

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**INCONEL 718 SÜPER ALAŞIMININ
NİTRÜRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuncay TURAN

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**INCONEL 718 SÜPER ALAŞIMININ
NİTRÜRLLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Tuncay TURAN
(506091462)**

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **506091462** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Tuncay TURAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“INCONEL 718 SÜPER ALAŞIMININ NİTRÜRLENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdem ATAR
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **06 Haziran 2013**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca tez yönetimimi üstlenen, fikir, bilgi ve deneyimlerinden çalışmamın her aşamasında yararlandığım, her zaman desteğini gördüğüm değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında yardım ve desteklerini esirgemeyen, görüş ve önerilerinden faydalandığım değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. E. Sabri KAYALI ve Sayın Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneylerdeki yardımları, tezin oluşturulmasındaki önerileri ve deneyimleri ile yol gösteren Dr. Özgür ÇELİK, Y. Müh. Amir MOTALLEBZADEH ve Dr. Onur MEYDANOĞLU'na teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca verdiği fikir, destekleri ve yardımları için çok sevgili arkadaşım Y. Müh. Ozan AKÇAKESE, sonsuz teşekkür ederim. Tez yazım aşamasında karşılaştığım sorunların çözümünde desteklerini esirgemeyen Y. Müh. Aysun DEMİRTAŞ'a, Met. Müh. Berk AYGÜN'e ve yüksek lisans dönemi boyunca birlikte çalıştığım tüm arkadaşlarıma ayrıca teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen ve bana hep güvenip inanan, hem maddi hem de manevi destek veren aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

Haziran 2013

Tuncay TURAN
Metalürji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. SÜPER ALAŞIMLAR	3
2.1 Süper Alaşımların Sınıflandırılması.....	4
2.1.1 Demir esaslı süper alaşımlar	5
2.1.2 Kobalt esaslı süper alaşımlar.....	6
2.1.3 Nikel esaslı süper alaşımlar	7
2.2 Inconel 718.....	9
2.3 Süper Alaşımların Uygulama Alanları	11
3. NİTRASYON	15
3.1 Nitrürleme Yöntemleri.....	18
3.1.1 Gaz nitrürleme.....	19
3.1.2 Akışkan yataklı fırında nitrürleme	23
3.1.3 Isıtma metodları.....	24
3.1.4 Akışkan yataklı fırınları avantajları.....	26
3.1.5 Tuz banyosunda nitrürleme.....	26
3.1.6 Floe prosesi	27
3.1.7 Plazma nitrürleme.....	27
3.2 Nitrürleme İşlemi Uygulanmış Süper Alaşımların Literatür Çalışmaları	29
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
4.1 Numunelerin Hazırlanması	35
4.2 Nitrürleme İşlemi	36
4.3 Nitrürlenmiş Yüzeylerin Yapısal Karakterizasyonu	36
4.3.1 X-Ray difraksiyon (XRD) analizi	36
4.3.2 Sertlik ölçümü	37
4.4 Nitrürlenmiş Yüzeylere Sıcaklığın ve Tutma Süresinin Etkisi.....	37
4.5 Yüksek Sıcaklık Aşınma Analizi	37
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	39
5.1 Nitrürlenmiş Yüzeylerin Yapısal Karakterizasyonu	39
5.2 Nitrürlenmiş Yüzeylere Yüksek Sıcaklığın ve Tutma Süresinin Etkisi	43
5.3 Yüksek Sıcaklık Aşınma Analizi	51
6. GENEL SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR.....	57
EKLER.....	61
ÖZGEÇMİŞ	67

KISALTMALAR

AMS	: Amerikan Askeri Standartları
YMK	: Yüzey merkezli kübik kristal yapı
HMK	: Hacim merkezli kübik kristal yapı
HSP	: Hekzagonal sıkı paket
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XRD	: X-Işınları difraksiyonu
HV	: Vickers sertlik değeri
HRC	: Rockwell sertlik değeri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Süper alaşımların sınıflandırılması	5
Çizelge 2.2 : Süper alaşımların uygulama alanları.....	12
Çizelge 4.1 : Ticari olarak temin edilen Inconel 718 alaşımı % ağırlıkça kimyasal kompozisyonu alaşımların sınıflandırılması.....	35
Çizelge 5.1 : Farklı sıcaklıklarda nitrülenmiş AMS 5662 numunelerin tabaka kalınlıkları.....	41
Çizelge 5.2 : Farklı yükler altında ölçülen ortalama yüzey mikrosertlik değerleri.....	42
Çizelge 5.3 : Aşınma izi ortalama genişlik ve derinlik değerleri.....	52
Çizelge A.1: 600°C’de 3-96 saat sürelerde fırında tutulan AMS 5662 ve 400°C’de nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri.....	62
Çizelge A.2: 600°C’de 3-96 saat sürelerde fırında AMS 5663 ve 400°C’de nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımlarının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri	62
Çizelge A.3: 700°C’de 3-96 saat sürelerde fırında tutulan AMS 5662 ve 400°C’de nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımlarının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri	63
Çizelge A.4: 700°C’de 3-96 saat sürelerde fırında AMS 5663 ve 400°C’de nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımlarının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri	63
Çizelge A.5: 800°C’de 10-120 dakika sürelerde fırında tutulan AMS 5662 ve 400°C’de nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımlarının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri	64
Çizelge A.6: 800°C’de 10-120 dakika sürelerde fırında AMS 5663 ve 400°C’de nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımlarının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri	64

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : γ'' (yarı kararlı intermetalik bileşik Ni_3Nb) çökelti fazı HMK kristal yapısı	9
Şekil 2.2 : Inconel 718 süper alaşımının sıcaklık-zaman-dönüşüm diyagramı.....	10
Şekil 2.3 : Süper alaşım parçaları (a) disk, (b) boru, (c) halkalar, (d) kanatçıklar, (e) şaf	13
Şekil 3.1 : Difüzyon ile yüzey sertleştirme tekniklerinin karşılaştırılması.....	16
Şekil 3.2 : Östenik ve martenzit fazlarının kafes yapıları şematik olarak gösterilmiştir.....	17
Şekil 3.3 : Azot atomunun arayer difüzyonunun şematik olarak gösterimi	20
Şekil 3.4 : Malzeme yapısında oluşan büyümenin şematik olarak gösterimi.....	21
Şekil 3.5 : Nitrüleme sonrası malzeme yüzeyinde oluşan bölgelerin şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.6 : γ' ve ϵ -nitrür fazlarının çelik yüzeyinde gösterilişi.....	23
Şekil 3.7 : Akışkan yataklı fırında akışkanlanma safaları	24
Şekil 3.8 : Nitrüleme Harici direnç ile ısıtılan akışkan yatak fırını	25
Şekil 3.9 : Dahili direnç ile ısıtılan akışkan yataklı fırın (1) kapak, (2) yalıtım malzemesi, (3) refrakter malzemesi, (4) akışkan yatak, (5) ısıtma elemanları, (6) gaz girişi, (7) ısıl işlem görececek numune	25
Şekil 3.10 : Gaz ısıtmalı (harici) akışkan yataklı fırın.....	26
Şekil 5.1 : Nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718 SEM kesit mikroyapıları ve XRD paternleri; (1) AMS 5662 XRD paterni, (2) Nitrülenmiş AMS 5662 XRD paterni	40
Şekil 5.2 : AMS 5662 ile farklı sıcaklıklarda nitrülenmiş AMS 5662 numunelerin artan yük altında yüzey mikrosertlik değerleri	42
Şekil 5.3 : 600°C sıcaklık ve sürenin sertliğe etkisi; (a) AMS 5662 ve nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718, (b) AMS 5663 ve nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımları.....	44
Şekil 5.4 : 700°C sıcaklık ve sürenin sertliğe etkisi; (a) AMS 5662 ve nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718, (b) AMS 5663 ve nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımları.....	46
Şekil 5.5 : 800°C sıcaklık ve sürenin sertliğine etkisi; (a) AMS 5662 ve nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718, (b) AMS 5663 ve nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımları.....	48
Şekil 5.6 : 800°C sıcaklık 96 saat süreyle fırında tutulan (a) nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718, (b) nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımlarının XRD paternleri.....	50
Şekil 5.7 : 600°C sıcaklık aşınma sonrası yüzey profil izleri; (a) AMS 5662, (b) 400°C'de nitrülenmiş AMS 5662, (c) AMS 5663, (d) 400°C'de nitrülenmiş AMS 5663.....	51

Şekil 5.8 : 600°C sıcaklıkta aşınma sonrası AMS 5662 ve 5663 ile nitrürleşmiş AMS 5662 ve 5663 numunelerin aşınma hacim kaybı değerleri	52
Şekil 5.9 : 600°C sıcaklık aşınma sonrası aşınma izi SEM görüntüleri, (a) AMS 5662, (b) nitrürleşmiş AMS 5662, (c) AMS 5663, (d) nitrürleşmiş AMS 5663	53
Şekil B.1 : 600°C sıcaklıkta 96 saat süreyle tutulması sonrası numunelerin yüzeyleri; (a) AMS 5662, (b) 400°C’de nitrürleşmiş AMS 5662, (c) AMS 5663, (d) 400°C’de nitrürleşmiş AMS 5663.....	65
Şekil B.2 : 700°C sıcaklıkta 96 saat süreyle tutulması sonrası numunelerin yüzeyleri; (a) AMS 5662, (b) 400°C’de nitrürleşmiş AMS 5662, (c) AMS 5663, (d) 400°C’de nitrürleşmiş AMS 5663.....	65
Şekil B.3 : 800°C sıcaklıkta 96 saat süreyle tutulması sonrası numunelerin yüzeyleri; (a) AMS 5662, (b) 400°C’de nitrürleşmiş AMS 5662, (c) AMS 5663, (d) 400°C’de nitrürleşmiş AMS 5663.....	66

INCONEL 718 SÜPER ALAŞIMININ NİTRÜRLENMESİ

ÖZET

Günümüzde süper alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda yüksek performans göstermesi gereken uçak ve uzay endüstrisinde türbin motorları ve türbin kanatları gibi parçaların imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık uygulamalarında diğer tüm metalürjik malzemelerden daha çok tercih edilmelerinin nedeni yüksek sıcaklıktaki; yüksek yorulma ve sürünme dayanımı, iyi korozyon direnci, uygun kimyasal kompozisyonu ve üretim aşamasında mikro yapısal kusurların fazla olmamasından kaynaklanır. Bu alaşımlar demir, nikel, kobalt ve krom'un farklı kombinasyonlarda bir araya gelmesiyle üretilmektedirler. Düşük miktarda tungsten, molibden, tantalum, niobyum, titanyum ve alüminyum da kullanılmaktadır. Alaşım elementlerin miktarına göre süper alaşımlar üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar; demir esaslı süper alaşımlar, kobalt esaslı süper alaşımlar ve nikel esaslı süper alaşımlardır. Nikel esaslı süper alaşımlar en önemli gruplardan biri olup, katı-eriyik ve ikincil-faz intermetalik çökelti tarafından mukavemetlendirilmektedir. Nikel ve krom kombinasyonu, bu süper alaşımların yüksek sıcaklık oksidasyon direncini artırır. Özellikle 650°C üstü sıcaklıklarda, mekanik dayanım açısından paslanmaz çeliklerden daha üstündür. Yüksek sıcaklıkta kırılma ve sürünme dirençleri iyidir, bu nedenle uçak sanayinde özellikle uçak motorlarının ağırlıklı olarak %50'sini nikel esaslı süper alaşımlar oluşturmaktadır.

