

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**316L OSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİ İLE Ti-6Al-4V
ALAŞIMININ PLAZMA NİTRÜRLENMESİ**

Metalurji ve Malzeme Müh. Aylin SORKUN

**FBE Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Nurhan CANSEVER

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
2. NİTRÜRLEME	2
2.1 Nitrürleme Yöntemleri	2
2.1.1 Katı Nitrürlem	2
2.1.2 Sıvı Nitrürleme	3
2.1.3 Gaz Nitrürleme	3
2.1.4 Plazma Nitrürleme	4
2.1.4.1 Plazma Nitrürlemenin Avantajları	6
3. PASLANMAZ ÇELİKLER	8
3.1 Ferritik Paslanmaz Çelikler	9
3.1.1 Mekanik Özellikleri	10
3.1.2 Korozyon Özellikleri	10
3.1.3 Uygulama Alanları	11
3.2 Martenzitik Çelikler	11
3.2.1 Mekanik Özellikleri	11
3.2.2 Korozyon Özellikleri	12
3.2.3 Uygulama Alanları	12
3.3 Ostenitik Paslanmaz Çelikler	12
3.3.1 Mekanik Özellikleri	14
3.3.2 Korozyon Özellikleri	15
3.3.3 Uygulama Alanları	16
3.3.4 316L Ostenitik Paslanmaz Çeliğin Plazma Nitrürlenmesi	17
3.3.5 316L Ostenitik Paslanmaz Çeliğin Biyomedikal Alandaki Uygulamaları	19
3.4 Çökelmeyle Sertleşen Paslanmaz Çelikler	20
3.5 Çift Fazlı Paslanmaz Çelikler	22
4. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI	24
4.1 Saf Titanyum	24
4.2 Ticari Saf Titanyum	25
4.3 Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	25

4.3.1	Alfa Titanyum Alaşımları.....	26
4.3.2	Yakın Alfa Titanyum Alaşımları.....	26
4.3.3	Alfa ve Beta Titanyum Alaşımları.....	27
4.3.4	Beta Titanyum Alaşımları.....	28
4.4	Titanyum Alaşımlarının Plazma Nitrülenmesi	29
4.5	Titanyum Alaşımlarının Biyomedikal Alandaki Uygulamaları.....	31
5.	316L VE Ti-6Al-4V ALAŞIMLARINA PLAZMA NİTRÜRLEME UYGULAMA ÇALIŞMALARI	36
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	40
6.1	Deneyde Kullanılan Numuneler.....	41
6.2	İyon Nitrürleme.....	41
6.3	Mikrosertlik Ölçümleri.....	43
6.4	X-ışınları Difraktometresi.....	43
6.5	SEM İncelemeleri.....	43
7.	DENEY SONUÇLARI.....	45
7.1	Mikrosertlik Ölçümleri.....	45
7.2	XRD Sonuçları.....	46
7.3	SEM Görüntüleri.....	53
8.	SONUÇLAR VE İRDELEME.....	59
9.	GENEL SONUÇLAR.....	62
	KAYNAKLAR.....	64
	EKLER.....	66
	Ek 1 Fe Fazının Teta Değerlerine Göre Kafes Sabitleri (JCPDS 01-087-0722).....	67
	Ek 2 Fe ₂ N Fazının Teta Değerlerine Göre Kafes Sabitleri (JCPDS 01-076-0090).....	67
	Ek 3 CrN Fazının Teta Değerlerine Göre Kafes Sabitleri (JCPDS 11-0065).....	67
	Ek 4 Fe ₃ N Fazının Teta Değerlerine Göre Kafes Sabitleri (JCPDS 01-083-0878).....	68
	Ek 5 Fe ₄ N Fazının Teta Değerlerine Göre Kafes Sabitleri (JCPDS 01-083-0875).....	68
	Ek 6 Alfa Ti Fazının Teta Değerlerine Göre Kafes Sabitleri (JCPDS 044-1294).....	69
	Ek 7 Beta Ti Fazının Teta Değerlerine Göre Kafes Sabitleri (JCPDS 44-1288).....	69
	Ek 8 TiN Fazının Teta Değerlerine Göre Kafes Sabitleri (JCPDS 01-074-1214).....	69
	ÖZGEÇMİŞ.....	70

SİMGE LİSTESİ

α	Hegzagonal sıkı paket titanyum
β	Yüzey merkez kübik sistemli titanyum
$\alpha+\beta$	α ve β fazlarını içeren titanyum alaşım tipi
γ'	Fe_4N şeklindeki nitrür fazı
ε	Fe_{2-3}N şeklindeki nitrür fazı
δ	Hacim merkezli kübik demirin karbonla oluşturduğu katı eriyik
n	Difraksiyon derece sayısı
d	Kristal yapılarda düzlemler arası mesafe
λ	X-ışını dalga boyu

KISALTMA LİSTESİ

DC	Direct Current (Doğru Akım)
HMK	Hacim Merkezli Kübik Sistem
HRB	Brinell Serliği
HRC	Rockwell Sertliği
HV	Vickers Sertliği
PVD	Physical Vapor Deposition(Fiziksel Buhar Biriktirme)
SEM	Scanning Electron Microscope(Taramalı Elektron Mikroskobu)
VSD	Vickers Serlik Değeri
YMK	Yüzey Merkezli Kübik Sistem

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Plazma nitrürleme sisteminin şematik gösterilişi.....	4
Şekil 2.2	Plazma nitrürleme işlemi mekanizması.....	6
Şekil 3.1	Yarı kararlı ostenitik paslanmaz çeliğinin (301) mekanik özellikleri.....	14
Şekil 3.2	Kararlı ostenitik paslanmaz çeliğinin (304) mekanik özellikleri.....	15
Şekil 3.3	Fe-N diyagramı.....	18
Şekil 3.4	Kemik vidası ve kemik levhası.....	20
Şekil 4.1	Ti-N denge diyagramı.....	30
Şekil 4.2	Titanyumun plazma nitrürlenmesi ile yüzey tabakalarının oluşumu.....	31
Şekil 4.3	İnsan vücudundaki sert doku yerleri.....	32
Şekil 4.4	Vida şeklindeki yapay diş tabanının şematik görünümü.....	33
Şekil 4.5	Yapay kalça bağlantısının şematik görünümü.....	34
Şekil 4.6	Yapay kalp kapakçığı.....	34
Şekil 4.7	Yapay vasküler stent.....	35
Şekil 5.1	Artık gerilmelerin artan nitrürleme süresiyle değişimi.....	36
Şekil 5.2	%10 N ₂ ve 450 °C’de nitrürlenmiş numunelerin yüzey pürüzlülüğü.....	37
Şekil 5.3	%10 N ₂ ve 450°C’de nitrürlenmiş numunelerin ultra mikro sertlik değerleri.....	37
Şekil 5.4	Sinterlenmiş 316L çeliğin 500 °C’de nitrürlenmesi sonucu mikrosertlikleri	38
Şekil 5.5	316L ‘nin 580-680K’deki %Ns içeriği ile zaman ilişkisi.....	38
Şekil 6.1	Nitrürleme mekanizmasının görünümü.....	41
Şekil 6.2	Bragg Yasası’nın açıklanması.....	43
Şekil 7.1	316L paslanmaz çeliğin nitrürleme süresine bağlı olarak sertlik değişimleri.....	46
Şekil 7.2	Ti-6Al-4V alaşımının nitrürleme süresine bağlı olarak sertlik değişimleri	46
Şekil 7.3	316 L malzemesinin 450°C, 1 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si.....	47
Şekil 7.4	316 L malzemesinin 450°C, 3 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si.....	47
Şekil 7.5	316 L malzemesinin 450°C, 6 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si.....	48
Şekil 7.6	316 L malzemesinin 550°C, 1 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si.....	48
Şekil 7.7	316 L malzemesinin 550°C, 3 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si.....	49
Şekil 7.8	316 L malzemesinin 550°C, 6 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si.....	49
Şekil 7.9	Ti-6Al-4V malzemesinin 550°C, 1 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si.....	50
Şekil 7.10	Ti-6Al-4V malzemesinin 550°C, 3 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si... ..	50
Şekil 7.11	Ti-6Al-4V malzemesinin 550°C, 6 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si... ..	51
Şekil 7.12	Ti-6Al-4V malzemesinin 650°C, 1 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si... ..	51
Şekil 7.13	Ti-6Al-4V malzemesinin 650°C, 3 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si... ..	52
Şekil 7.14	Ti-6Al-4V malzemesinin 650°C, 6 saatte plazma nitrülenme sonrası XRD’si... ..	52
Şekil 7.15	450°C ve 1 saat nitrürleme süresinde 316L paslanmaz çeliği 3500X,SEM.....	53
Şekil 7.16	450°C ve 3 saat nitrürleme süresinde 316L paslanmaz çeliği 3500X,SEM.....	53
Şekil 7.17	450°C ve 6 saat nitrürleme süresinde 316L paslanmaz çeliği 3500X,SEM.....	54
Şekil 7.18	550°C ve 1 saat nitrürleme süresinde 316L paslanmaz çeliği 3500X,SEM.....	54
Şekil 7.19	550°C ve 3 saat nitrürleme süresinde 316L paslanmaz çeliği 3500X,SEM.....	55
Şekil 7.20	550°C ve 6 saat nitrürleme süresinde 316L paslanmaz çeliği 3500X,SEM.....	55
Şekil 7.21	550°C ve 1 saat nitrürleme süresinde Ti-6Al-4V alaşımı 3500X,SEM.....	56
Şekil 7.22	550°C ve 3 saat nitrürleme süresinde Ti-6Al-4V alaşımı 3500X,SEM.....	56
Şekil 7.23	550°C ve 6 saat nitrürleme süresinde Ti-6Al-4V alaşımı 3500X,SEM.....	57

Şekil 7.24 650°C ve 1 saat nitrürleme süresinde Ti-6Al-4V alaşımı 3500X,SEM.....	57
Şekil 7.25 650°C ve 3 saat nitrürleme süresinde Ti-6Al-4V alaşımı 3500X,SEM.....	58
Şekil 7.26 650°C ve 6 saat nitrürleme süresinde Ti-6Al-4V alaşımı 3500X,SEM.....	58

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Ferritik paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları.....	9
Çizelge 3.2 Bazı yeni ferritik paslanmaz çelikler.....	10
Çizelge 3.3 Bazı ferritik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikler.....	10
Çizelge 3.4 Ferritik paslanmaz çeliklerin tipik uygulamaları.....	11
Çizelge 3.5 Martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları.....	11
Çizelge 3.6 Bazı martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.....	12
Çizelge 3.7 Martenzitik paslanmaz çeliklerin tipik uygulamaları.....	12
Çizelge 3.8 Bazı ostenitik paslanmaz çeliklerin yüzde kimyasal bileşimi.....	14
Çizelge 3.9 Bazı ostenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.....	15
Çizelge 3.10 Ostenitik paslanmaz çeliklerin tipik uygulama alanları.....	16
Çizelge 3.11 Bazı yarı ostenitik çökelti sertleştirilmiş paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonu	21
Çizelge 3.12 Bazı yarı ostenitik çökelti sertleştirilmiş paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.....	21
Çizelge 3.13 Bazı çökelti sertleştirilmiş martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları.....	22
Çizelge 3.14 Bazı çökelti sertleştirilmiş martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.....	22
Çizelge 3.15 Bazı dupleks paslanmaz çeliklerin kimyasal kompozisyonları.....	23
Çizelge 3.16 Bazı dupleks paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.....	23
Çizelge 4.1 Bazı titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri.....	25
Çizelge 4.2 $\alpha + \beta$ alaşımlarının kimyasal kompozisyonları ve tipik uygulamaları.....	27
Çizelge 4.3 Bazı $\alpha + \beta$ titanyum alaşımının mekanik özellikleri.....	28
Çizelge 4.4 Bazı β titanyum alaşımlarının kimyasal kompozisyon ve uygulamaları.....	29
Çizelge 6.1 316L' nin kimyasal bileşimi ve nitrürleme öncesi sertliği.....	40
Çizelge 6.2 Ti-6Al-4V' nin kimyasal bileşimi ve nitrürleme öncesi sertliği.....	40
Çizelge 6.3 316L ostenitik paslanmaz çelik için nitrürleme koşulları.....	42
Çizelge 6.4 Ti-6Al-4V titanyum alaşımının nitrürleme koşulları.....	42
Çizelge 7.1 316 L ostenitik paslanmaz çelik malzemesinin nitrürleme koşullarına bağlı olarak sertlik değişimleri.....	45
Çizelge 7.2 Ti-6Al-4V titanyum alaşımı malzemesinin nitrürleme koşullarına bağlı olarak sertlik değişimleri.....	45

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında çalışmalarım süresince ilgi ve yardımlarıyla bana destek olan hocam Sayın Doç. Dr. Nurhan CANSEVER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deney numunelerinin plazma nitrülenmesinde ve deney sonrası nitrülenmiş parçaların sertliklerinin ölçümünde yardımcı olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Turgut Gülmez'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında numune hazırlama aşamasında yardımını esirgemeyen kimyasal analiz teknikeri Şevki Şahin'e, XRD analizlerini gerçekleştiren Cem Bey'e, SEM analizlerinde yardımcı olan Uzman Polat Topuz'a, önerileri ile eksiklerimin tamamlanmasında yardımcı olan Arş. Gör. Murat Danışman'a teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemi sağlayan aileme de teşekkürlerimi bir borç bilirim.

ÖZET

Plazma nitrüleme, “İyon Nitrüleme” adı ile de anılan oldukça yeni bir yüzey işleme yöntemidir. Plazma nitrüleme termokimyasal bir yüzey işlem prosesi olarak genel olarak çeliklerin ve titanyum alaşımlarının yüzey sertliklerini ve aşınma dayanımlarında artış sağlamak amacı ile uygulanır. İşlem süresinin kısa oluşu, düşük işlem sıcaklığı, minimum distorsiyon göstermesi ve çevreyi kirletmeyen bir proses olması gibi bir çok avantajlara sahiptir.

Bu çalışmada plazma nitrüleme işleminin sertliklere, faz oluşumlarına ve mikroyapıya olan etkisi incelenmiştir. Nitrüleme işlemi $N_2:H_2$ oranının 1:4 olduğu gaz karışımında yapılmıştır. Nitrüleme süresince sistem 10 torr basınç altında tutulmuştur. 316L numuneleri 450°C ve 550°C, Ti-6Al-4V alaşımı numuneleri 550°C ve 650°C 1, 3, 6 saatlik sürelerde nitrülenmişlerdir.

Plazma nitrülenmiş 316L numunelerin sertlik değerleri 300HV_{0,1}'den 1200HV_{0,1}'e yükselmiştir. 450°C'de nitrülenmiş 316L numunelerinde Fe₃N, Fe₂N, Fe₄N fazları oluşmuştur. 550°C'de ise aynı malzemede Fe₃N, Fe₂N, Fe₄N, CrN fazları oluşmuştur. Titanyum alaşımı numunelerinde sertlik değerleri 350 HV_{0,1}'den 460 HV_{0,1}'e yükselmiştir. Nitrülenmiş titanyum alaşımı numunelerinde α -Ti, α (N)-Ti, Ti₂N, TiN fazları oluşmuştur.

Anahtar Kelimeler: Plazma nitrüleme , iyon nitrüleme, nitrüleme, 316L, ostenitik paslanmaz çelikler, Ti-6Al-4V , titanyum alaşımları

ABSTRACT

Plasma nitriding which is also called “Ion Nitriding” is relatively new method. Plasma nitriding is a thermochemical process that has been applied commercially for about two decades to increase surface hardening and improve wear resistance of steels and titanium alloys. There are many advantages of plasma nitriding such as shorter exposure time, lower process temperature, minimum distortions, low energy usage and environmental pollution.

This study aims to investigate the effect of plasma nitriding on surface hardening, phase formation and microstructures of specimens. Plasma nitriding was performed in a 1:4 gas mixture $N_2:H_2$. During the nitriding process was kept constant at 10 torr and temperature of 316 specimens was 450°C-550°C, Ti-6Al-4V alloys was 550°C-650°C for the periods 1, 3, 6 hours respectively.

Hardness values of plasma nitrided 316L specimens surfaces are increased from 300 HV_{0,1} to 1200 HV_{0,1}. Fe₃N, Fe₂N, Fe₄N phases are formed at 450 °C on 316L specimens. Fe₃N, Fe₂N, Fe₄N, CrN phases are formed at 550°C on 316L specimens. Plasma nitrided titanium alloy specimens surface hardness value is increased from 350 HV_{0,1} to 460 HV_{0,1}. α -Ti, α (N)-Ti, Ti₂N, TiN phases are formed at 550°C-650 °C on titanium alloy specimens.

