

# PLAZMA (İYON) NİTRÜRLEME YÖNTEMİ VE MALZEME ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

**Ufuk ÖZDEMİR**  
Hava Harp Okulu Dekanlığı  
Yeşilyurt-İstanbul  
u.ozdemir@hho.edu.tr

**Muzaffer ERTEN**  
İTÜ Makina Fakültesi  
Gümüşsuyu-İstanbul  
erten@mkn.itu.edu.tr

## ÖZET

Makina elemanları kendilerinden beklenen fonksiyonları yerine getirirken, parçaların yüzeyleri iç kısımlarına nazaran daha yüksek gerilme ve daha yüksek aşındırıcı kuvvetlere maruz kalır. Bu gerilme ve kuvvetler malzemenin yüzey dayanım sınırını aşınca malzeme yüzeyinde kırılmalar başlar ve böylece aşınma ve korozyon oluşur. Bu nedenle daha uzun bir ömür için bu tür etkilere maruz kalan malzemelerin yüzey dayanımları artırılmalıdır. İyon (plazma) nitürleme yöntemi bu amaçla kullanılan bir yöntemdir. Özellikle otomotiv sanayinde, metalurji sektöründe ve takım imalat sanayinde uygulama alanı bulan iyon (plazma) nitürleme yöntemi, çeliklerin yüzey sertleştirilmesinde yaygınca kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı plazma nitürleme yönteminin temel prensiplerini, avantajlarını, uygulama sınırlarını ve yöntemle ilgili güncel gelişmeleri incelemektir.

**Anahtar Kelimeler :** Yüzey Sertleştirme, Nitürasyon, İyon Nitürleme

## ABSTRACT

The surfaces of parts manufactured from steels and other alloys are subjected to higher stresses, greater abrasive forces and more direct environmental exposure than are the part interiors. When aggressive forces reach the limits of a material's resistance, surface initiated fracture, fatigue, wear and corrosion occur. For these reasons, surface modification and enhancement have long been applied to steels. Ion (plasma) nitriding is one of the most widely used advanced surface modification techniques applied to steels. It has been used in the fabrication of components for the automobile industry, metallurgical industry and tool manufacturing. The purpose of this paper is to briefly review the plasma nitriding which is now being applied to steels. In particular, the benefits, limitations and processing principles are described.

**Key Words :** Surface Hardening, Nitriding, Ion Nitriding

## 1.GİRİŞ

Kullanım amaçlarına bağlı olarak; yüzeyi sert ve aşınmaya dayanıklı, buna karşılık iç yapılarının sünek olması arzu edilen çelik malzemelerde yüzey sertleştirme yöntemi uygulanır. Bunun için, malzeme yüzeyinde istenilen derinliğe kadar sertleşme sağlayan, sünek iç yapıyı etkilemeyen değişik yüzey sertleştirme yöntemleri geliştirilmiştir.

Yüzey sertleştirme yöntemleri incelendiğinde; sertleştirilen malzeme özellikleri, arzu edilen sertlik değeri ve derinliği, uygulanabilirlik, malzemenin kullanım şartları ve gelişen teknolojiye bağlı olarak çok değişik yüzey sertleştirme yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Örneğin; normal şartlarda yeterli düzeyde sertlik elde edilemeyen çeliklerin yüzeyine karbon verilerek sertleştirmenin yapıldığı sementasyon yöntemi, iyi sertleşme kabiliyeti olan çeliklerin arzu edilen sertleşme derinliğine kadar olan kısmının ostenitleştirme sıcaklığına kadar ısıtılıp

aniden soğutulduğu alevle yada indüksiyonla yüzey sertleştirme, yüzeye sertlik artırıcı element atomlarının nüfuz ettirildiği nitürasyon yöntemi bunlardan bazılarıdır. Bunların dışında; yüzeyin sert bir malzeme ile kaplanması, yüzeye çelik püskürtülerek veya haddelenerek yüzey sertliğinin artırılması da uygulanan yöntemler arasındadır.

Bu çalışmada yüzey sertleştirme yöntemlerinden biri olan nitürasyon yönteminin yeni ve özel bir uygulaması olan plazma (iyon) nitürleme yönteminin uygulama esasları, bu yöntemin uygulamasındaki yeni gelişmeler ve uygulanabilirliği hakkında yapılan araştırmanın sonuçları verilmiştir.

## 2.NİTRÜRASYONLA YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMİ

Yüzey sertleştirme yöntemlerinin büyük çoğunluğu ısı ile gerçekleştirilmektedir. Isıl işlem; metalsel malzemelerde, katı haldeki sıcaklık değişimleri

yoluyla bir yada birbirine bağlı birkaç işlemle, amaca uygun özellik değişmelerinin elde edilmesi şeklinde tanımlanabilir. Bu tanımdan anlaşılacağı üzere; ısı işlem, parçaların belli bir sıcaklığa kadar ısıtılması, bu sıcaklıkta uygun bir süre bekletilmesi ve belli bir programa uygun olarak sıcaklığın oda sıcaklığına düşürülmesi şeklinde üç kademede gerçekleştirilir. Nitürasyon işleminin uygulanması sırasında da benzer prosedür takip edilir.

Nitürasyonla yüzey sertleştirme işlemi ile çeliğe kazandırılan özellikler şöyle sıralanabilir:

- 1- Yüksek bir yüzey sertliği ve aşınma mukavemeti,
- 2- Temperlenmeye karşı yüksek direnç ve yüksek sıcaklık sertliği,
- 3- Yüksek yorulma mukavemeti ve düşük yorulma çentik hassasiyeti,
- 4- Paslanmaz olmayan çelikler için iyileşmiş korozyon direnci,
- 5- Diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre yüksek boyutsal kararlılık.

