



## PLAZMA NİTRÜLENMİŞ AZ ALAŞIMLI BİR ÇELİĞİN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

### (*INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR OF A PLASMA NITRIDED LOW ALLOY STEEL*)

Serdar KARAOĞLU\*, Süleyman KARADENİZ\*, Çiçek KARAOĞLU\*

#### ÖZET/ABSTRACT

Plazma nitürasyonu ile yüzeyi sertleştirilen, az alaşimli AISI 5140 çeliğinin kuru sürtünmeli şartlarda aşınma deneyleri yapılmıştır. Plazma nitürasyon işleminde, süre, sıcaklık ve ortamın azot yüzdesi işlem değişkenleri olarak kullanılmıştır. Yüzeyi sertleştirilen numuneler; optik ve taramalı elektron mikroskobisi ve mikrosertlik ölçümleriyle incelenmiştir. Numunelerin aşınma direnci, pim-halka deney düzeneği ile tespit edilirken, aşınma kaybı, sürtünme mesafesine bağlı olarak ölçülmüştür. Aşınmış yüzeyler ve aşınma artıkları mikroskobik olarak incelenerek aşınma mekanizmaları belirlenmiştir. Plazma nitürasyonu ile aşınma dayanımında önemli artışlar elde edilmiştir. Maksimum aşınma dayanımı için, proses parametrelerinin, ince kompond (beyaz) tabaka, yüksek yüzey sertliği ve kalın difüzyon tabakası verecek şekilde optimize edilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

*Dry sliding wear tests were carried out on a plasma nitrided AISI 5140 low alloy steel. Plasma nitriding process variables included time, temperature, and nitrogen partial pressure of nitriding atmosphere. The plasma nitrided samples were characterized using microhardness techniques, optical and scanning electron microscopy. A pin-on-ring wear testing machine was utilized to assess the wear resistance of treated samples. The resulting wear loss was monitored as a function of sliding distance. Worn surfaces and collected wear debris were analyzed and dominant wear mechanisms were identified using microscopy techniques. It was found that the wear resistance improved considerably after the plasma nitriding process. However, for maximum resistance to wear, process parameters should be chosen so as to minimize the compound layer thickness and maximize the surface hardness and case depth.*

#### ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

Kuru sürtünme, Plazma nitürasyonu, Mikrosertlik, Aşınma yüzeyi  
*Dry sliding, Plasma nitriding, Microhardness, Worn surface*

## 1. GİRİŞ

Plazma destekli yüzey sertleştirme işlemlerinden olan plazma nitrürasyonu çevresel olarak temiz bir teknolojidir (Hombeck ve Bell,1997). Modern bir yüzey sertleştirme yöntemi olan plazma nitrürasyonu, günümüzde çelik, dökme demir, titanyum ve sinterlenmiş ürünlerde geniş ölçüde kullanılmaktadır.

Geniş bir aralıkta hassas olarak ayarlanabilen pek çok parametresiyle plazma nitrürasyonu, konvansiyonel nitrürasyonla elde edilemeyen yapı ve özellikleri sağlar. Bu sebepten, plazma nitrürasyonu bilinen nitrürasyon yöntemlerine göre pek çok üstünlüğe sahiptir (Edenhofer, 1974).

Plazma nitrürasyonu işlemi azot-hidrojen gaz karışımında vakum ortamında gerçekleştirilir. Yüksek gerilim altında iyonize olan gaz iletken hale gelir. Pozitif yüklü gaz iyonları katodik (negatif kutba bağlanan) iş parçası tarafından çekilirler. İyonların iş parçası yüzeyini bombardıman etmesiyle nitrüleme işlemi gerçekleşir (Edenhofer, 1976).

Azot difüzyonuyla, iş parçası yüzeyinde, metalografik incelemede kolayca ayırt edilebilen iki tabaka oluşur. Yüzeydeki azotça zengin tabaka  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N ve  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N gibi demir-azot bileşiklerinden oluşur. Sadece birkaç mikron kalınlığında olan bileşik tabaka, dağlamadan etkilenmeyip, metalografik incelemede beyaz görüldüğü için “beyaz tabaka” olarak da anılır. Bileşik tabaka, oldukça kalın olan “difüzyon tabakası” tarafından desteklenir. Bu tabakada azot, eriyik olarak veya bazı özel nitrürler halinde bulunur.