Keywords: Plasma nitriding, ion nitriding, nitriding, 316L, austenitic stainless steels, Ti-6Al-4V, titanium alloys

1. GİRİŞ

Biyolojik sistemlerle etkileşim içinde olması gerekli olan medikal cihazlarda kullanılan ve canlı olmayan malzemelere genel anlamı ile biyomalzeme denmektedir. Burada temel gereklilik, malzeme ve vücut dokularının birbirlerine istenmeyen uygunsuz etkiler yapmadan bir arada bulunabilmeleridir. Bu karşılıklı uyumlu birliktelikle ilgili olaya kısaca biyoyuumluluk denmektedir. Biyoyuumluluk bir malzemenin özel bir uygulama için ne kadar uygun olduğunu tanımlar. Ortopedik implantlar vücudun biyokimyasal ve biyomekanik kuvvetlerin etkisi altında kalırlar ve implantlarla biyolojik çevre arasında belli etkileşimler olur. Kan plazmasında, hücreler arası ve hücre içi sıvılarda bulunan iyonik bileşenlerden metaller için en kritik olanı klor iyonudur. Ortamın asitliğinin artması ile korozyon oluşumu ve ilerlemesinde de artış meydana gelebilir. Yapılan araştırmaların sonunda 1950'lerde ortopedik implant üreticileri birkaç yıl gibi oldukça kısa bir sürede alaşım sistemleri içinden bazılarının istenen özelliklere sahip olanlarını değerlendirmişler ve paslanmaz çelik, kobalt bazlı alaşımlar ve titanyum alaşımları implant malzemesi olarak kabul görmüştür. (Gülmez, 1998)

Genel olarak nitrürleme işlemi dört alt yöntemden oluşmaktadır. Bunlar; katı nitrürleme, sıvı nitrürleme, gaz nitrürleme ve plazma (iyon) nitrürlemedir. Yapılan çalışmada, 316L paslanmaz çelik ve Ti-6Al-4V malzemelerinin göstermiş oldukları biyoyuumluluk açısından bu iki malzemenin plazma nitrürlenmesi yapılmıştır.

Plazma nitrürleme işlemi, NH_3 atmosferinde gerçekleştirilen termokimyasal bir yüzey işlem metodudur. Bu metot ile nitrürleme yapılmış yüzeyin sertlikleri artmış, aşınma dayanımları gelişmiştir. Nitrürleme çoğunlukla çeliklere uygulanmakla beraber alüminyum, titanyum alaşımları ile sinter malzemelere de uygulanabilmektedir.

Demir esaslı malzemelere yapılan nitrürleme işlemleri genellikle 500-600°C sıcaklık aralığında, titanyum ve alaşımlarında 650-950°C sıcaklık aralığında azot atomlarının malzeme yüzeyinden içine difüze olması sağlanmaktadır. Yapılan nitrürleme işleminin süresi, elde edilmek istenen nitrür tabakası kalınlığı, kullanılan nitrürleme yöntemi ve nitrürlenecek malzeme gibi etkenlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. (Karadeniz, 1990; İğdil, 2005)

2. NİTRÜRLEME

Nitrürleme, azotun malzeme içine difüzyonu ile parçanın yüzeyine yakın bölgedeki kısmının değiştirilmesini temel alan bir yüzey işleme metodudur. Nitrürlemenin termokimyasal bir işlem olması, işlem gören malzemenin yüzeye yakın kısımlarında kimyasal bileşiminin değişimine neden olmaktadır. Bunun sonucu ince olmayan parçalarda, parça içi ile parça yüzeyi farklı özellikler göstermektedir. Nitrürleme işleminin sonucunda parça yüzeyinin sertliğinin, yüzey dayanımının, aşınma direncinin ve korozyona karşı dayanımının arttığı görülmüştür. Nitrürlemede nitrür tabakasının derinliğine etki eden esas faktörler, işlem zamanı, sıcaklık, azot aktivasyonu ve malzeme bileşimidir. Nitrürleme işlemi, malzeme ve uygulanmak istenen nitrür tabakası kalınlığına bağlı olmak üzere, özellikle çeliklerde 500°C ve üzerinde uygulanır ve parçaya nitrürleme yöntemine bağlı olarak amonyak (NH_3), $\text{N}_2\text{-H}_2$ gaz karışımı, sodyumsiyanür (NaCN) veya potasyumsiyanür (KCN) tuzları kullanılarak azot difüze edilir. Nitrürleme işlemi klasik olarak katı, sıvı ve gaz nitrürleme olarak yapılmakla beraber son yıllarda gelişen plazma nitrürleme yöntemi ile dört gruba ayrılmıştır. (İğdil, 2005)

2.1 Nitrürleme Yöntemleri

Nitrürlenecek parçanın bulunduğu ortama göre (katı, sıvı, gaz gibi) adlandırılması ile yapılan nitrürleme yöntemleridir.

2.1.1 Katı Nitrürleme

Katı nitrürlemede (toz nitrasyonu) parçalar aynı kutu karbürizasyonunda olduğu gibi, kutu içerisine yerleştirilirler. Yaklaşık olarak % 15 oranında nitrasyonu hızlandırıcı malzeme kutunun dibine ilk olarak konulur. Daha sonra nitrürlenecek parçalar yerleştirilir ve nitrasyon tozları da bir tabaka halinde bu parçaların üzerine konulur. Daha fazla nitrürleme tozu ilave edilerek bir sıra parçalar, bir sıra toz tabakası ve yine bir sıra parçalar olacak şekilde yerleştirmeye devam edilir. Kutular sıkıca kapatıldıktan sonra çelik malzeme için sıcaklığı yaklaşık olarak 520-570°C olan fırına yerleştirilir. Bu işlemin 12 saati geçmemesi tavsiye edilir. Aksi taktirde çelik yüzeyleri oyuklaşma ve kabarıp pul pul dökülme gösterebilir. (Topbaş, 1993)

2.1.2 Sıvı Nitrürleme

Parçaların nitrürlenmesinde erimiş potasyum (K) ve sodyum (Na) siyanür tuzları kullanılmaktadır. 1950'lerin ortalarına kadar, nitrürleyici tuz banyoları sadece sınırlı bir ölçüde kullanılmış ve sonra esas olarak 10-30 dakika gibi kısa sürelerle burgu matkaplarının nitrasyonunda kullanılmıştır. Daha uzun nitrasyon sürelerinde özellikle çelik malzemelerin yüzeyinde çukurlar oluşup, yüzeyi düzgünsüzleşir. Bu her iki olay banyodaki farklı seviyelerdeki siyanat miktarlarındaki değişimlerden ve çelik parçaların yüzeylerinin oksidasyonuna neden olan demirin potadan çözünmesinden ileri gelmiştir. Son on yılda tuz banyosunda nitrasyon yöntemi, banyonun içerisine hava enjeksiyonu uygulamakla daha yaygın hale gelmiştir. Çünkü bu şekildeki uygulamada siyanat (NaCNO) miktarının kontrolü daha kolay yapılmıştır. Daha ileri bir gelişme, titanyum pota kullanılması ile sağlanmıştır. Böylece demir pota kullanımından kaynaklanan tuz ayrışması da ortadan kalkmıştır.

Çeliğin tuz banyosundaki nitrasyonunda kullanılan tuz karışımı genellikle ağırlıkça %60-70 NaCN ve ağırlıkça %30-40 KCN içerir. İdeal olan çalışma sıcaklıkları da 550-570°C olarak belirlenmiştir. Nitrürleme süresine bağlı olarak oluşabilecek boşlukları engellemek içinde hava veya oksijen verilerek siyanat miktarı kontrol altına alınarak boşluk oluşumu önlenir. (Topbaş, 1993)

2.1.3 Gaz Nitrürleme

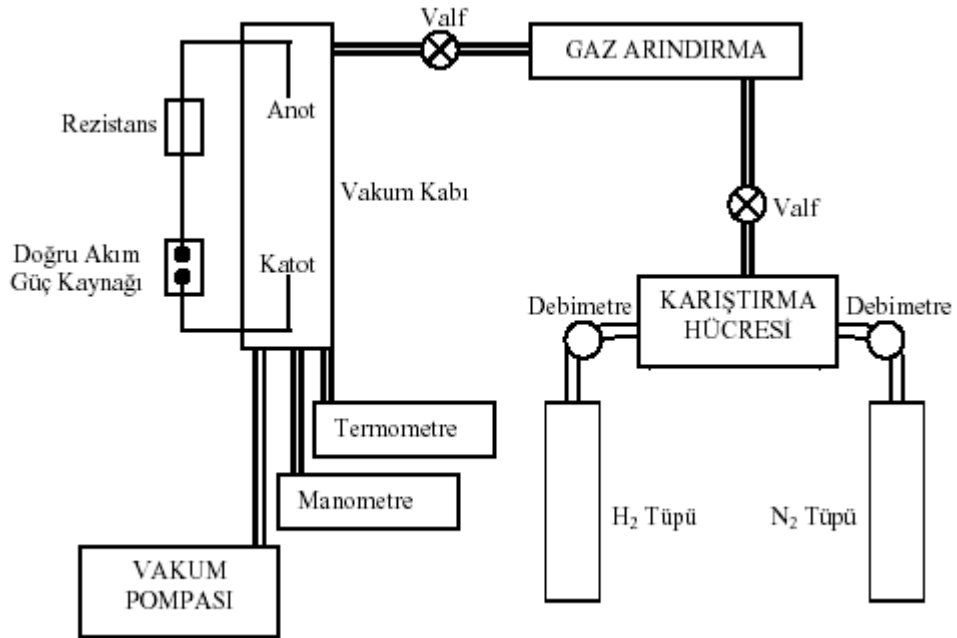
Gaz nitrürlemede parçaların nitrürlenmesi için amonyak (NH₃) gazından yararlanılmaktadır. Fırında 500-550°C sıcaklık aralığına getirilen parça içine, amonyağın ayrışması sonucunda oluşan azot difüze olur. Ayrışan amonyağın oranı %15-30 arasındadır. Difüze olan azot dışında kalan gaz karışımı ortamdan uzaklaştırılırken, ortama amonyak ilavesi sürekli olarak yapılır. Nitrürleme süresi 12 ile 120 saat arasında değişmektedir. Nitrürleme süresinin uzun tutulması durumunda parçanın ısınmasıyla oluşan aşırı temperleme, yumuşamaya neden olabileceğinden malzemenin temperleme sıcaklığına dikkat edilmelidir. (İğdil, 2005)

Gaz nitrürlemede kullanılan gaz çok az miktarda su buharı içerir. Gazın neminin, nitrasyon kutusuna girmeden önce alınması gerekir. Aksi halde su buharı nitrürlenmiş parçaların oksidasyonuna neden olur. En iyi nem giderme, gazın 1100 °C'ye ısıtılarak tekrar kullanılır hale getirilmesidir. (İğdil, 2005)

2.1.4 Plazma Nitrürleme

Plazma nitrürlemede temel prensip, vakumlu bir ortamda azot atomlarının elektrik verilerek iyonlaştırılması ve katot (negatif kutup) olarak yerleştirilen parça yüzeyine çarptırılmasıdır. Bu işlem 1-10 mbar basınçlı, vakum ortamında, 400-1000 V gerilim altında uygulanan doğru akımın (DC) azotu iyonlarına ayırması ve iyon haline gelen azot atomlarının malzeme yüzeyine çarparak difüze olmaları ile gerçekleşir. Doğru akımın kullanılması plazma ortamının sürekliliğini sağlamak içindir. Plazma nitrürleme yöntemi ile nitrürlenebilen tüm ve nitrürlenemeyen birçok çelik iş parçasının nitrasyonu mümkün olmaktadır. Çok üstün aşınma ve yorulma dayanımının, sertlik derinliğinin çok hassas kontrolünün istendiği yerlerde özellikle tercih edilir. (İğdil, 2005)

Yöntemdeki en önemli ekipmanlar, vakum pompası ile fırın, gaz dağılım sistemi ve elektrik ünitesidir. Gerilim, katod (iş parçası) ile anot (fırın duvarı) arasına uygulanır. 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 suretiyle ayarlanabilir. İşlem süresi 10 dakikadan 20 saate kadar değişir. (Karadeniz, 1990)



Şekil 2.1 Plazma nitrürleme sisteminin şematik gösterilişi. (Özdemir ve Erten, 2003)

Plazma nitrürleme mekanizması konusunda yüzde yüz kesin bir model henüz mevcut değildir. Fakat iyonitasyon olayını en iyi açıklayan modellerin başında Edenhofer'in modeli gelmektedir. Bu görüşe göre; anot-katod arasındaki gerilim düşümü dolayısıyla hızlanan yüklü parçacıklar çarpışma ile katod önünde gaz ortamlarını iyonize ederler, ortaya çıkan

iyonlar pozitif yük taşıyıcısı halinde metal yüzeyine çarparlar. Voltaj düşümü lineer olmayıp, düşümün hemen hemen tamamı katodun birkaç milimetre önünde gerçekleştiğinden bütün çarpışma ve iyonizasyonun tamamına yakını bu bölgede oluşur. Katod (iş parçası) üzerinde oluşan çizgi halindeki parlaklık iş parçasının kenarlarını takip ettiğinden bütün yüzey homojen iyon bombardımanına maruz kalır ve sonuçta homojen bir sertleşme derinliği elde edilir.

Belli bir enerjiye sahip iyonlar yüzeye çarpınca; sıçratma (sputtering), ısınma ve birikme (kondensasyon) olayları meydana gelir.

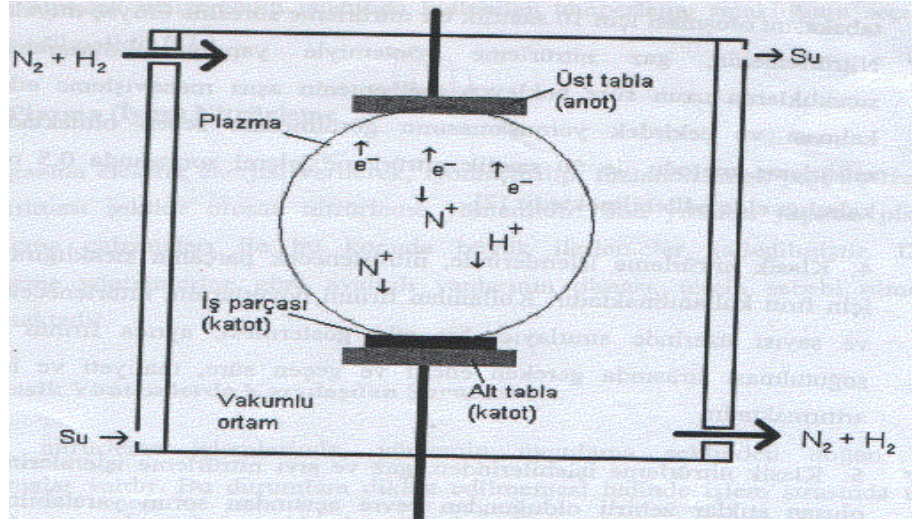
Sıçratma olayında; yüzeye çarpan iyonlar yüzeyde yüksek sıcaklıklar oluşturarak buharlaşmaya yol açarlar. Bunun sonucunda iş parçası yüzeyindeki demir ve diğer alaşım elementlerinin atomları, metalik olmayan element atomları ile elektronlar yüzeyden uzaklaşır. (Karadeniz, 1990)

Isınma; yüzeye çarpan iyonlar iş parçasının içine doğru nüfuz ederken kalan iyon enerjisi ısıya dönüşür. Açığa çıkan ısı enerjisi parçanın istenilen sıcaklığa kadar ısınmasını sağlar.

Birikme; yüzeye çarpan iyonların ancak çok az bir kısmı iş parçasına yayılır. Büyük bir yüzdesi sıçratma olayını sağlar. Sıçratılan demir atomlarıyla yüksek enerjili azot atomları yüzey civarında FeN şeklinde birleşip metal yüzeyinde birikirler. FeN sıcak metal yüzeyinde kararsız olduğundan Fe₂N gibi daha kararlı nitrürlere dönüşür. Dönüşme sırasında serbest kalan azot atomları ya metale ya da plazmaya döner.

Sıçratma ve birikme önemli ölçüde kullanılan gaza bağlıdır. Ayrıca basıncı ve voltajı değiştirerek bu iki olayın oluşumunu değiştirmek mümkündür. Gaz basıncının azaltılması yüzeyden saçılan atomların serbest hareket etmesini arttırmakta ve demirin azot ile birleşme ihtimalini azaltmaktadır. Sonuçta yüzeyde oluşan FeN tabakası incelmektedir. Eğer basınç arttırılırsa tam tersine olarak FeN tabakası kalınlaşacaktır.