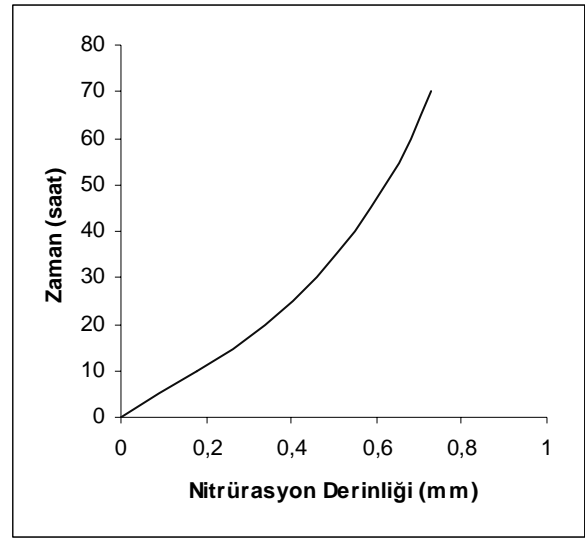
Nitürasyonla yüzey sertleştirme işleminde, çeliğin yüzeyine difüzyon ile azot verilerek, malzemenin yüzeyindeki özellikler değiştirilir. Azotun atom çapı karbona göre daha küçük olduğundan demir kafesine nüfuz etmesi daha kolay olur. Azotun alınması, yüksek sıcaklıklarda ostenitik katı çözeltilisinde çok hızlı olur. Ancak azot bağlantılarının (nitür) dış cidarda yığılması, yüzeyde kırılğan bir yapının oluşmasına neden olur. Ayrıca; ostenit-ferrit dönüşümünden dolayı hacim değişmesi de meydana gelir ve bu tabaka parçalanarak pul pul dökülür. Bu nedenlerden dolayı azot, yüksek alaşımlı çelikler hariç ostenitik yapıya değil, ferritik yapıya nüfuz ettirilir. Bu esnada, oldukça ince ve kırılğan bir yapı oluşur ve azot içeren bölgede nitürler çökeler. Çökeltmede oluşan alaşım nitürleri, martenzit sertliğinden de fazla sertliği olan bir tabaka meydana getirir.

Kullanılabilir, kırılğan olmayan ve sert olan azotu zenginleştirilmiş yüzey tabakası, sadece ferritik bölgedeki azot difüzyonu ile sağlanabildiğinden, difüzyon sıcaklığının  $A_{c1}$  (ötektoid sıcaklığı) sıcaklığının altında olması zorunludur. Ancak azot elementinin bu sıcaklığı düşürdüğü de dikkate alınmalıdır. Azot-demir sisteminde ötektoid sıcaklığı  $590^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu noktanın üzerinde (ferrit+ostenit bölgesi) azot difüzyonu yapılacak olursa azot difüzyonu ile birlikte sürekli ve artarak ferrit-ostenit dönüşümü olur. Bu durum yüzeyde kırılğan bir tabaka oluşmasına neden olur. Bu nedenle nitürasyon uygulaması, yapıda ostenitin bulunmadığı düşük sıcaklıklarda yapılmalıdır.

Alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde  $590^{\circ}\text{C}$ 'ın altındaki difüzyon sıcaklıklarında yüksek sertlik değerine ulaşılır, ancak sıcaklık düşük olduğundan difüzyonda yavaş olur. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda

nitürlerin çökmesi çok ince olur. Difüzyon sıcaklığının düşüklüğü, çökelen nitürlerle azot difüzyonunun zorlaşması nedenlerinden dolayı, sementasyonda elde edilen sertleşme derinliklerine ulaşmak istenirse uzun süre beklemek gereklidir. Şekil 1'de  $500^{\circ}\text{C}$  nitürasyon sıcaklığında zamana bağlı olarak elde edilen nüfuz derinliği verilmiştir [1].

Yüksek sıcaklıklara çıktığında, aynı süreler için daha fazla sertlik elde edilebilir. Ancak çok uzun işlem sürelerinde sertlikte azalma olur. Örneğin 20 saatlik nitürasyon süresi için  $500^{\circ}\text{C}$ 'de 0,3 mm'lik nitürasyon derinliğine ulaşılırken  $550^{\circ}\text{C}$ 'de 0,45 mm'lik nitürasyon derinliğine ulaşılmaktadır. Ancak bu durumda sertlik 100-200 Vickers Sertlik Değeri kadar azalır. Daha yüksek sıcaklıklara çıktığında sertlik azalması daha fazla ve ferritin ostenite dönüşme tehlikesi daha büyüktür.



Şekil 1. Zamana Bağlı Olarak Nitürasyon Derinliği

Gaz, banyo ve iyon (plazma) nitürasyon olmak üzere değişik nitürasyon teknikleri vardır.

Gaz nitürasyon yöntemiyle çok sert nitür tabakaları oluşturmak mümkündür. Çok sert nitürler; alüminyum, titan, molibden, vanadyum ve kromla  $500\pm 10^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda elde edilebilir. Ancak bu sıcaklıklar difüzyonu olumsuz yönde etkilediğinden, çok derin nüfuz derinliklerine ulaşmak zordur. Difüzyon hızı düşük olduğundan, işlem için gereken sürede oldukça fazladır. Gaz nitürasyonda, azot içeren gaz olarak genellikle amonyak ( $\text{NH}_3$ ) kullanılır. Parçalar, kontrol atmosferli gaz sızdırmaz fırın içerisinde  $500-520^{\circ}\text{C}$  kadar yavaş yavaş ısıtılır. Gerekli işlem süresi sonunda, parça tekrar yavaş yavaş soğutulur. Nitürasyondan önce, yüzey tabakasında oksitlenmiş, karbonu azalmış, yağlı bir durum olmamalıdır.