Inconel 718, uçak ve uzay sanayisinde yaygın olarak kullanılan nikel esaslı süper alaşımdır. Korozyon direnci ve yüksek mekanik özelliklerine sahip Inconel 718, ayrıca kaynaklanabilirliği ile önemli bir süper alaşımdır. Bu alaşımı farklı kılan, yüksek sıcaklıkta dayanımı artırıcı olarak niobyum ilavesi yapılmıştır. Inconel 718, uygun ısıtım işlem metodları ile solüsyona alınmış ve yaşlandırılmış durumda kullanılmaktadır. Böylece servis şartlarına göre yeterli mekanik özelliklerde üretilebilmesiye, son yıllarda geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır.

Özellikle çeliklerin yüzey özelliklerini geliştirmek için kullanılan nitrürleme yöntemi ile nikel bazlı süper alaşımların nitrürlenebilirliği hakkında yeterli ve detaylı çalışmalar çok az sayıda bulunmaktadır ve araştırma konusu durumundadır.

Yapılan bu çalışmada, düşük sıcaklıklarda konvansiyonel nitrürleme işlemlerinin AMS 5662 ve AMS 5663 ısıtım işlemlerine tabi tutulmuş Inconel 718 alaşımlarının yüzey özelliklerine etkisi incelenmiştir. Nitrürleme işlemleri gaz ve ısı taşıyıcı olarak Al_2O_3 partikülleri içeren akışkan yatak tipi bir fırında %60 amonyak + %40 azot gaz karışımı atmosferinde 375, 400, 450 ve 500°C sıcaklıklarda 10 saat süre ile yapılmıştır. AMS 5662 ve 5663 Inconel 718 alaşımlarının nitrürleme sonrası yüzeylerinde oluşan nitrürleşmiş bölge ve tabakalar, taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışınları difraksiyonu (XRD) analizi ve mikrosertlik deneyleri ile karakterize edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında ayrıca, AMS 5662 ve 5663 Inconel 718 süper alaşımlarına nitrürleme işlemi uygulandıktan sonra oluşan nitrürleşmiş tabakalarının yüksek

sıcaklık performanslarını belirleyebilmek amacıyla bu numunelere laboratuvar çalışması yapılmıştır. AMS 5662 ve 5663 Inconel 718 süper alaşımları nitrürleme işlemi sonrası yüzeylerinde oluşan nitrürleşmiş tabakasının yüksek sıcaklığın ve tutma süresinin etkisini araştırmak için AMS 5662 ve 5663 ile nitrürleşmiş AMS 5662 ve 5663 Inconel 718 süper alaşımları 600 ve 700°C sıcaklıklarda (3-96saat) ve 800°C sıcaklıkta (10-120dakika) farklı sürelerde fırın içerisinde tutulmuşlardır. Havada soğutularak, oda sıcaklığında yüzey mikrosertlik değerleri ölçülmüştür ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Nitrürleme işleminin AMS 5662 ve 5663 Inconel718 süper alaşımları için 700°C kadar etkili olduğu belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık aşınma analizi için 600°C’de AMS 5662 ve 5663 ile nitrürleşmiş AMS 5662 ve 5663 Inconel 718 süper alaşımlarına aşınma testi uygulanmıştır. Sonuç olarak, düşük sıcaklıklarda nitrürleme işleminde yüzeyde oluşan tabakanın 600°C aşınma direncini arttırdığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak, düşük sıcaklık nitrürleme işleminin gerek sertlik ve gerekse de aşınma direnci açısından Inconel 718 süper alaşımında uygulanabilecek bir yüzey sertleştirme işlemi olup, bu alaşım 600°C’de üstün yüzey özelliklerini uzun süreler emniyetli olarak koruyabilmektedir.

NITRIDING OF INCONEL 718 SUPERALLOY

SUMMARY

Superalloys are widely used in aerospace and aircraft industrial applications where high temperature strength and/or corrosion resistance are required. These applications include turbine motor engine, turbine blades and turbine disks and other parts. They are required to exhibit combinations of high strength, good fatigue and creep resistance, good corrosion resistance and the ability to operate at elevated temperatures for extended periods of time. Superalloys are based on nickel, nickel-iron, or cobalt that exhibit a combination of mechanical strength and resistance to surface degradation, which could not be obtained from other metallic materials. Properties can be controlled by adjustments in composition and by processing route (including heat treatment), and finally excellent elevated-temperature strengths are available in the finished products. Ability to maintain these properties at elevated temperatures severely hinders the machinability of these alloys, thus they are generally referred to as difficult-to-cut alloys. Superalloys are produced as wrought, cast and powder metallurgy product forms. The iron-nickel based superalloys evolved from austenitic stainless steels and are based on the principle of combining of a closed-packed fcc matrix both solid-solution hardening and precipitate-forming elements. Wrought cobalt-base alloys, unlike other superalloys, are not strengthened by a coherent, ordered precipitate. Rather, they are characterized by a solid solution strengthened austenitic (fcc) matrix in which a small quantity of carbide is distributed. Nickel based superalloys are the most complex type of superalloys and are used in the hottest parts of aircraft engines, covering over 50% of the engine weight. For lower temperature applications solid solution hardened nickel based superalloys or for higher temperature applications precipitation hardened nickel based superalloys are preferred. Chromium and aluminum are important in providing oxidation resistance by forming the chromium or aluminum oxide films on the surface of superalloy. Furthermore, superalloy systems are designed for ease of fabrication, to include machining, welding and heat treating.

Inconel 718 which is widely used in gas turbine components such as stators, compressors and turbine discs. These components are comparatively large and subjected to high temperature. Inconel 718 is a Ni-Cr-Fe-Nb alloy with many good mechanical properties such as high yield and ultimate tensile strengths, good creep and rupture strengths, and high resistance to fatigue. And this super alloy was developed to overcome problems with post-weld cracking that were common in precipitation hardened nickel based super alloys strengthened by γ' phase. Inconel 718 is specified as: solution annealed and precipitation hardened. It is an age-hardenable austenitic material. Strength is largely dependent on the precipitation of gamma prime phase into the metal matrix during heat treatment. These precipitations are combination of nickel (aluminum, titanium and niobium) phases. Niobium is the major element for precipitation. Ni and Cr contribute to the corrosion resistance of this material. They crystallize as γ' phase (fcc). Nb is added to form precipitates γ''

(Ni_3Nb , centered tetragonal crystal). Ti and Al are added to precipitate in the form intermetallic γ' ($\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$, simple cubic crystal). They have a lower hardening effect than γ'' particles. C is also added to precipitate in the form of the MC carbides ($\text{M} = \text{Ti}$ or Nb)

Before age hardening, these precipitations must be dissolved in the matrix. To perform this function the material must first be solution heat treated. The heat treatments are consisted of following steps; Anneal at 925°C to 1010°C , age at 720°C for 8h, furnace cool to 620°C , hold at 620°C for 18h, air cool. This is the optimum heat treatment where a combination of stress-rupture life, notch-rupture life, and rupture ductility is of the greatest concern. The highest room- temperature tensile and yield strengths are also associated with this heat treatment. Inconel 718 has also excellent corrosion resistance, which is similar to that of other nickel-chromium alloys. Age-hardenable Inconel 718 combines high-temperature strength up to 650°C with corrosion resistance and excellent fabricability. Its welding characteristics, especially its resistance to postweld cracking, are outstanding. With these properties, Inconel 718 is used for part for aircraft turbine engines, cryogenic tankage and components for oil and gas extraction and nuclear engineering

As the surface hardening technique, nitriding is the most attractive process for several ferrous and nonferrous alloys. Conventionally nitriding process is mostly performed at relatively high temperatures resulting in tempering effect and/or change in the microstructure via producing non-desirable equilibrium phases. Nitriding of nickel based superalloys has received much less attention as compared with ferrous materials and stainless steels, probably due to the fact that such alloys are well known to be extremely difficult to nitride. Only a few studies have been reported on plasma nitriding of Ni-based super alloys.

In this study, the effects of low temperature and conventional nitriding on the surface properties AMS 5662 and AMS 5663 quality Inconel 718 alloys were investigated. Nitriding processes was performed in a fluidized bed furnace containing Al_2O_3 particles as the gas and heat carrier in a atmosphere of 60% ammonia and 40% nitrogen gas mixture at 375, 400, 450 and 500°C temperatures for 10 h. The layers that formed surface of the nitrided AMS 5662 and AMS 5663 Inconel 718 alloys were characterized with scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) analysis, micro hardness tests and high temperature wear test.

The results obtained from the experiments conducted in the scope of this thesis are summarized below:

Nitriding at 375 and 400°C leads to formation of an f.c.c nitrogen solid solution denoted as γ_{N} on the surface of AMS 5662 Inconel 718 alloy. This nitrogen solid solution layer has been formed as the result of the anisotropic expansion of the original alloy unit cell in a similar way to that observed in the Fe–Cr–Ni system (AISI 316 austenitic stainless steel). This phase is known as S-phase or expanded austenite. Nitriding temperature of 400° induced a surface layer having thickness of about $\sim 5\text{--}6\text{ }\mu\text{m}$ thick single-phase nitrided layer. Nitriding at 450 and 500°C temperatures caused of CrN phase on the surface of AMS 5662 and AMS 5663 Inconel 718 samples.

Micro hardness measurements showed that low temperature nitriding (at 400°C for 10 h) caused at least a four-fold increase in the surface hardness of the examined Inconel 718 alloys.

Effects of the high temperature and holding time in the nitrided AMS 5662 and AMS 5663 Inconel 718 samples have been analyzed by surface hardness measurements. The surface hardness values of samples held at 600°C and 700°C were stable throughout duration time of 96 h. However, surface hardness of nitrided AMS 5662 and AMS 5663 Inconel 718 alloys held at 800°C, significantly decreased after holding time of 10 min.

The wear test of samples at 600°C revealed the beneficial effect of the low temperature nitriding (400°C) on the wear resistance of the examined Inconel 718 alloys. Wear test were conducted on the samples which were previously held at 600°C for 96 hours.

The results of the present study clearly revealed the contribution of that low temperature gas nitriding process on the surface properties of AMS 5662 and AMS 5663 quality Inconel 718 super alloys at elevated temperatures (up to 600 °C).