Yapılmış olan pek çok çalışmaya rağmen plazma nitrürlenmiş çeliklerin aşınma mekanizması tam olarak anlaşılmış değildir. Bell ve Sun, numunelerin, şiddetli aşınma olmaksızın ağır yüklere dayanabilmesi için kalın ve mukavim bir difüzyon tabakasının gerekli olduğunu gösterdiler (Bell ve Sun, 1990). Aynı az alaşımlı çelik üzerinde, benzer işlem şartlarının kullanıldığı bir başka çalışmada kuru ve abrazif içerikli yağlamalı şartlarda malzeme kaybını azaltmak için, yüksek sertlik ve kalın difüzyon tabakası gerekliliği ifade edilmiştir (Karamış, 1991). Kalın bileşik tabakaya sahip olan bazı numunelerin, kuru sürtünme şartlarında diğerlerinden az aşınması bu çalışmanın şaşırtıcı sonuçlarından biridir. Oldukça gevrek olan, çok fazlı ve kalın bir bileşik tabakanın, malzemelerin aşınma hızını özellikle ilk aşınma safhasında arttırdığı çeşitli deneysel çalışmalarda ifade edilmiştir (Sun ve Bell, 1991; Karamış, 1992; Karamış, 1993). Fakat, bu genel bir kaide olmayıp, örneğin Karamış’da olduğu gibi, bazı karşıt örnekler de mevcuttur (Karamış, 1991). Peng bir sıcak iş takım çeliğinin abrazif aşınma davranışını incelediği çalışmasında, plazma nitrürasyonu ile sertleştirilen yüzeylerin, çalışmada uygulanan diğer yüzey işlemlerine göre daha iyi sonuç verdiğini görmüştür (Peng, 1989). Plazma nitrürlenmiş martenzitik bir paslanmaz çeliğin, farklı temas şartlarında aşınma davranışının incelendiği bir çalışmada, benzer sıcaklıklarda daha kısa süre işlem gören numunelerin daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür (Sun vd., 1994).

Bu çalışmanın amacı, plazma nitrürasyonu ile yüzeyi sertleştirilen AISI 5140 az alaşımlı çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi ve yüksek bir aşınma direnci için optimum proses parametrelerinin tespit edilmesidir. Çalışma, genelde plazma nitrürlenmiş numunelerin aşınma davranışına odaklanmıştır. Aşınma direnci ile yapısal özellikler arasındaki ilişkinin araştırılması için, malzemenin yüzey sertleşme karakteristiği, nitrürlenmiş tabakaların kompozisyonu ve yapısı da incelenmiştir. İlk önce, farklı süre, sıcaklık ve gaz kompozisyonu parametreleri kullanılarak plazma nitrürasyonu işlemi uygulanan numuneler, daha sonra optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopisi yöntemleri ile incelenmiştir. Ardından, numunelerin sertlik profillerinin çıkarılması için mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Son olarak da, plazma nitrürasyonu parametrelerinin, numunelerin aşınma performansına

etkilerini belirlemek için, kuru sürtünme şartlarında pim-halka aşınma deneyleri uygulanmıştır. Analiz sonuçlarına bağlı olarak, proses parametreleri ile numunelerin aşınma özellikleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 2.1. Malzeme

Deneyde malzemesi olarak, kimyasal analiz sonuçları Çizelge-1’de verilen AISI 5140 (DIN 41Cr4) çeliği kullanılmıştır. 850 °C de 1/2 saat tavlanylıp, yağda su verildikten sonra 580 °C de 1 saat temperlenen 10mm çapındaki malzemeler oda sıcaklığına kadar havada soğutulmuştur. Isıl işleminden sonra, talaşlı işleme ve taşlama ile numuneler imal edilmiştir.

Su verilip temperlenen numunelerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve uzama yüzdesi gibi mekanik özellikleri sırasıyla: 992 MPa, 1087 MPa, ve %14 olarak ölçülmüştür.

Çizelge1. Malzemenin kimyasal kompozisyonu (AISI 5140)

Alaşım Elemanı	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Al
Miktar (%)	0.46	0.22	0.77	0.03	0.02	1.11	0.08	0.43

### 2.2 Plazma Nitrürasyonu İşlemleri

Plazma nitrürasyon işlemleri laboratuvar tipi bir ünite de yapılmıştır. Cihaz elektrik ark akımının direkt kontrolünü yapamadığı için, tüm işlemlerde, nitrürlenmiş numunelerin yüzey alanları sabit tutulmuştur. Yani akım yoğunluğu, akım ile orantılıdır. Gerilim ve akım yoğunluğu aralıkları gaz kompozisyonu ve işlem sıcaklığına bağlı olarak 400-600 V ve 2.5-4.0 mA/cm<sup>2</sup> dir. İşlem değişkenleri olarak kullanılan; süre, sıcaklık ve gaz kompozisyonunun birbirlerine göre değişimleri Çizelge 2’de görülmektedir.

