesi ve metalin kaplama altında korozyona uğraması engellenemez. Aktif kaplamaların koruma yeteneği içerdikleri hatalardan etkilenmez. Çünkü kaplamanın sağladığı koruma temelde katodik korumadır. Metal korunacağı yerde hızlı bir şekilde bölgesel tahribata uğrarsa, bu tip kaplamalara kaplamanın davranışına katodik kaplama da denir [35].

Metalik kaplama yöntemlerini sıralayacak olursak;

3.6.1. Sıcak Daldırma

En yaygın, en ucuz metal kaplama yöntemlerinde olan sıcak daldırma özellikle çeliğe, çinko, alüminyum, kurşun, bakıra kalay kaplamada kullanılır. Sıcak daldırma bilinen en eski ve en yaygın olan kaplama yöntemidir. Kaplama malzemesi olarak ergime sıcaklığı düşük olan metaller (çinko, kalay, kurşun, alüminyum) öncelikle kullanım bulurlar. Galvanizli demir düşük karbonlu çelik sacın 450 °C' de ergimiş çinko banyosuna daldırılmasıyla üretilmektedir. Ergime sıcaklığı nispeten düşük olan metallerin kaplanmasında uygulanır. Galvaniz kaplamanın ömrü çinko tabakasının kalınlığına ve çevre koşullarına göre değişmektedir. Oksijen varlığı ile çinko hidroksit koruyucu bir tabaka şeklinde çökmektedir [36].

Sıcak daldırma ile elde edilen çinko kaplamaların kalınlığı ortalama 50µm 'den daha fazladır. Çinko kaplı çelik (galvaniz çelik) deniz suyu gibi iletkenliği yüksek ortamlarda 10 başarı ile kullanılır. Ancak iletkenliği sınırlı normal sularda çinkonun sağlayacağı katodik koruma küçük mesafeleri kapsadığından kaplamanın boşluksuz bir yapıya sahip olması önem taşır. Genelde metal kaplamalar yumuşaktır, kaplama sırasında metalin yüksek sıcaklığa maruz kalması mukavemetin azalmasına da neden olabilirler [37].

3.6.2. Sıcak Püskürtme

Özel alaşımlı tozların kaplama uygulamasından sonra özel yöntemlerle ısıtılarak yapılan kaplamanın, ana metalle eritilerek birleştirme uygulamasıdır. Başta çinko ve alüminyum

olmak üzere kurşun, kalay, bakır, paslanmaz çelik bu yöntemle kaplanır. Tel ve toz püskürtme olarak tanınan sıcak püskürtme yöntemi öncelikle ergime sıcaklığı düşük metaller (çinko ve alüminyum) uygulanır. Sıcak püskürtme tekniği karmaşık şekilli parçaların kaplanması ve yer-yer bozulan kaplamanın onarımına özellikle uygundur. Metal kaplamadan önce özellikle büyük konstrüksiyonların kum temizlenmesi, çelik yüzeylerine basma gerilimi oluşturarak gerilimli korozyonu veya korozyonlu yorulma tehlikesini ortadan kaldırmış olur. Yüksek ergime sıcaklığının getirdiği zorluklara karşın, paslanmaz krom-nikel çeliklerden sıcak püskürtme yolu ile yapılan kaplamalar sık kullanılır. Çok yüksek olan boşluk oranını alüminyum püskürterek azaltmak mümkündür. Alüminyumla doldurmanın önemli yararı kaplamaya 800°C'ye kadar ileri bir oksidasyon dayancı sağlamasıdır [37].

3.6.3. Difüzyonla Kaplama

Korunacak metalin ikinci bir metalle alaşımlayarak korozyon ve özellikle oksidasyon dayancını arttırmak amacına yöneliktir. Kaplanacak malzemelerin kaplayıcı metali toz halinde içeren uygun bir karışım içine hava girişine izin vermeyecek şekilde yataklanır. Üst yüzeyin alaşımlanması katı hal difüzyonu ile gerçekleştiğinden sistemin kaplayıcı metalin ergime sıcaklığına yakın ısıtılması gerekir. Kaplama doğal olarak sıcaklık ve ısıtma süresine bağlıdır. Sıcaklık ve ısıtma süresi değişkenlik göstermemesine dikkat edilmelidir. En yaygın olan difüzyon kaplamalar çinkolama, kromlama ve alüminyum kaplamalardır [37].

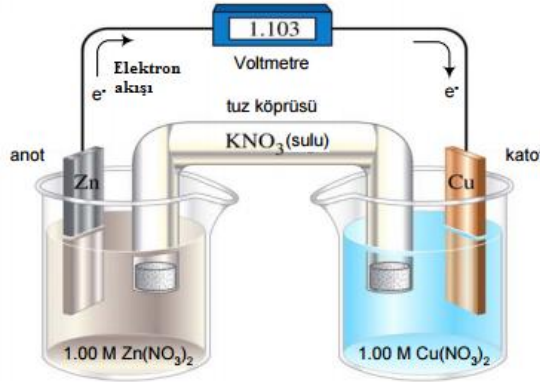
3.6.4. Akımsız Kaplama

Metalik kaplamalar akımlı ve akımsız olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu iki farklı kaplamayı etkileyen özelliklerden biri altlık malzemesinin geometrik durumudur. Farklı geometrik yüzeylere sahip parçalarda tercih edilen akımsız kaplama homojen bir kaplama sunması nedeniyle tercih edilmektedir. Akımsız kaplama, elektrik akımı kullanılmadan metal atomlarının oto katalitik kimyasal indirgenme yöntemi ile elde edilerek taban metal yüzeyine kaplama tekniğidir. Akımsız kaplamalar bir güç kaynağına ihtiyaç duymaması ve altlık malzemesi olarak metal olma zorunluluğu bulunmaması dışında elektrolitik kaplamalara oldukça benzerdir. Akımsız metal kaplamalar içerisinde nikel kaplamalar en önemli yeri tutar, altın, kalay, bakır kaplamalar da ticari olarak yapılmaktadır. Nikel saf olarak veya bor, fosfor ve tantal ile alaşımlı olarak aşınma ve korozyon dayanımını arttırmak amacıyla kaplanmaktadır [38].

Akımsız nikel kaplamada sürekli kullanılan asit hipofosfit banyosudur. Çok iyi bir homojen kaplama sunar. Nikel sülfat, sodyum hipofosfit ve katkı maddeleri içermektedir. Çözeltinin pH'ı 4.6 ve sıcaklığı 82-84°C'dir. Kaplamanın sertliği 500-600 VHN olmakla beraber 450°C'de ısıtma işlemi ile amorf Ni-P'nin kristalleşmesiyle 950 VHN'ye çıkmaktadır [39].

3.6.5. Elektrokimyasal Hücreler

Bir elektrokimyasal hücre Şekil 3.13'de görüldüğü üzere, her biri bir elektrolit çözeltisine daldırılmış elektrotlar içerir. Sıvı içerisinde daldırılmış bu elektrotlar, indirgenme reaksiyonu elektrot olarak katotta olurken, yükseltgenme anotta olur. Akım anottan katoda doğru hareket eder. Çözelti içerisinde indirgenecek tür bulunmadığında katotta H₂ oluşurken, yükseltgenecek tür bulunmadığında anotta O₂ oluşur. Reaktifler arası doğrudan reaksiyonu engellemek için önceki çalışmalarda hücreler arasına, içerisinde doygun tuz çözeltisi olan bir tuz köprüsü konulur [35].



Şekil 3.13. Elektrokimyasal bir hücrenin şematik görünümü [40].

Şekil 3.13' de Elektrokimyasal bir hücrenin şematik görünümü verilmektedir. Hücreler galvanik ya da elektrolitiktir. Galvanik hücreler elektrik enerjisini (kendiliğinden) depolayan pillerdir. Bir elektrolitik hücrenin çalışması için dışarıdan elektrik enerjisi verilmesi gereklidir. Bu elektriğinde redresör yardımıyla kontrol altında verilmesi kaplama için etken bir husus olmaktadır [35].

Zn anot, Cu katot olduğunda hücre kendiliğinden yürürken (galvanik), Zn katot, Cu anot olduğunda hücrenin çalışması için dışarıdan elektrik enerjisi verilir. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi dışarıdan redresör yardımıyla verilen elektrikle elektrolitik kaplama işlemi başlamaktadır [21].

Hücre diyagramı: $\text{Zn (k)} \mid \text{Zn}^{+2} (\text{sulu}) \parallel \text{Cu}^{+2} (\text{sulu}) \mid \text{Cu (k)}$

Anottaki reaksiyon: $\text{Zn (k)} \longleftrightarrow \text{Zn}^{+2} + 2\text{e}^-$

Katottaki reaksiyon: $\text{Cu}^{+2} + 2\text{e}^- \longleftrightarrow \text{Cu (k)}$

Toplam reaksiyon: $\text{Zn (k)} + \text{Cu}^{+2}(\text{sulu}) \longleftrightarrow \text{Zn}^{+2}(\text{sulu}) + \text{Cu (k)}$ $E_{\text{hücre}}=1.103 \text{ V}$

Elektrolitik kaplama işleminde dışarıdan alınan elektrik, bir galvanik hücrenin çeşitli kısımlarında gerçekleşen üç ayrı işlem sonunda iletilir. a.) Elektronların hareketi; elektronlar çinko, çinko-bakır iletken bağlantı maddesi ve bakır metali yönünde hareket ederek bakır elektrotuna doğru akım halindedirler. b.) İki çözelti arasındaki iyon göçü; katyonlar çinko elektrotundan bakıra, anyonlar da bakır elektrotundan çinkoya doğru göç ettiği bilinmektedir. Çözeltilerdeki tüm iyonlar bu elektroliz taşınımına katkı sağlamaktadır. c.) Üçüncüsü ise iki elektrotun yüzeyinde oluşan yükseltgenme veya indirgenme reaksiyonudur. Böylece hazırlanan ortamla, elektrotun elektron akımı ile çözeltinin iyonik gücü arasında bağlantı kurularak bir akım elde edilmesi için gerekli devre tamamlanmış olur ve kaplama işlemi başlamış olur [40].

4. ELEKTROLİTİK KROM KAPLAMA UYGULAMALARI

4.1 GİRİŞ

Elektrolitik yolla metal kaplamacılığı 1843 yılında başlamış ve R. Boettger ilk nikel kaplamayı yapmıştır. Banyo ترکیبی nikel sülfat ve amonyum sülfat olmuştur. 1849' da ilk olarak ticari anlamda nikel kaplamacılığı başlamıştır. Zaman ilerledikçe ve kaplama üzerinde çalışıldıkça yeni terkipler geliştirilmiştir. Karbonlu anotlar kullanılmaya başlanmıştır. 1912' de İngiltere' de ilk parlatici kullanılmıştır. 1915' ten sonra gelişmeler hızla artmış ve Watt's ve De Verter özellikle kaplamanın kalite kontrolü üzerinde durmuşlardır. 1935' te Thompson pH kontrolünün önemini belirtmiş ve Schlötter ise modern parlak nikel banyolarının ticari anlamda değer kazanması ve kullanılmasını başlatmıştır. Sonraki yıllarda kaplamacılık üzerine çok gelişmeler olmuştur. İlk krom kaplamayı 1843' te Antoine Clesar Becquerel uygulamıştır. Antoine Clesar Berquerel kendi kitabında krom klorür (CrCl_3) ve krom sülfat $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ kullandığını belirtmektedir. Kromik asit çözeltisinden ilk krom kaplama 1856' da Geuther tarafından yapılmıştır. Kaplamadaki önemli bir etken olan kromik asit çözeltisini 1919 – 1924 yıllarında Sargeut çalışması, pratiklik ve uygunluğunu kitabında belirtmiştir [10].

Kaplamacılık farklı kaplama yöntemleri ile yapılabilmektedir. Bunlar; elektrolitik sıcak daldırma, sıvı metal püskürtme, metal giydirme ve iyon implantasyon yöntemleriyle yapılmaktadır [41]. Endüstride kullanılan parçalar başta krom olmak üzere alüminyum, bakır, kobalt, nikel, çinko, kadmiyum, kalay ve kurşun gibi saf metallerle ya da bunların alaşımları ile kaplandığını daha önceden söylemiştik. Krom kaplanan parçalar daha çok makine endüstrisinde kullanılmaktadır. Mühendislik ve dekoratif amaçlı olmak üzere iki farklı bölüme ayrılan krom kaplama; kromun korozyon ve aşınma direnci ile sertliğinin yüksek, sürtünme katsayısının düşük olması nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca kaplama sanayisinde önemli bir yer edinmiştir [42].

Mühendislik amaçlı kaplamada krom doğrudan esas metal üzerine kalın bir tabaka halinde (2,5-500 μm) kaplanır [8]. Makinelerde yaygın olarak kullanılan miller, piston segmanları, motor subapları ve itecekleri, içten yanmalı motor silindirleri ile takım

tezgâhlarına ait bazı parçalar, turbo motor milleri ve iplik fabrikalarındaki sargı milleri de sert krom kaplanır [5]. Ayrıca, ucuz ve kolay bulunan metallere üretilen ve yüzey özellikleri iyi olmayan parçalara krom kaplanarak kullanım süreçleri arttırılabilir [11].

Dekoratif amaçlı krom kaplamaların en önemli özelliklerinden biri, kaplama yüzeyinin parlak bir görünüme sahip olmasıdır ve uygulama alanları da bu şekildedir. Ancak, dekoratif amaçlı kaplamalarda krom tabakasının kalınlığı 0,13 µm ile 1,3 µm arasında değişmektedir. Bu kalınlık parça yüzeylerini korozyona ve aşınmaya karşı korumada yeterli olmayabilir [9]. Bu nedenle dekoratif amaçlı krom kaplamalarda parçalar, bakır ve nikel kaplandıktan sonra krom kaplanırlar. Böylece korozyon ve aşınmaya karşı korunmuş olmaları sağlanır [8].

Kaplama işleminin metal endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanması, kaplamacılıkta kaliteyi ve ekonomiyi ön plana çıkarmaktadır. Bu duruma bağlı olarak, kaplama kalitesi ve hızı ile doğrudan ilgili olan banyo bileşimi ve banyo sıcaklığı, akım yoğunluğu, pH değeri gibi çalışma şartlarının araştırılması giderek önem kazanmıştır ve birçok çalışma bu yöne kaymıştır [7].

4.2. ELEKTROLİTİK KAPLAMA

18. Asırda elektriğin bulunması ve uygulanması ile metallerin, değerli metallerle kaplanması düşünülmüştür [42]. 1805 yılında İtalyan Brugnatelli elektrik kaynağı olarak kullanıldığı akü yardımı ile altın ve gümüş kaplama için siyanürlü elektroliti bulması, insanlara doğa da oksitlenmeye karşı dayanıklı metallerle dayanıksız metalleri kaplama olanağı sağlamıştır [1]. Metallerin elektrokimyasal birikimi ve çözünmesi çok sayıda metal işleme yöntemlerinde kullanılır. Bunlardan en yaygın kullanım alanı bulan ve en iyi bilinen elektrolitik kaplama olmuştur. Metal kaplama kaplanacak malzemenin yüzeylerine elektrolitik birikim yolu ile uygulanır. İletken bir yüzey tabakası sağlamak koşuluyla, kaplanan yüzey metal ya da metal olmayan bir maddedir. Elektrolitik şekillendirme metal birikiminin kullanıldığı başka bir yöntemdir. Bu yöntemde biriken tabakanın kalınlığı normal kaplamada uygulandan çok daha fazladır ve yüzeye biriken metal birikim tamamlandıktan sonra yüzeyden ayrılabilir. Metalin kalınlığı kendi başına yetecek ve dayanıklı olacak şekilde ve biriktiği yüzeyin geometrik şeklini alacak ölçüde olmalıdır [42].

Elektrolitik kaplamada, kaplama ünitesinin başlıca malzemeleri: katot, anot, elektrolit

ve kaplama sıvısına uygun banyosudur. Elektrolitik kaplamada isminden de anlaşılacağı gibi elektriğe ihtiyaç duyulan kaplamadır. Aynı metal veya farklı bir metalin tuzunu içeren sulu bir çözelti içerisine yerleştirilen metal nesne, güçlü bir katodik elektrik potansiyeli ile elektrolitik kaplama yapılır. Elektrolitik kaplama, metalin çözeltiden indirgenerek hidrojen veya oksijen çıkışı ile katodik reaksiyonlar tarafından gerçekleşir. Hidrojen ve oksijen çıkışlarının homojen olması önemli bir durumdur [35]. Kaplamada kullanılan elektriksel araçlar ana güç kaynağından gerekli düşük gerilim (doğru akım) sağlamak amacıyla bir azaltıcı dönüştürücü ve rektifiye edici araçlardır. Bazı özel durumlarda motor jeneratörler de kullanılmaktadır. Bu arada kaplama hücrelerine gerekli gücün istenen oranda verilmesini sağlayacak kontrol sistemlerine gereksinim vardır ki kaplama banyosuna gelen gücün ani değişimler göstermemesi önemlidir [43]. Metaller, kaplama sonunda kristal haldedirler. Kristal boyutu ve kristallerin birikim şekli, birikimin adhezyon, süreklilik, görünüş, sağlamlık ve diğer özelliklerini belirler. Birikimin kristal yapısı kaplama özellikleri tarafından belirlenir, bunlardan en önemlisi elektrolitin kimyasal bileşimi ve diğeri ise akım yoğunluğudur. Hücrenin fiziksel özellikleri de önemlidir, özellikle sıcaklık, karıştırma ve elektrotların büyüklüğü, şekli ve birbirine olan mesafesi önemlidir [44].

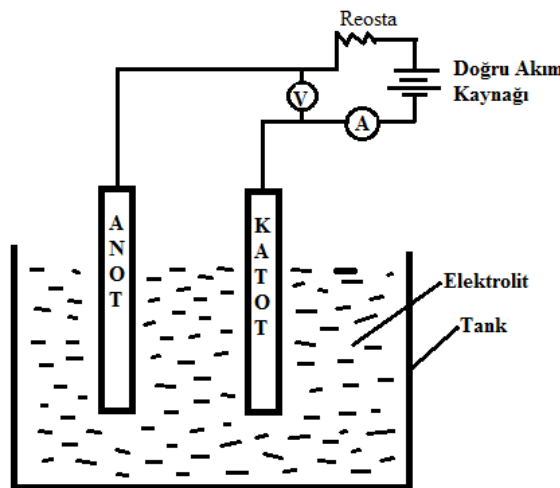
Kaplanacak malzeme yani katot denilen malzemede oluşacak reaksiyonlardan dolayı elektrolitik kaplamalar hidrojen zengin olma eğilimindedirler; bu da kırılabilirlik ve boşluklu kaplama gibi mikroyapı problemlerine yol açmaktadır. Diğer problem ise elektrolitik kaplamaların üniform olmayışıdır. Katot olarak asılan malzemenin geometrik yapısı akımsız kaplamanınkinden çok daha sade ve keskin olmayan köşeleri olmalıdır. Köşeler, kenarlar ve çıkıntılarda yüksek elektrik alan oluşur ve düz yüzeylere göre çok daha hızlı bir şekilde kaplanır. Üniform kaplama süresine dikkat edilmezse köşe ve kenarlarda daha kalın kaplamaya neden olabilir ve böylece yüzey üzerinde kaplama kalınlığı farklılıklar gösterebilir [38]. Elektrolitik kaplamalar farklı tabaka şeklinde uygulanabilmektedir. İnce kaplama olarak bilinen yöntem altlık malzemesini farklı alaşımların çok katlı bir şekilde kaplanmasını sağlamaktadır. Örnek verecek olursak otomobil tamponlarının kaplanmasında yüzeydeki boşlukları doldurmak ve iyi bir yapışma sağlamak için önce bir kat bakır kaplama, onun üzerine korozyon dayancısı sağlamak amacı ile bir kat nikel ve tampon yüzeyinin arzulanan parlak görünümünü kazanması için de bir kat krom kaplama uygulanabilir [35]. Elektrolitik kaplamada önemli parametreler kaplama banyo bileşimi, banyo sıcaklığı, akım yoğunluğu, anot

katot arası mesafe ve kaplama öncesi işlemler kaplamada önemli rol oynamaktadır. Bu sayede istenilen sertlik ve dekoratif görünüm elde edilebilir. En yaygın olan elektrolitik kaplamalar krom, nikel, kalay, çinko, bakır ve kadmiyumdur. Elektrolitik kaplamalar, elektrokimyasal hücreleri taşınım vasıtasıyla gerçekleştirilir [35].

Aslında elektrolitik kaplama, metal ve alaşımlarının yüzeyinden akım geçmesi ile yoğun, üniform ve yapışkan bir kaplama elde etmek amacıyla uygulanan elektrikle biriktirme prosesidir. Kaplamada istenilen yüzey özellikleri değişebilir. Örneğin, metal gibi iletken ya da plastik gibi yalıtkan bir malzeme olabilir. Elektrolitik kaplama ürünleri yaygın olarak otomobil, gemi, havacılık, makine, elektronik, mücevherat, savunma ve oyuncak endüstrisi gibi birçok alanda kullanılır [45].

4.2.1. Elektroliz

Kimyasal bir tepkimenin elektrik yardımıyla gerçekleşmesine, elektrik işleminin kimyasal bir işleme dönüştürülmesine denir. Açıklamak gerekirse, elektroliz işlemi elektroliz çözeltinin içerisine iletken daldırılmasıyla başlanır ve bunlar birkaç voltluk doğru akım kaynağına bağlanırsa çözeltiden bir elektrik akımı geçer. Bu sırada çözelti içinde iyonlarla akım taşınır ve her iki elektrotta bazı kimyasal değişimler olur ve buna elektroliz denir. Çözeltiden akım geçmesi ve elektrotlarda ayrışmanın olması için değişik elektrolitler için değişik olan minimum gerilime ayrışma gerilimi denir. Elektrotlarda dönüşen madde miktarı Faraday kanunlarına göre çözeltide geçen elektrik miktarı ile orantılıdır [46].