Banyo nitürasyon, yüksek miktarda siyanat içeren siyanürlü tuz banyolarında yapılır. Bu ortamda,

yüksek sıcaklıklarda siyanürden (CN) karbon ayrışmasına benzer olarak, düşük sıcaklıklarda azot ayrıştırılarak çeliğe verilir. Banyo nitürasyonun gaz nitürasyona göre üstün tarafı, banyo nitürasyonunda 500 °C gibi düşük sıcaklıklarda daha yüksek sertliğe ulaşılabilmesi ve küçük nüfuz derinliklerinde, eşit derinliğe daha kısa sürede ulaşılabilmesidir. Parçaların tuz banyolarına daldırılıp alınması da, gaz fırınlarındaki nitürasyona nazaran daha kolaydır. Ayrıca koruyucu kaplama yapılmaksızın, bölgesel olarak kısmi daldırma yapılarak, bölgesel nitürasyon yapılabilir. Ancak dezavantajı, hızlı ısınma nedeniyle daha çok deformasyon tehlikesi oluşma ihtimalinin olmasıdır. Hız çeliklerinin dışında, banyo nitürasyonu daha az kullanılır. Daha çok, yüksek aşınma dayanımlı yüzey elde etmek veya değişken zorlanma hallerinde yüksek sürekli dayanım oluşturmak için tercih edilir. Banyo nitürasyon % 25-50 siyanür ve % 50 siyanat içeren siyanür banyolarında yapılır. Banyo sıcaklığı genellikle 500-580 °C arasındadır. Nitürasyon süresi, normal olarak 2 saattir. Nitürasyon sonrası parçalar suda ani olarak soğutulurlar. Büyük gerilmelerin oluşmasını engellemek için 80 °C'ye kadar ısıtılmış banyolarda kullanılabilir. Bazı durumlarda havada soğutma da uygulanabilir. Bu nitürasyon yöntemi özellikle aşınmaya karşı dayanımın yüksek olması istenilen yerlerde tercih edilen bir yöntemdir.

### 3. PLAZMA (İYON) NİTRÜRLEME

Çeliklerin yüzeylerine azot verilerek uygulanan nitürasyon işleminde uygulama süresinin çok uzun olması, bu sürenin kısaltılması yönünde araştırmacıları sürekli meşgul etmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, 1960'lı yıllardan itibaren endüstriyel anlamda kullanım alanı bulan plazma nitürasyonu yada diğer ismiyle iyon nitürleme yöntemi geliştirilmiştir. Plazma nitürasyon yönteminde azot difüzyonu, metal yüzeyinde ve yüzeye çok yakın bölgede termo-kimyasal reaksiyonlarla gerçekleştirilir. Azot difüzyonuyla teşekkül eden nitürler ve malzemenin özelliklerine etkisi, alışımlı diğer nitürasyon yöntemlerinde olduğu gibidir. Termo-kimyasal reaksiyonların oluşması için gerekli azot, azot gazının ya da azot içeren bir gaz veya gaz karışımının yüksek gerilimli doğru akım ile iyonlara ayrıştırması ile elde edilmektedir. Bu yöntemde gaz olarak genellikle azot yada amonyak kullanılmaktadır. Nitür partiküllerinin oluşması için gerekli olan aktifleşme enerjisi ise, fırın cidarı ile parça arasında oluşturulan yüksek gerilim ile azot verilecek parçaya doğru ivmelendirilen iyonların parça yüzeyini bombardımanı sonucunda açığa çıkmaktadır.

Şekil 2'de plazma nitürasyon yönteminin gerçekleştirildiği sistemin şematik resmi verilmiştir. Plazma nitürleme sistemi; vakum fırını, gaz dağıtım sistemi ve elektrik güç kaynağı olmak üzere üç ana donanımdan meydana gelmektedir. Güç kaynağının kapasitesi, nitürasyon yapılacak yüzey alanına

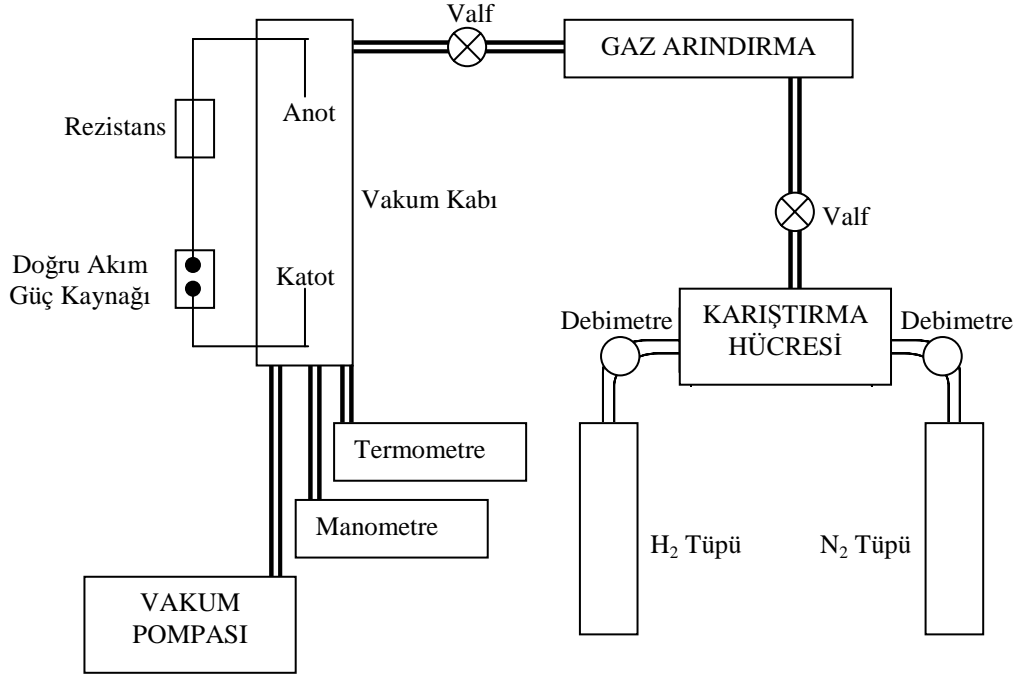
bağlıdır. 400-800 V arasında doğru akım alınabilen transformatörlerde akım yoğunluğu 1 mA/cm<sup>2</sup> seviyesindedir. Gaz jeneratöründe üretilen gazda N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> oranı genellikle % 2 ile % 25 aralığında değişmektedir. Vakum pompası 1-10 torr basınç aralığında çalışabilmektedir. Nitürasyon işlemi sırasında yüzeyin sıcaklığı ölçülmektedir.