Çizelge2. Plazma nitrürasyonu işlem şartları

GRUP	SÜRE (h)	SICAKLIK (°C)	AZOT (%)
1.500.20	1	500	20
4.500.20	4	500	20
12.500.20	12	500	20
4.450.20	4	450	20
4.550.20	4	550	20
4.500.60	4	500	60

### 2.3 Mikrosertlik ve Mikroskopik Çalışmaları

Mikroskopik inceleme ve mikrosertlik ölçümleri için 7mm çapında, 15mm boyunda numuneler hazırlanmıştır. Polyester kalıba alınan numunelerin yüzeyleri standart yöntemlerle parlatılıp %2’lik nital ile dağlanmıştır. Optik ve taramalı elektron mikroskopisi ile oluşan yapılar incelenmiş, bileşik tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. 80.10<sup>-3</sup> kg yük uygulanarak gerçekleştirilen mikrosertlik ölçümleri ile numunelerin sertlik profilleri çıkarılmış böylece ulaşılan sertlik seviyeleri ve sertleşme derinlikleri tespit edilmiştir.

## 2.4 Aşınma Deneyleri

Aşınmaya karşı maksimum direnç için oluşturulması gereken mikroyapı, bir başka deyişle optimum işlem parametrelerinin belirlenmesi amacıyla bir dizi aşınma deneyi yapılmıştır. Karşılaştırma amacıyla işlem görmemiş numunelere de aşınma deneyleri uygulanmıştır. Tüm deneyler kuru sürtünme şartlarında, oda sıcaklığında, pim-halka deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çapı 60 mm, genişliği 16 mm olan aşındırıcı halkalar, yağda su verilerek  $60\pm 2$  HRC sertliğine ulaştırılan AISI 4140 malzemelerden imal edilmiştir. Halkaların silindirik kısımları taşlanarak  $R_a=0,20$   $\mu\text{m}$  değerinde yüzey kalitesine ulaşılmıştır. 7 mm çapında, 12,7 mm boyunda silindirik numuneler olarak işlenen pimlerin alın yüzeyleri 600'lük SiC kağıt zımpara ile düzeltilmiştir.

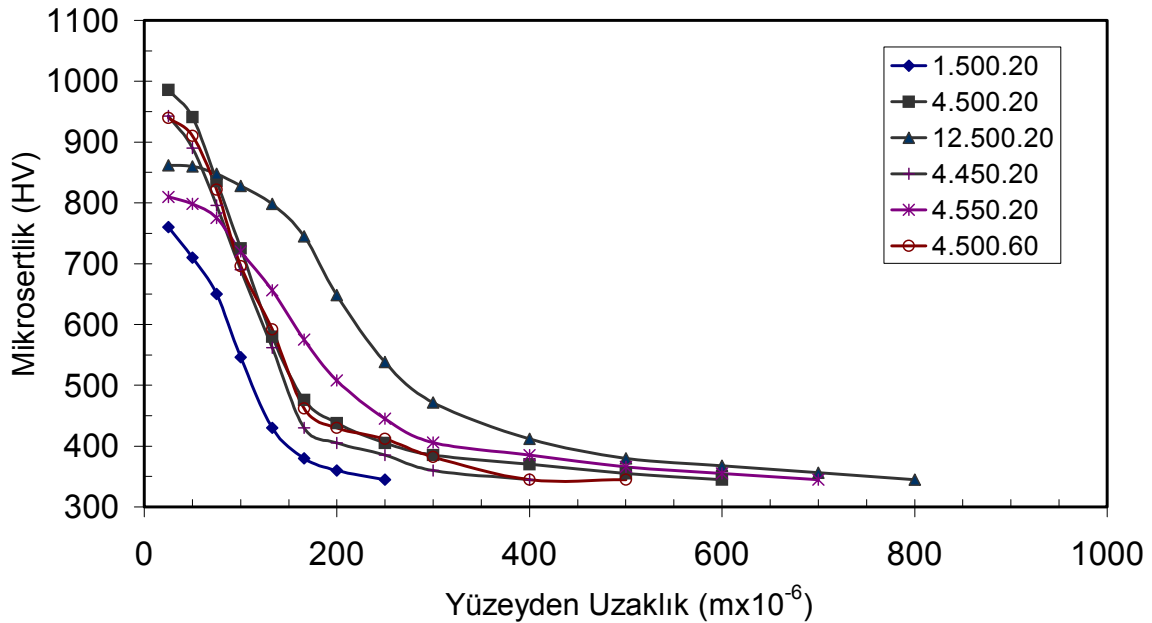
Deneyler 40N'luk bir normal yük ( $P_N$ ), 0,5 m/s'lik kayma hızı uygulanarak 2000 m kayma mesafesi boyunca yapılmıştır. Pimler her 400 m lik kayma mesafesinde  $\pm 10^{-4}$  g doğrulukla tartılarak aşınma kütle kaybı cinsinden ölçülmüştür. Halka ve pim deney öncesi, pimler ayrıca her tartım öncesi ve sonrası alkol ile temizlenmiştir. Deneylerden sonra, aşınma izleri ve aşınma artıkları mikroskopik tekniklerle incelenerek, işlem gören numunelerin aşınma davranışındaki değişimler araştırılmıştır.

