

PLAZMA NİTRÜRLEME İLE ÇELİKLER  
ÜZERİNDE KOMPLEKS KAPLAMALARIN  
OLUŞTURULMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim GÜNEŞ

Danışman  
Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2006

“Bu tez çalışması “104M213” numaralı proje olarak TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.”

T.C.  
AFYONKARAHİSAR KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLAZMA NİTRÜRLEME İLE ÇELİKLER  
ÜZERİNDE KOMPLEKS KAPLAMALARIN  
OLUŞTURULMASI

İbrahim GÜNEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Metal Eğitimi Anabilim Dalı  
Danışman  
Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

AFYON  
2006

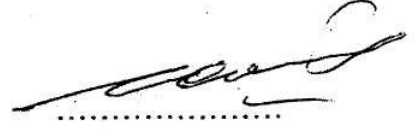
## TEZ SINAV SONUÇ FORMU

**İbrahim GÜNEŞ**'in yüksek lisans tezi olarak hazırladığı "**Plazma Nitrüleme ile Çelikler Üzerinde Kompleks Kaplamaların Oluşturulması**" başlıklı bu çalışma, lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

09/08/2006

İMZA

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Galip SAİD  
(Başkan)



Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK  
(Danışman)



Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇOLAKOĞLU



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...15.08.2006...Gün  
ve 2006/16..7..sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Dr. Süleyman TAŞGETİREN  
MÜDÜR  
Enstitü Müdürü

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### PLAZMA NİTRÜRLEME İLE ÇELİKLER ÜZERİNE KOMPLEKS KAPLAMALARIN OLUŞTURULMASI

İbrahim GÜNEŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

Bu çalışmada; (20 x 6 mm ebatlarındaki AISI 8620 ve AISI 52100 çelikleri termo-reaktif difüzyon yöntemi (TRD) ile %55 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %35 ferro-krom, %10 NH<sub>4</sub>Cl içeren bir paslanmaz çelik kutu içerisinde krom karbür kaplanmıştır. Kaplama işlemi 800 °C ve 1000 °C’de 5 saat süreyle elektrik rezistanslı bir fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak kormlanmış ve kromlanmamış AISI 52100 çelikleri plazma iyon yöntemi ile %50 H<sub>2</sub>, %50 N<sub>2</sub> gazı ortamında 500 °C’de 2 saat sürelerle nitrürlenmiştir. Numuneler alkolle temizlendikten sonra plazma haznesine yerleştirilmiş ve haznenin havası 0,025 mbar basınca boşaltılmıştır. Deney süresince sıcaklık numuneye temas halinde olan bir termokupl vasıtasıyla ölçülmüştür ve plazma 500-600 V gerilimlerde oluşturulmuştur. Kesitten kesilen numuneler metalografik işlemlerden geçirilerek optik mikroskop altında incelenmiştir. X-ışınları analizi çelikler üzerinde TRD işlemi için Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> ve Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> fazlarını, plazma nitrürleme için Fe<sub>2</sub>N ve Fe<sub>3</sub>N fazlarını ve çift işlem için CrN, Cr<sub>2</sub>N fazlarını göstermiştir. Tabakalardaki aşınma hızı ve sürtünme katsayısı sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklığın artmasıyla hem aşınma hızı hem de sürtünme katsayısı artmaktadır.

**2006, 79 sayfa.**



**Anahtar kelimeler:** AISI 52100, AISI 8620, Krom karbür, Krom nitür, Yüksek sıcaklık aşınması, Aşınma ve sürtünme

## ABSTRACT

Ms.Sc

### FORMING OF COMPLEX COATINGS ON THE STEELS BY PLASMA NITRIDING

İbrahim GÜNEŞ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metal Education

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

In this study, various coatings were applied for AISI 8620 and AISI 52100 steels with dimension of (20 x 6 mm). TRD carbide coatings were performed by pack method in the powder mixture consisting of 35 wt.% ferro-chromium powder, 10 wt.% ammonia chloride activator and 55 wt.% filler (alumina powder) in a double stainless steel box at temperatures of 800 and 1000 (C for 5 h in an electrical resistance furnace. Secondly, chromized and non- chromized AISI 52100 steels ion nitrided at gas mixtures of 50% H<sub>2</sub> and 50% N<sub>2</sub> at temperature of 500°C for 2h. Samples were cleaned in alcohol and placed in plasma nitriding chamber. Plasma treatment was performed in a dc plasma system. The system was evacuated to 0,025 mbar. The glow discharge was operated with a potential difference of 500–600 V. The nitriding temperature was measured using thermocouple, placed at the bottom of the nitrided sample. After nitriding, the samples were cut in cross-section and prepared using Standard metallographic techniques. X-ray diffraction analysis showed phases of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> and Cr<sub>7</sub>C for TRD treatment, phases of Fe<sub>2</sub>N ve Fe<sub>3</sub>N for plasma nitriding and phases of CrN, Cr<sub>2</sub>N for dublex treatment on the steels. The wear rate and friction coefficient of hard layers were depend on the temperature. Both the wear rate and friction coefficient increased with increase in temperature.

**2006, 79 pages.**

**Key Words :** Chromizing, plasma nitriding, duplex treatments, Wear

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	III
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	X
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Yüksek Sıcaklık Difüzyon Kaplamaları.....	3
2.1.1 Termo-reaktif difüzyon prosesi (TRD).....	3
2.1.1.1 Katı ortamda karbürleme.....	4
2.1.1.2 Akışkan yatakta karbürleme.....	4
2.1.1.3 Gaz fazından çökeltme ile karbürleme.....	4
2.1.1.4 Sıvı ortamda karbürleme.....	5
2.1.2 TRD prosesinin üstünlükleri.....	5
2.1.3 TRD işleminin endüstriyel uygulamaları.....	6
2.1.4 TRD Yönteminde Temel Prensipler.....	8
2.1.5 Karbürler.....	9
2.1.5.1 Karbürlerin kristal yapıları.....	10
2.1.5.2 Karbürlenmiş yüzeylerin genel özellikleri.....	11
3. PLAZMA NİTRÜRLEME.....	13
3.1 Plazmanın Tanımı ve Elemanları.....	13
3.2 Plazma Konumu Geçiş.....	16
3.3 Elektrik Boşalması Mekanizması.....	17
3.4 Plazmanın Özellikleri.....	22
3.5 Plazma Çeşitleri.....	23

3.6 Plazmanın Nitrürlemenin Endüstriyel Uygulamaları.....	23
3.7 Plazma Nitrürlemenin Ekonomik Boyutu.....	26
3.8 Plazma ile Termokimyasal Yüzey İşlemleri.....	27
3.9 Plazma ile Karbürleme .....	28
3.10 Plazma ile Nitrokarbürleme.....	29
3.11 Plazma ile Borlama.....	31
3.12 Plazma ile Nitrürleme.....	31
3.12.1 Sıvı Nitrürleme ( Tuz Banyosunda Nitrürleme ).....	33
3.12.2 Gaz Nitrürleme.....	34
3.12.3 Ekipman ve Proses Dataları.....	34
3.12.4 İyonitürasyonun Metalurjik Yönden Avantajları.....	35
3.12.5 İyonitürasyonun Tatbik Alanı ve İş Parçasının Hazırlanması.....	36
4. SÜRTÜNME VE AŞINMA.....	38
4.1 Sürtünme ve Sürtünme Teorileri.....	38
4.2 Aşınma ve Aşınmaya Etkileyen Faktörler.....	42
4.3 Aşınma Proseslerinin Sınıflandırılması.....	43
4.3.1 Adhezif (yapışma) Aşınması.....	44
4.3.2 Abrazif Aşınma.....	47
4.3.3 Yorulma ve Delaminasyon Aşınması .....	48
4.3.4 Oksidasyon aşınması.....	49
4.3.5 Konu ile İlgili Çalışmaların İncelenmesi.....	49
5. MATERYAL ve METOT.....	53
5.1 Deney Malzemesi.....	53
5.2 Krom Karbür ve Nitrürleme İşlemi.....	53
5.3 Metalografik İnceleme .....	54
5.4 X – Işını Çalışmaları İşlemi.....	54
5.5 Tabaka Kalınlığı ve Mikrosertlik.....	54
5.6 Aşınma Deneyleri.....	55
6. BULGULAR.....	57
6.1 Mikro Yapı Sonuçları.....	57

6.2 X – Işınları Sonuçları.....	60
6.3 Aşınma ve Sürtünme Sonuçları.....	63
7. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	73
7.1 Öneriler.....	74
KAYNAKLAR .....	75
TEŞEKKÜR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	83

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Proses sırasında aktivatörün ve karışım tozlarının sıcaklıktan.....	9
3.1 Magnezyum atom modeli.....	14
3.2 Bir atoma ait elektronların formal olarak enerji seviyeleri şeması.....	16
3.3 Tüm gaz boşalma bölgeleri ve elektrik arkı boşalma karakteristikleri.....	18
3.4 Elektrik arkı mekanizmasının şematik gösterilişi.....	20
3.5 Nitrokarbürleşmiş malzemede (saf demir) nitrokarbürleşmiş tabakanın optik mikroskop görünüşü .....	30
3.6 İyonitürleşme işlemi prensip şeması.....	35
4.1 SiC-Metal çifti için metalik bağın d-valansı ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki.....	42
4.2 Adhezif aşınmanın temel mekanizması hali.....	45
4.3 Bilye-disk adhezif aşınma çiftinde bilye ve diskin aşınma diyagramı .....	46
5.1 Kaplanan numunelerin boyutları.....	53
5.2 Yüksek sıcaklık aşınma deney sisteminin görünümü.....	55
6.1 Değişik sıcaklıklarda AISI 52100 ve 8620 çelikleri üzerinde TRD yöntemiyle oluşturulan krom karbür tabakasının optik mikroyapısı.....	59
6.2 AISI 52100 çeliği üzerinde oluşturulan plazma nitürleşmiş tabakasının optik mikroyapısı.....	59
6.3 AISI 52100 çeliği üzerinde oluşturulan krom nitürleşmiş tabakasının optik mikroyapısı.....	60
6.4 Değişik sıcaklıklarda 5 saat süreyle TRD ısı işlemine maruz bırakılmış AISI 52100 ve 8620 çeliklerinin X-ışınları difraksiyonu analizi.....	61
6.5 AISI 52100 ve 8620 çeliklerinin aşınma hızının sıcaklıkla değişimi.....	67
6.6 AISI 52100 ve 8620 çeliklerinin sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi.....	69
6.7 Yüzey işlem görmemiş AISI 52100 çeliğinin 150°C’de yüzeyine uygulanan aşınma deneyinde oluşan izin mikroyapı görüntüsü.....	70
6.8 AISI 52100 çeliğinin 800°C’de 5 saat krom karbürleşmiş numunenin 150 °C’de yüzeyine uygulanan aşınma deneyinde	

oluşan izin mikroyapı görüntüsü .....	70
6.9 AISI 52100 çeliğinin 1000°C’de 5 saat krom karbürleşmiş numunenin 150 °C’de yüzeyine uygulanan aşınma deneyinde oluşan izin mikroyapı görüntüsü .....	71
6.10 Plazma nitrürlenmiş AISI 52100 çeliğinin 150 °C’de yüzeyine uygulanan aşınma deneyinde oluşan izin mikroyapı görüntüsü.....	71
6.11 Krom nitrürlenmiş AISI 52100 çeliğinin 150 °C’de yüzeyine uygulanan aşınma deneyinde oluşan izin mikroyapı görüntüsü.....	71
6.12 Aşındırıcı WC-Co bilyenin aşınma yüzeyi optik mikroskop fotoğrafı .....	72



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\mu_k$	Sürtünme Katsayısı

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
CrC	Krom karbür
CrN	Krom nitür
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
HV	Vickers sertliği
HRC	Rockwel sertliği
TRD	Termoreaktif difüzyon
TD	Termo difüzyon
CFE	Karbür oluşturuçu element
NFE	Nitür oluşturuçu element
T	Sıcaklık
t	Zaman
L	Hasar iz genişliği
R	Aşındırıcı bilye yarıçapı
S	Hasar alanı
d	Hasar derinliği

## GİRİŞ

Endüstride yaygın olarak kullanılan malzemelerin başında dökme demirler ve çelik gelmektedir. Bu malzemelerden yapılan parçalar, gerek korozyon ve aşınma dayanımlarının artırılması ve gerekse dış görünüşlerinin güzelleştirilmesi için, dış etkenlere dayanıklı, parlak ve sert metallere kaplanırlar (Dubpernell 1985). Kaplama; elektrolitik, sıcak daldırma, sıvı metal püskürtme, metal giydirmeye ve iyon implantasyon yöntemleriyle yapılmaktadır (Çakır 1990). Endüstride kullanılan parçalar başta krom olmak üzere alüminyum, bakır, kobalt, nikel, çinko, kadmiyum, kalay ve kurşun gibi saf metallere ya da bunların alaşımları ile kaplanır. Krom kaplanan parçalar daha çok makine endüstrisinde kullanılır. Mühendislik ve dekoratif amaçlı olmak üzere ikiye ayrılan krom kaplama; kromun korozyon ve aşınma direnci ile sertliğinin yüksek, sürtünme katsayısının düşük olması nedenleriyle tercih edilmektedir (James 1997, Lowenheim 1963).

Endüstrideki plazma nitrürleme ve seramik kaplamaların plazma destekli (PVD), yüzey mühendisliği tekniklerinin en yaygın kullanılan yöntemleridir. Plazma nitrürleme işlemlerinde nitrürleme reaksiyonu sadece malzeme yüzeyinde gerçekleşmez, aynı zamanda azotun yüzeyden malzeme merkezine doğru uzun mesafeli difüzyonundan dolayı yüzey altında da meydana gelir. Yüzeyde oluşan bir iyon nitrürleme tabakasının yanında yüzey altında nispeten daha kalın (yaklaşık 0.5mm) ve sert (Vickers sertliği yaklaşık 1000 HV) bir yapı meydana gelmektedir. Bu kalın tabaka numune merkezine inildikçe azotça fakirleşmekte ve sertliği düşmektedir. Bu sadece malzemenin yorulma mukavemeti ve aşınma dayanımını iyileştirmekle kalmaz aynı zamanda yük taşıma kapasitesini de artırır.

Makinelerde ortaya çıkan arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının kullanım dışı kalmalarının en önemli sebeplerinden birisi, hatta en önemlisi aşınmadır. Sürtünme nasıl bir enerji kaybı ise aşınma da tekrar geriye kazanılamayan bir madde kaybı sebebidir. Bu yüzden, dünyada her yıl önemli ölçüde ekonomik kayıplar meydana gelmekte, buna paralel olarak, kayıpların önlenmesi için

çeşitli tedbirler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Son yıllarda sağlanan gelişmelerle, aşınma dayanımını artırmaya yönelik yüzey kaplama teknikleri, mühendislik takım ve elemanlarının seçim ve tasarımında çok önemli değişikliklere sebep olmuştur.

Demir esaslı malzemelerin termokimyasal olarak karbür kaplanması üzerine son 20 yıl içerisinde çok sayıda makale, bildiri ve kitap bölümleri çıkmıştır. Japonya’da çok sayıda firma bu kaplama tekniğini kullanmaktadır. Ülkemizin bu teknikle tanışması üniversitelerde araştırma konusu olarak incelemelerden ileri gitmemiştir. Dünya literatüründe özellikle titanyum karbür, vanadyum karbür ve krom karbür üzerinde geniş çalışmalar yapılmış ve bu kaplamalar üzerinde kapsamlı araştırmalar yapılmıştır.

Mühendislik amaçlı kaplamalarda krom doğrudan esas metal üzerine kalın bir tabaka halinde (2,5-500 µm) kaplanır (Guffie 1989). Makinalarda yaygın olarak kullanılan miller, piston segmanları, motor subap itecekleri, içten yanmalı motor silindirleri ile takım tezgahlarına ait bazı parçalar sert krom kaplanırlar (Lowenheim 1963). Ayrıca, ucuz ve kolay bulunan metallere üretilen ve yüzey özellikleri iyi olmayan parçalar da krom kaplanarak kullanım süreleri artırılabilir (Pletcher ve Walsh 1990). Dekoratif amaçlı krom kaplamaların en önemli özelliklerinden biri, kaplama yüzeyinin parlak bir görünüme sahip olmasıdır. Ancak, dekoratif amaçlı kaplamalarda krom tabakasının kalınlığı 0,13 µm ile 1,3 µm arasında değişir. Bu kalınlık parça yüzeylerini korozyona ve aşınmaya karşı korumada yeterli olmayabilir (Weiner ve Walmsley 1980). Bu nedenle dekoratif amaçlı krom kaplamalarda parçalar, bakır ve nikel kaplandıktan sonra krom kaplanırlar (Guffie 1989).

Metal kaplamaların endüstriyel uygulamalarda 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 kazanmaktadır (Dubpernell 1972).

## **2. GENEL BİLGİLER**

### **2.1 Yüksek Sıcaklık Difüzyon Kaplamaları**

#### **2.1.1 Termo-Reaktif Difüzyon Prosesi (TRD)**

Termo-reaktif difüzyon prosesi; karbür, nitrür ve karbo-nitrür gibi sert ve aşınma direnci yüksek olan tabakaların, çelik malzemelerin yüzeyinde oluşturulduğu bir metottur. TRD prosesinde çelik ve altlık malzemedeki karbon ve azot, vanadyum, niyobyum, tantalum, krom, molibden veya tungsten gibi karbür veya nitrür oluşturu elementlerle, biriken bir tabaka oluşturmak için difüze olur. Difüze olan karbon ve azot, karbür ve nitrür oluşturu elementlerle altlık malzeme yüzeyinde metalürjik olarak bağlanmış olan karbür ve nitrür kaplamaları oluşturacak şekilde yoğun bir biçimde reaksiyona girer.

TRD prosesi geleneksel yüzey sertleştirme metotlarına benzemez. Çünkü geleneksel yüzey sertleştirme metotlarında karbon ve azot, altlık malzemenin yüzeyini sertleştirmek amacıyla dışarıdan difüze edilmektedir. TRD Prosesi konvansiyonel difüzyon metoduna benzememesine rağmen, TRD prosesinde de altlık malzemenin yüzeyinde kaplama tabakasının oluşumu gerçekleşmektedir. TRD prosesinde elde edilen kaplama tabaka kalınlıklarına CVD veya PVD teknikleri kullanılarak ulaştırılmaktadır. Kıyaslanacak olursa, CVD kaplamaların kalınlıkları, TRD prosesinde elde edilen kaplamaların kalınlıklarına yakındır (Heat Treatment 1991).

Termo-reaktif difüzyonla karbür tabakası dört değişik ortamda oluşturulabilir (İpek 1996).

- a- Katı ortamda karbürleme.
- b- Akışkan yatakta karbürleme.
- c- Gaz fazında çökeltme ile karbürleme.
- d- Sıvı ortamda karbürleme.

### **2.1.1.1 Katı Ortamda Karbürleme**

Katı ortamda karbürleme; yüzeyi karbürlenecek malzemenin toz halindeki karbür yapıcı ortam içerisinde 850–1050 °C arasındaki sıcaklıklarda 10–30 saat tutulmasıyla gerçekleşir. Kutu sementasyonuna benzeyen bu metot soy gaz atmosferinde veya sıkı kapatılmış kutularda normal atmosferde yapılabilir (Baldı vd. 1980, Jurkov vd. 1988). Karbürleme ortamının bileşenleri, karbon içeren bir bileşiğin yanı sıra karbür yapıcı element, aktivatör ve dolgu malzemesinden ibarettir. Karbür yapıcı elementler Cr, Mo, W, Nb, Zr, Ta, Ti ve Si' dur.

Aktivatör ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NH}_4\text{F}$ ,  $\text{NH}_4\text{Br}$ ,  $\text{NH}_4\text{I}$ ) parçalandığında ve karbür yapıcı elementlerle reaksiyona girdiğinde aktif bir gaz ortamı meydana getirmektedir. Bunların görevi, karbür yapıcı element parçacıklarının topaklaşmasını ve malzeme yüzeyine yapışması önlemektir (Tohru 1989).

### **2.1.12 Akışkan Yatakta Karbürleme**

Akışkan yatak sisteminde, kapalı bir ortam içine yerleştirilen, boyutları 100–200  $\mu\text{m}$  arasında değişen seramik tozları ve tabandan beslenen hava inert gaz ile akışkan ortam sağlanmaktadır. Ortama ilave edilen karbür yapıcı tozlar 900–1200 °C aralığındaki sıcaklıklarda çelik yüzeyinde birleşerek karbür tabakası oluşturmaktadır. Tabaka kalınlığı ortam bileşenleri yanı sıra zaman ve sıcaklığa bağlıdır (Öktem vd. 1994).

### **2.1.1.3 Gaz Fazından Çökeltme İle Karbürleme**

Vakum teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, gaz fazında çökeltme tekniklerinde de ilerlemeler olmuştur. Bu yeniliklere örnek olarak CVD ve

PVD tekniklerini gösterebiliriz. CVD yöntemi, çöktmek istenen maddelerin buharının malzeme yüzeyinde kimyasal bir reaksiyon oluşturmasıyla uçucu olmayan bir çökelti yapması şeklinde açıklanabilir. Proses genellikle yüksek sıcaklıklarda 500 °C'nin üzerinde 10–760 Torr basıncı altında yapılır. PVD (Buhar Fazından Kaplama) yöntemi, CVD yöntemine benzer şekilde gaz fazından fiziki olarak çöktmedir. Bu yöntemler ve alaşımları üzerinde nitrür, oksit, karbür gibi bileşikler vakum altında, ısı enerjisi veya parçacık bombardımanı yardımıyla çöktilir (Öktem vd.1994).

#### **2.1.1.4 Sıvı Ortamda Karbürleme**

Tuz banyosunda karbürleme sistemi, normal tuz banyosu ısıl işleme benzemekte CVD ve PVD yöntemine kıyasla çok daha basit araç ve gereç gerektirmektedir. Bu yöntemde karbürleme ortamı sıvıdır. Karbürlenecek malzeme 800–1200 °C arasında 1–11 saat bekletilerek karbür oluşumu gerçekleştirilmektedir (Öktem vd.1994).

#### **2.1.2 TRD Prosesinin Üstünlükleri**

TRD Prosesinin üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

- Basit donanım, düşük maliyet,
- Kolay operasyon,
- Seçici karbür kaplama,
- Girintili çıkıntılı bölgelerde üniform kaplama,
- Uzun banyo ve kalıp ömrü,
- Malzemeye yapışan tozun kolay temizlenmesi,
- Koruyucu atmosfer gerektirmemesi,
- Kolay su verebilme (göbek sertliği),
- Atık ve zehirli gaz olmaması, çevreye zarar vermemesi,
- Kalıp parlatılmasında kullanılan işçilikten tasarruf,

- Yağlayıcıdan tasarruf (veya hiç yağlayıcı kullanılmadan),
- Yüzey işlemlerindeki ve boyutsal hassasiyetteki artıştan ötürü, ürün kalitesinin artar.

Daha az kalıp malzemesi kullanılarak, kalıp malzemesi ve üretim maliyetlerinde azalma sağlar (Öktem vd.1994).

### **2.1.3 TRD İşleminin Endüstriyel Uygulamaları**

Karbürlerin mükemmel özelliklerinden dolayı, karbür kaplı malzemeler, kalıplar, presler, döküm dövme, toz sıkıştırma, boru çekme, tel yapımı, kauçuk, plastik imalatında ayrıca kesme takımı, bıçaklar ve otomobil parçalarında kullanılmaktadır (Fujita ve Arai 1985). Dahası bu proses, metal ve tekstil endüstrisinde yönlendirici olarak kullanılan malzemelerde, pompa parçalarında, hadde zincirlerinde aşınan ve yıpranan parçaların özelliklerini iyileştirmiştir. Ayrıca yatak parçaları, şaft, pul, nozul ve valflerin de özelliklerini iyileştirmede kullanılmaktadır. Eğer kullanılmak istenen aletler, aşınmaya dayanıklı, iyi korozyon ve oksidasyon direncine sahipse şoka dayanıklı, malzemenin bütününe tokluk, yorulma ve enine kopma mukavemetini koruyan, sert ve aşınmaya dirençli bir yüzey gerektiriyorsa, bu durumda TD prosesi ile oluşturulan bir yüzey tabakası düşünülmelidir (Plumb 1985).