Plazma nitrürlemede diğer bir model boş küre +N iyonu çifti oluşumuna dayanır ve iyon bombardımanı metal yüzeyinde kristal hataları oluşturur. Azot iyonları ile meydana gelen bu hatalarda boş köşeler birleşerek kararlı boş köşe+N iyonu çiftleri ortaya çıkmaktadır. Metal içine yayılan bu çiftlerin difüzyonu yeralan difüzyonudur ve azot atomunun arayer difüzyonundan daha hızlı oluşur. (Karadeniz, 1990)



Şekil 2.2 Plazma nitürleme işlemi mekanizması. (İğdil, 2005)

2.1.4.1 Plazma Nitürlemenin Avantajları

Plazma nitürlemenin geleneksel nitürleme yöntemlerine göre bir çok üstünlükleri vardır. Bunlar arasında daha kısa sürede nitürleme yapılabilmesi, düşük işlem sıcaklığı, temiz yüzey eldesi, düşük enerji kullanımı ve çevre kirliliğine yol açmadan işlem yapabilme sayılabilir. Plazma nitürleme karbonlu çeliklere, sementasyon çeliklerine, sıcak ve soğuk iş takım çeliklerine, dökme demir ve paslanmaz çelik gibi tüm demir esaslı malzemelere uygulanabildiği gibi alüminyum ve alaşımlarına, titanyum ve alaşımlarına hatta sinter metallere de uygulanmaktadır. Plazma nitürleme yüzeyin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmesi sebebiyle makine imalatında bir çok parça için kaçınılmaz yüzey işlemi haline gelmiştir. Dişliler, krank milleri, subaplar, dövme kalıpları ve alüminyum ekstrüzyon kalıpları örnek verilebilir. (Gülmez, 1998)

Plazma nitürlemenin diğer avantajları da; karmaşık geometrili parçaların kolay nitürlenmesi, parça yüzeyinde sertliğin, yüzey dayanımının, aşınma direncinin, korozyona karşı dayanımında artış görülmesidir. Nitürleme sıcaklığının düşük sıcaklıklarda dahi başarılı olması istenmeyen yapı oluşumlarının engellenmesine yardımcı olmaktadır. Enerji gereksinimini elektrik enerjisinden sağlandığından, fosil atıkların yakılması sonucu oluşabilecek atıklar gibi çevreye zararlı çıktıkların olmaması çevre kirlenmesine neden olmamaktadır. (İğdil, 2005)

Plazma nitürlemenin avantajları şöyle sıralanabilir:

- Çok iyi aşınma ve yorulma direnci, sert tabakanın sünekliliği
- Yüksek ölçüsel kararlılık
- Gaz ve enerji tasarrufu
- Çevre dostu

- Sistemde tam otomasyon
- Bölgesel nitrürleme.

Plazma nitrürlemenin dezavantajları da şöyle sıralanabilir.

- İlk yatırım maliyeti yüksek
- Elektrik bağlantılarında yüksek hassasiyet gerekli
- Diğer kısa süreli nitrokarbürleme işlemlerine göre daha uzun süreler. (İğdil, 2005)

3. PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler esas olarak mükemmel korozyon dirençlerinden dolayı tercih edilirler. Mükemmel korozyon dirençlerinin nedeni, yüksek krom içeriklerinden kaynaklanmaktadır. Demire küçük miktarda örneğin yaklaşık %5 krom katılması bir miktar korozyon direnci sağlar, ancak paslanmaz çelik üretimi için demire en az %12 krom katılması gereklidir. Klasik teorilere göre krom, metal alt katmanlarını korozyondan koruyan bir oksit filmi oluşturmakla demir yüzeyini pasif hale getirir. Bu koruyucu filmi oluşturmak için paslanmaz çelik yüzeyi oksitleyici maddelerle temas etmek zorundadır .

Paslanmaz çeliklere nikel katılması bu malzemelerin nötr veya zayıf oksitleyici maddeler içindeki korozyon dirençlerini artırır, ancak maliyetlerini yükseltir. Yeterli miktarda nikel de ostenitik YMK yapının oda sıcaklığında kalmasını sağlayarak şekillendirilebilirlik ve sünekliği iyileştirir. Paslanmaz çeliklere molibden katıldığında klor iyonlarının varlığında korozyon direncini artırırken, alüminyum da yüksek sıcaklıkta oksitlenme direncini artırır. (Smith, 2000a; 2000b)

Paslanmaz çelikler beş başlık altında toplanmaktadır. Bunlar; ferritik paslanmaz çelikler, martenzitik paslanmaz çelikler, ostenitik paslanmaz çelikler, çökelmeyle sertleşen paslanmaz çelikler ve çift fazlı paslanmaz çeliklerdir.

Ferritik paslanmaz çelikler; normal olarak %11-30 Cr içerirler. Karbon içerikleri %0,12'den azdır. Diğer alaşım elementleri, korozyon dirençlerini veya işlenebilirlik gibi özellikleri iyileştirmek için küçük miktarda katılırlar. Ferritik paslanmaz çelikler, düşük karbon içeriklerinden dolayı normal olarak ostenitten ferrite dönüşüme uğramazlar ve bu nedenle ısıtıl işlem uygulanabilir olarak düşünülemezler. Buna karşın karbon miktarı az olan ferritik paslanmaz çelikler yüksek sıcaklıklardan hızla soğutulursa biraz sertleşme sağlarlar. Kaynaklanabilirlik, iyileştirilmiş süneklik ve korozyon direnci için bu alaşımlarda, karbon ve azot seviyeleri oldukça düşük tutulmak zorundadır.

Martenzitik paslanmaz çelikler; %0,1-1 C ve %12-17 Cr içerirler. Bu alaşımlar martenzit oluşturmak için sade karbonlu çeliklerdeki gibi sertleştirilebilirler. Karbon içeriği %1 ise ve uygun bir ısıtıl işlem uygulanırsa çok yüksek sertlikler elde edilebilir. Az miktarda diğer alaşım elementleri korozyon direnci, dayanım ve tokluğu iyileştirmek için ilave edilir.

Ostenitik paslanmaz çelikler; esas olarak %6-22 nikel içeren üç fazlı alaşımlardır. Ferritik paslanmaz çeliklerde olduğu gibi ısıtıl işlemlerle sertleştirilemezler. Buna karşın oda sıcaklığında ostenitik yapıda kalır, daha sünek ve normal olarak ferritik paslanmaz çeliklerden daha iyi korozyon direncine sahiptirler. Pek çok ostenitik paslanmaz çelikte, taneler arası

korozyonu önlemek için özel olarak ısıtıl işlem uygulanmaz ve kimyasal bileşimlerinde değişiklik yapılması zorunludur.

Çökelmeyle sertleşen paslanmaz çeliklerde; değişen miktarlardaki nikel ve molibdenin yanında %10-30 Cr bulunur. Bu paslanmaz çelik türündeki fazlar Cu, Ti, Nb, Al ilaveleri ile oluşturulur. Yüksek sıcaklıklarda dahi yüksek mekanik dayanım özellikleri gösterirler.

Çift fazlı paslanmaz çelikler; ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin arasında yer alan farklı bir grup paslanmaz çelik türüdür. Hem ferritik hem de ostenitik çeliklerin özelliklerini bir arada bulundururlar. Bu nedenle çift fazlı çelikler bazı mühendislik tasarımları için optimum malzeme seçimi sunmaktadır. (Smith, 2000a; 2000b)

3.1 Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler başlıca yapım malzemeleri olarak kullanılırlar. Esas olarak %12-30 Cr içerirler. Normal ısıtıl işlem şartlarında (HMK α - tipi demir) ferritik olarak kalırlar. Ferritik paslanmaz çelikler tasarım mühendisliği açısından öneme sahiptirler. Çünkü bunlar nikel içeren paslanmaz çelikler gibi aynı korozyon direncini sağlarlar fakat alaşım elementi olarak nikel ihtiyacı olmadığı için maliyetleri düşüktür. Ferritik paslanmaz çelikler sünekliklerinin azlığı ve düşük kaynaklanabilirliklerinden dolayı kullanımları ostenitik paslanmaz çeliklerden daha sınırlıdır. Standart ferritik paslanmaz çeliklerin süneklik problemlerini aşmak için düşük karbon ve azot içerikli yeni ferritik paslanmaz çelikler geliştirilmiş ve ticari olarak üretilmiştir. Bu alaşımlar iyileştirilmiş korozyon direncine ve kaynaklanabilirliğe sahiptir. (Smith, 2000a; 2000b)

Çizelge 3.1 Ferritik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri.
(Smith, 2000a; 2000b)

%Kimyasal bileşim				
AISI tip	Cr	C (max)	Mo	Al
405	13.0	0.08		0.2
409	11.0	0.08		
434	17.0	0.12	1.0	
446	25.0	0.20		

3.1.1 Mekanik Özellikleri

Standart ferritik paslanmaz çelikler, düşük karbonlu çeliklerden biraz daha yüksek çekme ve akma dayanımına, daha düşük uzamaya sahiptirler. Yeni ferritik paslanmaz çelikler düşük düzeyde karbon ve azot içeriklerinden dolayı standart ferritik paslanmaz çeliklerden daha yüksek uzama değerlerine sahiptirler. (Smith, 2000a; 2000b)

Çizelge 3.2 Bazı yeni ferritik paslanmaz çelikler. (Smith, 2000a; 2000b)

İsim	%C	%Cr	%N	%Ti	%Mo
18-2	0.02	18	-	0.4	2
26-1	0.03	26	-	0.5	1

Çizelge 3.3 Bazı ferritik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.
(Smith, 2000a; 2000b)

Çelik	Akma dayanımı (MN/m ²)	Çekme dayanımı (MN/m ²)	% Uzama
405	275.8	448.2	25
434	365.4	530.9	23
18-2	290.5	468.9	37
26-1	334.8	482.7	30

3.1.2 Korozyon Özellikleri

Ferritik paslanmaz çelikler genellikle sertleştirilemezler ve en iyi korozyon dirençlerini tavllanmış şartlarda gösterirler. Bu alaşımların genel korozyon dirençleri krom miktarları arttıkça artar ve çözündürme tavlaması uygulanmış % 23-28 krom en iyi korozyon direncini sağlar. Ferritik paslanmaz çeliklerin oyuklanma korozyonuna karşı dirençleri krom miktarı arttıkça artmasına rağmen molibden ilavesi ile bu direncin daha da iyi olduğu görülmüştür. Oyuklanma korozyonuna karşı direnç sağlamak için ferritik paslanmaz çelikler en azından %23-28 krom ve % 2'den fazla molibden içermelidir. Ferritik paslanmaz çelikler az miktarda karbon ve azot içerseler bile taneler arası korozyona karşı hassastırlar. Taneler arası korozyon mekanizması bu tür çeliklerde, tane sınırlarında krom karbürlerin ve nitrürlerin çökmesi şeklinde olur. Alaşıma titanyum ve niobyum gibi elementlerin ilavesi ile taneler arası korozyona karşı olan hassasiyet azaltılır. (Smith, 2000a; 2000b)

3.1.3 Uygulama Alanları

Ferritik paslanmaz çelikler çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Çizelge 3.4'te bazı ferritik paslanmaz çelik tiplerinin kullanım alanları belirtilmiştir.

Çizelge 3.4 Ferritik paslanmaz çeliklerin tipik uygulamaları.
(Smith, 2000a; 2000b)

AISI tip	Uygulama Alanı
405	Tavlama ve sertleştirme kutuları, oksidasyon dirençli bölmeler
409	Otomobil egsoz sistemleri, tarımsal püskürtme için tanklar
434	Atmosferik korozyona direnç için tasarlanmış, otomobil bağlayıcıları
446	Tavlama kutuları, cam kalıpları, ısıtıcılar, pirometre tüpleri

3.2 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, ostenitik bölgeden su verme ile martenzitik yapı oluşturulması için yeterli miktarda karbon ve %12-17 krom içeren alaşımlardır. Martenzitik paslanmaz çeliklerin dayanım ve sertliğini optimize etmek için bileşimleri ayarlandığında bu alaşımların korozyon dirençleri ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklere göre daha zayıftır. Martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri korozyon direnci için minimum %12 Cr gerektirdiğinden sınırlıdır. Bu korozyon düzeyinden ilave edilebilecek maksimum karbon miktarı %0.15'tir. (Smith, 2000a; 2000b)

Çizelge 3.5 Martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri.
(Smith, 2000a; 2000b)

% Kimyasal bileşim					
AISI tip	Cr	C (max)	Ni	Mo	V
403	12.2	0.15		0.2	
410	12.5	0.15 mak.			
422	12	0.22	1.0	0.25	1
431	16	0.20 mak.	1.8		

3.2.1 Mekanik Özellikleri

Martenzitik paslanmaz çeliklerin çekme özellikleri ısıtma işlemi belli bir düzeyde kontrol edilebilir.

Çizelge 3.6 Bazı martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.
(Smith, 2000a; 2000b)

AISI tip	Temperleme sıcaklığı (°C)	Akma dayanımı (MN/m ²)	Çekme dayanımı (MN/m ²)	% Uzama	% Kesit daralması
403,410	200-760	275.8	571.1	30	65
414	200-648	655	827.4	17	55
420	204-648	344.8	655	25	55

3.2.2 Korozyon Özellikleri

Martenzitik paslanmaz çeliklerin korozyon dirençleri ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklere göre daha zayıftır. Çoğu martenzitik paslanmaz çelikler nemli havada pasiflik için gerekli olan minimum %12 Cr içerir. Bu tip paslanmaz çeliklerin bileşimi dayanım, sertlik ve korozyon direnci için tasarlanır ve bu nedenle bu alaşımlarda korozyon direnci için kimyasal denge zayıftır. (Smith, 2000a; 2000b)

3.2.3 Uygulama Alanları

Martenzitik paslanmaz çelikler çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Çizelge 3.7’de bazı martenzitik paslanmaz çelik tiplerinin kullanım alanları belirtilmiştir.

Çizelge 3.7 Martenzitik paslanmaz çeliklerin tipik uygulamaları.
(Smith, 2000a; 2000b)

AISI tip	Uygulanma Alanı
403	Buhar türbin bıçakları ve jet motor halkaları gibi gerilimli parçalar
410	Makine parçaları, pompa şaftları, jet motor parçaları, maden makinaları
414	Çatal, kaşık, cerrahi aletler, aşınma dirençli parçalar, cam kalıpları
420	Makina parçaları, civatalar, makaslar, maden makinaları
431	Yüksek mekanik özellikleri gerekli olduğu yerlerde, uçak ekipmanları

3.3 Ostenitik Paslanmaz Çelikler

Ostenitik paslanmaz çelikler esas olarak %16-25 Cr ve %7-20 Ni içeren üçlü demir-krom-nikel alaşımlarıdır. Bu alaşımların yapıları bütün ısıtma işlemlerinde ostenitik yapıda kaldığı için ostenitik olarak adlandırılırlar. Ostenitik paslanmaz çelikler ABD’de paslanmaz çelik üretiminin %70’ini oluşturmaktadır. Bu alaşımlar esas olarak yüksek korozyon dirençlerinden ve şekillendirilebilirliklerinden dolayı üstün bir pozisyona sahiptirler. Böylece pek çok mühendislik uygulamaları için tercih edilen malzemeler olmuşlardır. Tip 302 ve 304 en

yaygın olarak kullanılan paslanmaz çeliklerdir. Hem yüksek sıcaklıklarsa hem de çevre sıcaklığında uygulama alanı bulur. 304 ostenitik paslanmaz çeliği ile aynı amaca sahip olan %2 Mo içeren 316 ostenitik paslanmaz çeliği yüksek korozyon direncine ve iyileştirilmiş yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir. Krom seviyesi %23'ten 25'e yükseltile 309 ve 310 ostenitik paslanmaz çelikleri öncelikli olarak yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılırlar. (Smith, 2000a; 2000b)

Ostenitik paslanmaz çelikler, ostenit kararlaştırıcı element olan nikeli yüksek miktarda içermelerinden dolayı yüksek sıcaklık tavlamalarından sonra, oda sıcaklıklarında ostenitik (YMK) yapılarını korurlar. Nikele ilave olarak ostenitik yapının korunması ve kararlaştırılmasında katkıda bulunan diğer elementler Mn, C ve N'dir. Bir %18 Cr-%8 Ni içeren paslanmaz çeliği tavlama sıcaklığından soğutulduğunda ostenitik yapıda kalır. Buna karşılık bazı Fe-Cr-Ni paslanmaz çeliklerde düşük krom ve nikel içeriklerinden dolayı ostenit kararlı olamayacağından alaşımlar oda sıcaklığı veya biraz aşağısındaki sıcaklıklarda deforme edilirlse ostenitin bir kısmı martenzite dönüşebilir.