## 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### 3.1 Malzeme Karakterizasyonu

Numunelerin yüzeylerinden itibaren sertliklerini gösteren mikrosertlik profilleri Şekil 1'de görülmektedir. Bileşik tabaka kalınlığı, sertleşme derinliği ve maksimum sertlik değerleri ise Çizelge 3'te verilmiştir.

Plazma nitrülenmiş tüm numunelerde önemli yüzey sertleşmesi sağlanmıştır. Maksimum sertlik seviyesi ve sertlik profillerinin şekli, plazma nitrülenmiş az alaşımlı çeliklerinkine benzer olup, difüzyon bölgesi ile sertleşmemiş çekirdek arasında keskin bir sınırın gözlemlendiği



Şekil 1. Plazma nitrülenmiş numunelerin sertlik profilleri

yüksek alaşımlı çeliklerinkinden oldukça farklıdır (Robino ve İnal, 1983; Chyou ve Shih, 1990; Miyamura vd., 1986; Sato vd., 1988).

Çizelge3. Maksimum yüzey sertliği, difüzyon tabakası ve bileşik tabaka kalınlıkları

Numune Grupları	1.500.20	4.500.20	12.500.20	4.450.20	4.550.20	4.500.60
Yüzey Sertliği (HV)*	760	986	862	943	810	940
Difüzyon Tabakası (µm)	166	320	496	247	424	306
Bileşik Tabaka (µm)	2,5	5,5	7	2	11	7,5

(\*Yüzeyin 25 µm altında ölçülen ortalama değerler)

Sertlik seviyesi, sertleşme derinliği ve bileşik tabaka kalınlığı işlem süresi ve sıcaklığı ile önemli değişim göstermektedir. En yüksek sertlik değerleri 500 °C'de 4 saat boyunca nitrürlenmiş numunelerde ölçülmüş olup, artan işlem süresi ve sıcaklığı için sertliğin azaldığı gözlenmiştir.

Yüzey sertliğinin zaman ve sıcaklığa bağlı olması, meydana gelen nitrür çökeltilerinin boyut ve dağılımının etkisine işaret etmektedir. Kısa işlem sürelerinde ve düşük sıcaklıklarda azot difüzyonu ve çökelti yoğunluğu düşük olacağından, elde edilen sertleşme de sınırlı kalmaktadır. Aşırı uzun süre ve/veya yüksek sıcaklıklarda işlem gören numunelerde, kaba çökeltiler yüzünden sertlikte düşme görülmektedir.

İşlem süre veya sıcaklığının artırılmasıyla azotun malzeme içinde yayılımını kolaylaştıracağından, oluşan difüzyon tabakasının kalınlığı da artmaktadır.

Kullanılan gaz karışımındaki azot miktarı ile sertlik seviyesi arasındaki açık bir ilişki görülmemektedir. Azotun artmasıyla difüzyon tabakasında hafif bir azalma meydana gelmektedir.