Şekil 4.1. Elektroliz hücresi [46].

Şekil 4.1' de Elektroliz hücresi verilmiştir. İçerisinde iki elektrot, çözelti ve akım kaynağı olan sisteme elektroliz hücresi denir. Bu elektrotların (+) ucu anot, (-) ucu katot

olarak adlandırılır. Katot olarak kaplanacak malzeme tanımlanır. Elektrik kaynağından gelen akım anot ucuna aktarılır ve oradan çözelti içerisinde katoda iletilir. Böylece dış devrede elektron akımı anottan katoda doğrudur. Elektrolitin içinde (+) yüklü iyonlar (katyon) katoda giderek elektron alır ve indirgenir, (-) yüklü iyon (anyon) anoda giderek orada elektron verir ve yükseltgenir [47].

4.3 KROM KAPLAMA

Malzeme kaplama yöntemlerinden biri olan krom kaplama malzemeye kattığı üstün özellikleri, yaygın olarak bilinen prosesleri ve maliyet verimliliği nedeniyle metallerin yüzey işlemlerinde geniş kullanım alanı bulmaktadır. En önemli kullanım alanları krom ve kromat dönüşüm kaplamalarıdır. Çelik malzemelere elektrolitik olarak tatbik edilen krom kaplama, yüksek aşınma direnci ve yüzey dayanımı amacıyla sert krom kaplama veya nispeten ince tabaka halinde estetik amaçlı olarak uygulanmaktadır. Ayrıca dekoratif kaplama şeklinde de uygulanır. Kromat dönüşüm kaplama; alüminyum, magnezyum, kadmiyum kaplama ve alaşımları üzerine korozyon dayanımı ve/veya boya altı olarak uygulanan elektrolitik olmayan bir prosestir. Yüzey işlemlerinde krom olarak en yaygın sert krom kaplamalardır. Tamiri yapılmak istenen yüzeyi korumak istenen parçaların kaplanıldığı yöntemdir [48]. Sert krom kaplamanın kullanım alanları, aşınma direnci uygulamaları, takım-alet performansının ve ömrünün geliştirilmesi ve parça kurtarılmasıdır. Genellikle pistonlarda aşınma fazla olduğundan sert krom kaplama olarak piston kullanımı verilebilir. Kaplanmış piston kaplanmamış pistonla göre beş kat daha fazla ömürlüdür. Valf gövdeleri aşınmayı önlemek için yaklaşık 2,5 µm, hidrolik şaftlar servis ömrünü arttırmak amacıyla 20–30 µm kalınlığında kaplanır.

Diğer malzemelerde ise takım alet gibi aşınması fazla olan malzemelerde, sürtünmeyi ve korozyonu azaltmak içinde kullanılır [48].

Krom kaplama havacılık uygulamalarında da kullanılır. Bunlar: Hidroliklerin, iniş takımlarının, dönen şaftların, dişlilerin ve kayma ya da dönme hareketine maruz kalan yüzeylerdir. Uçaklarda krom kaplamanın en çok kullanıldığı yerler ise iniş takımı ve hidrolik hareket mekanizması parçalarıdır. Aşınmış olan parçaların tamiri esnasında da kullanılır. Böylece firmalara ekonomik açıdan kar sağlamış olmaktadır[48], [49].

Sert krom kaplama mühendislik kaplama ya da fonksiyonel kaplama olarak adlandırılır. Banyonun sıcaklık ve akım yoğunluğu değiştirilerek sert ve dekoratif kaplama

yapılması sağlanır. Sert ve dekoratif krom kaplamaların farkları aşağıdaki maddelerde belirtilmiştir:

- Sert krom kaplama, yüzeyi aşınmaya karşı korumda, aşındırıcılara karşı düşük sürtünme katsayısına, korozyona ve aşınan parçaların geri tamir edilerek geri dönüştürülmesi için uygulanır. Başka bir özelliği de aşınmış parçaların taşlanmış yüzeylerini eski çaplara getirebilmesidir.
- Adından da anlaşıldığı gibi dekoratif krom kaplamada ise daha çok, görsellğin ön planda olduğu parlak ve estetik bir görünüş istenilen malzemelerde kullanılır.
- Sert kromun kaplama kalınlığı normalde 2,5–500 μm olur, bazı uygulamalarda daha da kalın olarak uygulanır.
- Dekoratif kaplamalar ise bazen 1,3 μm civarında olur.
- Belirli istisnalar dışında sert krom kaplama direk olarak ana metale uygulanır, dekoratif krom ise bakır-nikel ve nikel kaplamaların üzerine uygulanır [48], [50].

Sert krom kaplama sıvılarında metalin kaynağı kromik asittir. Bununla birlikte, katalizör olarak davranan ve kromun katodik birikimine yardımcı olan belirli bir miktarda asit bulunmadıkça krom kaplanamaz. Katalizörler asit anyonlarını sağlar; ilk olarak kullanılanı sülfattır. Sülfat yerine karmaşık asit radikallerinin içinde bulunan flor iyonlarının kullanılması krom kaplama süreçlerini geliştirmiştir. 1980'lerin sonlarında ise florsuz solüsyonlar geliştirilmiştir. Kaplamanın sertliği ve korozyon dayanımı, konvansiyonel sülfat solüsyonundan katalizör karışımı solüsyonu ve florsuz solüsyona geçtikçe giderek arttığı gözlemlenmektedir [48], [50].

Elektrolitik kaplamayı etkileyen faktörler; akım yoğunluğu, konsantrasyon ve karıştırma, sıcaklık, ana metalin ve elektrolitin doğası, pH, kaplama süresi ve kaplama gücüdür:

- Akım yoğunluğu: Elektrotların birim yüzeyine isabet eden akım şiddetidir $[\text{A}/\text{dm}^2]$ ile gösterilir. Akım yoğunluğu arttığında kristallerin oluşum hızı arttığından ince taneli kristaller oluşur. Daha da artarsa katot yüzeyinde deşarj olan metal iyonları çözelti içinden gelenlerle yeterince karşılanamadığından katotta bir fakirleşme meydana gelir. Bunun sonucu homojen olmayan, siyah ve süngerimsi bir kaplama oluşur.

- Konsantrasyon ve karıştırma: Düşük konsantrasyonda ince taneli yüksek konsantrasyonda ise daha iri taneli kristalleri oluşturmaktadır. Katottaki fakirleşmeyi karşılamak amacıyla elektrolite ya da katoda hareket verilebilir.
- Sıcaklık: Difüzyonu arttırarak küçük kristalli yapıların, diğer taraftan da katot polarizasyonunu azaltarak büyük kristallerin oluşumuna neden olur. Her banyonun belirli çalışma sıcaklığı vardır. Sıcaklık işlemi kaplama esnasında belirli periyotlarla kontrol edilmelidir.
- Ana malzeme ve elektrolit: Ana metalin özellikleri ve parçanın daha önceki üretim aşamaları kaplama kalitesini etkilemektedir. Kompleks tuzların elektroliziyle elde edilen kaplamalar, normal tuzlarla elde edilenlerden daha üstündür. Elektroliti hazırlarken kullanılacak su da çok önemlidir, yüksek sertlikteki sular kullanılmamalıdır. Kaplama öncesi ana malzemenin yüzeyi çok iyi temizlenmelidir.
- pH: Elektrolitlerin belirtilen pH değerlerinin altında veya üstünde olması kaplama kalitesini bozacaktır ve bunu için pH değeri kontrol altında tutulmalıdır. Kaplama hatlarında, alkali banyolardan asit kaplamalara geçerken nötrleme gibi pH değerini etkileyecek durumlara dikkat edilmelidir.
- Kaplama gücü: Kaplama gücünü redresörden, bağlantısı iyi yapılmış iletkenlerden ve banyo bileşiğinden alan ünite, kaplama esnasında o gücü malzemenin tüm yüzeyine aktarmalıdır. Düzgün olmayan bir malzeme üzerinde oldukça düzgün bir kaplama elde edilmesi için çözeltinin gösterdiği özelliğe dağılma veya kaplama gücü denir. Sıcaklık artışı iletkenliği arttırırsa da, polarizasyonu daha fazla arttıracağından kaplama gücünü azaltmış olmaktadır.
- Kaplama süresi ise kaplama banyosunda bekleme süresine bağlı olarak kalınlığı artabilmektedir. Kaplama esnasında banyodan çıkarılıp kalınlığı ölçülen malzemelerin tekrar kaplama banyosuna sokarak kaplanılacak süreyi belirlemeleri gerekmektedir. Ayrıca banyo içerisindeki krom değerlerinin de kontrol edilmesi gerekmektedir [10], [48], [51].

Krom kaplama işleminde, krom kaplamadan daha önemli olan yüzey temizleme işlemi vardır. Uygun bir temizleme işleminden geçen parçalar daha sonra askıya asılarak istenilen kalınlığa göre 24 saate kadar kaplama banyosuna daldırılır. Parçalar banyodan çıkarıldıktan sonra maske sökülür, fırınlanarak gevreklik giderme işlemi ve sonrasında son yüzey işlemi yani taslama, parlatma vb. işlemler yapılarak kaplama prosesi tamamlanır. Kaplamanın ana metale iyi yapışabilmesi için yüzeyin son derece temiz

olması, her hangi bir film veya oksit tabakası içermemesi gerekmektedir. Hidrolik sıvı ya da benzer koruyucu akışkanlara maruz kalan kaplamalı yüzeyleri korozyondan korumak için nikel alt kaplama da uygulanmaktadır. Bir diğer husus da; kaplamalar nispeten kalın olduğundan, kaplama yüzeyinin pürüzlü, kaba yapıda olmamasına dikkat edilmesi gereğidir. İstenildiği durumlarda kaplama kalınlığı artırılıp taşlama yapılarak yüzey pürüzlülüğü giderilmektedir [48], [51], [52].

Krom kaplama işleminin de avantaj ve dezavantajları vardır. Avantajları: İstenilen korozyon dayanımı, düşük sürtünme katsayısı, yüzey düzgünlüğü, parlaklığı, sertliği, sağlamlığı, aşınma dayanımı, düşük maliyeti, uygulamasının kolay olması ve kaplamanın bilinmesidir. Tüm bunları etkileyecek durum kaplama banyosu, kaplama öncesi temizleme işlemi ve kaplama parametreleridir. Dezavantajları ise: Bazı durumlarda homojen olmayan kaplama, yorulma ömrünün azalması, delik ve boru parçalarında zayıf etkileşim, yüksek güç tüketimi, lehim tutmaması, mikro çatlaklardan dolayı azalan korozyon dayanımı (bazı araştırmalar terini söylemektedir), buharlaşma sonucu meydana gelen hidrojen oluşumu sonucunda yüksek emisyon, yapışma kabiliyetinin az olması (son derece yüze temizliğine bağlıdır) ve +6 değerli kromun toksik ve kanserojen olması gibi durumlardır [48], [53]-[55].

Krom kaplama esnasında iç stresleri azaltmak için mikroçatlaklar oluşur. Bu çatlaklar krom ile kaplanır, önceki çatlaklar daha kolaylıkla dağlanabilir ve çevresindeki kaplamadan farklı bir yansıtma indeksine sahiptirler. Korozyon uygulamalarında, en çok sayıda mikroçatlağı sağlayan solüsyon kullanılmaktadır. Nikel ve kromun birlikte kaplanması durumunda nikel kaplama 20–30 μm arasında değişiklik gösterirken, parlak krom kaplama 0.2-0.25 μm incelikte kaplamaya sahiptir. Krom kaplama kalınlık arttıkça korozyon direnci artmaktadır. Krom kaplamayı hemen-hemen mikro çatlaksız yapmak mümkündür. Akım yoğunluğu, sıcaklığı değiştirilerek, katalizör konsantrasyonunu değiştirilerek yapılır. Bu şekilde yapılan çatlaksız kaplama gri renkli olur. Korozyon dayanımı, kaplamanın içindeki iç streslerden dolayı çok zayıftır ki, bu iç stresler bir süre sonunda tüm kaplama boyunca uzanan geniş çatlaklara yol açar [54], [43].

Katottan çıkan hidrojen gazı, karbürleşmiş ve yüksek dayanımlı çelikler basta olmak üzere, demir esaslı ana malzemelerde hidrojen gevrekliği (kırılganlığı) oluşumuna yol açmaktadır. Hidrojen gazı gevrekliğine yol açan başka etkenlerde temizlemenin iyi

yapılmamasıdır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta da, kaplanacak is parçasının et kalınlığıdır. Kaplama kalınlığı ana malzeme kalınlığına bağlı olarak yapılmalıdır. Eğer ince bir malzemeye kalın kaplama uygulanırsa, oluşan çatlaklar ana metalde de çatlakların olmasına neden olabilir [54], [52].

4.3.1. Yüzey Temizleme İşlemi

Krom kaplamada ve diğer kaplamalarda kaplama kadar önemli olan bir durum ise yüzey temizliğidir. Kaplanması istenilen parçaların yüzeylerinde bulunan yağ, kir ve pas gibi yabancı maddeler kaplama metalinin yüzeye yapışmasını engeller ve bazı bölgelerde kaplamanın yapılamaması bazı bölgede kaplama kalınlığı farkı olmasına neden olur [56]. Bundan dolayı yüzey temizlemenin çok dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Yüzey temizleme, kirlilik durumuna göre mekanik, kimyasal ve elektrokimyasal temizleme yöntemleriyle yapılmaktadır. Bu yöntemleri ana malzemenin durumu belirlemekle birlikte temizleme yöntemlerinin doğru seçimi de etkiler [57]. Yüzey temizleme işlemlerinde uygulanan bazı yöntemler; mekanik temizleme, elektrolitik yöntemle temizleme yapılır ve devamında asitli su ile yüzey oksitlerinden ayrıştırılır.

4.3.2. Krom Kaplama Koşulları

Elektrolitik krom kaplamada; kaplama hızı, kaplama kalınlığı ve kaplamanın görünümünü etkileyen faktörlerin başına çözeltinin kimyasal bileşimi, banyo sıcaklığı ve akım yoğunluğu gelmektedir. Bunlar krom kaplamayı etkileyen en önemli hususlardır [58].

Kaplamanın sertliğini etkileyen durumlar çözeltinin bileşimi ve katalizör miktarıdır. Yapılan çalışmalara bakıldığında çözeltideki krom oksit miktarı arttıkça sertliğin azaldığı görülmektedir. Ayrıca katalizör miktarı belirli bir değerin üzerine çıktığında ise verilen akımın iletkenliğinin ve sertliğinin azaldığı görülmüştür [9].

Krom kaplamada banyo sıcaklığı 35°C ile 40°C arasında ve 10 A/dm² ile 55 A/dm² arasındaki akım yoğunluklarında mat olduğu, 45°C ile 60°C arasındaki sıcaklıklarda ve aynı akım yoğunluklarında ise parlak kaplamalar olduğu bilinmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda yapılan kaplamalar akım yoğunluğu arttıkça akım etkinliğinin, kaplama hızının ve kaplama sertliğinin arttığını ortaya koymuştur [5], [13], [9], [59].

4.3.3. Krom Kaplama Banyoları

Krom kaplamada, krom iyonları oksidin (CrO_3) sulu çözeltisinden sağlanır. Krom oksidin sulu çözeltisi H_2CrO_4 ve $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ gibi polikromik asitlerden oluşur ve bu asitler arasındaki dinamik denge; $2\text{H}_2\text{CrO}_4 \leftrightarrow \text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O}$ reaksiyonu ile ifade edilmektedir [11]. Söz konusu asitler çözeltide HCrO_4^- , CrO_4^{2-} ve CrO_7^{2-} iyonlarına ayrıştığı bilinmektedir [68]. Fakat krom kaplama yalnız kromik asit çözeltisinde yapılmamaktadır [67]. Kromik asit çözeltisinde yapılan krom kaplama sırasında katotda krom III kromat $[\text{Cr}(\text{OH})\text{CrO}_4]$ olarak adlandırılan sert bir tabaka oluşmakta ve bu tabaka kromun çökmesini engellemektedir. Ayrıca, saf kromik asit içerisinde yapılan krom kaplamalarda katot hidrojen gazı açığa çıkarmaktadır [9]. Bu nedenlerle, kromun katotda birikmesini sağlamak ve krom III kromat tabakasını gevşetmek amacıyla kromik asit çözeltisine sülfürik asit, florür ve siliko florür gibi bazı katalizör maddeler katılır [8], [59].

Krom kaplama çözeltilerinde katalizör olarak en çok sülfürik asit kullanılmaktadır. Sülfürik asit Cr^{+3} iyonu ile kolayca reaksiyona girdiğinden dolayı krom III kromatı $[\text{Cr}_2(\text{H}_3\text{O})(\text{SO}_4)_4]^{2-}$, $[\text{Cr}_2(\text{H}_3\text{O})(\text{SO}_4)_5]^{3-}$, $[\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_6]^{6-}$ iyonlarına ayrıştırır ve sert tabakanın oluşumunu engeller [59]. Sülfürik asit oranı, kaplama kalitesini ve akım etkinliğini doğrudan etkilemeyen çözelti bileşeni olduğu bilinmektedir [7].

Düşük konsantrasyonlu çözeltilerde kaplama yapılırken akım yoğunluğu yüksek tutulduğu bilinmektedir. Böylece çözeltilerde homojen kaplama yapılmamakla beraber, kaplamanın sertliği ve aşınma direnci de yüksek olur. Yüksek konsantrasyonlu çözeltilerde ise kaplama düşük akım yoğunluklarında yapılır. Bu şekilde yapılan kaplamaların görüntüsü parlaktır ve kaplama tabakası parça yüzeyinde homojen dağılım gösterir [5]. Çizelge 4.1.'de düşük ve yüksek konsantrasyonlu çözeltiler ile kaplama koşulları verilmiştir [6].

Çizelge 4.1. Düşük ve yüksek konsantrasyonlu çözeltiler ile çalışma koşulları [6].

Çözelti bileşenleri ve kaplama parametreleri	Düşük konsantrasyonlu çözelti	Yüksek konsantrasyonlu çözelti
Kromik asit (g/l)	250	400
Sülfürik asit (g/l)	2,5	4
Banyo sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	40-70	25-50
Akım yoğunluğu (A/dm^2)	16-40	8-20
Kaplama yöntemi	Sert krom kaplama	Dekoratif amaçlı krom kaplama

Krom kaplamada, elektroliz süresince harcanmayan, korozyon direnci yüksek olan kurşun anot kullanılmaktadır. Homojen krom kaplama elde edebilmek için anot alanının katot alanından daha büyük olması gerekir [8].

4.4 KROM KAPLAMA ÇEŞİTLERİ

Krom kaplama çeşitleri dekoratif krom kaplama, sert krom kaplama (mühendislik kaplama) ve diğer krom kaplama çeşitleri olmak incelenebilir [60].

4.4.1. Dekoratif Krom Kaplama

Krom kaplama 1924'den beri ticari olarak uygulanmaktadır [61]. Dekoratif krom kaplamaların kalınlığı genellikle 0.80 μm 'nin altındadır. Yansıtıcı görünüşlerinin yanı sıra korozyon direnci, kayganlık ve mukavemet sağlarlar [62]. Dekoratif krom neredeyse sadece nikel üzerine kaplanır. Nikel üzerine kaplanması korozyon davranışını olumlu yönde etkilemektedir. Nikel plastik, çelik, alüminyum, bakır alaşımları ve çinko döküm kalıpları gibi altlıklara kolayca kaplanır. Nikel tercih edilmesinin bir diğer sebebi kroma beyaz bir renk vermesi ve yüzeyinin krom tarafından oksidasyona karşı korumasıdır [63]. Dekoratif kaplama hekzavalet olarak kullanılırken trivalent krom elektrolitleri olarak kullanılmaktadır [61]. Dekoratif krom kaplamanın tercih edilme nedeni, uygun koşul ve akım yoğunlukları olması ve parlak bir kaplama ile sonuçlanmasıdır [62], [64]. Parlak krom sadece tek bir krom katmanından ibaret değildir. Her zaman bir ya da daha fazla nikel alt katmanına sahiptir. Nikel katmanının kalınlığı 5-50 μm aralığında değişiklik gösterebilir. Üstteki krom katman kalınlığı ise 0,4 μm civarındadır [65].

Krom kaplama sırasında sıcaklığın sabit tutulmasıyla kaplama işleminin sonucunda çıkan malzemenin parlak olmasını sağlar. Örneğin bir dekoratif krom kaplama banyosu 44°C' de kullanılıyorsa sıcaklık kaplama boyunca 43-45 °C aralığında tutulmalıdır ki parlak bir kaplama elde edilsin [62].

4.4.2. Sert Krom Kaplama

Ticari olarak sert krom kaplama, 1920'lerin sonunda ABD ve Almanya'da yapılan çalışmalar sonucu kullanılmaya başlamıştır. Bu çalışmalarda 100:1 oranında kromik asit ve sülfürik asit esaslı banyolar kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda sert krom kaplama için kullanılan banyoların formülasyonu değiştirilmemiş, hala bu orijinal yapı

kullanılmaya devam edilmiştir. Sert krom kaplama fazlasıyla denenmiş ve uzun yıllar kendini kanıtlamıştır [61], [66].