En yaygın olarak kullanılan paslanmaz çelikler etkili miktarda karbon içerenlerdir. 302 ostenitik paslanmaz çeliğinde yaklaşık olarak %0.1 C ve 304 ostenitik paslanmaz çeliğinde %0.06 C bulunur. Ostenitik paslanmaz çeliklerde karbon eriyebilirliği %18 Cr-%8 Ni alaşımlarında olduğu gibi sıcaklık düştükçe azalacağından yavaş soğutulduklarında krom karbürler çökebilir. Kritik sıcaklık aralığı 850°C'den 400°C'ye yavaş soğutmada yetersiz sayıdaki krom atomu matristeki taneden tane sınırlarına doğru krom karbür çökmesi ile krom atomlarının yerini alır. Bu nedenle tane sınırlarına yakın bölgeler korozyon direnci için gerekli olan %12'den daha az krom içeriğine sahip olur. Bu şartlardaki ostenitik paslanmaz çelikler taneler arası korozyona karşı hassas duruma gelirler. Bu durumu önlemek için ostenitik paslanmaz çelikler krom karbürü katı eriyik içine yerleştirmek için yüksek ancak tane büyümesini önlemek için de yeterince düşük sıcaklıklarda tavlmalıdır. (Smith, 2000a; 2000b)

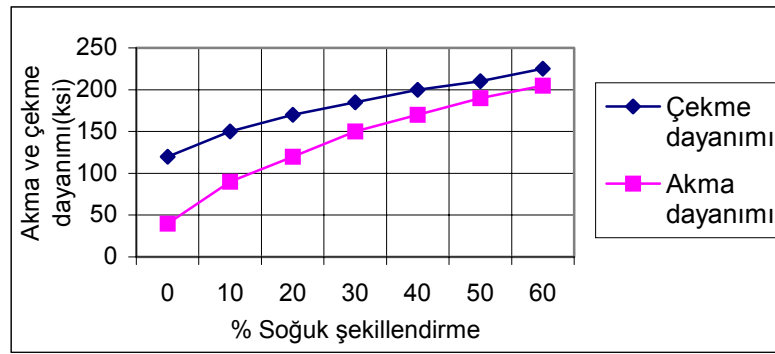
Çizelge 3.8 Bazı ostenitik paslanmaz çeliklerin yüzde kimyasal bileşimi. (İğdil, 2005)

Çelik tipi	% Kimyasal bileşim					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
304	0.08	2.00	1.00	18.00-20.00	8.00-10.5	
316	0.08	2.00	1.00	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.0
316L	0.01	1.76	0.21	17.2	15.3	2.7

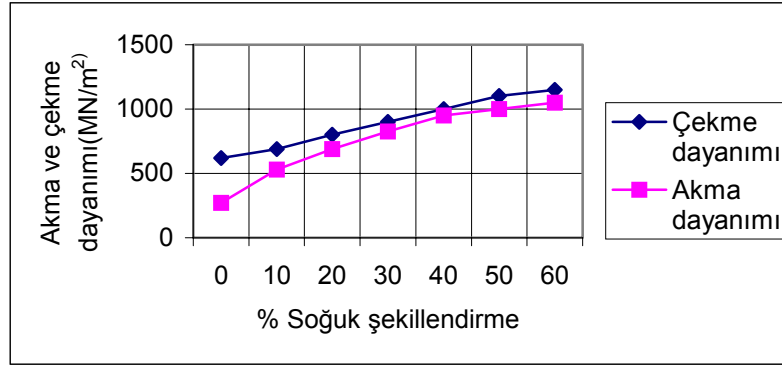
Yüksek sıcaklıklardan sonra 304 ostenitik paslanmaz çeliğinin her zaman hızlı soğutulması mümkün olmaz ve bu durum korozyona neden olabilir. Yavaş soğutulduklarında meydana gelebilecek olan taneler arası korozyonu da önlemek için karbonla birleşen elementlerin ilavesi ile kimyasal bileşiminde değişimler yapılmalıdır.

3.3.1 Mekanik Özellikleri

Ostenitik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında ostenitik yani yüzey merkezli kübik bir yapıya sahip oldukları için ısıtılma işlemle büyük oranlarda sertleştirilemezler. Bu alaşımlar soğuk deformasyonla dayanımları artırılabilir. Örneğin 301 ostenitik paslanmaz çeliğinin soğuk deformasyon ile akma dayanımı 275.8 MN/m^2 den 827.4 MN/m^2 ye yükseltilebilir. Ostenitik paslanmaz çelikler, mikro yapıdaki ostenitin kararlı hale gelebilirliğine göre kararlı ve yarı kararlı ostenitik çelikler olarak ikiye ayrılabilir. Kararlı ostenitik paslanmaz çeliklerin mikroyapıları soğuk deformasyondan sonra ostenitik olarak kalır. Yarı kararlı ostenitik paslanmaz çelikler soğuk deformasyonla belli bir düzeyde martenzite dönüşerek ostenit-martenzit karışımından oluşan bir yapı ortaya çıkarır. (Smith, 2000a; 2000b)



Şekil 3.1 Yarı kararlı ostenitik paslanmaz çeliğinin (301) mekanik özellikleri. (Smith, 2000a; 2000b)



Şekil 3.2 Kararlı ostenitik paslanmaz çeliğinin (304) mekanik özellikleri. (Smith, 2000a; 2000b)

304 ostenitik paslanmaz çeliği normal pekleşme davranışı gösterir ve gerilim uygulandıkça eğri parabolikleşir. 301 ostenitik paslanmaz çeliği yaklaşık %10-15 deformasyondan sonra hızlandırılmış bir pekleşme davranışı gösterir. Bu hızlandırılmış pekleşme davranışı yarı kararlı olan ostenitteki martenzit oluşumuna neden olmaktadır. (Smith, 2000a; 2000b)

316L paslanmaz çeliğinin kimyasal bileşimi olarak diğer paslanmaz çeliklerden çok fazla farklı olmamasına karşın, özellikle implant olarak kullanımı açısından diğer paslanmaz çeliklere göre daha fazla tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra diğer paslanmaz çelikler gibi kimya ve yiyecek endüstrisinde de kullanım alanı genişir. (İğdil, 2005)

Çizelge 3.9 Bazı ostenitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri. (Smith, 2000a; 2000b)

Çelik tipi	Akma dayanımı (MN/m ²)	Çekme dayanımı (MN/m ²)	% Uzama
301	275.8	758.5	60
304	389.5	579.2	55
304L	268.9	558.5	55
310	310.3	655	45
316	289.6	679.2	50
316L	289.6	558.2	50

3.3.2 Korozyon Özellikleri

Genelde ostenitik paslanmaz çelikler bütün paslanmaz çeliklerden daha iyi korozyon, endüstriyel atmosfer ve asit maddelerine karşı dirence sahiptir. Korozyon şartları çok şiddetli olduğunda yani yüksek sıcaklık ve kuvvetli asit içeren bir ortamda daha çok 304 ostenitik paslanmaz çeliği kullanılmaktadır.

Ostenitik paslanmaz çeliklere %2 molibden ilavesi oyuklanma korozyon direncini artırır. Bu korozyona karşı en dirençli ostenitik paslanmaz çelik malzemesi %2.5 molibden içeren 316 tipidir. Çok az inklüzyon ve empüriteli temiz çelikler genelde en iyi oyuklanma korozyon direncine sahiptir. Ancak üretimleri pahalıdır.

304 ostenitik paslanmaz çeliğinin en büyük dezavantajı; bu çeliklerin 400-850°C gibi hassas sıcaklık aralıklarına ısıtıldıklarında taneler arası korozyona karşı hassas olmalarıdır. Taneler arası korozyona karşı hassasiyetlik düzeyi, alaşımın bileşimine ve sıcaklık aralığındaki zamana bağlıdır. Karbon içeriğini katı eriyik düzeyinin altına indirme işlemi, ostenitik paslanmaz çeliklerde taneler arası korozyonu önler. Taneler arası korozyonu önlemenin bir diğer yolu da titanyum ve niobyum ilaveleri ile karbonun titanyum ve niobyumla bağlanması sağlanarak önlenabilir. (Smith, 2000a; 2000b)

3.3.3 Uygulama Alanları

Ostenitik paslanmaz çelikler çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Çizelge 3.10'da bazı ostenitik paslanmaz çelik tiplerinin kullanım alanları belirtilmiştir.

Çizelge 3.10 Ostenitik paslanmaz çeliklerin tipik uygulama alanları.
(Smith, 2000a; 2000b)

Çelik tipi	Uygulama alanı
301	Yüksek dayanım, yüksek sünekliğin gerekli olduğu yerlerde kullanılır. Tren yolu arabaları, uçak parçaları, otomobil tekerlek kapakları
304	Kimyasal ve yiyecek işleme ekipmanları, mayalama ekipmanları, soğuk kaplar, oluklar, yağmur olukları, sac kaplamalar
304L	Kömür silo hatları, sıvı gübreleme ve lapa domates tankları
310	Isı değiştiriciler, fırın parçaları, yanma çemberleri, kaynak dolgu metalleri, gaz türbin bıçakları, yakma makinası ısı toplayıcıları
316	Yüksek korozyon direnci ve yüksek sürünme dayanımının istendiği yerler, kaynak fiçileri, kimyasal taşıma ekipmanları
316L	Yoğun kaynak gerektiren yerlerde, biyomedikal alanda

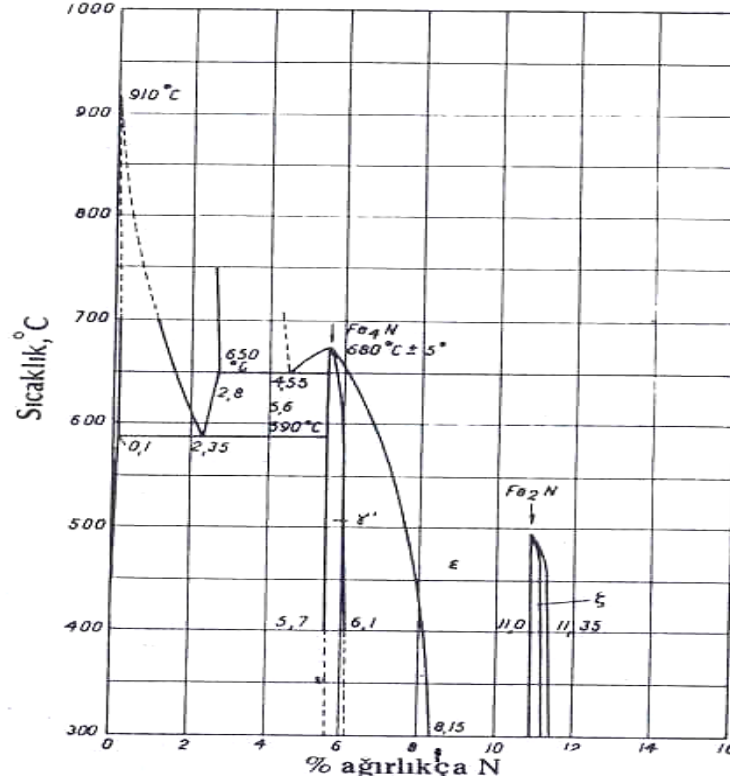
3.3.4 316L Ostenitik Paslanmaz Çeliğin Plazma Nitrürlenmesi

316L paslanmaz çeliğinin plazma nitrürlenmesinde nitrürleme sıcaklığı 400-550°C arasında değişebilmektedir. Kap içerisinde kullanılan gaz 1 ile 10 Torr arasındaki düşük basınç altında tutularak plazma oluşumunu kolaylaştırır. İşlem sırasında uygulanan gerilim 400-1000 V aralığındadır. Plazma nitrürlemede, metal yüzeylerde başlıca iki tabaka oluşmaktadır. Bunlar en dışta beyaz tabaka ve yayınım bölgesidir. Beyaz tabaka gaz bileşimine , işlem süresi ve sıcaklığına, yayınım bölgesi ise esas olarak malzemenin metalurjik özelliklerine bağlıdır. (İğdil, 2005)

Beyaz tabaka; en dış yüzeyde oluşan ince, sert ve gevrek yapıdır. Yapısında esas olarak γ' -Fe₄N veya ϵ -Fe₂₋₃N metaller arası bileşikler bulunmaktadır. γ' ve ϵ bileşikler tek veya çok fazlı olabilirler. Tabaka demir ve azot bileşiği olduğundan sertliği ve diğer özellikleri malzeme bileşiminden bağımsızdır. Plazma nitrürlemede gazın bileşimi beyaz tabakada oluşan fazların özelliklerini belirlemede en önemli değişken olmaktadır. Parçaların çalışma şartlarına bağlı olarak beyaz tabakanın oluşması istenir veya istenmez. ϵ aşınmanın olduğu önemli uygulamalarda tercih edilirken, γ' ise daha yumuşak ve sünek olduğundan aşınma dayanımı düşük olan fakat darbelere daha dayanıklı olduğundan bu tür uygulamalar için uygundur. Beyaz tabakanın bu sert ve gevrek yapısı nedeniyle, bulunması istenmeyen durumlarda ek bir takım mekanik ve kimyasal işlemlerle kaldırılabilir. Pahalı ve zor olan bu yöntemler yerine alternatif olarak nitrürleme ile gaz karışımındaki azot miktarının belli bir sınırın altında tutulması ile beyaz tabakanın hiç oluşmaması sağlanır. İşlem atmosferindeki azot potansiyeli malzeme yüzeyinde nitrür tabakası oluşturmayacak düzeyde düşük olduğundan bu yöntemde yüzeyde hiç beyaz tabaka oluşmaz veya çok az diğer fazlara göre daha sünek olan Fe₄N fazı oluşur. Diğer bir yöntem de kademeli nitrürleme yapmaktır. Bu işlemde de esas amaç hem işlem süresinin azaltılması hem de beyaz tabaka kalınlığının azaltılmasıdır. Yüksek oranda azot içeren bir ortamda yapılan nitrürleme işleminden sonra gaz karışımındaki azotun miktarı azaltılarak veya sadece soy gaz (Ar) kullanılarak, sıcaklık ve zamanla yüzeyde meydana gelen tabakanın içeriye yayındırılması ile gerçekleştirilir. (Gülmez, 1998)

Yayınım tabakası yani difüzyon tabakası; azotun yayınarak girdiği çekirdek mikro yapısına sahip bölgedir. Demir esaslı malzemelerde azot katı eriyik halinde çözünürlük sınırına kadar (%0.4), yapıda kafes boşlukları ara yerlerde bulunabilir. Sadece katı eriyik sertleşmesi, sertliği çekirdek sertliğinin biraz üstüne çıkarabilmektedir. Kabuk derinliği işlem sıcaklığı, işlem süresi ve malzemenin alaşım içeriğine bağlı olarak değişir. Azot yoğunluğu çekirdekten yüzeye doğru giderek artmakta, çözünürlük sınırı aşıldığında çok ince nitrür çökeltileri

oluşmaktadır. Bu çökeltiler hem tane sınırlarında hem de tane içlerinde çökelirler. Demir nitrür veya diğer alaşım nitrürleri kafes yapısının çarpılmasına ve dislokasyonların kilitlenmesine neden olduğundan sertlik çok yüksek değerlere çıkar. (Gülmez, 1998)



Şekil 3.3 Fe-N diyagramı. (Thelning, 1984)

Azotun yüzeyden içeri doğru nüfuz etmesi ile azotla dolan metal kafesin içerdiği alaşım elementlerine bağlı olarak sertlikte artış olur. Yüzeydeki sertlik Al, V, Mo, Ti, Cr gibi nitrür oluşturan alaşım elementlerinin bulunmasına bağlı olarak değişir. Yüzeydeki sertliği en çok artıran Al'dan başlayarak Ti, Cr, Mo, V olarak sıralanır. Ancak bu elementler kuvvetli nitrür yapıcı olduklarından azotun yayılımını engellerler ve alüminyum dışındakiler karbürde oluştururlar. Bu karbürler nitrürleme esnasında çözünerek karbonca zengin bir bölge oluştururlar. Çeliklerde artan karbon miktarı ile beyaz tabaka kalınlığı artarken karbonun azotun yayılım katsayısını düşürmesinden dolayı da yayılım tabakası azalmaktadır. İyon nitrürleme yayılımı kontrollü bir işlem olduğundan sıcaklık, yüzey sertliği ve tabaka derinliğini etkileyen bir faktördür. Artan nitrürleme sıcaklığı ile yayılım bölgesinin derinliği artar. Buna ilaveten beyaz tabaka kalınlığı da sıcaklıkla beraber artış gösterir. (Gülmez, 1998)

İyon nitrürleme saf azot, azot + soygaz, kırılmış amonyak veya azot + hidrojen ortamlarında gerçekleştirilebilir. Yüksek sertlik ve kalın tabaka elde edebilmek için en uygun gaz karışımı N₂-H₂ çiftidir. Yüzeyde beyaz tabaka oluşturmaksızın sadece yayılım tabakası yapmak veya

yüzeyde istenen herhangi bir tabakayı oluşturmak asıl olarak gaz karışımındaki azot miktarına bağlıdır. Gaz karışımında azotun %5' ten az olması durumunda yüzeyde beyaz tabaka oluşmamakta, % 15-30 arasında tek fazlı γ' -Fe₄N tabakası oluşmakta, %60-70 arasında azota ilaveten %1-3 arası metan ya da etan kullanılması ile de yüzeyde tek fazlı ϵ -Fe₂₋₃ N tabakası oluşur. ϵ türü beyaz tabaka özellikle aşınmaya karşı parçalar için istenen bir tabakadır. (Gülmez, 1998)

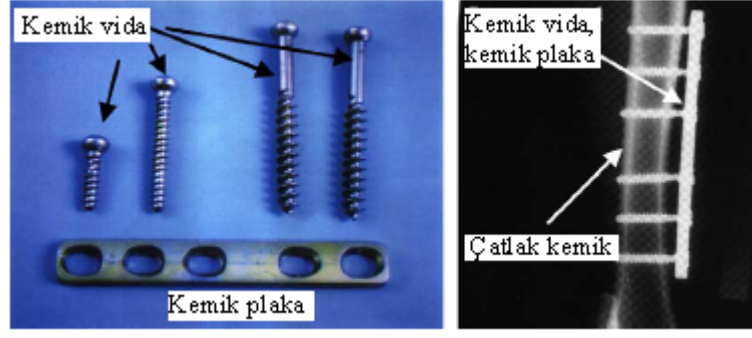
Verilen bir nitrürleme süresi için artan sıcaklıkta yüzey sertliği düşmektedir. Düşük sıcaklıklarda ise yayınan azot miktarının az olması nedeniyle yüzey sertliği yine düşebilmektedir. Yüksek yüzey sertliği malzemede optimum bir sıcaklık aralığı ile tanımlanabilir.

