

PULS NİTRÜRLEME CİHAZININ TASARIMI
VE AISI 52100 ÇELİĞİNİN PLAZMA NİTRÜLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şükrü ÜLKER

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

MAKİNA EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
Ağustos 2006

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

T.C.
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PULS PLAZMA NİTRÜLEME CİHAZININ TASARIMI VE
AISI 52100 ÇELİĞİNİN PLAZMA NİTRÜLENMESİ

Şükrü ÜLKER

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

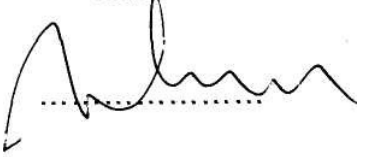
AFYONKARAHİSAR
2006

TEZ SINAV SONUÇ FORMU

Şükrü ÜLKER'in yüksek lisans tezi olarak hazırladığı " **Puls Plazma Nitrüleme Cihazının Tasarımı Ve AISI 52100 Çeliğinin Plazma Nitrülenmesi**" başlıklı bu çalışma, lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

08/08/2006

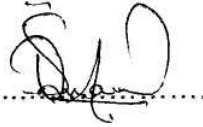
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN
(Başkan)

İMZA


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

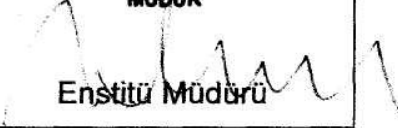


Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Ömer SOYKASAP



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...15.08.2006.....Gün
ve .2006/16-1 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN
MÜDÜR


Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PULS PLAZMA NİTRÜRLEME CİHAZININ TASARIMI VE AISI 52100 ÇELİĞİNİN PLAZMA NİTRÜLENMESİ

Şükrü ÜLKER

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

Makine parçalarının iç yapı, aşınma direnci, korozyon direnci ve yorulma mukavemeti gibi özelliklerini iyileştirmek için çeşitli yüzey sertleştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Plazma nitrürleme ile elde edilen tabakaların kontrol edilebilmesi ve diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre avantajının çok olmasından dolayı plazma nitrürleme işlemi endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Pulsu plazma nitrürlemenin klasik plazma nitrürlemeye göre birçok avantajı vardır. Pulsu plazma nitrürleme daha kısa işlem süresi, artan difüzyon ve karmaşık parçaların kolay nitrürlenebilmesi gibi özelliklerinden dolayı klasik nitrürlemeye göre bazı avantajlara sahiptir.

Bu çalışma da puls plazma nitrürleme cihazının tasarımı yapılmıştır. Tasarımda 2.5 kW gücünde DC güç ünitesi, paslanmaz çelik hazne, vakum pompası ve çeşitli flanş ve contalar kullanılmıştır. Ayrıca, AISI 52100 yatak çeliği, % 50 H₂ ve % 50 N₂ gaz karışımında; 500 °C sıcaklıkta, 4 saat süreyle 0-20 kHz frekans aralığında, 490-650 voltta darbeli (pulsu) plazma nitrürlenmiştir. Numuneler alkolle temizlendikten

sonra plazma haznesine yerleştirilmiş ve haznenin havası $2,5 \times 10^{-2}$ mbar basınca boşaltılmıştır. Deney süresince sıcaklık numuneye temas halinde olan bir termokupl vasıtasıyla ölçülmüştür ve kesitten kesilen numuneler metalografik işlemlerden geçirilerek incelenmiştir. X-ışınları difraksiyonu tabakanın Fe_2N ve Fe_3N fazlarında oluştuğunu göstermiştir. Beyaz tabakanın sertliği frekansla değişmemektedir. Sürtünme katsayısı 0.22-0.47 arasında değişmektedir. Plazma esnasında uygulanan frekans aşınma hızında önemli bir etkidir.

2006, 68 sayfa

Anahtar Kelimeler: Pulsu plazma nitrürleme, tasarım, aşınma, sertlik, difüzyon

ABSTRACT

Thesis

DESIGN OF PULSED PLASMA NITRIDING DEVICE AND PLASMA NITRIDING OF AISI 52100 STEEL

Şükrü ÜLKER

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Education

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Şükrü TAKTAK

There are several metal surface treatment methods to improve the wear, corrosion hardness, fatigue and the surface properties of machine parts. The plasma nitriding process has become a considerable industrial interest due to the most advantages beneficial surface property enhancement. Pulsed plasma nitriding process has some advantages, such as shorter process times, increasing diffusion and nitriding easily for complicated geometries, compared with the traditional plasma nitriding processes.

In this study, pulsed plasma nitriding device was designed. In design, DC power supply with 2.5 kW, stainless steel chamber, vacuum pump and various flanges and gaskets were used. In addition, AISI 52100 bearing steel was pulsed-plasma nitrided at gas mixture of 50 % H₂ and 50 % N₂, at 500 °C for 4 h. The dc plasma was operated with a potential difference of 490–650 V in the frequency range 0-20 kHz. Samples were cleaned in alcohol and placed in plasma nitriding chamber. The system was

evacuated to $2,5 \times 10^{-2}$ mbar. 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 for standard metallographic techniques. The X-ray diffraction indicates that the white layer consists of phases of Fe_2N and Fe_3N . Microhardness of the white layer does not vary with frequency. The friction coefficient of the samples varies between 0.22-0.47 values. Frequency, applied during plasma nitriding, is an important effect on wear rate.

2006, 68 pages

Key Words: Pulsed plasma nitriding, design, wear, hardness, diffusion

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	i
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1 Plazma	4
2.1.1 Plazmanın Tanımı ve Elemanları	4
2.1.2 Elektrik Boşalması Mekanizması	7
2.1.3 Plazmanın Özellikleri	11
3. LİTERATÜR BİLGİLERİ	13
4. PLAZMA İLE NİTRÜRASYON	20
4.1 Ekipman ve Proses Dataları	20
4.2 Nitrürasyon Mekanizması	20
4.3 İyon Nitrürasyonun Metalurjik Yönden Avantajları	23
5. PLAZMA İLE TERMOKİMYASAL YÜZEY İŞLEMLERİ	25
5.1 Plazma İle Karbürleme	26
5.2 Plazma ile Nitrokarbürleme	27
5.3 Plazma ile Borlama	28
5.4 Plazma ile Nitrüleme	29
6. AŞINMA VE AŞINMA HASARLARI	32
6.1 Sürtünme.....	32
6.2 Aşınma	32
6.2.1 Aşınmayı Etkileyen Faktörler	35
6.2.2 Aşınma Mekanizmaları	36
6.2.2.1 Adhezif aşınma (Yapışma aşınması).....	36
6.2.2.2 Abrazif aşınma	37
6.2.2.3 Yorulma ve delaminasyon aşınması.....	39

6.2.2.4 Oksidasyon aşınması	40
7. PLAZMA NİTRÜRASYON DENEY DÜZENİĞİNİN KURULMASI.....	41
7.1 Vakum Pompası	41
7.2 Vakum Kabı	42
7.2.1 Vakum Hattı Üzerinde Bulunan Flanş Bağlantıları	43
7.2.1.1 CF bağlantılar	43
7.2.1.2 KF bağlantılar	44
7.2.1.3 LF bağlantılar	45
7.2.2 Gaz Girişleri	45
7.2.3 Basınç Ölçer	46
7.2.4 Sıcaklık Ölçer	46
7.2.5 Elektrik Bağlantıları	47
7.3 Güç Kaynağı.....	48
7.4 Kullanılan Gazlar	49
7.5 Filtre	50
8. MATERYAL ve METOT	51
8.3 Metalografi Çalışmaları.....	52
8.4 Mikrosertlik Ölçümleri ve XRD Analizi	52
8.5 Aşınma Deneyleri	53
9. BULGULAR.....	55
10. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	64
10.1 Sonuçlar	64
10.2 Öneriler.....	64
KAYNAKLAR	66
TEŞEKKÜR	
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Magnezyum atom modeli	5
Şekil 2.2 Bir atoma ait elektronların formal olarak enerji seviyeleri şeması	7
Şekil 2.3 Elektrik arkı boşalmasının şematik akım – gerilim ilişkisi	8
Şekil 2.4 Elektrik arkı mekanizmasının şematik gösterilişi	9
Şekil 4.1 Glow deşarj bölgeleri ve gerilim düşümü.....	21
Şekil 4.2 İyon nitrürasyon işlemi mekanizması	22
Şekil 5.1 Nitrokarbürleşmiş Malzemede (Saf demir) Nitrokarbürleşmiş Tabakanın Optik Mikroskop Görünüşü.....	27
Şekil 5.2 Borlanmış Malzemede (AISI 4140) Borlu Tabakanın Optik Mikroskop Görünüşü.....	29
Şekil 5.3 Nitrokarbürleşmiş Malzemede (AISI 5140) Nitrokarbürleşmiş Görünüşü.....	31
Şekil 6.1 Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi.....	34
Şekil 6.2 Adheziv aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi	37
Şekil 7.1 Plazma nitrürasyon cihazının şematik gösterimi	41
Şekil 7.2 CF bağlantı düzeneği	44
Şekil 7.3 KF bağlantı düzeneği	44
Şekil 7.4 LF bağlantı düzeneği.....	45
Şekil 7.5 Gaz giriş bağlantıları	46
Şekil 7.6 Termokupl ve bağlantı flanşı	47
Şekil 7.7 Elektrik bağlantı flanşı	47
Şekil 7.8 Güç kaynağının şematik görünümü.....	48
Şekil 7.9 Vana dönüş sayısının akış ile bağlantısı	50
Şekil 8.1 Bilye disk aşınma cihazının şematik gösterimi	53
Şekil 8.2 Sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi	54
Şekil 9.1 Plazma nitrokarbürleşmiş AISI 52100 çeliğinin mikroyapı fotoğrafları a) 5 kHz b) 10 kHz c) 20 kHz	55
Şekil 9.2 5kHz frekansında nitrokarbürleşmiş malzemenin X-Ray difraksiyon analizi.....	57

Şekil 9.3 Mikrosertlik deneyinin yapılışı	57
Şekil 9.4 Mikrosertlik grafiği a) 5 kHz b) 10 kHz c) 20 kHz.....	58
Şekil 9.5 AISI 52100 çeliğinin aşınma deneylerinde oluşan izlerin optik mikroyapı görüntüleri a) Nitrülenmemiş 5N yük b) 5 kHz 5N yük c) 10 kHz 5N yük d) 20 kHz 5N yük	61
Şekil 9.6 AISI 52100 çeliğinin aşınma deneylerinde kullanılan bilye üzerinde oluşan izlerin mikroyapı görüntüleri a) 20 kHz 5N b)20 kHz 20N.....	62
Şekil 9.7 Sürtünme katsayısının işlem parametrelerine göre değişimi.....	63
Şekil 9.8 Aşınma hızı, işlem parametreleri ilişkisi.....	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Çalışma faktörü parametreleri	18
Çizelge 5.1 Plazma Destekli Yüzey İşlemlerine Bakış.	25
Çizelge 8.1 Deney numunesinin kimyasal kompozisyonu.....	51
Çizelge 8.2 Plazma nitrürasyon işleminde kullanılan deney parametreleri	52
Çizelge 9.1 Plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak numunelerin yüzeyinde oluşan sertlik dağılımları	58
Çizelge 9.2 Aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin aşınma öncesi pürüzlülük değerleri.....	60
Çizelge 9.3 Bilye üzerinde oluşan aşınma izlerinin çapı	62

SİMGELER DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
E_1, E_2, E_3	Enerji
E_d	Disosyasyon enerjisi,
E_i	İyonizasyon enerjisi,
F_s	Sürtünme kuvveti,
μ_s ,	Sürtünme katsayısı,
N	Normal kuvvet,
μ_k	Kinetik sürtünme katsayısı sürtünme faktörü,
PWM	Darbe (Puls) genişlik modülasyonu

1. GİRİŞ

Plazma nitrürleme işlemi çeliklerin korozyona ve aşınmaya karşı davranışlarını artırmak için kullanılan en etkili metotlardan birisidir.

Plazma yada iyon nitrürleme adı verilen yüzey sertleştirme yönteminde, malzemeye difüze olmak için metal yüzeyine gönderilen elemental azotun eldesinde glow deşarj tekniği kullanılır. Vakum ortamında, plazmayı oluşturmak için yüksek gerilimli elektrik enerjisi kullanılır ve azot iyonları iş parçasına nüfuz etmesi için hızlandırılır. Bu iyon bombardımanı iş parçasını ısıtır, yüzeyi temizler ve aktif azot sağlar. Kullanılan gaz karışımı ağırlıklı olarak H_2 ve N_2 'nin çeşitli oranlardaki karışımı olup bazı durumlarda argon gazı da ilave edilebilir.

Plazma nitrürleme 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).

Alsaran ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada, sıcaklık zaman ve gaz karışım oranı gibi parametrelerin değişik kombinasyonlarıyla AISI 5140 düşük alaşımlı çeliği iyon nitrürlemişlerdir (Alsaran et al 2002 a). Numunelerin yüzey sertliği, yorulma mukavemeti, beyaz ve difüzyon tabaka kalınlığı ölçülerek, Taguchi yöntemiyle optimum çalışma şartlarını belirlemişlerdir. Elde edilen bazı sonuçlar şöyledir:

- Yorulma mukavemetinde en etkili parametre işlem zamanıdır. 12 saatlik işlem süresinde, 550 °C sıcaklıkta ve 0,33 N_2/H_2 karışımında en iyi yorulma mukavemeti elde edilmiştir.

- Yüzey sertliğinde en etkili parametre işlem sıcaklığıdır. Maksimum yüzey sertliği 4 saatlik işlem süresinde, 450 °C sıcaklıkta ve 0,33 N₂/H₂ karışımında elde edilmiştir. 450 °C sıcaklıktan sonra yüzey sertliği azalmıştır (Alsaran et al 2002 a,b).
- Beyaz tabaka kalınlığında en etkili parametre gaz karışım oranıdır. Gaz karışım oranı arttıkça beyaz tabaka kalınlığı artmıştır. Minimum beyaz tabaka kalınlığı 1 saatlik işlem süresinde, 400 °C sıcaklıkta ve 0,05 N₂/H₂ karışımında elde edilmiştir.
- Difüzyon tabakası kalınlığı için en etkili parametre işlem süresidir. Maksimum difüzyon tabakası kalınlığı 12 saatlik işlem süresinde, 550°C sıcaklıkta ve 0,05 N₂/H₂ karışımında elde edilmiştir (Alsaran et al 2002 a).

Pulslu plazmanın yüzey işleme için pek çok avantajı vardır. En başta gelen işlem süresinin kısa olmasıdır. Buna paralel olarak enerji tüketiminin az olması, gaz tüketiminin az olması, düşük proses fiyatının olması, çevre kirliliğinin az olması gibi avantajları vardır (eltro.co.uk).

Corengia ve diğerleri pulslu plazma nitrülenmiş AISI 410 martenzitik paslanmaz çeliğinin aşınma ve korozyon davranışını incelemişlerdir. Pulslu DC glow deşarj altında %25 N₂-%75 H₂ gaz karışımında, 623, 673 ve 723 K sıcaklıklarında iyon nitrülenmişlerdir (Corengia et al 2004). En yüksek sertlik değerini 673 K de elde etmişlerdir. 673 ve 723 K de sertleştirilen numuneler işlenmemiş numunelerle karşılaştırıldığından farklı polarizasyon eğrileri elde etmişlerdir. 623 K de nitrülen numunelerde düşük korozyon akımı göstermiştir ve 673 ve 723 K sıcaklıkta 20 saat nitrülen numuneler düşük korozyon direnci göstermiştir.

Menthe ve diğerleri plazma nitrülenmiş östenitik paslanmaz çeliğinin mekanik özelliklerini geliştirmek için çalışmalar yapmışlardır. AISI 304L paslanmaz çeliğini 375-475 °C sıcaklık aralığında, farklı işlem zamanı gaz

karışımlarında pulslu plazma nitrürlemişlerdir (Menthe et al 2000). Pulslu plazma nitrürlemeyle, işlenmemiş numunenin mikrosertliği karşılaştırıldığında, işlem görmemiş numuneden yaklaşık 5 kat daha büyük sertlik değeri elde etmişlerdir. Plazma nitrürendikten sonraki aşınması işlemsiz numuneyle karşılaştırıldığında önemli ölçüde azalma olduğunu görmüşlerdir.