Sanayi ortamında endüstriyel parçaların aşınma ve korozyon direncini iyileştirmek için sert krom kaplama kullanımı oldukça fazladır. Kullanım alanları olarak: Mühendislik alanlarının olduğu çoğu yer ve askeriye, madencilik ve uzay alanlarında, otomotiv ve uçak alanlarında, içten yanmalı motor parçaları ve merdanelerde, hidrolik silindirlerde ve takım tezgâhların gibi birçok alanı mevcuttur [66], [67]. Sert krom kaplamalarda kaplama kalınlıkları genel olarak 10-550 µm aralığındadır. Oksit, hidroksit ve hidrit kalıntıları içeren krom iyi bir yapıya sahiptir. Bu yapı aynı zamanda yüksek derecede iç gerilime ve sertliğe (1200 HV' ye kadar) ve kaplama boyunca görülen bir çatlak ağına sahiptir [67].

Krom kaplamalar çok sert yüzeylerin elde edildiği, aşınmaya ve darbeye karşı dirençli olduğu, yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruduğu, basınca ve korozyona karşı dirençli olduğu için tercih edilmektedir. Kullanım alanlarına örnek olarak yukarıda verilmiştir. Onların yanı sıra çekme takımları ve mil yatakları da örnek olarak verilebilir. Ayrıca yüksek termal direncine sahip olduğundan buhar türbinleri ve döküm kalıplarında da kullanılırlar. Sert krom kaplamanın bir diğer önemli özelliği ise kimya, eczacılık ve gıda endüstrisinde motorlardaki korozyonu önlemesidir [68].

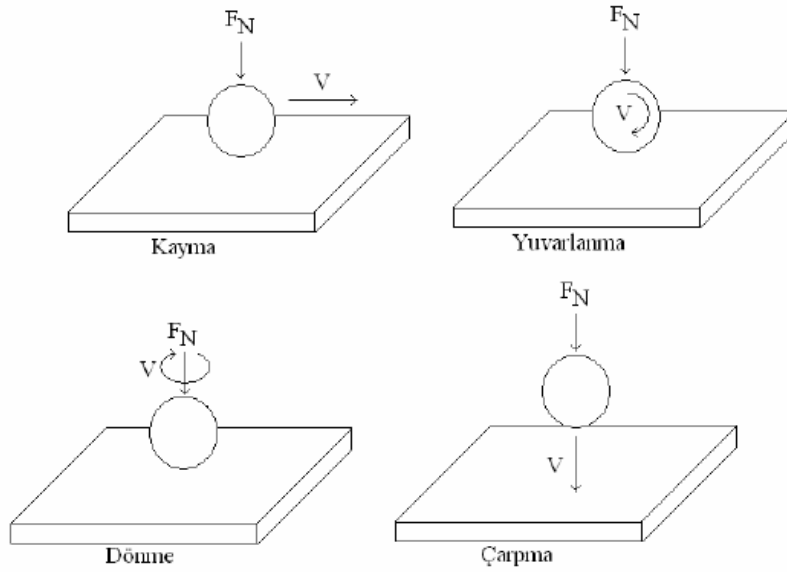
4.4.3. Diğer Krom Kaplama Çeşitleri

Literatür taraması göstermiştir ki, Trist, soğutulmuş elektrolitten üretilen özel soğuk krom kaplama kullanmıştır. Carveth, kromu erimiş siyanüre daldırarak krom kaplama üzerinde siyah bir renk elde etmiştir. Ayrıca daha fazla sertlik elde etmek için krom kaplamanın karbürleştirilmesi de denenmiştir. Chessin ve Walker, krom kaplamaya eşit oranda parlaklık vermek için organik katkılar içeren bir banyo geliştirmiş ve bu şekilde kaplama gerçekleştirmişlerdir [62].

5. SÜRTÜNME VE AŞINMA

5.1 SÜRTÜNME

Sürtünme, birbirine temas eden iki nesnenin arasında harekete karşı oluşan kuvvettir. Sürtünme hareketleri, sürtünene cisimlere göre kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, dönme ve çarpma şeklinde olmaktadır. Şekil 5.1' de Tribolojik sistemlerin kinematikleri verilmiştir. Hareke yönüne göre kuvvet uygulandığı görülmektedir [69].



Şekil 5.1. Tribolojik sistemlerin kinematikleri [69].

Temas eden bu yüzlerdeki sürtünme kuvvet kayıplarına neden olur ve aşınmaya yol açar. Aşınma ise işleme toleranslarının kötüleşmesine sebep olmaktadır.

Sürtünmenin istendiği durumlarda aşınma istenmemektedir ve bazı makine parçaları için geçerlidir. Bu durumlara karşı frezeleme ve taşlama gibi talaşlı imalat işlemlerinde ise sürtünme için minimum enerji harcayarak maksimum aşınmanın meydana gelmesi beklenir. İki malzeme birbirine temas edecek şekilde yerleştirilse, bu malzemelerden birini diğeri üzerinde kaydırmak için uygulanan kuvvete sürtünme kuvveti direnç gösterir [69].

Bazı kuvvetler aşağıda açıklanmıştır:

F_s : Kaymayı başlatan kuvvet.

F_n : Temas yüzeylerine etki eden normal kuvvet.

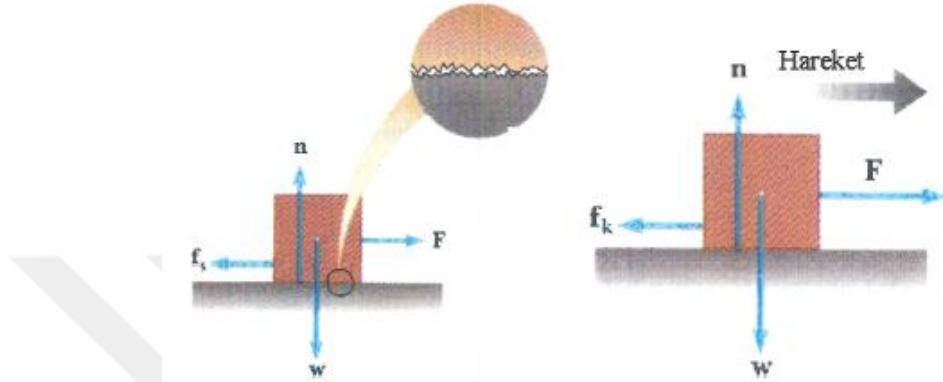
μ_s : Statik sürtünme katsayısı.

μ_k : Kinetik sürtünme katsayısı olmak üzere;

$F_s = \mu_s \cdot F_n$ Bağlantısı mevcuttur.

Kayma başladıktan sonra, sürtünme kuvvetinde bir azalma olur ve bu durumda;

$F_k = \mu_k \cdot F_n$ Bağlantısı yazılabilir. Burada $\mu_k (< \mu_s)$ 'dir.



Şekil 5.2. Statik dinamik sürtünme esnasında cisme etki eden kuvvetler [69].

Şekil 5.2' de Statik ve dinamik sürtünme esnasında cisme etki eden kuvvetler görülmektedir ve her kuvvetin bir sürtünme değeri vardır. Yüzey işlemi olarak iyi bir şekilde torna edilmiş makine parçalarının yüzeyi laboratuvar ortamında incelendiğinde çok sayıda pürüzlerin olduğu görülür. Sürtünmenin etkisinden oluşan bu pürüzlülükler, parçanın yüzeyi parlatılarak on katı bir azalma görülmektedir. Ancak yinede mikro olarak pürüzlülük görülmektedir [69].

5.1.1. Kayma Sürtünmesi

Birbirine temas eden veya birbiri üzerinde kayan iki yüzey, ne kadar hassas işlenmiş olsalar dahi gerçek temas alan görünür temas alanının 0,01 ila 0,1'i kadardır. Gerçek temas sadece küçük pürüz taneciklerinde meydana gelecektir. Kayma sırasında teğetsel kuvvet artırıldığında, temas noktalarındaki birleşmeler kaymaya başladığı gözlenir. Tüm birleşmelerin kesilmesi için gerekli sürtünme kuvveti, birleşmelerde malzemenin gerilmesi ile orantılı olarak değişmektedir [69].

$$F_s = A_r \cdot S \quad (5.1)$$

F_s : Kesme için gerekli sürtünme kuvveti.

A_r : Gerçek temas alanı.

S : Malzemenin kesme gerilmesi.

Pratik uygulamalarda kayma sürtünmesi bazı faktörlerden de etkilenebilmektedir.

5.1.2. Yuvarlanma Sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketine karşı temas yüzeylerinde oluşan dirençtir. Yuvarlanma sürtünmesi, yüklü bir kürenin veya silindirin, düz bir kütle yüzeyi üzerinde yuvarlanması sırasında oluşur. Yük altındaki silindirin yuvarlanmasında sürtünme direnci, silindir merkezine uygulanır ve bu sürtünme, aşağıda gösterilen bağıntıya uygun olarak yük ile doğru orantılı ve yuvarlanma elemanın çapı ile ters orantılıdır [69].

$$F_r = k \cdot (W^n / D^m) \quad (5.2)$$

Burada;

k: Malzeme ve yüzey şartlarına bağlı sabit.

F_r : Yuvarlanma sırasındaki sürtünme direnci.

W: Yük.

D: Silindir veya kürenin çapı.

n, m: Deneyisel sabitlerdir.

Yuvarlanma sürtünme katsayısı " μ_T " kayma sürtünmesinde olduğu gibi aynı yöntemlerle bulunur.

$$\mu_T = F_r / W$$

Genel olarak yuvarlanma sürtünme katsayısı sürtünme katsayısına göre çok düşük olmakla, statik ve kinetik sürtünme katsayıları ile yaklaşık olarak aynıdır [70].

5.2 SÜRTÜNME MEKANİZMALARI

Sürtünme kavramı, birbiri üzerinde hareket eden iki yüzey arasında yağlayıcı madde bulunup bulunmaması bakımından, temas yüzeylerinin durumuna göre; kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme olmak üzere üç başlık incelenebilirler [69].

5.2.1. Kuru Sürtünme

Sürtünme hem istenilen hem de istenilmeyen bir olay olarak çıkar. Yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme hali kuru sürtünme olarak kabul edilmektedir. Gerçek anlamda kuru sürtünme, her türlü yabancı maddeden tam olarak arındırılmış, yüzeylerin, mutlak basınçta birbirlerine göre izafi olarak hareket ettirilmeleri durumunda meydana gelmektedir. Atmosfer şartlarındaki sürtünme durumlarında, yüzeyler çok iyi bir şekilde temizlenmiş olsalar dahi, sürtünme sonucunda sıcaklığı yükselen yüzeylerde çok ince oksit tabakaları oluştuğu

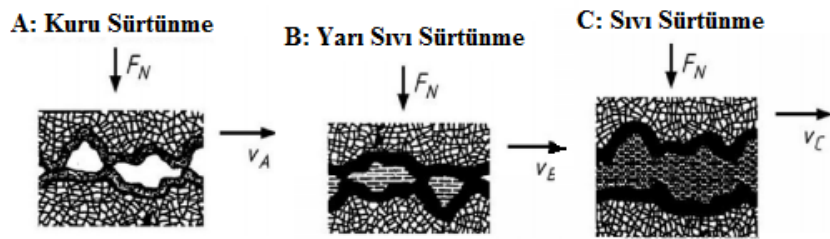
bilinmektedir. Bu oluşum, yzeylerin srttlenme ve aşınma davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir [71].

5.2.2. Sınır (Yarı Sıvı) Srttlenme

Srttlenen iki yzeyin arasına yağlayıcı olarak tanımlanan madde girmesi durumunda yzeylerde kuruluk olmayacaktır. Böylece srttlenme yağlanmış yzeyler arasında gerekleēecektir. Yağlanmış iki yzey arasında sınır ve film srttlenmesi oluşur. Kuru srttlenme ile film srttlenmesi arasındaki srttlenme durum sınır srttlenmesi olarak adlandırılır. Birbiri ile temas olan iki metal yzeyi arasında belirli fiziksel özelliklere sahip üçüncü bir madde yağlayıcı koyulup, mevcut yük ve kayma hızı koşullarında kesintisiz bir yağlayıcı film oluşmadığı kabul edildiğinde, srttlenme direncinin üç temel bileşeni olacaktır. Bu dirençler adhesiv bileşeni, deformasyon bileşeni ve yağ filminin kayma direncidir [69].

5.2.3. Sıvı (Film) Srttlenme

İki yzey arasında srttlenmeyi azaltmak için bir yağlayıcının bulunması, srttlenme direncini azalttığını deneysel olarak kanıtlanmıştır. En ideal tribolojik ortam, i srttlenme direnci çok düşük olan kesintisiz bir ara tabakanın oluşumu ile ortaya çıkmaktadır. Bu duruma bağlı hareket yapan iki yzeyin arasında oluşabileceği adhesiv ve deformasyon dirençleri ortadan kalkmaktadır. şekil 5.3'te Kuru, sıvı ve yarı sıvı srttlenmeleri görülmektedir[69].



şekil 5.3. Kuru, yarı sıvı ve sıvı srttlenmeleri [69].

5.3. SRTTLENME KATSAYISI DEğERLERİ

İki malzeme birbirine temas edecek şekilde yerleştirilirse, malzemelerin birbiri üzerinde kaymasını sağlamak için uygulanan kuvvete dik yönde olacak şekilde, bir srttlenme kuvveti oluşur. Vakumda, çok iyi temizlenmiş metal yzeylerini birbirleri üzerinde kaydırmak mümkün değildir. Kayma kuvveti, birleşme noktalarında yüksek plastisite ve

tamamen yapışmaya sebep olmaktadır. Bu olay metalden yüzey filmini kaldıran ortamlarda metalik birleşme noktalarında oksit filmi oluşturarak μ değerinde büyük ölçüde azalmaya neden olur. Altın haricindeki bütün metaller, yüzeylerinde belirli bir kalınlıkta oksit filmi oluştururlar. Pürüz uçlarında oluşan oksit filmleri arasındaki birleşme noktalarının, kayma esnasında ana metalden daha gevrek ve düşük mukavemetli oldukları saptanmıştır. Bu durumda yüzeyler ince oksit tabakası üzerinde, metalin kendisinden daha düşük gerilme değerinde kayacak ve buna bağlı olarak μ değeri 0,5-1,5 arasında azalacaktır [69].

5.4. SÜRTÜNME KANUNLARI

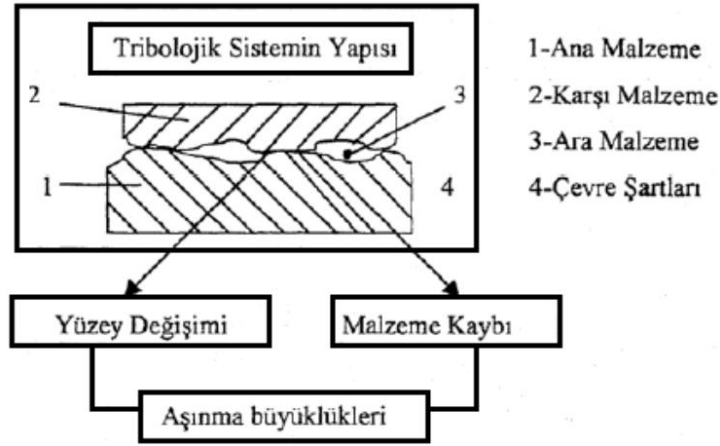
Araştırmalara göre sürtünme kuvveti ile bilinen ilk çalışma 1452-1519 yılları arasında olmuş ve Leonardo da Vinci'ye aittir. Da Vinci'ye göre sürtünme katsayısının sürtünme kuvvetini normal yüke oranı olduğunu bulmuştur. Ünlü fizikçi Amontons 1699 yılında sürtünme kuvvetini yeniden keşfetmiştir ve Amontons'a göre sürtünme iki ana kurala dayanmaktadır. Bunlar: Sürtünme kuvveti normal kuvvet ile orantılı olması ve sürtünme kuvveti görünür temas alanından bağımsız olmasıdır. [72].

Bu kurallar ünlü fizikçi Coulomb tarafından da kabul edilmiştir. Coulomb bu iki kurala ilaveten üçüncü bir sürtünme kuralı olarak ta sürtünme kuvveti kayma hızından bağımsız olduğunu ifade etmiştir. Bu üçüncü kural statik sürtünme ile dinamik sürtünmenin birbirinden farklı olduğunu ortaya koymuştur [72].

5.5. AŞINMA

Katı cisimlerin yüzeylerinde farklı etkenlerden dolayı malzeme kayıplarının ortaya çıkması olarak aşınma tanımlanır. Aşınma, temas eden yüzeylerden mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak ta bilinir. Aşınma, katı hal temasında bulunan iki katı yüzeyin birinden veya her ikisinden malzeme kaybı prosesidir [73]. Alman standardı (DIN 50320) ve Uluslararası standardı (ASTM) G40-93'e göre aşınma; Katı, sıvı veya gaz karşı cinsine göre izafi hareket ve temas şeklinde mekanik bir etkiden dolayı katı bir cisim yüzeyinden malzemenin ileri derecede istenilmeyen kaybı' olarak tanımlanmaktadır. Katı cisimlerin yüzeyleri oksitlerle ya da yağlayıcılarla kaplı olsalar bile oksit filminin mekanik yük altında parçalandığı ve yağlayıcının adsorbsiyonunun zayıf olduğu yerlerde, yer-yer katı-katı teması olur. Bu temaslar ise aşınmaya neden olmaktadır [74].

Şekil 5.4'te Tribolojik bir sistemin şematik olarak gösterimi verilmiştir. Şekle göre bir aşınma sisteminde; ana malzeme yani aşınan, karşı malzeme yani aşındıran, ara malzeme, yük ve hareket temel unsurlar sayılmaktadır [75].



Şekil 5.4. Tribolojik bir sistemin şematik olarak gösterimi [74].

5.5.1. Aşınma Türleri

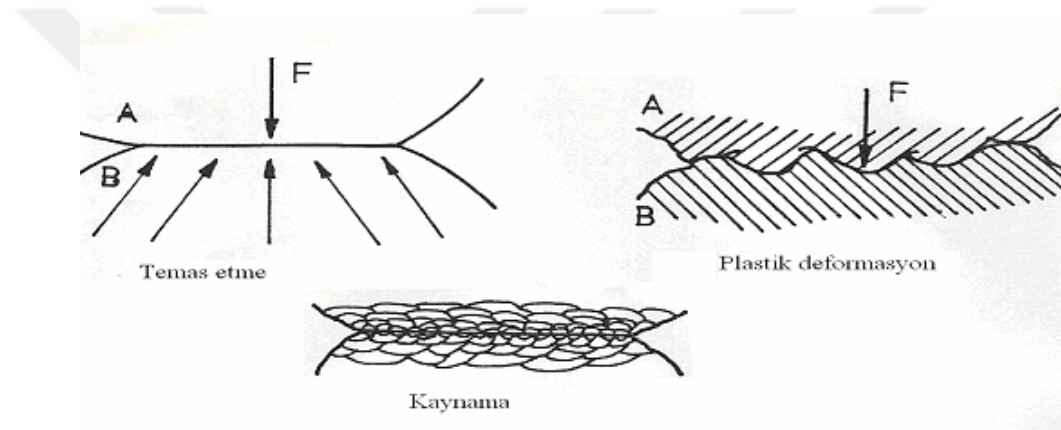
Aşınma, üretim süreci sırasında kırılma hasarı kadar önemli olan bir hasar olmamasına karşı, malzeme ve enerji kaybı nedeniyle ekonomik olarak pahalı bir hasar mekanizması olarak bilinir. Aşınma, hareketli makine parçalarının ömürlerini, performanslarını azaltan ve bu parçaların bozulmasına neden olan, bozulan parçaların makinenin bütününe etkileyecek derecede hasara yol açabilecek olması için çok önemli bir faktördür. Bu sebeple, ekonomik açıdan aşınmasının neden olduğu kayıplar ve hasarlar çok büyük olmakla beraber çok dikkat edilmektedir. Rabinowicz aşınmayı dört temel grupta toplamıştır [76]. Bunlar; adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, kalkma veya oyuklanma ve kimyasal veya korozyif etkidir. Problemin doğru olarak çözülmesi için aşınma mekanizmasının çok iyi anlaşılması gerekmektedir [75].

5.5.1.1 Adhezif Aşınma (Yapışma Aşınması)

Özellikle kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında görülerek adhesiv çekim kuvveti oluşturmaktadır. [76]. Aşınma türleri arasında en çok rastlanan aşınmadır. Bu aşınma türü, birbirleriyle temas halinde bulunan iki metalin yüzeylerinin, yüksek basınç ve meydana gelen yüksek sıcaklık ile birlikte, temas yüzeyinde kayma meydana gelmektedir. Çalışma esnasında bu kaynaklar birbirlerinden ayrılırken yüzeylerinden ufak parçacıklar kopar. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya Adhesiv denir [77]. Adhezif aşınma prosesleri, katı malzemelerin

atomik boyutta temas halinde olmaları durumunda oluşan arayüzeyssel adhezif birleşme noktaları tarafından başlayarak normal bir yük uygulandığı zaman, çıkıntılardaki bölgesel gerilmesinde yükselme görülür.

Birbiriyle etkileşim içerisinde bulunan metaller, yüzeylerindeki pürüzler vasıtasıyla temas gerçekleşir. Çok düzgün yüzeylerde bile pürüzler söz konusudur. Metalin ağırlığında veya herhangi bir yükleme durumunda, pürüz tepelerinde meydana gelen gerilme sonucu plastik deformasyon oluşur. Şekil 5.5'te görüldüğü gibi Adhezif aşınmada oluşan kaynak bağında ki kaynak soğuk kaynak olarak tarif edilebilir. Bu bölgeler izafi hareket durumunda, sürtünme kuvvetinin etkisiyle kırılarak yüzeyler arasına taşınır. Bu şekilde meydana gelen malzeme kaybına Adhesiv aşınma denir [75].