İşlem süresiyle tabaka kalınlığı doğal olarak artar. Ancak belirli bir nitrürleme sıcaklığı için özellikle uzun süreli nitrürleme işlemlerinde elde edilen yüzey sertliklerinde düşme olmaktadır. Verilen bir işlem sıcaklığı için yüzey sertliğini maksimum yapan optimum bir sürenin olduğu görülmüştür. Literatürde tabaka kalınlığı ile süre arasında parabolik bir ilişki olduğu belirtilmiştir. İyon nitrürlemede; diğer işlem parametreleri de tabaka özelliklerini etkilediğinden herhangi bir malzeme için uygun işlem parametrelerinin bulunması gereklidir. (Gülmez, 1998; İğdil, 2005)

3.3.5 316 L Ostenitik Paslanmaz Çeliğin Biyomedikal Alandaki Uygulamaları

Metalik cerrahi implantlar, insan vücudunun ılık tuzlu ortamında korozyona uğrarlar. Altın dışındaki tüm elementler, Gibbs serbest enerjilerini azaltmak için çözeltiler içinde , basit ve karmaşık iyonlar şeklinde çözünürler ve korozyon ürünleri olarak ayrışır. Kendilerine özgü üstün dayanımları, toklukları, işlenebilirlikleri ve düşük korozyon hızlarından dolayı cerrahi alaşımlar, ortopedik ve diş protezlerinin yapımında kullanılırlar. Metalik protezler korozyona uğrarken protezlerin yapıldığı özel cerrahi alaşımlardan bazı elementler ve bunların bileşikleri yerel dokulara geçerler ve büyük bir olasılıkla vücudun diğer kısımlarına dolaşım yolu ile taşınırlar. Bunlar demir, krom, nikel, kobalt, molibden, titanyum, alüminyum ve vanadyumdur. Bu elementlerin çoğu cerrahi 316L paslanmaz çelik malzemenin ana alaşım elemanlarıdır.

Günümüzde halen kullanılmakta olan klasik implantların çoğu tipik 316L paslanmaz çelik malzemeden yapılmaktadır. Protezlerin imalinde kullanılan malzemelerden paslanmaz çeliklerden ortopedik vida, ortopedik plaka ve ameliyat araç gereçlerinde yararlanılmaktadır. (Gülmez, 1998)



Şekil 3.4 Kemik vida ve kemik plaka. (Xuanyong vd., 2004)

316L ostenitik paslanmaz çelik malzemesi ucuzdur, kolay işlenebilir ve çok iyi parlatılabilir. Bu yüzden ortopedik implant malzeme alanında son 30 yılda geniş bir biçimde kullanılmaktadır. Ortopedik malzeme olarak kullanılan bu tip malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanımlarından önce yüzey işlemlerine tabi tutulurlar. Bu yüzey işlemleri plazma nitrürleme, iyon implantasyonu, fiziksel buhar püskürtme gibi yöntemler olabilir. Kemik plakalarında, azot iyon implantasyonu yorulma ömrünü artırmak için kabul edilebilir ve ekonomik bir işlem olarak yapılmaktadır. (Xuanyong vd., 2004)

3.4 Çökmeyle Sertleşen Paslanmaz Çelikler

Çökmeyle sertleşen paslanmaz çelikler çeşitli uygulamalar için ilk olarak 1940'lı yıllarda geliştirilmiştir. Özelliklerinin en önemlileri; kolay üretim, yüksek dayanım, iyi süneklik ve mükemmel korozyon direncidir. Çok yaygın olarak kullanılan iki tip çökmeyle sertleşen paslanmaz çelik vardır. Bunlar yarı ostenitik ve martenzitik tipleridir. (Smith, 2000a; 2000b)

Yarı ostenitik tip; tavllanmış şartlarda ostenitik ancak basit ısı ve termomekanik ısı işlemlerle martenzite dönüşebildiği için yarı ostenitik olarak adlandırılır. Bu tip alaşımı yapmak için ostenit ve ferrit arasındaki dengenin çok sıkı korunması gerekir. Ostenit veya ferrit çok yüksekse ostenit martenzite dönüşemeyecek kadar kararlı olacaktır. Ostenit oranı çok düşükse kısmi veya tamamen martenzite dönüşüme direnç gösteren tavllanmış şartlardaki kararlı ostenit üretilemez. (Smith, 2000a; 2000b)

Çizelge 3.11 Bazı yarı ostenitik çökelmeyle sertleşen paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimi. (Smith, 2000a; 2000b)

Sınıf	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	%N
17-7PH	0.07	0.50	0.30	17.0	7.1		1.2	0.04
PH 15-7 Mo	0.07	0.50	0.30	15.2	7.1	2.2	1.2	0.04
PH-14-8Mo	0.04	0.02	0.02	15.1	8.2	2.2	1.2	0.005
AM-350	0.10	0.75	0.35	16.5	4.25	2.75		0.10
AM-355	0.13	0.85	0.35	15.5	4.25	2.75		0.12

17-7 PH çeliği tip 301 ostenitik paslanmaz çelik gibi yaklaşık olarak aynı Cr ve Ni içeriğine sahiptir. Ancak ayrıca çökelmeyle sertleşme için %1.2 Al içerir. Bu alaşımlar genellikle fabrikadan ‘Şart A’ ile tanımlanmış tavlanmış (çözündürme uygulanmış) şartlarda temin edilir. Tavlanmış şartlarda yapı ostenitik matriste δ ferrit kirışlerden meydana gelmiştir. Bu alaşımların avantajı olan yumuşak şartlarda üretimden sonra ostenit, martenzite dönüşümü sağlamak amacıyla şartlandırılır. Şartlandırma işlemi karbonu katı eriyikten uzaklaştırmak için yeterince yüksek sıcaklığa ısıtma ve karbonu krom karbür (Cr_{23}C_6) şeklinde çökeltilmeden meydana gelir. Çökeltilme ilk olarak ferrit-ostenit arayüzeyinde olur. Ostenitik matristen karbon ve bir miktar kromun uzaklaştırılması osteniti kararsız hale getirir ve Ms sıcaklığına soğutma sonucu ostenit martenzite dönüşür. (Smith, 2000a; 2000b)

Çizelge 3.12 Bazı yarı ostenitik çökelmeyle sertleşen paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri. (Smith, 2000a; 2000b)

Sınıf	Biçim	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik (Rc)	% Uzama
17-7PH	Levha	1276	1379	43	9
PH 15-7 Mo	Levha	1551	1655	48	6
PH-14-8Mo	Levha	1482	1586	48	6
AM-350	Levha	1207	1420	46	12
AM-355	Levha	1248	1510	48	13

Martenzitik tip; martenzitik çökelmeyle sertleşen paslanmaz çelikler çözündürme uygulanmış şartlardaki yüksek sertliklerinden dolayı, genel olarak çubuk, tel ve ağır dövülmüş şekilde kullanılır. Levha şeklinde kullanımları azdır. Çözündürme ısı işlemi ve oda sıcaklığında soğutmadan sonraki bu çeliklerdeki ostenit ve ferrit dengesi martenzitik şartlardadır. Paslanmaz W ve 17-4 PH çelikleri martenzitik matriste bir miktar δ ferritten oluşan iki faza sahiptir. Ferrit özellikle, büyük kesitlerdeki bütün dayanım düzeylerinde kesit boyunca zayıf

özelliklere neden olur. 15-5 PH ve Custom 450 gibi yeni çökelmeyle sertleşen paslanmaz çelikler ferritten arındırılmış olarak üretilir. Bu nedenle de kesit kalınlığı boyunca özellikler iyileştirilir. Bu çeliklere çözündürme tavlama, oda sıcaklığına soğutma ve yaşlandırma ile ısıtma işlemi uygulanır. 17-4 PH çeliklere yaklaşık 1040°C’de çözündürme ısıtma işlemi uygulanır ve maksimum sertleştirme için 450-510°C’de yaşlandırma işlemi yapılır. (Smith, 2000a; 2000b)

Çizelge 3.13 Bazı çökelmeyle sertleşen martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri. (Smith, 2000a; 2000b)

Sınıf	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo	%Al	%Cu	%Ti	%Nb
Orta Dayanım										
17-4 PH	0.04	0.30	0.60	16.0	4.2			3.4		0.25
Custom450	0.03	0.25	0.25	15.0	6.0	0.8		1.5		0.3
PaslanmazW	0.06	0.50	0.50	16.75	6.25		0.2		0.8	
Yüksek Dayanım										
PH13-8Mo	0.04	0.03	0.03	12.7	8.2	2.2	1.1			

Çizelge 3.14 Bazı çökelmeyle sertleşen martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri. (Smith, 2000a; 2000b)

Sınıf	Biçim	AkmaDayanımı (MPa)	ÇekmeDayanımı (MPa)	% Uzama	Sertlik (Rc)
17-4 PH	Çubuk	1207	1310	14	42
Custom450	Çubuk	1269	1351	14	42
PaslanmazW	Çubuk	1241	1345	10	42
PH13-8Mo	Çubuk	1448	1551	12	47
Custom455	Çubuk	1620	1689	10	49

3.5 Çift Fazlı Paslanmaz Çelikler

Çift fazlı paslanmaz çelikler ferritik ve ostenitik paslanmaz çeliklerin ortasında yer alan paslanmaz çelik grubudur. Bu nedenle de hem ostenitik hem de ferritik paslanmaz çeliklerin bazı özelliklerini içerir. Çift fazlı çeliklerin gerilim korozyonuna olan dirençleri ferritik çeliklerinki kadar olmasa da nispeten yüksektir. Toklukları ferritik çeliklerden fazla, ostenitik çeliklerinki kadar iyi değildir. Dayanımları ostenitik çeliklerden daha fazladır. Çift fazlı çelikler bazı mühendislik tasarımları için optimum malzeme grubunu oluşturmaktadır. Ticari çift fazlı paslanmaz çeliklerin krom içerikleri %18-30, nikel içerikleri %3-9 aralığında değişmektedir. Bütün korozyona karşı koruyuculuğu krom sağlarken, nikel tokluk ve şekillendirilebilirliği artırır. Alaşımların hepsi özellikle oyuklanma korozyon direncini

iyileştirmek için molibden içerir. Taneler arası korozyonu azaltmak içinde krom karbür çökmesini önlemek veya azaltmak amacıyla düşük karbon ($\% < 0.03$) içeriğine sahiptirler . (Smith, 2000a; 2000b)

Çizelge 3.15 Bazı çift fazlı paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri.
(Smith, 2000a; 2000b)

Alaşıım	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Mn	%Si
Ferrallium 255	0.08	25.5	5.5	3.0	2.0	2.0
7 Mo	0.08	25.5	3.7	0.5	1.0	0.75
U50	0.03	21.0	7.0	2.5	2.00	1.0
SAF2205	0.03	22	3.05.5	2.0	0.8	0.8

Çift fazlı paslanmaz çeliklerin çekme dayanımı yaklaşık olarak ostenitik çeliklerle aynıdır. Ancak çift fazlı çeliklerin akma dayanımları ostenitik paslanmaz çeliklerden yaklaşık olarak üç kat fazladır. Çift fazlı çeliklerin yüksek akma dayanımı, ağırlığı azaltmak için mühendislik tasarımlarında bir avantajdır. Çift fazlı çeliklerin uzaması ostenitik çeliklerden daha azdır, ancak çoğu üretim özellikleri için yeterlidir. Toklukları ostenitik ve ferritik çeliklerin ortasındaki değerlere sahiptir. (Smith, 2000a; 2000b)

Çizelge 3.16 Bazı çift fazlı paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri.
(Smith, 2000a; 2000b)

Alaşıım	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	%Uzama
Ferrallium255	480 min	740 min	20 min
7 Mo	565	683	31
U50	315-440	590-800	20-25
SAF2205	410-450	680-900	25

Çift fazlı çeliklerin genel korozyon dirençleri krom, molibden ve azot içerikleriyle belirlenir. Çift fazlı çeliklerin oyuklanma korozyon dirençleri 304 ve 316 ostenitik paslanmaz çeliklerinkinden daha üstündür. % 25 Cr ve % 3 Mo içeren yüksek alaşımlandırılmış çift fazlı paslanmaz çelikleri deniz suyuna karşı iyi korozyon direncine sahiptir. Klorun neden olduğu gerilim korozyon kopmalarına karşı hassastırlar. Ancak bu hassasiyet ostenitik paslanmaz çeliklere oranla daha üstündür. Genelde ferrit miktarının yüksek olması, gerilim korozyonuna karşı olan direnci iyileştirmektedir. (Smith, 2000a; 2000b)

4. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI

Titanyum ve alaşımları 1952 yılından beri yapısal malzemeler olarak kullanımda olduğu için yeni mühendislik malzemeleridir. Titanyum alaşımları, yüksek bir dayanımın ağırlığa oranına, yaklaşık 550°C'ye kadar yüksek sıcaklık özelliklerine, özellikle oksitleyici asitlerde, klor maddelerinde ve çoğu doğal ortamlarda mükemmel korozyon dirençlerine sahiptir. Titanyum ve alaşımlarının maliyeti yaygın olarak kullanılan metallere göre daha fazladır. Bunun nedeni de titanyumun cevherlerinden ekstraktif edilmeleri zordur ve üretimlerinde çok gelişmiş ergitme ve fabrikasyon teknikleri kullanılmasıdır. Titanyum alaşımı fabrikasyonunun yüksek maliyeti temel olarak bu metalin yüksek reaktifliği ve oksijen, azot, hidrojen, karbon için duyarlılığından kaynaklanmaktadır. Bu yüksek maliyete rağmen titanyum ve alaşımları, özel özelliklerin avantaj olarak kullanılabileceği yerlerde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Titanyum alaşımlarının yüksek dayanımın ağırlığa oranı ve yüksek sıcaklık özellikleri uçak endüstrisinde çok büyük bir öneme sahiptir. Titanyumun mükemmel korozyon direnci bu metali kimya ve yiyecek endüstrilerinde kullanışlı hale getirmiştir. Titanyum ve alaşımları için yeni kullanımlar sürekli araştırılmakta ve geliştirilmektedir. (Smith, 2000a; 2000b)

4.1 Saf Titanyum

Titanyum 4.54 g/cm³ yoğunluğa sahip hafif bir metaldir. Yüksek bir ergime sıcaklığına (1668°C) ve orta değerinde bir elastikiyet modülüne (16.8×10¹¹dyn/cm²) sahiptir. Titanyum iki allotropik kristal yapıda bulunur. Bunlar hegzagonal sıkı paket yapıya sahip α titanyum ve hacim merkezli kübik yapıya sahip β titanyumdur. Saf titanyumda α fazı 883°C'ye kadar karardır. β geçiş sıcaklığı 883°C üzerinde hegzagonal α fazı hacim merkezli kübik yapıda olan β fazına dönüştürülür. (Smith, 2000a; 2000b)

Titanyum alaşımları oda sıcaklığındaki mikro yapılarına bağlı olarak α , yakın α , $\alpha+\beta$, β olarak sınıflandırılır. α kararlaştırıcıları; Al, O, N, C, β kararlaştırıcıları; Mo, V, Nb, Ta, nötr kararlaştırıcıları; Zr'dir. α ve yakın α titanyum alaşımları yüksek korozyon direnci gösterirler, fakat düşük sıcaklık dayanımına sahiptirler. Buna karşılık $\alpha+\beta$ alaşımları α ve β fazlarının bir arada bulunmasından dolayı yüksek dayanım gösterirler. Malzemelerin özellikleri α ve β fazlarının oranına, bileşimine, ısıl davranışlarına, termomekanik proses koşullarına bağlıdır. β alaşımları düşük elastisite modülü ve yüksek korozyon direncine sahiptirler. (Xuanyong, 2004)

Alaşım tipi	Mikroyapısı	Elastisite modülü (Gpa)	Akma dayanımı (Mpa)	Sertlik
Ti	α	105	692	70HRB
Ti-6Al-4V	$\alpha - \beta$	110	900	36HRC
Ti-12Mo-6Zr-2Fe	β	74-85	1060	33HRC

4.2 Ticari Saf Titanyum

Ticari saf titanyum alařımlanmamıř ve saflık deęeri %99.5-%99 olan titanyumdur. Alařımlanmamıř titanyumda esas elementler demir ve arayer elementleri olan karbon, oksijen, azot ve hidrojenidir. Ticari saf titanyum içinde oksijen içerięinin sınıf ve dayanımını belirledięi bir α fazı alařımı olarak dūřunūlebilir. Karbon, azot ve hidrojen titanyumda empūriteler halinde bulunur. Dūřuk sınırlardaki azot arayer eriyebilirlięi çok az olmakla beraber varlıęı genellikle istenmez, unkū titanyum üzerine gevrekleřtirici bir etkisi vardır. Ticari saf titanyumun dayanımı azdır, ancak titanyum alařımlarından daha ucuz ve korozyona karřı dirençlidir. Dayanımın öncelikle aranan özellik olmadığı durumlarda ticari saf titanyum kullanılabilir. Ticari saf titanyum pek çok kimyasal ortama karřı mūkemmel korozyon direncine sahiptir. Nitrik asit, nemli klor, klor özelteleri, klorlanmış organize bileřikler, inorganik klor özelteleri ve özellikle sıcak klor özeltelerine karřı dirençlidir. Titanyum kullanımında artıřın görūldūęu yer, petrol proses endūstrisi ve ısı deęiřtiricilerdir. Ticari saf titanyuma %0.2 paladyum ilavesi indirgeyici madde içerisinde korozyon direncini artırır. Būylece hidroklorik, fosforik ve sūlfirik asit özelteleri, oksitleyici ve indirgeyici deęiřken iřlem řartları için titanyumun uygulama aralıęını geniřletmiř olur. (Smith, 2000a; 2000b)