1. GİRİŞ

Süper alaşımlar, diğer alaşımlardan farklı olarak yüksek sıcaklıklarda şiddetli mekanik gerilmelere ve yüzey yapısı değişimlerine karşı üretilmiş ısıl direnci yüksek, korozyon ve oksidasyona karşı dirençli, çok iyi sürtünme ve kopma direncine sahip demir-nikel, nikel ya da kobalt esaslı alaşımlardır. Demir-nikel esaslı süper alaşımlar paslanmaz çelik teknolojisinin bir uzantısıdır ve genellikle dövme işlemiyle üretilir. Kobalt ve nikel esaslı alaşımlar ise kullanım alanına göre döküm ve dövme işlemi ile üretilmektedir. Mekanik özellikleri alaşım elementleri ve uygulanan ısıl işlem prosesleri ile servis şartlarına uygun özelliklerde üretilmektedir [1]. Süper alaşımlar yüksek sıcaklıklarda yüksek performans göstermesi gereken uçak türbin motorları ve süper turbo yükleyicilerin üretiminde, nükleer reaktörler, uzay araçlarında, roket motorlarında, petrokimyasal ekipmanlarda kullanılmak için geliştirilen alaşımlardır [2]. Oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklık korozyonu açısından en önemli alaşım elementi kromdur. Bu yüzden süper alaşımlar yeterli miktarda krom elementi içerir. Bunun dışında molibden, tungsten, niyobyum, alüminyum, titanyum gibi önemli alaşım elementleri içermektedir. Genellikle nikel alaşımlarının işlenmesi zordur, kesme işlemi sırasında yüksek sıcaklıklar oluşur, ısı ve diğer yükler deformasyon aşınmasına neden olurlar. Kesme hızları oldukça düşüktür. Bazı nikel alaşımlarının işlenmesi diğerlerine göre çok daha zordur, karbür veya seramik bir kesici takım ile çalışma koşullarının doğru seçilmesini gerekli kılar [3].

Inconel 718 alaşımı ilk olarak 1965 yılında uluslararası nikel şirketi Huntington Division tarafından dövülmüş ve yaşlandırılarak sertleştirilmiş nikel esaslı alaşım olarak üretilmiştir [2]. Inconel 718 süper alaşımı yüksek mukavemetli, mükemmel korozyon direncine ve yüksek sıcaklıklarda kararlılığını devam edebilen özelliklere sahiptir. Son yıllarda uçak ve uzay endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan Ni esaslı ve çökelme sertleşmesiyle mukavemetlendirilmiş, en önemli sertleştirme elementi Nb olan bir süper alaşımdır [4]. Döküm ve dövülmüş iki şekilde üretilen Inconel 718 çok iyi kaynaklanabilirliği sahip olması nedeniyle gaz türbin parçalarının vazgeçilmez malzemesi olmuştur. Çok iyi mekanik özelliklerine sahip

olmasına rağmen Inconel 718 ve diğer süper alaşımların aşınma karakteristiği istenilen düzeyde değildir. Bu nedenle, Malzemelere yüzey işlemleri uygulanarak korozyon direncini olumsuz etkilemeden, tribolojik davranışlarını geliştirilerek performansları arttırılır. Böylece süper alaşım uygulamaları daha geniş alanlarda kullanılabilir [5].

Plazma nitrürleme demir ve demir dışı alaşımlarına geleneksel uygulanan bir termokimyasal yüzey işlemidir. Nitrürleme işlemi sonucunda örnek olarak Cr içerebilen alaşımlarda yaklaşık olarak 500°C sıcaklıkta istenilmeyen CrN fazı oluşmakta ve malzemenin korozyon direncini azalmaktadır. Konvansiyonel plazma nitrürleme düşük enerjili iyonların ve nötronların malzeme yüzeyine bombardımanı ile gerçekleşmektedir, bu nedenle zor sistemlere sahip olan östenik paslanmaz çelik, titanyum esaslı alaşımlar, alüminyum esaslı alaşımlar ve nikel esaslı süper alaşımlarda nitrürleme işlemi sınırlıdır. Literatür çalışmalarında nikel esaslı süper alaşımlara uygulanan az sayıda plazma nitrürleme işlemi rapor edilmiştir.

Bu çalışmada, AMS 5662 ve AMS 5663 ısıtma işlemlerine tabi tutulmuş Inconel 718 alaşımının yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla düşük sıcaklıklarda ve konvansiyonel nitrürleme sıcaklığında akışkan yatak tipi nitrürleme işlemine tabi tutulup mikroyapı ve yüzey mikrosertliği incelenmiştir. Yüksek sıcaklık ortam koşullarında kullanılan Inconel 718'in nitrürlenmiş yüzeylerine yüksek sıcaklığın ve tutma süresinin etkileri araştırılmıştır.

2. SÜPER ALAŞIMLAR

Yaklaşık olarak $0.6 T_m$ sıcaklıklarda kullanılabilen ve buna rağmen oksitleyici ortamlarda çok şiddetli mekanik gerilim ve gerinimlere dayanabilmek için kararlılıklarını kaybetmeyen malzemeler “süper alaşımlar” olarak adlandırılmaktadır. Genellikle nikel-, demir-nikel, ve kobalt esaslı olmak üzere üç grupta incelenirler. Ayrıca belirli oranlarda ve kombinasyonlarda tungsten, molibden, tantan, niyobiyum, titanyum ve alüminyum da içermektedirler. Yüksek sıcaklıklarda kullanılacak malzemelerde, yüzey kararlılığı ve nispeten yüksek mekanik gerilim özellikleri istenilmektedir. Süper alaşım yüksek sıcaklıklarda yüksek performans göstermesi gereken uçak türbin motorları ve süper turbo yükleyicilerin üretiminde kullanılmak için geliştirilen alaşımlardır. Süper alaşımların en önemli özellikleri; 650°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda mukavemetlerini koruması, ısı korozyonu ve erozyon dirençlerinin yüksek olmasıdır [6].

Günümüzde yaygın olarak kullanılan süper alaşımlar; demir, krom ve nikel ihtiva eden süper alaşımlar, kompleks demir-nikel-krom kobalt kompozisyonları, karbürlerle güçlendirilmiş kobalt esaslı alaşımlar, katı çözelti olarak mukavetlendirilmiş nikel esaslı alaşımlar ve çökelme-dağılma sertleştirilmesi uygulanmış nikel esaslı alaşımlardır. Genellikle demir esaslı alaşımların, kompleks demir-nikel-krom-kobalt alaşımların ve nikel esaslı katı çözelti olarak mukavetlendirilmiş alaşımların dirençlerin 650°C üzerindeki sıcaklıklarda, kobalt esaslı ve nikel esaslı (ikinci fazla güçlendirilmiş) alaşımların mukavemetlerinden daha düşüktür. Ergime noktalarına bağlı olarak, kobalt esaslı alaşımların 1100°C üzerindeki sıcaklıklardaki mukavemeti, nikelli alaşımlara oranla daha yüksektir. Kobalt esaslı döküm alaşımlar, yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahiptir ve matrisleri içerisinde kompleks karbürler oluşur. Bu malzemeler gaz türbin motorlarındaki hava üfleyicileri için kullanılmaktadır [7].

Demir-nikel esaslı süper alaşımlardan örnek olarak en popüler Inconel 718 alaşımı paslanmaz çelik teknolojisinin uzantısı olarak görülmekte ve genellikle dövme ile üretilmektedir. Kobalt-esaslı ve nikel-esaslı süper alaşımları da kullanım alanına

veya kimyasal bileşimine bağlı olarak dövme ya da döküm yöntemiyle üretilmektedir. Nikel esaslı süperalaşımlar üstün malzeme özellikleri nedeniyle, süperalaşımların içinde özel bir yere sahiptirlerdir. Çok yüksek ısı ve basınçta çalışan uzay araçlarının türbin bıçaklarının imalatında kullanılırlar. Bıçakların dahili ve harici soğutmalarını en iyi şekilde yerine getirmesi için bu bıçakların üzerine belli bir sırada delik delinir [8]. Uçak gaz türbin motorlarında kullanılan malzemeler olarak da ayrı bir önem arz etmektedirler. Bu malzemelerin mükemmel denilebilecek özellikleri yüksek sıcaklık mekanik mukavemet dayanımından, korozif ortamlardaki yorulma direncinin yüksekliğine kadar büyük bir aralıkta görülmektedir. Söz edilen özelliklerden dolayı, sadece uçak ve uzay endüstrisinin değil, gemi, tren, petro kimya ve nükleer güç sanayilerinin de uzun yıllar vazgeçemeyeceği malzemeler sınıfında yer almaktadırlar [6].

2.1 Süper Alaşımların Sınıflandırılması

Süper alaşımlar içerdiği elementlerin miktarına göre genel olarak üç ana gruba ayrılır; Nikel esaslı, demir-nikel esaslı ve kobalt esaslı süper alaşımlar.

Nikel esaslı süper alaşımlar yapısında yüksek miktarda nikel elementi bulunur. Yüksek sıcaklıklardaki mukavemeti oldukça iyi olmakla beraber korozyona karşı da oldukça dayanıklıdır. Yaklaşık olarak 650-1100°C sıcaklıkları arasında kullanılırlar. Bu sıcaklıklar arasında kullanılan malzemeler içerisinde yapısı en iyi bilinen malzeme çeşididir [9]. Demir-nikel esaslı süper alaşımların yapısında yüksek miktar demir elementi bulunur, mekanik özellikleri çok iyidir. 700°C sıcaklıklara kadar oksidasyona ve aşınma direncine karşı iyi özellik gösterir. Termal şoklara karşı dirençlidir. Demir-nikel esaslı süper alaşımların en büyük avantajı fiyatının diğer süper alaşımlara göre daha ucuz olmasıdır. Kobalt esaslı süper alaşımlar yapısında yüksek miktarda kobalt elementi bulunur. Ortalama 1175°C sıcaklıklara kadar mükemmel oksidasyon direnci ve yüksek mukavemete sahiptirler. Sıcak korozyona maruz kalınan ortamlarda ve düşük stress istenen yerlerde, dengeyi daha iyi koruyabildiği için Ni bazlı süper alaşımlardan daha iyi sonuç vermektedirler. Özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan ve hareketli parçalarda tercih edilir. Mukavemet açısından incelendiğinde 980°C'nin üzerindeki sıcaklıklar dışından nikel esaslı alaşımların yerine tercih edilmemektedirler. Yüksek ergime sıcaklığına sahip ısı dayanımlı alaşımlar uçak motorlarının parçalarının üretiminde kullanılan en temel

malzemelerdir. Yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik ve kimyasal özellikleri süper alaşımları jet motorlarında yüksek sıcaklıklarda çalışan sabit ve dinamik parçaların üretimi için vazgeçilmez hale gelmektedir.