Takım çelikleri, TRD prosesine tutulmaları için minimum % 0,3 karbon içermelidir. Bu değer birçok soğuk ve sıcak takım çeliklerinde, yüksek hız takım çeliklerinde ve bazı martenzitik paslanmaz çeliklerde mevcuttur. Yüksek hız takım çeliklerinde tam altlık malzeme sertliğini elde etmek için TRD işlemi sonrasında sertleşme işlemi uygulamak gerekmektedir. TRD için en iyi uygulamalar yüksek aşınma ve kazıma problemlerine sahip takımlardadır. Çizelge 2.1'de bazı şekillendirme, kesme takımları ve kalıp bileşenleri verilmektedir (Heat Treatment 1991).

Çizelge 2.1 TRD prosesine tabi tutulan takımların uygulamaları

Saç metal şekillendirme	Derin çekme kalıpları, sürücüler, iticiler, şekillendirme merdaneleri, iz çekiçleri, folya merdaneleri, kesme bıçakları, sıyırıcı yardımcı pimler ve bujingleri, pilot pimler ve diğerleri
Boru ve tüp ürünleri	Çekme kalıpları, sıkıştırma haddeleri, frenleyici merdaneler, boş merdaneler ve yardımcı merdaneler vs.
Boru ve tüp işleri	Bükme kalıpları, basmakalıplar, mandal, genişletme çekiçleri, sıvama ve yayma kalıpları, vs.
Tel üretimi	Çekme kalıpları, doğrultma merdanesi, oksit kaldırıcı merdane, besleme merdaneleri, yardımcı merdaneler ve kesme takımları.
Tel çekme işleri	Bükme kalıbı, yardımcı merdane, besleme merdanesi, sıyırma bıçağı vs.
Soğuk ve ılık dövme	Ekstrüzyon koçları ve kalıpları, derin çekme kalıpları, yağma çekiçleri ve kalıpları, markalama çekiç ve kalıpları, hadde kalıplar, merdane, kesiciler.
Sıcak dövme	Preste dövme kalıpları, hadde kapakları, yağma kapakları, döner sıvama kalıbı, kapalı dövme kalıbı, vs.
Döküm (Al, Zn)	Gravite döküm maça pimi, basınçlı döküm maça pimi, maça besleyiciler vs.
Kauçuk şekillendirme	Şekillendirme kalıbı, Ekstrüzyon kalıbı, Ekstrüzyon itici sonsuz vidası, torpido silindir kolları, torpido, silindir kolları, nozullar, giriş vs.
Plastik şekillendirme	Şekillendirme kalıpları, enjeksiyon vidası, kollar, silindirler, sevk ediciler, nozullar, giriş vs.
Cam şekillendirme	Şekillendirme kalıbı, pompalar, yanma nozulları, makine parçaları vs.
Toz kompaktlama	Şekillendirme kalıpları, maça çubukları, Ekstrüzyon kalıpları, vida vs.
Kesme ve işleme	Kesme takımları, kesme bıçakları, matkap tapa germe pimi, takım tutucular, yardımcı plakalar vs.



### 2.1.4 TRD Yönteminde Temel Prensipler

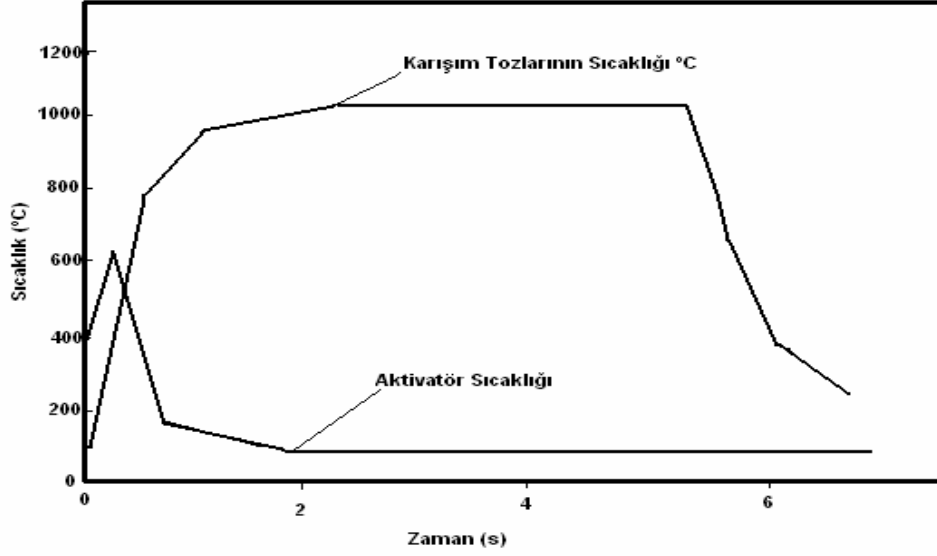
TRD yönteminde iş parçasının içine gömüldüğü toz karışımları temel olarak üç bileşenden oluşmuştur: Kaplama element kaynağı (verici malzeme, örn. Fe–Cr, Fe–V, Cr) karışımın tozlarının birbirleriyle sinterleşmesini önlemek için inert bir dolgu maddesi ( $Al_2O_3$  veya  $SiO_2$ ) ve bir aktivatör (genellikle  $NH_4Cl$ ) (İpek 1996).

TRD yöntemi gibi termokimyasal difüzyon yöntemleri birçok değişkenden etkilenir. Bu değişkenler aşağıda sıralanmışlardır (Üstel 1998).

- Difüzyon sıcaklığı
- Difüzyon süresi
- Verici malzemenin miktarı
- Aktivatör miktarı
- Numune malzemesinin yapısı (alaşım elementleri, karbon içeriği)
- Son işlemler (ısıl işlem)

Karışım bileşenlerinin önemli bir elemanı da aktivatördür. Aktivatör ısıtma esnasında ferro alaşım elementi ile reaksiyona girer ve uçucu metalik halojenürleri oluşturur. Bu şekilde aktif gaz ortamı sağlanmış olur. Aktivatör olarak muhtelif halojenür tuzları ( $NaF$ ,  $-Cl$ ,  $-Br$ ,  $-I$ ;  $MgF$ ,  $-Cl$ ,  $-Br$ ,  $-I$ ;  $NH_4F$ ,  $-Cl$ ,  $-I$ ) kullanılır.

TRD prosesi ile kaplama işleminde aktivatör ve karışım tozlarının proses sırasındaki değişimi Şekil 2.1’de verilmiştir. Buna göre aktivatör yaklaşık 580 °C’de ve işlem süresinin ilk 15 dakikasında parçalanmaktadır. Parçalanma sırasında meydana gelen gazlar bir tahliye borusuyla dışarı verilmektedir.



Şekil 2.1 Proses sırasında aktivatörün ve karışım tozlarının sıcaklıkları (Üstel 1998).

Proseste kullanılan altlığın karbon içeriğine bağlı olarak, düşük karbon miktarında metalik tabakalar (alüminyum, krom, titanyum, silisyum), yüksek karbon içeriğinde ise kullanılan ferro alaşımın cinsine bağlı olarak da seramik esaslı tabakalar (krom karbür, titanyum karbür, vanadyum karbür vb.) elde edilir. TRD prosesi ile fırında soğutulmuş üretilen kaplamalar, altlığın mukavemetinin artırılması amacıyla ısıl işleme tabi tutulur. Isıl işlemler tuz banyosunda 800–850 °C arasında yapılır.

### 2.1.5 Karbürler

Karbürler, en yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemeler olarak bilinmektedir ve sertlikleri de oldukça yüksektir. Bu özelliklerinden dolayı karbürler önemli mühendislik malzemeleri haline gelmişlerdir. Oksidasyon direncinin zayıflığı, özellikle nemli atmosferde karbürlerin kullanım alanını sınırlandırmaktadır (silisyum karbür hariç) (İpek 1996).

Karbürleri genel olarak dört gruba ayırmak mümkündür:

- Tuz benzeri karbürler oluşturan elementler  $\text{CaC}_2$  gibi.
- Metal benzeri karbürler oluşturan elementler, WC gibi.
- Elmas benzeri karbürler  $\text{B}_4\text{C}$  gibi.
- Metalik olmayan elementlerin karbürleri CO gibi.

Çizelge 2.2 Bazı sert malzemelerin sertliklerinin kıyaslanmaları (Ulman 1986)

Malzeme	Sertlik Vickers ( $\text{Kg/mm}^2$ )
Elmas	8000
Bor karbür	5000
Titanyum karbür	3300 - 4000
Titanyum borür	3400
Silisyum karbür	3400
Titanyum nitrür	3000
Volfram karbür( $\text{W}_2\text{f}$ )	3000
Vanadyum karbür	2100 - 2700
Niyobyum karbür	1900 - 2500
Krom karbür	1700 - 2300
Demir borür	2000
Volfram karbür (WC)	1600
Sert krom kaplama	1100
Sertleştirilmiş takım çeliği	900
İnşaat çeliği	150

### 2.1.5.1 Karbürlerin Kristal Yapıları

Goldschmidt periyodik tablonun IV–B ve V-B grupları ile üç ve beşinci periyotların arasında bulunan elementlerin oluşturduğu karbürleri (metal benzeri karbürleri) incelemiştir. Bu elementler, yaygın bir şekilde karbür oluşturuçu olarak ilave edilen bir bütün içine almaktadır. Goldschmidt ikili karbürlerin yapı bakımından üç sınıfa ayrılabilceğini bulmuştur.

1. Sınıf; kübik yapı (NaCl tipi): TiC, NbC, V<sub>4</sub>C<sub>3</sub> gibi.
2. Sınıf; sıkı paket hegzagonal yapı: Mo<sub>2</sub>C, MoC, W<sub>2</sub>C, WC gibi.
3. Sınıf; ortorombik yapı: Fe<sub>3</sub>C, Mn<sub>3</sub>C gibi.

Titanyum, niyobyum, vanadyum, krom, tungsten yada molibden gibi güçlü karbür oluşturu elementler mevcut olduğu zaman, çökelti, sementit yerine daha stabil alaşım karbürleri olabilir (İpek 1996).

### 2.1.5.2 Karbürlenmiş Yüzeylerin Genel Özellikleri

Karbürlü tabakaların faz yapıları, banyo bileşimine bağlı olarak değişmektedir. Karbür kaplamada yer alan bu fazlar, kaplama özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Bu nedenle kaplamada yer alan bileşiklerin bilinmesinde yarar vardır.

**Oksidasyon direnci:** V ve Nb karbür kaplı çelikler 500 °C civarında açık havada uzun süre kalırlarsa oksidasyona uğrarlar. Buna karşılık krom karbür kaplı çelik 800 °C civarında bile zor oksitlenir.

**Aşınma dayanımı ve ömrü:** Karbür kaplı çelik yüzeylerin sert ve sürtünme katsayılarının düşük olmasından dolayı, bunlar aşınmaya karşı yüksek dayanım göstermektedir.

**Sertlik:** Karbür tabakaların sertliği yüksektir. Tipik mikro sertlik değerleri aşağıda gösterilmiştir (Öktem vd. 1994).

Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	1100–1300 H <sub>v0,02</sub>
Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	1700–2300 H <sub>v0,02</sub>
NbC	1900–2500 H <sub>v0,02</sub>
VC	2100–2700 H <sub>v0,02</sub>

**Korozyon direnci:** Karbür kaplı demirler iyi korozyon direnci gösterirler. Cr karbür kaplı çelikler açık hava, klorin içerikli atmosfer ve tuz püskürtme testlerinde çok iyi korozyon direnci göstermiştir (Öktem vd.1994).

### 3. PLAZMA NİTRÜRLEME

Metal parçacıklarının yüzeylerini sert ve aşınmaya dayanıklı duruma getirmek, yorulma, korozyon ve sürtünme davranışlarını iyileştirmek için malzemelerin yüzeyinden iç kısımlara doğru yabancı atomların nüfuziyetini sağlamak gerekmektedir. Malzeme yüzeyinin hemen kenarında böyle bir tabaka oluşturmak için birçok değişik yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden hangisinin uygun olduğunu karar vermek için malzemenin kimyasal kompozisyonuna, durumuna ve yüzey şartlarına bağlı olarak karar verilir (Çelik ve Karadeniz 1993 ).

#### 3.1 Plazmanın Tanımı ve Elemanları

Maddenin kendine has özellikleri bulunan katı, sıvı, gaz ve plazma hali olmak üzere dört hali vardır. Bu haller arasındaki esas fark sahip oldukları enerjidir. Yani maddenin herhangi bir konumundaki (hal) enerjisini değiştirmek suretiyle maddeyi diğer bir konuma geçirmek mümkündür. Örneğin katı haldeki bir maddeye belirli, o maddeye özel bir enerji vermek suretiyle sıvı, sıvı hale de belirli bir enerji vererek gaz ve gaz hale de belirli bir enerji vererek plazma haline geçmek mümkündür. Bu işlemin tersi yapılarak, yani verilen bu enerjileri geri dolarak tekrar plazma halinden gaz, sıvı ve katı hale geçmek mümkündür.

$$\text{Katı} + E_1 = \text{Sıvı} \quad (\text{Ergitme})$$

$$\text{Sıvı} + E_2 = \text{Gaz} \quad (\text{Buharlaştırma})$$

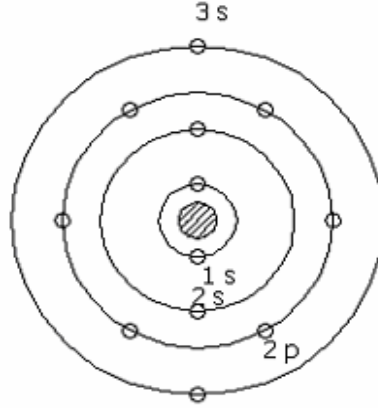
$$\text{Gaz} + E_3 = \text{Plazma} \quad (\text{İyonize etme})$$

O halde bu hallerden en küçük enerji konumunda olan katı ve en büyük enerji konumunda olanı da plazma halidir.

Plazma yakın bir geçmişe sahiptir. Plazmanın kendine has özelliklerinin oluşu onun maddenin “dördüncü hali” adını almasına neden olmuştur.

Plazma içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren bir karışımdır. Plazma doğada güneş ve bazı yıldızlar içinde, yıldırım ve elektrik boşalmalarında görülür.

Bilindiği gibi bir atom, ortada (+) yüklü bir çekirdek ve bunun çevresinde belirli yörüngelerde bulunan (-) yükleri (elektronları) içerir (Şekil 3.1).

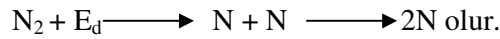


Şekil 3.1 Magnezyum atom modeli ( Karadeniz 1990).

Plazma karışımını meydana getiren elemanlara bir göz atalım:

**Nötral atom veya nötral molekül:** İhtiva ettikleri pozitif yüklerin sayısının, negatif yüklerin sayısına eşit olan atom ve moleküllerdir. Nötral bir moleküle, o elemente özel bir disosyasyon enerjisinden ( $E_d$ ) daha büyük enerji verilirse, bu molekül atomlarına ayrışır yani disose olur. Bu olaya disosyasyon denir (Karadeniz 1990).

Azot molekülü için bunu yazarsak,

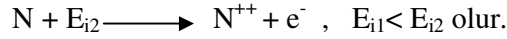
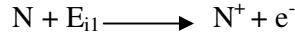


**İyon:** İhtiva ettiği (+) yük sayısı, (-) yük sayısından büyük olan atomlardır. Nötral bir atoma, o elemente özel bir iyonizasyon enerjisinden ( $E_i$ ) daha büyük bir enerji verildiği zaman, bu atom en az bir elektronu (negatif yükünü) kaybeder ve iyon

haline geçer, yani iyonize olur. Bu olaya iyonizasyon denir. Tabiatta ve teknikte iyonizasyon çeşitli yollarla gerçekleşir. Bunlardan önemlileri

- Termik iyonizasyon,
- Işın iyonizasyonu,
- Elektrik boşalması ile iyonizasyon,
- Çarpışma iyonizasyonudur.

Atom bir elektron kaybederse bir, n elektron kaybederse n katlı iyonizasyon ortaya çıkar. Bir atomdan ilk elektronu çıkarmak için gerekli enerji, daha sonraki çıkarılacak elektronlar için gerekli enerjiden daha küçüktür. Yine azot için

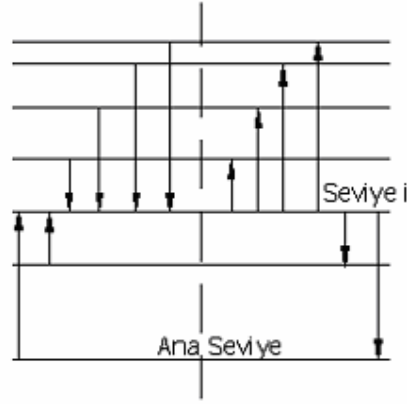


**Elektron:** Atomun negatif yükü olup, değeri  $e = 1,6.10^{-19}$  kulombdur.

**Foton:** Enerji yüklü ışığın parçacığıdır. Işın enerjisi taşıyıcısıdır.

**Uyarılmış Atom:** Üzerine iyonizasyon enerjisinden daha küçük bir enerji almış, elektron kaybetmemiş atomdur. Bu atoma o elementin iyonizasyon enerjisinden daha küçük bir enerji verilirse, bu atomun çevresindeki elektronlar atomu terk etmeyip, bunlardan bir veya birkaçı yörünge değiştirir. Yani bir üst enerji seviyesine geçer. Böylece uyarılmış atom olur. Şekil 3.2'de bir atoma ait elektronların enerji seviyeleri ve elektronların enerji seviyelerinin değişimi şematik olarak görülmektedir. Solda alt ve üst enerji seviyelerinden i seviyesine geçiş, sağda i enerji seviyesinden alt ve üst seviyelere geçiş görülmektedir.





Şekil 3.2 Bir atoma ait elektronların formal olarak enerji seviyeleri şeması. Solda i seviyesine elektron gelmesi, sağda i seviyesinden elektron gitmesi (Karadeniz 1990).

**Uyarma:** Enerji alarak bir üst seviyeye geçiştir.

**Sükûnete Gelme:** Enerji (foton) vererek bir alt seviyeye geçiştir.

### 3.2 Plazma Konumu Geçiş

Bir atoma iyonizasyon enerjisinden daha büyük enerji verilirse atom iyonize olur. Bu işlem eğer bir gaz kütlesi için gerçekleştirilirse plazma elde edilmiş olur. Plazma için gerekli olan enerjiyi gaz kütlesine mekanik, ısı ışın magnetik ve elektrik enerjisi şeklinde vermek mümkündür (Karadeniz 1990). Buna göre pratikte plazmanın elde ediliş şekillerini şu şekilde sınıflandırabiliriz:

#### a) Isı enerjisi vererek plazma elde etme

- Plazma fırını
- Q – Makinesi
- Kimyasal reaksiyon ısıyla plazma eldesi

#### b) Kompresyon = Sıkıştırma ile plazma elde etme (mekanik)

- Balistik kompresör
- Mekanik impuls dalgası tüpü
- Elektromagnetik impuls dalgası tüpü

- Magnetik kompresyon ile plazma eldesi

**c) Işınla plazma eldesi**

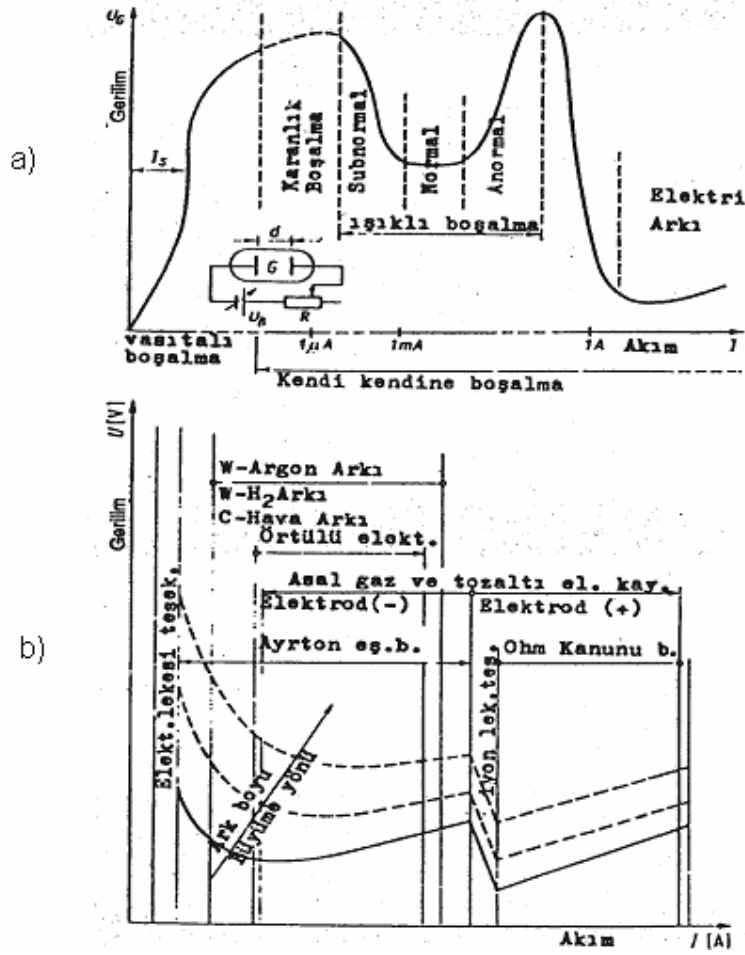
- Elektron ışığı ile plazma eldesi
- Laser ışını ile plazma eldesi

**d) Elektrik boşalmasıyla plazma eldesi**

- Glow – deşarj (Glimm – boşalması) ile plazma eldesi
- Elektrik arki ile plazma eldesi
- Korona boşalması ile plazma eldesi
- Elektrik atlaması ile plazma eldesi

**3.3 Elektrik Boşalması Mekanizması**

Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa, belirli şartlar gerçekleştirdiği takdirde, tatbik edilen gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise, bu iki plaka arasındaki bir elektrik boşalması olur ve bu iki iletken plaka arasında elektrik akımı akar. Burada akan akımın büyüklüğüne göre ortaya çıkan elektrik boşalması sistemleri sınıflandırılmıştır. Eğer bu akımın şiddeti 10 amperden büyük ise elde edilen sistem elektrik arki adını alır. Şekil 3.3’de tüm gaz boşalma bölgeleri ve elektrik arki boşalma karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 3.3 Tüm gaz boşalma bölgeleri ve elektrik arkı boşalma karakteristikleri a) Tüm gaz boşalmaları bölgelerinin akım – gerilim karakteristiği b) Elektrik arkı boşalmasının şematik akım – gerilim karakteristikleri (Karadeniz 1990).

Normal halde gazlar yalıtkandır. Ancak gaz iyonize edilirse (plazma) iletken olur. Elektrik arkında da iki kutup arasındaki gaz iyonize olduktan sonra akım akar ve ark ortaya çıkar. Bir atomun iyonize olması demek, çekirdeğinin etrafındaki elektronlardan en az birini kaybedip pozitif yüklü hale gelmesi demektir. Bunun için atoma o atomun iyonizasyon enerjisinden daha büyük bir enerji vermek gerekir (Karadeniz 1990).