Alaşımsız titanyumun çekme özellikleri temel olarak azot ve oksijen düzeyleri ile daha az olarak karbon içerikleri ile belirlenir. Oksijen alaşımsız titanyumun dayanımını kontrol eden esas element olduğu için arayer elementleri oksijen, azot ve karbonun mukavemetlenmeye etkisi oksijen eşdeğerliği ile ilgili olarak ifade edilir. (Smith, 2000a; 2000b)

4.3 Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımları yapılarındaki faz durumlarına göre sınıflandırılırlar. Alfa (α) fazından oluşan alaşımlar α titanyum alaşımları olarak ifade edilir. Az miktarda beta (β) kararlaştırıcı elementlerle birlikte α fazı içeren elementler yakın α titanyum alaşımları olarak adlandırılır. α ve β karışımından oluşan alaşımlar $\alpha+\beta$ titanyum alaşımları olarak isimlendirilirler. Son olarak çözündürme ısıl işleminden soğutmadan sonra oda sıcaklığında β fazının kararlı hale

getirildiği titanyum alaşımları β titanyum alaşımları olarak sınıflandırılır. (Smith, 2000a; 2000b)

α ve yakın α titanyum alaşımları genellikle ısıtıl işlem uygulanamaz ve kaynaklanamaz alaşımlardır. Bu alaşımlar orta dayanıma, iyi darbe tokluğuna ve yüksek sıcaklıklarda iyi sürünme direncine sahiptirler. Çoğu $\alpha+\beta$ alaşımlarına dayanımda orta bir artış sağlamak için ısıtıl işlem uygulanabilir. Dayanım düzeyleri ortadan yüksektir. Bu alaşımlar iyi şekillendirme özelliklerine sahiptir ancak yüksek sıcaklıklarda sürünme dirençleri α ve yakın α alaşımları gibi iyi değildir. β alaşımlarına çok yüksek dayanımlar için ısıtıl işlem uygulanabilir ve kolaylıkla şekillendirilebilir. Buna karşın bu alaşımlar yüksek dayanım şartlarında yüksek yoğunluğa ve düşük sünekliğe sahiptir. Bu dezavantajdan dolayı yaygın olarak kullanılmamaktadırlar. (Smith, 2000a; 2000b)

4.3.1 Alfa Titanyum Alaşımları

Günümüzde ticari kullanımda tüm α titanyum alaşımlarının içerisinde en önemli olan alaşım Ti-5Al-2.5 Sn'dir. Alüminyum ve kalay titanyumda α fazını kararlı hale getirdiği için bu alaşım α titanyum alaşım grubu içerisinde yer alır. Alüminyum titanyum için en önemli alaşım elementidir, çünkü alüminyum titanyumu katı eriyik mukavemetlenmesi ile mukavemetlendirir ve de yoğunluğunu azaltır. Bütün titanyum alaşımlarında belirli bir düzeyde bulunan oksijende alüminyum gibi kuvvetli bir α kararlaştırıcıdır ve titanyumu mukavemetlendirir. Buna karşın titanyumdaki bütün arayer elementleri gibi oksijen sünekliğini düşürür. Bu nedenle Ti-5Al-2.5Sn alaşımı düşük sıcaklıkta iyi süneklik gerektiren uygulamalar için üretilir. Ti-5Al-2.5Sn alaşımı kaynaklanabilir ve yüksek sıcaklıklarda iyi kararlılık ve oksidasyon direncine sahiptir. Dayanımı ise orta düzeydedir.

Tüm α titanyum alaşımları titanyumun hegzagonal sıkı paket yapısına sahiptir. Ti-5Al-2.5Sn alaşımı uçak motoru, kompresör, kanat ve kanat levha metal ve dövme için kaynaklanabilir alaşım tipi olarak buhar türbin kanatlarında iyi oksitlenme direnci ve dayanım gerektiren yerlerde kullanılmaktadır. (Smith, 2000a; 2000b)

4.3.2 Yakın Alfa Titanyum Alaşımları

Yakın α titanyum alaşımları α fazının yapısında bir miktar β fazı dağılımını içeren alaşımlardır. β kararlaştırıcı elementler olan küçük miktarlardaki molibden ve vanadyum (yaklaşık %1-2) oda sıcaklığında bu alaşımların bir miktar β fazı bırakması için ilave edilir. Yakın α titanyum alaşımlarından Ti-8Al-1Mo-%1V ve Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alaşımları en yaygın kullanılanlarıdır. Ti-8Al-1Mo-1V alaşımı genel olarak jet motorlarının kompresör

kısımında orta yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş ve uçak dış kaplama parçaları için kullanılır. Bu alaşım iyi kaynaklanabilirlik, iyi sürünme direnci, tokluk, yüksek dayanım, düşük süneklik ve yüksek elastik modül gibi istenen özelliklere sahiptir. Bu alaşımın tek dezavantajı tuzlu ortamda gerilim korozyonuna karşı hassas olmasıdır. (Smith, 2000a; 2000b)

4.3.3 Alfa ve Beta Titanyum Alaşımları

Titanyum alaşımlarının $\alpha+\beta$ alaşım grubu oda sıcaklığında yeterli miktarda β fazının kalmasını sağlamak için etkin miktarda bir veya daha çok β kararlaştırıcı elementler içererek bir $\alpha+\beta$ yapısına neden olur. $\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarına çözündürme ısı işlemi uygulanabilir, su verilebilir ve dayanımı artırmak için yaşlandırılabilir. $\alpha+\beta$ titanyum alaşım grubunda en çok kullanılan titanyum alaşımı Ti-6Al-4V alaşımıdır. Bu alaşım kolaylıkla kaynaklanabilir, işlenebilir, levha, ekstrüzyon, tel ve çubuk şekline getirilebilir. Ti-6Al-4V alaşımı savaş gereç dövme için yoğun bir şekilde kullanılır. Günümüzde de Ti-6Al-4V alaşımının vücut ile uyum sağlaması, vücut sıvısı içerisindeki korozyon direncinin iyi olması biyomedikal alandaki kullanımını artırmıştır. İleri uçak motorları için parçalar gibi yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanımlar gerektiren özel uygulamalar için Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo ve Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mn-Cr-0.25Si alaşımları geliştirilmiştir. Bu alaşımlar daha çok sertleşebilir, büyük kesitlerde ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir. (Smith, 2000a; 2000b)

$\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarının mikroyapıları öncelikle kimyasal bileşimine, işlemin geçmişine ve ısı uygulamalara bağlıdır.

Çizelge 4.2 $\alpha+\beta$ alaşımlarının kimyasal bileşimleri ve tipik uygulamaları.
(Smith, 2000a; 2000b)

%Alaşım	Şartlar	Tipik uygulamalar
Ti-6Al-4V	Tavlanmış,Çözündürme + yaşlandırma	Roket motor kılıfları, uçak türbinleri-kompresörleri, silah ekipmanları, tıpta
Ti-6Al-6V-2Sn	Tavlanmış,Çözündürme + yaşlandırma	Isıl işleme uygun, kaynaklanabilir, uçak iniş dişlileri, yapısal uçak parçaları
Ti-6Al-2Sn-4Zr	Çözündürme + yaşlandırma	İleri jet motor parçaları

$\alpha+\beta$ titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri de alaşımın bileşimi ve uygulanan ısı işlemleri ile değişkenlik göstermektedir.

Çizelge 4.3 Bazı $\alpha+\beta$ titanyum alaşımının mekanik özellikleri.
(Smith, 2000a; 2000b)

%Alaşım	şartlar	Akma Dayanımı(ksi)	Çekme Dayanımı (ksi)	% Uzama	%Kesit Dar.
Ti-6Al-4V	Tavlanmış,Çözündürme + yaşlandırma	160	170	10	25
Ti-6Al-6V-2Sn	Tavlanmış,Çözündürme + yaşlandırma	145	155	14	30
Ti-6Al-2Sn-4Zr	Çözündürme + yaşlandırma	170	184	10	23
Ti-10V-2Fe-3Al	Çözündürme + yaşlandırma	174	185	10	19

Yüksek sıcaklıklardaki yüksek dayanımlar Ti-6Al-6-2Sn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo ve Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si titanyum alaşımları ile elde edilebilmektedir. Çünkü bu alaşımlar yüksek sıcaklık kullanımları için tasarlanmışlardır. Ti-6Al-4V alaşımına β geçişin yaklaşık 40 °C altında çözündürme ısıı işlemi uygulanır, ardından su verilir ve yaşlandırılırsa, yeterli miktarda süneklikle beraber yaklaşık 120 ksi'lik maksimum bir çekme dayanımı elde dileyebilir. β geçişin üzerindeki çözündürme ısıı işlemi düşük süneklik ve dayanıma neden olur. (Smith, 2000a; 2000b)

4.3.4 Beta Titanyum Alaşımları

Yeterli miktarlarda β kararlaştırıcı alaşım elementleri titanyuma ilave edilirse tüm kararsız β fazından oluşan bir yapı su verme ve bazı durumlarda havada soğutma ile oda sıcaklığında elde edilebilir. β titanyum alaşımları için temel alaşım elementleri vanadyum, molibden, krom ve demirdir. Zirkonyum bazen β ve α fazlarının her ikisinin de dayanımını artırmak için ilave edilir. Alüminyumda bu alaşımların çoğuna yoğunluklarını azaltmak, biraz katı eriyik mukavemetlenmesini sağlamak ve oksidasyon direncini artırmak için ilave edilir. β titanyum alaşımları hacim merkezli kübik kristal yapılarından dolayı çözündürme ısıı işlemi uygulanmış ve su verilmiş şartlarda kolaylıkla soğuk şekillendirilebilirler. Bunun ardından da çok yüksek dayanımlara yaşlandırılabilirler. β titanyum alaşımları vanadyum ve molibden gibi ağır metallerin büyük yüzdelerinden dolayı yüksek yoğunluklara sahiptirler. Yüksek dayanım şartlarında bu alaşımlar düşük sünekliklere, kalın kesitlerde kimyasal segregasyon ve büyük tane boyutu problemlerine sahiptirler. Büyük tane boyutu düşük çekme, süneklik ve yorulma performansına neden olacağından günümüzde β titanyum alaşımları yaygın olarak kullanılmamaktadır. (Smith, 2000a; 2000b)

Çizelge 4.4 Bazı β titanyum alaşımlarının kimyasal bileşim ve uygulamaları.
(Smith, 2000a; 2000b)

% Alaşım	Uygulama Alanları
Ti-13V-11Cr-3Al	Yüksek dayanım gerektiren bağlayıcılar, uzay parçaları
Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	Uçak iskelet parçaları, plaka, dövülmüş parçalar
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	Yüksek dayanım gerektiren bağlayıcılar, burma çubukları
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	Şekillendirilebilirlik, korozyon direnci gerektiren parçalar

β titanyum alaşımların genellikle en yüksek dayanımlarını elde edebilmek için çözündürme ısıtıl işlemi uygulanmış ve yaşılandırılmış şartlarda sağlanır. Bu alaşımlar 210 ksi'ye kadar ulaşan bütün titanyum alaşımlarının en yüksek dayanımlarına sahiptirler. Ti-13V-11Cr-3Al alaşımına çözündürme ısıtıl işlemi ve yaşılandırma işlemi uygulandıktan sonra elde edilen akma dayanımı 170 ksi, çekme dayanımı 177 ksi, % uzaması 8'dir. Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn alaşımında ise tavlanmış durumundaki akma dayanımı 121 ksi, çekme dayanımı 128 ksi iken , aynı alaşıma çözündürme ısıtıl işlemi ve yaşılandırma işlemi uygulandıktan sonraki akma dayanım değeri 191 ksi, çekme dayanım değeri de 201 ksi değerine ulaşmıştır. (Smith, 2000a; 2000b)

Beta-C Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr bileşimine sahip beta titanyum alaşımı yakın zamanlarda geliştirilen titanyum alaşımlarındandır. Bu alaşım tipi çözündürme ve yaşılandırma işlemleri ile yüksek dayanım ve mükemmel korozyon direnci sayesinde bazı uzay dışı uygulamalar için kullanım özelliklerine sahiptir. (Smith, 2000a; 2000b)

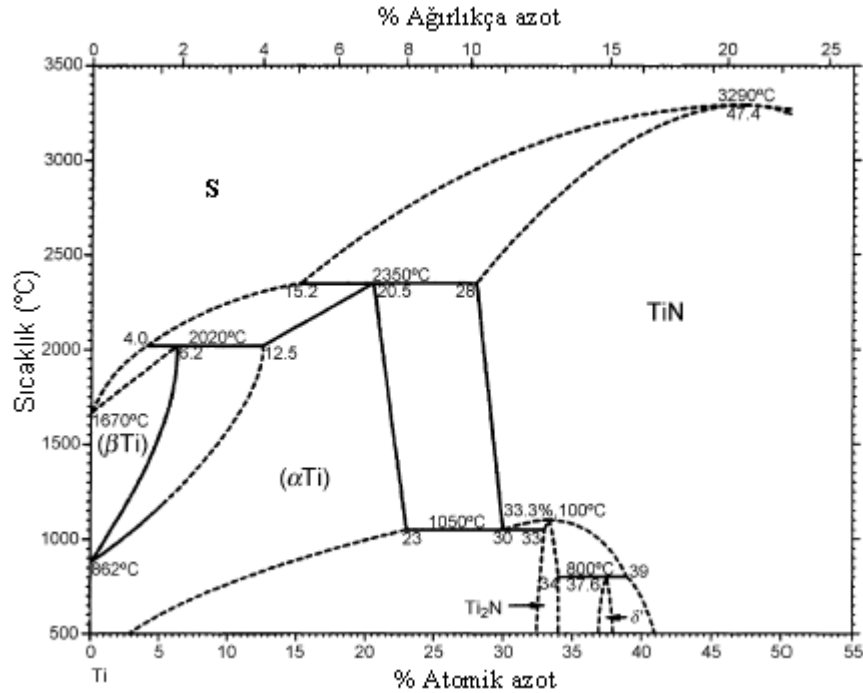
Yeni beta 215 titanyum alaşımı Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-2.5Sn bileşimine sahiptir. Mükemmel korozyon direnci, oksidasyon direnci, hidrojen direncine sahiptir. Bunlara ilave olarak yüksek çekme dayanım değerleri gösterir. Bu alaşım yüksek molibden içeriği yüksek sıcaklık kararlılığını, niobyum ise mükemmel oksidasyon direncini sağlar. Bu alaşımın uygulama alanı için önerilen kullanım yüksek sıcaklıklarla ilgilidir. (Smith, 2000a; 2000b)

4.4 Titanyum Alaşımlarının Plazma Nitrürlenmesi

Titanyumun plazma nitrürlenmesi de, diğer malzemelerde olduğu gibi iş parçası yüzeyine elektron ve iyonların bombardıman edilmesi ile gerçekleşmektedir. Vakumlu bir ortamda azot atomlarının elektrik verilerek iyonlaştırılması ve katot (negatif kutup) olarak yerleştirilen parça yüzeyine çarptırılması ile plazma nitrüleme işlemi yapılır. Plazma uygulamaları, biyomalzeme yüzeyinin işlem sonrası yüzey temizliğinin daha iyi olması ve yüzey enerjisinin artması için tercih edilen yöntemlerdir. Çok üstün aşınma dayanımının, sertlik derinliğinin çok hassas kontrolünün istendiği yerlerde özellikle tercih edilir. (İğdil, 2005)

Ti-6Al-4V $\alpha+\beta$ titanyum alaşımasının plazma nitrürlenmesi işlemi sonunda disk, piston ve eğme numuneleri kullanılarak yapılan yüzey işleminde bu numuneler üzerinde büyüyen nitrür tabakasının olduğu gözlenmiştir. Genel olarak titanyumun plazma nitrürlenmesinde uygulanan işlem sıcaklıkları 550°C-950°C aralıklarında gerçekleşmektedir. Bu sıcaklık aralığı paslanmaz çeliklere göre daha yüksek aralık değerini ifade etmektedir. Ti-6Al-4V ve Ti-10V-2Fe-3Al alaşımlarının mikrosertlik değerleri 900 HV'ye kadar gelebilmektedir. (Zhecheva vd., 2005)

Ti-6Al-4V $\alpha+\beta$ titanyum alaşımı plazma nitrürlemeden başka fiziksel buhar biriktirme, plazma iyon aşılama gibi yüzey işlemleri de uygulanabilmektedir. Bu tipteki uygulama için yüksek iyonlaşma enerjisine ve özel ekipmana ihtiyaç vardır. Plazma nitrürlemenin dezavantajı, titanyum alaşımlarının yorulma dayanımını azaltmasıdır. Ancak işlem sıcaklıklarının azaltılması ile bu problemin üzerinden gelinebilmektedir. (Zhecheva vd., 2005)