Çizelge 2.1’de süper alaşımların sınıflandırılması, yapılarındaki alaşım elementine göre isimlendirilmiş şekilde verilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere Inconel 718 alaşımı, nikel esaslı süper alaşımlar grubunda yer almaktadır.

Çizelge 2.1: Süper alaşımların sınıflandırılması [9].

Nikel Esaslı	Demir-nikel Esaslı	Kobalt Esaslı
-Inconel (578, 597, 600, 601, 617, 625, 706, 718, x750)	-Incoloy (800, 801, 802, 807, 825, 903, 907, 909)	-Haynes 188
-Nimonic (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE.11, PE.16, PK.33)	-A-286	-L-605
-Rene (45, 95)	-Alloy-901	-MAR-M918
-Udimet (400, 500, 520, 700, 710, 720)	-Discaloy	-MP35N
-Pyromet 860	-Haynes 556	-MP159
-Astroloy	-H-155	-Stellite 6B
-M-252	-V-57	-Elgiloy
-Hastelloy (C-22, G30, SX)		
-Hastelloy (C-22, G30, SX)		
-Waspaloy		
-Unitemp AF-2 IDA6		
-Hastelloy (C-22, G30, SX)		
-Haynes 230		

2.1.1 Demir esaslı süper alaşımlar

Demir esaslı süper alaşımlar, östenitik paslanmaz çeliklerden yola çıkılarak geliştirilmiştir. Matrisi yüzey merkezli kübik yapıya sahiptir, katı-eriyik mukavemetlendirici ve çökelti oluşturan elementleri içermektedir. Östenitik matris demir ve en az %25 oranında nikelden oluşmaktadır. Paslanmaz çeliklerde ise nikel %0-20 oranındadır. Diğer alaşım elementlerinden krom ise öncelikle katı-eriyik mukavemetlendirici olarak matrisde bulunur. Karbürler ve γ' Ni₃Al, γ' Ni₃Ti ve γ' Ni₃Nb gibi intermetalik çökelti sertleştirici olarak yapıda bulunur. Karbür çökeltmesi için, karbür oranı yaklaşık %0.5 olmalıdır. Küçük bir miktarda bor ilavesiyle yüksek sıcaklık özellikleri de artırılır [6].

Demir esaslı süper alaşımlar kimyasal kompozisyonuna ve sertleştirme mekanizmalarına göre birçok gruba ayrılmaktadır. V-57 ve A-286 grubu %25-35 Ni içeriğine ve YMK γ' fazı ile sertleştirilmiş demir esaslı süper alaşımlardır. Bu grupta

γ' fazı titanyumca zengin içeriğe sahiptir, fakat burada titanyum/alüminyum oranına dikkat edilmelidir. Yüksek miktarda titanyum/alüminyum oranı YMK yapıdaki γ' faz yerine hegzagonal sıkı paket yapısında $\gamma\text{Ni}_3\text{Ti}$ fazının oluşmasına neden olmaktadır, bu yapının mukavemete etkisi daha azdır. A-286 alaşımı türbin kutuları için de kullanılmaktadır. İkinci grup ise Inconel X750 ve Incoloy 901 alaşımları örnek verilebilir, en az %40 Ni içeriğine ve yüksek oranda katı-eriyik mukavemetlendirici ve çökelti oluşturan elementlere sahiptir. Bir başka grup ise YMK γ' fazı ile sertleştirilmiş demir-nikel-kobalt esaslı Incoloy 903, 907, 909, Pyromet CTX-1 ve Pyromet CTX-3 alaşımlarıdır. Bu alaşımlar 650°C sıcaklıkta düşük termal genleşme ve yüksek dayanım özelliği ile ön plana çıkmaktadırlar. Bu alaşımlar düşük miktarda titanyum elementi yaşlandırma sırasında matriste yarı kararlı $\gamma'(\text{Ni}_3\text{Ti},\text{Al})$ fazının oluşmasını sağlar ve γ' fazına göre daha az sertleşmeye etkisi vardır. Bu tip alaşımlar genellikle gaz türbin motorlarında dönen ve sabit parçaların arasında kullanılmaktadır [1].

2.1.2 Kobalt esaslı süper alaşımlar

Kobalt esaslı süper alaşımlar, ana element olarak kobalt içerir. Ayrıca önemli miktarda nikel, krom, tungsten az miktarda molibden, niobiyum, tantal, titanyum ve bazen demir gibi elementler de içermektedir [9]. Kobalt esaslı süper alaşımlar, diğer süper alaşımlar gibi kohorent çökelti ile sertleştirilmez, YMK östenik fazın katı-eriyik sertleştirilmesi ve matrise dağılmış düşük miktarda karbür fazları tarafından mukavemetlendirilir. 417°C sıcaklık üzerinde kobalt hegzagonal sıkı paket yapıda kristalleşmektedir, daha yüksek sıcaklıklarda ise yüzey merkezli kübik yapıya dönüşmektedir. Oda sıcaklığı ve ergime sıcaklığı arasında oluşan bu dönüşümün engellenmesi için kobalt esaslı süper alaşımlar nikel ile alaşımlandırılır. Kobalt esaslı süper alaşımlar, içerdiği yüksek miktarda krom nedeniyle mükemmel yüksek sıcaklık korozyon direncine sahiptir. Nikel esaslı alaşımlara göre daha iyi kaynaklanabilirlik ve termal yorulma direncine sahiptir. Diğer bir avantajı ise kobalt esaslı alaşımlar hava ya da argon ortamında ertilmeye uygundur, nikel ve demir esaslı alaşımlar ise içerdiği titanyum ve alüminyum reaktif metalleri nedeniyle vakum altında ertitme yapılması gerekir. Genel olarak kobalt alaşımları matriste kararlı YMK yapısı için %10 ya da daha fazla oranda nikel, demir, manganez ve karbon içermektedir. Ayrıca demir ve nikel işlenebilirliğini de artırmaktadır [1]. Kobalt katı-eriyik alaşımları üç gruba ayrılır; 650°C'den 1150°C kadar sıcaklıklarda kullanılan Haynes 188, UMCö-

50 ve S-816 alaşımları, Yaklaşık 650°C’de kullanılan bağlayıcı alaşımlar MP-35N ve MP-159 ve aşınma dirençli Stellite 6B alaşımıdır. Haynes 188 birçok mükemmel özelliğe sahip olup tutuşturucularda, geçiş kanalları ve gaz türbinlerinin iç tasarımıyla kullanılır. Bileşimlerinde lantan, silikon, alüminyum ve magnezyum vardır. Bu alaşımın, 1100°C’de oksidasyon direnci ve sürünme direnci yüksektir. %21 Fe içeren UMCö-50 alaşımı, diğer alaşımlar kadar sert değildir, fırın parçaları ve karıştırıcılar için kullanılmaktadır. MP-35N ve MP-159 alaşımları, işlem sertleşebilirliği istenilen yerlerde kullanılır. Her iki alaşım da yüksek dayanım ve sünekliğe sahiptir. Stellite 6B alaşımı yüksek krom içeriği ile yüksek sıcaklık sertliği ve oksidasyon direncine sahiptir. Genellikle buhar türbinlerinde kullanılmaktadır [1].

2.1.3 Nikel esaslı süper alaşımlar

Nikel esaslı süper alaşımlar en karmaşık süper alaşımlardır ve genellikle uçak motorlarında kullanılır. Motor ağırlığının %50’si ve üzeri nikel esaslı süper alaşımlardan meydana gelmektedir. Süper alaşımların en geniş grubunu oluşturmaktadır ve işlemesi oldukça güçtür. Düşük sıcaklıkta kullanım için katı-eriyik sertleştirilmiş ve yüksek sıcaklıkta kullanım için çökelti sertleştirilmiş olarak kullanılmaktadırlar. Nikel esaslı süper alaşımlar nikel elementi içeriği en az %50 civarındadır, yüksek kararlı YMK östenit faz matriste bulunur. Çoğu nikel esaslı süper alaşım %10-20 civarında krom, %8 alüminyum ve titanyum karışımı, %5-15 kobalt ve düşük miktarda boron, zirkonyum ve karbon içermektedir. Diğer ortak alaşım elementleri ise molibden, niyobyum, tantalum, tungsten ve renyumdur. Krom ve alüminyum elementlerinin Cr₂O₃ ve Al₂O₃ oksitlerine dönüşmesiyle oksidasyon direncini artırmasında önemli rol oynamaktadır [6].

Nikel esaslı alaşımlarda yapıda oluşan fazları tek tek incelediğimizde; Matris (γ); YMK yapıda östenitik yalıtkan fazdır, içeriğinde yüksek miktarda katı eriyik elementleri içerir. Bunlar kobalt, demir, krom, molibdenyum ve tungstendir. Tüm nikel esaslı alaşımlar matrisinde γ fazı bulunur [10].

Gamma prime (γ'); Alüminyum ve titanyum ilavesi sonucu matriste çökelti halinde bulunan, Ni₃(Al,Ti) kimyasal kompozisyona sahip intermetalik bir bileşiktir. γ' çökeltisi yüksek sıcaklıkta dayanım ve sürenme direnci özelliklerini arttırmaktadır, ayrıca nikel esaslı alaşımlarda birincil sertleştirme fazıdır [10].

Gamma double prime (γ''); Ni_3Nb kimyasal kompozisyonuna sahip kohorent bir intermetalik bileşiktir. Matrisle kohorent durumda çökelti olarak bulunmaktadır. Nikel-demir esaslı süper alaşımlarda IN-706 ve IN-718'de çökelti faz olarak bulunmaktadır. γ'' çökeltisi IN-718 alaşımının yüksek sıcaklık mekanik özelliklerini etkisinde önemli rol oynamaktadır. Isıl işlem sırasında γ' ve γ'' fazları beraber yapıda çökelti halinde bulunur fakat burada mukavemetlendirici olarak γ'' fazı rol oynamaktadır [10].

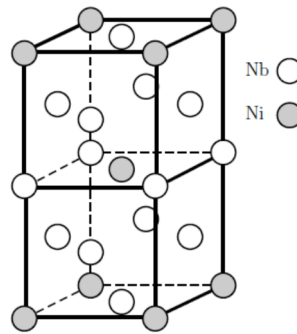
Karbürler; ağırlıkça %0,002-0,2 oranında ilave edilen karbon, titanyum, tantalum, hafniyum ve niyobyum gibi reaktif elementlerle birleştiğinde TiC , HfC ve NbC şeklinde metal karbürler (MC) formuna dönüşür. Isıl işlem boyunca MC karbürler bozunarak, tane sınırlarında M_{23}C_6 ve molibden, tungsten ve kromca zengin M_6C tipi karbürleri oluşturma eğilimindedir. MC tip karbürler genellikle düzensiz kübik yapıda büyük tanelerden oluşmaktadır. M_{23}C_6 formu ise plaka morfolojisinde düzenli yapıda bulunmasına karşın tane sınırlarında düzensiz, sürekli olmayan sınırlayıcı taneler olarak bulunmaktadır [10].