Bir elektrik arkında üreticinin artı kutbunun bağlandığı iletkene anot, eksi kutbunun bağlandığı iletkene katot adı verilir. Anot ile katot arasında tatbik edilen elektrikli gerilim sonucu anot ile katot arasında, değeri

$$E = \frac{U}{I} \text{ ( volt / cm)} \quad (3.1)$$

ile verilen bir elektrik akımı oluşur.

$U = \text{Anot} - \text{Katot}$  arasına uygulanan gerilim

$I = \text{Anot} - \text{Katot}$  arası uzaklık

Bu elektrik alanı ark içerisindeki yüklü parçacıklara değeri

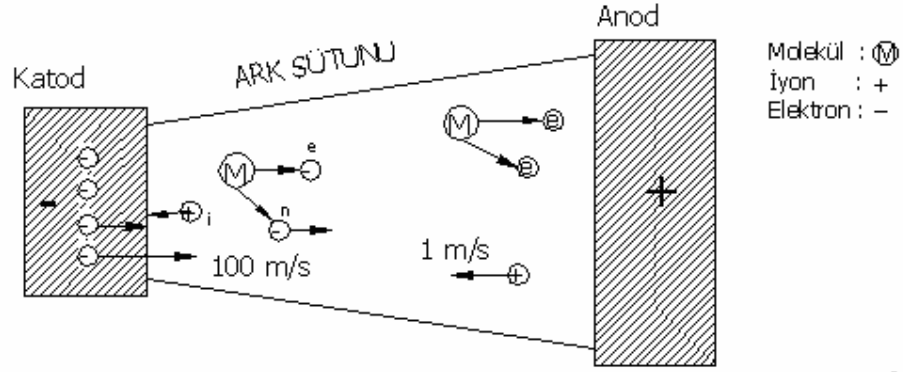
$$F = Q e \quad (3.2)$$

İle verilen bir kuvvet etki ettirir. Bu kuvvet elektron ve tek katlı iyonize olmuş, bir elektron kaybetmiş atomlar (iyonlar) için

$$F_{\text{elek}} = -q e \quad (3.3)$$

$$F_{\text{iyon}} = +q E \quad (3.4)$$

Bunun sonucu olarak elektronlar (-) kutuptan (+) kutba doğru, iyonlar (+) kutuptan (-) kutba doğru hareket ederler (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Elektrik arkı mekanizmasının şematik gösterilişi

Hareket halinde olan bu yüklü parçacıklar başlangıçta şu şekilde oluşur. Burada önce elektron emisyonu olmaktadır. Elektron emisyonu, bir malzemeden elektron çıkarma işlemidir. Elektronun tekrar katı malzemeye girmesi ise absorpsiyon adını alır. Pratikte elektron emisyonu dört şekilde yapılır.

- 1) Katı malzemeye bir elektrik arkı tatbik ederek,
- 2) Katı malzemeye ısı enerjisi vererek,
- 3) Katı malzemeye düşük kütlelerin bombardımanı ile,
- 4) Işın enerjisi ile.

Elektrik arkında, ark mekanizmasını başlatan ilk nüveyi oluşturan akım taşıyıcı elektronlar, anot ile katot arasında tatbik edilen elektriki gerilim dolayısıyla katot önünde oluşan elektrik alanı sayesinde katottan çıkar. Bu elektronların daha sonra anot istikametindeki hareketi nedeniyle sahip oldukları kinetik enerjilerini diğer atomlara çarptıklarında o atomlara verir, onlardan elektron çıkarmaları, yani

onları iyonize etmeleri (bombardıman ile) ark içerisindeki elektron ve iyon miktarı artmaktadır. Daha sonra katodu ısınması ile de ısı enerjisi ile emisyon işe girmektedir. Bu arada atomların da katı kütlelerden, kütleye olan bağ enerjilerinin üzerinde enerji almaları nedeniyle kopup ark içerisine karışması olayı olmaktadır.

Elektrik arkı kendi kendini idame ettirebilen bir elektrik boşalmasıdır. Bu tür bir elektrik boşalmasının oluşabilmesi için iki şart vardır.

1. Gaz atomlarının çarpışma yoluyla iyonizasyonu
2. Pozitif iyonların katoda gelip çarptıklarında (bombardıman) katoddan elektronların çıkması (sekonder elektron emisyonu = parçacık bombardımanı) gerekir.

Çarpışma iyonizasyonu için gerekli şart şudur:

İyonizasyon için önce çarpışmanın elastik olmayan bir çarpışma olması, yani çarpan elektronun kendi kinetik enerjisini çarpılana aktarması (vermesi) gerekir. Elastik çarpışmada elektron, enerjisinin çok az bir kısmını çarptığı atoma verir. Enerji büyüklüğü açısından gerekli şart ise,

$$\lambda IEI > U_i \text{ dir. Burada}$$

$\lambda$  : ortalama serbest yol uzunluğu, bir parçacığın (atom, iyon, elektron vs.) bir gaz ortamı içerisinde hiçbir kütleye çarpmadan alabildiği yoldur. Bir elektronun serbest yol uzunluğu bir iyonunkinden daha büyüktür. Zira elektronun kütlesi çok küçük olduğundan gazı oluşturan parçacıklar arasında çarpışmadan daha fazla yol kat edebilir. Elektronun serbest yol uzunluğu büyük olduğundan çarpışmadan önceki hızı ve dolayısıyla kinetik enerjisi de büyük olup çarpışma iyonizasyonu için elverişlidir. Gazlar ve plazma içinde ortalama serbest yol veya hızdan söz edilebilir. Çünkü buradaki kütlelerin hareketli her parça için sabit olmayıp, istatistik kanunlarına göre belirlenir.

E : Ark içindeki elektrik alanı şiddeti

$U_i$  : İyonizasyon gerilimi

Kendi kendini idame ettirebilen bir elektrik boşalmasının stabil olabilmesi için katottan çıkan bir elektron anoda giderken yolda çarpışma ile o kadar çok iyon ortaya çıkarmalıdır ki, bunlardan en az biri katoda geldiği zaman katottan bir elektron çıkarabilsin (sekonder emisyon = kütle bombardıman emisyonu). İyonizasyon gerilimi  $U_i$ , öyle bir gerilimdir ki, bir elektronun bir atomu iyonize edebilmesi için gerekli kinetik enerjiyi ( $e U_i$ ), ki bu iyonizasyon enerjisine eşittir ve bu enerjiyi alana kadar bu gerilimi (yolu) kat etmesi gerekir (Karadeniz 1990).

### 3.4 Plazmanın Özellikleri

- Plazma dış ortama karşı elektrik olarak nötrdür. Yani plazma içerisindeki pozitif yüklerin (iyonların yükleri) sayısı, negatif yüklerin (elektronlar) sayısına eşittir.
- Plazma içerisinde disosyasyon, iyonizasyon ve bu olayların tersi olan rekombinasyon olayları sürekli meydana gelir. Adı geçen bu olaylar kendi aralarında plazma içerisinde bir dinamik denge halinde bulunurlar.
- Plazma iyi bir elektrik ve ısı iletkenidir. Plazma içerisindeki parçacıklar bir enerji taşıyıcısıdır. Dolayısıyla elektrik ve ısı enerjisini de iletirler (taşırlar). Plazma içerisindeki hızlarının yüksek oluşu nedeniyle özellikle elektronlar elektrik ve ısı iletiminde esas rolü oynarlar.
- Plazma rotasyonsimetrik bir yapıya sahiptir. Buradaki silindir simetrisini sağlayan katottan çıkıp, anoda kadar kendini idame ettiren plazma akışıdır.
- Plazma yüksek sıcaklık ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Plazmanın sıcaklığı, enerji yoğunluğu, iyonizasyon derecesi (iyonize olmuş atom sayısının toplam atom sayısına oranı) ve plazma çıkış hızı (elektron hızı) plazma ekseninde maksimum olup, radyal yönde dışa doğru bu değerler azalır.
- Plazmaya elektrik ve manyetik alanla tesir edilebilir.

- Plazmayı magnetik ve termik olarak sıkıştırmak, dolayısıyla enerji yoğunluğunu ve sıcaklığını sınırsız bir şekilde yükseltmek mümkündür.

### 3.5 Plazma Çeşitleri

Plazmayı gagesi yönünden en iyi sınıflandırma, plazma içinde hüküm süren basınca göre sınıflandırmadır. Buna göre plazma üç gruba ayrılır:

- a) Düşük basınç plazmaları  $P < 1,3 \cdot 10^2$  Pa
- b) Orta basınç plazmaları  $1,3 \cdot 10^2$  Pa  $< P < 1,33 \cdot 10^4$  Pa
- c) Yüksek basınç plazmaları  $P > 1,33 \cdot 10^4$  Pa

Plazma içerisindeki yüksek basınç, yüksek elektrik alanı ve yüksek yüklü parçacık yoğunluğuna neden olur. Yüklü parçacık yoğunluğu, atomlarla elektronların elastik olmayan çarpışması neticesi ortaya çıkan iyonizasyon ihtimaline bağlıdır. Plazmadaki yüksek basınç, yüksek parçacık yoğunluğu ve dolayısıyla yüksek yüklü parçacık yoğunluğuna neden olur (Karadeniz 1990).

### 3.6 Plazmanın Nitrürlemenin Endüstriyel Uygulamaları

Plazma pratikte yedi alanda kullanım alanı bulmaktadır:

- I. Enerji dönüştürücü olarak plazma
  - 1. MHD (Magnetohidrodinamik) – Generatörler
  - 2. Termoyonik dönüştürücüler
  - 3. Çekirdek füzyonu generatörleri
- II. Elektrik iletkeni olarak plazma
  - 1. Elektrik şalterleri
    - a) Basınçlı gaz şalterleri
    - b) Vakum şalterleri
  - 2. Yan ark



### III. Işın kaynağı olarak plazma

#### 1. Plazma ışık kaynakları

- a) Düşük basınç ışık kaynakları
- b) Yüksek basınç ışık kaynakları
- c) Özel ışık kaynakları

#### 2. Gaz laserleri

- a) He – Ne Laseri
- b) Asal gaz iyonu laseri
- c) Metal iyonu laseri
- d) Metal buharı laseri
- e) UV – Azot laseri
- f) CO<sub>2</sub> – Laseri
- g) CO<sub>2</sub> – yüksek basınç – impuls laseri
- h) Asal gaz – Halojenid laseri

#### 3. Plazma gösterme sistemler (Rakam, şekil vs. gösterme)

- i) Elektronik tüpler
- j) Tablo gösterme sistemleri

### IV. İş aracı olarak (imalatta) plazma

#### 1. Plazma ile malzeme işleme

- a) Plazma ile kaynak
- b) Plazma ile ergitme kesmesi
- c) Plazma ile ergitme
- d) Plazma ile püskürtme
- e) Özel metotlar

#### 2. Plazma ile dış yüzey işleme

- a) Plazma ile kaplama tekniği
- b) Plazma – kimyasal tabaka oluşturma
- c) Plazma ile üst yüzey aktifleştirme
- d) İyon dağlaması (erozyon)
- e) Plazma ile dağlama (erozyon)

### V. Malzeme dönüştürücü olarak plazma

#### 1. Termik plazma kimyası

1. Termik olmayan plazma kimyası
- VI. Parçacık kaynağı olarak plazma
1. Yüklü parçacık kaynakları
  2. Hızlı nötral parçacık kaynakları
- VIII. Tahrik aracı olarak plazma
1. İyonla tahrik sistemleri
    - a) Kaulmann – İyon tahrik sistemleri
    - b) HF (Yüksek Frekans) – İyon tahrik sistemleri
    - c) Atom emisyonu – İyon tahrik sistemleri
  2. Plazma tahrik sistemleri
    - a) Ark – Tahrik sistemleri
    - b) İç (kendi) magnetik plazma tahrik sistemleri
    - c) Dış (yabancı) magnetik plazma tahrik sistemleri

Ülkemizde henüz yeni tanınmakta olan kullanım örneklerini şöyle sıralayabiliriz:

- Alüminyum, zamak v.b. malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan sıcak iş çeliğinden yapılmış kalıplar (X 40CrMoV5).
- Plastik işleme makinelerinin helezon milleri ve silindirleri, nitrürleme çeliği (34CrAlNi7).
- Çok çeşitli yerlerde kullanılan dişliler, kamlar (Ck45,42CrMo 4, 1050 v.b.).
- Azdırma bıçakları (S-6-5-2(DIN 1.3343)).
- Plastik enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıpları (40CrMnMo7, 90MnCrV8, Impax, Supreme, vb. ).
- Çeşitli takım, kalıp ve makine parçaları, soğuk iş takım çeliği (X210Cr12, X155CrVMo12).

- Soğuk çekilmiş borudan hidrolik silindir uygulamaları (St52).
- Dökme demirden yapılmış kızaklar, makine elemanları.
- Cam şekillendirmede kullanılan sıcak iş çeliği, paslanmaz ve ısıya dayanıklı çelik ve dökme demirden yapılmış çeşitli takım ve kalıplar.
- Yüksek hız dişli kutulan gemi ve otomotiv dişli kutulan (42CrMo4), (4140), (34CrAlMo5).

Modern sentetik fiberlerin oldukça aşındırıcı olan birkaç türü tekstil makinelerinin aşınmalarını arttırmaları. Tekstil makinelerindeki mekanik parçalar yüksek nem, yağlamanın yokluğu, tekrarlanan periyotlarda yüksek devirler ve yüksek hızda gidip gelen fiberlerin aşındırıcı etkisine maruz kalır. Sentetik fiberlerin kesiminde dakikada 90 kesmede denenmiş sertleştirilmiş (62–64 HV) 1095 çeliğinden yapılmış bir makas yaprağında normal bir ömür 1 milyon kesmedir (dört haftalık kullanım). İyon nitrürlenmiş 410 tipi yaprak 5 milyon kesme tamamlandıktan sonra az bir aşınma göstermiştir (Çelik ve Karadeniz 1992). Bir başka kullanım alanı ise buhar türbinleridir. Yüksek sıcaklıkla buhar atmosferinde çalışan 422 ve 410 paslanmaz çelik vana gövdeleri ve rekorlarının aşınma dirençlerini arttırmak için iyon nitrüleme başarıyla kullanılmıştır. Bu parçaların büyük bölümü 20 yıl ve daha fazla süreyle zorlanmadan çalışmıştır (Keneş 1995).

### **3.7 Plazma Nitrürlenmenin Ekonomik Boyutu**

Daha öncede belirtildiği üzere iyon nitrüleme tesisatı dört ana kısımdan meydana gelmektedir: vakum kabı, vakum ve gaz tedarik ünitesi, de güç ünitesi ve kontrol ünitesi. Endüstride kullanılan çoğu tesisatlarda bu dört ünite birbirinden bağımsız dört ayrı parça halinde bulunmaktadır. İşlemin

belirtilmesi gereken en önemli özelliği, ekonomikliği ve verimliliğidir. Vakum ortamını, deney akımını ve glow discharge'ı kontrol etmek için kullanılan gelişmiş teknikler, iyon nitrürleme tesisatının maliyet açısından önemli bir kısmını oluştururlar ve tuz banyosu, gaz nitrürleme gibi geleneksel yöntemlerden daha pahalıdır. Fakat işletme, çalışma ve bakım gibi diğer bütün maliyetlerde göz önünde bulundurulduğunda yöntem, parça başına maliyet açısından diğer geleneksel yöntemlerle rekabet edecek konuma ulaşmaktadır. İyon nitrürleme tesisatındaki işletme giderleri; düşük gaz tüketimi ve düşük elektrik tüketiminden ibarettir çünkü işlem vakum ortamında gerçekleştirilmektedir. İşlem için gerekli gaz debisi 30–100 l/h gibi düşük düzeydedir. Vakum ortamındaki enerji kaybı da sadece ışın yayılımı ve ısı enerjisi kaybindan oluştuğu için düşük düzeydedir. Gerekli ısı, iş parçalarının yüzeyine doğru gerçekleşen iyon bombardımanından sağlandığından gerekli elektrik enerjisi sadece fırın içindeki toplam şarjın yüzey alanı ile bağlantılıdır. Vakum pompaları hariç herhangi bir hareketli parça olmadığından bakım ve tamir masrafları düşüktür. Kullanılan gazlar korozif özelliğe sahip olmadığından tesisat için korozyon problemi de yoktur. Plazma nitrürleme ile bir seferde işlem görecekt malzeme miktarı diğer işlemlere kıyasla yaklaşık üç kat daha fazladır, işlem zamanı daha kısadır, çabuk ve kolay maskeleme metotları sayesinde zaman ve maliyetten hatırı sayılır oranda tasarruf etmek mümkündür. Diğer bir önemli husus, nitrürleme işlemi tamamlandığında, parçaların yıkanması gibi herhangi bir işlem gerekmemesidir (Çelik 1993, Karaoğlu 1998). İyon nitrürleme tesisatı ile doğrudan ilgili bütün bu kazançların yanı sıra yöntemin; uzun servis ömrü, iyi yüzey özellikleri ve yüksek boyut tamlığı gibi dolaylı avantajları da vardır (Çelik 1993, Karaoğlu 1998).

### **3.8 Plazma ile Termokimyasal Yüzey İşlemleri**

Yüzey işlemlerinde plazma ortamının kullanılması yaygınlaşarak devam etmektedir (Çelik vd. 2002). Bu yöntemin temelleri yaklaşık 70 yıl önce Bernhard Berghaus tarafından atılmış ve günümüzde endüstri için vazgeçilmez bir unsur olmuştur. Plazma destekli yayılım işlemlerinde amaç, karbon veya azot gibi ara

yer atomlarını parça yüzeyine göndermektedir. Bu atomlar malzeme içerisinde bulunan alaşım elementleriyle birleşerek aşınma ve korozyona dayanıklı bir yapı oluşturur. Bu yöntemler temelde alaşımli çeliklere uygulanmaktadır. Çizelge 3.1’de uygulanan plazma destekli termokimyasal işlemler için işlem sıcaklığı ve basıncına göre, elde edilen yüzey sertliği ve yayılım tabakası kalınlığı verilmiştir.

Çizelge 3.1 Plazma Destekli Yüzey İşlemlerine Bakış (Çelik vd. 2002).

Uygulanan işlem	Temel Mantığı	İşlem Sıcaklığı (°C)	İşlem Basıncı (mbar)	Elde Edilen Sonuç	
				Yüzey Sertliği(HV)	Difüzyon Tabakası Kalınlığı (µm)
Plazma ile karbürleme	Karbonun çözünümü ve takip eden su verme	800 – 1000	1 – 20	700 – 800	50– 2000
Plazma ile nitrürleme	Arayer N çözünümü	350 – 590	1 – 10	500 – 1200	50– 1500
Plazma ile Nitrokarbürleme	Arayer C ve N çözünümü	450 – 580	1 – 10	800 - 1100	5 – 10
Plazma ile borlama	Arayer Bor çözünümü	700 – 1000	1 – 10	1800 – 2000	5 – 400

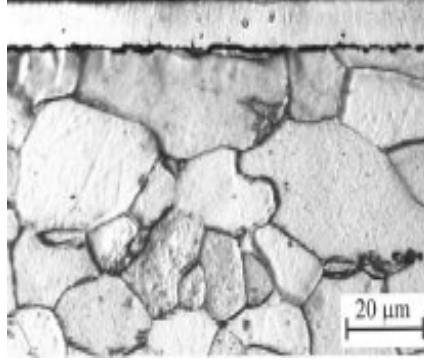
### 3.9 Plazma ile Karbürleme

Karbürleme işlemi, düşük karbonlu çeliklerin 850–925 °C sıcaklar arasında yüzeylerine karbon emdirilmesi esasına dayanır. Plazma ile karbürleme işlemi konusunda, ilk çalışma 1934 yılında Egan tarafından yapılmış ve patenti almıştır. 1960 yılında Vanin plazma ile karbürleme sistemini kurmuştur. Ancak bu sistemin bilinen karbürleme işlemine göre avantajının olmadığı görülmüştür. Son

yıllarda kurulan plazma ile karbürleme sistemleri ile bilinen tekniklere göre, bu yöntemin bir çok avantajı ortaya çıkarılmıştır. Günümüzde endüstriyel amaçla kurulmuş birçok plazma ile karbürleme sistemi mevcuttur. Plazma ile karbürleme işlemi, plazma ile nitrürleme işlemi ile hemen hemen aynıdır. Sadece kullanılan gaz ve gerilim değeri farklıdır. Bu işlemde doğru akım kullanılmaktadır. Gaz basıncı 1-20 torr olup, anot ve katot arasına genellikle 1000 voltluk bir gerilim uygulanarak plazma oluşturulur. Karbürleme gazı ise genellikle hidrokarbondur. Karbürleme işlemi ostenitik termokimyasal işlem olarak sınıflandırılabilir. Çünkü işlem tamamen ostenitik şartlarda meydana gelmektedir. Bu işlem 850-1050°C arasındaki sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu işlem sonrası malzemenin ısıl çarpılması hemen hemen yoktur. Çünkü soğuma vakum ortamında olmaktadır. Parçaların geometrisi homojen tabaka elde edilmesi için önemli değildir, her geometriye sahip malzemede homojen kalınlık elde edilebilir. Hatta işlem parametresinin iyi seçilmesi ile 0,5 mm çapındaki bir delik bile karbürlenebilir. Plazma ile karbürleme, işlem süresinin kısa olması, az distorsiyon ve yapının kontrol edilebilmesi gibi avantajlarından dolayı endüstride çok geniş uygulama alanı bulmuştur (Çelik vd. 2002).

### **3.10 Plazma ile Nitrokarbürleme**

Temelde nitrokarbürleme, katı, sıvı ve gaz ya da elektriksel boşalma şartlarında gerçekleştirilir. Günümüzde bu işlem hem sıvı hem de gaz atmosferinde çok sık olarak yapılmaktadır. Burada amaç istenen şartlara uygun tek fazlı  $\epsilon$ -nitür tabakasının oluşturulmasıdır (Şekil 3.5). Ancak bu işlem yapılırken istenen şartların oluşmasında birçok zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu büyük çoğunlukla, işlem esnasında yüzeyden saçılan karbonun etkisi ile ilgilidir. Çünkü saçılan karbon, nitrürleme için seçilen gaz karışımına katılabilir. Çok fazla miktarda karbon bu gaz karışımına katıldığı takdirde beyaz tabaka ( $\epsilon$ )'un içerisinde ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) sementiti oluşturabilir. Bu durum ise bu tabakanın işlevini tam olarak görmesini engelleyebilir.



Şekil 3.5 Nitrokarbürleşmiş malzemede (saf demir) nitrokarbürleşli tabakanın optik mikroskop görünüşü,  $T = 560^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 1$  saat (Çelik vd. 2002).

Plazma nitrokarbürleşme işleminin  $450\text{--}580^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklar arasında, demir esaslı malzemelerin yüzeyine azot ve karbonun yayınmasını içeren termokimyasal işlemdir. Yüzeyde  $\gamma$ - demir nitür ile beraber  $\epsilon$ - nitür tabakası, onun altında da difüzyon tabakası oluşur. Plazma ile nitürleşme işleminin tersine bu işleminde kullanılan gazlar azot-hidrojen-metan veya azot-hidrojen-karbon dioksit'tir. İlk yapılan plazma ile nitrokarbürleşme işleminde, işlem gazı olarak  $\text{CH}_4$  kullanılmıştır. Fakat çok küçük miktarda  $\text{CH}_4$  kullanımında bile kırılğan sementit ve  $\epsilon$ - nitürün oluştuğu görülmüş ve daha sonraki araştırmalarda ortama  $\text{CO}_2$  gazı verilerek bu sorun giderilmiştir. Bu işlemin amacı, düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin yüzeyinde  $\epsilon$ - nitür tabakası oluşturularak korozyon ve aşınma dayanımını artırmaktır. Bu işlem çoğunlukla sade karbonlu çelikler ve düşük alaşımlı çelikler gibi piyasada daha ucuz olan malzemelerin yüzeyini iyileştirmekte kullanılır. İşlem değişkenleri ile ilişkili olarak yorulma ve akma mukavemeti ve belirli hallerde korozyon direnci artırılır. Aşınma ve korozyon direncindeki artış, yüzeyde oluşan tek fazlı beyaz tabaka ( $\epsilon$ -nitür) sayesinde gerçekleşir. Plazma şartlarında gerçekleştirilen nitrokarbürleşme, işlemin çevreyle dost olması, uygun işlem değişkenleri ile tek fazlı  $\epsilon$ -nitür fazının elde etmenin kolay olması gaz ve enerji tüketiminin az olması nedeniyle tercih edilmektedir (Çelik vd. 2002).