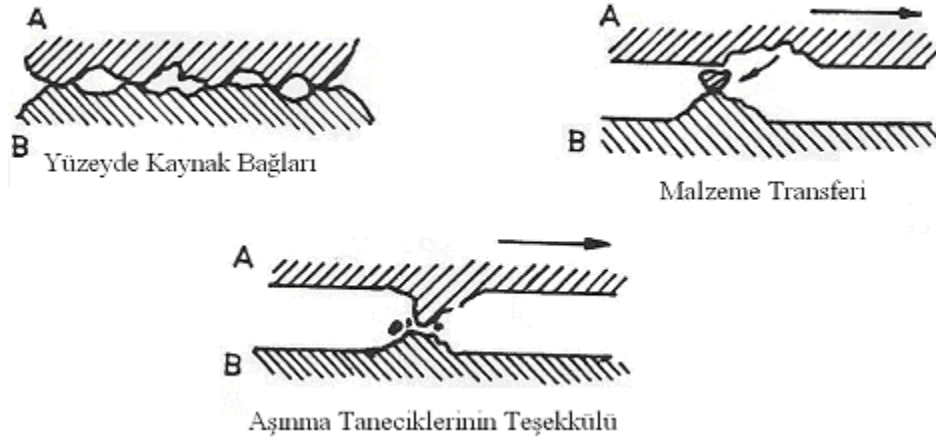


Şekil 5.5. Adhesif aşınmada oluşan kaynak bağı [78].

Sürtünme sırasında malzemenin dışında meydana gelen kaynak bağlarının kırılması tam temas yüzeylerinde meydana gelmesi durumunda malzemenin kaybı olmadığı görülür [77]. Fakat kırılmanın malzemenin temas yüzeyinin uzağında veya herhangi birinin içinde olması durumunda, kırılan parçalar bir yüzeyden diğer yüzeye geçerek malzeme transferi meydana gelmektedir. Şekil 5.6' da adhesiv aşınmada oluşan kaynak bağlarının kopması ve malzeme transferi şematik olarak gösterilmiştir [79].

Metallerin birinin diğerine göre yumuşak olması durumunda, meydana gelen kaynak bağı vasıtasıyla kırılma yumuşak malzemede olur ve malzeme transferi sert olan malzemeye doğru oluşur. Malzemelerin farklı sertlik değerlerinin oluşturduğu bu durum, malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken bir etkidir. Fakat yüzeyde bulunan nitrürler ve oksitler koparak yumuşak malzemeye gömülerek sert olan malzemeyi aşındırabilir [80]. Ortam ısısı, yüzey pürüzlülüğü, hareket hızı ve ortam

basıncı aşınmanın şiddetini arttıran temel faktörlerdendir [81].



Şekil 5.6. Kaynak bağlarının kopması ve malzeme transferi [79].

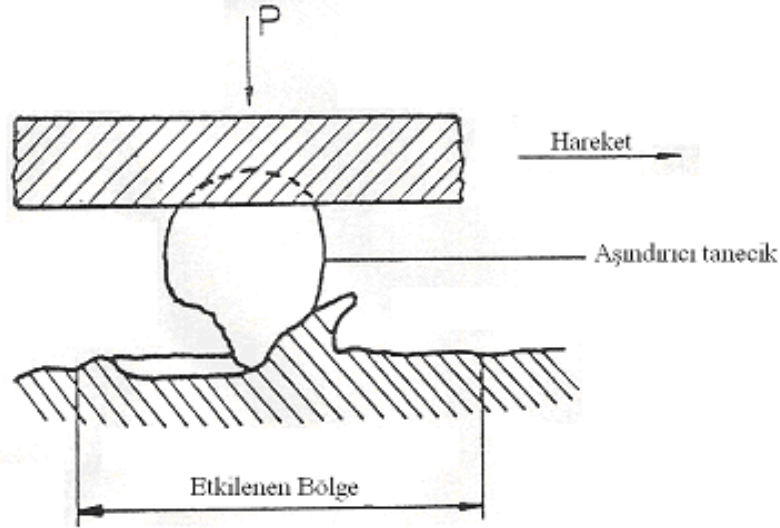
Adhesif aşınmaya en büyük etkenlerden biri metaller arasının yağlanmasıdır. Metal - metal aşınmasında metal yüzeylerin sürtünmesi ve birbiri üzerinde kayması sırasında yüzeylerden parçacıklar kopar ve kopan bu parçacıkların aşındırmayı hızlandırmasında etkin rol oynar [82].

5.5.1.2. Abrazif Aşınma

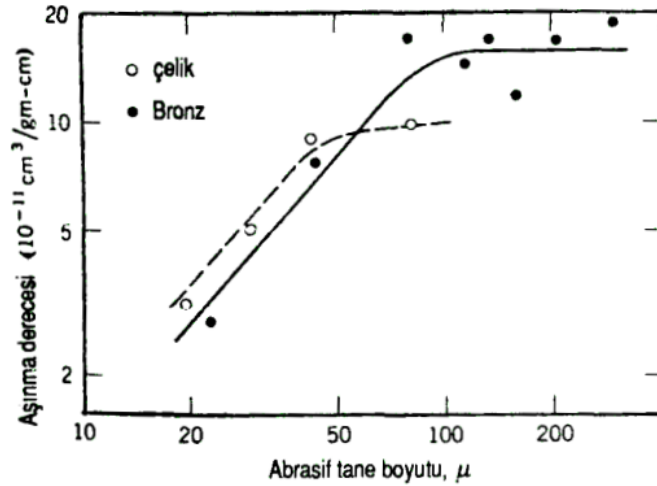
Abrazif aşınma, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle basınç altında etkileşmesiyle, sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması şeklinde tanımlanabilir. Çizilme ve yırtılma aşınması olarak da adlandırılan bu aşınma, hızlı aşınma hasarına neden olan bir türdür. İki elemanlı abrazif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucunda meydana gelmektedir [73].

Üç cisimli abrasiv aşınma ise, metal-metal sürtünmesi durumunda adhesiv veya iki cisimli abrasiv aşınma olarak başlayıp üç cisimli abrasiv aşınma olarak devam edebilmektedir. Bu aşınmada iki metal arasına sert tanecikler girer ve malzeme üzerinde çizikler hatta oyuklar oluşturarak aşınmayı meydana getirir [83]. Araya giren tanecikler toz, kum, mikro talaşlar ve parçalanmış oksit tabakaları vb. taneler olabilir hatta sürtünen malzemelerden kopan parçalarda olabilir [84]. Kum gibi bir parçacığın ara yüzeye girmesi sonucunda abrasiv aşınma artar ve her iki yüzeyde de değişiklikler meydana getirir. Her iki yüzeyde de çizikler gözlemlenir [85]. Üç cisimli abrasiv aşınmanın aşınmayı hızlandırdığı tespit edilmiştir. Bu nedenle sert taneciklerin araya girmesine engel olunmalıdır. Hızlanan aşınma malzeme kaybına neden olup ekonomik yönden büyük etkiler yaratabilir [84]. Malzemelerin yüzeylerinin durumları

değiştirilerek korozyona, çarpmaya ya da abrasiv aşınmaya karşı direnci artabilir [82]. Şekil 5.7 'de üç cisimli abrasiv aşınma mekanizması şematik olarak görülmektedir [79]. Abrasiv aşınmadaki sürtünme katsayısı metal malzemenin mekanik davranışına ve abrasiv parçanın karakteristikleri, özellikle abrazyon durumunda geometrisine göre değişmektedir [86].



Şekil 5.7. Üç cisimli abrasiv aşınma mekanizması [79].



Şekil 5.8. Abrasif tane boyutunun fonksiyonu olarak iki metalin aşınma oranı [80].

Şekil 5.8'de Abrasif aşınmadaki tane boyutunun fonksiyonu olarak iki metalin aşınma oranı verilmiştir. Tane boyu arttıkça aşınma oranının arttığı görülmektedir. Çizelge 5.1' de verilen Abrasif aşınma proseslerinin içeriği tipik abrasiv aşınma uygulamaları ve aşınma miktarları görülmektedir. Burada görülmekte olan önemli bir durum, oymalı sürtünme aşınmasının son derece yüksek aşınma hızlarına sahip olduğu durumudur [75].

Çizelge 5.1. Abrasif aşınma proseslerinin içerdiği tipik aşınma hızları [78].

Mekanizma	Aşınma miktarı (mg/s)
Oymalı sürtünme aşınmasında östenitik mangan çeliği i. Darbeyle <i>toz</i> üretiminde kullanılan çekişler ii. İş makinelerinin dalıcı dişleri iii. Kaba cevher kazıyıcılarının aşındırıcı bıçakları iv. Top milli kepçe ağızları v. Silis cevherlerinin kırılması için kırıcı bantlar vi. Kaba silis cevherlerinin tutulmasında kullanılan oluk bantlar	5 – 1000 5 – 500 4 – 15 2 – 20 0,1 – 1,0
Yüksek gerilmeli abrasiv aşınmada düşük alaşımlı yüksek karbonlu çelikler i. Silis cevherlerinde kullanılan çubuk ve bilyeli mil bantları ii. Islak öğütülmüş silis cevherlerinin aşındırma bilyelerinde iii. Islak öğütülen ham çimento çamurundaki öğütücü bilyeler iv. Kuru öğütülen çimento klinkerlerinde kullanılan öğütücü bilyeler	0,5 – 5 0,15 – 0,45 0,05 – 0,15 0,005 – 0,015
Düşük gerilmeli abrasiv aşınmada perlitik beyaz dökme demir i. Kum püskürtme nozülleri ii. Kum taşıma bantları iii. Aşındırıcı mineral çözeltilerinin pompalanmasında kullanılan yükleyici vanalar iv. Abrasiv mineral çözeltilerinde ajitasyon ve flatasyon pervaneleri v. Kum çözeltilerinde vida tipi sınırlandırıcıların aşınan pabuçları	100 – 1000 50 – 250 0,1 – 5 0,05 – 1 0,05 – 0,2

Bir malzemenin diğer bir malzeme tarafından önemli ölçüde abrasiv aşınmaya tabii tutulabilmesi için, ikinci malzemeden çok daha yumuşak olması gerekir. Böylece iki malzeme yerine bir malzeme değişimi yapılabilirliği düşünülmektedir. Bu sebeple abrasiv aşınmayı minimuma indirmek için aşınmaya uğrayan malzemenin diğer malzemeye göre daha sert olması istenir. Bu özellik değişik metotlarla sağlanabilir. Bu metotlar; Alaşımlamayla malzemelerin sertlikleri iyi bir şekilde artırılabilirliği, Isıl işlem uygulamaları yine malzemelerin sertliklerini önemli ölçüde değiştirebilirliği ve malzemelerin yüzeylerine dışarıdan müdahale ederek sert yüzey tabakası oluşturabilirliğidir [75].

5.5.1.3. Oyuklanma ve Kalkma Aşınması

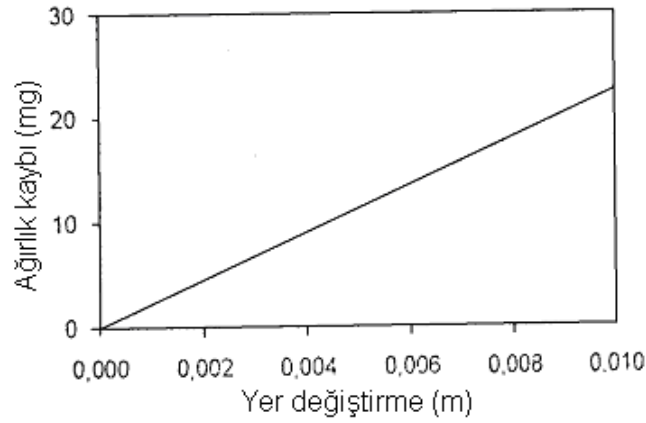
Oyuklanma ve kalkma aşınması, temas yüzeyinde küçük bir çukurun oluşmasıyla başlayarak kendini gösterir. Bu aşınma türünün görüldüğü yerler rulmanlar dişli çarklar ve kam mekanizmaları gibi makine elemanlarında, kısacası yuvarlanma hareketi yapan parça yüzeylerinde meydana gelir ve malzeme yorulması diye adlandırılır. Yüzeylerde meydana gelen Hertz basınçları, yüzeyin altında kayma gerilmesi oluşturur [79].

Malzeme yüzeyinin zorlanması nedeniyle, yüzeyde bir yorumla meydana gelir. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşlukların meydana geldiği görülmektedir. Oluşan bu boşluklar zaman geçtikçe yüzeye doğru büyüyerek ilerlemekte ve yüzeye küçük çukurların oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumda yüzeyler arasındaki yağın etkisi de önemlidir. Yüksek basınç altındaki yağın çatlaklara girmesi, bunların büyümesinde önemli rol oynayabilir. Oyuklanma ve kalkma aşınmasının diğer bir açıklama tarzı ise, çukurcukların plastik deformasyonlar nedeniyle doğrudan doğruya temas yüzeyinde meydana geldiği ve buradan malzemenin iç kısımlarına da yayıldığı ileri sürülmektedir [78], [79].

5.5.1.4 Kazıma Aşınması (Mekanik Korozyon Aşınması)

Kazıma, korozyonla desteklenen aşınma türleri arasında çok yaygın olarak bilinen bir türdür. Yük altında ve temas halinde olan malzemelerin titreşimli hareket nedeniyle oluşmaktadır. Titreşimin devam etmesi durumunda kendi kendini geliştirir. İki metal yüzey birbirine temas ettiği zaman, yük altında yüzeyde bulunan düzensizlikler sebebiyle yapışma olmaktadır [80], [87].

Şekil 5.9' da Kazımadan kaynaklanan toplam ağırlık kaybında, toplam yer değiştirme miktarının etkisi görülmektedir. Şekildeki grafik yumuşak çelikte görülen toplam ağırlık kaybı ve yer değiştirme mesafesidir. Relatif hareketin oldukça küçük boyutlu partiküllerin oluşmasına sebep olacak şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. 10^{-6} cm'lik bir yer değiştirme mesafesi bu hasara yol açabilmektedir [79].



Şekil 5.9. Kazımadan kaynaklanan toplam ağırlık kaybında, toplam yer değiştirme miktarının etkisi [79].

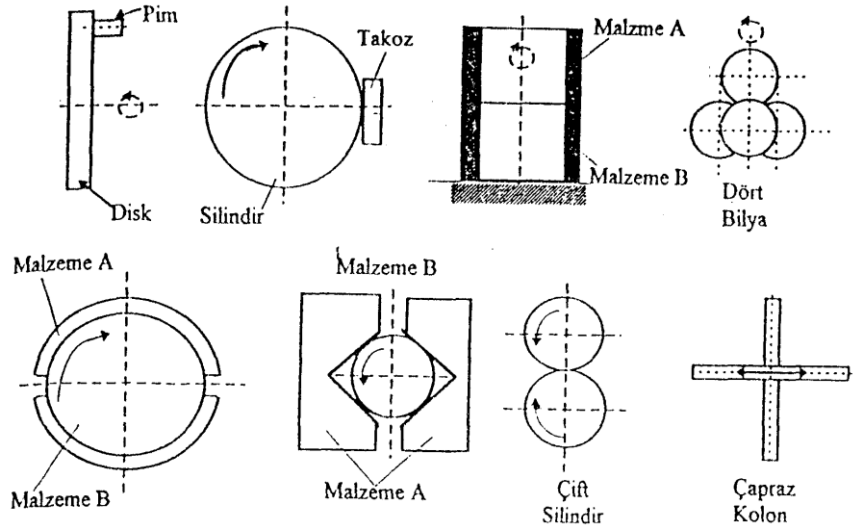
5.5.2. Aşınma Deneyleri Ve Ölçüm Yöntemleri

Endüstride malzeme kaybı istenmeyen durumdur. Malzeme kayıplarını göz önünde bulundurmayacek sektör yoktur. Özellikle makine sektöründe kullanılan makine parçalarının aşınmaya karşı dikkatle korunması gerekir. Aksi takdirde bir parçanın bütün makineyi etkileyebildiği bilinmektedir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyetini artırdığı için, onarımında geçen süre de üretimin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin tespiti için de birçok laboratuvar deneylerinin yapılması gerekmektedir. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışır. Aynısı olmaması durumunda farklı sonuçlarla karşılaşılması beklenen bir durum olmuştur. Bu model, basit geometrik şekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilmektedir [75].

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür. Bunlardan biri yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemelerinin adhesiv aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler, diğeri ise katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneylerdir. Aşınma deney sistemi olarak en çok kullanılanlar şekil 5.9 ve 5.10 de görülmektedir. Aşınma farkı kalınlık farkı, iz değişim ve radyoizotop metotları aşağıda sırasıyla açıklanmıştır [75].

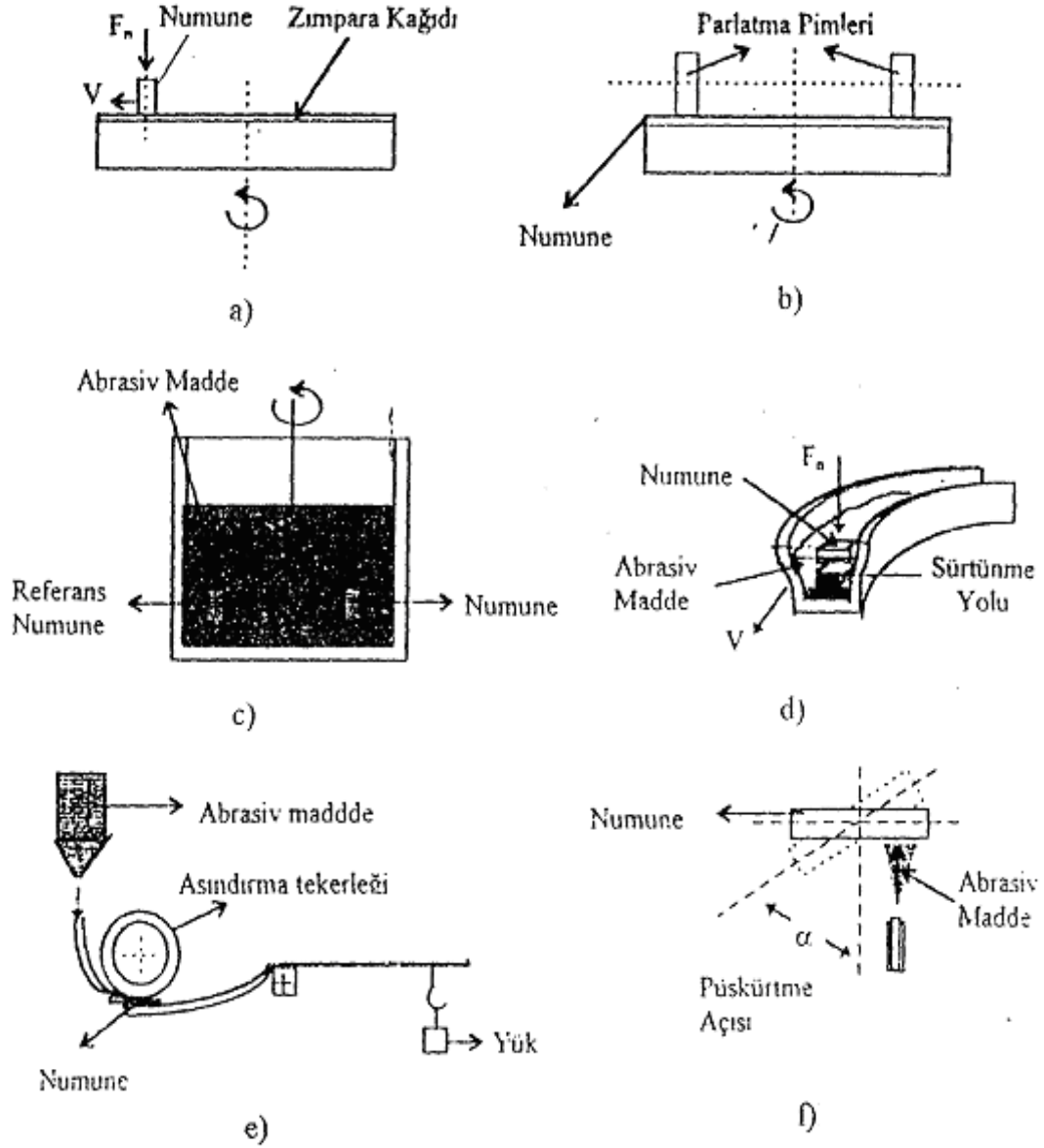
5.5.2.1. Ağırlık Farkı Metodu

Aşınma deneyleri arasında en çok kullanılan metoddur. En çok kullanılmasının nedeni ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dâhilinde bulunmasıdır. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınmaması, bu yöntemin dezavantajıdır [88].



Şekil 5.10. Yağlamalı ve yağlamasız adhesiv aşınma deney yöntemleri [88].

Şekil 5.10' da Yağlamalı ve yağlamasız adhesiv aşınma deney yöntemleri görülmektedir. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} gr. hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi ile yapılmalıdır. Aşınma miktarı gram ve miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı (gr/km), (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı, hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle, kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek de bulunabilmektedir [79]. Şekil 5.11. 'de abrasiv aşınma deneylerinde kullanılan yöntemler verilmiştir.



Şekil 5.11. Abrasiv aşınma deneylerinde kullanılan yöntemler [88], [89].

- a) Aşınma disk, b) Aşınma tablası, c) Aşınma kabı, d) Avery kabı, e) Aşınma tekerleği, f) Püskürtme lülesi.

5.5.2.2. Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma sırasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeri ile karşılaştırılması suretiyle elde edilmektedir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır, kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımıyla $\pm 1\mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülmelidir [79].

5.5.2.3. İz Değişimi Metodu

Sürtünen yüzeyde plastik deformasyon metodu ile geometrisi belirli bir iz oluşturur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun yani çapının değişimi ölçülür. İz değişimi metodu uygulamasında iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme uçlarıdır. Elmas piramit veya bilyenin bıraktığı iz boyutlarındaki değişim mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir [79].