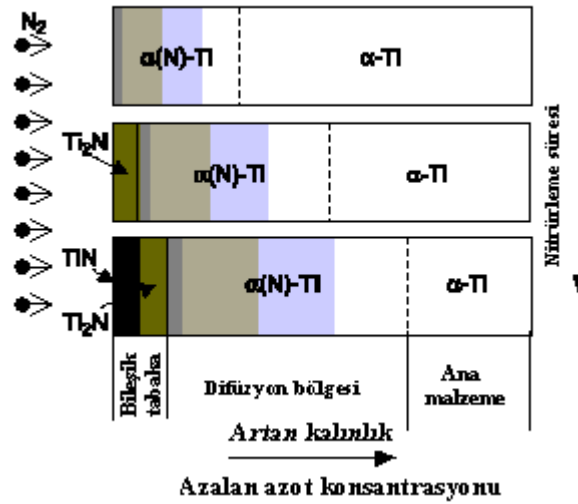


Şekil 4.1 Ti-N denge diyagramı. (Zhecheva vd., 2005)

Titanyum malzeme aktif azot içeren bir ortamda ve yüksek sıcaklıkta ise azottan kaynaklanan bir kütle transferi başlar. Azot, α titanyum fazı içerisine arayer atomu olarak emilir. Oluşan bu yüzey tabakası difüzyon bölgesi olarak adlandırılır ($\alpha(N)$). Bu proses α titanyum matriksi içinde çözünen azot miktarı arttıkça devam eder. Gaz/metal arayüzeyindeki azot konsantrasyonu α fazındakinden fazla konuma geldiğinde arayer çözeltisinde kalır ve yeni bir faz (Ti_2N) oluşumuna neden olan arayüzeyde bir reaksiyon gerçekleşir. Bunun sonucu olarakta difüzyon bölgesinin altında bileşik tabaka oluşur. Gaz/metal arayüzeyindeki azot

konsantrasyonu Ti_2N tabakasından fazla olduğunda numune yüzeyinde faz dönüşümü olur ve Ti_2N fazından TiN fazı oluşur. Difüzyon bölgesi sadece $\alpha(N)$ içerirken titanyum nitrürlü alt tabaka TiN ve Ti_2N içeren bileşik tabakadan oluşur. Nitrürleme boyunca numune yüzeyindeki faz geçişi ; $\alpha-Ti \Rightarrow \alpha(N)-Ti \Rightarrow Ti_2N \Rightarrow TiN$ şeklinde olur. (Zhecheva vd., 2005)

Bileşik tabakanın altında yer alan difüzyon bölgesi α titanyum fazı içindeki arayer azot çözeltisinden meydana gelir. Difüzyon bölgesinin mikroyapısı titanyum alaşımının kimyasal bileşimine ve nitrürleme sıcaklıklarına bağlıdır. Oluşan yeni yüzey tabakalarının kalınlığı nitrürleme prosesinin difüzyonu boyunca en çok sıcaklığa, zamana ve nitrürleme yöntemine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Titanyum ve titanyum alaşımlarında nitrür tabakalarının deney sonuçları genel olarak bileşik tabaka kalınlığının 1-50 μm aralığında olduğunu, difüzyon bölgesinin kalınlığının yüzlerce mikrometre seviyesinde olabileceğini göstermiştir. (Zhecheva vd., 2005)



Şekil 4.2 Titanyumun plazma nitrürlenmesi ile yüzey tabakalarının oluşumu (Zhecheva vd., 2005)

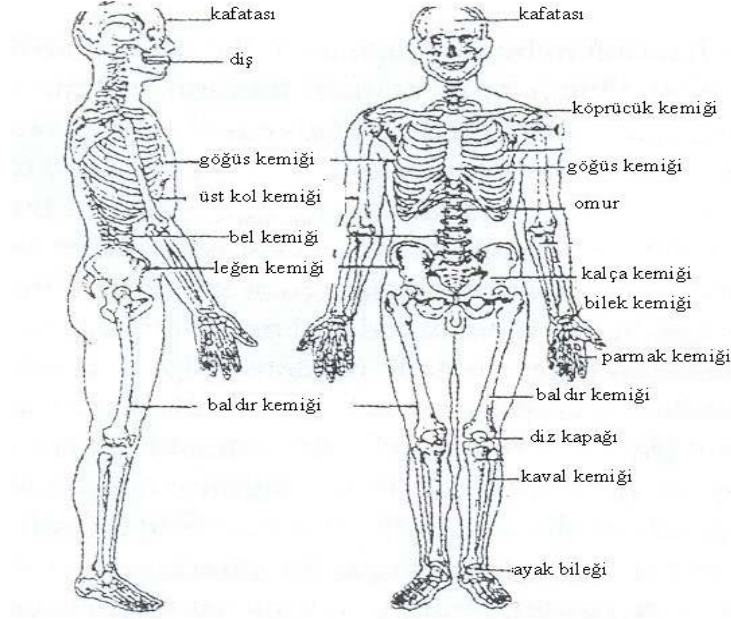
Plazma nitrürleme yüzey işleminde etkili olabilen parametreler; nitrürleme sıcaklığı, nitrürleme süresi, gaz karışımları, uygulanan basınç miktarı ve elektriksel etmenlerdir.

4.5 Titanyum Alaşımlarının Biyomedikal Alandaki Uygulamaları

Titanyum ve alaşımları korozyona karşı dirençli, vücut dokuları tarafından iyi bir şekilde kabul edilebilir malzemelerdir. Titanyum, titanyum alaşımlarının üstün biyoyumumluluk ve yüksek korozyon direnci göstermesi nedeniyle insan vücudunda tıp ve dişçilik gibi çeşitli alanlarda kullanılmasına olanak sağlamıştır. Titanyum ve alaşımları zayıf tribolojik özelliklerinden dolayı , endüstriyel ve tıp alanında daha yaygın kullanıma sahip olabilmek için plazma nitrürleme ve diğer nitrürleme yöntemleri gibi termokimyasal yüzey işlemlere tabi

tutulurlar. Titanyum ve alaşımları mühendislik uygulamalarında, dişli takımlarında, rulman yataklarında, yarış otomobili parçaları ve diş implantları gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır.

Ti-6Al-4V alaşım malzemesi vücutta sert dokuların olduğu bölgelerde kullanılırlar. Sert dokular kaza, yaralanma ve benzeri nedenlerle hasar görürler. Bu nedenle titanyum ve titanyum alaşımları yapay kemikler, bağlantılar ve diş tabanlarında büyük bir oranda kullanılırlar. Titanyumun düşük elastisite modülü ve biyomekanik avantaj göstermesi bu sert doku kısımlarında kullanımını arttırmıştır. (Gülmez, 1998; Xuanyong vd., 2004)



Şekil 4.3 İnsan vücudundaki sert doku yerleri (Xuanyong vd., 2004)

Özellikle yapay diş tabanlarında vida şeklindeki kullanımları ile biyomedikal alanda yer edinmesini sağlamıştır.

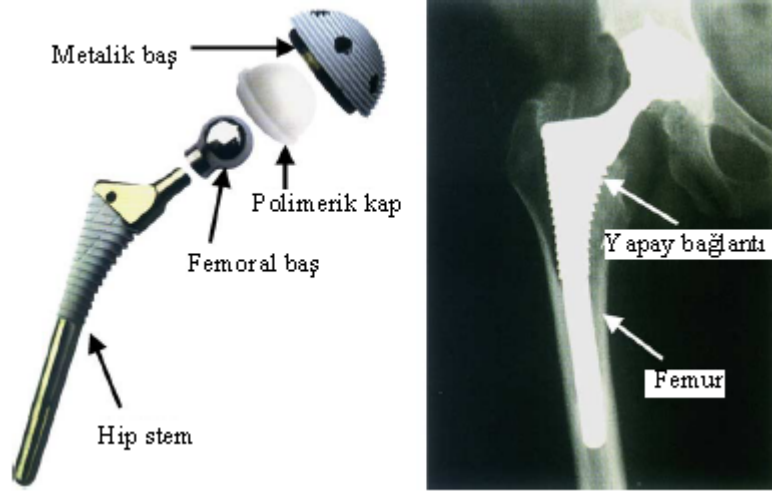


Şekil 4.4 Vida şeklindeki yapay diş tabanının şematik görünümü. (Xuanyong vd., 2004)

Son yıllarda özellikle klorlu çözeltilerde çok yüksek korozyon ve yorulma dayanımından dolayı daha fazla implant malzeme titanyum alaşımlarından yapılmaktadır. Düşük yoğunluğa sahip olması özellikle diz protezi gibi büyük protezler için önemli bir karakteristiktir. Titanyum alaşımları özellikle paslanmaz çeliğe oranla daha pahalıdır. Ancak düşük yoğunluğun ve daha iyi mekanik özellikleri sayesinde bileşenlerin toplam ağırlığının azlığı nedeniyle maliyetleri çok fazla olmamaktadır.

Titanyum alaşımları paslanmaz çelik gibi kolay işlenemezler, ayna parlaklığındaki son yüzey işlemine getirmek kolay değildir. Ayrıca sürtünme, aşınma davranışı pek iyi değildir. Hasara uğrayan kalça protezleri incelendiğinde titanyum küresel kafada ve karşılığında aşırı aşınma, kararma gözlenmiştir. Bu probleme çözüm olarak titanyum alaşımının ve polimer çiftinin aşınma dayanımını artırmak için yüzey sertleştirme işlemleri önerilmiştir. Bu işlemler titanyumun azotlu bileşiklerine dayanan üç değişik işlem olarak öngörülmüştür. Bunlar titanyumun yüzeylerini TiN ile kaplamak, plazma nitrüleme ve azot iyon implantasyonudur. (Gülmez, 1998)

Titanyumun en yaygın uygulamaları hip sitem, femoral baş, polimerik uç ve metalik uçtan oluşan yapay kalça bağlantısıdır.



Şekil 4.5 Yapay kalça bağlantısının şematik görünümü. (Xuanyong vd., 2004)

Titanyum ve titanyum alaşımları kardiyojide yaygın olarak kullanılmaktadır. Nikel - titanyum alaşımı yapay kalp kapakçığı ve yapay vasküler stentlerde kullanılmaktadır. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de kardiyojide kullanılan yapay kalp kapakçığı ve yapay vasküler stent görülmektedir.



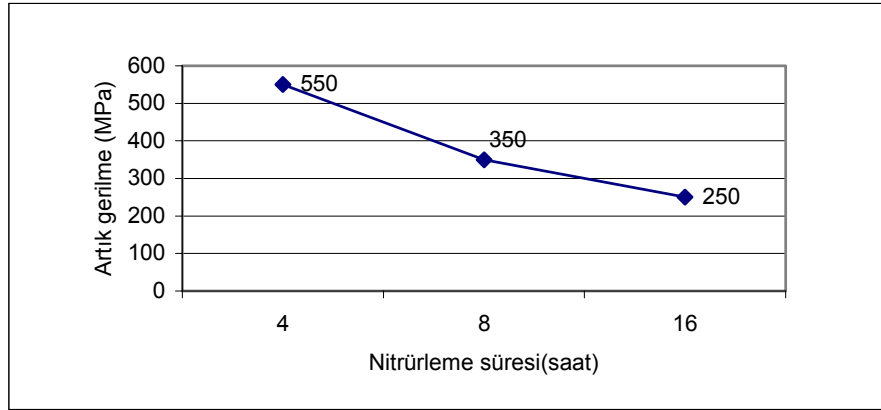
Şekil 4.6 Yapay kalp kapakçığı. (Xuanyong vd., 2004)



Şekil 4.7 Yapay vasküler stent. (Xuanyong vd., 2004)

5. 316L VE Ti-6Al-4V ALAŞIMLARINA PLAZMA NİTRÜRLEME UYGULAMA ÇALIŞMALARI

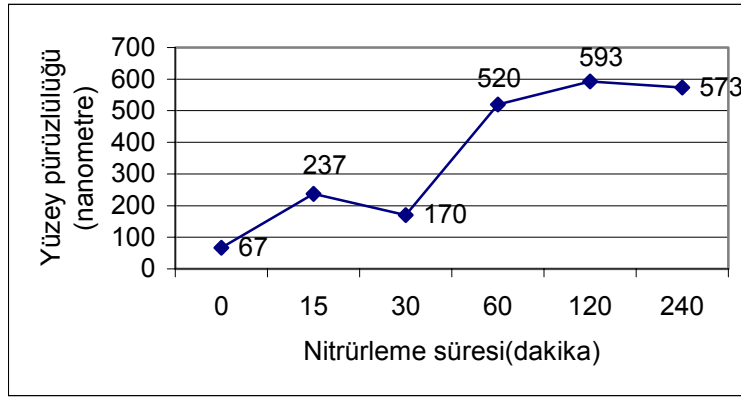
Gülmez, 316L ostenitik paslanmaz çeliğin plazma nitrürleme yöntemi ile yorulma dayanımlarındaki artışı ve kalıntı gerilmeleri incelemiştir. 316L ostenitik paslanmaz çelik parçalar 475°C sıcaklıktaki $N_2 - H_2$ gaz atmosferi ($N_2 : H_2 = 1:4$) içinde ve 10 Torr'luk vakum altında nitrürlenmiştir. Vakum odasına gaz karışımı için toplam gaz akışı $250 \text{ cm}^3/\text{dak}$ olacak şekilde verilerek işlem başlatılmış ve yaklaşık 600 V'luk doğru akım gerilimi altında işlem devam etmiştir. Tüm parçalar sırasıyla 2, 4, 8 ve 16 saatlik işlem sürelerinde nitrürlenmiştir. İmplantların yorulma ömrünün, iyon nitrürleme uygulanarak önemli oranda arttırılabildiği; ömrün yüksek gerilmeli yorulma (kısa ömürlü) modunda 1.5 kat, orta gerilme seviyeleri için 5 kat, düşük gerilme koşullarında (uzun ömürlü yorulma) ise en az 10 kat arttırılabildiği görülmüştür. (Gülmez, 1998)



Şekil 5.1 Artık gerilmelerin artan nitrürleme süresiyle değişimi. (Gülmez, 1998)

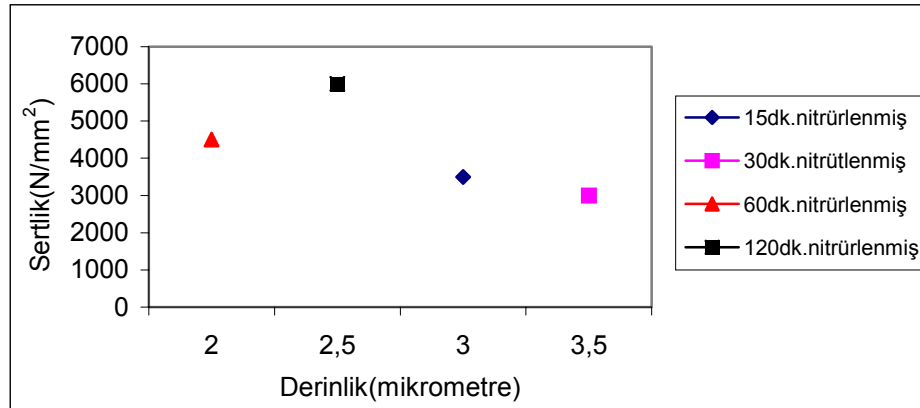
Artık gerilme deneylerinde; en fazla artık gerilme 3 saat nitrürlenmiş numunelerden elde edilmiş olup bunun değeri 560 MPa olarak basma karakterinde yüzeydeki maksimum artık gerilmedir. 8 saatlik numunelerde 356 MPa ve 16saatlik numunede ise 250 MPa olarak bulunmuştur. Buna göre nitrürleme süresinin artmasıyla difüzyon tabakası artarken, basma karakterli kalıntı gerilmelerin şiddeti azalmaktadır. (Gülmez, 1998)

İğdil yapmış olduğu yüksek lisans tezinde, düşük sıcaklıkta yapılan plazma nitrürleme işleminin 316L paslanmaz çelik malzemesi üzerine olan etkilerini incelemiştir. Deneyde %5, %10 ve %25 azot oranları ile 400°C, 450°C ve 500°C nitrürleme sıcaklıkları kullanılmıştır. Deneyde parçanın yüzey pürüzlülüğüne bakılmıştır. Kimyasal parlatma işlemine tabi tutulan parçaların nitrürlemeden önceki yüzey pürüzlülük değerleri 67 nanometre civarındayken, %10 ve 450°C'deki 1 saatlik nitrürlemeden sonra yüzey pürüzlülüğü 520 nanometre, 2 saatlik nitrürlemeden sonra ise 573 nanometre değerine çıkmıştır. (İğdil, 2005)



Şekil 5.2 %10 N₂ ve 450°C’de nitrürlenmiş numunelerin yüzey pürüzlülüğü. (İğdil, 2005)

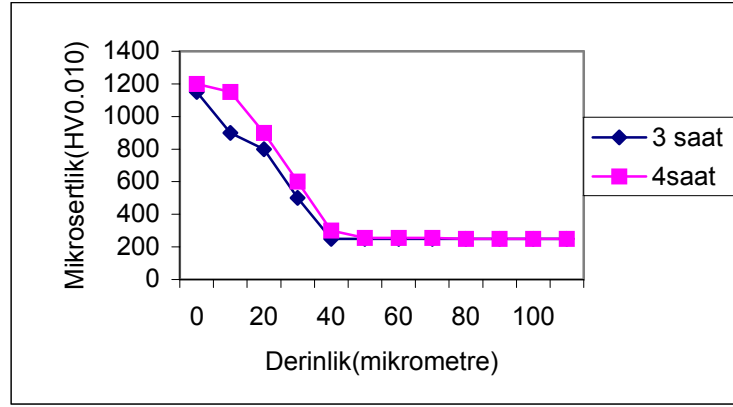
Nitrüleme işlemleri sonucu, yüzey pürüzlülüğünün, azot oranıyla doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Bununla birlikte nitrüleme sıcaklığının da yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu anlaşılmış ve nitrülemenin yapıldığı sıcaklık yükseldikçe yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Deney sonucunda X-ışınları ölçümlerinde; %10 N₂ ve 450°C’de yapılması durumunda, denenen en uzun süre olan 240 dakikalık nitrüleme süresinde bile CrN oluşmadığı görülmüştür. CrN fazının oluşumunun, 1 saat nitrüleme yapılan numunelerden %25 N₂ oranına sahip nitrülemeler ile 500 °C’de nitrüleme yapılan numunelerde meydana geldiği görülmüştür. (İğdil, 2005)



Şekil 5.3 %10 N₂ ve 450°C’de nitrürlenmiş numunelerin ultra mikro sertlik değerleri.