### 3.11 Plazma ile Borlama

Son yüzyılın başlarından itibaren çalışılmaya başlanan borlama ile çok sert, düşük sürtünme katsayısına sahip, yüksek sıcaklık mukavemeti fazla olan ve korozyon dirençli malzeme yüzeyleri elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bir termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemi olan borlama, bor atomları metal yüzeyine termokimyasal olarak yayınarak sert bor tabakası oluştururlar. Borlama işlemi esnasında FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakaları yüzeyde oluşur (Şekil 2.2). Bu tabakaların sertliği 1800–2000 HV değerine çıkartılabilir. Elde edilen bu sert tabaka aşınmaya karşı dayanımı artırmaktadır. Bu yöntem, yaklaşık 700–1100 °C sıcaklıkta, değişik ortamlarda (katı, sıvı, gaz veya plazma) alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, dökme demirlere, demir dışı metal ve alaşımlarına (Ni, Co, Mo, Ti), bu alaşımların toz metalürjisi yöntemiyle üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi birçok malzeme grubuna uygulanabilir. Borlama işlemleri arasında sadece paket borlama B<sub>4</sub>C-KBF<sub>4</sub>-SiC tozları kullanılarak ticari amaçlı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Çelik vd. 2002 ). Ar, H<sub>2</sub> gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, BF<sub>3</sub> veya B(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (trimetilborat) kullanarak, 800–1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10<sup>-2</sup> Pa gibi bir düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır. Mikroyapı ve demir bor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir. Bu yöntem Almanya’da otomotiv sektöründe kullanılmaya başlanmasıyla üstün özellikleri nedeniyle endüstrinin dikkatini çekmiş ve artan ilgiyle araştırmalar yoğunlaşmıştır (Çelik vd. 2002).

### 3.12 Plazma ile Nitrüleme

Nitrüleme demir esaslı malzemelerde ferrit fazında azotun yayınması ile oluşan bir termokimyasal işlemdir. Sertleştirme işlemi 500–590 °C sıcaklıklar arasında yapılır. İlk olarak 1920 yılında kullanılmaya başlanmış ve bu tarihten itibaren endüstride geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Temel olarak tuz banyosu, gaz ve



toz nitrüleme olmak üzere üç nitrüleme yöntemi vardır (Çelik vd. 2002). Bu metot, konvansiyonel nitrürasyonun yerini almaktan ziyade ona bir destek amacını taşır. Bu metotla konvansiyonel olarak nitrürlenebilen tüm ve nitrürlenemeyen birçok çelik iş parçasının nitrürlenebilmesi mümkün olmaktadır. Çok üstün aşınma ve yorulma dayanımının, sertlik derinliğinin çok hassas kontrolünün istendiği yerlerde özellikle tercih edilir (Karadeniz 1990). Avantajlarını kısaca şöyle özetlemek mümkündür;

- Hassas olarak sertleşme kalınlığının kontrolü
- İstenmeyen beyaz tabakanın ( $\text{FeN}$ ,  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ) kalınlığının kontrolü
- Yüzey altı gevrek nitrürlenmenin engellenmesi dolayısıyla çekirdek duktilitesinin artması.
- Prosesi  $350\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar düşürmek suretiyle distorsiyonların azaltılması ve çekirdek özelliklerinin değişmemesi.
- İşlem neticesinde yüzeyde çok az pürüzlülüğün oluşması.
- Metal maskeler kullanılarak lokal sertleştirmelerin mümkün olması

Plazma ile nitrürasyon yöntemi elektriki boşalma (glow discharge) şartlarında oluşur (Çelik vd. 2002). İlk olarak 1930 yılında İsviçreli mühendis Bernard Berghaus tarafından patenti alınmıştır. Bu yöntemde, malzeme yüzeyine iyonize edilmiş azotu yaymak için aktif ve reaktif plazma hali kullanılır. İşlem teorik olarak elektriksiz olarak iletken malzeme yüzeyine N ara yer atomunun yayınma işlemidir. Plazma ile nitrürasyon işlemi  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ , Ar ve  $\text{NH}_3$  gaz ortamında,  $350\text{--}590\text{ }^\circ\text{C}$  arasında gerçekleştirilebilir. Yüzeyi sertleştirilecek malzemenin Cr, Al, V, Mo ve Ti gibi alaşım elemanlarını içermesi yüzey sertliğini daha da artıracaktır. Plazma ile nitrürasyon işlemi sonrası en dışta beyaz tabaka ve onun altında da difüzyon tabakası olarak adlandırılan yapılar oluşur. Yüzey sertliği ve sertleşme derinliği işlem zamanına, sıcaklığa, gaz karışımına ve demir esaslı malzemenin alaşım içeriğine bağlıdır.

Günümüzde askeri amaçlı olarak kullanılan plazma ile nitrürleme işlemi, özellikle motor pistonlarında, krank millerinde, valflerde, kam milinde, dişlilerde, matkap, zımba gibi kesici takımlarda, derin çekilebilen malzemelerde, dönme ve eğilmeye maruz kalan tüm makine parçalarında kullanılmaktadır. Bu işlemin ekonomik ve kolay uygulanabilmesi endüstride kullanım alanını artırmıştır (Çelik vd. 2002).

### 3.12.1 Sıvı Nitrürleme ( Tuz Banyosunda Nitrürleme )

Çeliğin tuz banyosunda nitrürasyonu, orijinal gaz nitrürasyonu yöntemi kadar eskidir. Bu yöntemde kullanılan gaz karışımı genellikle %60 – 70 NaCN ve % 30-40 KCN içermektedir. İlave olarak karbonatlar, (  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ) ve siyanatlar (  $\text{NaCNO}$  ) mevcuttur. Banyo kompozisyonu yukarıdakilerle sınırlı değildir. Farklı kompozisyonlarda tuzlar da kullanılabilir. Örneğin tuz banyosunda kompozisyonu  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  /  $\text{CNO}^-$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$  olan çözelti kataliz olarak kullanılmaktadır. İlave edilen çözelti kimyasal ve ısı olarak denge sağlamaktadır.

Katkı maddeleri kullanılarak yapılan tuz nitrürasyonu çeşitli avantajlar sağlar. Bunları şöyle sıralayabiliriz: Oldukça yüksek akıcılık ve düşük tuz tüketimi, aktif çözelti kullanımı ve yeniden canlandırıcı tuz kompozisyonları ile çok yüksek nitrürleme potansiyeli, azot difüzyonun kinetiğinde artış, homojen  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ) tabakasının oluşmasına yardım ederek aşınmaya karşı direnci artırır. Tuz nitrürasyonunu tesisinin hazırlanması, uygulanması kolay ve ucuzdur, kirliliğe neden olmaz. Sursulf kompozisyonu, işlem sıcaklığı ayarlandıktan sonra, nitrürleme bitmeden önce uygulanır, daha sonra parçalar havada veya yağda soğutulur ve son işlem olarak ta sıcak su veya soğuk suyla yıkanarak işlem tamamlanır (Arslan 2001 ). Bu yöntem daha çok değişken (periyodik) yüklemenin mevcut olduğu ve çok yüksek olmayan yüzey basınçlarının sürtünme ile aşındırarak şekilde etki ettiği taşıt ve motor yapımında kullanılır. Örnek olarak; krank ve kam milleri, aks mafsalları, vites kutuları, su ve yağ pompaları için dişli çarklar, direksiyon takımları, silindir yuvaları, silindir başları, hidrolik direksiyon parçaları gösterilebilir.

### 3.12.2 Gaz Nitrürleme

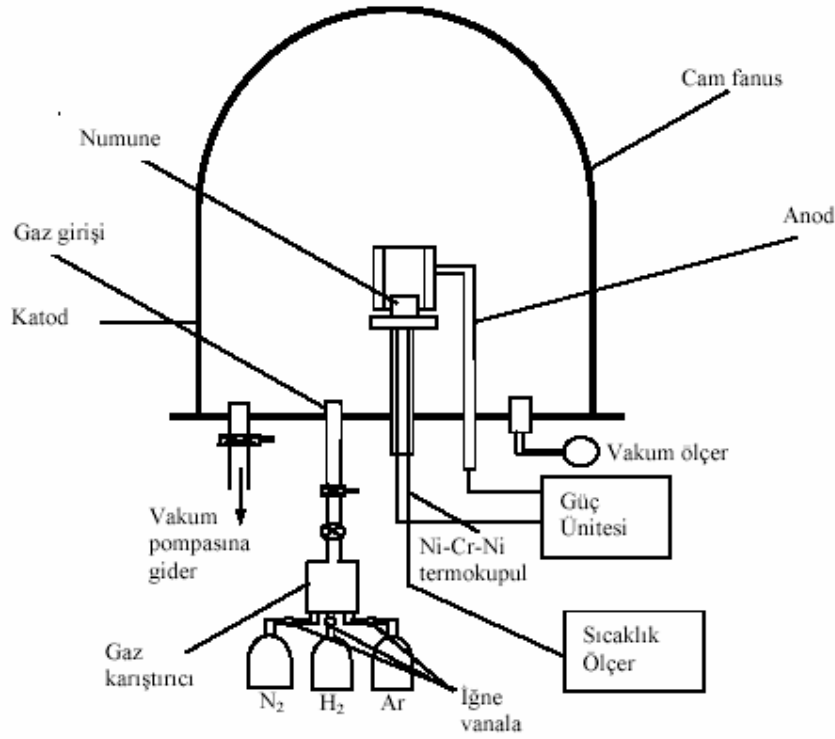
Gaz nitrürleme, parçanın azot içeren bir gazda (genellikle amonyak) ve uygun bir sıcaklıkta tutulması ile yüzeye azotun yayındırıldığı bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Bütün çelikler için nitrürleme sıcaklığı 500 – 570 °C arasındadır. Gaz nitrürleme işlemi; Al içeren az alaşımlı çeliklere, orta karbonlu krom içeren çeliklere, ferritik, martenzitik, ostenitik, çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklere uygulanabilmektedir. Gaz nitrürleme yöntemi ile 0,5 mm'ye kadar nitrürleme derinliği elde edilmektedir. Yapılan deneylerde gaz nitrürleme işleminde en büyük sertlik 538 °C'de, en büyük nitrürleme derinliği ise, 650 °C'de elde edilmektedir. Gaz nitrürleme işlemi, nem içermeyen susuz amonyak gazı kullanılarak tek veya çift kademede gerçekleştirilmektedir. Tek kademeli işlemde 495 – 525°C işlem sıcaklığı kullanılmakta ve % 15–30 oranlarında amonyak gazının ayrışma oranı elde edilmektedir.

Çift kademeli işlemin ilk kademesinde, ilk önce tek kademeli işlemde yapılanın aynısı tekrar edilir. Çift kademeli işlemin ikinci kademesinde ise, ilk kademedeki nitrürleme sıcaklığından daha fazla sıcaklıklarda (550–565 °C) nitrürleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda, gazın ayrışma oranı da %65–80 seviyesine artmaktadır. Çift kademeli işlemin amacı, beyaz nitrür tabakasının kalınlığını azaltma üstünlüğünü sağlamasıdır. Kullanım yeri olarak şu örnekler verilebilir, kamyon akslarındaki konu ayna dişlileri, takım tezgahlarının milleri, plastik malzeme püskürten makinelerin taşıyıcı salyangozları vs. (Arslan 2001).

### 3.12.3 Ekipman ve Proses Dataları

En önemli elemanlar vakum pompası ile fırın, gaz dağıtım sistemi ve elektrik ünitesidir. Fırının, yani iş parçasının nitrürleneceği kabın içinde basınç 0,1–10 Torr'dur. Doğru akım gerilimi 100 –1500 Volt olup, akım yoğunluğu 100–1000 Am<sup>-2</sup>'dir. Gerilim katot (iş parçası) ile anot (fırın duvarı) arasına uygulanır. Kullanılan gazlar, amaca göre N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>+A veya bunların hidrokarbon gazı

ilave edilmiş karışımlardır. Gaz atom ve molekülleri katot–anot arasındaki elektrik boşalması ile ortaya çıkan plazma içinde iyonize olurlar. Pozitif iyonlar negatif kutup olan iş parçasına büyük bir enerji ile çarparak yüzeyden içeriye doğru difüze olurken açığa çıkan çarpma enerjisi malzemeyi ısıtır. Dolayısıyla fırın için ayrı bir ısıtıcıya gerek yoktur. Sıcaklık voltaj ve akımı değiştirmek sureti ile ayarlanabilir. İşlem süresi 10 dakikadan 20 saate kadar değişir (Karadeniz 1990). Aşağıda şekil 3.6 iyonitürasyon işlemi prensip şeması görülmektedir.



Şekil 3.6 İyonitürasyon işlemi prensip şeması

### 3.12.4 İyonitürasyonun Metalurjik Yönden Avantajları

İyonitürasyon işlemi konvansiyonel nitürasyon işleminden daha çabuk cereyan eder. Gerek Edenhofer'e göre metal yüzeyinde kondense olan yük N yoğunluklu FeN dolayısıyla N'nin konvansiyonel metotlarda olduğu gibi özellikle tane sınırları boyunca değil bütün yüzey boyunca düzensel difüzyon şeklinde metal

içine nüfuz etmesi, gerekse boş köşe +N iyonu difüzyonunun azot atomu difüzyonundan daha hızlı olması bu olayı açıklar. Diğer avantajları daha iyi açıklayabilmek için nitürasyon neticesi oluşan tabakaların üzerinde bir miktar durmak gerekir.

**Beyaz Tabaka:** En üstteki bu tabaka  $Fe_4N$  ( $\gamma$ ) veya  $Fe_{2-3}N$  ( $\epsilon$ ) fazlarından birisi veya ikisinin karışımından ibarettir. Bu tabakanın özellikleri nitür yapısının homojenliğine ve kalınlığına bağlı olarak değişir. Eğer  $\gamma$  ve  $\epsilon$  fazları birlikte oluşuyorsa farklı kafes yapıları dolayısıyla iç gerilmeler artarak gevrek kırılmaya olan eğilim büyüyecektir. Konvansiyonel gaz nitürasyonunda bu tür bir beyaz tabaka oluşur. Sıvı nitürasyonunda ise daha ziyade tek fazın oluşumu ( $\epsilon$  fazı) tabakayı daha duktıl hale getirmesine rağmen kalınlıktaki artış gevrekleşmeye yol açar. İyonitürasyon ile bu tabaka gayet hassas olarak kontrol edilebilir. Örneğin  $N_2 + H_2$  gazı kullanarak beyaz tabaka kalınlığı azaltılabilir.  $H_2$  gazı saçılmayı arttırarak yüzeyi temizler, yani beyaz tabakanın azalmasını hatta yok olmasını sağlar.

**Difüzyon Tabakası:** Beyaz tabakanın altındaki bu bölge çok ufak ve sık dağılmış sert nitür fazları ihtiva eder. Konvansiyonel nitürasyonda azot atomları daha yüksek enerjili bölgeler olan tane sınırlarından difüze olurlar ve buralarda evvelce önce bulunan karbür fazları ile birleşerek çok gevrek olan karbonitürleri oluştururlar. Bunu neticesinde difüzyon tabakasının gerilmelere olan hassasiyeti büyük ölçüde artmış olur. Bunun sonucunda gevrek karbonitür fazları iç kısımlara doğru itilerek yüzeyin aşınmaya ve yorulmaya dayanımı artar.

### 3.12.5 İyonitürasyonun Tatbik Alanı ve İş Parçasının Hazırlanması

Alaşımli, alaşımsız, paslanmaz ve takım çeliklerine, dökme demirlere, titanyum ve alaşımlarına uygulanır. Bunlardan su alabilenlere su verilip temperlenir ve gerilim giderme tavlamaı uygulanır. Çökelleme ile sertleşen alaşımlar istenilen özelliklere göre yaşlandırılır ve gerilim giderme tavlamaı uygulanır.

Temperleme, yaşlanma ve gerilim giderme tavlamları yüksek çekirdek mukavemeti elde etmek amacı ile mümkün mertebe düşük tutulmalıdır.

İşlem neticesinde parçalarda boyut değişmesi ihmal edilecek kadar ufaktır. Dolayısıyla çoğunlukla parlatma dışında başka bir final operasyonu gerekmez. Boyutsal stabilitenin sebepleri şöyle özetlenebilir:

- Üniform ve yavaş ısınma
- Bütün yüzey boyunca sabit iyon akım yoğunluğu dolayısıyla üniform sıcaklık dağılımı.
- Vakumda yavaş soğuma.

#### **4. SÜRTÜNME VE AŞINMA**

#### 4.1 Sürtünme ve Sürtünme Teorileri

Sürtünme, birbirine göre izafi olarak hareket eden cisimlerin birbirlerine uyguladıkları direnç olarak tanımlanabilir. Genelde tanımlanan sürtünme her türlü yabancı maddeden arındırılmış yüzeylerin mutlak vakumdaki hareketlerini ifade eder. Fakat mevcut sistemlerin çoğunluğu normal atmosfer şartlarında çalışmaktadır. Atmosfer şartlarında çalışan yüzeyler ne kadar temizlenseler dahi oksit tabakası içermektedir. Bu yüzden yabancı maddelerden arındırılmış yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme hali kuru sürtünme kabul edilmektedir.

Malzemeler arasındaki sürtünme olaylarını izah ve formüle etmek için tarihsel gelişim içerisinde birçok teori ileri sürülmüştür. İlk zamanlar, sürtünme katsayısının pürüzlerin eğim açısının tanjantı ile ilişkili olduğu düşünülmüş, daha sonraları sürtünmede, iki katı arasındaki moleküler çekim kuvvetinin de etkili olduğu açıklanmıştır (Kragelskii 1965). Bunlar arasında Amontons ve Coulomb'un teorileri önemlidir. Coulomb, sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu gözlemlemiş ve statik sürtünme katsayısını ( $\mu_s$ ) kaymaya başlama kuvveti ile, kinetik sürtünme katsayısını da ( $\mu_k$ ) hareketi devam ettirme kuvveti ile tarif etmiştir. Bu teorilere göre (Hutchings 1992):

- a) Sürtünme kuvveti, normal yükü orantılıdır,
- b) Sürtünme kuvveti, geometrik temas alanına bağlı değildir,
- c) Sürtünme kuvveti, kayma hızına bağlı değildir,
- d) Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından daha büyüktür ( $\mu_s > \mu_k$ ).

Bunun sonucunda aşağıdaki ifade çıkarılmıştır:

$$\mu = F / W \quad (4.1)$$

Burada;  $\mu$  : Sürtünme katsayısı

F: Teğetsel kuvvet (sürtünme kuvveti)

W: Normal kuvvet (yük)

1940 yılında Bowden ve Tabor, kuru yüzeylerde kayma sürtünmesinin temelini açıklayan basit bir teori ileri sürmüşlerdir. Bu teoriye göre sürtünme kuvveti, iki cisim arasında oluşan soğuk kaynaklanmış bağlantıyı kesmek için gerekli olan kuvvettir. Sürtünmenin meydana gelmesinde en büyük etken, yüzeylerin birbirine temas eden tepeciklerindeki adhezif ve kohezif bağlardır. Ayrıca bu tepeciklerdeki deformasyonların da direncin artmasında etkisi bulunmaktadır. Temas halindeki iki yüzey arasında adhezyon ve kohezyon bağının oluşumu, büyük ölçüde yüzeylerin tekstür yapılarına ve bunların temas halindeki muhtemel değme geometrilerine bağlıdır (Persson 1999).

Teorik olarak ilk değme anında üç noktadan oturma olacaktır. Bu değme noktalarının elastik ve plastik deformasyonu sonucu değme alanı genişleyecek ve diğer tepecikleri de içine alacaktır. Bu yayılma, uygulanan kuvvetin büyüklüğüne bağlı olarak denge durumu oluşuncaya kadar devam edecektir. Elastik değme durumunda yüzeyde tepeciklerin yarım küre olduğu varsayıldığında deformasyon alanı;

$$A_r \sim W^{2/3} \quad (4.2)$$

Burada;

$A_r$ : Gerçek temas alanı

W :Normal kuvvet (yük)

Yüzey iyi işlenmiş ise;

$$A_r \sim W \quad (4.3)$$

bağıntısı geçerli olmaktadır (Moore 1975).



Bowden ve Tabor'un (1973) teorisine göre sürtünme kuvveti, yüzeyde tepeciklerdeki gerçek temas alanlarında oluşan adhezyon kuvveti ve sert yüzeyin yumuşak yüzey üzerinde oluşturduğu deformasyon kuvveti olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır.

$$F = F_{adh} + F_{def} \quad (4.4)$$

Burada;

F: Sürtünme kuvveti,

$F_{adh}$  : Kaynak bağı oluşturmuş yüzeyleri ayırmak için gerekli teğetsel kuvvet,

$F_{def}$  : Tepecik ve pürüzlerin yandan eğilmesi ve kesilmesi için gerekli kuvvet.

Yukarıdaki denklem normal kuvvete (yük) bölünürse, sürtünme katsayısının bileşenleri de bulunmuş olur.

$$\mu = \mu_{adh} + \mu_{def} \quad (4.5)$$

$\mu_{adh}$  ,  $\mu_{def}$ 'den çok daha büyük olduğundan,  $\mu_{def}$  ihmal edilebilecek mertebededir.

Basınç uygulanması durumunda deformasyonun olduğu yerdeki adhezyon kuvveti, malzemenin kohezif kuvvetinden daha büyük olduğunda ayrışma veya kopma oluşur. Ara yüzeydeki adhezyonu zayıflatan nedenlerden biri, yüzeydeki absorbe olmuş film veya oksitler diğeri ise, yüzeydeki pürüzler etrafındaki elastik deformasyonlardır (Hutchings 1992).

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{F_{Adh}}{W} \cong \frac{\tau.A}{H.A} \cong \frac{\tau.A}{P_a.A} \cong \frac{\tau}{P_a} \cong 0.2 \quad (4.6)$$

Burada;

$\tau$ : Kaynak noktalarındaki kayma mukavemeti,

A: Kaynak ve deformasyon noktaları alanı,

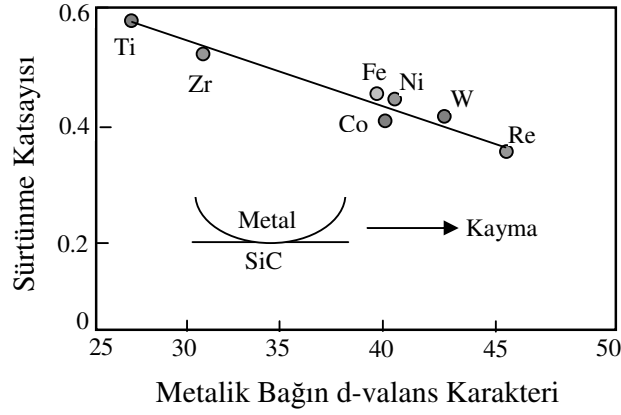
$P_a$ : Malzemenin plastik akma basıncı,

H: Malzemenin Brinell sertliği.