En önemli çökelti östenit γ nikel matriste bulunan γ' fazıdır. γ' ile mukavemetlendirilmiş nikel esaslı süper alaşıma dövülmüş Waspaloy ve döküm Rene 80 ve Inconel 713C örnek verilebilir. Eğer matriste γ' miktarı %25'ten daha az ise çökelti küresel şekilde bulunmaktadır, γ' miktarı %35 ve üzerinde ise çökelti kübik şekile dönüşmektedirler. Çoğu dövülmüş nikel esaslı alaşım %20-40 oranlarında γ' fazı matriste bulunur. Döküm alaşımları ise %60 γ' fazı matriste bulunur. γ' miktarı arttıkça, malzemenin yüksek sıcaklıkta dayanımı artmaktadır. Niyobyum içeren alaşımların sertleştirilmesi γ'' fazı çökeltisiyle olur. Ayrıca niyobyum ve titanyum veya alüminyum içeren alaşımlarda sertleştirilmesi γ'' ve γ' fazları ile oluşur, buna örnek olarak Inconel 706'dır. Bazı nikel bazlı alaşımlar Hasteloy X ve Inconel 625 sertleştirme methodu olarak katı eriyik sertleştirilmesi ile malzemeye mukavemet kazandırılır. Bu alaşımlar düşük sıcaklıklarda korozitif ortamlarda kullanılmaktadır [6, 11]. Waspaloy yüksek sıcaklık özellikleri ile Inconel 718 ile karşılaştırılabilir. Ancak Waspaloy mikroyapısı çok kritik metalürjik özelliğe sahiptir. Dövme olarak üretildiğinden, homojen, ince taneli mikroyapı elde edilmesi zordur. Bu nedenle bazı mekanik özellikler yönünden zayıf kalmaktadır, işleme ve kaynak özellikleri kısıtlıdır. Waspaloy'un yerine, yüksek sıcaklık özellikleri daha iyi olan yalnızca toz metalürjisi ile elde edilen Udimet 700, ReNe95 veya IN100 gibi

malzemeler kullanılmıştır. Yüksek sıcaklıkta çok yüksek mukavemet değerlerine sahip olmalarına rağmen kırılma mukavemetleri istenilen özelliklerde değildir [12].

2.2 Inconel 718

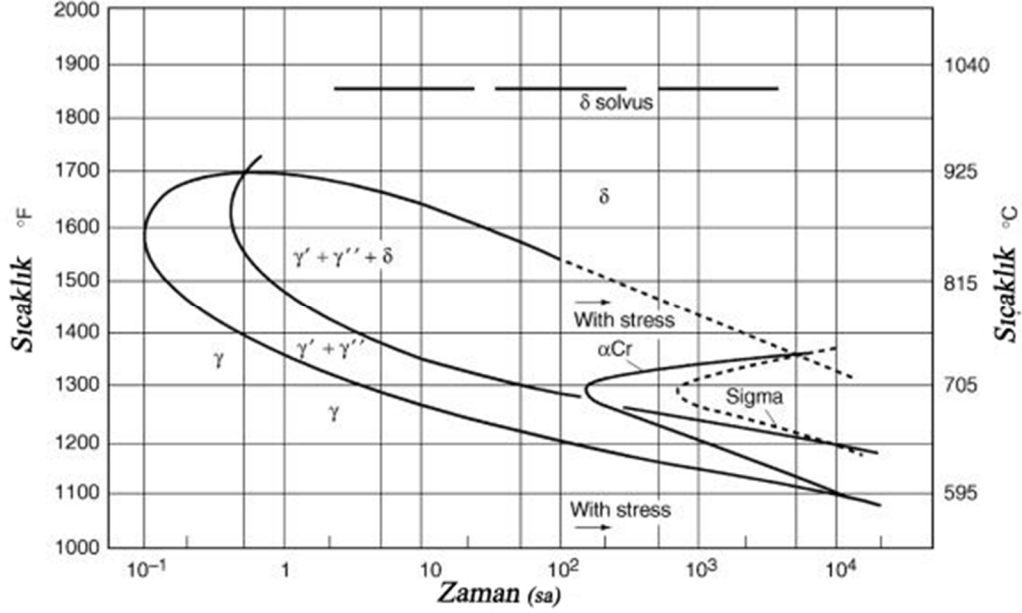
Inconel 718 alaşımı ilk olarak 1950'li yıllarda dövülmüş ve yaşlandırılarak sertleştirilmiş nikel esaslı süper alaşım olarak üretilmiştir [13]. Genellikle gaz türbinleri ve uçak motor parçalarında (kompresör ve türbin diskleri) kullanılmaktadır. Bu parçalar servis şartlarında yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Inconel 718 içeriğinde önemli miktarlarda Fe, Nb ve Mo alaşım elementleri bulunur. Küçük miktarlar da Al ve Ti elementlerini de içermektedir. Korozyon direnci ve yüksek mekanik özelliklerine sahip Inconel 718, ayrıca kaynaklanabilirliği ile önemli bir süper alaşımdır [14]. Nikel ve krom korozyon direncine katkı sağlamaktadır. Matriste YMK γ fazında kristalize olurlar. Nb ise malzemenin sertleşmesine sağlayan γ'' (yarı kararlı intermetalik bileşik Ni_3Nb) çökelti fazı olarak matriste bulunur. Çökelti fazın kristal yapısı Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmiştir Alüminyum ve titanyum elementleri ise γ' ($\text{Ni}_3\text{Al,Ti}$) fazını oluştururlar, bu faz γ'' fazına göre sertleşmeye daha az etkisi vardır. Karbon ise MC bileşiğinde şeklinde karbür olarak matriste bulunur ($M = \text{Ti}$ ve ya Nb). Karbon miktarının düşük olması diğer faz dönüşümlerini gerçekleşmesi için önemlidir. Molibden ise katı eriyik olarak mekanik özelliklerinin arttırmasını etkilemektedir. Uygun olmayan ısıl işlem koşulları Inconel 718 alaşımında ortorombik kristal yapıda, Ni_3Nb kimyasal kompozisyonuna sahip kararlı delta (δ) fazını oluşturmaktadır [1].



Şekil 2.1 : γ'' (yarı kararlı intermetalik bileşik Ni_3Nb) çökelti fazı HMK kristal yapısı [15].

Uygun ısıl işlem metodları bu alaşım için önemli olduğundan sıcaklık-zaman-dönüşüm (TTT) diyagramı incelenerek istenilen faz dönüşümünün gerçekleşmesi

için gerekli ısıtma işlem koşulları belirlenebilir. γ'' çökelti fazının kararsızlığı nedeniyle Inconel 718'in maksimum kullanım sıcaklığı $\sim 650^\circ\text{C}$ 'dir. Inconel 718 dayanımı en yüksek ve en geniş kullanım alanına sahip süper alaşımlardan biridir [16].



Şekil 2.2 : Inconel 718 süper alaşımının sıcaklık-zaman-dönüşüm diyagramı [17].

Çoğu uygulamada Inconel 718 alaşımı solüsyona alınmış ve çökeltme sertleşmesi (yaşlandırma ısıtma işlemi) ile mukavemetlendirilmiş olarak kullanılmaktadır. İkincil fazların (γ' , γ'') matris içerisinde çökmesi sonucu malzeme mukavemetlendirilir. Bu nikel – (alüminyum, titanyum, niyobiyum) fazlarının çökeltme işlemi $594\text{--}815^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında uygulanan ısıtma işlemi ile gerçekleşir. İkincil fazların yaşlandırma ısıtma işlemi sırasında oluşan metalürjik reaksiyonların düzgün bir şekilde ilerleyebilmesi için alüminyum, titanyum ve niyobiyum bileşenlerinin matris içerisinde çözünmüş olarak bulunması gerekir; eğer bu çökeltmeler farklı faz veya başka formda olurlarsa, matris içerisinde çökelmeleri düzgün olmayacaktır ve malzeme de istenilen mukavemetlendirme işlemi gerçekleştiremeyecektir. Bu nedenle yaşlandırma ısıtma işlemi öncesinde malzeme solüsyona alma ısıtma işlemi uygulanır.

Inconel 718 alaşımına standartlandırılmış olarak iki farklı yöntemde ısıtma işleminden uygulanmaktadır. Bunlardan birincisi solüsyona alma ısıtma işlemi $926\text{--}1010^\circ\text{C}$ sıcaklığı aralığında yapılır, hızlı soğutma genellikle su verme, ardından 718°C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırma ısıtma işlemi yapılır. Fırın daha sonra 620°C sıcaklığa soğutulur ve toplam yaşlandırma süresi 18 saat olacak şekilde bekletildikten sonra malzeme havada soğutulur. İkinci yöntem ise solüsyona alma ısıtma işlemi 1038--

1065°C sıcaklığı aralığında yapılır, hızlı soğutma genellikle su verme, ardından 760°C sıcaklıkta 10 saat yaşlandırma ısıtma işlemi yapılır. Fırın daha sonra 650°C sıcaklığa soğutulur ve toplam yaşlandırma süresi 20 saat olacak şekilde bekletildikten sonra malzeme havada soğutulur. İstenilen mekanik özelliklere göre Inconel 718 alaşımına uygulanan sölüsyona alma ve yaşlandırma ısıtma işleminin sıcaklık ve süre parametreleri değişebilmektedir [16].

Inconel 718 süper alaşımı genellikle talaşlı imalat yöntemiyle şekillendirilmektedir. Tornalama işlemleri talaşlı şekillendirmenin büyük bir kısmını kapsamaktadır. Talaşlı imalatı iyi seçilmeyen kesme parametreleri, kesici takımların hızlı aşınması ve kırılması gibi kayıpların yanı sıra, iş parçasının bozulması veya yüzey kalitesinin düşüklüğü gibi ekonomik kayıplara da neden olmaktadır. Inconel 718, düşük kesme hızlarında sementit karbür takımlar ile işlenebilirken daha yüksek kesme hızlarında ise seramik kesici takımlarla işlenebilmektedir. Yüksek sertliğe sahip nikel esaslı Inconel 718 süper alaşımın işlenmesi esnasında takım ömrünü kısaltan en önemli aşınma çentik aşınmasıdır [18].

Inconel 718 alaşımının kullanım alanları günümüzde yaygın olarak uçak ve gaz türbin motorlarında türbin diski olarak kullanılmaktadır. Inconel 718 dökümü, polikristalli ve eşeksenli bir mikroyapıya sahiptir, düşük ve orta sıcaklıktaki -250 700°C mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı son yıllarda uzay, petrol ve nükleer enerji endüstrisinde geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Uçak uygulamalarında; kompresör, türbin diski, türbin kanatçıkları, civata gibi uçak motoru parçalarında, krayojenik tanklarda (-162°C sıcaklıklarda servis şartları), uyduların güç kaynağı bataryalarında kullanılmaktadır.