Nitürasyon yapılacak parçanın yüzeyi yağ ve kirlerden temizlendikten sonra, vakum fırınına katot (negatif) olacak şekilde yerleştirilir. Fırın duvarları anot (pozitif) görevi yapar. Fırın 0,01 mbar basıncına kadar bir rotasyon pompası ile vakuma alınır. Fırın duvarları ile iş parçası arasında 100-1500 V arasında bir doğru akım uygulandıktan sonra, fırın içerisine azot yada amonyak gazı, fırın basıncı 1-10 mbar düzeyine gelene kadar yavaş yavaş verilir. Başlangıçta 1000 V değerine kadar yükselen gerilim farkı, artan gaz miktarı ile azalarak 600-700 V civarında istenilen basınç ve sıcaklık sağlandığında sabit duruma gelir. Bu sırada, iyonlaşmış gazın akkor ışını, katodik pozisyonda olan iş parçasını tamamen sarmış ve parıltılı boşalım adı verilen ayrılmış gaza ait iyonların parça yüzeyine bombardımanı başlamıştır. Bu iyon bombardımanı ile iş parçasında mükemmel bir yüzey temizliği sağlanır. Nitürasyon için gerekli azot difüzyonu ise, difüzyon için gerekli sıcaklığa ulaşıldığında başlar.

Plazma nitürasyon uygulanan yüzeylerde elde edilen sertlik profili, diğer nitürasyon yöntemlerine benzer. Ancak gerek yüzeyde gerekse yüzeye yakın bölgelerde, işlem daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği için daha yüksek yüzey sertlikleri elde edilebilir. Benzer nedenden dolayı, ölçü değişimi ve deformasyon en az iyon nitürasyon yönteminde meydana gelir. Ayrıca nitürasyon uygulanan yüzeyde geçiş bölgesinin çok ince olması yorulma dayanımının artmasına katkıda bulunur.

Plazma nitürasyon yönteminin, diğer nitürasyon yöntemlerine göre sağladığı üstünlükler şöyle sıralanabilir:

- Sadece iş parçasının ısıtılması nedeniyle enerji tasarrufu sağlanır ve ısı verim yüksektir.
- İşlem süresi açısından değerlendirme yapıldığında; diğer nitürasyon yöntemlerine göre aynı sıcaklık ve derinlik için işlem süresi yaklaşık %50-70 daha kısadır.
- İşlem sırasında ölçü değişimi ve deformasyon riski minimum düzeydedir.
- Düşük basınçlarda çalışıldığında gaz tasarrufu sağlanabilir.
- Sert ve daha az kırılmalı bir yüzey elde edildiği için, yüzey bitirme işlemlerine daha az gereksinim duyulur.
- Nitürasyon yapılmak istenilmeyen yüzeylerin mekanik olarak izolasyonu mümkündür.