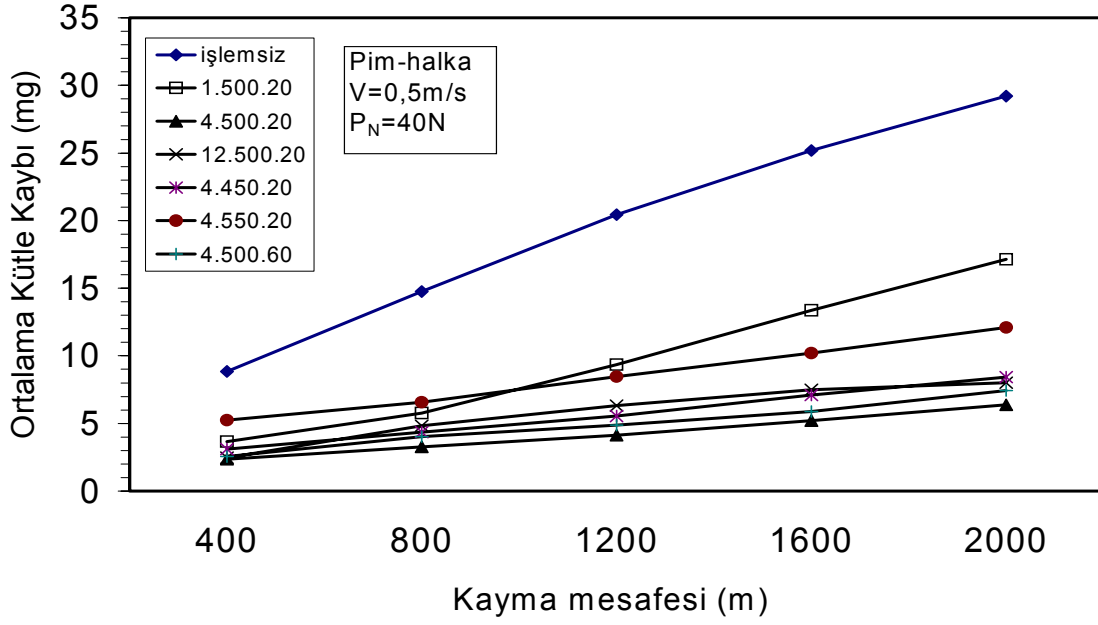
Çizelge 3'te görüldüğü gibi bu üç parametrenin artmasıyla bileşik tabaka kalınlığı artmaktadır. İşlem sıcaklığı bileşik tabaka kalınlığını belirleyen en önemli parametredir.

### 3.2 Aşınma Deney Sonuçları

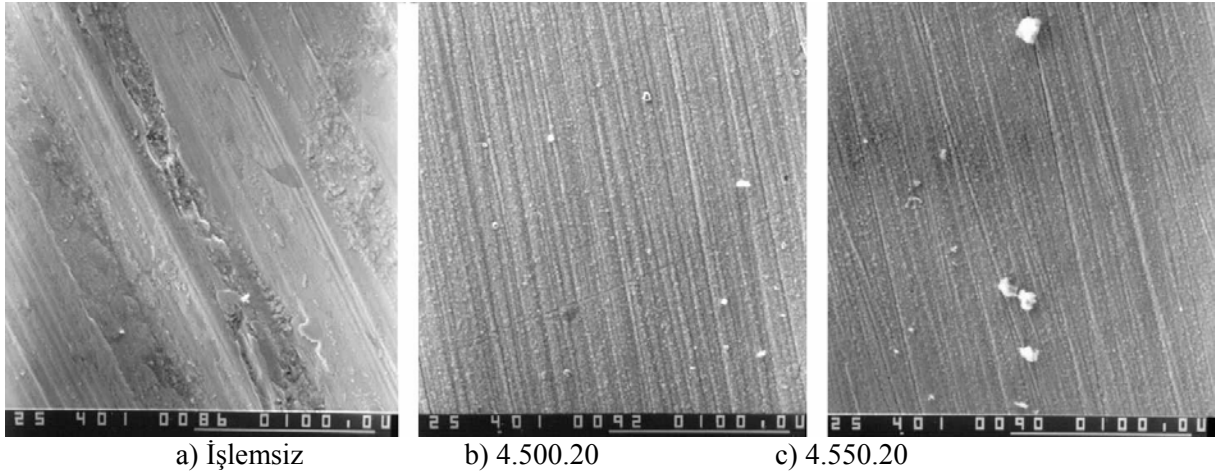
Plazma nitrürasyonu ile, malzemenin aşınma dayanımında, işlem parametrelerine bağlı olarak önemli artışlar elde edilebildiği, Şekil 2'deki aşınma eğrilerinden görülmektedir.