Corengia ve diğerleri AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğinin yüzey özelliklerinde pulslu plazma nitrürleme zamanının etkisini incelemişlerdir. 1 ile 28 saat arasındaki işlem zamanında, pulslu DC glow deşarj altında, %25 N₂-%75 H₂ gaz karışımında nitrürlemişlerdir (Corengia et al 2005). İyon nitrürleme zamanının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını, artan işlem süresiyle mono fazdan (γ -Fe₄N) dual (ϵ -Fe₂₋₃N+ γ -Fe₄N) faza geçiş olduğunu görmüşlerdir. 2 saatlik nitrürlemede yüzey sertliğinin maksimum olduğunu sonra daha kaba nitrür çökeltisi oluşumundan dolayı yüzey sertliğinin düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Bu çalışmada AISI 52100 yatak çeliği 500 °C sıcaklıkta, 4 saat işlem süresinde, %50 N₂-%50 H₂ karışımında, %80 duty cycle 'da (çalışma oranı) 10 mbar basınç altında 5, 10 ve 20 kHz frekans aralığında pulslu plazma nitrürlenmiştir. Nitrürlenen numunelerin mikroyapı, sertlik ve aşınma özellikleri üzerinde frekansın etkisi incelenmiştir. Aşınma deneyleri oda sıcaklığında, bilye disk aşınma cihazında, 5 ve 20 N' luk yüklerde, 1000 m kayma mesafesinde yapılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Plazma

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.

Katı + E_1 = Sıvı (Ergitme)

Sıvı + E_2 = Gaz (Buharlaştırma)

Gaz + E_3 = Plazma (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.

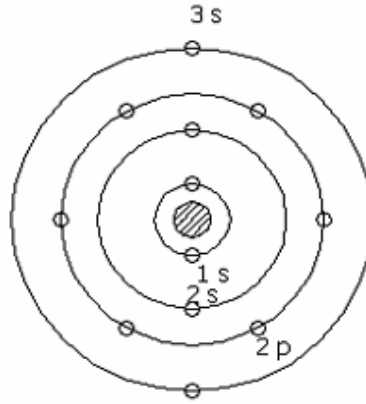
2.1.1 Plazmanın Tanımı ve Elemanları

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.

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).

Şekil 2.1 'de görüldüğü gibi bir atom, ortada (+) yüklü bir çekirdek ve bunun çevresinde belirli yörüngelerde bulunan (-) yükleri (elektronları) içerir

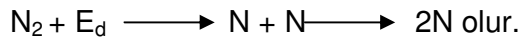


Şekil 2.1 Magnezyum atom modeli (Karadeniz 1990)

Plazma karışımını meydana getiren elemanlar şunlardır:

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,

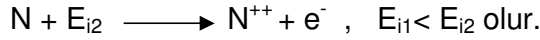
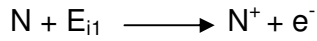


İyon: İhtiva ettiği (+) yük sayısı, (-) yük sayısından büyük olan atomlardır. Nötral bir atoma, o elemente özel bir iyonizasyon enerjisinden (E_i) daha büyük bir enerji verildiği zaman, bu atom en az bir elektronu (negatif yükünü) kaybeder ve iyon haline geçer, yani iyonize olur. Bu olaya

iyonizasyon denir. Tabiatta ve teknikte iyonizasyon çeşitli yollarla gerçekleşir. Bunlardan önemlileri

1. Termik iyonizasyon,
2. Işın iyonizasyonu,
3. Elektrik boşalması ile iyonizasyon,
4. Çarpışma iyonizasyonudur.

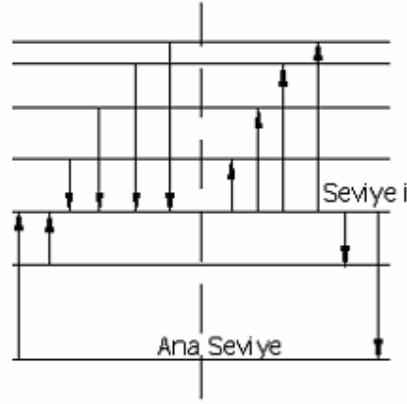
Atom bir elektron kaybederse bir, n elektron kaybederse n katlı iyonizasyon ortaya çıkar. Bir atomdan ilk elektronu çıkarmak için gerekli enerji, daha sonraki çıkarılacak elektronlar için gerekli enerjiden daha küçüktür. Yine azot için



Elektron: Atomun negatif yükü olup, değeri $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ kulomb'dur.

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 2.2'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.



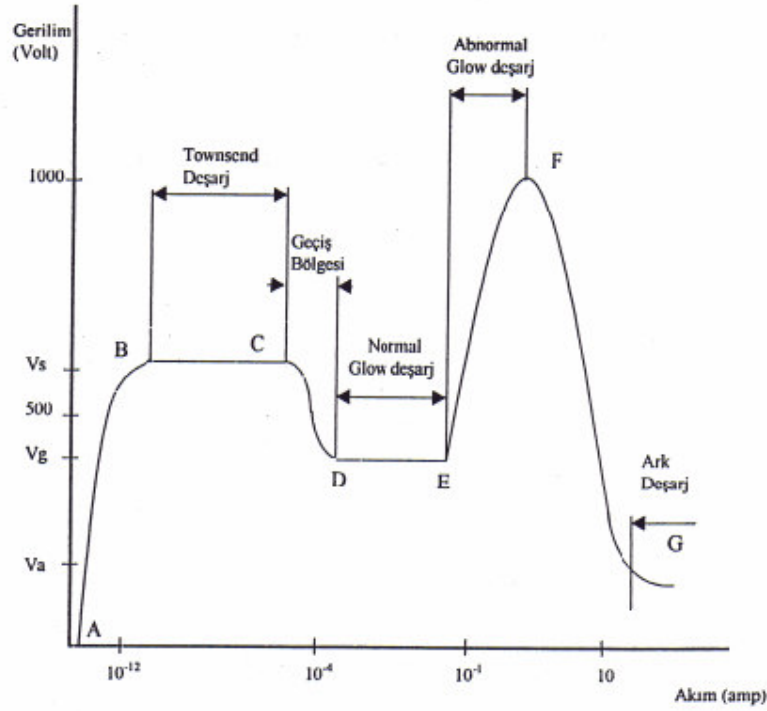
Şekil 2.2 Bir atoma ait elektronların formal olarak enerji seviyeleri şeması (Karadeniz 1990)

Uyarma: Enerji alarak bir üst seviyeye geçiştir.

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

2.1.2 Elektrik Boşalması Mekanizması

Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa, belirli şartlar gerçekleştiğinde, 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 2.3' de tüm gaz boşalma bölgeleri ve elektrik arki boşalma karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 2.3 Elektrik arkı boşalmasının şematik akım – gerilim ilişkisi

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 iletken anot, eksi kutbunun bağlandığı iletken katot adı verilir. Anot ile katot arasında tatbik edilen elektrik gerilimi sonucu anot ile katot arasında, değeri

$$E = \frac{U}{l} \quad (\text{volt / cm}) \quad (2.1)$$

ile verilen bir elektrik akımı oluşur.

U = Anot – Katot arasında uygulanan gerilim

l = Anot – Katot arası uzaklık

Bu elektrik alanı ark içerisindeki yüklü parçacıklara değeri

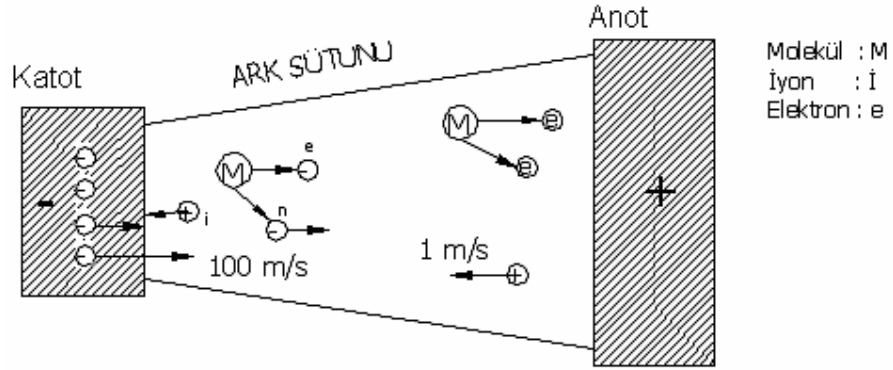
$$F = Q e \quad (2.2)$$

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

$$F_{elek} = -q e \quad (2.3)$$

$$F_{iyon} = +q E \quad (2.4)$$

Bunun sonucu olarak Şekil 2.4' te görüldüğü gibi elektronlar (-) kutuptan (+) kutba doğru, iyonlar (+) kutuptan (-) kutba doğru hareket ederler.



Şekil 2.4 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.

- Katı malzemeye bir elektrik arkı tatbik ederek,

- b) Katı malzemeye ısı enerjisi vererek,
- c) Katı malzemeye düşük kütlelerin bombardımanı ile,
- d) Işın enerjisi ile.

Elektrik arkında, ark mekanizmasını başlatan ilk nüveyi oluşturan akım taşıyıcı elektronlar, anot ile katot arasına 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 verip, 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, kütleyle 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.

- a) Gaz atomlarının çarpışma yoluyla iyonizasyonu
- b) Pozitif iyonların katoda gelip çarptıklarında (bombardıman) katottan 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,

$$\lambda |e| > U_i \quad (2.5)$$

dir. Burada

λ : ortalama serbest yol uzunluğu, bir parçacığın (atom, iyon, elektron vs.) bir gaz ortamı içerisinde hiçbir kütleyle 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, alana kadar bu gerilimi (yolu) kat etmesi gerekir (Karadeniz 1990).

2.1.3 Plazmanın Özellikleri

- a) Plazma dış ortama karşı elektrik olarak nötrdür. Yani plazma içerisindeki pozitif yüklerin (iyonların yükleri) sayısı, negatif yüklerin (elektronlar) sayısına eşittir.
- b) 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.
- c) Plazma iyi bir elektrik ve ısı iletkenidir. Plazma içerisindeki parçacıklar bir enerji taşıyıcısıdır. Dolayısıyla elektrik ve ısı enerjisini de iletirler (taşırılar). Plazma içerisindeki hızlarının yüksek

oluşu nedeniyle özellikle elektronlar elektrik ve ısı iletiminde esas rolü oynarlar.

- d) Plazma rotasyonsimetrik bir yapıya sahiptir. Buradaki silindirik simetrisini sağlayan katottan çıkıp, anoda kadar kendini idame ettiren plazma akışıdır.
- e) 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.
- f) Plazmaya elektrik ve manyetik alanla tesir edilebilir.
- g) Plazmayı magnetik ve termik olarak sıkıştırmak, dolayısıyla enerji yoğunluğunu ve sıcaklığını sınırsız bir şekilde yükseltmek mümkündür.

3. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Karaoğlu ve diğerleri, plazma nitrülenmiş az alaşımlı bir çeliğin aşınma davranışını incelemişlerdir. Plazma nitrürasyon proses parametrelerine bağlı olarak AISI 5140 çeliğinin aşınma dayanımında önemli artışlar elde etmişlerdir. En yüksek aşınma direnci, yüzey sertliği en yüksek olan numunelerde görülmüştür. Yüksek sıcaklıkta işlem gören numunelerde oluşan kalın beyaz tabaka oldukça gevrek ve aşınmanın ilk safhasında bu tabakanın kırılmasıyla ortaya çıkan parçacıklar aşınma mekanizmasını adhezif aşınmadan abrazif aşınmaya çevirerek malzemenin aşınma hızını yükseltir. Böylece, aşınma dayanımı, artan beyaz tabaka kalınlığı ile azalır ve aşırı kalın beyaz tabaka plazma nitrürasyonunda bir hata olarak kabul edilebilir. Bazı numunelerin nispeten düşük aşınma direnci göstermesinin sebepleri; kalın beyaz 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, beyaz tabakanın aşırı büyümesini önleyecek şekilde seçilmelidir sonucuna varmışlardır (Karaoğlu vd. 2001).

Çelik ve diğerleri gaz karışımlarının iyon nitrürleme üzerine etkisinin araştırılması isimli bir çalışma yapmışlardır (Çelik vd. 2000). Bu çalışmada da ikili ve üçlü gaz karışımları oluşturularak işlem için en iyi gaz karışımı araştırmışlardır. İyon nitrürasyon işleminden sonra, numuneler incelendiğinde iki farklı bölgenin oluştuğu görmüşlerdir. En dış kısımda demir nitrürlerden $Fe_{2-3}N$ (ϵ), Fe_4N (γ) oluşmuş çok ince bir tabaka meydana geldiğini saptamışlardır. Gaz karışımlarında hidrojen miktarındaki artış ile birlikte malzemenin yüzey sertliği ve difüzyon derinliği artarken, beyaz tabaka kalınlığında azalma olduğunu görmüşlerdir. Azot-argon gaz karışım oranları incelediklerinde, argonun sertlik artışına sınırlı bir katkısı olduğu ve bu karışımda beyaz tabaka kalınlığında da düşüş olduğu görmüşlerdir. 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 varmışlardır (Çelik vd. 2000).

Alsaran ve diğerleri iyon nitrürlenmiş ve TiN kaplanmış AISI 5140 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü adhezyon, sertlik, yapı ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir (Alsaran vd 2005). Alt maddelere kaplama uygulanmasıyla, plazma nitrülemeden sonra $\gamma - Fe_4N$ büyük miktarda içeren malzemelerle daha iyi tribolojik özellikler elde etmişlerdir (Alsaran vd. 2005).

Podgornik ve diğerleri 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 nitrüleme bölgesinin etkisini incelemişlerdir. Kaplanmamış ve ön sertleştirilmiş numunelerle sert kaplı plazma nitrürlenmiş numuneyi karşılaştırmışlardır, mekanik ve aşınma özelliklerini geliştirmişlerdir.

Fancey ve diğerleri gaz atmosferleri olarak azot + argon azot + neon karışımlarının değişik oranlardaki kompozisyonlarının işlem üzerine etkileri hakkında çalışmalar yapmışlardır (Çelik vd. 2000). Düşük basınçlarda anot-katot arasına uygulanan gerilim sonrası oluşan glow deşarj'da kullanılan gazın cinsine göre azot, hidrojen, argon gazlarının iyonları, nötral molekülleri, elektronları yer almaktadır. Özellikle N^+ iyonları işlemin ana elemanıdır. Çünkü yüzeye azot emdirmek amaçlanmaktadır. Ancak tek başına azot gazı plazmasıyla yapılan nitrüleme işleminde gerekli iyileşmelerin sağlanmadığı görmüşlerdir. Bundan dolayı azot, hidrojen,

argon gazlarının birlikte oluşturdukları karışımlardan faydalanma yoluna gitmişlerdir (Çelik vd. 2000).

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

Pulsu sistemler, işlem süresini azaltmakta, boşalım (deşarij) süresince pozitif iyonlarca numunenin sağılımlarını sınırlamakta, elektrik ark oluşmasını önlemekte, elektrik enerjisinden tasarruf yapmaktadır (Yong M. Kim et al 2002).

Pulsu sistemin avantajı ilave düğmelerle proses optimizasyonu yapılır. Plazma parametreleri değiştirilerek nitelikli farklı kaplamalar ve yüzeyler elde edilir.

Pulsu sistemlerin dezavantajı daha yüksek modülatör, daha yüksek voltaj izolasyonu gereksinimi, kabloların daha yüksek akım kapasiteli, elektromanyetik karışmaya karşı daha iyi koruyuculuk, puls manyetik alanları, burgaç akımı (Foucoult akımı), ani endüklenen gerilim yükselmeleri ve parçaların ve elektrotların daha iyi soğutulması sebebiyle daha yüksek fiyatlara mal olur (Anders 2004).

Pulsu plazmanın puls süresi (pulse duration and duyt cycle) ve çalışma oranının kullanımıyla pek çok avantajı vardır. En düşük plazma gücünün kullanımı aşırı ısınmayı önler, düzgün sıcaklık dağılımına imkan verir. Ayrıca pulsu plazmanın kullanımıyla birçok çelik nitrülenebilir (Podgornik, Vizintin 2001)

Podgornik ve Vizintin plazma ve pulslu plazma nitrürlenmiş 42CrMo4 dişlilerinin aşınma direncini incelemişlerdir. Aşınma deneylerinde plazma ve pulslu plazma arasında farklılık olmadığını, yüzey sertliği yönünden pulslu plazmanın daha geniş alana yayıldığını görmüşlerdir. Mikrosertlik dağılımında yüzeyden uzaklık arttıka pulslu ve plazma nitrüleme sonuçları hemen hemen aynı çıktığını, yüzeyden uzaklık azaldıkça mikrosertlik değerinin pulslu plazmada yüksek olduğunu tespit etmişlerdir (Podgornik, Vizintin 2001).