5.5.2.4. Radyoizotop Metodu

Radyoizotop metodu, sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya α -parçacıklarıyla bombardıman edilerek, radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanan bir yöntemdir. [75].

Yöntemin avantajlı tarafı aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesidir. Dezavantajlı tarafı ise ekonomik olması nedeniyle kullanılmamakta ta ki özel bir durum gerektiren yerlerde tercih edilmektedir [78], [79].



6. MATERYAL VE YÖNTEM

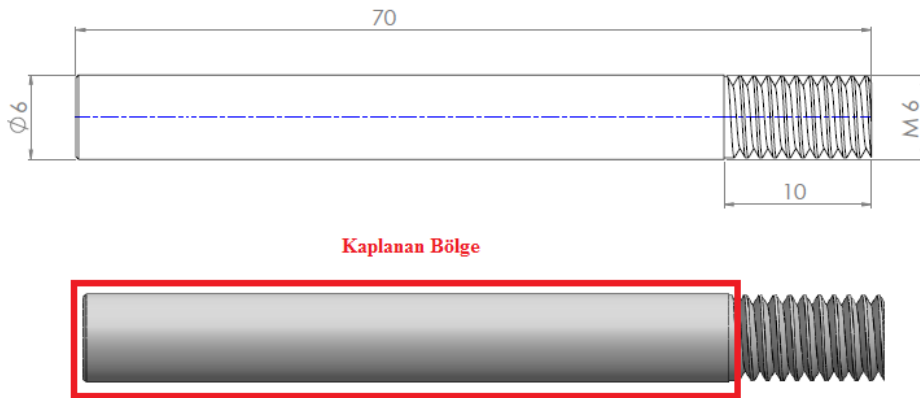
6.1. KAPLAMA DENEYİNDE KULLANILAN ARAÇ GEREÇLER VE UYGULANAN İŞLEMLER

6.1.1. Malzeme Seçimi Ve Numune Hazırlama İşlemi

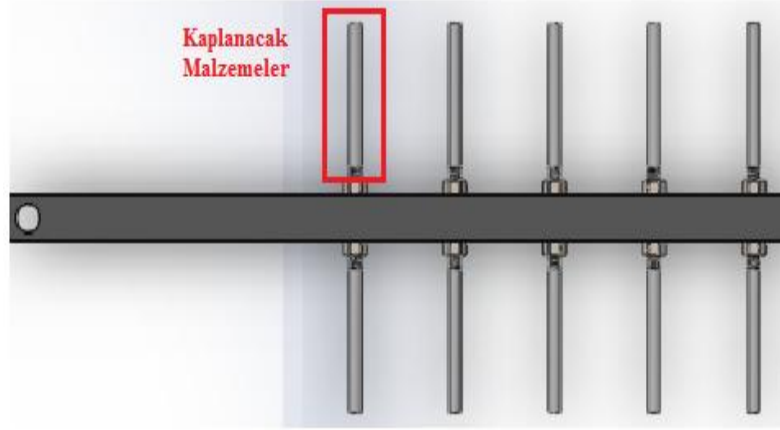
Sert krom ile kaplanan silindirik numunelerde kaplama parametrelerinin etkisini incelemek için endüstride kolay temin edilen, mekanik özellikleri düşük, St 37-2 yapısal mil çeliği kullanılmıştır. Köse Çelik Ltd. Şti'den, 3 m boyunda ve 6 mm çapında alınan mil numunelerini kaplama bağlantı aparatına ve kaplama işlemine hazırlamak için bilgisayar sayımlı yönetim (CNC) - Drehmaschine DT 43 Duo torna tezgâhı ile Şekil 6.1' de verilen ölçülerde işlenmiştir. Bu ölçüler otomobillerde kullanılan turboşarj mili ölçülerine yakın ölçülerdir. Numunelerin kaplama öncesi kaplamaya hazırlama işlemlerinde ve sert krom kaplama işlemlerinde Şekil 6.2'de görülen kaplama bağlantı aparatı kullanılmıştır. Köse Çelik Ltd. Şti. tarafından verilen yapı çeliğine ait kimyasal bileşen Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Yapı çeliğinin kimyasal analizi. (% Ağırlık)

C	Mn	Si	S	P	Fe
0,11	0,66	0,19	0,033	0,028	Kalan



Şekil 6.1. Kaplanan malzeme.



Şekil 6.2. Kaplama bağlantı aparatı.

6.1.2. Mekanik Ve Diğer Temizleme İşlemleri

Elektrolitik sert krom kaplama işleminden önce kaplanacak malzemenin keskin köşelerini ve CNC makinesinin kesme işleminden oluşan çapakları talaş kaldırma yöntemiyle aşındırarak yuvarlatılmıştır. Keskin köşelerin yuvarlatılmasından sonra oluşan yüzeyi daha temiz hale getirmek amacıyla ince SiC tozu emdirilmiş keçeyle polisaj kullanılıp, bez keçeyle ve pasta kullanılarak yüzeyleri parlatılmıştır.

Yüzeyleri parlatılan numuneler saf alkol ile yıkanıp kurutulmuştur. Sonrasında sıcaklığı 40 °C' ye yakın sabunlu su ile tekrar yıkanıp, basınçlı hava ile kurutularak elektrolitik yağ alma işlemine geçilmiştir.

6.1.3. Elektrolitik Yağ Alma Ve Aside Daldırma İşlemi

Kaplama öncesi son işlemler olan elektrolitik yağ alma ve aside daldırma işlemi uygulanmıştır. Kapanacak malzemelerin daha hassas bir temizliğe tabi tutarak kaplanmaya hazır hale getirilmiştir. Bunun için deney numunelerine, önce elektrolitik yağ alma işlemi sonrasında ise aside daldırma işlemi uygulanmıştır. Elektrolitik yağ alma işleminde numuneleri ilk önce anot olarak bağlayıp 40-60 °C sıcaklığında ve 8-16 A/m² akım yoğunluğunda 1-2 dakika tutup, daha sonra katot olarak bağlayıp aynı sıcaklıkta ve 5-10 A/dm² akım yoğunluğunda 15-30 saniye tutularak elektrolitik yağ alma işlemi tamamlanmıştır. Buradan çıkan ve yüzeylerinden yağı tamamen temizlenen numuneleri sırasıyla daldırıp çıkarma yöntemiyle önce oda sıcaklığındaki saf suya sonra %5 sülfürik asitli suya ve sonrasında tekrar saf suya daldırılıp kaplama banyosuna girmeye hazır hale getirilmiştir. Daldırıp çıkarma işlemine her daldırmada malzemeler 5-10 saniye bekletilerek çıkarılmıştır. Hazırlanan malzemeleri kaplamak için kaplama öncesi ve kaplama işlemi Selen Kimya firmasında gerçekleşmiştir.

6.1.4.Elektrolitik Sert Krom Kaplama İşlemi Ve Kullanılan Araç Ve Gereçler

Krom kaplama tankı polivinil klorür'den (PVC) olup içerisine elektrikli titan muhafazalı ısıtıcı yerleştirilmiş, anot ve katot çubukları için lama kesitli bakır malzeme kullanılmıştır. Anotlar %7 kalay, %93 kurşun içermektedir ve yüzeyi şeritli olarak dört anot seçilmiştir. Güç kaynağı olarak Mersan marka 15 volt 300 amperlik redresör kullanılmıştır. Sert krom kaplama banyosuna ait kimyasal değerler; Kromik asit (CrO_3) 250 gr/lt, Sülfürik asit (H_2SO_4) 25 gr/lt, gaz kesici 100 cc şeklindedir. Kaplama sıvısını hazırlamak için Kromik asidi su ile karıştırıp üzerine Sülfürik asit eklenmiştir. Daha sonra kaplama esnasında dışarıya çıkabilecek gaz için, gaz kesici eklenip karıştırılarak homojenlik sağlanmıştır. Kaplama banyosuna ait görüntüler Şekil 6.3' de verilmiştir.



Şekil 6.3. Kaplama banyosu

Elektrolitik sert krom kaplama işlem parametrelerinde değişken olarak akım yoğunluğu, sıcaklık ve anot-katod arası mesafe kullanılmıştır. Kaplama deney parametreleri Çizelge 6.2' de verilmiştir. Değişken parametreler ve değiştirilmeyen parametreler kaplama işlemi boyunca sürekli kontrol edilerek kaplama gerçekleştirilmiştir. Numunelerin banyo içerisinde bekleme süreleri 1 saat, banyo pH değeri 5,1 olarak sabit tutulmuştur.

Çizelge 6.2. Numune sıralaması ve deneysel parametreler.

Deney Numune No	Akım Yoğunluğu (Amp/dm²)	Kaplama Banyo Sıcaklığı (°C)	Anot-Katot Arası Mesafe (mm)
1 Nolu Numune	25	40	100
2 Nolu Numune	25	40	200
3 Nolu Numune	25	60	100
4 Nolu Numune	25	60	200
5 Nolu Numune	55	40	100
6 Nolu Numune	55	40	200
7 Nolu Numune	55	60	100
8 Nolu Numune	55	60	200
9 Nolu Numune	40	40	100
10 Nolu Numune	40	40	200
11 Nolu Numune	40	60	100
12 Nolu Numune	40	60	200

Her bir deneysel parametre için yaklaşık 50 adet numune sert krom kaplama yapılmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler, kaplama açısından sorun olmayan ve hatasız kaplanmış parçalardan seçilmiş ve tüm deneysel çalışmalar bu numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kaplama işleminden sonra banyodan çıkan numuneler iki aşamalı su ile yıkama ve su ile durulama aşamasından geçirilerek talaş ve hava ile kurutulmuştur.

6.1.5. Kaplanan Numunelerin Metalografik İşlemler İçin Hazırlanışı

Kaplanmış malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama merkezinde gerçekleştirilmiştir. Kaplanan malzemelerden metalografik inceleme için ayrılan numuneler, aşındırarak kesme yöntemiyle kaplama kalınlığı, mikro sertlik ve mikro yapı incelemelerini yapabilmek için ortadan dikine kesilerek küçük numuneler haline, 3x5 mm ölçülerine getirilmiştir (Şekil 6.4). Küçük parçalar haline getirilen numuneler üzerinde kolay çalışabilmek için Şekil 6.5' de verilen bakalit alma cihazı ile tutulabilir hale getirilmiştir.



Şekil 6.4. Kaba ve hassas numune kesme cihazı.



Şekil 6.5. Bakalit alma cihazı.

Bakaliti alınan numune yüzeylerini Şekil 6.6' da verilen parlatma ve zımparalama cihazı ile 180-400-600-800-1000-1200 lük numaralı zımparalarla zımparalanıp sonrasında ise 6-3-1 mikron elmas pasta (alümina süspansiyon) kullanılarak parlatma keçesinde parlatılmıştır.



Şekil 6.6. Parlatma ve zımparalama cihazı.

6.1.6. SEM/EDS Analizleri Ve Mikro Sertlik Ölçümleri

Yüzeyleri parlatılan numuneleri % 2'lik Nital çözelti ile dağladıktan sonra mikro yapı incelemeleri, kaplama kalınlık ölçümü ve mikro yapı fotoğrafları Şekil 6.7'deki QUANTE FEG 250 marka Taramalı elektron mikroskobu (SEM/EDS) ile çekilmiştir.



Şekil 6.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobundan çıkan numunelerin yüzey mikro sertliğini ölçmek için Şekil 6.8'de verilen DIGIROK marka cihazda, Vickers sertlik ölçüm metoduyla ölçülmüştür.



Şekil 6.8. Dijital mikro sertlik test cihazı.

Ölçme işlemi için, piramit şeklindeki elmas uca tatbik edilen yük 100 gr olarak belirlenmiştir. Bu yük, 10 saniye kaplama üzerine uygulanarak piramit ucun kaplama üzerine iz bırakması sağlanmıştır. Bu izler cihazda incelenerek, köşegen mesafeleri ölçülüp numunelerin mikro sertlik değerleri bulunmuştur.

6.1.7. Aşınma Testi

Kaplanan numuneler önceden 6 mm çapında ve 55 mm boyunda hazırlanmış olup, aşınma testleri Pin-On-Disc aşınma cihazında disk üzerine 1200 kumluk zımpara kâğıdı bağlanarak abrasif aşınma, Şekil 6.9'daki Düzce Üniversitesi Tasarım Prototipleme Merkezinde bulunan aşınma test cihazı düzeneği ile yapılmıştır.



Şekil 6.9. Aşınma test cihazı.

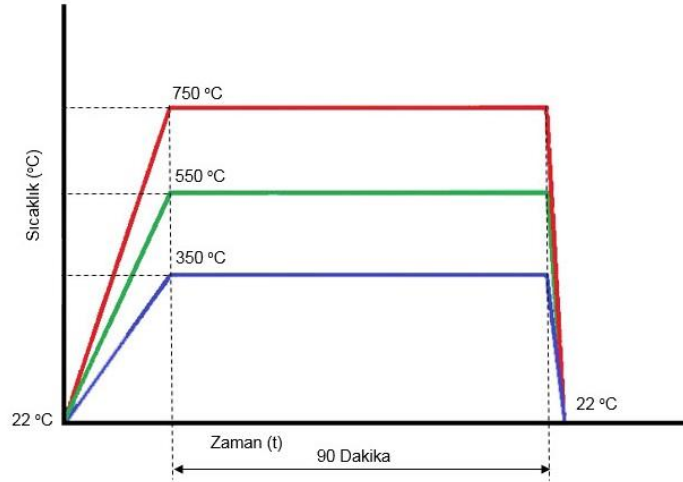
Numuneler önce 10N ve 25N'luk yük altında sırasıyla 250 ve 1000 metre mesafelerde aşındırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Fakat 10N ve 25N ağırlık altında gözlenen aşınma kaybı göz ardı edilecek kadar az olduğundan, önceki literatür araştırmaları ışığında sadece 40N yük altında ve 250, 500, 750, 1000 ve 5000 metre mesafelerinde aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her aşınma deneyinde, disk üzerinde yeni 1200 kumluk zımpara kâğıdı kullanılmıştır. Aşınma testinde ağırlık kaybı yöntemi kullanılmıştır. Ağırlık kaybı ölçümleri için Şekil 6.10'da verilen analitik hassas terazi kullanılmıştır.



Şekil 6.10. Analitik hassas terazi.

6.1.8. Termal Şok Testi

Kaplanan malzemelerin çalışma ortamından ya da çevresindeki ortamdan kaynaklanan ani sıcaklık değişimlerinin fiziksel hasara yol açması adına yapılan bir testtir. Isıl işlem fırını içerisine yerleştirilen deney numuneleri 350 °C, 550 °C ve 750 °C sıcaklıklarda 90 dakika ısıtılarak çalışma ortamındaki sıcaklık etkisi incelenmiştir. Şekil 6.11.'de Termal şok işlem grafiği görülmektedir.



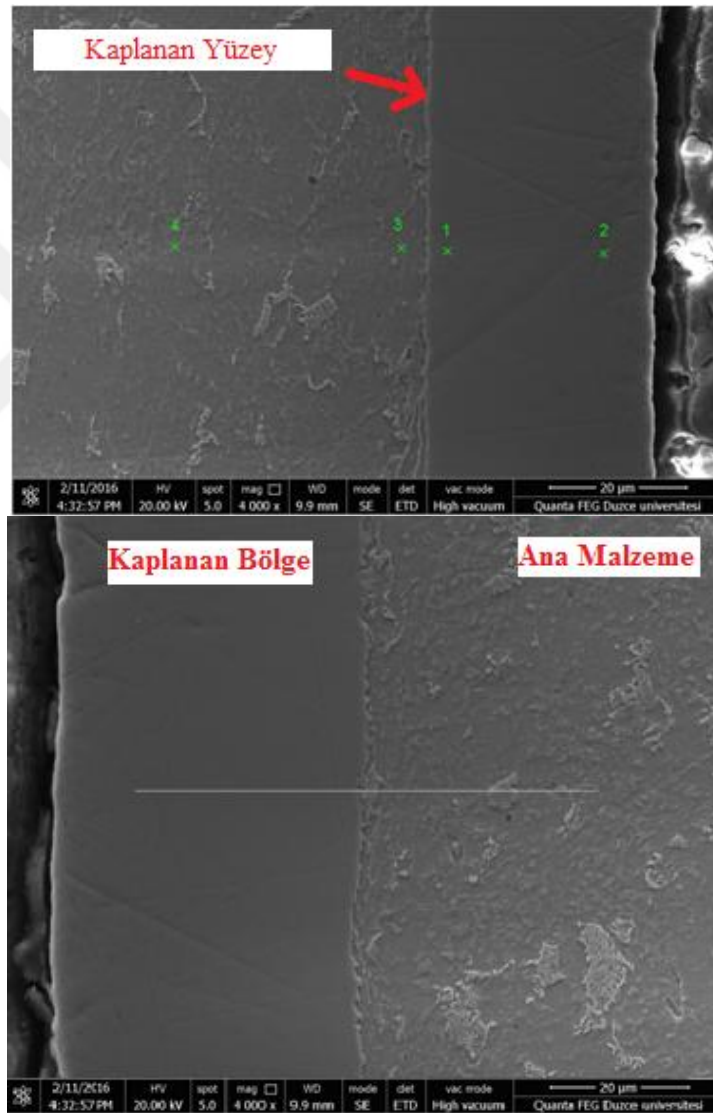
Şekil 6.11. Termal şok işlem grafiği.

Her sıcaklık değeri için yeni numuneler kullanılmıştır. Şekil 6.12.'de verilen ısıl işlem fırınından çıkan numuneleri hiç beklemeden oda sıcaklığındaki su içerisinde hızla soğutarak, kaplama yüzeyinde oluşan değişimler incelenmiştir.



Şekil 6.12. Isıl işlem fırını.

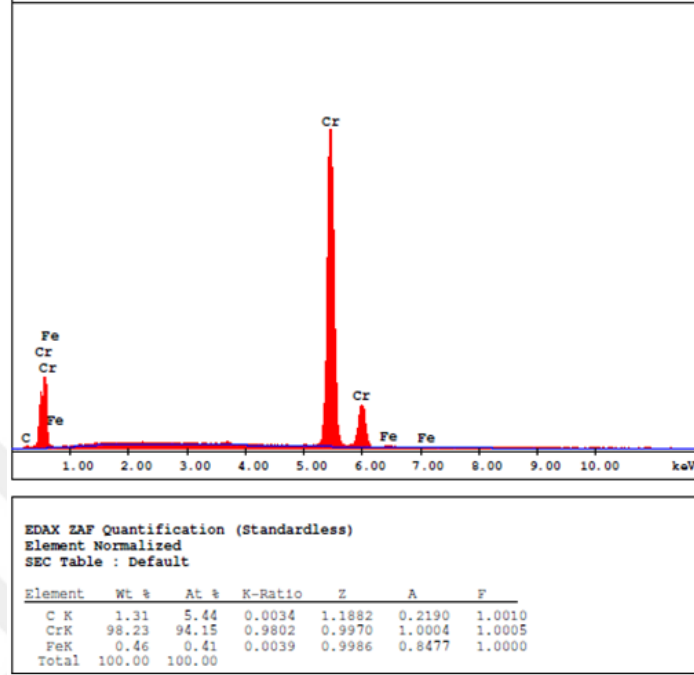
analizlerinin sıralaması kaplama bölgesinden başlayarak ana malzemeye doğru ve kaplama kalınlıklarına göre eşik aralıklarda seçilerek yerleştirilen noktalarda gerçekleştirilmiştir. İlk nokta kaplanan yüzeyine yakın olan kaplama bölgeden seçilmiştir. İkinci nokta kaplama bölgesinin yüzey kısmına (malzemeye gelen darbe ve çevre etkilerini karşılayacak olan ilk kısım) yakın olan bölgeden seçilmiştir. Üçüncü nokta ana malzeme üzerinde kaplanmış bölgeye yakın seçilerek kaplamadan oluşan her hangi bir değişiklik olup olmadığı incelenmiştir. Son olarak dördüncü kaplama ise ana malzemeden kaplama bölgesine eşit uzaklıkta seçilerek nokta analiz işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.2. Numunelere ait genel nokta ve çizgi analizleri.

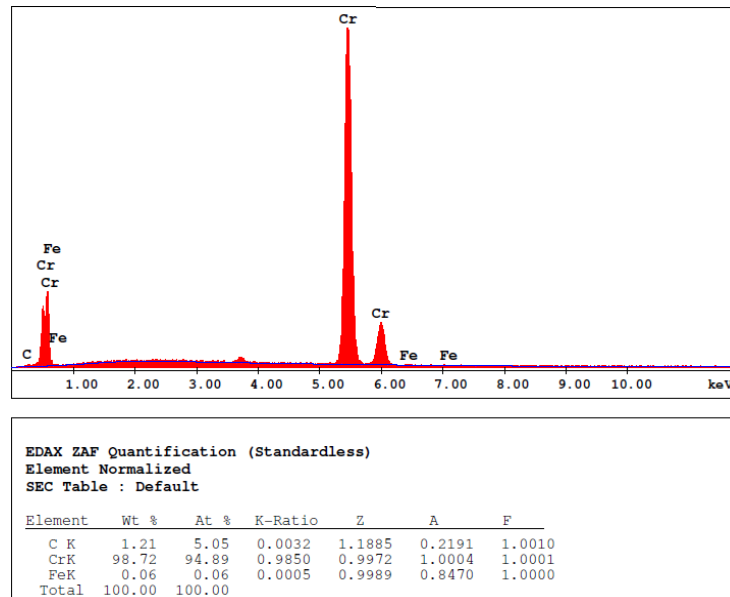
Şekilde 7.2.'de verilen nokta ve çizgi analizlerinin değerlendirmesi aşağıda yapılan incelemeler sunulmuştur. Her bir nokta için o ayrı-ayrı sonuç alınmış ve grafiğe dönüştürülmüştür. Alınan sonuçlarda nokta bölgesine göre hangi element değerinin

fazla olduğu hangi element değerinin eksik olduğu açıkça görülmektedir. Krom, karbon ve demir dengesi ölçülüp kaplama etkisi incelenmiştir. İncelenen her bir deney malzeme için yapılan bu analizin örnek olarak nasıl yapıldığı aşağıda verilmiştir.