2.3 Süper Alaşımların Uygulama Alanları

Süper alaşımların günümüzde birçok alanda geniş kullanıma sahiptir. Süper alaşım malzemelerin yerlerine kullanıldıkları metal ve metal alaşımlarına göre en önemli üstünlükleri; yüksek özgül mukavemet, yüksek spesifik elastik modülü, sürünme dayanımı, yorulma dayanımı, şekillenebilirlik, yüzey kararlılığı ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıkta bile devam ettirebilmesi nedeniyle uçak sanayi, endüstriyel gaz türbinleri, roket motorları ve petrokimyasal endüstri alanlarında, sıcak takımlar ve kalıpların yapımında kullanılmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık ortamlarında kritik uygulamalarda süper alaşımlar ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle özellikle uçak ve

uzay sanayi alanında kullanılan süper alaşımlar vazgeçilmesi zor malzemeler olmuşlardır [5].

Süper alaşımların yaygın olarak kullanıldığı uygulamalar Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

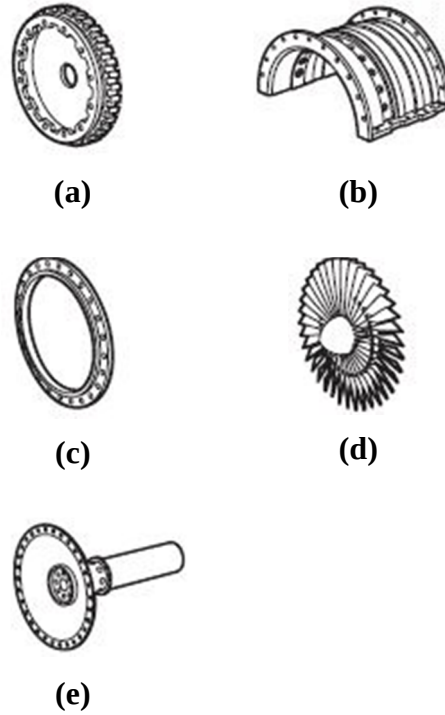
Çizelge 2.2: Süper alaşımların uygulama alanları [5].

Uçaklar ve endüstriyel gaz türbinleri	Diskler, civatalar, şaftlar, muhafa kapları, pervane kanatçıkları, vanlar yanma odaları
Gaz türbin santralleri	Civatalar, pervane kanatçıkları, gaz ısıtıcıların bacaları
Motorlar	Turbo yükleyiciler, eksoz valfleri, ısıtma elemanları, valflerde ve contalar
Metal işçiliği	Sıcak işleme takımları ve kalıplar, döküm kalıplar
Tıbbi uygulamalar	Dişçilik, protezcilik ekipmanları
Isıl işlem ekipmanları	Tepsiler, karıştırıcılar, konveyör bantları
Nükleer güç sistemleri	Hareket mekanizmaları için kontrol çubukları, akış valfleri, yaylar
Uzay araçları	Aerodinamik araç zırhları, roket motor parçaları
Kimyasal ve petrokimya sanayisi	Civatalar, valfler, reaksiyon kapları, borular, pompalar

Döküm, dövülmüş, haddelenmiş ve toz metalürjisi yöntemleriyle üretilerek, istenilen mekanik özelliklerde malzeme elde edilir. Servis şartlarına uygun özelliklerin elde edilmesiyle bazı süper alaşımlara ısıl işlem uygulanarak üstün mekanik özelliklere elde edilir. Süper alaşımların herhangi bir uygulama alanı seçimi sırasında; mukavemet, sürünme dayanımı, yorulma dayanımı, şekillenebilirlik ve yüzey kararlılığı gibi mekanik özellikleri dikkate alınmalıdır. Korozyona dayanaklı süper alaşımlar; çok çeşitli çözelti oranlarında ve çok çeşitli sıcaklıklarda her türlü kimyasala karşı çok üstün dirence sahip oldukları için; en geniş kullanım alanını kimyasal işleme sanayinde bulunmaktadır. Buna bağlı olarak; aşındırıcı ve oksitleyici kimyasal maddelerin kullanıldığı demir-çelik sanayi, ilaç sanayi, kimyasal işleme ve depolama tesisleri, kimyasal kaplama sanayi, havacılık sanayi, denizcilik sanayi gibi birçok sektörde kullanım alanı bulmuştur.

1950’li yıllarda uçak gaz türbin motorlarında kullanılmaya başlanan ve çok üstün yüksek sıcaklık performansı ile hızla, diğer sektörlerde yüksek sıcaklığa dayanıklılık

gerektiren uygulamalarda kullanım alanı bulan; Inconel (600, 625, 718, X750), Haynes (HR120, HR160, HR224), Rene 41 ve Nimonic 90 gibi süper alaşımlar günümüzde havacılık sanayi, ısıtım sanayi, sanayi fırınları, nükleer santraller, gaz türbinleri, seramik sanayi, otomotiv ve metal işleme sanayi gibi; çok iyi yüksek sıcaklık mukavemeti + yüksek sıcaklık oksidasyon direnci gerektiren pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Nikelin, demirin genleşmesi üzerinde çok önemli bir etkisinin olduğunun keşfedilmesinden sonra Fe-Ni alaşımları düşük genleşmeli alaşımlar olarak kullanılmaya başlanmıştır. Metalden en düşük ısıtım genleşmenin beklendiği uygulamalarda kullanılan bu alaşımlar çok düşük genleşme katsayısına sahiptirler. Başlıca kullanım alanları; kompozit kalıp uygulamaları, elektronik sanayi ve savunma sanayidir [5, 7, 19].



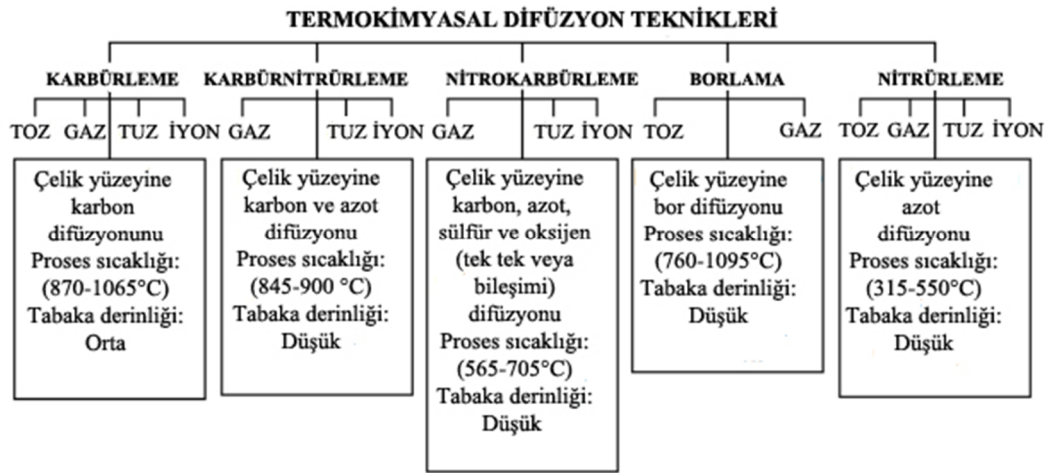
Şekil 2.3 : Süper alaşım parçaları (a) disk, (b) boru, (c) halkalar, (d) kanatçıklar, (e) şaft [20].

Yüksek sıcaklıktaki performansı ile dikkat çeken süper alaşımlar, Şekil 2.3’de gösterilen kritik parçaların üretiminde ana malzeme olarak kullanılmaktadırlar [20].

3. NİTRASYON

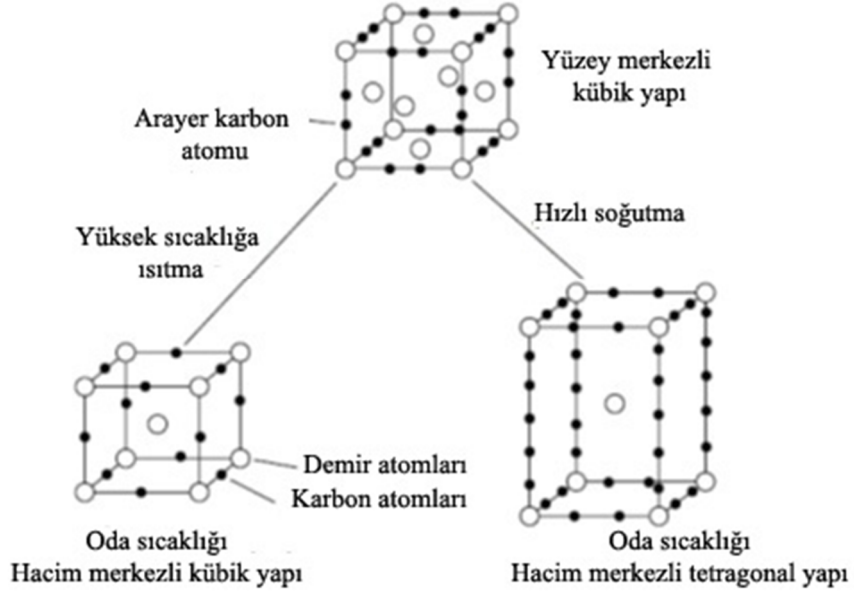
Nitrürleme işlemi ilk olarak 1900 yıllarının başlarında ortaya çıkmıştır sanayi uygulamalarında önemli bir rol almıştır. Genellikle nitrürleme işlemi uçak, otomotiv parçaları, tekstil makineleri ve türbin sistem parçalarının aşınma ve yorulma dirençlerinin artırmak amacı ile yüzeylerinin sertleştirme söz konusu olduğundan nitrasyon işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Nitrürleme işlemi sırasında herhangi bir faz değişimine ihtiyaç duyulmadan, malzeme yüzeyine difüzyon ile azot verilerek, malzemenin yüzeyindeki özellikleri değiştirilir [21]. Yüzeyde homojen bir sertlik kazanımı açısından uygun bir ısı işlem olan nitrasyon için seçilen yöntem (gaz, sıvı veya plazma nitrasyon vb.) ve seçilen yöntemin koşulları (gaz akışı, plazma, sıcaklık, zaman vb.) önemlidir. Nitrürleme işlemi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme metotlarına kıyasla düşük sıcaklıklarda yapılır. Nitrürleme işlemini etkileyen parametrelerinin kontrolü kolaydır. Temperleme ve ön sertleştirmedeki gibi göbek sertliğinde önemli bir değişim meydana gelmez. Ayrıca su verme işlemine gerek olmadığı için daha düşük distorsiyon oluşur. Düşük sıcaklıkta nitrürleme işlemi uygulanan malzemeye göre değişmesine rağmen yaklaşık olarak 500°C civarında seçilir. Genellikle işlem sıcaklığı, malzemeye uygulanan ön sertleştirme işlemi için kullanılan temperleme sıcaklığına bağlı olarak seçilmektedir. Eğer temperleme sıcaklığında veya üzerinde bir sıcaklıkta nitrürleme işlemi yapılırsa malzemenin göbek sertliği süre ve sıcaklığa bağlı olarak azalacaktır. Göbek sertliğinin azalması nedeniyle malzemenin yüzeydeki nitrürlenmiş tabakaya desteği azalacaktır ve istenilen özellikler elde edilemeyecektir. Yüzey sertleştirme işlemlerinden karbürleme ve nitrokarbürleme işlemleri nitrürlemeye göre daha yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Karbürleme işlem sıcaklığı yaklaşık 970°C civarında iken karbonitrürleme işlem sıcaklığı ise 870°C civarındadır. Şekil 3.1’de termokimyasal difüzyon ile yüzey sertleştirme sıcaklıklarının ve sertleşmiş tabaka derinliklerinin kıyaslaması gösterilmiştir. Karbürleme işlemiyle elde edilen sertleştirilmiş tabaka derinliği, nitrürleme işlemiyle elde edilene kıyasla önemli ölçüde daha derindir. Bazı karbürlenmiş tabakalarının derinlikleri 6,35 mm kadar olabilmektedir. Tabaka derinliğini arttırmak için yapılan uzun karbürleme süresi ve