Yukarıdaki ifade, Coulomb kanunundaki sürtünme katsayısının yük, alan ve hızdan bağımsız olduğu teorisini doğrulamaktadır. Yukarıdaki ifadeye göre, ana

malzemeden daha düşük kayma mukavemetine sahip olan tabaka ve filmler sürtünme katsayısını düşürmektedir. Yine yukarıdaki ifadeye göre, yaklaşık olarak  $\mu = 0.2$ 'dir. Fakat gerçekte bulunan değerler daha fazladır. Aradaki bu fark, sürtünme esnasında değme alanı büyümesi ve plastik sertleşme olaylarının meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır (Hutchings 1992).

Temas alanı büyümesi, pürüz tepeciklerinde durgun haldeki mikro deformasyon alanlarının kayma hareketine bağlı olarak kayma gerilmesi etkisi ile büyümesi şeklinde açıklanmaktadır. Metalik malzemeler üzerinde sürtünme katsayısının incelenmesinde diğer önemli olay plastik sertleşmedir. Elasto-plastik temas hali incelenirken pek çok metalik malzemede plastik akmaya bağlı olarak bir sertleşme (pekleşme) halinin meydana geldiği gözlenmiştir. Buckley, iki yüzey arasındaki adhezyonun kristal düzlemleri arasındaki eşleşme derecesine bağlı olduğunu ileri sürmüştür. En yüksek adhezyon ve sürtünme kuvvetleri aynı malzemelerin eşleşmiş düzlemleri için gözlenmiştir. Daha düşük adhezyon ve sürtünme kuvvetleri, benzer latis boyutları ve birbiri içerisinde çözülebilirliğe sahip farklı malzemelerin eşleşmiş düzlemleri için bulunmuştur. Vakumda yapılan çalışmalarda en küçük sürtünme katsayısı, YMK (yüzey merkezli küp kafes) metalllerinde (111) düzlemi veya HSP (hegzogonal sıkı paketli kafes) metalllerinde bazal düzlem gibi en yüksek atomik yoğunluğa sahip olan düzlemlerde bulunmuştur. Bu düzlemler en düşük yüzey enerjiye sahip olduklarından eşleşen düzlemler ve yönler sürtünme katsayısını düşürmektedir (Basse 1992).



Şekil 4.1 SiC-Metal çifti için metalik bağın d-valansı ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki (Basse 1992).

Adhesif sürtünme, geçiş metallerinin d valans bağ karakteristik derecesi gibi temel özelliklerle de ilişkilidir (Şekil 4.1). Yüksek doymamış bağ derecesine sahip olan titanyum, bağ yapmak için kuvvetli bir eğilim gösterir. Bağ yapma karakteristik derecesi arttıkça, yüzeyinde metal olmayan filmler oluşacak ve sonuçta sürtünme katsayısı azalacaktır (Basse 1992).

#### 4.2 Aşınma ve Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınma çok geniş tanımlara sahiptir. ASLE (American Society of Lubrication Engineers)'ye göre aşınma, mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) araştırma grubuna göre, yüzeyde relatif hareketin sonucu olarak cisimden sürekli malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Alman DIN 50320 normuna göre ise aşınma, kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulması şeklinde tanımlanmaktadır (Peterson 1976).

Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleşebilir. Bunlar bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel anlamda oluşan ayrılmalıdır. Uygulamada aşınma kapsamına daha çok yüzeyden fiziksel anlamda ayrılan malzemenin sebep olduğu hasarlar dahil edilmektedir. Bir aşınma sisteminde temel unsurlar şunlardır: I- Ana malzeme (aşınan), II- Karşı malzeme (aşındıran), III- Ara malzeme, IV- Yük, V- Hareket. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte tribolojik sistem olarak adlandırılır.

Bir aşınma sistemindeki önemli etkenlerden biri de çevre şartlarıdır. Sistem elemanlarının nem veya korozif etkilerle karşı karşıya kalması aşınmayı hızlandırır. Birbirleri ile temasta olan malzeme yüzeyleri, oksit filmleri, sert kaplamalar ve yağlayıcılar ile korunsalar bile mekanik yüklemeler altında tabakaların veya yağlamının bozulması iki yüzeyin birbiri ile doğrudan temasına sebep olabilir. Bunun sonucunda oluşacak sürtünme, malzemenin çalışma koşullarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya sebep olur.

Aşınmayı etkileyen faktörleri şu şekilde sınıflandırabiliriz (Kayalı 1993).

1. Ana malzemeye bağlı faktörler: Malzemenin kristal yapısı, malzemenin sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve malzemenin boyutu.
2. Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi.
3. Ortamın etkisi: Sıcaklık, nem, atmosfer.
4. Servis şartları: Basınç, hız, kayma yolu.

### **4.3 Aşınma Proseslerinin Sınıflandırılması**

Aşınma prosesleri için bir çok sınıflandırmalar yapılmıştır. Kislik (Peterson 1976), pürüzlerin (asperity) mekanik bozulması, pürüz yorulması, servis esnasında kırılma, oksit filmlerinin dökülmesi, moleküler etkileşim ve yüksek

sıcaklıktan dolayı mekanik bozulma olarak genel bir sınıflandırma yapmıştır. Kragelskii (1965), elastik ve plastik yer değiştirme, kesme, yüzey filmlerinin bozulması ve aşınan malzemenin bozulması olarak sınıflandırmıştır. Archard ise, malzeme ve yüzey arasındaki temas alanının, elastik ve plastik deformasyonu arasındaki farkları göz önüne alarak sınıflandırma yapmıştır (Peterson 1976). Aşınma, Archard'ın sonuçlarına dayanan kategoriler içinde sınıflandırılmaktadır.

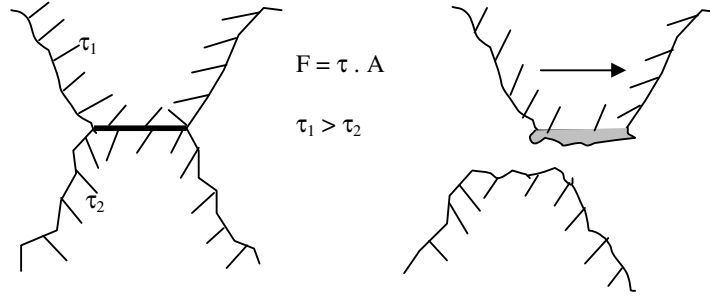
#### 4.3.1 Adhezif (Yapışma ) Aşınması

Adhezif aşınma en genel olarak, karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre relatif hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir. Basınç altında bir araya getirilmiş malzemelerde bulunan karşılıklı pürüzler, sürtünme ile oluşan ısı ve soğuk kaynaklaşma etkisi ile birbirlerine bağ yaparlar. Yüzeylerin relatif teğetsel hareketi, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopmaya neden olur. Bunun neticesinde Şekil 4.2'den görüldüğü gibi bir yüzeyden diğerine malzeme transferi meydana gelir (Holberg ve Matthews 1994).

Adhezif aşınma ile ilgili olarak birçok araştırmacı tarafından teorik çalışmalar yapılmıştır. Holm (Ulukan 1993), kaymanın başlaması ile değme noktalarına yakın kristal atomlarının karşılıklı etkileşimleri sonucu belirli bir L kayma yolunda, V kadar bir hacmin aşınmasının A değme alanı ile orantılı olarak meydana geldiğini kabul etmektedir.

$$A = \frac{F_n}{P_a}; \quad V = Z.A.L = \frac{Z.F_n.L}{P_a} \quad (4.7)$$

Burada Z, her bir etkileşimde yüzeyden ayrılan atom sayısını belirtmektedir.



Şekil 4.2 Adhezif aşınmanın temel mekanizması (Holberg ve Matthews 1994).

Adhezif aşınma ile ilgili olarak birçok araştırmacı tarafından teorik çalışmalar yapılmıştır. Holm (Ulukan 1993), kaymanın başlaması ile temas noktalarına yakın kristal atomlarının karşılıklı etkileşimleri sonucu, belirli bir L kayma yolunda V kadar bir hacmin aşınmasının A temas alanı ile orantılı olarak meydana geldiğini kabul etmektedir.

$$A = \frac{F_n}{P_a}; \quad V = Z.A.L = \frac{Z.F_n.L}{P_a} \quad (4.8)$$

Burada Z, her bir etkileşimde yüzeyden ayrılan atom sayısını belirtmektedir. Archard, adhezif aşınmanın ağırlıklı olduğu hallerde, bu aşınma tipi için aşağıdaki bağıntıyı deneylerden çıkarmıştır (Holberg ve Matthews 1994).

$$V = \frac{K.W.s}{H} \quad (4.9)$$

Burada;

V: Aşınma hacmi,

K: Malzemeye ait bir sabit,

W: Normal kuvvet (yük),

H: Malzemenin sertliği,

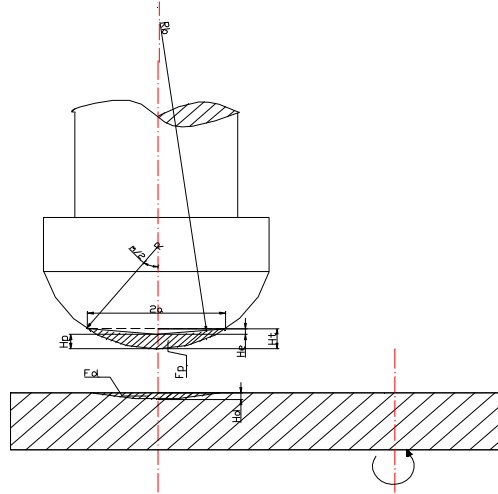
s: Kayma yolu.

Bu konuda yapılan teorik çalışmalar sonucunda, teorik yaklaşımlarda hemen hemen aynı sonuçlara varılmıştır.

Bu sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- a) Adhezif aşınma miktarı, uygulanan yük ve kayma yolu ile doğru, malzemenin plastik akma mukavemeti ve sertliği ile ters orantılıdır.
- b) Sonuçlardaki farklılıklar sadece malzeme sabitleri diyebileceğimiz katsayılarla olmaktadır.
- c) Yüksek hız, yüksek sıcaklık ve aşırı yükleme durumlarında, bu bağıntılarda sapmalar önemlidir (Ulukan 1993).

Habig (1974), bilye-disk sisteminde (Şekil 4.3) adhezif aşınmayı incelemiş ve disk üzerinde nokta teması yapan pinin aşınma hacmi için aşağıdaki formülü geliştirmiştir.



Şekil 4.3 Bilye-disk adhezif aşınma çiftinde bilye ve diskin aşınma diyagramı (Habig 1974).

$$V_p = \frac{\pi}{3} [H_t^2 (3R - H_t) - H_e^2 (3R_b - H_e)] \quad (4.10)$$

Burada;  $H_t = R - \sqrt{(R^2 - a^2)}$  (4.11)

$$R_b = \frac{(2a)^2}{8H_e} - \frac{H_e}{2} \quad (4.12)$$

Habig (1974), yaptığı deneyler sonucunda, ikisinin de aynı malzeme olması durumunda, bilye ve diskin eşit gerilmelere maruz kalmadığından dolayı farklı aşınma hızları verdiğini belirlemiştir.

#### **4.3.2 Abrazif Aşınma**

Abrazif aşınma, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle temasta olması ve sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması ile meydana gelir. Sert partiküller ya dışarıdan sisteme girer veya adhezif aşınma ürünleri olarak sistem içinde meydana gelir. Buna göre, abrazif aşınma iki elemanlı veya üç elemanlı olarak meydana gelmektedir. İki elemanlı abrazif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleri ile etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrazif aşınma ise ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olacağı gibi aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir (Ashby ve Jones 1996). Sert bir yüzey yumuşak bir yüzey üzerine bastırıldığında, sert yüzey üzerindeki pürüzler yumuşak malzeme üzerinde lokal plastik akış meydana getirir. Teğetsel hareketin etkisiyle sert yüzey yumuşak yüzeyden malzeme kaldırır (Lipson ve Cowel 1961). Abrazif aşınma mekanizmasında, sertlik aşındırıcı tane veya pürüzün boyut ve şekli, atak açısı, uygulanan normal yük, kayma hızı ve malzemelerin kırılma tokluğu önemli faktörlerdir.

Hutchings (1992), abrazif aşınma mekanizmasının plastik deformasyon veya gevrek kırılma olmak üzere iki şekilde meydana geldiğini belirlemiştir. Birinci durumda malzeme kaybı metallerdeki gibi plastik deformasyonla, ikinci durumda ise malzeme kaybı, özellikle seramiklerde ve düşük kırılma tokluğuna sahip malzemelerde olduğu gibi gevrek kırılma ile meydana gelmektedir. Çatlaklar, uygulanan yük kritik bir değeri ( $W^*$ ) aştıktan sonra meydana gelmekte ve bu değer malzemelerin kırılma tokluğu ve sertliğine bağlı olarak,



$$W^* \propto \left(\frac{K_c}{H}\right)^3 K_c \quad (4.13)$$

şeklinde değişim göstermektedir.

### 4.3.3 Yorulma ve Delaminasyon Aşınması

Yorulma aşınması, değişken tekrarlı yüklemeler sonucu meydana gelir. Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Neticede, malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur (Holberg ve Matthews 1994).

Delaminasyon aşınması ise, birbiri üzerinde kayan yüzeylerde mikroskobik ölçekte ortaya çıkan bir çeşit yorulma aşınmasıdır. Temas bölgesinde oluşan basıncın sonucu yüzeyin hemen altında çatlaklar oluşur. Yükün daha fazla artması ve çatlağın deformasyonu, çatlağın yayılmasına ve diğer çatlaklarla birleşmesine neden olur. Çatlak yayılması yüzeye paraleldir. Nihayetinde plaka şeklinde yüzeyden kopmalar meydana gelir (Holberg ve Matthews 1994).

Delaminasyon aşınma teorisi ilk defa Suh (1973) tarafından açıklanmıştır. Bu teoriye göre, aşınma esnasında malzemenin yüzeyi veya yüzeyine çok yakın yerler yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip değildir. Kayma hareketinin devam etmesi ile yüzeyden sonlu uzaklıktaki dislokasyonlar pekleşmeye uğrar. Bunun neticesinde küçük boşluklar oluşur. Malzeme içerisinde ikinci bir sert fazın olması bu boşlukların oluşumunu kuvvetlendirir. Zamanla, boşluklar büyür ve nihayetinde yüzeye paralel çatlaklar ortaya çıkar. Bu çatlaklar kritik bir kalınlığa ulaştıklarında yüzey ile çatlak arasındaki malzeme, plaka şeklinde partiküller halinde kesilir. Bu partiküllerin şekli, uzunluğa ve iç gerilmelere bağlıdır. Suh,

kendi teorisine dayanan aşınma denklemi de geliştirmiştir. Bu teoriye göre aşınma hızı, normal yük ve kayma uzunluğu ile doğru orantılıdır. Archard'ın aşınma denkleminin tersine sertliğe direk olarak bağlı değildir.

#### **4.3.4 Oksidasyon Aşınması**

Oksidasyon aşınması, en yaygın karşılaşılan kimyasal aşınma proseslerinden biridir. Metallerin yüzeyinde ince bir oksit tabakası her zaman oluşabilmektedir. Bu tabaka aynı zamanda, sürtünme ve aşınmaya karşı koruyucu tabaka özelliğine sahip olabilir (Holberg ve Matthews 1994). Oksidasyon aşınması teorisine göre, kayan iki yüzey arasında ortaya çıkan sürtünme ısısı, metal yüzeyi üzerindeki oksit filminin kalınlığını artırmak için enerji sağlayabilir. Oksit filmi kritik bir kalınlığa ulaştığında çıkıntılar (asperities), aşınma partikülleri oluşturarak kırılırlar. Bu yığıntılar (debris) abrazif aşınmayı başlatabilir. Oksidasyon aşınmasının adhezif aşınmadan bir derece daha düşük olduğu düşünülür. Bu Şekilde aşındırıcı partikül oluşturma ihtimali temas basıncı, kayma hızı, sıcaklık ve evre gibi aşınma ortamı özelliklerine ve korozyon potansiyeli, oksidasyon kinetiği, metalin oksijene afinitesi, mukavemet ve sertlik gibi aşınan metalin özelliklerine bağlıdır. Şartlar ince, sert ve yapışkan oksit filminin büyümesine izin verirse aşınma hızı, temas eden yüzeyler arasındaki adhezyonun azalmasına bağlı olarak azalabilir (Elder vd. 1988).

#### **4.3.5 Konu ile İlgili alışmaların İncelenmesi**

Chen- Yi Wei ve Fan-Shiong Chen TRD ve plazma nitrürleme yöntemiyle elde edilen çok tabakalı katmanların karakterizasyonu ile ilgili çalışmalarında AISI D2 eliği kullanmışlardır. alışmalarında AISI D2 eliğini normal sertleştirme, TRD yöntemiyle kromlama, kromlama + 5 saat plazma nitrürleme, kromlama + 10 saat plazma nitrürleme ve kromlama + 20 saat plazma nitrürleme işlemlerine tabi

tutmuşlardır. Çalışmada plazma nitrürleme süresi arttıkça krom nitrür piklerinde şiddetli artışlar görmüşlerdir. Buna karşılık karbon konsantrasyonunda azalma görmüşlerdir. TRD ile elde edilen krom karbür tabaka sertliğinin, kromlama + plazma nitrürleme ile elde edilmiş olan CrN tabakasının sertliğinde biraz düşük olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca aşınma davranışlarını karşılaştırmışlardır. Aşınma işlemi sonucunda TRD ile kaplamada aşınma miktarı, kromlama + plazma nitrürleme kaplamadakinden daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca kromlama + plazma nitrürleme zamanı arttıkça aşınma miktarında çok büyük düşüşlerin olduğunu görmüşlerdir. TRD ile kaplama sonucunda tabakasının sürtünme katsayısı 0,6-0,9 arasında değişirken, kromlama + 20 saat plazma nitrürlenmiş numunenin sürtünme katsayısı 0,7 olduğu sonucuna vararak, plazma nitrürleme süresinin artmasına paralel olarak sürtünme katsayısında düşüşlerin olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca TRD yöntemiyle kaplama sonucunda Cr<sub>2</sub>N ve Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> tabakasının baskın olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kim ve arkadaşları dupleks kaplamalarda krom birikmesinin, korozyon direncini geliştirilmesi ile ilgili çalışmalarında yumuşak çelik kullanarak, ilk önce elektrolitik yöntemle bir tuz banyosunda 30 dakika boyunca krom kaplamışlardır. Daha sonra krom kaplanan numunenin sertlik değerinin 1300–1720 HV arasında değiştiğini görmüşlerdir. Cr kaplamadan sonra plazma nitrürleme yöntemi ile numuneler nitrürlenmiştir. Bu çalışmada N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> ve CH<sub>4</sub> gaz karışımları kullanmışlardır. 720 °C’de 660 Pa basınçta 20 saat süreyle plazma nitrürlemişlerdir. Ve krom karbür tabakasının 40 µm, krom nitrür tabakasının 6–7 µm kalınlığa sahip olduğunu, krom nitrür tabaka sertliğinin 1200 HV iken dış yüzeyden içeriye doğru inildikçe içteki krom tabakası sertliğinin 400 HV olduğunu göbekte ise sertliğin 300 HV’e düştüğünü görmüşlerdir. Ve krom nitrürlemenin krom karbür alaşımlı kaplamalara göre korozyon direncini 60 kat daha arttırdığını görmüşlerdir.

Chang ve arkadaşları AISI 1020 ve H13 çeliklerini kromlamışlar ve nitrülemişlerdir. Kromlanmış çeliklerin kromlanmamış çeliklere göre, aşınma hacimleri düşük olduğunu sonucuna varmışlardır. Ayrıca krom nitrürlü

numunelerin aşınma hacimleri, kromlanmış numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Krom nitrürlemenin çeliklerin aşınma davranışlarını iyileştirdiği sonucuna varmışlardır.

Karaoğlu ve arkadaşları, plazma nitrürlenmiş az alaşımlı bir çeliğin aşınma davranışını incelediler. Plazma nitrürasyon proses parametrelerine bağlı olarak AISI 5140 çeliğinin aşınma dayanımında önemli artışlar elde ettiler. En yüksek aşınma direnci, yüzey sertliği en yüksek olan numunelerde görüldü. Yüksek sıcaklıkta işlem gören numunelerde oluşan kalın bileşik tabaka oldukça gevrek ve aşınmanın ilk safhasında bu tabakanın kırılmasıyla ortaya çıkan parçacıklar aşınma mekanizmasını adezif aşınmadan abrazif aşınmaya çevirerek malzemenin aşınma hızını yükseltir. Böylece, aşınma dayanımı, artan bileşik tabaka kalınlığı ile azalır ve aşırı kalın bileşik tabaka plazma nitrürasyonunda bir hata olarak kabul edilebilir. Bazı numunelerin nispeten düşük aşınma direnci göstermesinin sebepleri; kalın bileşik tabaka ve düşük sertliğe sebep olan yüksek işlem sıcaklığı ile yeterli sertlik artışı sağlamayan kısa işlem süresidir. Malzeme kaybını azaltmak için, plazma nitrürasyon işlem parametreleri, kalın ve yüksek sertlikli bir difüzyon tabakası verirken, bileşik tabakanın aşırı büyümesini önleyecek şekilde seçilmelidir sonucuna vardılar.

Çelik ve arkadaşların gaz karışımlarının iyon nitrürleme üzerine etkisinin araştırılması isimli bir çalışma yaptılar ( Çelik vd. 2000). Bu çalışmada da ikili ve üçlü gaz karışımları oluşturularak işlem için en iyi gaz karışımı araştırılmıştır. İyon nitrürasyon işleminden sonra, numuneler incelendiğinde iki farklı bölgenin oluştuğu gördüler. En dış kısımda demir nitrürlerden  $Fe_{2-3}(\epsilon)$ ,  $Fe_4N(\gamma)$  oluşmuş çok ince bir tabaka meydana gelmektedir.

Gaz karışımlarında hidrojen miktarındaki artış ile birlikte malzemenin yüzey sertliği ve difüzyon derinliği artarken, beyaz tabaka kalınlığında azalma olduğunu gördüler. Azot-argon gaz karışım oranları incelediklerinde, argonun sertlik artışına sınırlı bir katkısı olduğu ve bu karışımda beyaz tabaka kalınlığında da düşüş olduğu gördüler. Bu düşüş hidrojen gazının etkisinden daha azdır. Difüzyon

tabakası, nitrürleme zamanının artışıyla birlikte kalınlaşmaktadır. Argon gazı, azot gazı ile karışım olarak kullanıldığında malzemenin yüzey sertliğine sebep olmaktadır (Çelik vd. 2000).

Ayrıca istenmeyen beyaz tabakanın da incelmesini sağlamaktadır. Ancak sertlik ve beyaz tabaka kalınlığına etkisi hidrojen gazı kadar değildir. Hidrojen gazının elde edilmesi, taşınması ve maliyeti göz önüne alındığında, azot gazı ile birlikte argon gazının kullanılması uygun olabilir sonucuna vardılar (Çelik vd. 2000).

Alsaran ve diğerleri iyon nitrürlenmiş ve TiN kaplanmış AISI 5140 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü adhesyon, sertlik, yapı ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü ve TiN kaplamanın artmasıyla bağlı yoğunluk çizgisini buldular fakat beyaz tabakadaki  $\epsilon$  - Fe<sub>2-3</sub> ün miktarının artmasıyla kritik yük ve kaplama sertliği azalmıştır. Alt maddelere kaplama uygulanmasıyla, plazma nitrürlemeden sonra  $\gamma$  - Fe<sub>4</sub>N büyük miktarda içeren malzemelerle daha iyi tribolojik özellikler elde ettiler ( Alsaran ve diğerleri 2005 ).