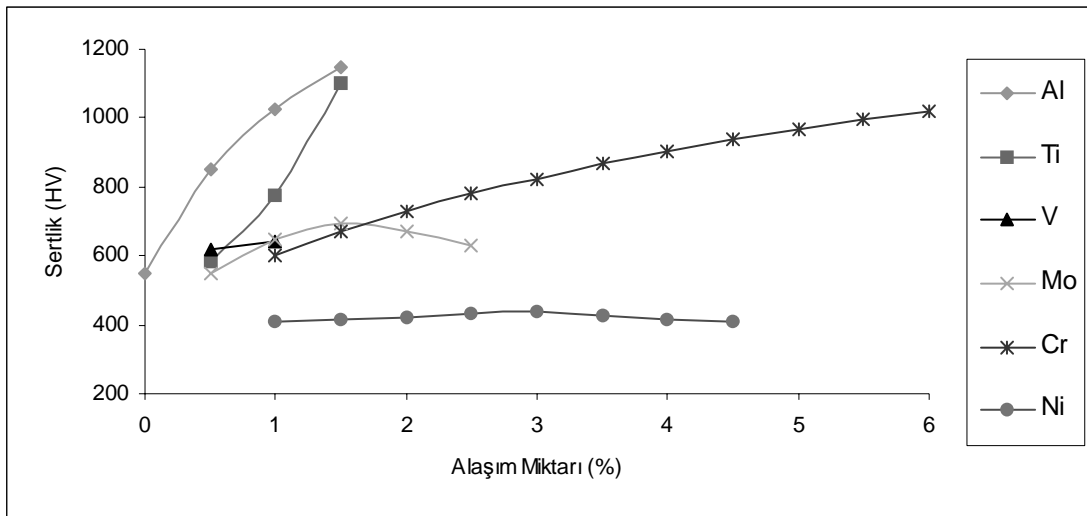


Şekil 2. Plazma Nitrürasyon Tertibatının Şematik Gösterimi

- g- Gaz veya diğer atıklarla çevreyi kirlilemez, insan sağlığı açısından zararlı değildir.
- h- Otomasyona uyumludur. Sistem değişkenlerin kontrol altında tutulması kolaydır.
- i- İş parçası üzerindeki tüm girinti, çıkıntı ve delikler üzerinde homojen bir azot difüzyonu sağlanabilir.
- j- Reaksiyonun gerçekleştiği fırında hareketli parçalar söz konusu olmadığından fırım bakım masrafları daha düşüktür.
- k- Nitrülenecek parçanın büyüklüğü ve ağırlığı önemli değildir.

Plazma nitrürasyon yönteminin avantajları olmasına rağmen birtakım dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlar şöyle sıralanabilir:

- a- İlk yatırım maliyetleri yüksektir. Bu nedenle sadece seri üretimde ekonomiktir.
- b- Nitrülenecek parçanın hacmine, dolayısıyla reaksiyon fırının hacmine bağlı olarak 40 kW ila 1000 kW arasında enerji gereksinimine ihtiyaç vardır.
- c- Aynı şarjda; sadece aynı boyut ve kesitteki parçalara nitrürasyon uygulanabilir.



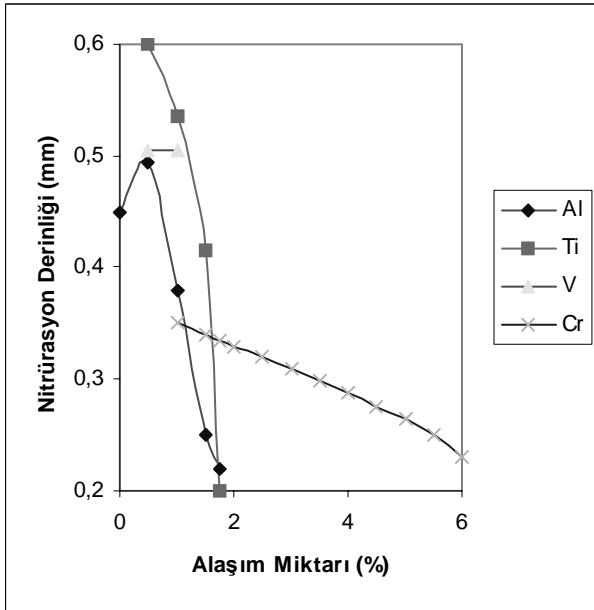
Şekil 3. Alaşım elementlerinin çeliğin nitrürasyonu sonrası sertliğe etkisi

#### 4. NİTRÜLENEBİLİRLİK

Nitrülenebilirlik; çeliğin azotu absorbe edebilme kabiliyeti ve azotun sağladığı sertlik artışı olarak ifade edilir. Alaşım elementlerinin çeliğin nitürasyonu sonrası sertliğine etkisi Şekil 3'de verilmiştir [2].

Yüksek yüzey sertliği istenen nitürlenecek bir çeliğin bileşimi üzerinde karar verileceği zaman, seçim, genellikle Al, Cr ve Mo gibi nitür oluşturan elementler üzerinde yapılır. Şekil 3'deki diyagramdan da görüleceği gibi; yüzey sertliği üzerinde en büyük etkiye sahip Al'dur. Bunu sırasıyla Ti, Cr, Mo ve V takip eder. Ni'in etkisi sade karbonlu çeliklerde oluşan yüzey sertliği kadardır.

Nitürasyon derinliği Şekil 4'de görüleceği gibi alaşım elementi miktarının artmasıyla azalır [2]. Sertlik artışında en büyük etkiye sahip olan Al ve Ti aynı zamanda azotun difüzyonuna en fazla geciktirici etkiyi gösterir. Bu elementlerin miktarı arttıkça, azotun çeliğin bünyesine alınması zorlaşır. Optimum sertlik ve nitürasyon derinliğinin sağlanması için tavsiye edilen Al oranı % 1 civarındadır. Karbonun da benzer şekilde azot difüzyonuna karşı kuvvetli bir engelleyici özelliği vardır. Alaşım elementlerinin difüzyona karşı etki göstermelerinin nedeni, azotla beraber nitürler oluşturmalarıdır.



Şekil 4. Alaşım elementlerinin 400 HV sertlik değerinde ölçülen nitürasyon derinliğine etkisi (Nitürasyon işlemi 520 °C'de 8 saat süreyle yapılmıştır)

Özbaysal ve arkadaşları [3] yaptıkları çalışmada diğer çalışmalarda elde edilen sonuçlara benzer olarak; yüzey sertliğinin nitürleme zamanının bir fonksiyonu olduğunu, difüzyon derinliğinin zamanla parabolik olarak arttığını, nitürleme kabiliyetinin çeliğin bileşimine bağlı olduğunu, mikroyapıdaki karbürlerin nitür oluşumunu geciktirdiğini, ancak mekanizmayı

etkilemediğini, yüksek alaşımli çeliklerde nitrojen tüketiminin daha fazla olduğunu ve karbon miktarının artmasıyla nitrojenin çelik matrise difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisinin arttığını göstermişlerdir.