sıcaklık dezavantajı ise malzemede tane büyümesinin meydana gelmesidir. Nitrürleme işlemi ise (ferritik çelikler için) demir-karbon diyagramında ferritik bölge içinde yapıldığı için mazleme göbeği ve yüzeyinde herhangi bir tane büyümesi meydana gelmemektedir. Nitrürleme işlemi karbürleme kadar tabaka derinliği elde etmek mümkün değildir. 90 saatlik süreyi aşan nitrürleme işlemlerinde herhangi bir metalürjik avantaj elde edilememektedir. Azot atomu çelik ve demire karşı afinitesi yüksektir ve hızlı bir şekilde yapı içerisine difüze olur. Yüksek sıcaklıklarda ise azotun difüzyonu daha hızlı ve derin olur. Difüzyon için önemli olan sıcaklık seçimi, istenilen sertleştirilmiş tabakanın çeşidi ve kalitesi, işlem görecekt parçanın yüzey alanı, çeliğin kimyasal kompozisyonu ve gaz ayrışımı dikkat edilmelidir. Eğer işlem sıcaklığı çok yüksek seçilirse, demir içerisinde doymuş azot çözeltisi oluşur. Sonrasında ise nitrür ağı olarak bilinen problem meydana gelebilir. Bu durum keskin köşelerin gevrekleşmesine, yüzeyde dökülmelere neden olmaktadır [21].



Şekil 3.1 : Difüzyon ile yüzey sertleştirme tekniklerinin karşılaştırılması [21].

Konvensiyonel yüzey difüz tekniklerinden karbürleme ve karbonitrürleme işlemlerinde çelik östenitleştirme sıcaklığına çıkarıldıktan sonra karbürleme işlemi yapılmaktadır. İşlem bitiminde çeliğe su verme işlemi yapılarak malzemenin hızlı soğuması sağlanır. Böylelikle östenik fazı (yüzey merkezli kübik) martenizit fazına (hacim merkezli tetragonal) dönüştürülür. Şekil 3.2’de östenik ve martenizit fazları gösterilmiştir. Bu arada dikkat edilmesi gereken östenik ve martenizit fazlarının kafes yapılarının büyüklükleridir. Martenzit fazının oluşturulması sırasında yapıda yeterli miktarda karbon mevcut olması gerekmektedir. Nitrürleme işleminde ise hızlı soğumaya gerek yoktur [21].



Şekil 3.2 : Östenik ve martenzit fazlarının kafes yapıları şematik olarak gösterilmiştir [21].

Distorsiyon, ısıtma işlemlerinin ve mühendislerin en çok karşılaştığı problemler arasında yer almaktadır. Distorsiyon son ısıtma işlem sırasında şekil distorsiyonu (geometrik şekil değişimi; eğilme, bükülme) ve boyut distorsiyonu (malzemenin hacminde büyüme veya çekilme) olmak üzere iki gruba ayrılır. Distorsiyon azaltılabilir fakat tamamen giderilemez. Döküm, ısıtma işlem, dövme ve haddeleme işlemleri sonucunda malzemede iç gerilmeler meydana gelir. Çeliklerde ön ısıtma ve talaşlı şekillendirme sonrasında distorsiyonu azaltmak için gerilim giderme tavı uygulanır. Son talaşlı şekillendirme ve nitrürleme işleminde ise bu tavlama sonra yapılır. Nitrürleme işlemi düşük sıcaklıklarda yapıldığı için su verme işlemi gerekmemektedir. Bu nedenle çelik atmosfer koşulları altında veya azot ortamında soğumaya bırakılır ve termal gradyan riski azaltılır. Böylece nitrürleme işlemi azalan distorsiyon, azalan son talaşlı imalat süresi, iyi parça temizliği ve iyi boyutsal kararlılık gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca karbürleme işlemiyle kıyasladığımızda nitrürleme daha az maliyete sahiptir. Karbürleme işleminde östenit fazı temperlenmemiş martenzit fazına dönüşürken yapıda karışık fazların varlığı boyutsal kararlılığı azaltmaktadır. Nitrürleme işleminde ise östenit fazında herhangi bir değişim meydana getirmediği için iyi boyutsal kararlılık göstermektedir. Ayrıca gerilim giderme tavı işlemiyle aynı özellik göstermektedir. Nitrürleme işlemini süre, sıcaklık, çeliğin kimyasal kompozisyonu, gaz akışı, gaz ayrışımı, çeliğin yüzey temizliği ve yüzey metalürjisi (kaplamalar) gibi parametreler etkilemektedir [21].

Nitrürleme işlemi genellikle özel çeliklere yani özel alaşım içeren azota karşı ilgisi olan ve kararlı nitrür oluşturan malzemelere uygulanır. Yüzey sertleştirme işlemi yapılan çeliklere nitrürleme işlemi sonrası yüksek sertlik değerleri elde edilmez. Saf demir ve düşük alaşımlı çelikler de nitrürlenebilir ancak gaz nitrürleme ile elde edilen en yüksek sertlik değeri 35 HRC civarındadır. Nitrürleme prosesini gelişimi sırasında Fry tarafından yüksek sertlik değerlerine sahip nitrürlenebilir çelikler geliştirmiştir. Bu çelikler krom, molibden, vanadyum, tungsten ve alüminyum alaşım elementleri içermektedir. Diğer çeliklerle kıyasladığımızda içerdiği alaşım elementlerinden dolayı maliyeti daha yüksektir. Yüksek sertlik değerleri elde edilen bu çeliklerde kararlı nitrürler oluşmaktadır. İçerdiği alaşım elementi miktarına göre sertlik değerleri değişmektedir [21]. Geleneksel yüzey sertleştirme işlemlerine kıyasla nitrürlenmiş çeliklerin korozyon ve oksidasyon karşı dirençleri daha iyidir. Nitrürlenmiş alaşımlı çelikler ve takım çeliklerin yüzeyleri tuzlu su korozyonuna, nem ve suya karşı iyi direnç gösterir. Buna rağmen nitrürleme işlemi paslanmaz çeliklerde korozyon direncini azaltmaktadır. Bunun nedeni ise kromun oksijine karşı ilgisi ve paslanmaz çeliklerin yüzeyinde krom oksit filmi şeklinde bulunmasıdır. Bu oksit filmi nitrürleme için bir engel oluşturur. Difüzyon için yüzeyin pasifleştirilmesi gerekir, bu da korozyon direncini azaltır. Nitrülenmemiş çeliklere göre nitrürlenmiş çeliklerde oyuklanma korozyonu daha yavaş şekilde oluşmaktadır. Sonuç olarak nitrürleme işlemi alaşımlı çeliklerin korozyon direncini artırmaktadır. Nitrürleme işlemi malzemenin göbek özelliklerini değiştirmez, bunun nedeni nitrürleme sıcaklığının düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesidir [21].

Nitrürleme işlemi ilk kez otomotiv sanayi de vites ekipmanlarında kullanılmıştır. İlerleyen zamanla nitrürleme işleme daha geniş uygulama alanlarına yayılmıştır. Mühendis ve metalürjistler nitrürleme işlemini yaratıcı, tutarlı ve kabul edilebilir prosesler için kullanmaya devam etmektedirler. Birçok yararlı avantajlarıyla nitrürleme işlemi gelişmesine devam edecek ve popüleritesi artacaktır [21].

3.1 Nitrürleme Yöntemleri

Nitrürleme işlemi sırasında birçok parametre prosese etki eder. Bunlar azot kaynağı, ısıtma, süre ve çeliğin kompozisyonudur. Nitrürleme toz, gaz, sıvı ve plazma nitrürleme şeklinde uygulanabilir. Nitrürleme yöntemine bağlı olarak yüzeyde, demir nitrürler ve altlığın içerdiği alaşım elementlerinin nitrürleri oluşur.

3.1.1 Gaz nitrürleme

Gaz nitrürleme işleminde azot kaynağı sisteme dışarıdan bağlanan amonyak gazının ısıtılarak ayrışmasıyla sağlanır. Amonyak gazının ayrışması için sıcaklığın 500°C ile 570°C arasında olması gerekir. Amonyak termodinamik durumda kararsızdır ve aşağıda verilen reaksiyon ile ayrışır [21].



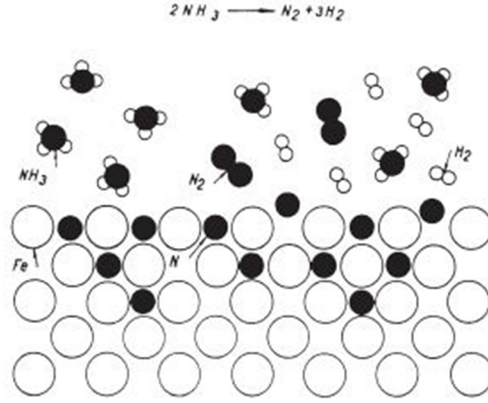
İşlem sıcaklığında çelik yüzeyinde genellikle aşağıda üç reaksiyon gerçekleşir [21].



(3.2) eşitliğinde gösterilmiş atomik azot ve hidrojen bileşenleri kararlı değildir, benzer atomlar ile birleşerek (3.2) ve (3.3)'deki molekülleri oluştururlar. İşlem sıcaklığında serbest azot çelik içerisine doğru difüze olur, fakat çok yavaş gerçekleşir. Burada önemli olan sıcaklığın ekonomik ve pratik etkisidir. 500°C sıcaklık göz önüne alınacak olursa ekonomik bir sıcaklık denilebilir. Bu sıcaklıkta azotun çelik ve demire ilgisi yüksektir ve difüzyon için hazırdır. Yüksek sıcaklıklarda ise azot atomunun difüzyonunu daha hızlı ve derin gerçekleştirmektedir. Ekonomik sıcaklık optimum derinlikte difüzyona imkan sağlar, ayrıca çeliğin göbek özelliklerinin olumsuz yönde etkilememektedir. Amonyak gazının (3.1) eşitliğinde ayrışması ile azot atomu çelik içerisine difüze olur. Azot atomunu 0.142 nm çapa sahiptir ve demir kafes yapısında oktahedral arayer boşluklarına yerleşir. Arayer boşlukları alfa demir için maksimum 0,038 nm; gamma demir için maksimum 0,104 nm çapındadır. Saf demirin 590°C'de nitrürlenmesinde Fe-N faz diyagramına göre aşağıdaki fazlar meydana gelir [21, 22].