Podgornik ve arkadaşları farklı PVD kaplamalı (TiN, TiAlN ve ta-C) ve plazma nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin mikrosertliği, yüzey pürüzlülüğü ve kuru sürtünme aşınma dayanımını incelemişlerdir ( Podgornik vd. 2001). Kaplama ana malzemesinin, kaplamaların performansı üzerinde nitrürleme bölgesinin etkisini incelediler. Kaplanmamış ve ön sertleştirilmiş numunelerle sert kaplı plazma nitrürlenmiş numuneyi karşılaştırdılar, mekanik ve aşınma özelliklerini geliştirdiler (Podgornik vd. 2001).

Gavgalı ve arkadaşları iyon nitrürleme işleminin AISI 5140 çeliğinin burulma özelliklerine etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Beyaz tabaka kalınlığının, artan nitrürleme sıcaklığı, zamanı ve gaz karışım oranıyla arttığını; burulma momenti, iyon nitrürleme sonucu çok küçük azalma göstermesine rağmen, burulma açısı büyük oranda azaldığını; burulma açısının, yüzeyde nitrürleme sonucunda oluşan sert ve gevrek beyaz tabaka kalınlığının artması ile azaldığını buldular (Gavgalı vd. 2002).

## 5. MATERYAL ve METOD

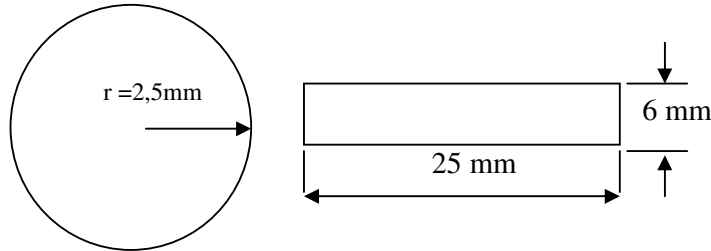
### 5.1 Deney Malzemesi

Deneyisel çalışmalarda kullanılan yatak çeliklerinin kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Deneyisel çalışmalarda kullanılan çeliklerinin (%) kimyasal bileşimi

Çelik Türü	(%) Kimyasal Bileşim									
	C	Cr	Fe	Mn	Si	Cu	Ni	P	Mo	Sn
AISI 52100	0,95	1,45	96,7	0,318	0,194	0,155	0,107	0,0143	0,0137	0,0095
AISI 8620	0,202	0,52	97,3	0,78	0,27	0,22	0,46	0,011	0,19	0,014

Numuneler 6 mm kalınlığında ve 25 mm çapında kesilerek kaplama işlemi için 1200 grid’lik zımparalama kademesine kadar zımparalanmış ve sonra parlatılmıştır. Numunelerin boyutları şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5.1 Kaplanan numunelerin boyutları

### 5.2 Kromlama ve Nitrürleme İşlemi

Bu çalışmada; 120–1200 grid’lik zımpara kademelerinden geçirilen AISI 52100 ve AISI 8620 çelikleri termo-reaktif difüzyon yöntemi (TRD) ile %55  $Al_2O_3$ , %35 ferro-krom, %10  $NH_4Cl$  tozlarını içeren bir paslanmaz çelik kutu içerisinde kromlanmıştır. Kaplama işlemi 800 °C ve 1000 °C’de 5 saat süreyle elektrik

rezistanslı bir fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak kromlanmış ve kromlanmamış AISI 52100 çeliği plazma iyon yöntemi ile %50 H<sub>2</sub>, %50 N<sub>2</sub> gazı ortamında 500 °C'de 2 saat sürelerle puls nitrürlenmiştir. Numuneler alkolle temizlendikten sonra plazma haznesine yerleştirilmiş ve haznenin havası 0,025 mbar basınca boşaltılmıştır. Deney süresince sıcaklık numuneye temas halinde olan bir termokupul vasıtasıyla ölçülmüştür ve plazma 500 V gerilimde, 0,5–0,55 Amper akımda, 10 kHz frekansa, 10 mbar çalışma basıncında, %80 Duty cycle (çalışma oranı)'da oluşturulmuştur. Kesitten kesilen numuneler metalografik işlemlerden geçirilerek optik mikroskop altında incelenmiştir.

### **5.3 Metalografik İnceleme**

Yüzey işlemlerine tabi tutulan numuneler, kesitten kesilerek kalıplanmış ve 120–1200 grid' lik zımparalama kademesinden geçirilmiştir. Metalografik olarak parlatılmış olan numuneler % 3'lük nital ile dağlanarak mikro yapılar ortaya çıkarılmıştır. Metalografik olarak hazırlanan numuneler Olympus Bx6 marka optik mikroskop ile incelenmiştir

### **5.4 X – Işını Çalışmaları**

TRD yöntemiyle kromlanmış, nitrürlenmiş ve her ki işlemede maruz bırakılmış numuneler üzerinden faz X- ışını difraksiyon yöntemiyle incelenmiştir. X- ışını radyasyonu olarak CuK $\alpha$  radyasyonu kullanılmış olup numune yüzeyleri 20–90 derece arasında taranmıştır.

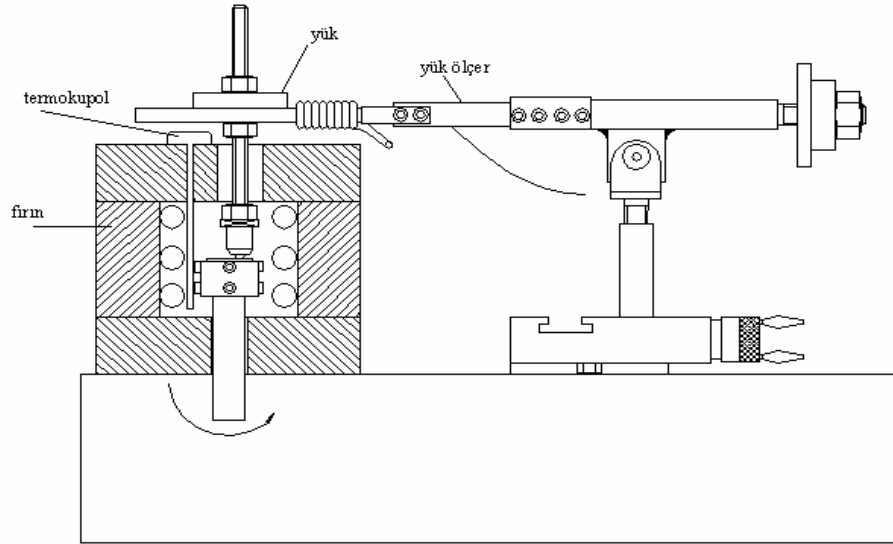
### **5.5 Tabaka Kalınlığı ve Mikrosertlik**

Deneyde kullanılan numunelerin tabaka kalınlıkları optik mikroskop yardımıyla tespit edilmiştir. Kromlanmış numunelerin sertlikleri Knoob ucuyla 25 gr yük

altında kesitten ve yüzeyden, nitrürlenmiş numunelerin sertlikleri ise kesitin dış yüzeyinden başlayarak malzeme merkezine doğru kısa aralıklarla, Vickers ucuyla 50 gr yük altında Shimadzu HVM-2 mikrosertlik cihazında ölçülmüştür.

## 5.6 Aşınma Deneyleri

Bu çalışmada TRD yöntemiyle kromlanmış AISI 52100, AISI 8620 çeliği, krom nitrürlenmiş AISI 52100 çeliği, sadece plazma nitrürlenmiş AISI 52100 çeliği, yüzey işlemsiz (kaplanmamış) AISI 52100 ve AISI 8620 çelik numuneler bilye-disk aşınma yöntemine tabi tutulmuştur. Numuneler oda sıcaklığı, 150 °C ve 300 °C sıcaklıklarda 10 N yük altında ve 0,3 m/s kayma hızında 1000 m aşındırılmıştır. Aşındırıcı olarak 8 mm çapında WC-Co bilye kullanılmıştır. Aşınma yüzeyinden titreşimleri alan loadsell'in ısınmasını önlemek amacıyla titreşimi ileten paslanmaz çelik kol üzerinde bakır borularla sulu soğutma mekanizması mevcuttur. Kullanılan araba ile bilyenin, numune üzerinde istenilen herhangi bir yere rahatlıkla baskı uygulanabilmektedir. Şekil 5.2'de aşınma deney mekanizmasında bulunan aşınma cihazı, titreşimleri alan cihaz ve grafiği elde eden bilgisayarın şekli verilmektedir.



Şekil 5.2 Yüksek sıcaklık aşınma deney sisteminin görünümü



Aşınma hızı, Perthometer M2 marka pürüzlülük cihazından elde edilen aşınma izleri kullanılarak aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$\text{Aşınma hızı} = \frac{\text{Aşınan hacim miktarı}}{\text{Uygulanan yük x Kayma mesafesi}}, \text{ mm}^3/\text{Nm}$$

Her bir numune için izin profili çıkarılmış ve milimetrik kağıt üzerinden kesit alanları hesaplanmıştır. Kesit alanının aşınma izinin çevre uzunluğu ile çarpılması neticesinde aşınan hacim miktarı belirlenmiştir.

## 6. BULGULAR

### 6.1 Mikro Yapı Sonuçları

TRD kromlama, plasma nitrüleme ve her iki yüzey işlemine tabi tutulan AISI 52100 ve 8620 çeliklerinin tabaka kalınlıkları, yüzey işlem sıcaklıkları, mikrosertlikleri çizelge 6.1'de ve optik mikroyapıları şekil 6.1-6.3'de görülmektedir. Şekil 6.1-6.3'den görüldüğü gibi karbür ve nitrür difüzyon tabakaları yüzeye paralel ve düz bir morfolojiye sahiptir.

Çizelge 6.1'de de verildiği gibi AISI 52100 çeliğinin krom karbür tabaka kalınlığının 800 °C'de  $5.2 \pm 0.63$   $\mu\text{m}$  olduğu ve sertliğinin de 1644  $\text{HK}_{0,025}$  1000 °C'de ise tabaka kalınlığı  $14.3 \pm 1.66$   $\mu\text{m}$ , sertlik değerinin ise, 1823  $\text{HK}_{0,025}$  olduğu görülmektedir. AISI 8620 çeliğinin krom karbür tabaka kalınlığının 800°C'de  $2.8 \pm 0.42$   $\mu\text{m}$  olduğu ve sertliğinin de 1588  $\text{HK}_{0,025}$ . 1000 °C'de ise tabaka kalınlığı  $10.5 \pm 1.27$   $\mu\text{m}$ , sertlik değerinin ise, 1769  $\text{HK}_{0,025}$  olduğu görülmektedir. Plazma nitrürlenmiş AISI 52100 çeliğinin sertliği 1215  $\text{HK}_{0,025}$ , tabaka kalınlığı  $4.0 \pm 0.8$   $\mu\text{m}$ , krom nitrürlenmiş AISI 52100 çeliğinin sertlik değeri ise 2570  $\text{HK}_{0,025}$ , tabaka kalınlığı  $5.0 \pm 0.6$   $\mu\text{m}$ 'dur.

Çizelge 6.1'de AISI 52100 çeliğinin, yüzeyde oluşan krom karbür kaplama tabakasının ve sertlik değerinin AISI 8620 çeliğine daha yüksek olduğu görülmektedir. Sertlik değerleri literatürdeki değerlerine çok yakındır (Heat Treatment 1981).

Çizelge 6.1'de krom karbür difüzyon tabakalarının tabaka kalınlıkları ve mikrosertlikleri görülmektedir. AISI 52100 çeliği üzerindeki tabaka kalınlığı yüksek karbon miktarından dolayı daha fazladır. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla her iki çelik üzerinde krom karbür difüzyon tabakasının kalınlıkları da artmıştır.

Krom karbür tabakalarının mikrosertlikleri Knoob ucuyla 25 gr yük altında Shimadzu HMV-2 mikrosertlik cihazında ölçülmüştür. 800 °C'de kromlanan

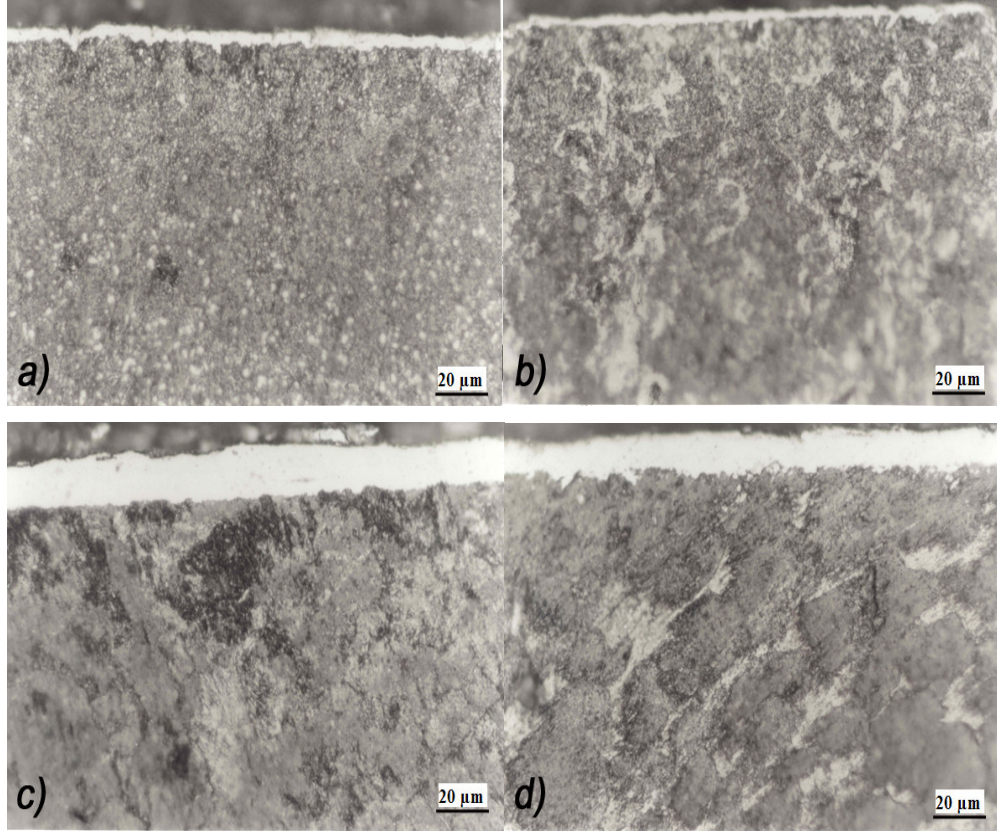
numunelerin tabaka kalınlıkları çok küçük olduğundan mikrosertlik numunenin kesidi yerine üst yüzeyinden ölçülmüştür. Knoob ucunun tepe açısının yaklaşık 172° olduğundan sertlik izi çeliğe ulaşmamakta, sadece tabakadan ölçüm almaktadır. 1000 °C’de kromlanan numunelerde mikrosertlik kesitten alınmıştır.

Çizelge 6.1’den görüldüğü gibi AISI 52100 ve 8620 çelikleri üzerindeki tabakaların sertliği, işlem sıcaklığının artmasıyla birlikte sertliklerinde artış gözlenmiştir.

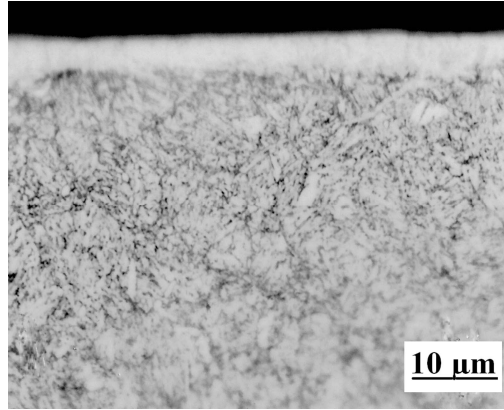
Ayrıca krom nitrürlenmiş AISI 52100 çeliğinin krom karbür ve plazma nitrür kaplamalara göre sertlik değerinin yüksek, tabaka kalınlığının ise düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.1. AISI 52100 ve 8620 çelikleri üzerinde yüzey işlemleri ile oluşturulan tabakaların(krom karbür, krom nitrür) kalınlığı ve mikrosertliği.

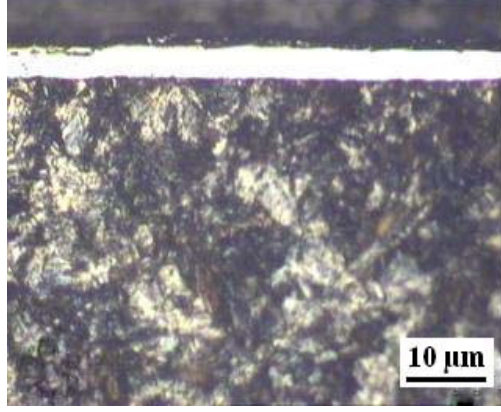
Çelik Türü	Yüzey İşlemleri Sıcaklığı (°C)	Tabaka Kalınlığı (µm)	Mikrosertlik
AISI 52100	TRD 800	5.2±0.63	1644 HK <sub>0.025</sub>
	TRD 1000	14.3±1.66	1823 HK <sub>0.025</sub>
AISI 8620	TRD 800	2.8±0.42	1588 HK <sub>0.025</sub>
	TRD 1000	10.5±1.27	1769 HK <sub>0.025</sub>
AISI 52100	Plazma Nitürleme 500	4.0±0.8	1215 HK <sub>0.025</sub>
AISI 52100	Krom Nitürleme 500	5.0±0.6	2570 HK <sub>0.025</sub>
AISI 52100	İşlem Görmemiş	-----	970 HK <sub>0.025</sub>
AISI 8620	İşlem Görmemiş	-----	402 HK <sub>0.025</sub>



Şekil 6.1 Değişik sıcaklıklarda AISI 52100 ve 8620 çelikleri üzerinde TRD yöntemiyle oluşturulan krom karbür tabakasının optik mikroyapısı, a) 52100–800°C, b) 8620–800°C, c) 52100–1000°C, d) 8620–1000°C.



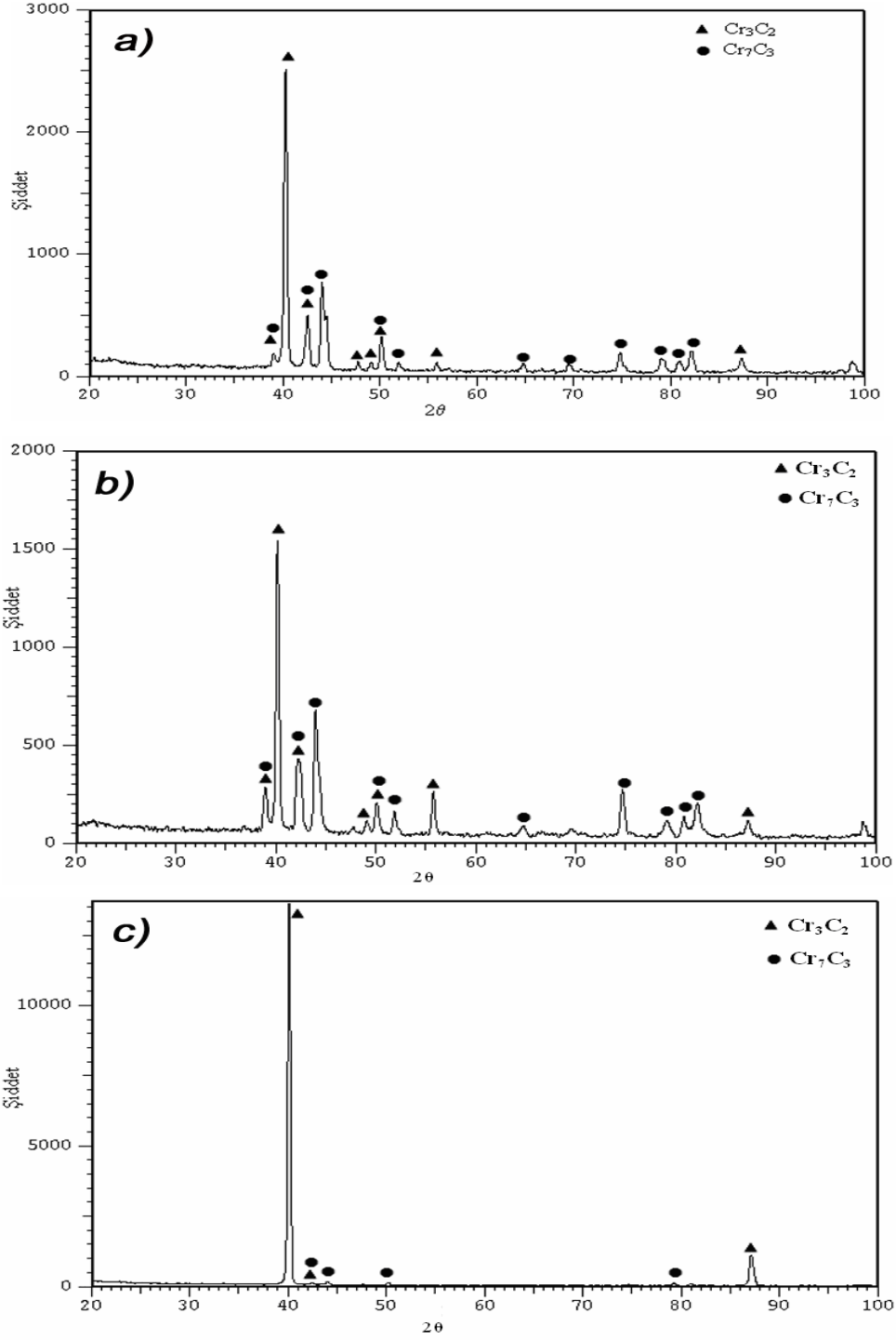
Şekil 6.2 AISI 52100 çeliği üzerinde oluşturulan plazma nitrür tabakasının optik mikroyapısı.