İşlem görmüş numuneler arasında 550 °C'de nitrürlenmiş olanlarda (4.550.20) en yüksek başlangıç aşınmasının (400 m sürtünme sonunda) meydana geldiği tespit edilmiştir. 2000 m sürtünme sonundaki toplam aşınma miktarının, en kısa süre işlem gören numunede (1.500.20) maksimum olduğu görülmektedir.

Söz konusu deney şartlarında işlem görmemiş numuneler, düşük sertlikleri sebebiyle kötü bir aşınma performansı sergilemiştir. Bu numunelerin aşınma yüzeyleri incelendiğinde şiddetli bir başlangıç aşınması, bunun bir sonucu olarak da metalik aşınma artıkları ve malzeme kaybı görülmüştür. Bu numunelerde kütle kaybı sürtünme mesafesiyle lineer olarak artmış ve daima işlem görmüş numunelerden yüksek olmuştur. İşlem görmemiş ve plazma nitrürlenmiş bazı numunelerin, 400 m sürtünme sonrası oluşan aşınmış yüzeyleri Şekil 3'de görülmektedir. Pimler üzerinde oluşan aşınma çizgileri, halkanın dönme doğrultusuna paraleldir. İşlem görmemiş numunede, bölgesel kaynakların olduğu adezyon aşınması, şiddetli bir başlangıç aşınması olduğunu göstermektedir (Şekil 3 a). Nitrürlenmiş numunelerin ise bazı aşındırıcı parçacıklar tarafından çizilerek abrazif aşınmaya maruz kaldığı görülmektedir (Şekil 3 b ve 3 c). Söz konusu partiküllerin, aşınmanın ilk safhasında, pürüzlerin kırılması sırasında numune yüzeyinden koparak ayrılan bileşik tabaka parçacıkları olduğu açıktır.



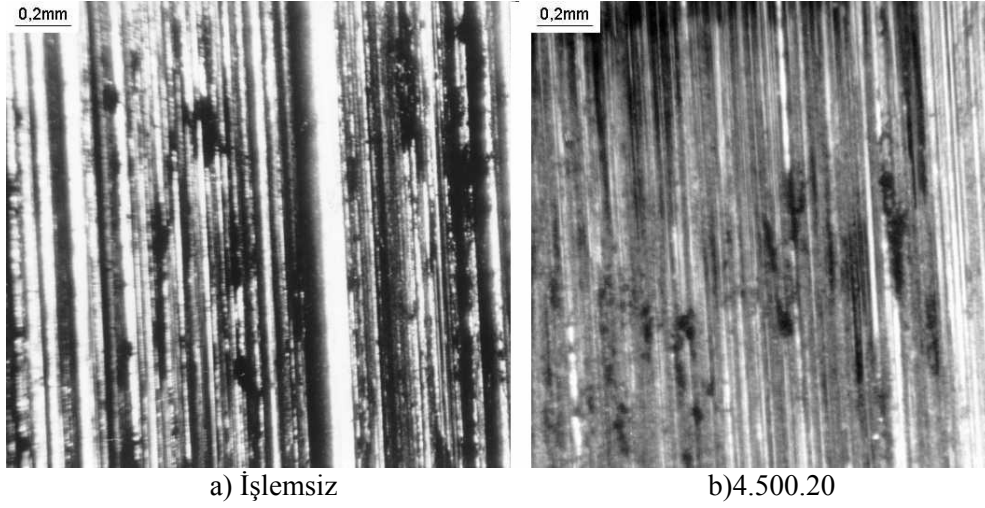
Şekil 2. Plazma nitrürlenmiş ve işlem görmemiş numunelerin aşınma eğrileri