Sun ve Bell [4]; düşük alaşımli çeliğin nitürlenmesiyle ilgili olarak yaptıkları çalışmalar sonucunda yorulma dayanımını nitür derinliği, çap ve arayüzey gerilme değerinin bir fonksiyonu olarak tanımlamışlardır.

Karamış [5]; plazma nitürlenmiş En40B çeliğinin yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışını incelemiş, kuru ve aşındırıcı içeren yağlama koşullarında aşınma karakteristiklerini yük, zaman ve beyaz tabaka kalınlığının fonksiyonu olarak tanımlamıştır. Yaptığı çalışma sonucunda; plazma nitürlemeyle aşınma direncinin arttığını, uzun nitürleme sürelerinin sertleştirilmiş tabaka kalınlığını arttırdığını, mikroyapının oluşturulan sert tabaka üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve kalın beyaz tabakanın ince beyaz tabakaya göre daha kolay parçalanarak aşınma hızının artmasına neden olduğunu göstermiştir.

Karamış ve Gerçekçioğlu [6]; plazma nitürlenmiş AISI H13 ve 722M24 çeliklerinin oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklardaki davranışını ve beyaz tabaka soyulmasını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; gevrek olan beyaz tabaka nedeniyle başlangıçta hızlı bir aşınmanın olduğunu, beyaz tabakanın işletme öncesi yapıdan uzaklaştırılması veya oluşumunun engellenmesiyle daha iyi aşınma şartlarının oluşturulabileceğini belirtmişlerdir.

Berg ve arkadaşları [7]; nitürleme işlem parametrelerini sistematik olarak değiştirerek 4 farklı çeliği plazma nitürlemişlerdir. Nitürlemeden sonra bileşim tabakası kalınlığı ve difüzyon bölgesini kapsayan mikroyapısal incelemeler yaparak, sertlik derinlik profillerini elde etmişler, sertlik profilinden etkili difüzyon sabiti ve buna karşılık gelen aktivasyon entalpilerini bulmuşlardır.

Alves ve arkadaşları [8]; karmaşık bir geometriye sahip bir iş parçası üzerinde plazma nitürlenmiş tabakaların büyüme davranışını sistematik olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; nitürleme parametrelerinin bir fonksiyonu olarak farklı derinlik ve sertlik değerlerini elde etmişler ve 570 °C'de nitürleme istisna olmak üzere nitürlenen tabaka kalınlığının numunenin yüksekliği ile arttığını göstermişlerdir.

Jeong ve Kim [9]; plazma nitürlemede tabaka oluşum davranışı üzerinde işlem parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; bileşim tabakası ve difüzyon bölgesi kalınlığının gaz basıncıyla birlikte arttığını ve düşük basınçlarda bileşim tabakasının oluşmadığını belirtmişlerdir.

Çelik ve Karadeniz [10]; AISI 4140 çeliğinin plazma nitürlenmesinde oluşan bileşim tabakasının yapısını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; en kalın bileşim tabakasının 550 °C'de elde edildiğini, daha yüksek sıcaklıklarda azaldığını, çok yüksek sıcaklık ve uzun işlem sürelerinde çok ince bir beyaz tabaka elde edilebildiğini, ancak bu durumun yüzey sertliğinin azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.

Park ve arkadaşları [11]; sinterlenmiş çeliklerin plazma nitürlenmesi sonucunda elde edilen tribolojik özelliklerini ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; plazma nitürlemeyle sinterlenmiş parçaların aşınma özelliklerinin iyileştiğini ve sürtünme sırasında adhezyon ile abrazyon aşınması karışımı bir aşınma mekanizmasının etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Michel ve arkadaşları [12]; plazma nitürleme mekanizmasını, hidrojen etkisini ve plazma-katı etkileşimini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda; oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan plazma nitürlemenin, elektronlarla gaz molekülleri arasındaki elastik çarpışmalar sonucunda oluşan ürünlerin kimyasal yapısı, aktivasyon enerjisi ve konsantrasyonu ile kontrol edilebileceği gösterilmiştir.

Pranevicius ve arkadaşları [13]; ostenitik paslanmaz çeliklerin plazma nitürleme mekanizmalarını, nitrojen dağılım profilini ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; nitrojence zengin değişim tabakası büyümesinin termal difüzyondan daha ziyade yüzeydeki atomların yer değişimi ile kontrol edildiğini, iyon nitürlemenin başlangıcında yüzey boşlukları nedeniyle prüzlerin arttığını, işlem süresiyle birlikte nitrojen atomlarının matris atomlarıyla olan karışımının arttığını ve nitrojen derinlik profilinin yüzey şartlarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Fancey ve arkadaşları [14]; çeliğin plazma nitürlenmesinde nitrojene eklenen argon, neon ve hidrojenin plazma nitürlemeye etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; tabaka sertliğinin iyon tipinden önemli ölçüde etkilenmediğini, bununla birlikte özellikle pis yüzeylerin nitürlenmesinde iyonların sputtering oluşturabilecek kütlede olması gerektiğini, kritik bir nitrojen yoğunluğunun altında etkili bir nitürleme için nitrojen yetersizliğinin söz konusu olduğunu ve bu kritik değer üzerindeki nitrojen oranlarında beyaz tabakanın oluştuğunu belirtmişlerdir.

Lee ve Shih [15]; 304 ile 410 paslanmaz çelikleri ve 4140 düşük alaşımlı çeliğin plazma nitürleme davranışını ve mikroyapısını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; aşınma hızı ve sürtünme katsayısı büyüklük sıralamasının nitürlemeden önce 4140>410>304 şeklindeyken

nitürlemeden sonra 304>410>4140 şeklinde değiştiğini göstermişlerdir.