Podgornik ve diğerleri plazma ve pulslu plazma nitrürlenmiş AISI 4140 eliğinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir (Podgornik et al 1998). Plazma ve pulslu plazma nitrürlenmiş elik yüzeyler sertleştirilmiş elik yüzeylerinin aşınma özelliklerinin karşılaştırmasını yapmışlar ve ayrıca kuru sürtünme koşulları altında aşınma üzerinde beyaz tabakanın etkisini belirlemişlerdir. Sonuç olarak plazma ve pulslu plazma karşılaştırıldığında çeliğin mikro yapısında neredeyse farklılık olmadığını, yüzey pürüzlülüğü ve mikro sertlik değerlerinin aynı olduğunu bulmuşlardır. Nitrüleme atmosferinde azot içeriğinin daha yüksek olduğu pulslu plazma nitr lemede yüzey mikrosertliği daha yüksek olmuştur. Pulslu plazma nitrüleme konvensiyonel plazma nitrüleme ile karşılaştırıldığında daha kısa sürede pulslu plazma nitrüleme ile aynı nitrüleme derinliğini elde etmişlerdir. Normal sertleştirilmiş AISI 4140 eliği karşılaştırıldığında, plazma ve pulslu plazma nitrüleme ile zayıf azot atmosferinde incelenen çeliğin tribolojik özelliklerini geliştirmişlerdir. Yüzey işleminin uygulamada sürtünme katsayısına etkisinin olmadığını fakat diğer taraftan plazma ve pulslu plazma nitrüleme ile sertleştirilmiş elik ile karşılaştırıldığında zayıf atmosfer azotunda AISI 4140 eliğinin aşınması azaltıldığı sonucuna varmışlardır. Yüzeyde sert ve kırılğan beyaz tabakanın olması, kaymanın ilk aşamasında sert abrazif parça oluşumu ve beyaz tabakanın kırılmasından dolayı elik yüzeyin aşınmasına neden olmuştur. Dolayısıyla

çelik parçaların nitrülenmesinde sert ve kırılğan bir beyaz tabakanın oluşmasından kaçınılması gerektiğini belirtmişlerdir (Podgornik et al 1998).

Jeong ve Kim plazma nitrülenmiş 316L paslanmaz çeliklerin yüzey karakteristikleri ve nitrür tabakasında sıcaklık ve puls frekansının etkisi isimli bir çalışma yapmışlardır. %80 N₂ %20 H₂ gazı ortamında 50, 1000, 2000 ve 5000 Hz frekans aralığında 400 ve 500 °C sıcaklık altında plazma nitrülemişlerdir. Puls frekansının artmasıyla tabaka kalınlığı da artmıştır. 400 °C' de 5-11 µm ve 500 °C' de 60-70 µm civarında tabaka kalınlığını ölçmüşlerdir. Sıcaklık ve frekansın artmasıyla yüzey pürüzlülük değeri olan R_a artmıştır. 400 °C'de S fazı ve 500 °C' de CrN ve Fe₄N fazı oluşmuştur. Bununla birlikte puls frekansının değişiminin, nitrür tabakalarının kompozisyonunda etkisi olmamıştır (Jeong and Ho-Kim 2001).

Şakar düşük alaşımlı AISI 8620 çeliğini 450-600 °C sıcaklık aralığında 10 mbar basınçta, ½, 8 saat aralığında; %70 H₂ - %30 N₂ gaz karışımını içeren ortamda iyon nitrülemiş ve optimum difüzyon derinliği ve yüzey sertliğini bulmuştur. Maksimum yüzey sertliğini 500 °C sıcaklıkta 4 saatlik deneylerde yaklaşık 490 HV, maksimum difüzyon derinliği 600 °C sıcaklıkta 8 saatlik deneylerde 420 µ olarak bulmuştur (Şakar 1998).

Dirik 8620 çeliğini 500 °C 'de 1 - 4 -12 saat ve 550 °C 'de 4 saat %80 H₂ - %20 N₂ gazı ile plazma nitrülemişdir. AISI 8620 çeliğine uygulanabilecek en uygun yüzey sertliğinin 500 °C' de 4 saat nitrülemeyle 991 HV sertliğine ulaştığını saptamıştır. Sıcaklık artışıyla yüzey sertliğinin düştüğünü saptamıştır (Dirik 1998).

Arslan AISI 4140 çeliğini 500 °C sıcaklıkta 6-12-24 saatlik sürelerle NH₃ gazı ile nitrüleyip yorulma dayanımını saptamıştır. Artan iyon nitrüleme zamanı ile yorulma dayanımının arttığını bulmuştur. 24 saatlik plazma nitrülenmiş numunelerde yorulma dayanımını yaklaşık 501 MPa olarak bulmuştur (Arslan 2001).

Wierzchon ve diğeri Armco demiri ve 33H3MF çeliğini 10 ve 60 kHz frekanslar arasında pulslu plazma nitrürlemişler ve bu çeliklerde oluşan nitrür tabakalarını incelemişlerdir. Mikrosertlik profilleri, tabakaların aşınma ve korozyon direncini belirlemişlerdir. Parçanın impuls (darbe) ısıtmada puls duty (çalışma) faktörünün çok önemli bir etken olduğunu belirtmişlerdir. ($W=T_a/T$, T_a = puls süresi(pulse duration) T = puls tekrarlılık süresi (pulse repetition)) Bu faktörü 0.05 ile 0,2 arasında kullanmışlardır. Gaz karışımı 1/1 oranında 2 saat süreyle 520 °C 'de 4 hPa basınçta ve 10, 25, 40, 60 kHz frekanslarda ek ısıtıcı kullanmadan yapmışlardır. Sonuç olarak pulslu plazmada frekansın artmasıyla aşınma direnci artmıştır. En iyi korozyon direnci 25 kHz de elde edilmiştir. Bütün durumlarda çeliğin korozyon direnci artmıştır (Wierzchon et al 1997).

Kunosic ve diğeri Č.1530 Č.4732 and Č.4751 çeliklerini pulslu plazma nitrürleyerek plazmaya çalışma oranının (duty cycle) etkisini incelemişlerdir. Tüm deneyler %15, 50, 75, 95 çalışma oranında yapılmış ve diğer parametreleri sabit tutmuşlardır. Değişken çalışma oranlı plazma nitrürlenmiş çeliklerin yüzey karakteristikleri birbirine benzer sonuçlar çıkmıştır. Çalışma oranının azotun nüfuziyetine ve mikrosertlik dağılımına etkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır (Kunosic et al 2004).

Jeong ve diğeri AISI M2 çeliğini 530 °C ve 6 torr basınç altında 4 saat boyunca %80 N₂ - %20 H₂ gaz karışımında plazma nitrürleyerek duty (çalışma) faktörün etkisini araştırmışlardır. Kullandıkları faktörler Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Çalışma faktörü parametreleri

Çalışma faktörü	1	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
Puls on/off zamanı (µs)	DC	150/15	35/15	15/15	15/35	15/150

Sonuç olarak çalışma faktörü 1, 0.9 ve 0.7 için yüzey pürüzlülük değerleri tamamen yüksek, çalışma faktörü 0.5 ve 0.3 için diğerlerine göre düşük,

0.1 duty faktöründe ise çok düzgün yüzey çıktığını bulmuşlardır. Çalışma faktörün artmasıyla difüzyon tabakası ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını saptamışlardır (Jeong et al 2000).

Molinari ve diğerleri Ti-6Al-4V alaşımını üç farklı sıcaklıkta 973, 1073 ve 1173 K nitrülemişlerdir. Nitrürlenmiş malzemeleri üç farklı yük (50, 100, 200 N) yük ve kayma hızı (0,3 0,6 0,8 m/s) koşullarında pin on disk aşınma cihazıyla kuru kayma deneyleri yapmışlardır ve aynı koşullar altında nitrülenmemiş malzemelerle karşılaştırma yapmışlardır. Plazma nitrüleme Ti-6Al-4V alaşımının kuru kayma direncini belirgin bir şekilde iyileştirdiğini bulmuşlardır. Nitrüleme sıcaklığı; değişken yük ve kayma hızı koşulları altında gözlemlenen ana aşınma mekanizmasına göre seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Beyaz tabaka 1073 K de nitrülenmiş malzemede düşük kayma hızı ve yüklerde adhezyon direnci ile ilgili olarak optimal özelliklere sahiptir. 0,3 m/s kayma hızı ve 50 N yük altında oluşan aşınmada nitrülenmemiş numune nitrülenmiş numuneye göre daha düşük aşınma hacmine sahiptir. Artan yük ve kayma hızı ile nitrülenmiş numunelerin daha az aşınma hacmine sahip olduklarını bulmuşlardır ve en az aşınma hacimleri 1173 K sıcaklığında nitrülen deneylerde elde edilmiştir (Molinari et al 1997).

4. PLAZMA İLE NİTRÜRASYON

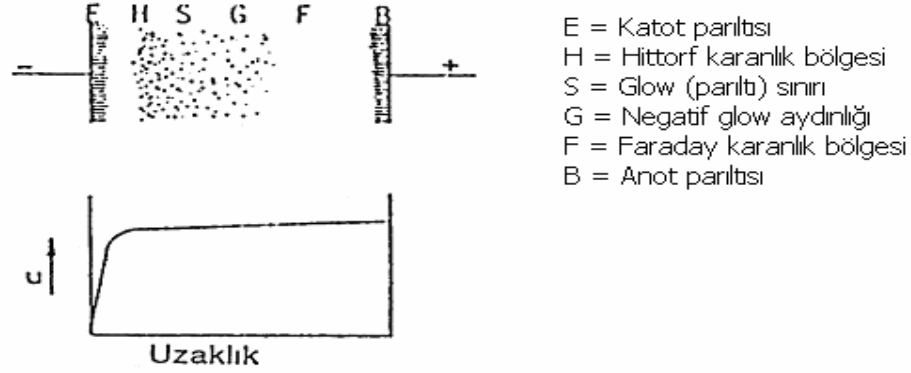
4.1 Ekipman ve Proses Dataları

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⁻²'dir. Gerilim katot (iş parçası) ile anot (fırın duvarı) arasına uygulanır. Kullanılan gazlar, amaca göre N₂+H₂, N₂+H₂+A veya bunların hidrokarbon gazı ilave edilmiş karışımlarıdır. Gaz atom ve molekülleri katod – 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).

4.2 Nitrürasyon Mekanizması

Bu konuda yüzde yüz kesin bir model mevcut değildir. Fakat iyon nitrürasyon olayını en iyi açıklayan olayların başında Edonhofer modeli gelmektedir. Olay şöyle açıklanmaktadır: Anot katot arasındaki gerilim düşümü dolayısıyla hızlanan yüklü parçacıklar çarpışma ile katot önünde gaz ortamlarını iyonize ederler, ortaya çıkan iyonlar, pozitif yük taşıyıcısı halinde metal yüzeyine çarparlar. Şekil 4.1 'de Glow deşarj bölgeleri ve gerilim düşümü görülmektedir. Voltaj düşümü lineer olmayıp, düşümün hemen hemen tamamı katodun birkaç mm önünde gerçekleştiğinden bütün çarpışma ve iyonizasyonun tamamına yakını bu bölgede cereyan eder. Katot (iş parçası) üzerinde oluşan çizgi halindeki parlaklık iş parçasının kenarlarını takip ettiğinden bütün yüzey (delikli, düz karmaşık vs.) homojen iyon bombardımanına maruz kalır ve neticede homojen bir

sertleşme derinliği elde edilir. Bir E enerjisine sahip olan iyonlar yüzeye çarpınca şu olaylar meydana gelir:



Şekil 4.1 Glow deşarj bölgeleri ve gerilim düşümü

Saçılma Olayı: Yüzeye çarpan iyonlar yüzeyde yüksek sıcaklıklar oluşturarak buharlaşmaya yol açarlar. Bunun sonucunda iş parçası Fe ve diğer alaşım elemanları atomları, metalik olmayan element atomları (Örneğin: C, O, N) ile elektronlar yüzeyden uzaklaşır:

$$E = A + E_{kin} \quad (3.1)$$

A: Atomların yüzeyden saçılması için gerekli enerji;

E_{kin} : Saçılan atomların kinetik enerjisi

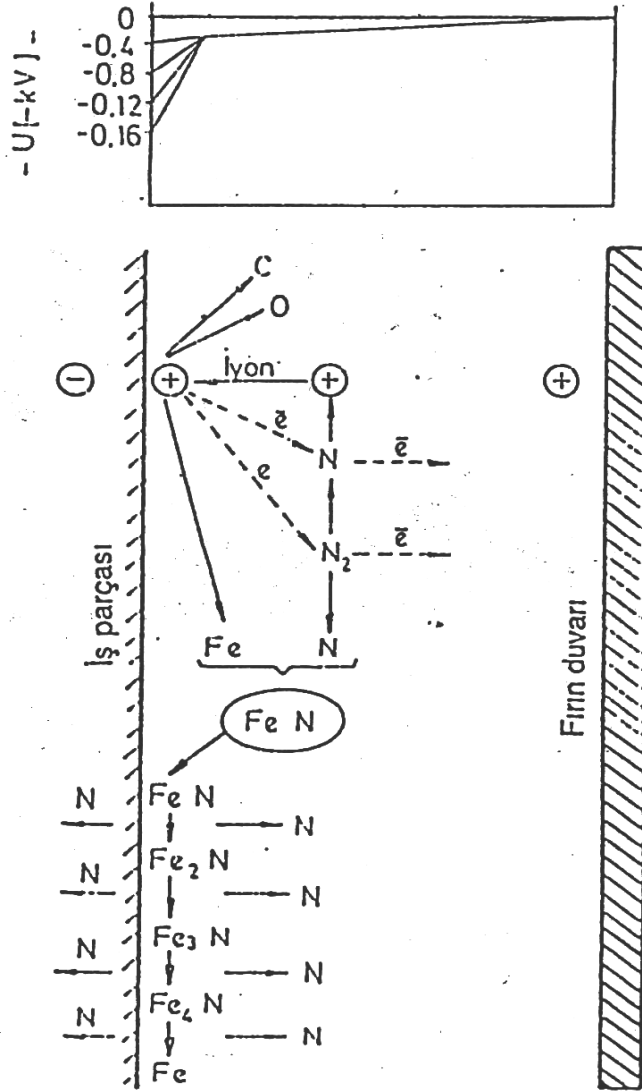
Isınma: Yüzeye çarpan iyonlar iş parçasının içine doğru nüfuz ederken, kalan iyon enerjisi ısıya (Q) dönüşür. Bu halde toplam enerji

$$E = A + E_{kin} + Q \quad (3.2)$$

dır. Bu ısı enerjisi parçanın istenilen sıcaklığa kadar ısınmasını sağlar.

Yoğunlaşma (Birikme): Şekil 4.2'de iyon nitrürasyon işlemi mekanizması görülmektedir. Yüzeye çarpan iyonların ancak çok az bir kısmı iş parçasına yayılır. Büyük bir yüzdesi saçılma olayını sağlar. Saçılan Fe atomlarıyla yüksek enerjili N atomları yüzey civarında FeN şeklinde birleşip metal yüzeyinde birikirler. FeN sıcak metal yüzeyinde kararsızdır,

bundan dolayı kararlı diğer nitritlere (Fe_2N , Fe_3N ve Fe_4N) dönüşür. Dönüşme esnasında serbest kalan N atomları ya metale yayınır veya plazmaya döner.



Şekil 4.2 İyon nitürasyon işlemi mekanizması

Saçılma ve birikme önemli ölçüde kullanılan gaza bağlıdır. Ayrıca basıncı ve voltajı değiştirmek mümkündür. Örneğin gaz basıncının azaltılması (partikül yoğunluğunun azalması) yüzeyden saçılan atomların serbest hareket mesafesini arttırmakta, Fe ile N' nin birleşme ihtimalini azaltmaktadır. Sonuçta yüzeyde oluşan FeN tabakası incelmektedir. Eğer basınç arttırılırsa tam tersine olarak FeN tabakası kalınlaşacaktır.

İyonitrürasyonda diğerk bir model boş köşee+N iyonu çifti oluşumuna dayanır. İyon bombardımanı metal yüzeyinde kristal hataları oluşturmakta ve N iyonları ile meydana gelen bu hatalarda boş köşeler birleşerek stabil boş köşee +N iyonu çiftleri ortaya çıkmaktadır. Metal içine yayınan bu çiftlerin difüzyonu yer alan difüzyondur ve azot atomunun ara yer difüzyonundan daha hızlı olarak cereyan eder.

4.3 İyon Nitrürasyonun Metalurjik Yönden Avantajları

İyon nitrürasyon işlemleri konvansiyonel nitrürasyon işlemlerinden daha çabuk cereyan eder. Gerek Edenhofer'e göre metal yüzeyinde kondense olan yüksek N yoğunluklu FeN dolayısıyla N'nin konvansiyonel metotlarda olduğu gibi özellikle tane sınırları boyunca değil bütün yüzey boyunca düzlemsel difüzyon şeklinde metal içine nüfuz etmesi, gerekse boş köşee + N iyonu difüzyonunun azot atomu difüzyonundan daha hızlı olması bu olayı açıklar. Diğer avantajları daha iyi açıklayabilmek için nitrürasyon neticesi oluşan tabakaların üzerinde bir miktar durmak gerekir.