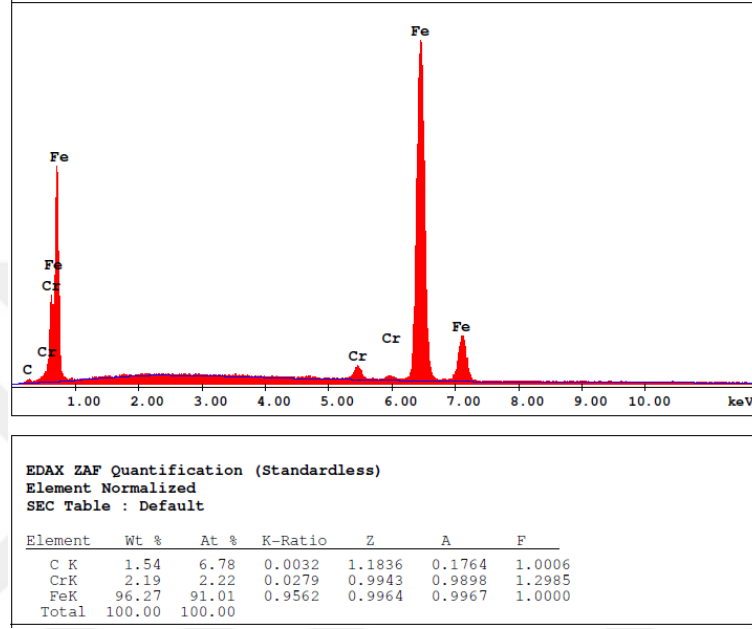
Şekil 7.3. 1 Numaralı nokta (EDS) analizi.

Şekil 7.3' de verilen nokta analizinde bir numaralı nokta üzerinde yapılan ölçümlerin, nokta izinin kaplanan bölge yüzeye yakın olduğunu ve krom (Cr) değerinin fazla olduğundan kaplama bölgesi üzerinde olduğu anlaşılmaktadır. Bu bölge için beklenen sonuçlar gözlenmiştir. Grafikte krom değerinin % 98.23, demir (Fe) değerinin % 0.46 olduğu görülmektedir.



Şekil 7.4. 2 Numaralı nokta (EDS) analizi.

Şekil 7.4' de verilen nokta analizinde iki numaralı nokta üzerinde yapılan ölçümlerin, nokta izinin kaplama bölgesi yüzeyine yakın olduğunu ve krom (Cr) değerinin fazla olduğundan kaplama bölgesi olduğu anlaşılmaktadır. Bu bölge için beklenen sonuçlar gözlenmiştir. Bu noktada demir (Fe) değeri % 0.06, krom değerinin % 98.72 olarak görülmektedir. Alınan değerlere göre demirin olmadığı tamamen kaplama bölgesinde yapılan analiz olduğu yorumlanabilmektedir.



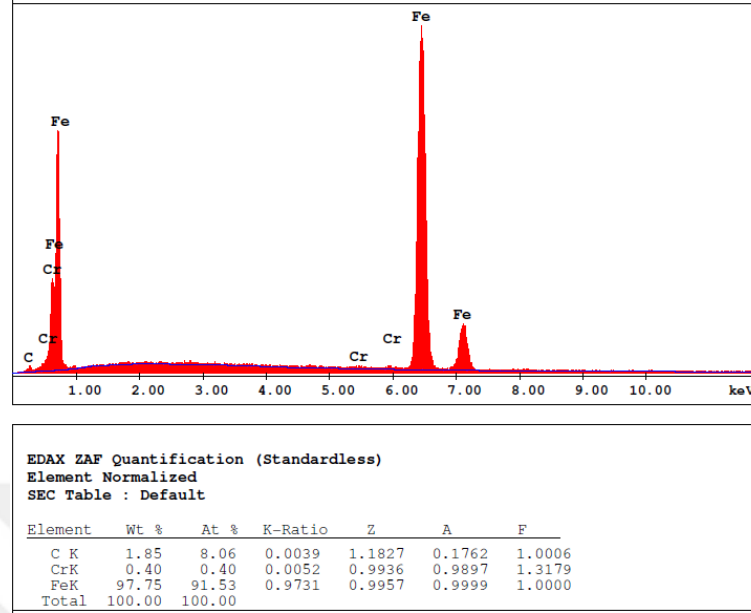
Şekil 7.5. 3 Numaralı nokta (EDS) analizi.

Şekil 7.5' de verilen nokta analizinde üç numaralı nokta üzerinde yapılan ölçümlerin, nokta izinin kaplanan yüzeye yakın olduğunu ve demir değerinin fazla olduğundan ana malzeme üzerinde olduğu anlaşılmaktadır. Bu bölge için beklenen sonuçlar gözlenmiştir. Bu noktada demir değerinin % 96.27 krom değerinin ise % 2.19 olduğu görülmektedir.

Şekil 7.6' da ise verilen nokta analizinde dört numaralı nokta üzerinde yapılan ölçümlerin, nokta izinin kaplanan yüzeye uzak olduğunu ve demir değerinin fazla olduğundan ana malzeme üzerinde olduğu anlaşılmaktadır. Bu bölge için beklenen sonuçlar gözlenmiştir. Bu noktada demir değerinin % 97.75 krom değerinin ise % 0.40 olduğu görülmektedir. Alınan değerlere göre demir değerinin fazla olduğundan tamamen ana malzeme üzerinde yapılan analiz olduğu yorumlanabilmektedir.

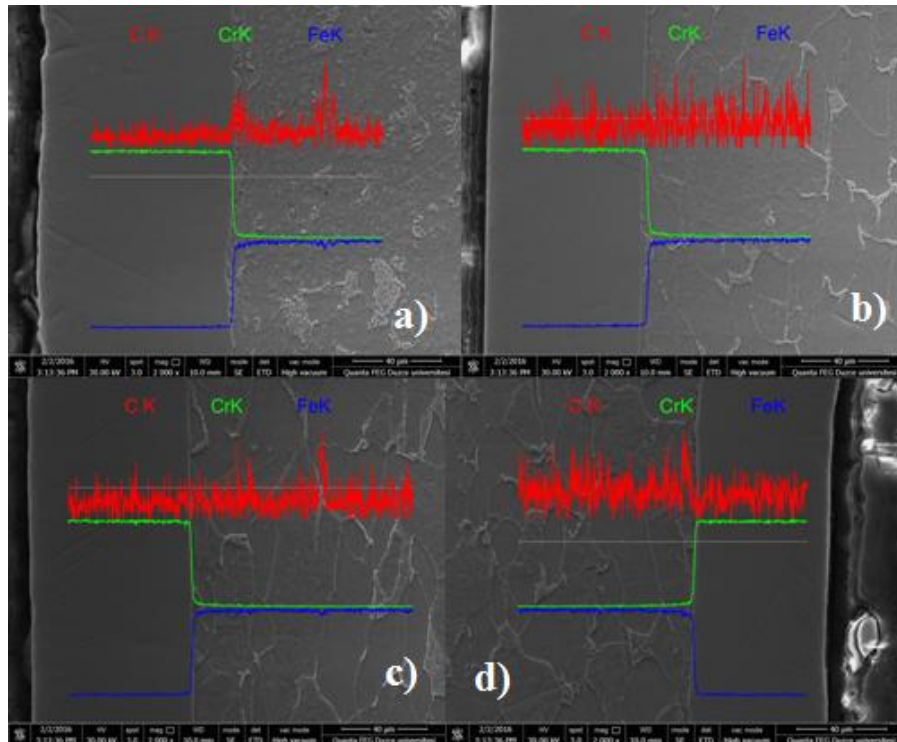
Her nokta analizi için değerler yüzdelik (%) olarak verilmiş, kalan değerlerin karbon (C) olduğu grafik üzerinde belirtilmiştir. Karbon oranını, analiz noktasının sementit

bölgesine yakınlık değeriyle değışti ve genel olarak sabit olduğu görölmektedir. Bu oran çizgi analizinde daha açık bir şekilde görölmektedir.



Şekil 7.6. 4 Numaralı nokta (EDS) analizi.

Nokta analizinde olduğu gibi çizgi analizinde de her malzeme için ayrı-ayrı çizgi analizi yapılmıştır. Çizgi analizi SEM cihazından mikro yapı üzerine kaplama bölgesinden ana malzeme bölgesine çizilen bir çizgi üzerinden yapılmıştır. Yapılan analizde çizgi boyunca krom, demir ve karbon oranları incelenmiştir.



Şekil 7.7. Genel çizgi analizleri.

Şekil 7.7' de sert krom kaplanan deney numunelerinin genel çizgi analizleri görülmektedir. Çizgi analizleri SEM cihazında mikro yapı üzerinde yapılmıştır. Krom, demir ve karbon değerlerine göre incelenmiştir. Çizilen çizgi boyunca ortalama 660 adet nokta üzerinden veriler aktararak grafik oluşturulmuştur. Şekilde görülen grafiklerde analiz çizgisinin kaplama bölgesinden ana malzemeye doğru çizilerek ve analizin başlangıç noktasını çizginin çizilme yönü belirlemiştir. Çizginin geçtiği noktalardan krom, demir ve karbon değerlerinin değişimi görülmektedir. Şekildeki 7.7'de görülen resmi incelendiğinde, çizgi kaplama bölgesinden ana malzemeye doğru çizilmiştir ve analiz o yönde gerçekleşmiştir. Çizgi takip edildiğinde, kaplama bölgesindeki krom değerinin, kaplama yüzey çizgisine geldiği an ani düşüşü görülmektedir. Bunun nedeni ise o bölgeden sonra krom değerinin sıfıra yakın olduğunu demir değerinin yükseldiğidir. Takip edilen krom ve demir değerleri (verilen renkli çizgiler) ani değişikliklerin kesin olarak kaplama yüzey çizgisinde olduğunu göstermektedir. Karbon oranı ise analiz çizgisinin sementit grubu üzerine geldiği noktalarda artış gösterdiği, diğer bölgedeki noktalarda ise aynı oranda kaldığı görülmektedir. Kaplama içerisinde tespit edilen karbon miktarının krom atomları ile birleşerek krom karbür çökelekleri oluşturduğu ve böylece karbür çökeleklerinde sertlikte artışa neden olduğu düşünülmektedir. Nokta ve çizgi analiz sonuçlarının genel olduğunu ve diğer numunelerdeki sonuçlara benzer olduğunu için bütün numuneler verilmemiştir.

Çizelge 7.1'de Deney numunelerine ait ortalama kaplama kalınlıkları verilmiştir. Kaplama kalınlıkları üzerinde yapılan ölçümlere göre en yüksek kaplama kalınlığına 55 amp/dm², 100 mm anot-katot arası mesafe ve 40 °C banyo sıcaklığı parametreleri ile 5'nolu numunede ulaşılmıştır. Kaplama kalınlıkları mikro yapıları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde ise numunelerde, kaplama banyo sıcaklığı arttıkça kaplama kalınlıkları azalmıştır. Anot-katot arası mesafe azaldıkça ve kaplama akım yoğunluğu arttıkça kaplama kalınlıklarının arttığı görülmüştür.

B. SARIGÜL yapmış olduğu "Çeliğin Sert Krom Kaplanması ve Çeşitli Çalışma Parametrelerinin Kaplama Kalitesine Etkilerinin İncelenmesi" adlı çalışmasında; Akım yoğunluğunun artmasıyla kaplama kalınlığının da arttığını, akım yoğunluğunun kaplama hızını önemli derecede etkilediğini, sıcaklık arttığında kaplama kalınlığının azaldığını ve anot katot arası mesafe azaldığında kalınlığın arttığını gözlemlemiştir [91].

D. PLETCHER ve F. C. WALS yapmış oldukları "Industrial Electrochemistry" adlı

çalışmada; Katot yüzeyinde krom birikmesinin hidrojen gazı çıkışıyla olduğu bilinmektedir. Sıcaklık yükseldiğinde; aktivasyon kontrollü olan hidrojen çıkış hızı, krom birikme hızından daha fazla arttığı için yüksek sıcaklıklarda kaplama hızı ve kaplama kalınlığı düşmekte olduğunu açıklamışlardır [11].

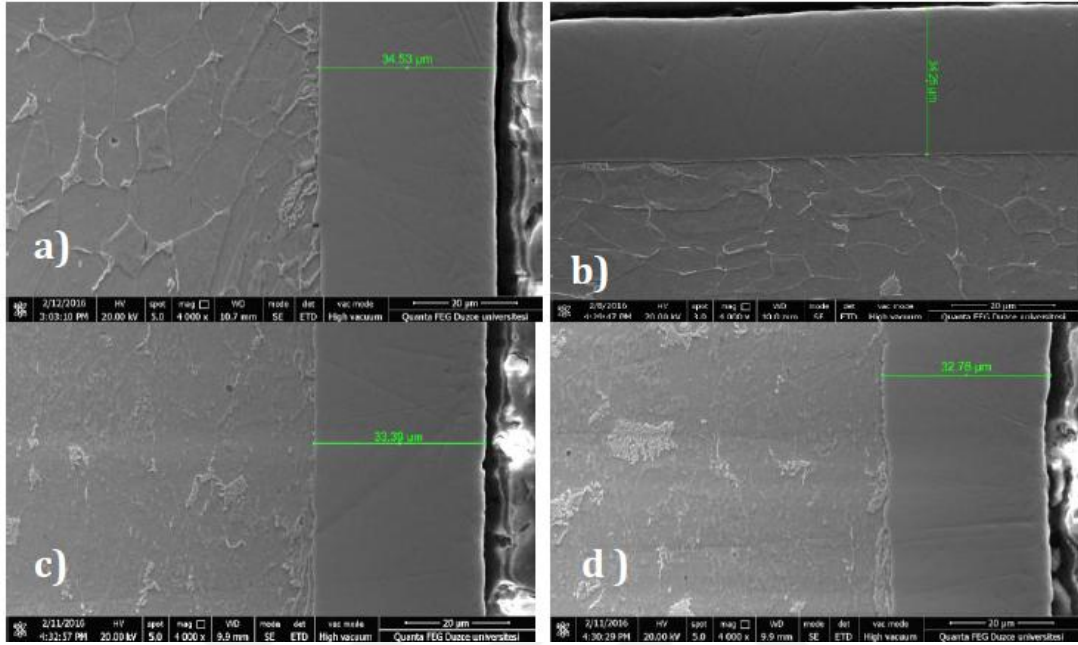
Çizelge 7.1. Deney numunelerin kaplama kalınlıkları.

Deney Numune No	Değişken Parametreler			Kaplama Kalınlıkları Ort.
	Akım Yoğunluğu (Amp/dm ²)	Kaplama Banyo Sıcaklığı (°C)	Anot-Katot Arası Mesafe (mm)	
1	25	40	100	34.53 µm
2	25	40	200	34.26 µm
3	25	60	100	33.39 µm
4	25	60	200	32.78 µm
5	55	40	100	44.25 µm
6	55	40	200	42.63 µm
7	55	60	100	39.98 µm
8	55	60	200	38.64 µm
9	40	40	100	37.29 µm
10	40	40	200	36.98 µm
11	40	60	100	35.91 µm
12	40	60	200	35.12 µm

Şekil 7.8’de Bazı deney numunelerinin kaplama işlemi sonrasında çekilen mikro yapı görüntülerinde ölçülen kaplama kalınlıkları verilmiştir. Resimler incelendiğinde kaplamanın numune yüzeyine tam olarak yapışma gösterdiği görülmektedir. Kaplamanın yapışkanlığı ve düzgün bir kaplama olması için, kaplanılacak bölgenin temizliğinin çok iyi yapılması, mikro aşındırma işlemi ile kaplamanın tutunması ve mümkün oldukça keskin köşelerinin olmaması gerekmektedir.

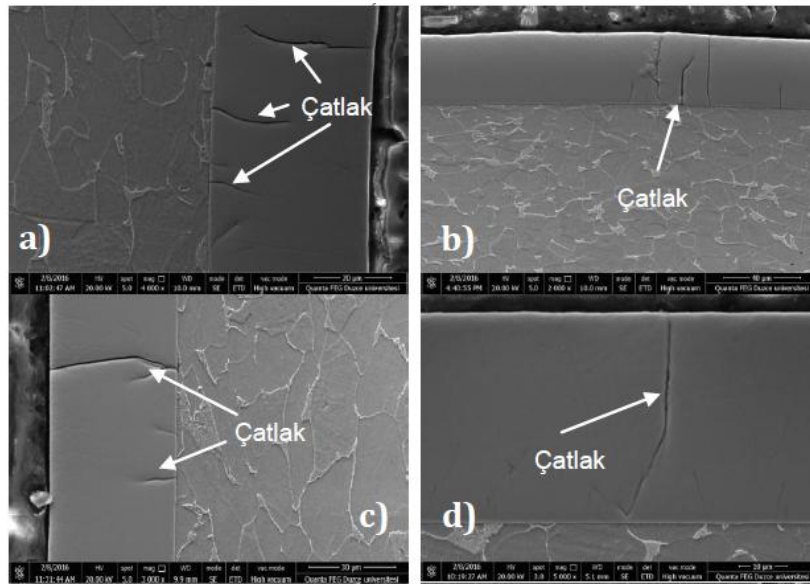
S. KAVAK yapmış olduğu "Sert Krom Kaplamada İşlem Parametrelerinin Değiştirilmesinin Kaplama Üzerine Etkilerinin Araştırılması" adlı çalışmada, akım yoğunluğunun kalınlığı doğru oranda etkilediğini akım arttıkça kalınlığın arttığını tespit etmiştir. Sabit akım yoğunluğunda sıcaklık yükseldikçe kaplama kalınlığının düştüğünü gözlemlemiştir. Kavak çalışmasında ana metal ile kaplama arasında yapışkanlığı arttırmak için kaplanacak malzeme yüzeyine mikro düzeyde aşındırma işlemi yani pürüzlendirme yapılarak yüzeyde mekanik bağlanma sağlanmayı önermiştir. Aşınan yüzeylerin doldurulması ve malzemelere sertlik, aşınma ve sürtünme direnci kazandırmak için elektrokimyasal yöntemle sert krom kaplama en uygun yöntemlerde birisi olduğunu söylemiştir [46]. Yapılan yüzey temizleme işlemleri sonucu iyice

temizlenmiş yüzeye kaplamanın daha iyi yapıldığı görülmektedir. Yeterli düzeyde temizlenmeyen yağlı ve oksit tabakası olan yüzeylerde kaplama yapışma kalitesi düşmekte hatta kaplama tutmamaktadır.



Şekil 7.8. Deney numunelerine ait kaplama kalınlık görüntüleri.

a) 1 Nolu numune b) 2 Nolu numune c) 3 Nolu numune d) 4 Nolu numune



Şekil 7.9. Deney numunelerine ait mikro çatlak görüntüleri.

a) 1 Nolu numune b) 2 Nolu numune c) 3 Nolu numune d) 4 Nolu numune

Mikro yapılarda kaplama bölgesinde oluşan mikro çatlaklara ait görüntüler ise Şekil 7.9'da verilmiştir. Yapılan literatür çalışmaları da göstermiştir ki sert krom kaplama yapılan numunelerde kaplama bölgesinde mikro çatlaklar oluşmuştur.

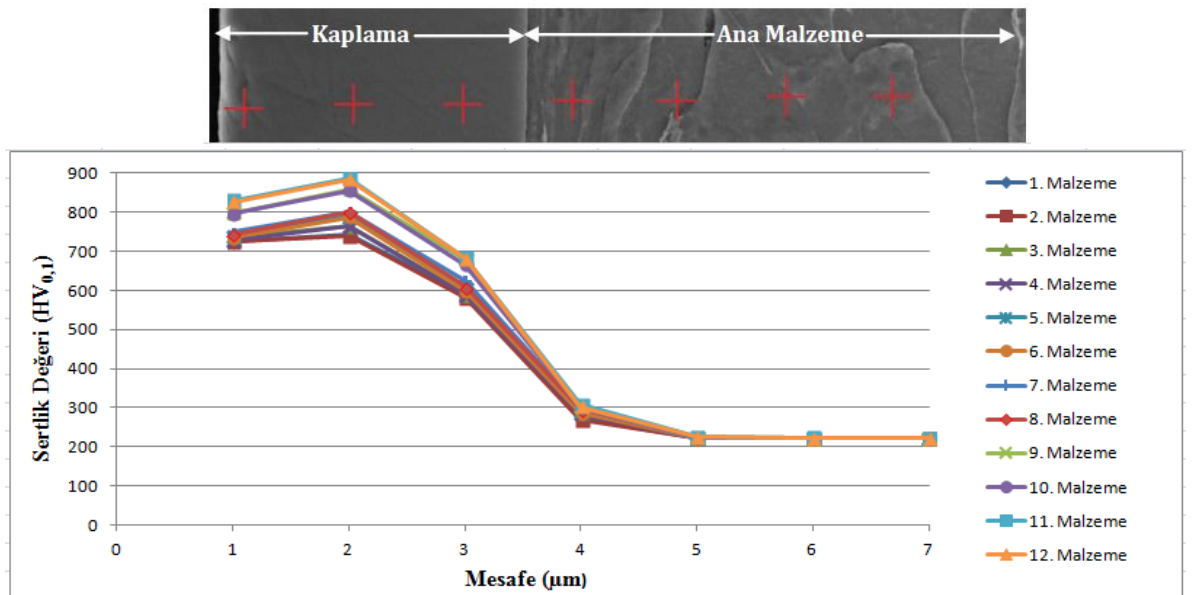
Y. A. GEREDİ yapmış olduğu "Krom Kaplama Teknikleri" adlı çalışmasında, krom kaplama hızını ve akım verimliliğini en çok etkileyen faktörler olarak banyo sıcaklığı ve akım yoğunluğunu olduğunu ifade etmişlerdir. Bazı şartlarda yapılan krom kaplamalarda, kaplama yüzeylerinde mikro çatlakların meydana geldiğini gözlemlemiştir. Bu durumu, kaplama tabakasında değişik bileşimlere sahip kararsız krom hidrürlerin oluşumundan kaynaklandığını gözlemlemiştir [42].