Çelik ve arkadaşları [16]; değişik çalışma koşulları altında AISI 8620 çeliğinin iyon nitürleme davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; maksimum yüzey sertliğinin 500 °C'de 8 saat süreyle nitürleme için elde edilebildiğini, en büyük difüzyon tabakası kalınlığının ise 600 °C'de 8 saat süreyle nitürleme için elde edilebildiğini, düşük sıcaklık ve kısa işlem sürelerinde bileşim tabakasının oldukça ince olduğunu, ancak 600 °C'de işlem süresi 4 saatten 8 saate çıktığında bileşim tabakası kalınlığının azaldığını belirtmişlerdir.

Alsaran ve Çelik [17]; farklı işlem parametreleri altında AISI 5140 çeliğinin iyon nitürlemesini yaparak faz kombinasyonu, sertlik profili ve tabaka kalınlığını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; tabaka kalınlıklarının zaman, sıcaklık ve gaz karışım oranıyla arttığını, yüzey sertliğinin büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olduğunu ve maksimum yüzey sertliğinin 450 °C'de 4 saatlik zaman ve 0,33'lük gaz karışımıyla elde edilebildiğini belirtmişlerdir.

Musil ve arkadaşları [18]; dubleks bir kaplama sağlayan yüksek basınçta derin bir katot boşalmayla birleştirilmiş yeni bir plazma nitürleme yöntemi ileri sürmüşlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; bu yöntemin konvansiyonel plazma nitürleme yöntemlerine göre parça yüzeyinde daha fazla bir iyileşme sağlandığını, gaz karışımındaki H<sub>2</sub> varlığı nedeniyle işlemin etkinliğinin arttığını ve belli şartlarda beyaz tabaka oluşmadığı için özellikle ön nitürleme yapılarak iyi bir adhezyon oluşmasının arzu edildiği uygulamalar için oldukça uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Alsaran ve arkadaşları [19]; sıcaklık, zaman ve gaz karışım oranı gibi parametrelerin değişik kombinasyonları ile AISI 5140 düşük alaşımlı çeliği iyon nitürlemişler ve optimum çalışma şartlarını araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; yüzey sertliğinin maksimum olması için en etkin parametrenin işlem sıcaklığı olduğunu, beyaz tabaka kalınlığını minimum yapan parametrenin de işlem sıcaklığı olduğunu ve difüzyon tabakası kalınlığı için en etkin parametrenin işlem süresi olduğunu belirtmişlerdir.

Metin ve İnal [20]; plazma nitürleme sırasında oluşan demir nitürlerin oluşma ve büyüme kinetiğini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; her zaman plazma nitürlemenin başlangıcında demir nitürlerin oluştuğunu, bunların artan işlem süresiyle  $\gamma'$  fazına dönüştüğünü, tane büyüklüğünün küçük olması nedeniyle yüksek bir konsantrasyon eğiliminin söz konusu olduğunu, nitür tabakası kalınlığının büyümesinin zamana göre parabolik olduğunu ve saf

nitrojene kıyasla nitrojen-hidrojen karışımında daha derin bir tabakanın elde edilebildiğini belirtmişlerdir.

Çelik ve arkadaşları [21]; AISI 8620 çeliğini farklı gaz karışım oranlarında nitrürleyerek gaz karışım oranının sertlik, difüzyon tabakası ve beyaz tabaka üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; gaz karışımındaki hidrojenin artmasıyla yüzey sertliği ve difüzyonun arttığını ve beyaz tabaka kalınlığının azaldığını, gaz karışımına argon ilavesinin sertlik artışında sınırlı bir etki yaptığını ve beyaz tabaka kalınlığının azalmasında hidrojenden daha az bir etkiye sahip olduğunu, ancak hidrojen gazının maliyeti ve taşınması dikkate alındığında azotla birlikte argon gazının kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

## 5.SONUÇ

1960'lı yıllardan itibaren uygulama alanı bulan plazma nitürleme, diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre nisbeten yeni bir yöntem olmakla birlikte günümüze pek çok alanda uygulanmaktadır. Bunun temel nedeni diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre sağlamış olduğu üstünlüklerdir. Bu üstünlükler içinde en önemlileri kuşkusuz sadece iş parçasının ısıtılması ve aynı yüzey sertliği için işlem süresinin daha kısa olması nedeniyle sağlanan enerji tasarrufudur. Bunun yanısıra; işlem sırasında ölçü değişimi ve deformasyon riskinin minimum düzeyde olması, düşük basınçlarda çalışıldığından gaz tasarrufunun maksimum düzeyde olması, nitürasyon yapılması istenilmeyen yani sertleşmesi istenilmeyen yüzeylerin mekanik olarak izolasyonunun mümkün olması, gaz veya diğer atıklarla çevreyi kirletmemesi, insan sağlığı açısından zararlı olmaması, otomasyona uyumlu olması, iş parçası üzerindeki tüm girinti, çıkıntı ve delikler üzerinde homojen bir azot difüzyonunun sağlanabilmesi, nitürlenecek parçanın büyüklüğü ve ağırlığının önemli olmaması da bu yöntemin sağlamış olduğu diğer avantajlardır. Bu üstünlüklerin yanısıra iyon nitürlemenin de bir takım dezavantajları mevcuttur. Bunlar; nitürleme sisteminin kurulabilmesi için ilk yatırım masraflarının yüksek olması, nitürleme kamerasında aynı anda sadece aynı boyut ve kesitteki parçaların nitürlenebilmesi ve nitürlenecek parçanın dolayısıyla reaksiyon fırınının hacmine bağlı olarak yüksek enerji gereksinimlerine ihtiyaç duyulabilmesidir. Bu dezavantajların ortadan kaldırılması veya minimuma indirilmesi durumunda iyon nitürleme uygulamalarının artacağı ve diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine nazaran daha geniş uygulama alanı bulacağı şüphesizdir.