Beyaz Tabaka: En üstteki bu tabaka Fe₄N (γ) veya Fe₂₋₃N (ϵ) fazlarından birisi veya ikisinin karışımından ibarettir. Bu tabakanın özellikleri nitrür yapısının homojenliğine ve kalınlığına bağlı olarak değişir. Eğer γ ve ϵ fazları birlikte oluşuyorsa farklı kafes yapıları dolayısıyla iç gerilmeler artarak gevrek kırılmaya olan eğilim büyüyecektir. Konvansiyonel gaz nitrürasyonunda bu tür bir beyaz tabaka oluşur. Sıvı nitrürasyonunda ise daha ziyade tek fazın oluşumu (ϵ fazı) tabakayı daha düktil hale getirmesine rağmen kalınlıktaki artış gevrekleşmeye yol açar. İyonitrürasyon ile bu tabaka gayet hassas olarak kontrol edilebilir. Örneğin N₂ + H₂ gazı kullanarak beyaz tabaka kalınlığı azaltılabilir. H₂ 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 nitrür fazları ihtiva eder. Konvansiyonel nitrürasyonda N atomları daha yüksek enerjili bölgeler olan tane sınırlarından difüze olurlar ve buralarda evvelce önce bulunan karbür fazları ile birleşerek çok gevrek olan karbonitrürleri oluştururlar. Bunu neticesinde difüzyon tabakasının gerilmelere olan hassasiyeti büyük ölçüde artmış olur. Halbuki iyon nitrürasyon işleminde karbonsuz nitrürleme gazı kullanılarak ve karbon saçılması uygulayarak yüzey ve yüzeye yakın yerlerde karbon azalmasını sağlamak mümkündür. Bunun sonucunda gevrek karbonitrür fazları iç kısımlara doğru itilerek yüzeyin aşınmaya ve yorulmaya dayanımı artar.

5. PLAZMA İLE TERMOKİMYASAL YÜZEY İŞLEMLERİ

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 yayınım işlemlerinde amaç, karbon veya azot gibi ara yer atomlarını parça yüzeyine göndermektir. Bu atomlar malzeme içerisinde bulunan alaşım elementleriyle birleşerek aşınma ve korozyona dayanıklı bir yapı oluşturur. Bu yöntemler temelde alaşımlı çeliklere uygulanmaktadır. Çizelge 5.1'de uygulanan plazma destekli termokimyasal işlemler için işlem sıcaklığı ve basıncına göre, elde edilen yüzey sertliği ve yayınım tabakası kalınlığı verilmiştir.

Çizelge 5.1 Plazma Destekli Yüzey İşlemlerine Bakış (Çelik vd. 2002)

Uygulanan işlem	Temel Mantiğı	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'nin 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

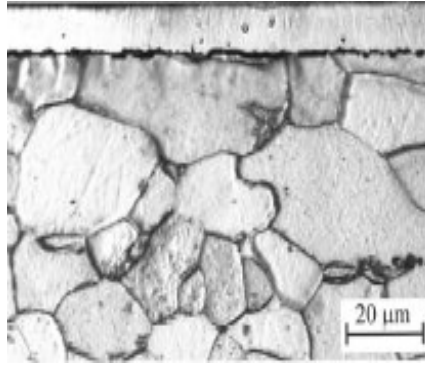
5.1 Plazma İle Karbürleme

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).

5.2 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 ϵ - nitrür tabakasının oluşturulmasıdır. 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 (ϵ)'nin içerisinde (Fe_3C) sementiti oluşturabilir. Bu durum ise bu tabakanın işlevini tam olarak görmesini engelleyebilir. 560 °C sıcaklıkta 1 saat nitrokarbürlenmiş saf demirin üzerinde oluşan nitrokarbür tabakasının optik mikroskoptaki görünüşü Şekil 5.1 de verilmektedir.



Şekil 5.1 Nitrokarbürlenmiş Malzemede (Saf demir) Nitrokarbürü Tabakanın Optik Mikroskop Görünüşü (Çelik vd. 2002)

Plazma nitrokarbürleme işlemi 450-580 °C sıcaklıklar arasında, demir esaslı malzemelerin yüzeyine azot ve karbonun yayınmasını içeren termokimyasal işlemdir. Yüzeyde γ - demir nitrür ile beraber ϵ - nitrür tabakası, onun altında da difüzyon tabakası oluşur. Plazma ile nitrürleme işleminin tersine bu işlemde kullanılan gazlar azot-hidrojen-metan veya azot-hidrojen-karbondioksit'tir. İlk yapılan plazma ile nitrokarbürleme işleminde, işlem gazı olarak CH_4 kullanılmıştır. Fakat çok küçük miktarda

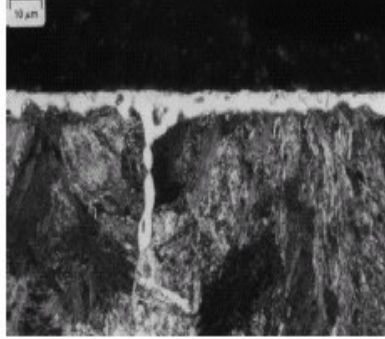
CH₄ kullanımında bile kırılğan sementit ve ε nitrürün oluştuğu görülmüş ve daha sonraki araştırmalarda ortama CO₂ gazı verilerek bu sorun giderilmiştir. Bu işlemin amacı, düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin yüzeyinde ε - nitrür tabakası oluşturularak korozyon ve aşınma dayanımını artırmaktır. 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 (ε - nitrür) sayesinde gerçekleşir.

Plazma şartlarında gerçekleştirilen nitrokarbürleme, işlemin çevreyle dost olması, uygun işlem değişkenleri ile tek fazlı ε nitrür fazının elde etmenin kolay olması ve gaz ve enerji tüketiminin az olması nedeniyle tercih edilmektedir (Çelik vd. 2002).

5.3 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 borlamada, bor atomları metal yüzeyine termokimyasal olarak yayınarak sert bor tabakası oluştururlar. Borlama işlemi esnasında FeB ve Fe₂B tabakaları yüzeyde oluşur ve 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 B₄C-KBF₄-SiC tozları kullanılarak

ticari amaçlı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Çelik vd. 2002). 950 °C' de 1 saat borlanmış AISI 4140 çeliğinde oluşan bor tabakasının görünüşü Şekil 5.2 'de görülmektedir.



Şekil 5.2 Borlanan Malzemede (AISI 4140) Borlu Tabakanın Optik Mikroskop Görünüşü (Çelik vd. 2002)

Plazma ile borlama işlemi ile ilgili olarak yaklaşık 20 yılı aşkın süredir çalışılmasına rağmen, henüz tam olarak anlayamamıştır. Ar, H₂ gazları ile birlikte bor kaynağı olarak BCl₃, B₂H₆, BF₃ veya B(OCH₃)₃ (trimetilborat) kullanarak, 800-1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10⁻² 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).

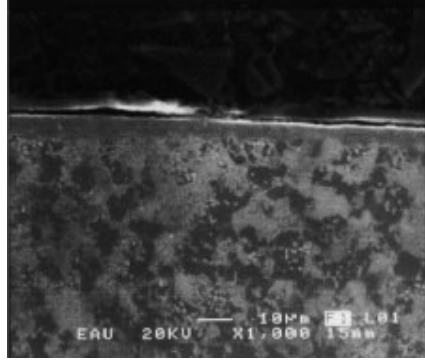
5.4 Plazma ile Nitrüleme

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 (Karadeniz 1990). 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. Avantajlarını kısaca şöyle özetlemek mümkündür;

- Hassas olarak sertleşme kalınlığının kontrolü
- İstenmeyen beyaz tabakanın (FeN, Fe₂₋₃ N) kalınlığının kontrolü
- Yüzey altı gevrek nitrülenmenin engellenmesi dolayısıyla çekirdek duktilitesinin artması.
- Prosesi 350 °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 (Karadeniz 1990).

Plazma ile nitrürasyon yöntemi elektriki boşalma (glow discharge) şartlarında oluşur (Çelik vd. 2002). Bu yöntemde, malzeme yüzeyine iyonize edilmiş azotu yaymak için aktif ve reaktif plazma hali kullanılır. İşlem teorik olarak elektrikselsel olarak iletken malzeme yüzeyine N ara yer atomunun yayınma işlemidir. Plazma ile nitrürasyon işlemi N₂, H₂, Ar ve NH₃ gaz ortamında, 350-590°C arasında gerçekleştirilebilir. Yüzeyi sertleştirilecek malzemenin Cr, Al, V, Mo ve Ti gibi alaşım elemanlarını içermesi yüzey sertliğini daha da artıracaktır. 450 °C sıcaklıkta 4 saat nitrürlenmiş AISI 5140 çeliğinde oluşan nitrürlü tabakanın SEM görünüşü Şekil 5.3' de görülmektedir.



Şekil 5.3 Nitrülenmiş Malzemedede (AISI 5140) Nitrürlü Tabakanın SEM Görünüşü (Çelik vd. 2002)

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 (Çelik vd. 2002).

6. AŞINMA VE AŞINMA HASARLARI

İstenmeden meydana gelen aşınma, çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı sırasında kırılma kadar önemli bir problem olmasa bile, çok büyük ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Bu konu, makine dizaynlarında çok önemlidir. Çünkü temas eden yüzeylerde, sürtünme kuvvetleri güç kaybına, aşınma ise, işleme toleranslarının kötüleşmesine neden olmaktadır. Bu yüzden de aşınma, göz önüne alınması gereken çok önemli parametrelerden biridir.

6.1 Sürtünme

Bilindiği gibi, iki malzeme birbirlerine temas edecek şekilde yerleştirilirse, bu malzemelerden birini diğeri üzerinde kaydırmak için uygulanan kuvvete sürtünme kuvveti direnç gösterir. Kaymayı başlatan kuvvet (F_s) ile, temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (N) arasında 6.1 bağıntısı mevcuttur.

$$F_s = \mu_s \cdot N \quad (6.1)$$

Burada μ_s , sürtünme katsayısıdır.

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

$$F_k = \mu_k \cdot N \quad (6.2)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada μ_k ($<\mu_s$) kinetik sürtünme katsayısıdır.

6.2 Aşınma

Aşınma, genellikle temas eden yüzeylerde mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. Standartlara, örneğin Alman DIN 50320 normuna göre aşınma, "Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz)

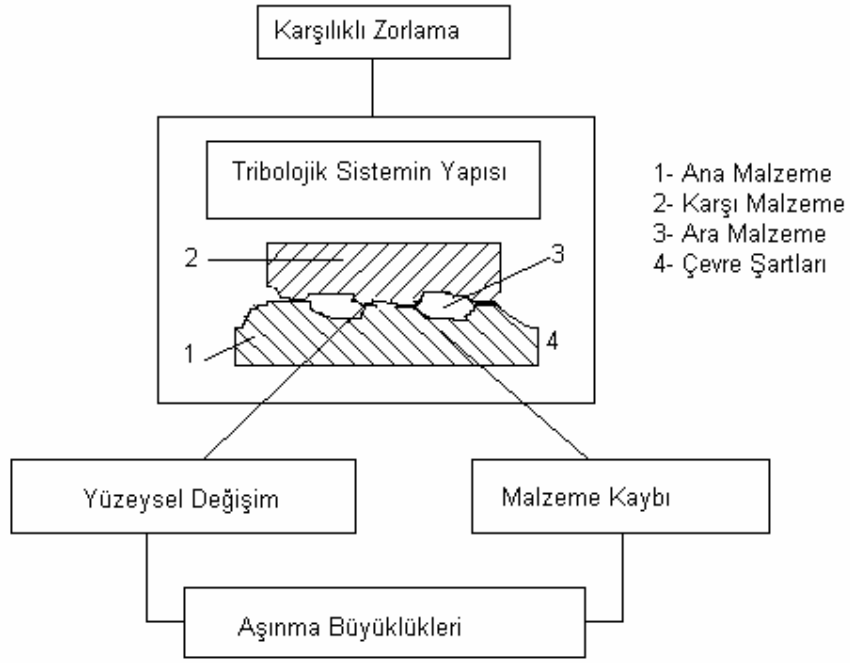
teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenilmeyen yüzey bozulmasıdır” şeklinde tanımlanmaktadır. Benzer şekildeki bir aşınma tanımı da aşınma ve erozyonla ilgili terminolojiyi içeren ASTM G40-93 standardında verilmektedir.

Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleşebilir. Bunlar bölgesel erimler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel anlamda oluşan ayrılımdır. Uygulamada aşınma kapsamına, daha çok yüzeyden fiziksel anlamda ayrılan malzemenin sebep olduğu hasarlar dahil edilmektedir.

Bir aşınma sisteminde;

- 1) Ana malzeme (aşınan),
- 2) Karşı malzeme (aşındıran),
- 3) Ara malzeme,
- 4) Yük,
- 5) Hareket,

aşınmanın temel unsurlarıdır. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte “Tribolojik Sistem” olarak adlandırılır. Bir tribolojik sistemin standartlara uygun şematik olarak gösterimi Şekil 6.1’de görülmektedir.



Şekil 6.1 Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi

Aşınma, genellikle önceden bilinen bir hasar tipidir. Birbirleri ile temasta olan malzeme yüzeyleri oksit filmleri veya yağlayıcılar ile korunsalar bile, mekanik yüklemeler altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması, iki yüzeyin birbiriyle doğrudan temasına sebep olabilir. Bu temas sonucu oluşan sürtünme, malzemenin çalışma koşullarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya sebep olur. Bu hasar uygun yağlama, filtreleme, uygun malzeme seçimi ve uygun tasarım gibi faktörlerle en aza indirilebilir, fakat kesinlikle tümüyle önlenemez.

Aşınma çeşitli yönleriyle korozyona benzer. Bu iki hasar tipi de zamanla kendiliğinden gelişir, her ikisinin de oluşumu önceden bir derecede bilinebilir, her ikisinin de çeşitli tipleri vardır. Aşınma da korozyon gibi bir yüzey olayı olduğundan, yüzeyi etkileyen her şey aşınma davranışını da etkiler.

Aşınma, temelde bir yüzey hasarıdır. Aşınma hasarları kapsamına giren yüzeyden malzeme kaybı kayma, kırılma, talaş oluşumu, yorulma, kimyasal çözünme ve difüzyon yoluyla gerçekleşebilir.

Aşınma olayında, oluşan hasarı değerlendirmek oldukça önemlidir. Yüzeyde oluşan hasar tipleri ve her bir hasarı önlemek amacıyla kullanılacak koruma yöntemi, uygulamadan uygulamaya farklılık gösterir. Örneğin tüketilebilir veya zamanla tüketilebilmesi fazla önem taşımayan parçalarda, önemli olan sistemde baskın durumda bulunan aşınma mekanizmasını önlemektir. Bu durumda, yüzeyde oluşan aşınma parçacıkları çok fazla önem taşımaz. Fakat dönen yataklar, baskı silindirleri gibi yüzey topografyasının öneminin yüksek olduğu uygulamalarda, yüzeyde oluşan parçacıklar hatta yüzey çatlakları bile, çalışan parçanın verimini olumsuz yönde etkilerler.

İstenmeden meydana gelen aşınma olayı, çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı sırasında çok büyük ekonomik kayıplara (enerji, işgücü, malzeme vs.) neden olmaktadır. Örneğin ABD’de, işlem maliyeti 70 milyar dolar/yıl ve takım maliyeti ise 900 milyon dolar/yıl (1978) gibi çok yüksek değerlere ulaşmaktadır.

6.2.1 Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen çeşitli faktörler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler, aşağıda dört şekilde verilmiştir :

1) Ana malzemeye bağlı faktörler

- * Malzemenin kristal yapısı
- * Malzemenin sertliği
- * Elastisite modülü
- * Deformasyon davranışı
- * Yüzey pürüzlülüğü

- * Malzemenin boyutu
- 2) Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi
- 3) Ortamın etkisi
 - * Sıcaklık
 - * Nem
 - * Atmosfer
- 4) Servis koşulları
 - * Basınç
 - * Hız
 - * Kayma yolu

6.2.2 Aşınma Mekanizmaları

6.2.2.1 Adhezif aşınma (Yapışma aşınması)

Yapışma aşınması olarak da adlandırılan adhezif aşınma, en sık rastlanılan tür olmasına rağmen, genellikle hasarları hızlandırıcı etkide bulunmaz. Adhezif aşınma en genel olarak, karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre göreceli olarak hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye olan malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir.