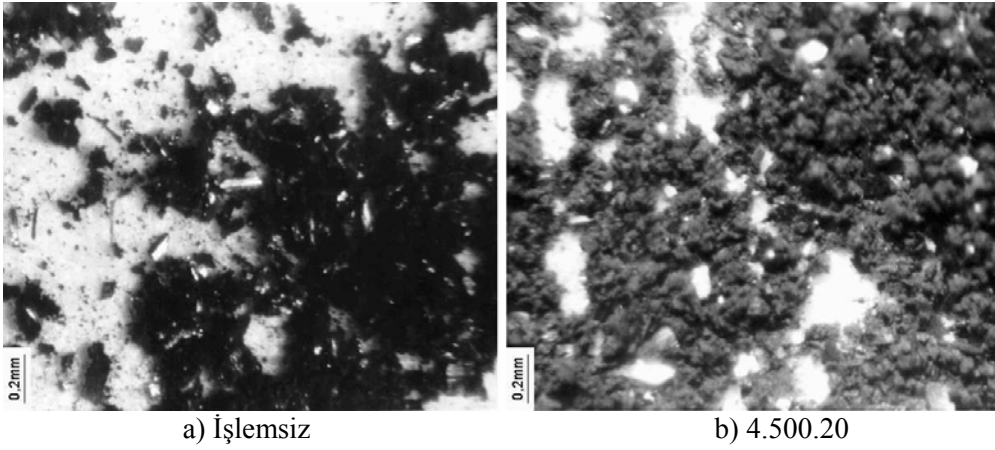
Şekil 3. Bazı numunelerin 400 metre kayma mesafesi ardından aşınma yüzeyleri

İşlem görmemiş ve yüzeyi sertleştirilmiş iki numunenin 2000m sürtünme yolundan sonraki aşınma yüzeyleri Şekil 4'te görülmektedir. Kaba ve derin aşınma çizgileri ile, şiddetli aşınma karakteristiklerine sahip olan işlem görmemiş numunede önemli miktarda plastik deformasyon oluşmuştur. Plazma nitrürlenmiş numunede ise çok daha düşük dereceli bir hasar ve plastik deformasyon göze çarpmaktadır. Daha düzgün, oksitlenmiş görünüşüyle bu numunede şiddetli olmayan, düşük hızlı bir aşınmanın karakteristikleri mevcuttur.

Optik mikroskop ile yapılan incelemelerde aşınma yüzeyi ve aşınma artıkları morfolojisinin aşınma mekanizmasıyla yakın ilişkisi olduğu görülmüştür. İşlem görmemiş bir numunenin, büyük ve ağırlıklı olarak metalik olan aşınma artıkları (Şekil 5-a), bu numunenin deney şartlarında şiddetli bir aşınmaya maruz kaldığını göstermektedir. Nitrürlenmiş bir numunenin aşınma artıklarında ise (Şekil 5-b), erken periyotlardan kalan iri parçacıklar ile toz halinde oksitler göze çarpmaktadır. Aşınma yüzeyinin oksitlenmiş görüntüsü ile toz halindeki oksit artıklar, nitrürlenmiş numunelerde şiddetli olmayan oksitleyici bir aşınmanın etkin olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 2000 m kayma mesafesinden sonra bazı numunelerin aşınma yüzeyleri



Şekil 5. Aşınma artıklarının yapısı

550 °C'de 4 saat nitrürlenmiş numunenin (4.550.20) özellikle deneyin ilk safhasında gösterdiği yüksek aşınma kaybı, bu numunenin sertliğinin düşük ve bileşik tabakasının oldukça kalın olmasının bir sonucudur (Çizelge 3). Kalın olan bileşik tabaka, kırılarak abrazyon parçacıkları ortaya çıkarmakta, böylece aşınma türü, adeziv aşınmadan, abrazyon aşınmaya dönüşmektedir. Sonuçta bileşik tabaka kalınlığının artması aşınma hızını da arttırmaktadır.

Bileşik tabaka kalınlığı dışında, numune sertliği de aşınma dayanımına etki etmektedir. Kalın bileşik tabaka ve düşük sertlik veren yüksek sıcaklıklar (550 °C) ile, yine düşük sertlik veren kısa işlem süreleri (1 saat) kullanılarak nitrürlenmiş numunelerin aşınma dayanımları göreceli olarak düşüktür.

Aşınma hızı açısından en önemli etken yüzey sertliğidir. Aynı şartlar altında minimum aşınma kaybının ölçüldüğü 500 °C'de 4 saat nitrürlenmiş numune (4.500.20) aynı zamanda yüzey sertliği en yüksek olan numunedir. 550 °C'de işlem gören numunenin yüksek aşınma kaybı göstermesinin bir sebebi de nispeten yumuşak olan malzemenin sert ve gevrek olan bileşik tabakayı destekleyecek kadar sağlam olmamasıdır.

Aşınma kayıpları ve malzeme mikroyapıları göz önüne alındığında, aşınma kayıplarının minimize edilmesi için, yüksek sertlik ve ince bileşik tabaka kombinasyonunun uygun olduğu sonucuna varılabilir.