## KAYNAKLAR

- [1] Thelning K.E., "Steel and Heat Treating" Marcel Decler Inc., New York, 260-320, 1994.
- [2] Menthe, E., Rie K.T., Schultze J.W., Simson S., "Structure and properties of plasma-nitrided

stainless steel" Surface and Coating Technology, 74-75, 412-416, 1995.

[3] Özbaysal, K., İnal O.T., Romig A.D., "Ion-nitriding behaviour of several tool steels", Materials Science and Engineering, A-78, 179-191, 1986.

[4] Sun, Y. Bell, T., "Plasma surface engineering of low alloy steels", Materials Science and Engineering, A-140, 419-434, 1991.

[5] Karamış, M.B., "An investigation of the properties and wear behavior of plasma-nitrided hot working steel (H13)" Wear, 150, 331-342, 1991.

[6] Karamış, M.B., Gerçekçioğlu, E., "Wear behaviour of plasma nitrided steels at ambient and elevated temperatures", Wear, 243, 76-84, 2000.

[7] Berg, M., Budtz-Jorgensen, C.V., Schweitz K.O., "On plasma nitriding of steels", Surface and Coating Technology, 124, 25-31, 2000.

[8] Alves, C., Silva, E.F., Martinelli A.E., "Effect of workpiece geometry on the uniformity of nitrided layers", Surface and Coating Technology, 139, 1-5, 2001.

[9] Jeong, B.Y., Kim, M., "Effect of the process parameters on the layer formation behavior of plasma nitrided steels", Surface and Coating Technology, 141, 182-186, 2001.

[10] Çelik, A., Karadeniz S., "Investigation of compound layer formed during ion nitriding of AISI 4140 Steel", Surface and Coatings Technology, 80, 283-286, 1996.

[11] Park, J.S., Lee, S.Z., Kim, J.H., Lee K.N., "Tribological characteristics of ion nitrided sintered steels", Surface and Coatings Technology, 114, 169-173, 1999.

[12] Michel, H., Czerwiec, T., Gantois, M., Ablitzer, D., Ricard A., "Progress in the analysis of the mechanisms of ion nitriding", Surface and Coatings Technology, 72, 103-111, 1995.

[13] Pranevicius, L., Templier, C., Meheust, J.P., "On the mechanism of ion nitriding of an austenitic stainless steel", Surface and Coatings Technology, 135, 250-257, 2001.

[14] Fancey, K.S., Leyland, A., Egerton, D., Torres, D., Matthews A., "The influence of process gas characteristics on the properties of plasma nitrided steel", Surface and Coatings Technology, 76-77, 694-699, 1995.

[15] Lee, C.K., Shih, H.C., "Structure and corrosive wear resistans of plasma nitrided alloy steels", Corrosion, 50, 848-856, 1994.

[16] Çelik A., Efeoğlu İ., Alsaran A., "İyon nitürleme işleminden sonra ısıtılma işleminin iç yapıya etkisinin araştırılması", Bilim Günleri Sempozyumu-Denizli, 150-156, 1999.

[17] Alsaran, A., Çelik, A., "Structural characterization of ion nitrided AISI 5140 low alloy steel", Materials Characterization, 35, 234-239, 1998.

[18] Musil, J., Vlcek, J., Ruzicka M., "Recent progress in plasma nitriding", Vacuum, 59, 940-951, 2000.

[19] Alsaran, A., Çelik, A., Çelik, C. Efeoğlu, İ., "İyon nitürasyon ile yüzey sertleştirme işleminde

optimum çalışma şartlarının belirlenmesi”, 9.ncu Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, 2000.

[20] Metin, E., İnal, O.T., “Formation and growth of iron nitrides during ion-nitriding”, Journal of Materials Science, 22, 2783-2788, 1987.

[21] Çelik, A., Efeoğlu, İ., Sakar G., “Microstructure and structural behavior of ion-nitrided AISI 8620 Steel”, Materials Characterization, 46, 39-44, 2001.

## ÖZGEÇMİŞLER

### Ufuk ÖZDEMİR

28 Eylül 1972 tarihinde İstanbulda doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladıktan sonra, 1993 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 1998 yılında aynı üniversitede yüksek lisans eğitimini tamamladı. 1994 yılından itibaren muvazzaf subay olarak Hava Harp Okulu Dekanlığında görev yapmakta olup, İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünde doktora çalışmalarına devam etmektedir. İlgilendiği konular CAD-CAM, Talaşlı İmalat ve Makina Elemanlarıdır.

### Muzaffer ERTEN

Muzaffer ERTEN 1946 yılında Siirt’te doğdu. İ.T.Ü. Makina Fakültesinden Yüksek Makina Mühendisi olarak mezun oldu. Doktorasını bitirdikten sonra 1994 yılında İ.T.Ü. Makina Fakültesinde yardımcı doçent kadrosuna atandı. İngilizce bilmektedir. Evlidir ve iki çocuğu vardır. İlgili alanları; makina elemanları, CAD-CAM, CNC tezgahlar, talaşlı imalat, takım tezgahları, hızlı prototip imalatı, güvenilirlik, imalat ve kalite kontrol ve toplam kalite yönetimidir.