İki ayrı metal yüzeyi basınç altında Şekil 6.2' de olduğu gibi bir araya getirildiği zaman, iki ayrı yüzeyde bulunan karşılıklı çıkıntılar gerek sürtünme neticesinde oluşan ısı, gerekse de soğuk kaynaklaşma nedeniyle birbirleriyle bağ yaparlar. Meydana gelen bu bağ, birleşen çıkıntıların diğer bölgelerindeki bağ yapısından daha kuvvetli olabilir. Yüzeylerin birbirlerine karşı olarak yaptığı hareketin devam etmesiyle birleşen iki çıkıntı, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopacaktır. Bu kopma kaynak noktasında meydana gelmediği zaman, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi meydana gelir. Bu prosesin çalışma

koşullarında birçok kere tekrarlanmasıyla, adhezif aşınma kendisini hissettirecek boyutlara ulaşır.



Şekil 6.2 Adhezif aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi

Adhezif aşınma, özellikle birbiri ile kayma sürünmesi yapan malzeme çiftinde meydana gelen kaynaklaşma olayının bir sonucudur. Birbiri üzerinde kayan teknik yüzeylerin, ancak küçük bir kısmı temas halindedir ve küçük temas yüzeylerindeki gerilmeler çok küçük yüklemelerde dahi akma dayanımı değerine ulaşırlar veya geçerler. Böylece, moleküler yapışma kuvvetleri etkisini gösterir. Bu nedenle bir parçadan diğerine malzeme geçişi, soğuk kaynaklaşma ve küçük parçacıkların kesilmesi olayları meydana gelir.

Birbirlerine göre farklı metalurjik, mekanik, kimyasal ve topoğrafik özelliğe sahip iki metal yüzeyinin birbirleri üzerinde kayması, oldukça kompleks bir sistemdir. Bu sisteme yağlayıcıların da ilave edilmesiyle, sistem daha da karmaşık bir hal alır. İyi bir yağlamanın amacı, karşılıklı gelen yüzeylerin tamamen ayrılmasını sağlamak olmalıdır. Bu sayede, sürtünme sebebiyle meydana gelen ısı oluşumu azaltılarak, sıcaklıkla aktive edilen kimyasal ve fiziksel değişikliklerin de önüne geçilebilir.

6.2.2.2 Abrazif aşınma

Yırtılma veya çizilme aşaması olarak da isimlendirilen abrazif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür.

Abrazif aşınma en genel olarak, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle basınç altında etkileşmesiyle, sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması şeklinde tanımlanabilir. Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma şekli verilebilir.

Bu tip aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elemanlı ve üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılır.

İki elemanlı abrazif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrazif aşınmada ise, ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıklardan birer ana malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir.

Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrazif veya adhezif olarak başlayıp, üç elemanlı abrazif olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro talaşlar ve parçalanmış oksit parçacıkları üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturabilir. Serbest hale geçen mikro talaş parçacıkları, genellikle ana malzemeden daha sert olduklarından dolayı aşınmayı hızlandırır.

Abrazif aşınmayı etkileyen iki temel faktör, aşındırıcı partikül ile metal yüzeyi arasındaki sertlik farklılığı ve teması meydana getiren basıncın büyüklüğüdür. Abrazif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden normal yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak kaldırılması açısından daha az iz bırakması sağlanır. (Kayalı 1997).

6.2.2.3 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 and 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 and Matthews 1994).

Delaminasyon aşınma teorisi ilk defa Suh (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.

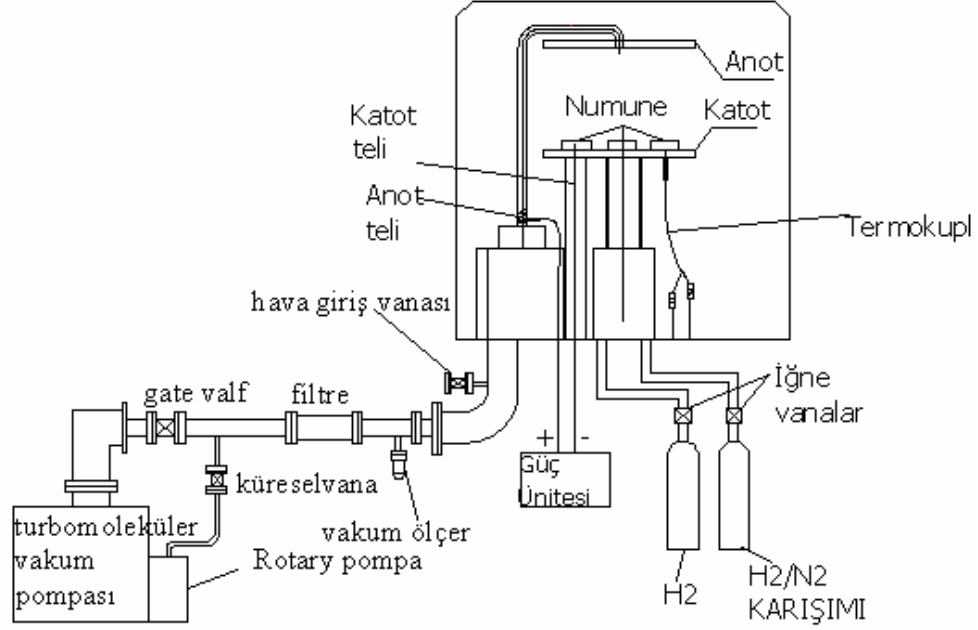
6.2.2.4 Oksidasyon aşınması

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 and Matthews 1994).

Oksidasyon aşınması teorisine göre, kayan iki yüzey arasında ortaya çıkan sürtünme ısı, 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 çevre 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 et al 1988).

7. PLAZMA NİTRÜRASYON DENEY DÜZENİĞİNİN KURULMASI

Şekil 7.1'de plazma nitrürasyon cihazının şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 7.1 Plazma nitrürasyon cihazının şematik gösterimi

7.1 Vakum Pompası

Plazma nitrürasyon düzeneğinin temel elemanlarından birisi olan vakum pompası istenen vakumu kısa bir sürede sağlayacak şekilde seçilir. Sistemde kullanılan vakum pompasının özellikleri aşağıdaki gibidir:

Rotary Pompa

Pompa tipi DUO 016 B

Pompanın debisi 18 m³/h

Yağ hacmi 2.8 lt

Pompa işlem sıcaklığı 80 °C

Turbomoleküler Vakum Pompası

Pompa tipi TPU 240

Gaz akış hızı
N₂ 230 lt/s
H₂ 210 lt/s
He 230 lt/s
Su soğutmalı

7.2 Vakum Kabı

Bir iyon nitrürasyon düzeneğinde üzerinde durulması gereken eleman vakum kabıdır. Vakum kabı, içerisine işlevi olan elemanları alabilecek minimum büyüklükte olmalıdır. Bunun nedeni, vakuma alınacak hacmin mümkün olduğunca küçük tutulmasıdır. Vakum kabı birbiriyle sızdırmazlık elemanlarıyla donatılmış biri sabit, diğeri hareketli iki temel kısımdan oluşmaktadır. Hareketli kısım (bundan sonra hazne olarak geçecektir) işlem esnasındaki olayları izleyebilmek için üzerine cam pencere takılmış paslanmaz çelik silindirden imal edilmiştir. Bu durumda hazne anot (+ uç) olarak kullanılabilir. Paslanmaz çelik silindir borunun alt kısmına CF 200 flanş TİG kaynağı ile kaynatılmıştır. Sistemdeki tüm kaynaklı birleştirmeler TİG kaynağı ile yapılmıştır. Borunun üst tarafına ise kör flanş yapılıp kaynatılmıştır. Haznenin en önemli elemanı sabit kısım olan ve üzerine bağlantıların yapıldığı kısımdır (bu kısım bundan sonra tabla olarak geçecektir). Tabla, 25 mm kalınlığında 255 mm çapında paslanmayı önlemek açısından paslanmaz çelikten imal edilen CF bağlantılı flanştır. Bu deneysel çalışmada kullanılan vakum kabının boyutları Ø 200 mm ve yükseklik 300 mm dir.

Tabla üzerinde şu elemanlar bulunmaktadır:

- Vakum girişi
- Elektrik bağlantıları
- Gaz girişleri

- Sıcaklık ölçme bağlantısı

Sistemde istenilen vakum değerine ulaşılması bu bağlantıların sızdırmaz olması nedeni ile mümkündür ve burada gözden kaçabilecek çok küçük bir husus vakumun istenen değere ulaşmasını engelleyecektir.

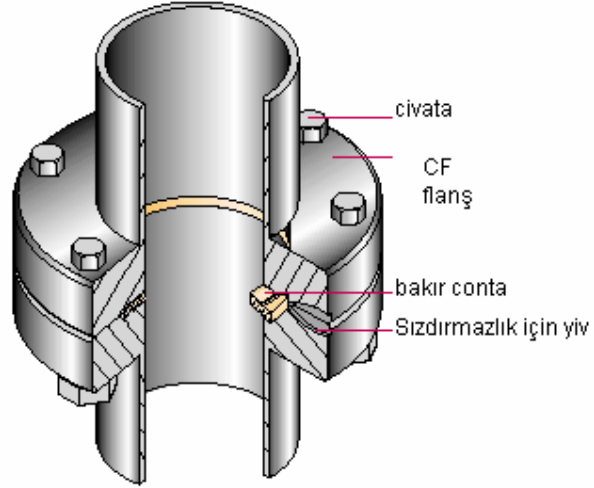
Vakumdaki bağlantıların sızdırmaz olması için konstrüksiyonu ve imalatı üzerinde önemle durulmalıdır.

7.2.1 Vakum Hattı Üzerinde Bulunan Flanş Bağlantıları

Bağlantılarda kullanılan harfler flanşın adını, rakamlar ise flanş ebatları hakkında bilgi verir.

7.2.1.1 CF bağlantılar

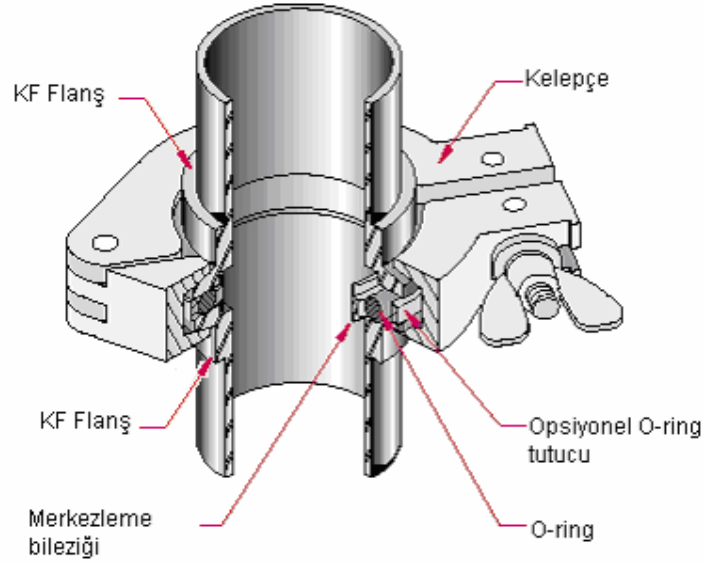
Şekil 7.2'de genel bir CF bağlantısının resmi görülmektedir. CF 16 dan CF 250 mm bağlantıya kadar ebatları bulunmaktadır. Tabla CF 200 lük flanştan yapılmıştır. CF bağlantılarda bakır conta kullanılırsa vakum aralığı 1×10^{-13} mbar' a kadar, sıcaklık olarak -200°C ile 450°C aralığında çalışabilmektedir. Elastomer conta kullanılırsa 1×10^{-8} mbar' a kadar vakum basıncı, -20°C ile 150°C sıcaklık aralığında çalışmaktadır. Sistemimizde ki CF bağlantılarda üzeri gümüş kaplanmış bakır conta kullanılmıştır.



Şekil 7.2 CF bağlantı düzeneği

7.2.1.2 KF bağlantılar

Şekil 7.3'de genel bir KF bağlantısının resmi görülmektedir. 10^{-8} mbar vakuma ve $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa kadar çalışabilmektedir. KF 10 dan KF 50 'ye kadar flanş bulunmaktadır.



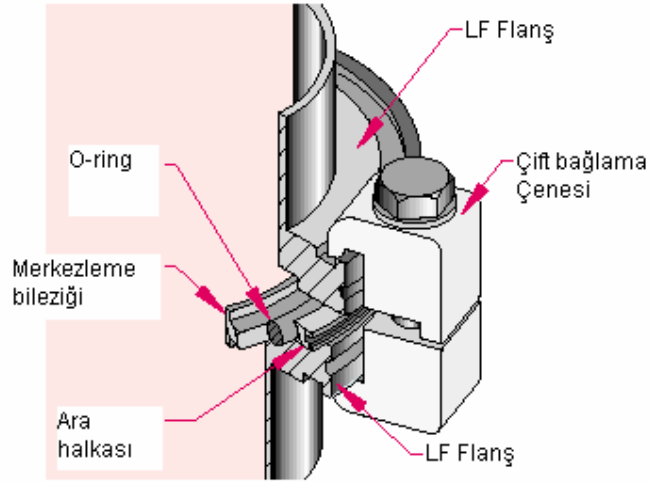
Şekil 7.3 KF bağlantı düzeneği

Vakum girişi, pompa ile vakum kabını birleştiren kıvrılabilir çelik bir borudan ibarettir. Bu boru üzerine sistemi pompadan izole etmek için

vakuma dayanıklı vana kullanılmıştır. Bu boru vakum pompasına KF25 bağlantı ile bağlanmıştır.

7.2.1.3 LF bağlantılar

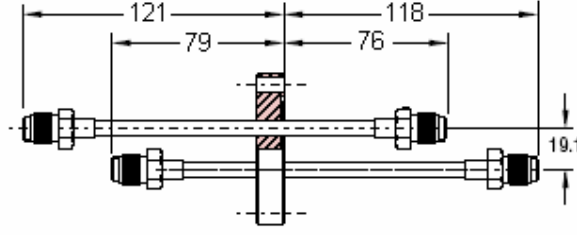
Şekil 7.4'de genel bir LF bağlantısının resmi görülmektedir. KF flanşın kullanılmadığı yerlerde kullanılır. Flanş boyutları 63 mm den 500 mm ye kadar bulunmaktadır. Sistemimizdeki boru bağlantıları LF 100'dür. 10^{-8} mbar vakuma ve 150 °C sıcaklığa kadar çalışabilmektedir.



Şekil 7.4 LF bağlantı düzeneği

7.2.2 Gaz Girişleri

Bu deneysel çalışmada azot, hidrojen girişleri tablaya tek bir flanş üzerinden iki boruyla sağlanmıştır. Şekil 7.5'te gaz giriş bağlantısının şekli görülmektedir. Flanş bağlantısı olarak DN40CF flanş kullanılmıştır. Gaz girişlerinin mümkün olduğunca vakum girişinden uzak tutulması tavsiye edilmektedir.



Şekil 7.5 Gaz giriş bağlantıları

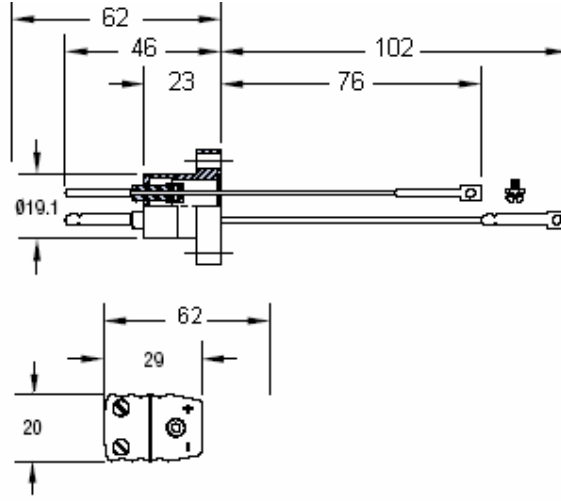
7.2.3 Basınç Ölçer

Bu deneysel çalışmada basınç ölçümü Pfeiffer-Balzers PKR 251 marka basınç ölçeri ve TPG 261 marka basınç göstergesi ile yapılmıştır. Bu alet 5×10^{-9} mbar ile 1000 mbar arasında ölçüm yapabilmektedir.

Basınç ölçme bağlantısı, basınç ölçme aletinin başının boyutlarından daha küçük olmayan çapta kısa bir boru kullanılarak yapılmalıdır ve ölçü aletinin başı, basıncı ölçülmek istenen yere mümkün olan en yakın yere monte edilmelidir. Uzun veya dar bağlantılar hatalara neden olabilir.