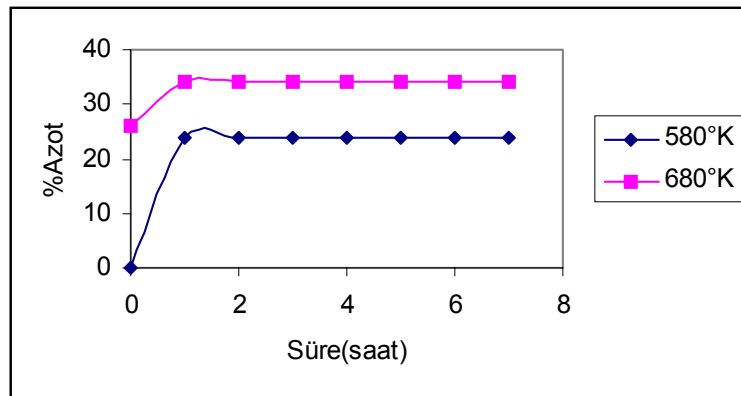
(İğdil, 2005)

Souza ve arkadaşları sinterlenmiş 316L austenitik paslanmaz çeliklere plazma nitrüleme işlemini uygulamışlardır. Bu çalışma; 400°C, 450°C, 500°C, 550°C nitrüleme sıcaklıklarında, %20 N₂+%80 H₂ gaz karışımında 6-10 mbar basınçta, 3-4 saatlik nitrüleme sürelerinde yapılmıştır. 500°C ve üzerindeki sıcaklıklarda 4 saatlik nitrüleme süresi sonunda 40 µm kalınlığa sahip nitrür tabakası oluşmuştur. (Souza vd., 2004)



Şekil 5.4 Sinterlenmiş 316L çeliğin 500°C'de nitrürlenmesi sonucu mikrosertlikleri.
(Souza vd., 2004)

Renevier ve arkadaşları 316 L ostenitik paslanmaz çeliklere uyguladıkları düşük sıcaklık plazma nitrüleme çalışmalarını; 580K (307°C) ve 680K (407°C)'deki iki farklı nitrüleme sıcaklıklarında ve 5 dakikadan 9 saate kadar olan nitrüleme sürelerinde yapmışlardır. Deney sonucunda, başlangıçta 316L ostenitik paslanmaz çelik numune için yüzeysel azot oranının artmasına karşılık belirli nitrüleme sürelerinden sonra azot miktarı sabit bir değerde durmuştur. (Renevier vd., 1999)



Şekil 5.5 316L'nin 580-680K'deki %Ns içeriği ile zaman ilişkisi. (Renevier vd., 1999)

Avelar ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada; Ti-6Al-4V alaşımından yapılmış disk numuneler plazma nitrülemeye tabi tutulmuştur. Numune boyutları 25.4mm × 5.0mm ve nitrülemeden önceki sertlik 350 HV'dir. Nitrüleme sıcaklıkları 600°C, 650°C, 700°C ve 750°C olmak üzere 120 dakika nitrüleme süresi belirlenmiştir. 800°C'deki nitrüleme sıcaklığına da 100 dakika nitrüleme süresi uygulanmıştır. Ti-6Al-4V alaşımının 600°C'de 120 dakika plazma nitrüleme sonucu elde edilen yüzey sertliği nitrülemeden önceki sertliğine göre çok düşük çıkmıştır. 650°C'de elde edilen sertlik 475 HV ve nitrür tabaka kalınlığı 20 µm'dir. 700°C'de yüzey sertliği 560-600HV ve nitrür tabakasının kalınlığı 30-40 µm'dir. Nitrüleme sıcaklığı 750 ve 800°C'yi aştığı sıcaklıklarda yüzey sertliği 700 HV ve

nitrür tabakasının kalınlığı 45-50 μm 'ye ulaşmıştır. Yapılan deney çalışmasının X-ışınları analizlerinde 600°C ve 650°C'de titanyum nitrür (Ti_2N) tabakası oluşmadığı, yapıda α -Ti ve β -Ti yapıları gözlenmiştir. 700°C, 750°C, 800°C'deki sıcaklıklarda titanyum nitrür (Ti_2N) tabakası oluşmuştur. (Avelar vd., 2005)

Nolan ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada; Ti-6Al-4V alaşımının plazma nitrürlenmesi ile PVD yönteminin karşılaştırılmasını esas almıştır. Her iki yöntemde titanyum alaşımının tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi için tasarlanmış yöntemlerdir. Plazma nitrürlenme metodu titanyum alaşımının özellikle aşınma dayanımında önemli artışlar göstermiştir. Plazma nitrürlenme yönteminde nitrür tabakası $\text{TiN}+\text{Ti}_2\text{N}$ fazlarından oluşurken, PVD yönteminde nitrür tabakası sadece TiN fazından oluşmuştur. Bu farklılık özellikle sertlikte açıkça ortaya çıkmıştır. PVD yönteminde nitrür tabakasının sertliği 500 HV değerinde iken, plazma nitrürlenme yönteminde elde edilen nitrür tabakasının sertlik değeri 800 HV'den daha büyük değerlere ulaşmıştır. (Nolan vd., 2005)

Kashaev ve arkadaşları Ti-6Al-4V alaşımına %10 N_2 içeren argon-azot karışımında, disk numuneler için 700°C, piston ve eğme numuneleri için 800°C nitrürlenme sıcaklığında, 6 ve 8 saatlik nitrürlenme sürelerinde plazma nitrürlenme işlemini uygulamışlar. Piston numuneleri disk numunelerine göre yüksek yüzey değerlerine sahip olduğundan plazma nitrürlenme yönteminde daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmuştur. Disk numunelerde nitrürlenme sonunda 80-150 μm kalınlığında nitrür tabakası elde edilmiştir. Piston numunelerde de 8 saat sonunda 700 °C'de 100 μm kalınlıkta nitrür tabakası elde edilmiştir. Sertlikleri yaklaşık olarak 900 HV değerinde çıkmıştır. (Kashaev vd., 2005)

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Plazma nitrüleme, azotun malzeme iç yapısına difüzyonla girmesi ile çok ince nitrür bileşiklerinin oluşumunu sağlayarak yüzeyde önemli oranda dayanım artışı meydana getiren bir yöntemdir. Plazma nitrülenmiş parçaların sertliklerinde ve aşınma dayanımlarındaki artış bu termokimyasal yüzey işlemini son yıllarda geleneksel nitrüleme işlemlerine oranla daha fazla önem kazandırmıştır.

Yapılan çalışmada, 316L ostenitik paslanmaz çelik numunelerimiz 450°C ve 550°C’ deki nitrüleme sıcaklıklarında 1, 3, 6 saatlik nitrüleme sürelerinde nitrülenmiştir. Ti-6Al-4V alaşımı numunelerimiz; 550°C ve 650°C’deki nitrüleme sıcaklıklarında ve 1, 3, 6 saatlik nitrüleme sürelerinde nitrülenmiştir. Bu çalışmadaki amacımız; çeşitli sıcaklık ve sürelerde plazma nitrüleme yöntemi ile malzeme yüzeyinin yapısındaki değişimi incelemek ve kullanım alanlarında uygulanabilirliğini araştırmaktır. Bu amaca yönelik olarak, nitrüleme sonrası nitrülenmiş parçalara uygulanacak deneyler ve ölçümlere karar verildikten sonra elimizdeki numune sayısına bağlı olarak deneysel koşullar tespit edilmiştir.

6.1 Deneyde Kullanılan Numuneler

Yaptığımız çalışmada 316L ve Ti-6Al-4V alaşımı olmak üzere iki farklı malzeme kullanılmıştır. Numunelerin literatürdeki kimyasal bileşimleri ve nitrüleme işleminden önceki sertlik değerleri Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 316L’ nin kimyasal bileşimi ve nitrüleme öncesi sertliği.
(Smith, 2000a; 2000b)

Malzeme	%Kimyasal Bileşim						Sertlik(HV0,1)
316L	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	300
	0,01	1,76	0,21	17,2	15,3	2,7	

Çizelge 6.2 Ti-6Al-4V’nin kimyasal bileşimi ve nitrüleme öncesi sertliği.
(Smith, 2000a; 2000b)

Malzeme	%Kimyasal Bileşim		Sertlik(HV0,1)
Ti-6Al-4V	Al	V	350
	6,00	4,00	

Dikdörtgenler prizması şeklindeki 316L paslanmaz çelik malzemesinden tel erozyon yöntemi ile 5x15x4 mm boyutlarında 10 adet deney numunesi kesilmiştir. Aynı şekilde silindirik

ubuk eklindeki Ti-6Al-4V malzemesi de tel erozyon yöntemi ile çapları 5 mm, kalınlıkları 4 mm olacak şekilde 12 adet deney numunesi kesilmiştir.

Parçaların yüzeyleri 120 mesh numaralı zımparadan başlanarak sırası ile 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı zımparaya kadar zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra parçalar önce alümina daha sonra da elmas pasta ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur.

Yüzeyleri hazırlanan parçalar nitrürleme işlemine tabi tutulmadan önce yüzeylerinde oluşabilecek toz ve pisliklerden tekrar arındırmak amacı ile trikloretilen ile yüzeyleri temizlenmiştir.

6.2 İyon Nitrürleme

İyon nitrürleme işlemi İTÜ Makina Fakültesinde bulunan 2 kW gücündeki doğru akımlı laboratuar tipi iyon nitrürleme sisteminde gerçekleştirilmiştir. Plazma nitrürleme yöntemi için kullanılan düzenek, parçaların nitrürlenmesi için gerekli vakumlu ortamı sağlayan silindirik kap, gerekli elektrik enerjisini sağlamakta ve voltajı ayarlamakta kullanılan güç kaynağı (2kWDC), pompa (8L/dak), gaz oranını ayarlamada kullanılan su tankı, hidrojen ve azot gazlarının bulunduğu tüpler, nitrürleme sıcaklığını ölçmekte kullanılan termokopul ve basıncı ölçmekte kullanılan U tipi civa sütunlu manometreden oluşmaktadır.



şekil 6.1 Nitrürleme mekanizmasının görünümü. (Gülmez, 1998)

Nitrürleme sırasında hidrojen gaz çıkışı $270 \text{ cm}^3/\text{dak.}$ civarında tutulurken, azot gazının akış hızı, karışımın oranına göre ayarlanmıştır. Nitrürleme 10 Torr'luk vakum altında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasındaki sıcaklık ölçümlerini sağlamak için kullanılan Ni-Cr-Ni termo eleman çifti, parça sıcaklıklarını ölçmek amacıyla parçaların deney sırasında üzerine konuldukları katot diske bağlanmıştır. Ortalama 600-700 V'luk bir gerilim aralığında

gerçekleştirilen nitrürlemede, doğru akım güç kaynağı ile sıcaklıklar sürekli kontrol edilerek ayarlanmıştır.

İlk temizlikleri trikloretilen ile yapılan parçaların, nitrürleme aşamasında, vakumlu ortamda, sadece H_2 gazının ortama verilip akım uygulanması sonucu, iyonize olan hidrojen atomlarının parça yüzeylerini bombardıman edip, temizlenmeleri de sağlanmıştır. Bu işlemin iki amacı vardır. Birincisi parçaların sıcaklığını nitrürleme yapılacak sıcaklığa çıkarmak, diğeri ise parça yüzeylerinde oluşmuş yağ, oksit gibi pislik tabakalarının temizlenmesini sağlamaktır.

316L ostenitik paslanmaz çelik malzemeleri $450^{\circ}C$ ve $550^{\circ}C$ 'deki sıcaklıklarda, N_2-H_2 gaz atmosferi ($N_2:H_2 = 1:4$) içinde ve 10 torr'luk vakum altında 1, 3 ve 6 saatlik nitrürleme sürelerinde nitrürlenmiştir. Ti-6Al-4V titanyum alaşım malzemelerini ise $550^{\circ}C$ ve $650^{\circ}C$ 'deki sıcaklıklarda %20 azot içeren N_2-H_2 ortamında, 10 torr'luk vakum altında 1, 3 ve 6 saatlik nitrürleme sürelerinde nitrürlenmiştir. Deneyi yaptığımız cihaz $650^{\circ}C$ 'den daha yukarı çıkamadığından Ti-6Al-4V alaşımındaki nitrürleme sıcaklıkları düşük kalmıştır.

Çizelge 6.3 316L ostenitik paslanmaz çelik için nitrürleme koşulları.

Nitrürleme Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	Nitrürleme Süresi (saat)	Azot Oranı (%)
450	1	20
450	3	20
450	6	20
550	1	20
550	3	20
550	6	20

Çizelge 6.4 Ti-6Al-4V titanyum alaşımının nitrürleme koşulları.

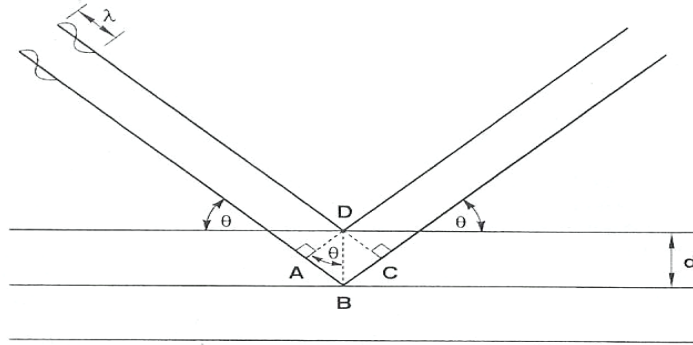
Nitrürleme Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	Nitrürleme Süresi (saat)	Azot Oranı (%)
550	1	20
550	3	20
550	6	20
650	1	20
650	3	20
650	6	20

6.3 Mikrosertlik Ölçümleri

İyon nitrüleme ile elde edilen tabakanın sertliğini ölçmek için Vickers mikrosertlik ölçümleri; 100 gr. yük altında ve SHIMADZU HMV marka bir mikrosertlik cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Vickers sertlik ölçüm cihazı 0,01 kgf ile 2 kgf kuvvet aralığına sahiptir. Sertlik ölçümü elmasan yapılmış basık dört kenarlı piramit şeklindeki uçla yapılmıştır (Uç açısı 136°). Elmas ucun parçaya kuvvet uygulaması sonucu parçada bıraktığı dikdörtgen şeklindeki izin köşegenleri ölçülmüştür. Bu köşegen uzunluklarının makina tarafından gerekli hesaplamaları yapılmasıyla sertlik değeri bulunmuştur.

6.4 X-Işınları Difraktometresi

X-ışınları, foton adı verilen bir miktar enerjiden oluşan, bir tür elektromanyetik yayınıdır. X-ışınları bir malzeme üzerine yönlendirildiğinde, malzemenin kristal yapısına bağlı olarak yansır. Bragg kanunu olarak bilinen bu ilişki yardımıyla kristal düzlemlerine karşılık gelen difraksiyon açısı arasında bağıntı kurulur. Malzemedeki bu düzlemler ayırt edici bir özellik olup, büyük oranda malzeme bileşimine göre değişir. Böylelikle X-ışını ölçümüyle malzeme yapısındaki bileşenler belirlenebilir. (İğdil, 2005)



Şekil 6.2 Bragg Yasası'nın açıklanması. (İğdil, 2005)

Ölçümler Philips marka XRD cihazında yapılmıştır. Cihaz 40V voltaj ve 40 mA akıma ayarlanmıştır. Oluşan Cu-K α X ışınları $1,54 \text{ \AA}$ dalga boyunda ve tarama alanı $30\text{-}80^\circ$, tarama hızı da $0,02^\circ/\text{dak.}$ seçilmiştir.

6.5 SEM İncelemeleri

Nitrülenmiş 316L ostenitik paslanmaz çelik numuneleri ile Ti-6Al-4V titanyum alaşımı numunelerinden enine kesitler alınarak yüzeyleri hazırlandıktan sonra taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. 316L ostenitik paslanmaz çelik malzeme kral suyu ile,