#### 4. SONUÇLAR

Plazma nitrürasyon proses parametrelerine bağlı olarak AISI 5140 çeliğinin aşınma dayanımında önemli artışlar elde edilmiştir. En yüksek aşınma direnci, yüzey sertliği en yüksek olan numunelerde görüldü.

Yüksek sıcaklıkta işlem gören numunelerde oluşan kalın bileşik tabaka oldukça gevrek ve aşınmanın ilk safhasında bu tabakanın kırılmasıyla ortaya çıkan parçacıklar aşınma mekanizmasını adeziv aşınmadan abrazif aşınmaya çevirerek malzemenin aşınma hızını yükseltir. Böylece, aşınma dayanımı, artan bileşik tabaka kalınlığı ile azalır ve aşırı kalın bileşik tabaka plazma nitrürasyonunda bir hata olarak kabul edilebilir.

Bazı numunelerin nispeten düşük aşınma direnci göstermesinin sebepleri; kalın bileşik tabaka ve düşük sertliğe sebep olan yüksek işlem sıcaklığı ile yeterli sertlik artışı sağlamayan kısa işlem süresidir.

Malzeme kaybını azaltmak için, plazma nitrürasyon işlem parametreleri, kalın ve yüksek sertlikli bir difüzyon tabakası verirken, bileşik tabakanın aşırı büyümesini önleyecek şekilde seçilmelidir.

#### KAYNAKLAR

- Bell T., Sun Y. (1990): "Load bearing Capability of Plasma Nitrided Steel under Rolling Sliding Contact", *Surface Engineering*, V.6 (2), p.133-139.
- Chyou S.D., Shih H.C. (1990): "Structure and Electrochemical Properties of Plasma Nitrided Low Alloy Steel", *Mater Sci and Eng.*, V.A129 (1990), p.109-117.
- Edenhofer B. (1974): "Physical and Metallurgical Aspects of Ionitriding-Part2", *Heat Treatment of Metals*, V.1, p. 23-28.
- Edenhofer B. (1976): "The Ionitriding Process-Thermochemical Treatment of Steel and Cast Iron Materials", *The Metallurgist and Materials Technologist*, V.8, p. 421-426.
- Hombeck F., Bell T. (1997): "Environmentally Harmless Plasma Thermochemical Processes", *Surface Engineering*, V.7(1), p.45-52.
- İnal O.T., Robino C.V. (1982): "Structural characterisation of some ion nitrided steels", *Thin Solid Films*, 95, 195-207.
- Karamış M.B. (1991): "Friction and Wear Behavior of Plazma nitrided Layers on 3%Cr-Mo Steel", *Thin Solid Films*, V.203, p.49-60.
- Karamış M.B. (1992): "Some Effects of the Plasma Nitriding Process on Layer Properties", *Thin Solid Films*, V.217 (1992), p.38-47.
- Karamış M.B. (1993): "Wear Properties of Stell Plasma nitrided at High Temperatures", *Thin Solid Films*, *Mater. Sci. and Eng.*, V.A168, p. 49-53.
- Miyamura H., Takada J., Kuwahara H., Kikuchi S. (1986): "Ion-Nitriding Behavior of Sevsral Tool Steels", *J. of Mater. Sci.*, V.21, p.2514-2518.
- Peng Q.F. (1989): "Improving Abrasion Wear by Surface Treatment", *Wear*, V.129, p.195-203.
- Robino C.V., İnal O.T. (1983): "Ion Nitriding Behavior of Several Low alloy Steels", *Mater. Sci. and Eng.*, V.59, p.79-90.
- Sato K., Takahashi K., Inoue Y., Yamazaki T., Nitoh Y. (1988): "Surface Layers Produced by IonNitriding of Austenitic Fe-Mn-Al Alloys and the Effects on Hardness and Corrosion Resistance", *J.of Mater. Sci.*, V.23, p.4445-4449.
- Sun Y., Bell T. (1991): "Plasma Surface Engineering of Low Alloy Steel", *Mater. Sci. and Eng.*, V.A140, p.419-434.
- Sun Y., Bell T., Wood G. (1994): "Wear behavior of Plasma nitrided Martensitic Stainless Steel", *Wear*, V.178, p.131-138.
- Takada J., Ohizumi Y., Miyamura H., Kuwahara H., Kikuchi S., Tamura I. (1986): "Ion-Nitriding of an Fe-19wt%Cr Alloy", *J. of Mater.Sci.*, V.21, p.2493-2496.