7.2.4 Sıcaklık Ölçer

Sıcaklık ölçümü katodun içinden geçirilerek alttan parçaya temas eden Kromel – Alumel termokupl kullanılarak yapılmıştır. Şekil 7.6 da termokupl ve bağlantı flanşı görülmektedir. Termokupl bağlantısı DN16CF flanş kullanılarak yapılmıştır. Sıcaklık değerinin hassas olarak okunabilmesi için termokupl uçlarının çok iyi birleştirilmesi gerekmektedir. Bu birleştirme işlemi tek bir noktada oksijen kaynağı ile yapılmalıdır. Ayrıca termokuplun katot içinde kalan kısmının çok iyi izole edilmesi gerekir. Aksi takdirde termokupl katot gibi davranmakta ve arkın oluşmasına sebep olacaktır. Sıcaklık ölçerinin ölçüm aralığı -200 °C ile 1200 °C arasındadır.

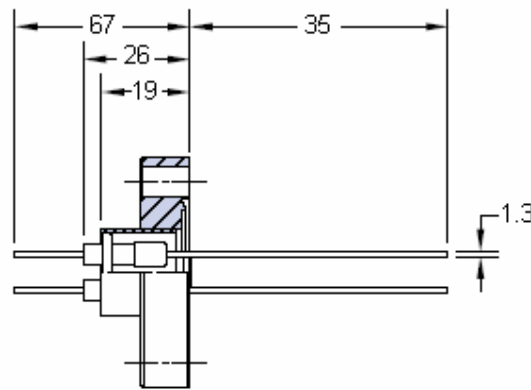


Termokupl bağlantı parçası

Şekil 7.6 Termokupl ve bağlantı flanşı

7.2.5 Elektrik Bağlantıları

Elektriksel bağlantıda anot ve katot teli sızdırmazlığı sağlanmış tek bir flanş (DN16CF) üzerinde girişi yapılmıştır ve flanşın içerisi silikonla doldurulup anot katot telleri seramik boncuklarla yalıtılmıştır. Ayrıca seramik boncuklar yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedirler. Şekil 7.7 de elektrik bağlantı flanşı görülmektedir.

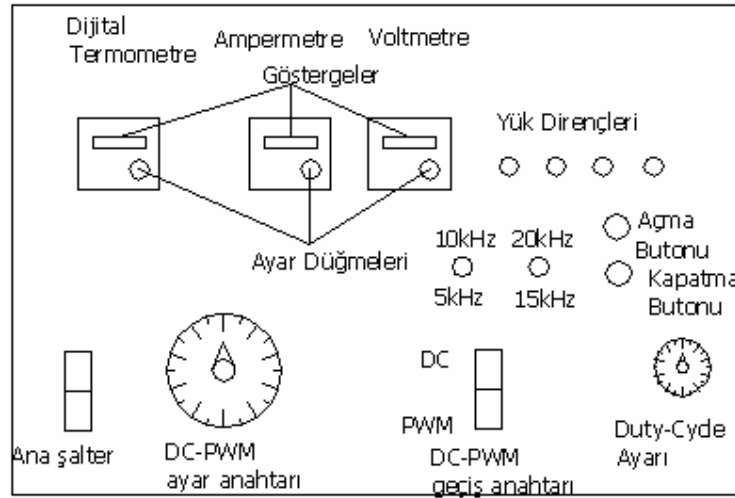


Şekil 7.7 Elektrik bağlantı flanşı

7.3 Güç Kaynağı

Güç kaynağı 2.5 kW gücünde, 1200 V DC çıkışı ve 800 V PWM darbe genişlik modülasyonu (pulse width modulation) çıkışına sahiptir. Puls ünitesi 5, 10, 15, 20 kHz frekanslarında ve çalışma oranı ise %1 ile % 99 değerleri arasında ayarlanabilmektedir.

İyon nitrürasyon düzeneğinin başarıyla çalışmasını sağlayan en önemli kısımlardan birisidir. İyon nitrürasyon işlemi Şekil 2.3' deki eğrinin E-F arasındaki düzensiz olan bölgede yapılır. Nüfuziyetin yüksek olması ve işlemin kısa sürede yapılabilmesi için eğrinin F noktasına yakın çalışması gereklidir. Fakat plazma bu bölgede düzensiz olduğu için ark meydana gelebilir. Ark olması malzeme yüzeyini bozar. Bu nedenle, ark oluşumunu önlemek ve düzeni sağlamak amacıyla güç kaynağında çeşitli kontrol sistemleri kullanmak gereklidir. Bu kontrol sistemleri güç kaynağının çıkış gerilimini, akımını, gerilim artış hızını ve sıcaklığını kontrol altında tutarlar. Ayrıca bu ayar olanakları sayesinde metalurjik yapının ayarlanabilmesi mümkün olmaktadır. Şekil 7.8' de güç kaynağının şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 7.8 Güç kaynağının şematik görünümü

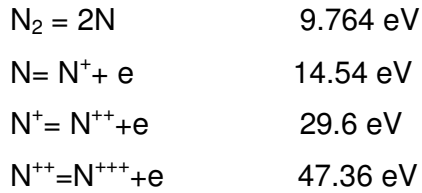
7.4 Kullanılan Gazlar

İyon nitrürasyonda kullanılan gazlar N_2+H_2 , N_2+H_2+Ar olabildiği gibi amaca göre bunlara hidrokarbon gazı ilave edilmiş gaz karışımları da kullanılabilir. Bu deneysel çalışmada, 150 kg/cm^2 basınçta 40 lt'lik %50-%50 N_2-H_2 karışımı tüp kullanılmıştır ve 150 kg/cm^2 basınçta 40 lt'lik H_2 tüpü kullanılmıştır. Burada azot gazı nitrürasyonu dağlarken, hidrojen gazı da azottan daha düşük ayrışma ve iyonizasyon enerjisine sahip olduğu için deşarj olayını başlatabilmek için için önemlidir. Hidrojen aynı zamanda metal yüzeyinde oluşan saçınmayı artırarak, oluşan beyaz tabakanın azaltılmasını hatta yok edilmesini sağlar. Aşağıda bazı gazlara ait ayrışma ve iyonizasyon enerjileri verilmektedir;

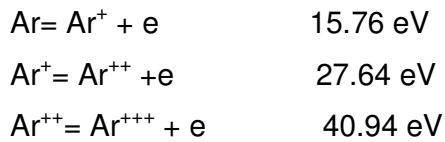
Hidrojen



Azot



Argon



Helyum



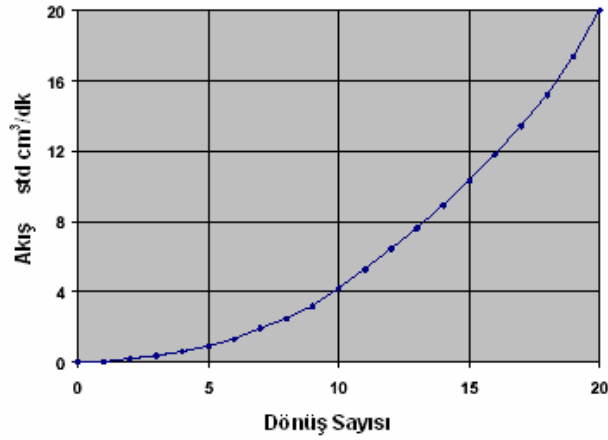
Tüpten sonra vakuma verilen gaz miktarını çok iyi ayarlayabilmek için hassas iğne vanalar kullanılmaktadır. Bu iğne vanalar vasıtasıyla vakum ortamına istediğimiz gaz karışımını gönderebiliriz. Bu deneysel çalışmada Chell marka ultra hassas iğne vana kullanılmıştır. Bu iğne vananın özellikleri şu şekildedir:

1 bar fark basıncında akış aralığı 0-20 std cm³/dk

Basınç aralığı vakumdan 18 bar'a kadar

Sızma oranı 1x10⁻⁹ mbar lt/sn

Akış oranı vananın girişi ile çıkışı arasındaki basınç farkı bir atmosfer olmasına bağlıdır. İğneli vananın akış karakteristiği şekilde verilmiştir.



Şekil 7.9 Vana dönüş sayısının akış ile bağlantısı

Vananın aşırı şekilde sıkılması vanaya zarar verecektir.

7.5 Filtre

Pompadan gelen buhardan vakum haznesini korumak, gazlardan pompayı korumak, işlem esnasında ortaya çıkan ve hazneden gelen partikülleri tutmak için filtre kullanılmıştır. Filtre içerisinde paslanmaz çelik veya bakır yün şeklinde talaşlar mevcut olup kullanılan gaza göre talaş seçimi yapılır.

8. MATERYAL ve METOT

8.1 Malzemelerin Hazırlanması

Bu deneysel çalışmada deney numunesi olarak Çizelge 8.1 'de kimyasal kompozisyonu verilen AISI 52100 yatak çeliği iyon nitrüleme işlemine tabi tutulmuştur.

Çizelge 8.1 Deney numunesinin % kimyasal kompozisyonu

C	P	Mo	Mn	Cr	Al	Si	Ni	Cu
0,95	0,0143	0,0137	0,318	1,45	0,0252	0,194	0,107	0,155

21 mm çapında ve 5 mm kalınlığında hazırlanan numuneler iyon nitrürasyondan önce 850 °C' de yarım saat bekletildikten sonra yağda su verilmiştir. Daha sonra 200 °C'de 1 saat süreyle temperlenmiştir. Numunelerin sertliği yaklaşık 800 HV'dir. Sertleştirilen numuneler 120 grid lik zımparadan başlanarak 1200 gridlik zımparaya kadar parlatılmıştır. Sonra numuneler 1 µ luk sıvı alümina ile çuhada parlatılmıştır.

8.2 Plazma Nitrüleme İşlemi

Sistem çalıştırılmadan önce sistemin içerisinde özellikle contanın iyice temizlenmesine özen gösterilir. Temizleme işlemi alkolle yapılır. Daha sonra sistem iyice kurutulur. Aksi taktirde vakum istenen değere ulaşmayacaktır. Daha sonra iş parçası katot üzerine yerleştirilir. Gaz girişindeki vanaların kapalı olup olmadığı kontrol edilir. Hidrojen ve azot gazlarının vakuma geliş basınçları ayarlanır. Turbomoleküler pompa çalıştırılacaksa soğutma suyunun vanası açılır. Pompa yağı kontrol edildikten sonra hazne yerine konarak pompa çalıştırılır ve vakumun istenen değere gelmesi beklenir. Vakum istenen değere ulaşıncaya kadar hidrojen vanası uygun miktarda açılarak vakum ortamına verilir. Daha sonra güç

kaynağı belirlenen güç konumuna getirilerek işlem başlatılır. İstenilen sıcaklığa ulaşıncaya nitrürleme süresi başlatılır.

Plazma nitrürasyon işleminde kullanılan deney parametreleri Çizelge 8.2' de verilmiştir.

Çizelge 8.2 Plazma nitrürasyon işleminde kullanılan deney parametreleri

	Frekans		
	5 kHz	10 kHz	20 kHz
Sıcaklık	500 °C	500 °C	500 °C
Duty Cycle (Çalışma Oranı)	80%	80%	80%
İşlem Süresi	4 h	4 h	4 h
Çalışma basıncı	10 mbar	10 mbar	10 mbar
Uygulanan Gerilim ve Akım	650 V 0,25 - 0,29A	490 V 0,59 - 0,61 A	535 V 0,40 - 0,45 A
Vakum Basıncı	2,5 x 10 ⁻² mbar		

8.3 Metalografi Çalışmaları

Plazma ile nitrürasyon işleminden sonra numunelerin kesitleri alınarak sırasıyla 120, 240, 320, 400, 800, 1200 no lu SiC zımparalardan geçirildikten sonra 1 µ' luk alumina pasta ile parlatılmıştır. Parlatılan yüzeyler % 5' lik nitelle dağlanarak mikroyapıları ortaya çıkarılmıştır. Mikroyapılar, Olympus BX-60 marka optik mikroskop ile incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Tabaka kalınlıkları ise yine aynı optik mikroskoba takılı optik mikrometre yardımıyla ölçülmüştür. Tabaka kalınlığı, metalografi numunesinin dört yüzünden yapılan en az on ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

8.4 Mikrosertlik Ölçümleri ve XRD Analizi

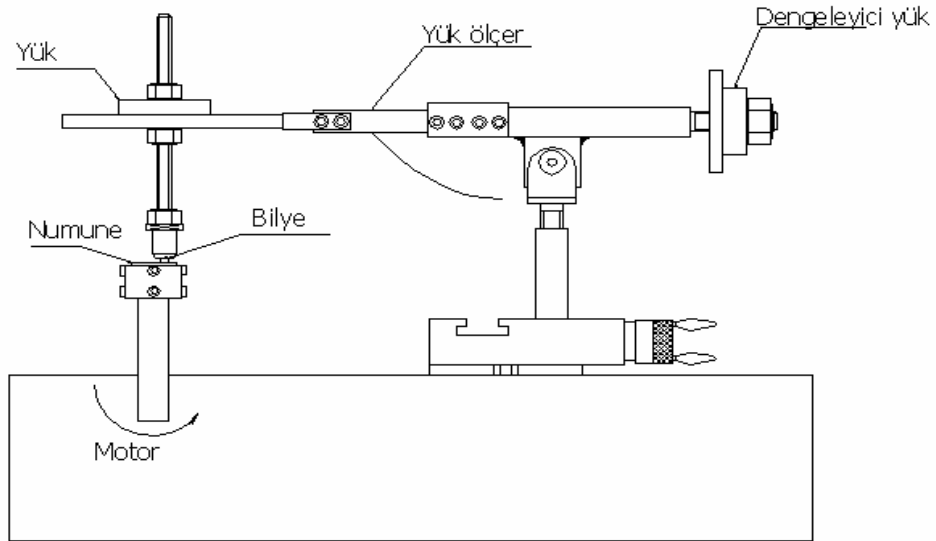
Mikrosertlik ölçümleri 50 gr yük altında ve 15 sn yükleme süresinde Shimadzu H MV-2L marka sertlik ölçme cihazı ile yapılmıştır. Difüzyon

derinliğini belirlemek için mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. İnal ve Robino plazma ile nitrürasyon sonrası sadece malzemenin yüzeyinden 0,7 mm mesafeye kadar sertleşme işlemi gerçekleştiğini dolayısıyla malzemenin iç kısmının sertliği aynı kaldığını saptamışlardır. Difüzyon tabakası derinliği, esas malzeme sertliğinin % 8-10 fazlasına ulaştığı mesafe olarak kabul etmişlerdir (İnal and Robino 1982). Yapılan ölçümlerde difüzyon derinliği, esas malzeme sertliğinin %10 fazlasına ulaştığı mesafe olarak kabul edilmiştir.

İyon nitrürlenmiş malzemelerde meydana gelen yapıları tespit etmek amacıyla, 5 kHz'lik deney numunesi, $\text{CuK}\alpha$ radyasyon kullanan X-Ray difraktometrede 20-90 derece 2θ açısı arasında taratılmıştır.

8.5 Aşınma Deneyleri

Pulsu plazma nitrürlenmiş AISI 52100 yatak çeliğinin tribolojik özelliklerini belirlemek için Şekil 8.1'de gösterilen bilye-disk aşınma cihazı kullanılmıştır.

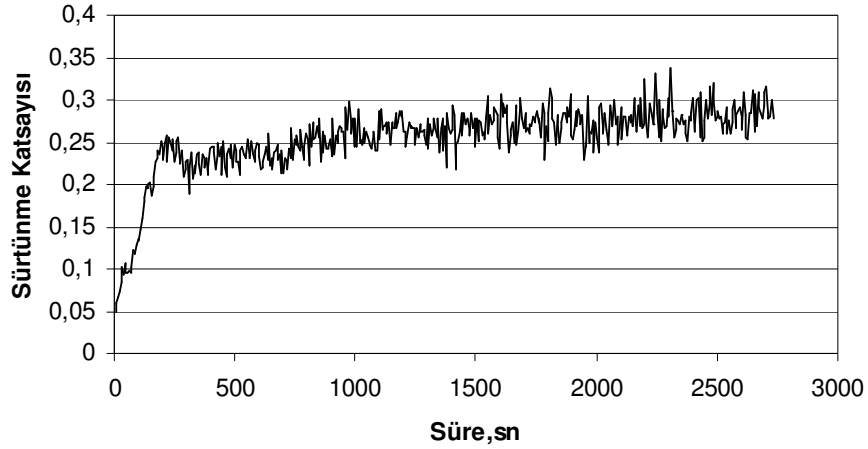


Şekil 8.1 Bilye disk aşınma cihazının şematik gösterimi

Numuneler oda sıcaklığında, 5 ve 20 N yük altında ve 0,3 m/s kayma hızında 1000 m aşındırılmıştır. Hazırlanan numuneler 8 mm çapında WC-Co bilyeye karşı kuru sürtünme şartlarında aşındırılmıştır. Aşınma hızı, Perthometer M2 marka pürüzlülük cihazından elde edilen aşınma izleri kullanılarak aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

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

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. Şekil 8.2 'de sürtünme katsayısının zamana bağlı olarak değişimi görülmektedir.