Y. ALEMDAĞ yapmış olduğu "Sıcaklık ve Akım Yoğunluğunun Sert ve Dekoratif Amaçlı Krom Kaplamaların Yapı ve Özelliklerine Etkisi" adlı çalışmasında; Düşük akım yoğunluğunda ve düşük sıcaklıklarda yapılan kaplamalarda mikro çatlakların yüzeye dikey olarak oluştuğunu tespit etmiştir. [6].

7.2. MİKRO SERTLİK DENEYİ

Numunelerin yüzey mikro sertliğini DIGIROK marka cihazında, Vickers sertlik ölçüm metoduyla ölçülmüştür. Ölçümler kaplama üst noktasından başlamış ve ana malzemeye doğru her 10 mikronluk mesafelerde gerçekleştirilmiştir.

Şekilde görüldüğü deney numunesinin mikro yapısı üzerinde eşit aralıklarla sertlik değerleri ölçülüp her numune için not alınmıştır. Alınan bu değerler ile deney numunelerinin mikro sertlik değer grafiği oluşturulmuştur. Şekil 7.10'de Sert krom kaplanan numunelerde mikro sertlik ölçüm noktaları ve sonuçları verilmiştir.



Şekil 7.10. Numunelerde mikro sertlik ölçüm sonuçları.

Sertlik diyagramı sonuçları incelendiğinde kaplamadan ana malzemeye doğru gidildikçe sertlikte artış olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak ana malzeme içerisinde bulunan karbon atomlarının kaplama içine doğru nüfuz etmesi ve bu nedenle o noktalarda krom karbür çökelekleri oluşturması sonucunda olduğu düşünülmektedir. Kaplama uç noktasına doğru gidildikçe ise sertlik miktarında azalma görülmektedir. Numunelerde yapılan çizgisel analizler karbonun kaplama içerisindeki varlığını doğrulamaktadır. Ayrıca akım yoğunluğunun belirli bir değere yaklaşması ve banyo sıcaklığının artmasıyla sertliğin arttığı düşünülmektedir.

Y. IWAİ ve arkadaşlarının yapmış oldukları "Effects of Hard Chromium Plating on Cavitation Corrosion" adlı çalışmada; Kaplanan numunelerin sertlik değerlerinin artan banyo sıcaklığı ve artan akım yoğunluğu ile arttığını gözlemlemişlerdir. Kaplamanın sertliğinin içerdiği hidrojen miktarına, iç gerilmelere ve dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak değiştiğini belirtmişlerdir [92].

Sarıgül, akım yoğunluğunun 45 Amp/dm² 'den fazla verildiğinde sertliğin azalmaya başladığını ve sıcaklık arttığında sertliğin arttığını, anot katot arası mesafenin sertliği önemli bir derecede etkilemediğini görmüştür. Akım yoğunluğu arttığında kaplamada çatlaklar tespit etmiştir [91].

S. KAVAK çalışmasında, Anot katot mesafesi azaldıkça kaplama kalınlığının arttığı ve 45 Amp/dm² den daha büyük akım yoğunluklarında kaplama sertliğinde azalma olduğunu ve sıcaklık arttıkça sertliğinde arttığını tespit etmiştir [46].

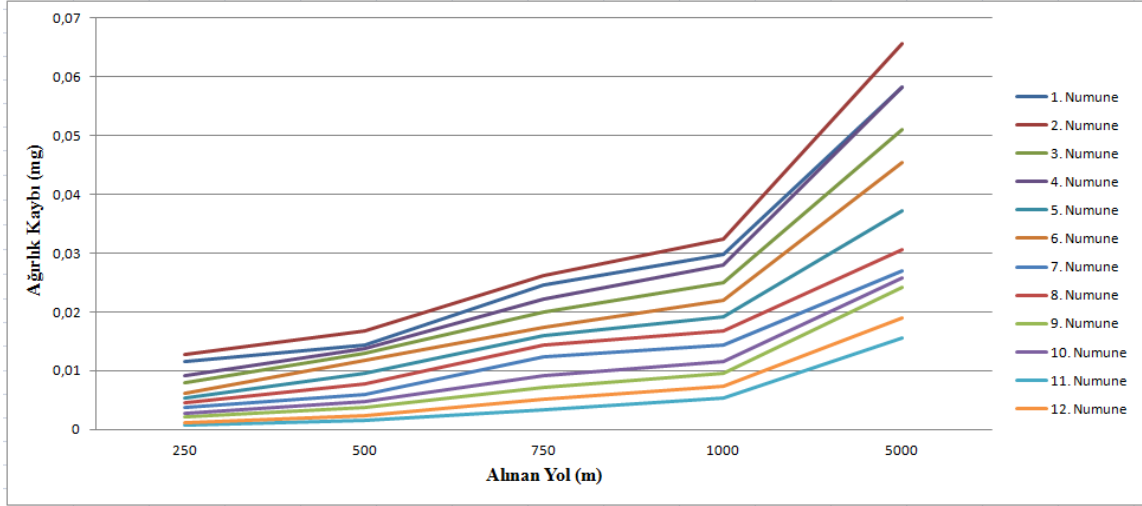
Şekilde görülen en sert malzeme olarak 11 numaralı numune tanımlanabilir. Bu numunenin kaplama değerleri 40amp, 60 °C ve 100mm mesafede gerçekleşmiştir. Yüksek akımda sertliğinde azda olsa azalma olduğu gözlemlenmektedir. Düşük akımda ise sertlikteki düşüş dikkat çekmektedir.

7.3. AŞINMA DENEYİ

Aşınma değerleri hesaplanırken ağırlık kaybı yöntemi uygulanmıştır. Deney sonucu elde edilen ağırlık kayıplarına ait grafik şekil 7.11'de verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere, 5000m'de aşınma direnci en yüksek olan 11 numaralı numune olarak tespit edilmiştir. Bu numuneye ait sertlik değerleri bu sonuçları doğrulamaktadır. Aşınma

değeri en düşük olan ise 2 numaralı numune olarak belirlenmiştir.

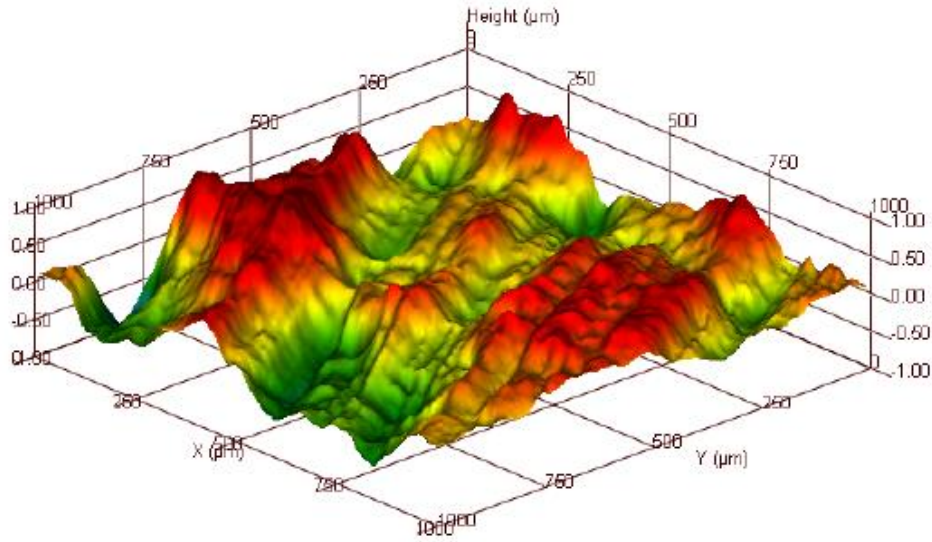
B. SARICA yapmış olduğu "Farklı Kalite Çeliklere Uygulanan Yüzey Kaplama İşlemlerinin Aşınma Davranışlarına Etkisi" adlı çalışmasında; aşınma değerinin sertlikle ilgili olduğunu ve en sert olan deney numunelerinin diğerlerine göre aşınmaya daha az maruz kaldıklarını tespit etmiştir [73].



Şekil 7.11. Deney numunelerinde aşınma değerleri.

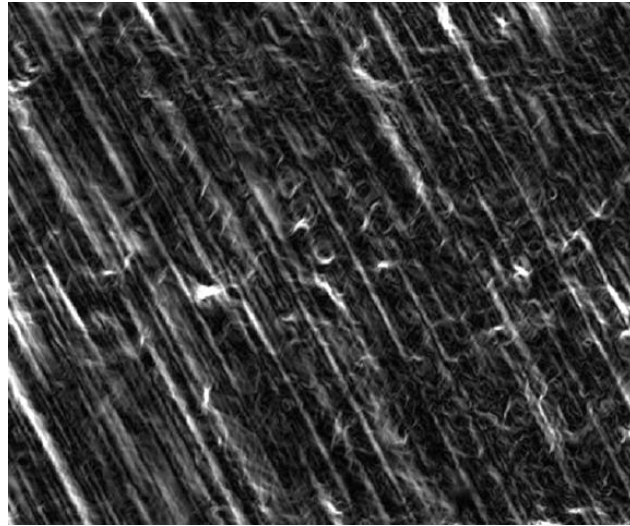
Akım yoğunluğunun ve banyo sıcaklığının düşük olması, anot katot mesafesinin yüksek olması aşınmanın direncini olumsuz etkileyen parametre değerleridir. Bu değerler 25 amp, 40 °C ve 200 mm'dir. Numunelerde elde edilen ağırlık kaybı değerleri çok az olmakla birlikte sabit yük altında artan mesafe ile aşınma sonucu ağırlık kayıplarının arttığı gözlenmiştir.

Bu sonuçlara göre en az ve en fazla aşınan numunelerin yüzey grafikleri Getphase programında oluşturularak yüzey pürüzlülük değerlerine göre kıyaslama yapılmıştır. Ve yüzey pürüzlülük (Ra) değerlerinin aşınma değerlerini doğruladığı gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülük değerlerine göre aşınma direnci en yüksek olan numunede 0,09 μm , aşınma direnci en düşük olan numunenin ise 0,30 μm 'dir. Aşağıda verilen yüzey grafik ve mat alan görüntüleri yüzey pürüzlülük değerlerini doğrulamaktadır.

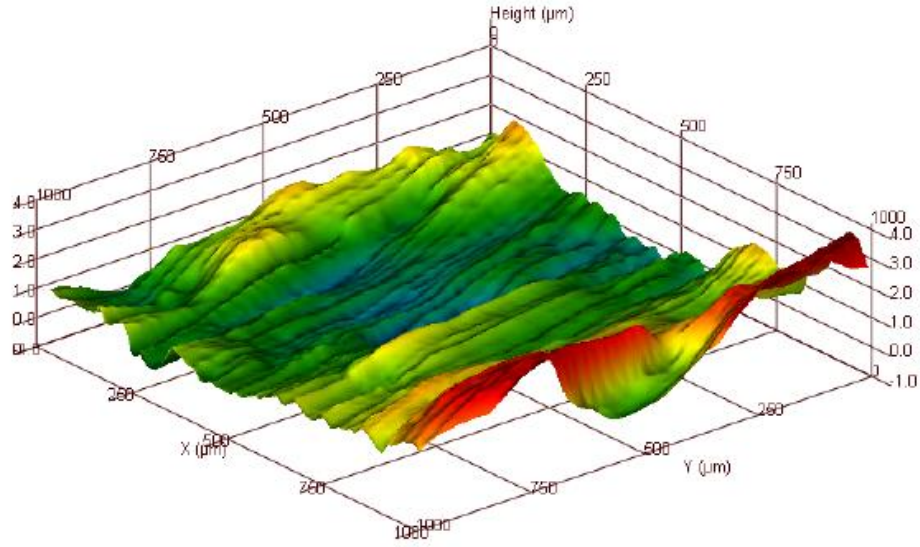


Şekil 7.12. 11 Nolu numunenin aşınan yüzey grafiği.

Şekil 7.12 ve Şekil 7.13’de 11 nolu numunenin aşınan yüzeyinin grafiği ve mat alan görüntüsü verilmiştir. Şekil 7.12’de verilen grafikte, 11 numaralı numunenin sürtünmeye karşı koyduğu aşınma direncinin yüksek olduğunu görülmektedir. Sürtünmenin aşındırmaya zorladığı bölgeler ve aşınmaya başlayan bölgeler açıkça görülmektedir. Şekil 7.13’de ise verilen mat alan görüntüsünde sürtünmeden dolayı oluşan aşındırma izlerinin az olduğu bazı bölgelerde aşındırma net olarak görülürken diğer bölgelerde görülmemektedir.



Şekil 7.13. 11 Nolu numunenin aşınan yüzeyinin mat alan görüntüsü.



Şekil 7.14. 2 Nolu numunenin aşınan yüzey grafiği.

Şekil 7.14 ve Şekil 7.15’de ise 2 nolu numunenin aşınan yüzeyinin grafiği ve mat alan görüntüsü verilmiştir. Şekil 7.14’de verilen grafikte, 2 numaralı numunenin sürtünmeye karşı koyduğu aşınma direncinin düşük olduğunu görülmektedir. Grafikte sürtünme bölgesinin düzlendiği görülmektedir. Bu da 2 numaralı numunenin aşınma direncinin düşük olduğu ve aşınmaya karşı koyamayıp aşınmaya maruz kaldığını göstermektedir. Şekil 7.15’de verilen 2 numaralı numunenin mat alan görüntüsünde sürtünmeden dolayı oluşan aşındırma izleri net olarak görülmektedir. Görülen aşındırma izlerinin numunenin aşınmaya karşı direncinin düşük olduğunu doğrulamaktadır.

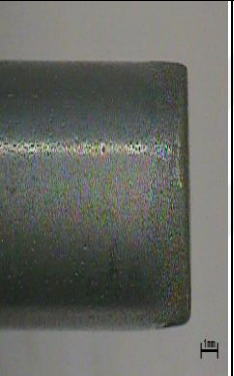
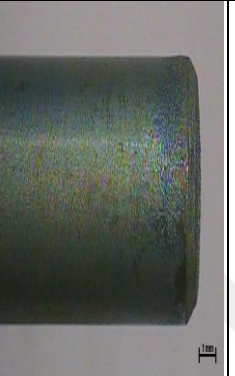
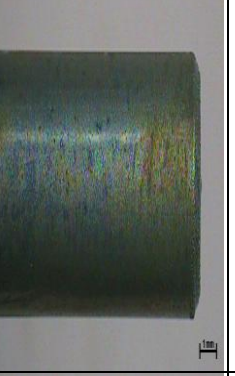
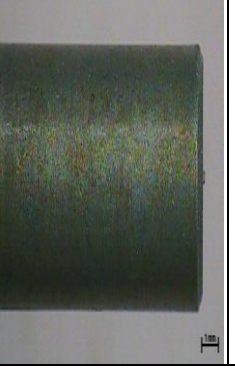


Şekil 7.15. 2 Nolu numunenin aşınan yüzeyinin mat alan görüntüsü.

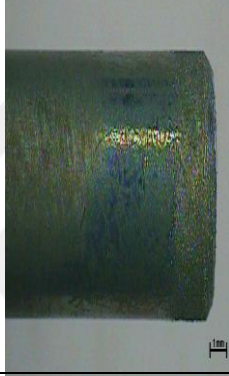
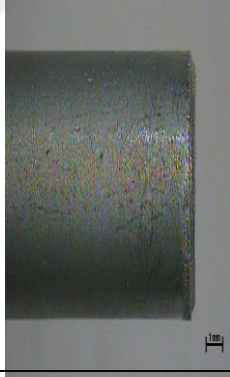
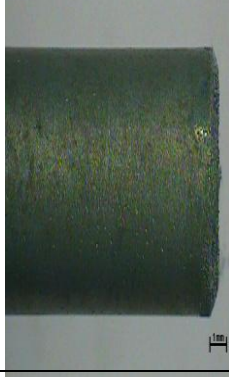
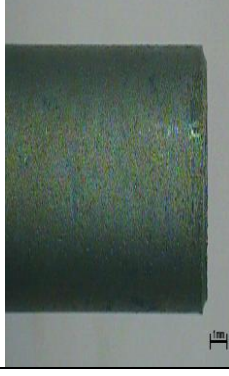
7.4. TERMAL ŞOK DENEYİ

Malzemelere uygulanan termal şok deneylerinde, fırın içerisine yerleştirilen deney numuneleri artan ve değişen sıcaklıklarda, 350 °C, 550 °C ve 750 °C sıcaklıklarda 90 dakika ısıtılarak çalışma ortamındaki etkisi incelenmiştir. Değişken sıcaklıklara maruz bırakılan ve hiç ekletilmeden oda sıcaklığındaki su içerisinde soğutulan numunelerdeki değişimler sıcaklıklara göre farklılıklar göstermektedir.

Şekil 7.16. Karşılaştırmalı termal şok deney görüntüleri.

Deney Numune No	İşlemsiz	350 °C Sıcaklık	550 °C Sıcaklık	750 °C Sıcaklık
1 Nolu Numune				
2 Nolu Numune				
3 Nolu Numune				

Şekil 7.16. Karşılaştırmalı termal şok deney görüntüleri (Devamı).

Deney Numune No	İşlemsiz	350 °C Sıcaklık	550 °C Sıcaklık	750 °C Sıcaklık
4 Nolu Numune				
5 Nolu Numune				
6 Nolu Numune				
7 Nolu Numune				

Şekil 7.16. Karşılaştırmalı termal şok deney görüntüleri (Devamı).

Deney Numune No	İşlemsiz	350 °C Sıcaklık	550 °C Sıcaklık	750 °C Sıcaklık
8 Nolu Numune				
9 Nolu Numune				
10 Nolu Numune				
11 Nolu Numune				

Şekil 7.16. Karşılaştırmalı termal şok deney görüntüleri (Devamı).

Deney Numune No	İşlemsiz	350 °C Sıcaklık	550 °C Sıcaklık	750 °C Sıcaklık
12 Nolu Numune				

Yapılan çalışmada, kaplamanın yüzeye yapışma özelliği incelenmiştir. İşlemsiz numuneler ile 350 °C sıcaklıkta ısıtılan numuneler arasında değişiklik gözlenmezken, 550 °C ve 750 °C sıcaklıklarda renk değişimleri gözlenmiştir. 550 °C 'de Isıtılan numunelerde bölgesel renk değişimleri; mavimsi ve koyu yeşil olarak görülmüştür. 750 °C 'de Isıtılan numunelerde ise koyu yeşile yakın renkler tespit edilmiştir. Yüzeyi makro boyutta incelenen numunelerde kaplamanın kalkmadığı gözlenmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. SONUÇLAR

Sert krom kaplanan silindirik numunelerde kaplama parametrelerinin etkilerinin incelenmesi adlı bu tez çalışmasında, değişken olarak kullanılan parametreler; akım yoğunluğu, banyo sıcaklığı ve anot-katot arası mesafelerdir. Yapılan kaplama sanayi ortamında gerçekleştiği için banyoyu ve kaplamayı etkileyecek en iyi değerler seçilmiştir. Kaplama süresi, banyo bileşeni ve pH değeri sabit tutularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Sanayi ortamında ucuz ve kolay bulunan transmisyon çeliği seçilerek, en iyi değerlerle en verimli kaplamanın yapılması, malzemelerin tokluğunu etkilemeden kalitesini arttırıp, malzeme yüzeyine sertlik kazandırmak, sürtünme ve aşınmaya karşı dirençli olması amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Yapılan sert krom kaplamada, düşük karbonlu yapı çeliğine en düşük parametreler dahi uygulandığında malzemenin mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkileri olduğu gözlenmiştir.
- SEM görüntüleri incelendiğinde, yapılan kaplama işleminin düzgün olduğu gözlenmiştir. Nokta analizlerinde, kaplama metalinde krom element değerlerinin ana malzemeye göre fazla olduğu tespit edilmiştir. Çizgi analizlerinde kaplama bölgesinden ana malzemeye doğru krom değerinin azaldığı, demir değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.
- Kaplama işlemi esnasında akım yoğunluğunun artması ile birlikte numunelerde sertlik, aşınma direnci ve kaplama kalınlıklarının arttığı gözlenmiştir. Anot-katot arası mesafenin sertlikte çok fazla bir değişime neden olmadığı görülürken, bu mesafe azaldıkça numunelerdeki kaplama kalınlıklarının arttığı gözlenmiştir.
- Çizelge 7.1 incelendiğinde en fazla kaplama kalınlığına sahip 5 Nolu numuneye

ait olan, akım yoğunluğu 55 Amp/dm^2 , kaplama banyosu sıcaklığı 40°C ve anot-katot arası 100 mm mesafelerde ulaşılmıştır. Kaplama kalınlığı en ince olan numune ise 4 numaralı numunedir. Parametreleri akım yoğunluğu 25 Amp/dm^2 kaplama banyosu sıcaklığı 60°C ve anot-katot arası mesafe 200 mm 'dir. En yüksek kaplama kalınlığı $44.25 \mu\text{m}$, en düşük kaplama kalınlığı $32.78 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.