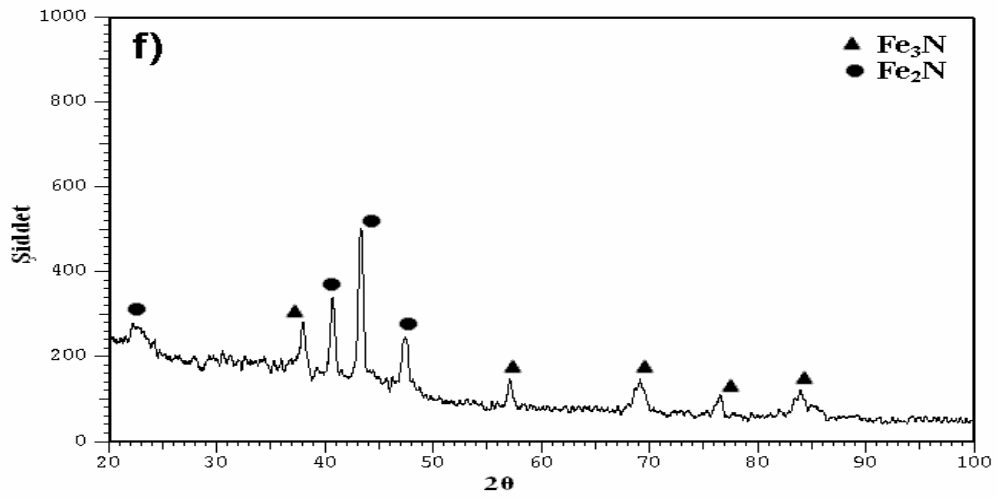
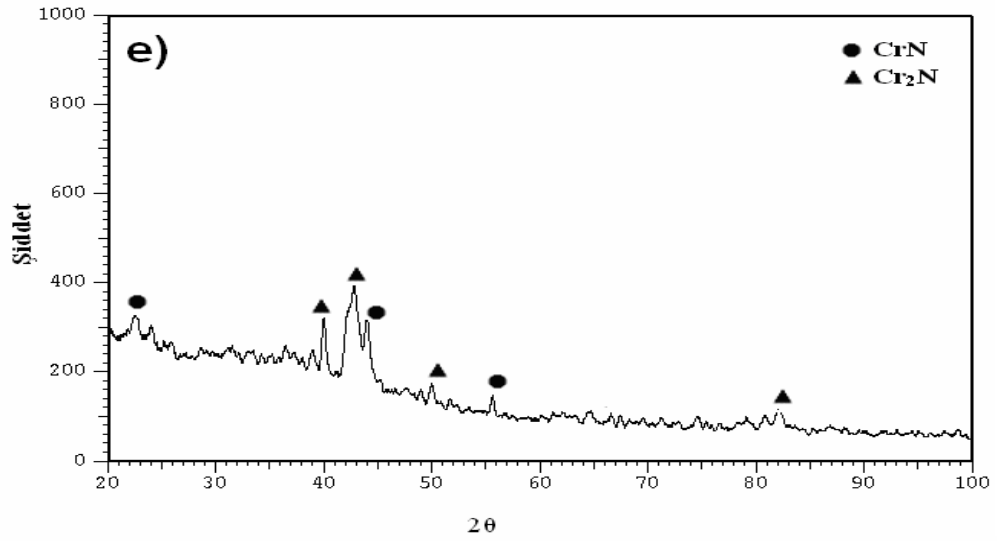
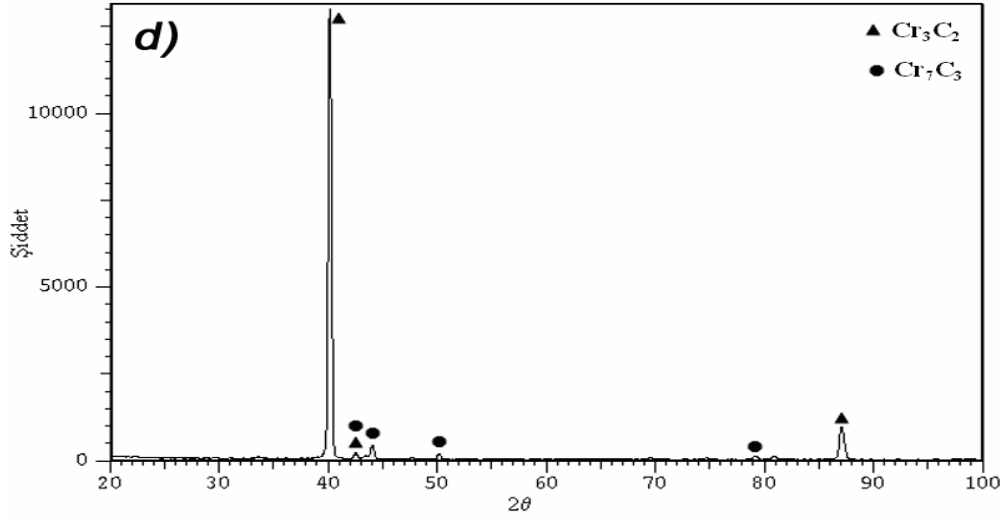
Şekil 6.3 AISI 52100 çeliği üzerinde oluşturulan krom nitrür tabakasının optik mikroyapısı.

## 6.2 X – Işınları Sonuçları

Yüzey işlemleri neticesinde oluşan tabakaların faz analizleri x-ışınları difraktometresinde  $\text{CuK}_\alpha$  ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) radyasyonu kullanılarak yapılmıştır. Şekil 6.4'de çelikler üzerinde oluşturulmuş difüzyon kaplamaların XRD analizleri görülmektedir. Şekil 6.4 a-d'de görüldüğü gibi 800 ve 1000 °C'de 5 saat kromlama yüzey işlemine tabi tutulmuş her iki çelikte de tabaka  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  ve  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  karbürlerinden oluşmaktadır. Baskın faz  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  karbürüdür. Şekil 6.4 e'de çift yüzey işlemine tabi tutulmuş AISI 52100 çeliğinin X-ışınları difraksiyon paterni  $\text{CrN}$ ,  $\text{Cr}_2\text{N}$  göstermektedir. Baskın faz ise  $\text{Cr}_2\text{N}$ 'dür. Şekil 6.4 f'de puls plazmada nitrülenmiş 52100 çeliğinin üzerinde  $\text{Fe}_2\text{N}$  ve  $\text{Fe}_3\text{N}$  fazlarından oluşan difüzyon tabakası görülmektedir Bu sonuç literatürle de uyum sağlamaktadır (Alsaran vd. 2000).



Şekil 6.4 Değişik sıcaklıklarda 5 saat süreyle TRD ısıl işlemine maruz bırakılmış AISI 52100 ve 8620 çeliklerinin X-ışınları difraksiyonu analizi, a) 52100–800 °C, b) 8620–800 °C, c) 52100–1000 °C, d) 8620–1000 °C, e) krom nitrülenmiş AISI 52100, f) plazma nitrülenmiş AISI 52100.



Şekil 6.4'ün devamı

### 6.3 Aşınma ve Sürtünme Sonuçları

Bu çalışmada, TRD yöntemiyle kromlanmış AISI 52100 ve AISI 8620 çeliği, çift yüzey işlem uygulanmış AISI 52100 çeliği ve plazmada nitrülenmiş AISI 52100 çeliği değişik sıcaklıklarda bilye-disk aşınma yöntemine tabi tutulmuştur. Aşınma hızlarının sıcaklıkla değişim grafikleri şekil 6.5’de verilmiştir.

Şekil 6.5 a ve b’den görüldüğü gibi 1000 °C’de yüzey işlemine tabi tutulmuş çelikler 800 °C’de yüzey işlemine maruz bırakılmış çeliklerin aşınma hızından daha düşük aşınma hızına sahiptir. Bunun nedeni difüzyon tabakasının daha kalın olmasıdır. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla her üç numunede de aşınma hızı artmaktadır. Yüzey işlemi uygulanmamış numunelerde sıcaklığın artmasıyla beraber plastik deformasyon artmakta ve adhesif aşınmanın ortaya çıkmasıyla aşınma şiddetlenmektedir. Yüzey işlemi uygulanmış çeliklerde ise difüzyon esaslı kaplamaların sıcaklıktan etkilenmesi ve hafif bir plastik deformasyon göstermesi muhtemeldir.

Şekil 6.5 a ve b’de kromlama yüzey işlemine tabi tutulmuş AISI 52100 çeliğinin oda sıcaklığındaki aşınma hızı AISI 8620 çeliğinden daha küçüktür. Şekil 6.5 a’den da görüldüğü gibi AISI 52100 çeliğinin aşınma hızı sıcaklıkla birlikte artmaktadır. En düşük aşınma hızı 1000 °C’de yüzey işlemine tabi tutulmuş numunede görülürken, en büyük aşınma hızı yüzeye işlem uygulanmamış AISI 52100 çeliğinde görülmüştür. Yüzey işlemi uygulanmamış AISI 52100 çeliğinin oda sıcaklığındaki aşınma hızı  $1.7 \times 10^{-8}$  mm<sup>3</sup>/Nm’dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C’ye çıktığında % 44, sıcaklık 300 °C’de ise % 100 oranında aşınma hızı artmıştır. 800 °C’de kromlama yüzey işlemi uygulanmış AISI 52100 oda sıcaklığındaki aşınma hızı  $1.1 \times 10^{-8}$  mm<sup>3</sup>/Nm’dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C’ye çıktığında % 36, sıcaklık 300 °C’de ise % 138 oranında aşınma hızı artmıştır. 1000 °C’de kromlama yüzey işlemi uygulanmış AISI 52100 çeliğinin oda sıcaklığındaki aşınma hızı  $0.81 \times 10^{-8}$  mm<sup>3</sup>/Nm’dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C’ye çıktığında % 37, sıcaklık 300 °C’de ise % 122 oranında aşınma hızı artmıştır. Şekil 6.5 b’den görüldüğü gibi AISI 8620 çeliğinin

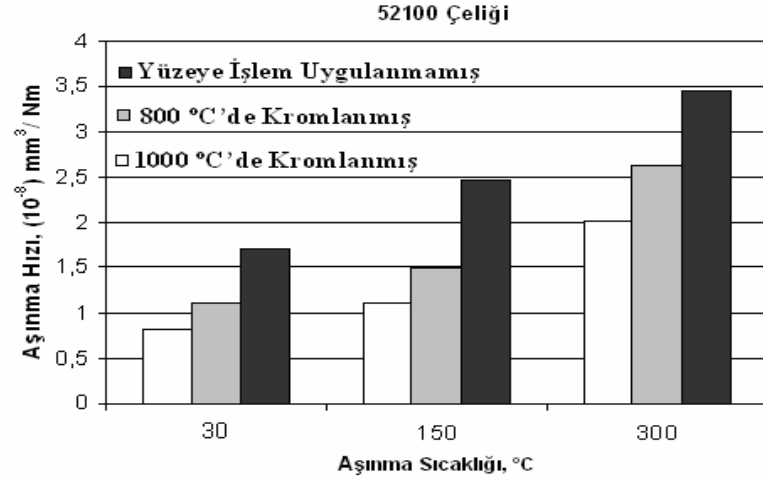


aşınma hızı sıcaklıkla birlikte artmıştır. Yüzey işlemi uygulanmamış AISI 8620 çeliğinin oda sıcaklığındaki aşınma hızı  $2.25 \times 10^{-8}$  mm<sup>3</sup>/Nm'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 42, sıcaklık 300 °C'de ise % 86 oranında aşınma hızı artmıştır. 800 °C'de kromlama yüzey işlemi uygulanmış AISI 8620 çeliğinin oda sıcaklığındaki aşınma hızı  $1.55 \times 10^{-8}$  mm<sup>3</sup>/Nm'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 53, sıcaklık 300 °C'de ise % 60 oranında aşınma hızı artmıştır. 1000 °C'de kromlama yüzey işlemi uygulanmış AISI 8620 çeliğinin oda sıcaklığındaki aşınma hızı  $1.3 \times 10^{-8}$  mm<sup>3</sup>/Nm'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 13, sıcaklık 300 °C'de ise % 57 oranında aşınma hızı artmıştır. En düşük aşınma hızı 1000 °C'de yüzey işlemine tabi tutulmuş numunede görülürken, en büyük aşınma hızı ise yüzeye işlem uygulanmamış AISI 8620 çeliğinde görülmüştür. Şekil 6.5 a ve b' de genel olarak tüm yüksek sıcaklık aşınma deneylerinde (oda sıcaklığı, 150 °C, 300 °C) AISI 8620 çeliğinin aşınma hızı, AISI 52100 çeliğinden daha düşük çıktığı görülmüştür.

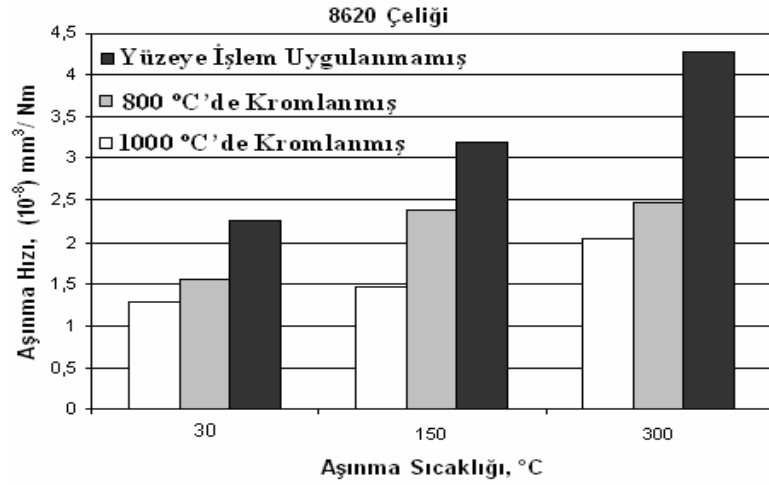
Şekil 6.5 c'den görüldüğü gibi plazma nitrülenmiş AISI 52100 çeliğinin aşınma hızının sıcaklıkla değişim grafiğinde görüldüğü gibi AISI 52100 çeliğinin oda sıcaklığındaki aşınma hızı  $0.7 \times 10^{-8}$  mm<sup>3</sup>/Nm'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 42, sıcaklık 300 °C'de ise % 80 oranında aşınma hızı artmıştır.

Şekil 6.5 d'de çift yüzey işlemi uygulanmış AISI 52100 çeliğinin aşınma hızının sıcaklıkla değişim grafiğinde görüldüğü gibi AISI 52100 çeliğinin oda sıcaklığındaki aşınma hızı  $0.5 \times 10^{-8}$  mm<sup>3</sup>/Nm'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 60, sıcaklık 300 °C'de ise % 87 oranında aşınma hızı artmıştır. Şekil 6.5 c ve d'de plazma nitrülenmiş ve çift yüzey işlemi uygulanmış AISI 52100 çeliğinin aşınma hızının sıcaklıkla değişim grafiğinde görüldüğü gibi AISI 52100 çeliğinin aşınma hızı sıcaklığa bağlı olarak artmaktadır. Plazma nitrüleme düşük sıcaklık yüzey işlemi olduğundan 300 °C gibi sıcaklıkta beyaz tabakada yapının bozularak sertliğin düşmesi muhtemeldir. Ayrıca çift yüzey işlemi uygulanmış AISI 52100 çeliğinin, plazma nitrülenmiş

AISI 52100 çeliğine göre aşınma hızı tüm aşınma sıcaklıklarında (oda sıcaklığı, 150 °C, 300 °C) daha düşük değere sahiptir.

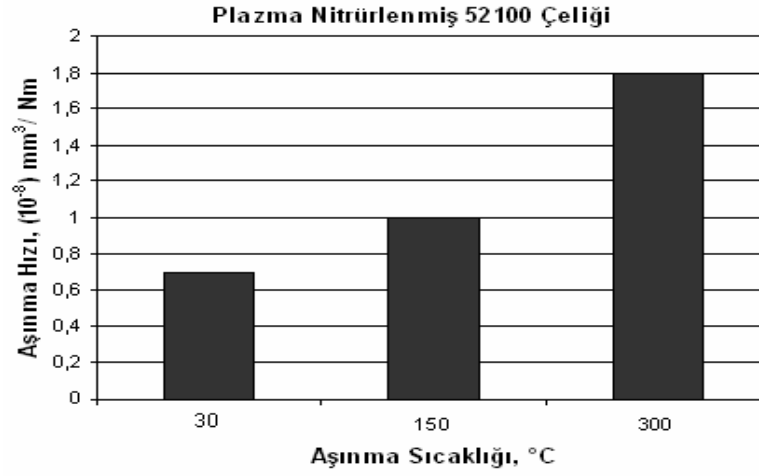


a)

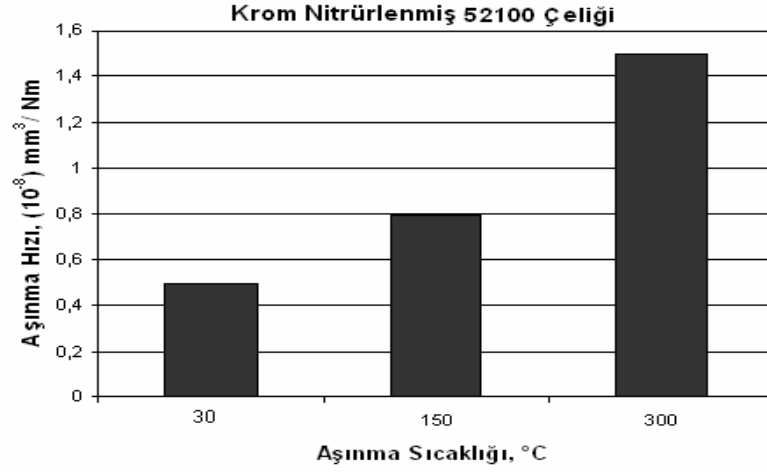


b)

Şekil 6.5 AISI 52100 ve 8620 çeliklerinin aşınma hızının sıcaklıkla değişimi; a) AISI 52100, b) AISI 8620, c) Plazma nitrürlenmiş AISI 52100, d) çift yüzey işlem uygulanmış AISI 52100



c)



d)

Şekil 6.5'in devamı

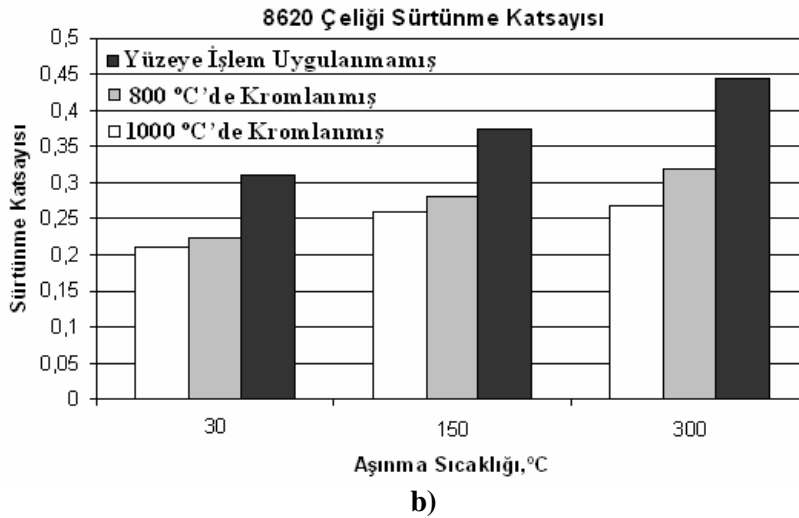
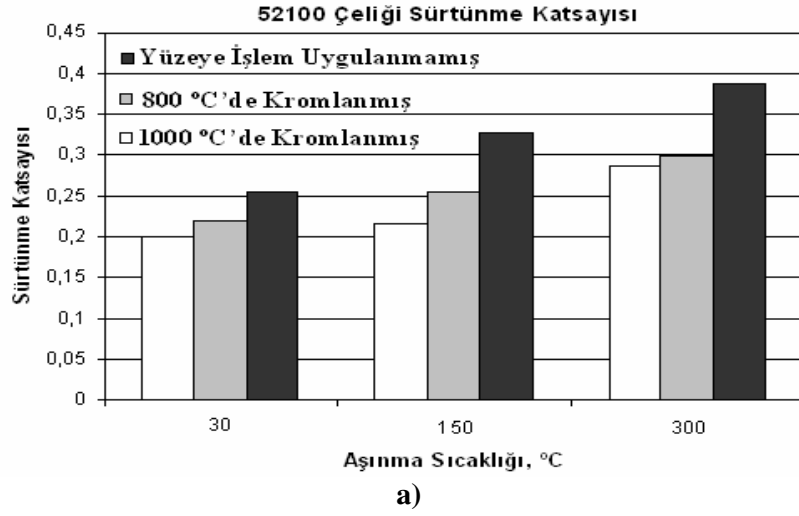
Şekil 6.6 a ve b'de AISI 52100 ve AISI 8620 çeliklerinin sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Şekil 6.6 a'da yüzeyi işlem görmemiş AISI 52100 çeliğinin oda sıcaklığındaki sürtünme katsayısı 0.25'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 32, sıcaklık 300 °C'de ise % 52 oranında sürtünme katsayısı artmıştır. 800 °C'de kromlama yüzey işlemine tabi tutulmuş AISI 52100 çeliğinin oda sıcaklığındaki sürtünme katsayısı 0.22'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 13, sıcaklık 300 °C'de ise % 36 oranında sürtünme katsayısı artmıştır. 1000 °C'de kromlama yüzey işlemine tabi tutulmuş AISI 52100 çeliğinin oda sıcaklığındaki sürtünme katsayısı

0.20'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 10, sıcaklık 300 °C'de ise % 40 oranında sürtünme katsayısı artmıştır. Şekil 6.6 b'de yüzeyi işlem görmemiş AISI 8620 oda sıcaklığındaki sürtünme katsayısı 0.31'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 20, sıcaklık 300 °C'de ise % 42 oranında sürtünme katsayısı artmıştır. 800 °C'de kromlama yüzey işlemine tabi tutulmuş AISI 8620 çeliğinin oda sıcaklığındaki sürtünme katsayısı 0.22'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 28, sıcaklık 300 °C'de ise % 45 oranında sürtünme katsayısı artmıştır. 1000 °C'de kromlama yüzey işlemine tabi tutulmuş AISI 8620 çeliğinin oda sıcaklığındaki sürtünme katsayısı 0.21'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 23, sıcaklık 300 °C'de ise % 28 oranında sürtünme katsayısı artmıştır. Her iki çelikte sürtünme katsayısı aşınma sıcaklığının artmasıyla artmaktadır. Şekil 6.6.a ve b'de 1000 °C'de kromlama yüzey işlemine tabi tutulmuş AISI 52100 ve 8620 çeliğinin sürtünme katsayısı 800 °C'de kromlama yüzey işlemine tabi tutulmuş AISI 52100 ve 8620 çeliğinden daha düşüktür. En düşük sürtünme katsayısı 1000 °C'de kromlama yüzey işlemine maruz bırakılmış AISI 52100 ve 8620 çeliğinde görülmüştür. Şekil 6.6 a ve b'den görüldüğü gibi AISI 52100 çeliğinin AISI 8620 çeliğine göre daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir.

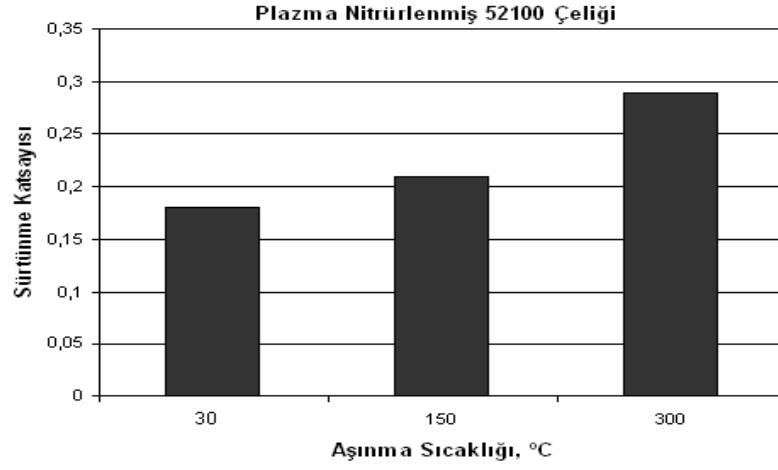
Şekil 6.6 c de görüldüğü gibi plazma nitrüleme yüzey işlemine tabi tutulmuş AISI 52100 çeliğinin oda sıcaklığındaki sürtünme katsayısı 0.18'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 16, sıcaklık 300 °C'de ise % 61 oranında sürtünme katsayısı artmıştır. Bu değerlerden görüldüğü gibi aşınma sıcaklığının artmasıyla AISI 52100 çeliğinin sürtünme katsayısında artış meydana gelmektedir.

Şekil 6.6 d'de çift yüzey işlemine tabi tutulmuş AISI 52100 çeliğinin oda sıcaklığındaki sürtünme katsayısı 0.15'dir. Ortam sıcaklığı oda sıcaklığından 150 °C'ye çıktığında % 26, sıcaklık 300 °C'de ise % 70 oranında sürtünme katsayısı artmıştır. Çift yüzey işlemine maruz bırakılmış AISI 52100 çeliğinin sürtünme katsayısı aşınma sıcaklığının artmasıyla artmıştır.