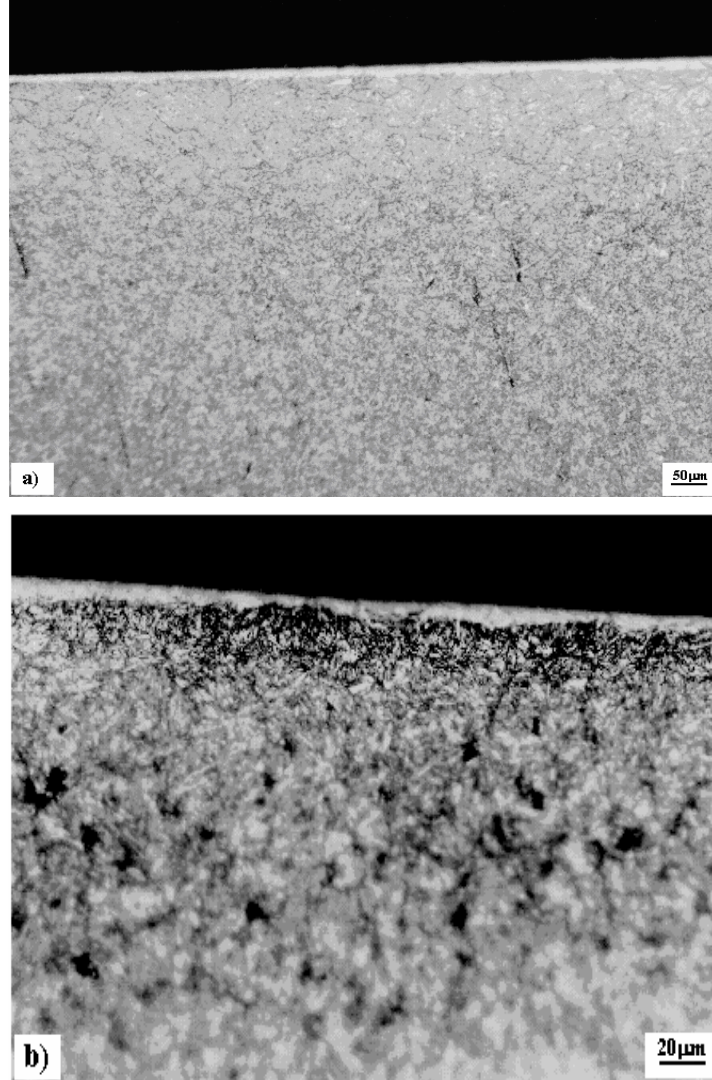
Şekil 8.2 Sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi

Sürtünme değerleri bilgisayarda 650 tane değere düşürülerek grafiği çizilmektedir ve Şekil 8.2' de olduğu gibi grafikler çizilerek sürtünme katsayısının ortalama değeri alınmıştır.

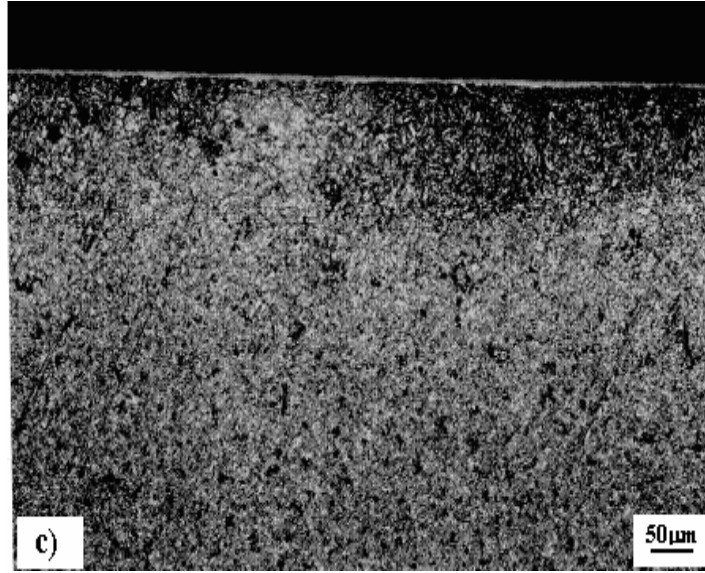
9. BULGULAR

9.1 Plazma ile Nitrürlenmiş AISI 52100 eliğinin Mikroyapısı

şekil 9.1'de 500 °C 4saat işlem süresinde ve %50-50 N₂/H₂ gaz karışım oranında 5,10 ve 20 kHz frekanslarda nitrürlenen AISI 52100 eliğinin iç yapısı görülmektedir.



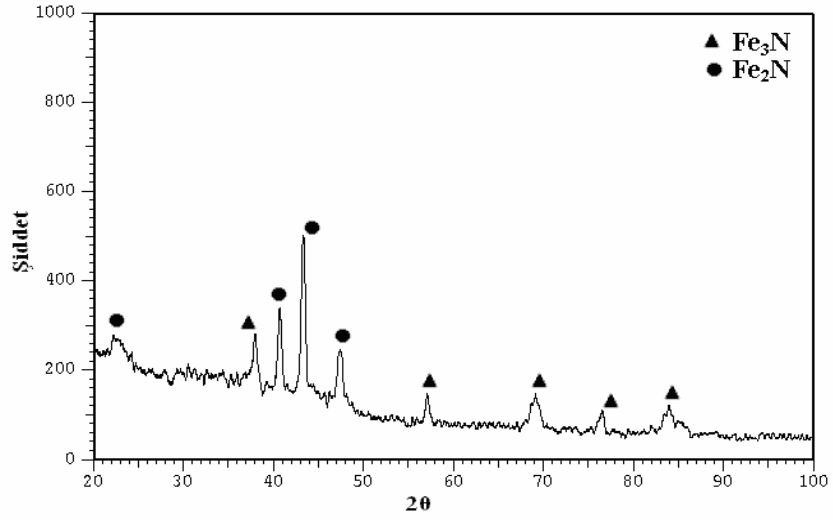
şekil 9.1 Plazma nitrürlenmiş AISI 52100 eliğinin mikroyapı fotoğrafları a) 5 kHz b) 10 kHz c) 20 kHz



c)

Şekil 9.1 (Devam) Plazma nitrülenmiş AISI 52100 çeliğinin mikroyapı fotoğrafları a) 5 kHz b) 10 kHz c) 20 kHz

Şekil 9.1' de görüldüğü gibi numunelerin en dış yüzeyinde 3,6-6 μm kalınlığında beyaz tabaka oluşmuş ve bu tabakanın altında oluşan difüzyon tabakası olarak adlandırılan yapı da 180-235 μm kalınlığındadır. 5 kHz frekasta nitrülenmiş numune üzerinde oluşan tabaka üniform bir şekilde yayılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi frekans artıkça beyaz tabaka kalınlığı azalmaktadır. 5 kHz frekansta beyaz tabaka kalınlığı en büyüktür. 5 kHz' lik deneyler sonucunda 6 μm , 10 kHz' lik deneyler sonucunda 3,6 μm , 20 kHz' lik deneylerde de yaklaşık 4 μm kalınlığında beyaz tabakalar elde edilmiştir. Şekil 9.2' de 5kHz frekansında nitrülenen malzemenin X-Ray difraksiyon analizi verilmiştir.

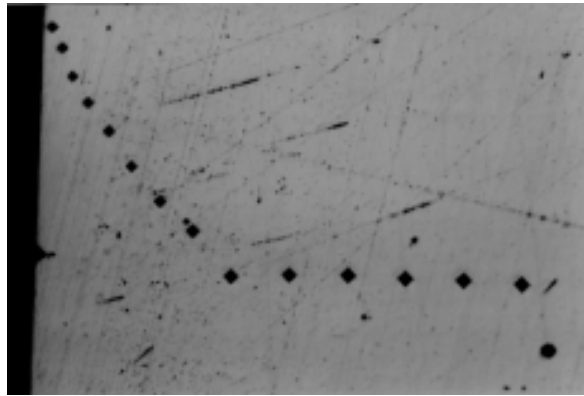


Şekil 9.2 5kHz frekansında nitrürlenmiş malzemenin X-Ray difraksiyon analizi

Şekil 9.2 incelendiğinde beyaz tabakanın Fe_2N ve Fe_3N fazlarının oluştuğu görülmektedir. Bu sonuç literatürle de uyum sağlamaktadır (Alsaran ve diğerleri 2000).

9.2 Yüzey Sertliği ve Difüzyon Tabakası Kalınlığının Belirlenmesi

Şekil 9.3 mikrosertlik deneyinin yapışını göstermektedir.



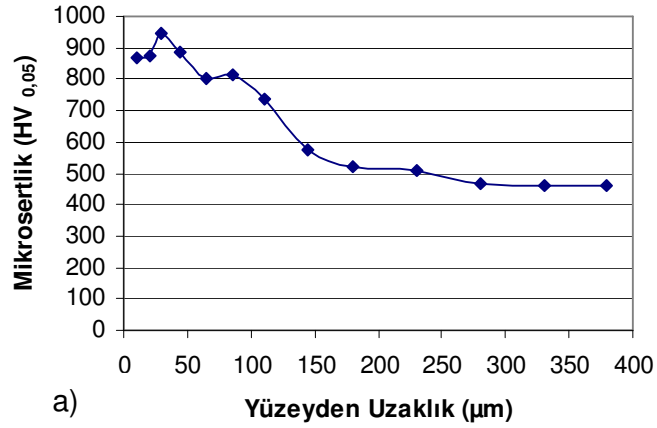
Şekil 9.3 Mikrosertlik deneyinin yapışını

Şekil 9.3'den de görüldüğü gibi numune yüzeyinden belirli mesafedeki uzaklıklardan ölçümler alınarak mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır.

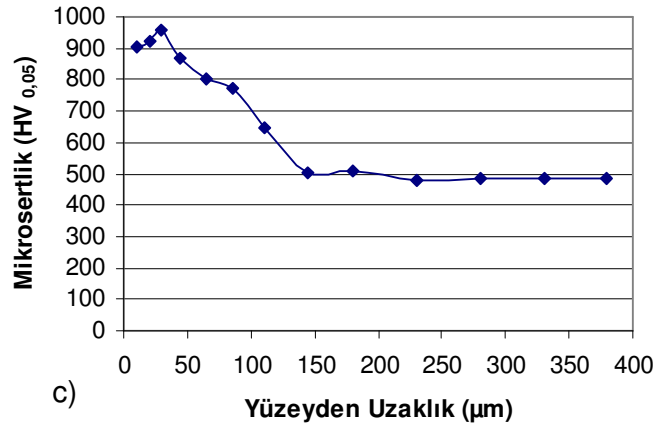
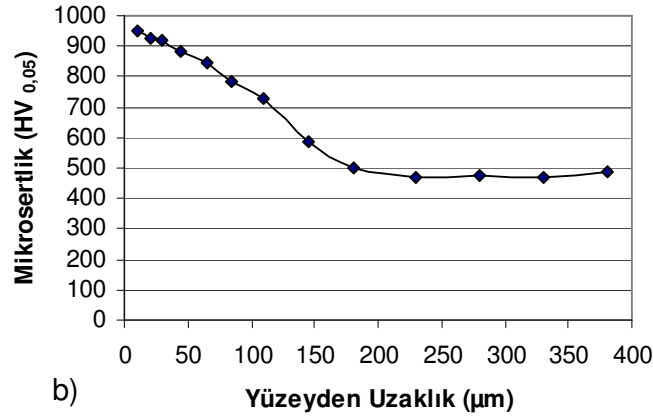
Plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak numunelerin yüzeyinde oluşan sertlik dağılımları Çizelge 9.1 de, grafik olarak gösterimleri ise Şekil 9.4'de verilmiştir.

Çizelge 9.1 Plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak numunelerin yüzeyinde oluşan sertlik dağılımları

Yüzeyden uzaklık, μm	Frekans		
	5 kHz	10 kHz	20 kHz
	Mikrosertlik, $\text{HV}_{0.05}$		
10	866	949	907
20	876	929	921
30	948	922	961
45	887	880	866
65	800	848	801
85	815	784	773
110	735	729	647
145	573	585	501
180	519	499	507
230	508	467	481
280	467	474	488
330	463	470	488
380	462	485	485



Şekil 9.4 Mikrosertlik grafiği a) 5 kHz b) 10 kHz c) 20 kHz



Şekil 9.4 (Devam) Mikrosertlik grafiği a) 5 kHz b) 10 kHz c) 20kHz

Şekil 9.4' de görüldüğü gibi beyaz tabakanın sertliği hemen hemen tüm frekanslarda aynıdır. Fakat difüzyon derinliği 5 kHz'de en yüksek 20 kHz'de ise en düşüktür. 5 kHz lik deneyler sonucunda 235 µm difüzyon tabakası, 10 kHz lik deneyler sonucunda 190 µm difüzyon tabakası, 20 kHz' lik deneylerde de yaklaşık 180 µm difüzyon tabakası kalınlığı elde edilmiştir. Wierzchon ve arkadaşları, Armco demiri ve 33H3MF çeliğini 10 ve 60 kHz frekanslar arasında puls plazmada nitrürlemişler ve bu çeliklerde oluşan nitrür tabakalarını incelemişlerdir. Artan puls frekansıyla yüzey sertliğinin düştüğünü saptamışlardır. Fakat bizim çalışmamızdan farklı olarak artan frekansla birlikte difüzyon tabakası kalınlığının da arttığını bulmuşlardır (Wierzchon et al 1997).

9.3 Plazma Nitrülenmiş AISI 52100 Çeliğinin Tribolojik Özellikleri

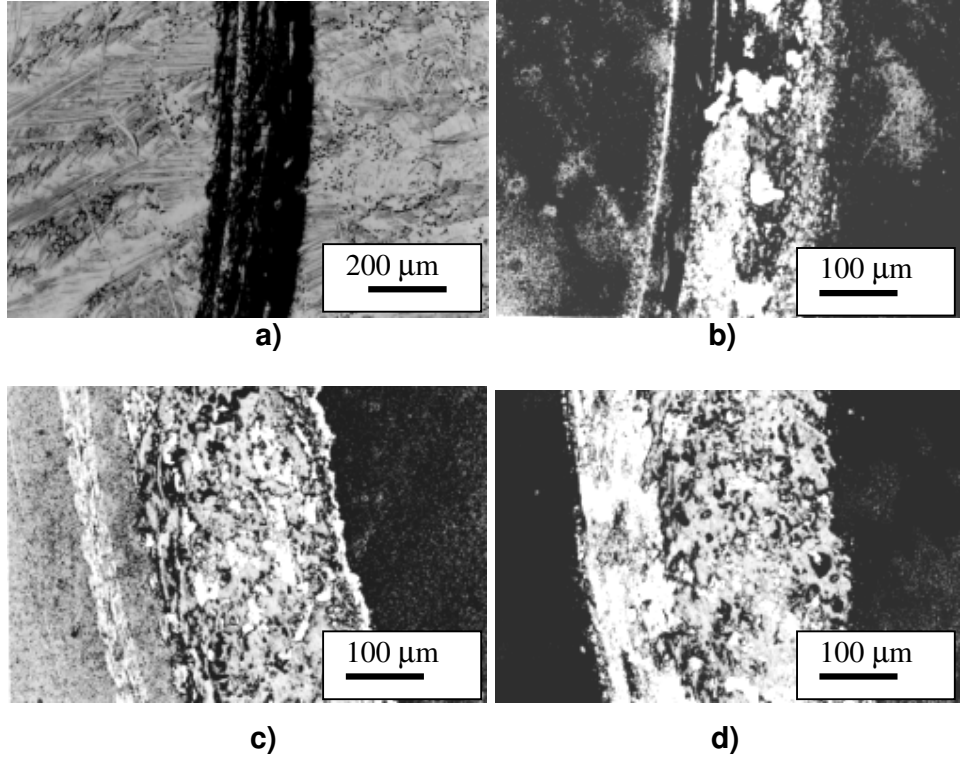
Plazma nitrüleme işlemi uygulanacak aşınma numuneleri metalografik olarak hazırlanarak, yüzey pürüzlülükleri Perthometer M2 marka yüzey pürüzlülüğü cihazında ölçülmüştür. Plazma nitrüleme işlemi uygulanan numunelerin aşınma deneyi öncesi R_a değerleri Çizelge 9.2'de verilmiştir.