- Banyo sıcaklığının azalmasıyla sertliğin azaldığı gözlenmiştir. Akım yoğunluğunun sertliğe olan etkisi ise 60°C ye kadar ısıtılmış banyoda akım yoğunluğunun 40 Amp/dm^2 üzerine çıkması dâhilinde sertliğin azaldığı tespit edilmiştir.
- Şekil 7.10 incelendiğinde ise sertliğin en fazla olduğu değer 11 numaralı numuneye ait olan, akım yoğunluğu 40 Amp/dm^2 , kaplama banyosu sıcaklığı 60°C ve anot-katot arası 100 mm mesafelerde ulaşılmıştır. Buna karşın sertliği en az olan ise 2 numaralı deney numunesi olmuştur. Deney parametreleri, akım yoğunluğu 25 Amp/dm^2 , kaplama banyosu sıcaklığı 40°C ve anot-katot arası mesafe 200 mm 'dir. Kaplama yüzeyinde ki en iyi sertlik değeri $830,5 \text{ HV}_{0,1}$, en düşük sertlik değeri ise $727 \text{ HV}_{0,1}$ olarak tespit edilmiştir.
- Aşınma kaybını etkileyen deneysel parametre olarak, banyo sıcaklığının düşük olması ve sertlik değerlerine bağlı olarak aşınmanın da bu değerlere göre değiştiği gözlenmiştir.
- Numunelerde 10N ve 25N 'luk yükler altında ve artan mesafelerde göz ardı edilecek kadar düşük ağırlık kayıpları gözlenmiştir. Numuneler 40N 'luk yükler altında ve artan mesafelerde aşındırıldığında, en düşük ağırlık kaybına 11 Nolu numunede ulaşılmıştır. Sertlik sonucu değerleri de bu durumu doğrulamaktadır. Diğer numuneler ile karşılaştırıldığında en yüksek ağırlık kaybı 2 numaralı numunede tespit edilmiştir.
- Aşınan yüzeylerde yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük (R_a) değerlerinin, aşınma değerlerini doğruladığı gözlenmiştir. Aşınma direnci en yüksek olan 11 Nolu numunenin yüzey pürüzlülük değeri $0,09 \mu\text{m}$, aşınma direnci en düşük olan 2 Nolu numunenin yüzey pürüzlülük değeri $0,30 \mu\text{m}$ olduğu tespit edilmiştir.

- Kaplanan numunelere uygulanan termal şok testlerinde 350 °C sıcaklıklarda değişimin olmadığı, 550 °C ve 750 °C sıcaklıklara çıkıldıkça renk değişimleri olduğu tespit edilmiştir. 550 °C'de ısıtılan numunelerde renk değişimleri; mavi olarak, 750 °C 'de ısıtılan numunelerde ise yeşil olarak tespit edilmiştir. Bu renk değişiminin malzemelerde artan sıcaklık sonucu oksitlenmenin rengi olduğu düşünülmektedir. Yüzeyi makro boyutta incelenen numunelerde kaplamada kalkma veya kırılma olmadığı gözlenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen değerlerin, çalışmanın amacına yaklaştığını göstererek yeni çalışmaların ne şekilde yapılacağına katkı sağlayacaktır.

8.2. ÖNERİLER

Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre en iyi kaplama parametreleri belirlenmiştir:

Sert krom kaplamada en uygun parametreler olarak akım yoğunluğunun 40-45 Amp/dm², banyo sıcaklığının 55-60 °C ve anot-katot arası mesafe 100 mm olarak seçilmelidir. Kaplama işlemi öncesi kaplanacak malzemenin geometrik şekli oldukça önemlidir. Literatür araştırması da göstermiştir ki keskin köşeli malzemelerde, kaplama homojenlik göstermemekle birlikte köşe bölgelerdeki kaplamanın düzgün olmadığı ve kaplama öncesi köşelerin yuvarlatılması gerektiği öngörülmektedir. Kaplama öncesi son işlemler olarak mekanik ve kimyasal temizleme seçilmeli temizliği son derece hassas yapılması gerekmektedir.

- Kaplanacak malzemenin temizliği kadar kaplama banyosunun da temizliği oldukça önemlidir. Kaplama banyosunda bulunan anotların kaplama öncesi yüzeylerinin zımparalama yöntemi ile temizlenerek yüzeyindeki oksitlerden arındırılmış olması gerekmektedir. Akımın kesintisiz iletilmesi için bu oldukça önemlidir. Kaplama banyosu içerisindeki sıvının homojenliği, akım iletkenliği için dikkat edilmesi gereken durumdur.
- Kaplama esnasında banyo araç ve gereçlerinden kaynaklanabilecek olumsuz durumlara önlem olarak yapılması gereken ilk adım, redresör (güç kaynağı) değerinin belirlenen maksimum akım değerinden oldukça yüksek seçilmelidir. Redresör ile anot - katot arası bağlantı kablolarının kaliteli olması kaplama

işlemi sırasında kabloların ısınıp yanmaması için önemlidir ve kaplama banyosu düzenli olarak kontrol edilmelidir.

- Çok daha hassas bir kaplama için bu çalışmada sabit tutulan pH değeri, banyo bileşenleri ve kaplama süresi değiştirilip kaplama denenebilir. Bu çalışmada seçilen parametrelerin arasında kalan değerler kullanılarak daha hassas bir kaplama yapılabilir.
- Bu parametreler sonucu yapılan kaplamanın korozyon değerleri araştırılarak, deformasyon ve yapışma gibi mekanik özellikleri scratch test çizik yöntemi ile incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] İ. K. Yonar, *Galvanoteknik*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Milli Eğitim Basımevi, 1979, böl. 1, ss. 5-49.
- [2] A.Y. Soykurt, "Cam şekillendirme makinalarındaki aşınan parçalara uygulanan yüzey işlemlerinin performans etkileri," Doktora tezi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [3] A. A. Eker, Korozyon mekanizmaları, *Ders Notları*, İstanbul, 2009.
- [4] S. F. Demir, "CrN Kaplamalara antibakteriyel özellik kazandırmak amacıyla Ag ve AgPd katkılandırılması," Yüksel lisans tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [5] F.A. Lowenheim, *Modern Electroplating*, vol. 5, Fifth Edition, New York, USA: 2010, pp. 16-94.
- [6] Y. Alemdağ, "Sıcaklık ve akım yoğunluğunun sert ve dekoratif amaçlı krom kaplamaların yapı ve özelliklerine etkisi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2000.
- [7] G. Dubpernell, *Electrodeposition of chromium from chromic acid solutions*, First Ed., New York, USA: Pergamon Press Inc. 1977, pp. 21-36.
- [8] R. K. Guffie, *The handbook of hard chromium plating*, 1st ed., Ohio, USA: Gardner Publications, 1986, pp. 74-79.
- [9] R. Weiner and A. Walmsley, *Chromium Plating*, vol. 1, Teddington, England: Finishing Publications Ltd., 1980, pp. 37-58.
- [10] V. Berk, *Yüzey İşlem Teknolojileri I*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Yuzeyislem.com, 2004, ss. 1-10.
- [11] D. Pletcher and F.C. Walsh, *Industrial Electrochemistry*, 2nd ed., New York, USA: Second Edition, Chapman-Hall, 1993, pp. 11-42.
- [12] İ. Keskin, *Malzeme El Kitabı*, 1. baskı, Ankara, Türkiye: Or-Gun Yayınları, 1991, ss. 226-223.
- [13] H.E. Boyer and T.L. Gall, *Metals Handbook Desk Edition*, 2nd ed., Ohio, USA: American Society for Metals, Metals Park, 1998, pp. 635.
- [14] T. Savaşkan, *Malzeme Bilgisi Ve Muayenesi*, 4. baskı, Trabzon, Türkiye: Celepler Matbaacılık, 2007, ss. 159-265.

- [15] M. Erdoğan, *Malzeme Bilimi Ve Mühendislik Malzemeleri*, Cilt 1, 3. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Yayın Dağıtım, 1998, böl. 13, ss. 298-321.
- [16] İ. Ay, Saf Demir soğuma eğrisi, *Ders Notları*, Balıkesir, 2015.
- [17] İ. Ay ve F. Kapusuz, Maleme Teknolojisi I, *Ders Notları*, Balıkesir, 2008.
- [18] K. V. Güngörmüş, "Az alaşımlı imalat ve yapı çeliklerinin zayıf asidik ortamdaki ağırlık kaybına mikroyapı ve alaşım elementlerinin etkisi," Yüksek lisans tezi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [19] M. Yüksel, *Malzeme Bilgisi*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Makine Mühendisleri Odası Yayıncılığı, 2003, böl.11-15-17, ss. 177-498.
- [20] Y. Güngör, *Malzeme Bilgisi*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Beta Basım Yayım Aş., 2001, böl. 2-9, ss. 6-59.
- [21] E. Keleşoğlu, *Sert Kaplamalar Üretim Teknikleri ve Özellikleri*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Yıldız Edu. İnternet Yayın, 2011, böl. 1-3-4-5-6-7, ss. 1-119.
- [22] A. Hara, "History of CVD and PVD Coated Cemented Carbide Tools, from Laminated to Diamond Coated," *Surface Modification Technologies*, vol 7, pp. 266, 1994.
- [23] B. Rother and J. Vetter, *Plasma-Beschichtungsverfahren Und Hartstoffsichten*, vol. 44, Leipzig, Germany: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993, ch. 1, pp. 39.
- [24] D. Walton, "Nucleation of Vapor Deposits," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 37, no. 10, pp. 2182, 1962.
- [25] H. Fischmeister and H. Jehn, *Hartstoffsichten zur Verschleißminderung*, Oberursel, Germany: DGM Informationsgesellschaft, 1987, pp. 45-70.
- [26] N. Solak, "Nitrür Esaslı Sert Seramik İnce Film Kaplamalarının Oksidasyon Davranışları," Yüksek lisans tezi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2002.
- [27] J. E. Sundgren, "Structure and properties of TiN coatings," *Thin Solid Films*, vol. 1, pp. 128-21, 1985.
- [28] H. Jehn and B. Rother, "Diagnostics and applications of thin films," *Thin Solid Films*, Proceedings of the INT Summer School, vol. 1, pp. 207, 1991.
- [29] C. Friedrich, G. Berg, E. Broszeit and C. Berger, "Datensammlung zu hartstoffeigenschaften," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 28, pp. 59-76, 1997.
- [30] W. Schatt, *Pulvermetallurgie sinter und verbundwerkstoffe*, vol. 1, Leipzig, Germany: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1988, pp. 485.

- [31] J.J. Gilman, "Hardness of carbides and other refractory hard metals," *Journal of Applied Physics*, vol. 41, no. 4, pp. 1664, 1970.
- [32] H. Jehn, S. Hoffmann, V. E. Rückborn and W. D. Münz, "Morphology and properties of sputtered (Ti, Al)N layers on high speed steel substrates as a function of deposition temperature and sputtering atmosphere," *Journal of Vacuum Science and Technology*, vol. 4, no. 2701, pp. 5, 1986.
- [33] S. Gulizia, M.Z. Jahedi and E.D. Doyle, "Performance evaluation of PVD coatings for high pressure die casting," *Surface and Coatings Technology*, vol. 140, pp. 200-205, 2001.
- [34] E. Keleşoğlu, C. Mitterer and M. Ürgen, "Corrosion characteristics of plain carbon steel coated with TiN and ZrN under high-flux ion bombardment," *Surface and Coatings Technology*, vol. 160, pp. 82-86, 2002.
- [35] N. Tuna, "Çinko ve nikel kaplanmış düşük karbonlu çelik plaka ve vidaların korozyon davranışının incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [36] S. L. Kakani and A. Kakani, *Material Science*, 1st ed., New Delhi, India: New Age International Publishers, 2004, pp. 382-394.
- [37] M. Doruk, *Korozyon ve Önlenmesi*, 1. baskı, Ankara, Türkiye: ODTÜ Yayınları, 1982, ss. 44-126.
- [38] A. W. Batchelor, L. N. Lam and M. Chandrasekaran, *Materials Degradation and its Control by Surface Engineering*, 3rd ed., London, UK: Imperial College Press, 2011, pp. 219-225.
- [39] R. Chattopadhyay, *Surface Wear Analysis Treatment, and Prevention*, 1st ed., USA: ASM International the Materials Information Society, 2001, pp. 162-165.
- [40] B. Beşerli, *Elektrokimyasal Hücreler*, 1. baskı, Ankara, Türkiye: Gazi Kitabevi, 2015, böl. 18. ss. 1-17.
- [41] A. Çakır, *Metalik Korozyon İlkeleri ve Kontrolü*, Yayın No: 131, Ankara, Türkiye: T.M.M.O.B. Makina Mühendisleri Odası, Bileşim Matbaacılık, 1990, ss. 119-135.
- [42] Y. A. Gerede, "Krom kaplama teknikleri," Yüksek lisans, Kimya Mühendisliği Bölümü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2003.
- [43] S. A. Saraç, *Metal Kaplama ve Elektrokimyasal Teknolojiler*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Çağlayan Kitabevi, 1995, ss. 48-58.
- [44] A. R. Berkem, *Elektro Kimya Laboratuar Uygulaması*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Yayınları, 1978, ss. 53-68.
- [45] H. H. Lou and Y. Huang, *Encyclopedia of Chemical Processing: Electroplating*, vol. 2, New York, USA: Taylor & Francis, 2006, pp. 839-849.

- [46] S. Kavak, "Sert krom kaplamada işlem parametrelerinin değiştirilmesinin kaplama üzerine etkilerinin araştırılması," Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye: 2001.
- [47] H. Yalçın ve T. Koç, *Elektrokimya*, 1. baskı, Ankara, Türkiye: Palme Yayınevi, 2007, ss. 55-62.
- [48] B. Meyers, S. Lynn and E. Jang, "Chromium elimination in surface engineering," *ASM International Handbook*, vol. 5, pp. 2414, 2002.
- [49] K. Legg and J. Sauer, "Use of thermal spray as an aerospace chrome plating alternative," *Linking Global Technologies With Markets*, vol. 1-2, pp. 6-33, 2000.
- [50] E. Svenson, *DuraChrome Hard Chromium Plating*, vol.1, Florida, USA: Surface Finishing Technology, 2010, pp. 2-7.
- [51] A. Evcin, Kaplama teknikleri, *Ders notları*, Afyonkarahisar, 2006.
- [52] Anonim, (2009). *Sert krom kaplama*. [Online]. Erişim: <http://www.yuzeyislemler.com/06kitap/sert-krom-kaplama.htm>.
- [53] M. Breitsameter, "Thermal spraying versus hard chrome plating," *Azo Materials*, vol. 32, no. 6, pp. 11-13, 2000.
- [54] C. Ünver. (2010, 24 Kasım). *Metal kaplamanın dünü bugünü*. TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Erişim: <http://arsiv.mmo.org.tr/pdf/11288.pdf>.
- [55] Anonim. (2010). *Chrome plating*. Wikipedia The Free Encyclopedia. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Chrome_plating.htm.
- [56] J. A. Fraunhofer, *Basic Metal Finishing*, vol. 1, London, England: Elek, 1976, pp. 84-88.
- [57] D. R. Gebe, "Principles of Metal surface Treatment and Protection," *Second Edition*, vol. 28, pp. 80-90, 1978.
- [58] S. Karagöl, "Çelik parçaların elektroliz yöntemi ile nikel ve krom kaplanması," Yüksek lisans tezi, Makina Mühendisliği Bölümü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye: 1995.
- [59] A. T. Khun, *Industrial Electrochemical Processes*, vol. 1, New York, USA: Elsevier Publishing Co. 1971, pp. 108-120.
- [60] Z. Aydın, "Fırça kaplama yöntemi ile biriktirilen sert krom kaplamanın mekanik özelliklerinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye: 2013.
- [61] A. Gardner, M. Barnstead and C. Hnetinka, "Chromium Plating," *Products Finishing*, vol. 75, pp. 96-105, 2011.
- [62] N. V. Mandich and D. L. Snyder, "Electrodeposition of Chromium," *Fifth Edition*, vol. 7, pp. 205-248, 2010.

- [63] J. H. Lindsay and D. L. Snyder, "Decorative Chromium Plating," *ASM International*, vol. 5, pp. 192-200, 1994.
- [64] J. K. Dennis and T. E. Such, *Nickel And Chromium Plating*, vol. 8, Ohio, USA: Woodhead Publishing Ltd. 1993, pp. 205-241.
- [65] M. Dahlhaus, A. Tsang and L. Wing, "Calculating corrosion," *Products Finishing*, vol. 69, pp. 50-54, 2005.
- [66] J. Langan, "Alternative For Tank Chromium Using (Brush) Plating," *Selective Electroplating and Anodising Solutions*, vol. 92, pp. 2-12, 1992.
- [67] M. H. Sohi, A. A. Kashi and S. M. M. Hadavi, "Comparative Tribological Study of Hard And Crack-Free Electrodeposited Chromium Coatings," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 138, pp. 219-222, 2003.
- [68] L. Fedrizzi, S. Rossi, F. Bellei and F. Deflorian, "Wear–Corrosion Mechanism of Hard Chromium Coatings," *Elsevier*, vol. 253, pp. 1173-1181, 2002.
- [69] A. Demir, "Farklı eliklerin yorulma aşınmasında malzeme sertliğinin aşınma üzerine etkisi," Yüksek lisans tezi, Makina Mühendisliği Bölümü, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye: 2012.
- [70] U. Özsera, "Endüstriyel yatak alaşımlarının aşınma davranışlarının karakterizasyonu," Yüksek lisans tezi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye: 1999.
- [71] F. Yılmaz, "Sürtünme ve Aşınma," 9th Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi, Türkiye, 1997, ss. 229-256.
- [72] F. Y. Şahin, "Titanyum-nikel alaşımlı malzeme üretimi ve aşınma davranışlarının incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Makina Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye: 2012.
- [73] B. Sarıca, "Farklı kalite çeliklere uygulanan yüzey kaplama işlemlerinin aşınma davranışlarına etkisi," Yüksek lisans tezi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye: 2005.
- [74] M. A. Topbaş, *Endüstri Malzemeleri*, 2. baskı, İstanbul, Türkiye: Yıldız Teknik Üniversitesi, 1993, ss. 220-223.
- [75] S. Apay, "Tozaltı sert dolgu kaynağına bor tozu ilavesinin aşınma özellikleri üzerine etkisi," Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye: 2007.
- [76] B. Selçuk, "Borlanmış AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye: 1994.
- [77] D. F. Moore, "Principples and Application Tribology," *Pergamon Pres*, vol. 1, pp. 109-156, 1975.

- [78] A. A. Öztürk, "Motor krank mili muylularına dolgu kaynağı yapılması ve aşınma karakteristiklerinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye: 2004.
- [79] F. Karataş, "Demir yollarında çalışan Monoblok tekerlerin çalışmaları esnasında aşınan kısımların MİG-MAG kaynağı ile değişik elektrot kompozisyonlarında yapılan dolgu kaynağının aşınma özelliklerinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Metal Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye: 1997.
- [80] B. Oğuz, *Dolgu Kaynağı El Kitabı*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Oerlikon Yayınları, 1976, böl. 2, ss. 4-72.
- [81] B. Oğuz, *Aşınma Sorunları ve Dolgu Kaynakları*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Oerlikon Yayınları, 1993, böl. 1, ss. 1-8.
- [82] H. B. Cary, *Modern Welding Tecnology*, vol. 6, New Jersey, U.S.A.: Sixth Edition, 1979, pp. 137.
- [83] T. Ohtani, Kamasaki and C. Tanaka, "On Abrasive Wear Property During Three-Body Abrasion of Wood," Elsevier, vol. 5, pp. 60-66, 2003.
- [84] Y. Kılınç, "Yağlı sürtünme şartlarında çelik ince zırlı yataklarda üretim tekniklerinin aşınmaya etkisinin araştırılması," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisi Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye: 1993.
- [85] H. Joseph and A. O. Tylczak, "Abrasive Wear," *ASM Handbook*, vol. 18, pp. 184-185, 1992.
- [86] G. Pintaude, D. K. Tanaka and A. Sinatora, "The Effects of Abrasive Particle Size on The Sliding Friction Coefficient of Steel Using a Spiral Pin-On-Disk Apparatus," Elsevier, vol. 255, pp. 55-59, 2003.
- [87] F. M. Ashby and H. R. D. Jones, "Engineering Materials," *Butterworth Heinemann*, vol. 2, pp. 295, 1996.
- [88] A. H. Demirci, "Teknik kuru sürtünmeli bir aşınma deney düzeneği tasarım ve imalatı," *Makine ve Mühendis Dergisi*, c. 29, s. 330, ss. 25-27, 1987.
- [89] B. Değerli, "Aşınma deneylerinde kullanılan deney düzenekleri," *Makine ve Mühendis Dergisi*, c. 37, s. 432, ss. 36-38, 1996.
- [90] I. Uygur, "Microstructure and wear properties of AISI 1038 H steel weldments," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 58, no.6, pp. 303-311, 2006.
- [91] B. Sarıgül, "Çeliğin sert krom kaplanması ve çeşitli çalışma parametrelerinin kaplama kalitesine etkilerinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Kimya Anabilim Dalı, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye, 2016.
- [92] Y. Iwai, T. Okada and T. Fujieda, "Effects of hard chromium plating on cavitation corrosion," Elsevier, vol. 128, pp. 2704-2710, 1989.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hasan KIR
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.02.1990 / OF
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : hasan14061@ogr.duzce.edu.tr / 1hasankir@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	İmalat Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2017
Lisans	Tasarım ve Konstrüksiyon Öğt.	Düzce Üniversitesi	2013
Lise	Tasarım ve Konstrüksiyon Öğt.	Bahçelievler Kocasinan EML.	2007