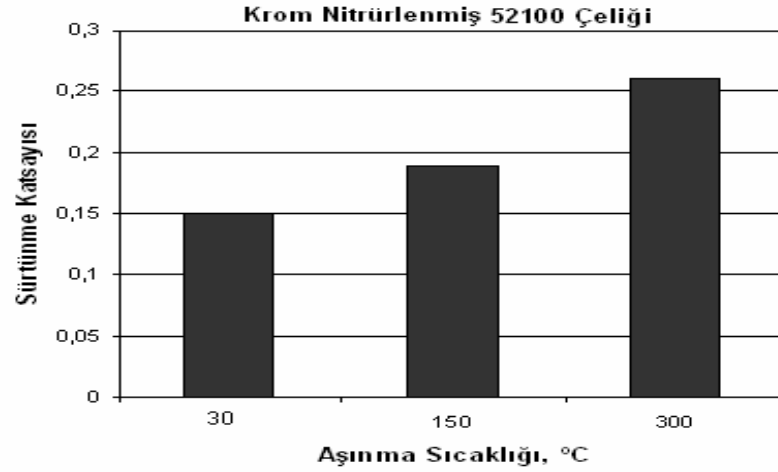
Çift yüzey işlemi uygulanmış AISI 52100 çeliğinin sürtünme katsayısı tüm aşınma sıcaklıklarında (oda sıcaklığı, 150 °C, 300 °C), plazma nitrülenmiş AISI 52100 çeliğine göre daha düşük sürtünme katsayısına sahiptir.



Şekil 6.6 AISI 52100 ve 8620 çeliklerinin sürtünme katsayısının sıcaklıkla değişimi; a) AISI 52100, b) AISI 8620, c) Plazma nitrüllü AISI 52100 d) çift yüzey işlem uygulanmış AISI 52100.



c)

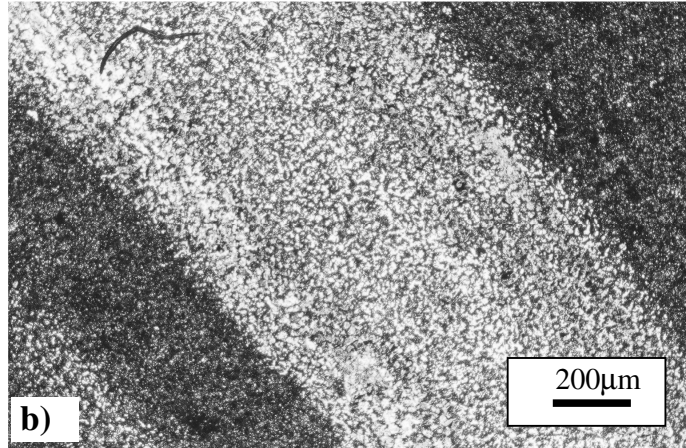
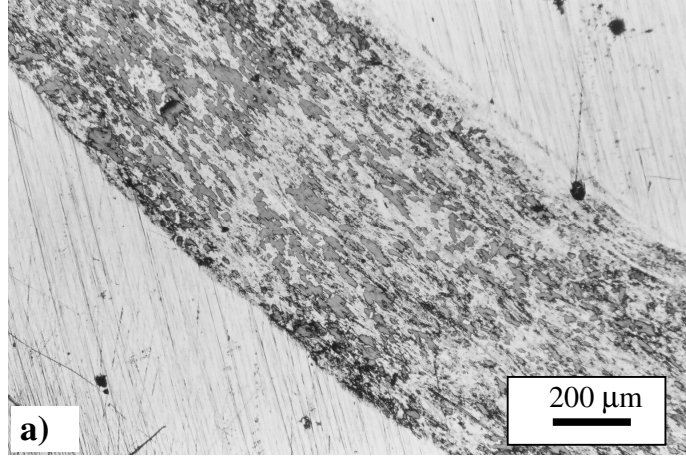


d)

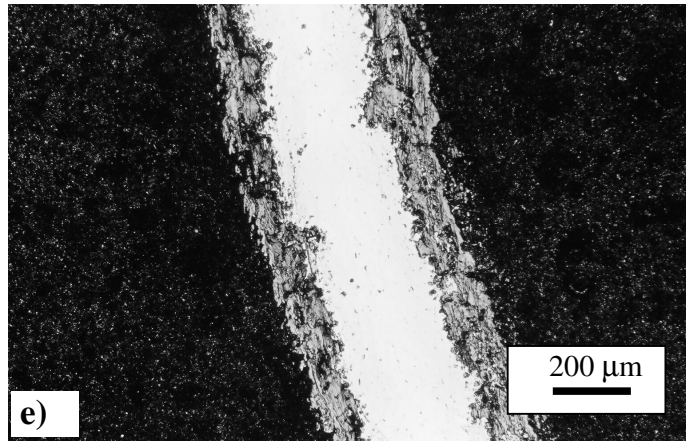
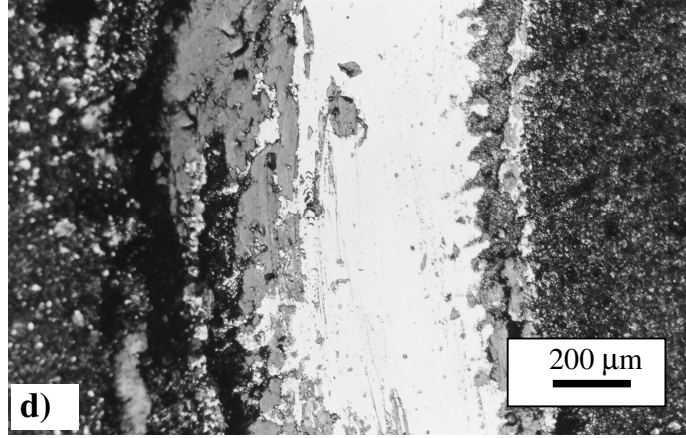
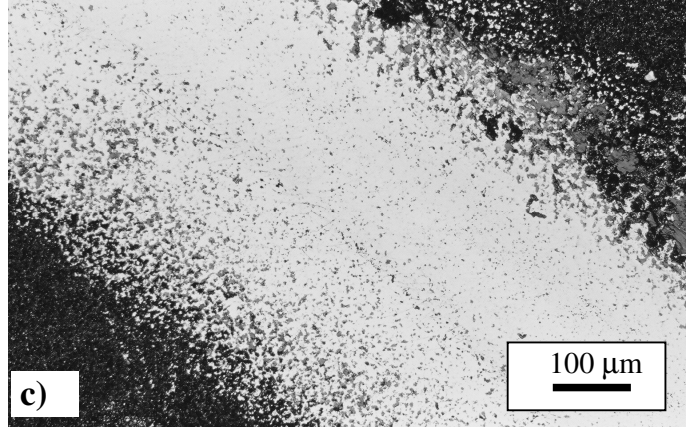
Şekil 6.6'nın devamı

Şekil 6.7'de 150 °C'de aşınma işlemine tabi tutulmuş numunelerin aşınma iz görüntüleri görülmektedir. Şekil 6.7'a dan görüldüğü gibi yüzey işlemi uygulanmamış aşınma izinde adhesif aşınma ve tabakalaşma(delaminasyon) aşınması görülmektedir. Yüzey işlemi uygulanmış numunelerde adhesif aşınmanın nispeten azaldığı fakat mikro-yorulma sonucu ince delaminasyon aşınmasının ortaya çıktığı görülebilir.

Şekil 6.7 d ve e’de plazma nitrürlenmiş ve çift yüzey işlem uygulanmış AISI 52100 çeliğinin 150 °C’de yüzeyine uygulanan aşınma deneyinde oluşan izin mikroyapısı görülmektedir. Çift işlem uygulanmış numunedeki aşınma iz kalınlığı plazmada nitrürlenmiş numunedeki aşınma iz kalınlığına göre çok daha küçüktür. Bu da sertlikleri arasındaki farktan ileri gelmektedir (plazma nitrüleme yaklaşık 1215 HK<sub>0,025</sub>, çift yüzey işlemi 2570 HK<sub>0,025</sub>).



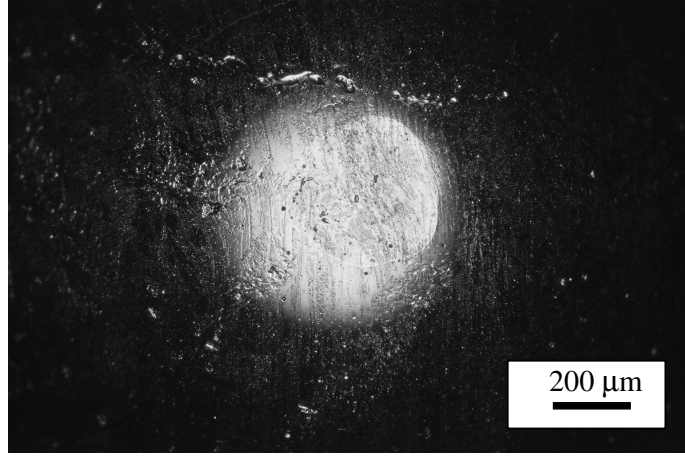
Şekil 6.7 AISI 52100 çeliğinin ve üzerinde oluşturulan tabakaların 150 °C’deki aşınma izin mikroyapı görüntüsü. a) Yüzey işlem görmemiş, b) 800°C’de kromlanmış, c) 1000°C’de kromlanmış, d) puls plazma nitrürlenmiş, e) çift yüzey işlem uygulanmış.



Şekil 6.7'nin devamı.

Şekil 6.8'de AISI 52100 çeliğine karşı 300 °C'de aşındırılmış WC-Co bilyenin aşınma yüzeyi optik mikroskop fotoğrafı görülmektedir.





Şekil 6.8 AISI 52100 çeliğine karşı 300 °C'de aşındırılmış WC-Co bilyenin aşınma yüzeyi optik mikroskop fotoğrafı

## BÖLÜM 7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada çelikler üzerine TRD kromlama, plazma nitrüleme ve her iki yüzey işlemi başarıyla uygulanmıştır. AISI 52100 çeliği üzerinde TRD kromlama, plazma nitrüleme ve her iki yüzey işlemi neticesinde oluşturulmuş tabakaların sertlikleri 1823, 1215 ve 2570 HK<sub>0,025</sub>'dir. TRD kromlama işlemi neticesinde tabakaların Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> ve Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> karbürlerinden oluştuğu bulunmuştur. Yine X-ışınları difraksiyonu, puls plazmada nitrülenmiş 52100 çeliğinin üzerindeki tabakanın Fe<sub>2</sub>N ve Fe<sub>3</sub>N fazlarından çift işlem uygulanması neticesinde oluşan tabakanın ise CrN, Cr<sub>2</sub>N fazlarından oluştuğunu göstermiştir.

Tabakalardaki aşınma hızı ve sürtünme katsayısı sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklığın artmasıyla hem aşınma hızı hem de sürtünme katsayısı artmaktadır. Çelik üzerindeki tabakalar sertliği artırırken aşınma hızında da azalmalara neden olmuştur. Çelikler üzerinde yüksek sıcaklıklarda yapılan aşınma deneyleri sonucunda, kaplanan yüzeylerin oksitlendiği ve aşınma davranışın kompleks bir yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir. Buna karşılık, kaplamaların sürtünme katsayılarının 300 °C sıcaklığına kadar arttığı, 52100 çeliğinin sürtünme katsayısının AISI 8620 çeliğinden biraz düşük olduğu görülmüştür. Sürtünme katsayısındaki düşüşlerin sebebinin, çalışma esnasında numune yüzeyinde oksit oluşmasıdır.

Yüzey işlemi görmemiş AISI 52100 ve 8620 çeliklerinin yüzey işlemi görmüş AISI 52100 ve 8620 çeliklerine göre yüksek aşınma hızına sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç ise literatürle uyumludur (Wei vd. 2005). Chang, Baggi ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada krom nitrülenmiş AISI 52100 çeliğinin aşınma hızı, yüzeyi işlem görmemiş ve yüzeyi işlem görmüş (kromlama, plazma nitrüleme) diğer numunelere göre aşınma hızının daha düşük olduğunu görmüşlerdir. Literatürde nitrürlü tabakaların delaminasyon aşınmasına yatkın olduğu ifade edilmektedir (Corengia et al 2006). Bu yüzden nitrülenmiş numuneler üzerindeki nitrürlü tabakanın delaminasyon (mikro yorulma) neticesinde kırıldığı ve abrazif aşınmaya doğru ilerlediği görülebilir.

## 7.1 Öneriler

- Bu çalışmada sadece AISI 52100 çelikleri krom karbür kaplanmış ve tek bir yük altında aşınma davranışı incelenmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda ve farklı yüklerde, çeliklerin aşınma davranışları araştırılmaya değer bir konudur.
- Bu çalışmada kaplamaların TRD prosesi ile rahatlıkla üretilebileceği saptanmış, bununla birlikte çeliğin içerdiği alaşım elementlerinin kaplama karakterini nasıl etkilediği araştırmaya değer bir konudur.
- Kaplama tabakasının mekanik özellikleri, özellikle aşınma davranışları incelenmiştir. Fakat kaplamaların, oksidasyon ve korozyon dirençleri ile oksidasyon ve korozyon davranışları incelenmemiştir. Bu da incelemeye değer bir konudur.
- Ayrıca kaplamaların, çeliklerin yorulma davranışları üzerine etkisi araştırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Alsaran, A., Çelik, A., Karakan, M., 2005, " Structural, Mechanical and Tribological Properties of Duplex – Treated AISI 5140 Steel", Materials Characterization.
- Arai, T., Harper, S.,1991, Thermoreactive Deposition/ Diffusion Process, ASM Metal Handbook on Heat Treating 10th Edition.
- Arslan O., 2001, " Plazma Nitrüleme Isıl İşleminin Makine Parçalarının İçyapı ve Mukavemet Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Ashby, F. and Jones, R.H., 1996, " Engineering Materials", Butterworth / Heinemann, Oxford, pp. 247.
- Baggio, S. V. H., Vasconcelos G. De., Oliveira, M. A. S., Ferreirab, B. C., 2003, Duplex surface treatment of chromium pack diffusion and plasma nitriding of mild steel. Surface and Coatings Technology, Vol. 163 –164, pp. 313-317.
- Baldı, A.L., Wynewood, P., 1980, Modified Diffusion Coating of the Interior of a Steam Boiler Tube, U:S: Patent 4, 208, 453.
- Basse, J.L., 1992, "Basic Theory of Solid Friction", Metals Handbook, 9<sup>th</sup> Edition, Vol. 8, American Society for Metals, pp. 27-38.
- Bindal, C., 1991, Az Alaşım ve Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeyle Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. Ağustos.

Bowden, F. P. and Tabor, D., 1950, "The Friction and Lubrication of Solids", At the Clarendon Press, Oxford.

Bowden, F.P. and Tabor, D., 1973, "Friction; An Introduction to Tribology", Anchor Press, New York.

Çakır, A., 1990, Metalik Korozyon tikeleri ve Kontrolü, T.M.M.O.B., Makine Mühendisleri Odası, Yayın No: 131, Bileşim Matbaacılık, Ankara.

Çelik, A., Alsarın, A., Karakan, M., 2002, "Plazma İle Termokimyasal Yüzey İşlemleri", Mühendis ve Makine, Sayı:510.

Çelik, A., Karakan, M., Alsarın, A., 2000, " Gaz Karışımlarının İyon Nitrürleme Üzerine Etkisinin Araştırılması", DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 2, Sayı:2, Mayıs.

Çelik, A., 1993, Effect of Ion Nitriding Parameters on Fatigue Strength of AISI 4140 Steel. Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Doctorate Thesis, İzmir.

Çelik, A., Karadeniz, S., 1992, İyon Nitrürleme Yüzey Sertleştirme İşleminin AISI 4140 Çeliği Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. 5. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiriler Kitabı, 541-549, Ankara.

Chang, D. Y., Lee, S. Y., Kang, S. G., 1999, Effect of plasma nitriding on the surface properties of the chromium diffusion coating layer in iron-base alloys. Surface and Coatings Technology, Vol. 116–119, pp. 391–397.

Dubpernell, G., 1972, Electrodeposition of Chromium from Chromic Acid Solutions, Pergamon Press Inc., New York.

Dubpernell, G., 1985, Metals Handbook, American Society for Metals, Ohio,

USA.

Elder, J. E., Thamburaj, R., Patnaik, P. C., 1988, "Optimising Ion Implantation Conditions for Improving Wear, Fatigue and Fretting Fatigue of Ti-6Al-4V", International Materials Reviews, Vol. 33, No. 6, pp. 289-312.

Fujita, H., Arai, T., 1985, Carbide Coatings in Molten Borax Bath, 4th International Congress on Heat Treatments of Materials, Volume II, Berlin, 1109-1124.

Gavgalı, M., Çelik, A., Alsaran, A., Totik, Y., 2002, "İyon Nitrüleme İşleminin AISI 5140 Çeliğinin Burulma Özelliklerine Etkisi Üzerine Bir Çalışma", Mühendis ve Makine Sayı:507, Nisan.

Guffie, R.K., 1989, Hard Chromium Plating, Products Finishing, 74-79

Habig, K.H., 1974, "On the Determination of Wear Rates", Wear, Vol. 28, pp. 135-139.

Heat Treatment", Metals Handbook., 1981, 9<sup>th</sup> Edition, Vol. 4, pp. 27-226, Ohio.

Heat Treatment", 1991, ASM Handbook, ASM International, Materials Information Society, Vol 4, 437-447.

Holberg, K., Matthews, A., 1994, "Coatings Tribology- Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering", Elsevier Science Publications, Amsterdam.

Hutchings, I. M., 1992, "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials", Edward Arnold, London.

- İpek, M., 1996, “Kutu Sementasyon Yöntemiyle Çelik Yüzeylerine TiC Kaplanması”, SA.Ü. Met. Müh., Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Karadeniz, S., 1990, “Plazma Tekniği”, TMMOB, Ankara.
- Kayalı, E.S., 1993, “Sürtünme ve Aşınma”, Workshop on Antiwear Coatings, Tubitak, Gebze.
- Keneş, S., 1995, Plazma İyon Nitrürleme ve Endüstriyel Uygulamaları. Metalurji, 23-26, İstanbul.
- Keneş, S., Hatman, A., 1998, “Plazma İyon Nitrürleme ve Nitrokarbürleme”, 1. Isıl İşlem Sempozyumu, İstanbul .
- Karaoğlu, S., 1998, Plasma Nitriding Behaviour of AISI 5140 Steel, s. 33, İzmir.
- Karaoğlu, S., Karadeniz, S., Karaoğlu, Ç., 2001, “Plazma Nitrürlenmiş Az Alaşımli Bir Çeliğin Aşınma Davranışının İncelenmesi”, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 3, Sayı:3, Ekim.
- Kim, D., Kim M., Nam, K.S., Chang, D., Kwon, S.C., 2003, Duplex coating for improvement of corrosion resistance in chromium deposit. Surface and Coatings Technology, Vol.169–170, pp.650–654.
- Kragelskii, I. V., 1965, “Friction and Wear”, Butter Worths, London.
- Corengia, P., Walther, F., Ybarra, G., Sommadossi, S., Corbari, R., Broitman, E., 2006, “Friction and rolling–sliding wear of DC-pulsed plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel”, Wear, Vol. 260 pp. 479–485
- James, H. ve Lindsay, I, 1997, Decorative and Hard Chromium Plating, Plating and Surface Finishing, 84, 50-51.

- Jurkov, J., Melnichuk, G.A., Stepanova, N.V., 1988 Composition for Depositing Diffusion Carbide Coatings on Iron-Carbon Alloys Articles, U.S: Patent 4,765,840.
- Lim, S. C., Ashby, M.F., and Brutton J. H., 1987, "Wear-Rate Transitions and Their Relationship to Wear Mechanisms", *Acta Metall*, 35, 1343-1348.
- Lipson, C. and Colwell, L.V., 1961, "Handbook of Mechanical Wear", University of Michigan, Michigan.
- Lowenheim, F. A., 1963, *Modern Electroplating*, The Electrochemical Society Inc., New York.
- Menthe, E., Rie K. T., 1999, Plasma nitriding and plasma nitrocarburizing of electroplated hard chromium to increase the wear and the corrosion properties. *Surface and Coatings Technology*, Vol.112, pp.217–220.
- Moore, D. F., 1975, "Principles and Applications of tribology", Pergamon Press., Oxford.
- Öktem, Z., Çapan, L., Çep, H., 1994, "Termoaktif Difüzyon Yöntemiyle Çelik Yüzeylerin Karbür Kaplanması" *Metal Dünyası Dergisi*, Sayı 19.
- Rabinowicz, E., 1965, "Friction and Wear of Materials", John Wiley and Sons, Inc., New London.
- Suh, N.P., 1973, "The Delamination Theory of Wear", *Wear*, Vol. 25, pp. 111-124
- Persson, B.N.J., 1999, "Sliding Friction", *Surface Science Reports*, Vol. 33, pp. 83-119.



- Peterson, M.B., 1976, "Wear Testing Objectives and Approaches, Selection and Use of Wear Tests for Metals", ASTM STP 615, R.G. Bayer Edit., American Society for Testing and Materials, pp. 3-11.
- Pletcher, D., Walsh, F.C., 1990, Industrial Electrochemistry, Second Edition, Chapman-Hall, Co., NewYork .
- Plumb, S., 1985, Toyota Diffusion Process Shows Advantages, Metallurjia, Vol. 52, No 2, 59-62.
- Podgornik, B., Vizintin, J., Vanstrat, O., Larsson, M., Hogmark, S., Ronkainen, H., Holmberg, K., 2001, "Tribological Properties Of Plasma Nitrided and Hard Coated AISI 4140 Steel", Wear.
- Porter, D. A. and Easlerling, K. E., 1986, "Phase Transformations in Metals and Alloys", Second Editon, pp. 417-422, London.
- Tohru, A., 1989, "Development of Carbide and Nitride Coatings By Thermoreactive Diffusion Surface Modification Technologies III Proceeding of The Third International Conference Held in Neuchate", Switzerland, August 28-September 1.
- Ulman's Encyclopedia of Industrial Chemistry", 1986, Vol. A5, pp. 61-77, Germany.
- Ulukan, L., 1993, "Makine Elemanları III", Ders Notu, İstanbul.
- ÜSTEL, F., 1998, "Kutu Sementasyon Tekniği ile Yüksek Hız Çeliğinin Yüzeyine  $TiC_x N_{1-x}$  Türü Sert Tabakaların Üretilebilirliğinin Araştırılması", Doktora Tezi, SA.Ü. Fen Bil. Ens., Sakarya.
- Wang, L., Kim, D. S., Nam, K. S., Kim, M., Kwon, S. C., 2005, Microstructure of

electroplated hard chromium coatings after plasma nitrocarburizing. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 190, pp. 151–154.

Wei, C. Y., Chen, F. S., 2005, Characterization on multi-layer fabricated by TRD and plasma nitriding. *Materials Chemistry and Physics*, Oct., Vol.90, pp.178–184.

Weiner, R., Walmsley, A., 1980, *Chromium Plating*, Finishing Publications Ltd. Teddington.

## **TEŞEKKÜR**

Her Őeyden önce, bu aŐamaya gelmemde ve yetiŐmemde emeklerini hiÇbir Şekilde ödeyemeyeceğim aileme ve kıymetli danıŐmanım Sayın Yrd. DoÇ. Dr. Şükrü TAKTAK' a sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Tez ھاalıŐmamda buldukları katkıdan dolayı, ArŐ. Grv. Yusuf KAYALI'ya, Sn. Şükrü ÜLKER'e, Yüksel YILMAZ'a, tüm bölüm hocalarıma ve beni ھاalıŐmamda destekleyen sevgili eŐim Yakube GÜNEŞ'e teŐekkürlerimi bir borĐ bilirim.

Ayrıca bu tezi destekleyen TÜBİTAK'a teŐekkürlerimi sunarım.

## **ÖZGEÇMİŞ**

06 Nisan 1980 tarihinde Antalya'nın Korkuteli ilçesinde doğan İbrahim GÜNEŞ, ilkokulunu, Yeşilyayla İlkokulu'nda, Ortaokulu ve Liseyi Korkuteli'nde tamamladı. 2000 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği Bölümünü kazandı. 2004 yılında bu programdan mezun oldu. 2004 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı ve 2006 yılında Yüksek Lisansı'nı tamamladı.