Çizelge 9.2 Aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin aşınma öncesi pürüzlülük değerleri

Frekans (kHz)	Yüzey Pürüzlülüğü R_a (μm)
5	0,135
10	0,13
20	0,328

Çizelge 9.2 incelendiğinde 5 kHz ile 10 kHz deki R_a değerleri hemen hemen aynı olup 20 kHz deki pürüzlülük değeri ise diğerlerine oranla yaklaşık 2,5 kat büyük çıkmıştır. Jeong ve Ho-Kim plazma nitrülenmiş 316L paslanmaz çeliklerin yüzey karakteristiklerini ve nitrür tabakasında sıcaklık ve puls frekansının etkisini incelemiştir. Frekans değeri arttıkça mikrosertlik değerinde pek fazla değişiklik olmadığını görmüşlerdir. Ayrıca frekansın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını da saptamışlardır (Jeong ve Ho-Kim 2001).

Şekil 9.5 'de AISI 52100 çeliğinin aşınma deneylerinde oluşan izlerin optik mikroyapıları görülmektedir.



Şekil 9.5 AISI 52100 çeliğinin aşınma deneylerinde oluşan izlerin optik mikroyapı görüntüleri a) Nitrülenmemiş 5N yük b) 5 kHz 5N yük c) 10 kHz 5N yük d) 20 kHz 5N yük

Şekil 9.5'den de görüldüğü gibi nitrülenmemiş ve 5kHz'de nitrülenmiş numunelerin aşınma iz kalınlıkları hemen hemen aynıdır. Frekansın artmasıyla aşınma iz kalınlığında da artma gözlenmektedir. Şekil a'ya dikkat edildiğinde sürtünme ısısının yoğunluğundan dolayı daha fazla oksitlendiği ve bu oksit tabakasının aşınma hızını olumlu etkilediği görülür. 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 abrazyon aşınmaya doğru ilerlediği görülebilir.

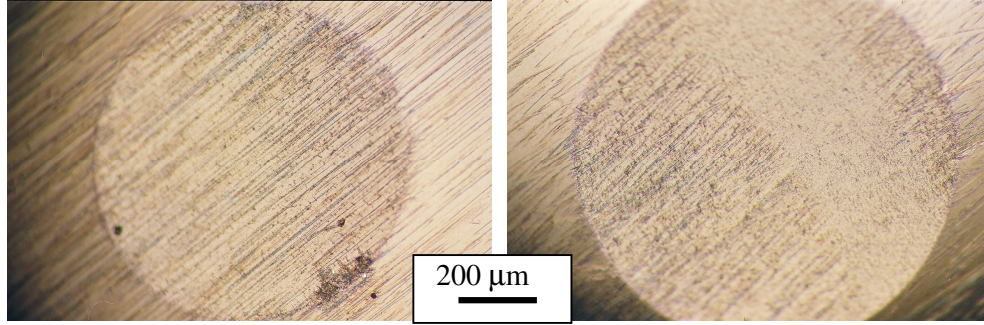
Çizelge 9.3 'te bilye üzerinde oluşan aşınma izlerinin çapı verilmektedir.

Çizelge 9.3 Bilye üzerinde oluşan aşınma izlerinin çapı

Uygulanan Yük (N)	Bilye üzerindeki aşınma iz çapı (μm)			
	Nitrürlenmemiş	5 kHz	10 kHz	20 kHz
5	Belirlenemedi	635	670	685
20	780	850	880	820

Çizelge 9.3'e göre en fazla aşınma nitrürlenmiş numunelerde görülmektedir. Nitrüleme frekansı ve yük arttıkça bilye üzerinde oluşan aşınma izleri de büyük olmuştur.

Şekil 9.6'da AISI 52100 çeliğinin aşınma deneylerinde kullanılan bilye üzerinde oluşan izlerin mikroyapısı görülmektedir.



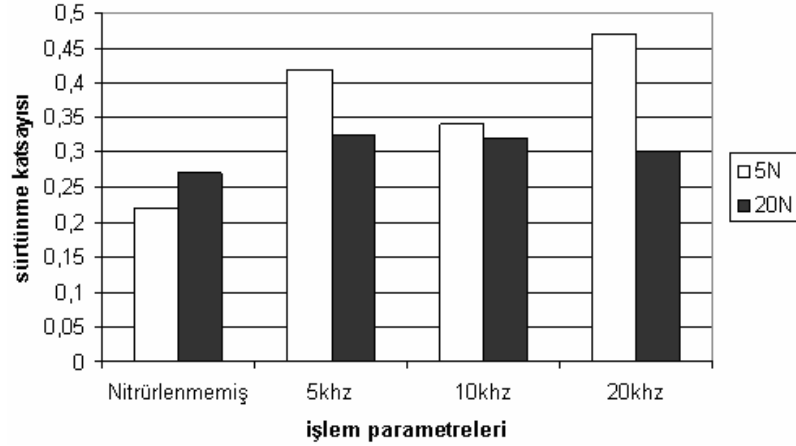
a)

b)

Şekil 9.6 AISI 52100 çeliğinin aşınma deneylerinde kullanılan bilye üzerinde oluşan izlerin mikroyapı görüntüleri a) 20 kHz 5N b)20 kHz 20N

Şekil 9.6 'den görüldüğü gibi yükün artmasıyla birlikte bilye üzerinde oluşan iz çapı da büyümektedir.

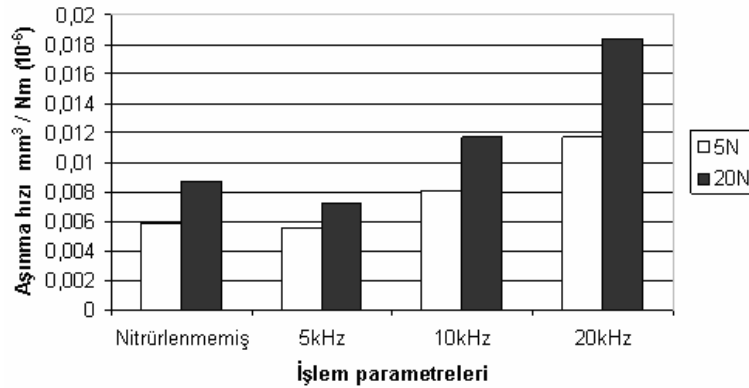
Şekil 9.7 'de sürtünme katsayısının işlem parametrelerine göre değişimi görülmektedir.



Şekil 9.7 Sürtünme katsayısının işlem parametrelerine göre değişimi

Şekil 9.7' de görüldüğü gibi nitritlenmemiş numune hariç diğerlerinde yükün artmasıyla sürtünme katsayısı da azalmıştır. Bunun nedeni bilye-disk ara yüzeyinde kopma ve kırılma sonucu oluşan partiküllerin sürtünme kuvvetini değiştirmesi veya bilyenin aşınması neticesinde temas alanının artarak birim alana gelen yükün düşmesi olabilir. Sürtünme katsayısının nitritlenmemiş numunede en düşük olduğu görülmektedir.

Şekil 9.8' de aşınma hızı ile işlem parametrelerinin ilişkisi verilmektedir.



Şekil 9.8 Aşınma hızı, işlem parametreleri ilişkisi

Şekil 9.8' de görüldüğü gibi 5 kHz' de nitritlenmiş ve nitritlenmemiş numuneler hemen hemen aynı aşınma hızına sahiptir. Artan yük ve frekansla birlikte aşınma hızı da artmıştır. Bu olay, 10 ve 20 kHz'lerde nitritli tabakanın nispeten az olması ve daha çabuk kırılması neticesinde abrazif aşınmanın daha erken başlamasından dolayı olabilir.

10. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

10.1 Sonuçlar

Puls plazma nitrülenmiş AISI 52100 yatak çeliği üzerinde yapılan incelemelerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Plazma ile nitürasyon işlemi sonrası malzeme yüzeyinde beyaz tabaka ve difüzyon tabakası olarak adlandırılan iki farklı yapı oluşmuştur. Plazma ile nitürasyon parametrelerine göre Fe_2N ve Fe_3N fazlarını içeren beyaz tabaka kalınlığı 3,6-6 μm arasında değişirken bu yapının altında oluşan difüzyon tabakası kalınlığı ise 180-235 μm arasındadır. Difüzyon tabakası kalınlığı en yüksek olan değer 5 kHz lik deneyler sonucunda elde edilmiştir
- Mikrosertlik değeri, hemen hemen tüm frekanslarda aynı çıkmıştır ve frekansın değişmesiyle mikrosertlik değerinin etkilenmediği sonucuna varılmıştır.
- 5 kHz' de nitrülenmiş numuneler nitrülenmemiş numuneyle hemen hemen aynı aşınma hızına sahiptir. Artan yük ve frekansla birlikte aşınma hızı da artmıştır.
- Bilye üzerinde oluşan aşınma izi artan frekansla birlikte büyümüştür. Buradan gevrek olan beyaz tabakanın kırılmasıyla ortaya çıkan partiküller nedeniyle abrazif ve delemantasyon aşınması gerçekleşmiştir sonucuna varılabilir.

10.2 Öneriler

- X-ışını analizleri 10 ve 20 kHz'lik deneylere de yapılarak oluşan yapıların incelenmesi aşınma hızlarını yorumlamada faydalı olabilir.
- Pulsun haricinde DC plazma nitürleme yapılarak puls nitürleme ile plazma nitürleme arasındaki fark görülebilir.

- Bu çalışmaya dayanarak farklı sıcaklıklarda plazma nitrürleme ve farklı kayma hız ve yüklerinde aşınma deneyleri yapılarak plazma nitrülemeye puls etkisi daha ayrıntılı incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Alsaran, A., Çelik, A., Çelik, C., 2002 a, "Determination of the optimum conditions for ion nitriding of AISI 5140 Steel", Surface and Coatings Technology, 1 March, Vol. 160 pp. 219–226.
- Alsaran, A., Çelik, A., Karakan, M., 2005 " Structural, Mechanical and Tribological Properties of Duplex – Treated AISI 5140 Steel", Materials Characterization.
- Alsaran, A., Karakan, Mehmet., Çelik, A., 2002 b, "The Investigation Of Mechanical Properties Of İon-Nitrided AISI 5140 Low-Alloy Steel", Materials Characterization, 8 March, Vol.48, pp. 323– 327.
- Anders, A., 2004 "Fundamentals of Pulsed Plasmas for Materials Processing"., Surface and Coating Technology, Vol.183, pp.301-311.
- Arslan, O., 2001, "Plazma Nitrürleme Isıl İşleminin Makina Parçalarının İçyapı ve Mukavemet Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Corengia, P., Ybarra, G., Moina, C., Cabo, A., Broitman, E., 2004, "Microstructure and corrosion behaviour of DC-pulsed plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel", ,Surface & Coatings Technology, 27 March, Vol. 187, pp. 63– 69.
- Corengia, P., Ybarra, G., Moina, C., Cabo, A., Broitman, E., 2005, "Microstructural and Topographical Studies of DC-Pulsed Plasma Nitrided AISI 4140 Low-Alloy Steel", Surface & Coatings Technology, Vol.200, 20 April, pp. 2391– 2397.
- 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.
- Çelik, A., Alsaran, A., Karakan, M., " Plazma İle Termokimyasal Yüzey İşlemleri", Mühendis ve Makine, Sayı:510, Temmuz 2002.
- Çelik, A., Karakan, M., Alsaran, A., 2000, " Gaz Karışımlarının İyon Nitrürleme Üzerine Etkisinin Araştırılması", DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Mayıs Cilt: 2, Sayı:2.
- Dirik, F. M., 1998 "8620 Çeliğine Uygulanan İyon Nitrasyonu", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Elder, J. E., Thamburaj, R., Patnaik, P. C., 1988, "Optimising Ion Implantation Conditions for Improving Wear, Fatigue and Fretting Fatigue of Ti-6Al-4V", Internationals Materials Reviews, Vol. 33, No. 6, pp. 289-312.
- Gavgalı, M., Çelik, A., Alşaran, A., Totik, Y., 2002 "İyon Nitrüleme İşleminin AISI 5140 Çeliğinin Burulma Özelliklerine Etkisi Üzerine Bir Çalışma", Mühendis ve Makine , Nisan, Sayı:507.
- Holberg, K., and Matthews, A., 1994, "Coatings Tribology- Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering", Elsevier Science Publications, Amsterdam.
- http://www.eltro.co.uk/Pulsed_plasma.htm, 04.05.2006
- İnal, O.T. and Robino, C.V., 1982, "Structural Characterization Of Some Ion-Nitrided Steels", Thin Solid Films, Vol.95, pp.192-207.
- Jeong, B.Y., and Ho-Kim, M., 2001 "Effects Of Pulse Frequency And Temperature On The Nitride Layer And Surface Characteristics Of Plasma Nitrided Stainless Steel"., Surface and Coatings Technology, Vol.137, pp.249-254.
- Jeong, G. H., Hwang, M. S., Jeon, B. Y., Kim, M. H., Lee, C., 2000, "Effects Of The Duty Factor On The Surface Characteristics Of The Plasma Nitrided And Diamond – Like Carbon Coated High Speed Steel", Surface and Coatings Technology Vol.124, pp. 222–227.
- Karadeniz, S., 1990, " Plazma Tekniğı", TMMOB, Ankara.
- Karaoğlu, S., Karadeniz, S., Karaoğlu, Ç., 2001. " Plazma Nitrülenmiş Az Alaşımli Bir Çeliğın Aşınma Davranışının İncelenmesi", DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Ekim Cilt: 3, Sayı:3.
- Kayalı, S.,1997, "T.M.M.O.B. Metalurji Mühendisleri Odası Hasar Analizi Seminer Ders Notları" 07-11 Nisan, İstanbul, s. 5.1-5.8
- Kunosic, A., Trifunovic, J., Durisic, Z., 2004, "Influence of Pulsed Plasma Duty Cycle on Nitriding of Some Steel Grades", 22nd Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, National Park Tara, Serbia and Montenegro, 23-27 August,
- Menthe, E., Bulaka, A., Olfe, J., Zimmermann, A., Rie, K.-T., 2000, "Improvement of the mechanical properties of austenitic stainless steel after plasma nitriding", Surface and Coatings Technology, Vol.133-1134, pp. 259-263

- Molinari, A., Straffelini, G., Tesi, B., Bacci, T., Pradelli G., 1997 "Effects of load and sliding speed on the tribological behaviour of Ti-6Al4V plasma nitrided at different temperatures", *Wear* Vol. 203 204 pp. 447-454.
- Podgornik, B., and Vizintin, J., 2001 "Sliding and Pitting Wear Resistance of Plasma and Pulse Plasma Nitrided Steel", *Surface Engineering* Vol.17, No.4.
- Podgornik, B., Vizintin, J., Leskovsek V., 1998 "Tribological Properties Of Plasma And Pulse Plasma Nitrided AISI 4140 Steel", *Surface and Coatings Technology*, Vol.108 -109, pp. 454-460.
- 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*, Vol. 249, pp. 254-259.
- Suh, N.P., 1973, "The Delamination Theory of Wear", *Wear*, Vol. 25, pp. 111-124.
- Şakar, G., 1998, "İyon nitürasyon deney düzeneğinin imali ve uygulanması", Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Wierzchon, T., Rudnick, J., Hearing, M., and Niedbala, R., 1997 "Formation and properties of nitrided layers produced in pulsed plasma at a frequency between 10 and 60 kHz", *Vacuum*, Vol. 48, No. 6, pp. 499-502.
- Yong M. K., Jong U. K., Jeon G. H., 2002 "Investigation on the pulsed DC plasma nitriding with optical emission", *Surface and Coatings Technology*, 151 –152 pp. 227–232

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sűresince benden bilgi ve deneyimlerini hiçbir zaman esirgemeyen tez danıőmanım ve deęerli hocam Yrd. Doç. Dr. Őűkrű TAKTAK'a sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Tez çalıőmamda buldukları katkılarından dolayı, Arő. Grv. İbrahim GŪNEŐ'e, Arő. Grv. Yusuf KAYALI'ya, Teknisyen Birol EROL'a, Yűksel YILMAZ'a teőekkűrlerimi bir borç bilirim.

Bu tez çalıőmasını destekleyen TŪBİTAK'a teőekkűrlerimi sunarım.

Ayrıca tűm űđrenim hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme teőekkűr ederim.

ÖZGEÇMİŞ

26.07.1982 yılında Afyonkarahisar ilinde doğan Şükrü ÜLKER, ilköğretimini Kazım Özer İlkokulu ve Hacı Ahmet Özsoy Ortaokulu'nda tamamladı. Ortaöğretimini Afyonkarahisar Merkez Endüstri Meslek Lisesi Tesviye Bölümü'nde tamamladı. 1999 yılında Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi, Talaşlı Üretim Öğretmenliği Ana bilim Dalı'nı kazanarak 2003 yılında bu programdan mezun oldu. 2004 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisansa başladı. 2006 yılında yüksek lisansını tamamladı.