- Hacim merkezli kübik α -Fe
- Yüzey merkezli kübik γ' -Fe₄N
- Hekzagonal ε -Fe₂₋₃N
- Ortorombik ζ -Fe₂N

Azot atomları verilen ısı ile demir kafesi içerisinde hareket etmesine arayer difüzyonu denilmektedir. Şekil 3.3'de arayer difüzyonu şematik olarak gösterilmiştir [21].



Şekil 3.3 : Azot atomunun arayer difüzyonunun şematik olarak gösterimi [21].

500°C derece sıcaklıkta amonyak gazı kararlılığı düşük olması nedeniyle %98 oranında civarında ayrışma gerçekleşir. Bu ayrışma reaksiyonu oldukça yavaş ilerlemektedir. Çeliğin nitürlemesi sırasında ortamda bazen %20 oranından az, genellikle %50 oranına kadar amonyak bulunur ve ayrışma derecesi denge durumundan düşüktür. Geriye kalan amonyak çelik içerisinde (3.5)’deki reaksiyona bağlı olarak azotun difüzyonunu etkilemektedir [21].



Azotun aktivitesi için kütle transfer itici gücü (3.6)’da gösterilen formül ile hesaplanır [21].

$$a_{\text{N}} = K_{\text{N}} \frac{P_{\text{NH}_3}}{p^{3/2}} \quad (3.6)$$

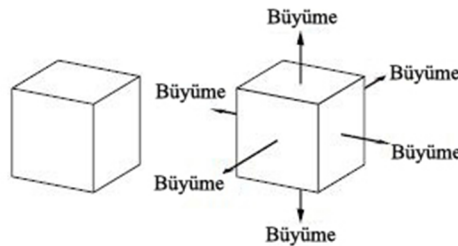
(3.6)’da gösterilen formülde K_{N} azot denge sabiti, P_{NH_3} ve $P_{\text{H}}^{3/2}$ amonyak ve hidrojenin kısmi basınçlarıdır. Azot atomunun transferi düşük olduğundan amonyak gazından serbest kalan hidrojen atomu proses hızını belirler. Daha önce de bahsedildiği gibi nitrürleme işlemleri 120 saate kadar uzun sürelerde uygulanmaktadır. Nitrürleme işleminde amonyak gazının ayrışma derecesi belirli etkindir. Yüksek ayrışma derecesinde denge durumu söz konusu olduğundan nitrürleme etkisi düşüktür. İşlem sırasında genellikle sabit ayrışma derecesi (%30) kullanılır. Bazı durumlarda ise sıcaklı ve ayrışma derecesine bağlı olarak iki farklı basamak kullanılmaktadır. Nitrürleme işleminin etkisi (3.7)’deki eşitliğinde gösterilen nitrürleme potansiyeli ile kolaylıkla hesaplanabilmektedir [21].

$$Np = \frac{P_{\text{NH}_3}}{p^{3/2} \text{H}_2} \quad (3.7)$$

Nitrürleme potansiyeli amonyak atmosferinin nitrürleme kabiliyetini göstermektedir. Bu hesaplama ile nitrürlenecek malzemenin nitrür tabaka yapısı ve derinliği tahmin edilebilmektedir. Yüksek nitrürleme potansiyeli değerlerinde yüzeyde yüksek azot konsantrasyonu ve daha dik konsantrasyon gradyanı elde edilir. Düşük nitrürleme potansiyelleri ise yüksek alaşımlı çeliklerde beyaz (gevrek) tabakasız nitrür tabakasının oluşmasını sağlamaktadır [21].

Amonyak gazının kullanılmasının sebebi 590°C sıcaklıkta nitrürleme işlemi sırasında çeliğin alfa- ferrit fazında %0.115 oranında azot çözünebilecektir. 500°C sıcaklıkta ise bu değer %0.099'a kadar gerilemektedir. Alfa-ferrit fazının düşük oranda azot çözünürlüğü nedeniyle yüksek basınçlı gaz nitrürlemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Azot tüpünün kullanılamamasının sebebi ise işlem sıcaklığında molekül halinde bulunan azotun serbest azot atomlarına ayrışmasının zor olmasıdır. Isınan malzemenin yüzeyi amonyak ile temasıyla katalizör görevi görerek amonyağın ayrışmasına yardımcı olur ve serbest azot atomları malzeme yüzeyine difüze olur [21, 23].

Çeliğin içinde bulunan karbon da reaksiyonu etkilemektedir. Azot atomunun östenik fazını kararlı duruma geçmesini sağlamaktadır, ancak bu dönüşüm yavaş olmaktadır. Östenit fazının martenzit fazına dönüştüğünde yapıda Fe-N oluşmaktadır. Demir-karbon diyagramında nitrürleme işlemi ferritik bölge ile sınırlıdır. Nitrürleme işlemi sonucunda hacim merkezli kübik yapı değişmemektedir. Şekil 3.4'de gösterildiği gibi azot atomunun malzemenin yüzeyine difüzyonu ile yapıda büyüme oluşmakta ve hacim artmaktadır. Bu büyüme sadece malzemenin yüzeyinde gerçekleşirken malzemenin göbeği aynı özelliğini korumaktadır. Ayrıca herhangi bir faz değişimi gerçekleşmemektedir. Nitrürleme sıcaklığı azot atomunun difüzyonu için en önemli parametredir. İşlem sıcaklığı en az 350°C olabilir. 600°C sıcaklıklarda da nitrürleme işlemi yapılabilir fakat nitrür ağının oluşma riski daha fazladır ve kalın nitrür tabakası elde etmek zorlaşır [21, 24].

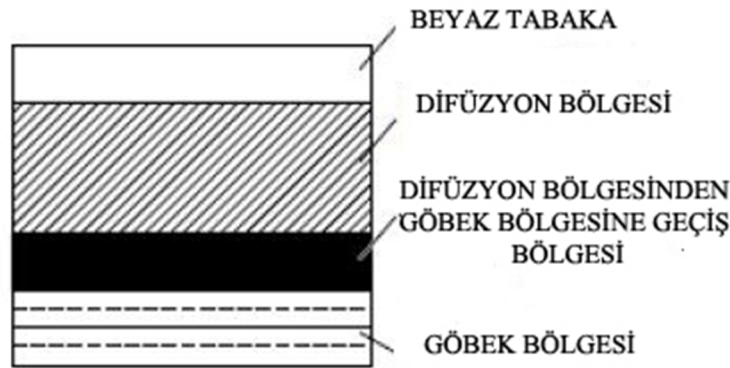


Şekil 3.4 : Malzeme yapısında oluşan büyümenin şematik olarak gösterimi [21].

Nitrürleme işlemi sonucunda malzemede distorsiyon oluşmamaktadır. Yüzeyde azot atomu difüzyonu ile bir büyüme oluşmaktadır. Bu büyüme çeliğin kimyasal kompozisyonuna, gaz ayrışımına, işlem sıcaklığına ve işlem süresine bağlı olarak değişmektedir.

Nitrürleme öncesi çeliğin ön ısıtma işleminden geçmesi gerekir. Bunun nedeni malzemenin göbeğinin nitrür tabakasını destekleyecek uygun özelliklere sahip olması gerekmektedir. Eğer ön ısıtma yapılmaz ise nitrürleme işlemi çok zor yapılır. Nitrürleme işlemi gerçekleştirilse bile herhangi bir yük altında önemli olan malzemenin göbek sertliğidir, ve nitrür tabakasına destek olması gerekmektedir. Ön ısıtma çeliklerin için önemli bir prosetir [21].

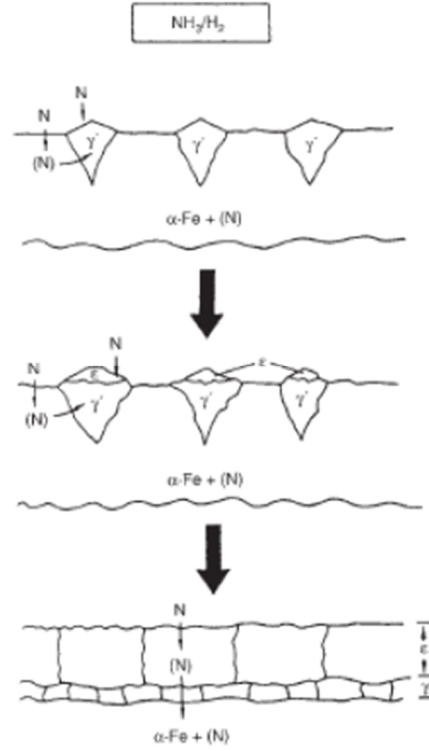
Nitrürleme işleminin mikroyapısı incelendiğinde nitrür tabakası çekirdeklenme büyümesi ile çelik yüzeyinde oluşmaya başlar. Bu çekirdeklenmiş büyüme alanları bir araya gelerek kırılğan ve sert beyaz tabakayı oluşturur. Bu tabaka çeliğin yüzeyinde bulunur ve içeri difüze olmaz. Sıcaklık, süre ve gaz kompozisyonuna kalınlığı değişmektedir. Çelik içerisindeki karbon miktarı çekirdeklenme işleminin morfolojisini değiştirmektedir. Çelik yüzeyinde karışık fazların oluşmasına neden olur. Beyaz tabakanın hemen altında kararlı nitrürlerden oluşan difüzyon bölgesi oluşur. Difüzyon bölgesinden sonra ise malzemenin göbeği gelir. Bu üç farklı bölge Şekil 3.5’de gösterilmiştir [21].



Şekil 3.5 : Nitrürleme sonrası malzeme yüzeyinde oluşan bölgelerin şematik gösterimi [21].

Çelik yüzeyi ile nitrürleyici atmosfer arasındaki arayüzeyde γ' fazının çekirdeklenmesiyle nitrürlerin oluşumu başlar. Bu çekirdeklenme prosesi ϵ fazı çekirdeklenene kadar devam eder. Şekil 3.6’da çekirdeklenme prosesi

gösterilmektedir. Ayrıca azot atomunun beyaz tabaka içerisinde difüzyonu çelik altığının içerisine göre daha yavaştır [21, 23].



Şekil 3.6 : γ' ve ϵ -nitrür fazlarının çelik yüzeyinde gösterilişi [21].

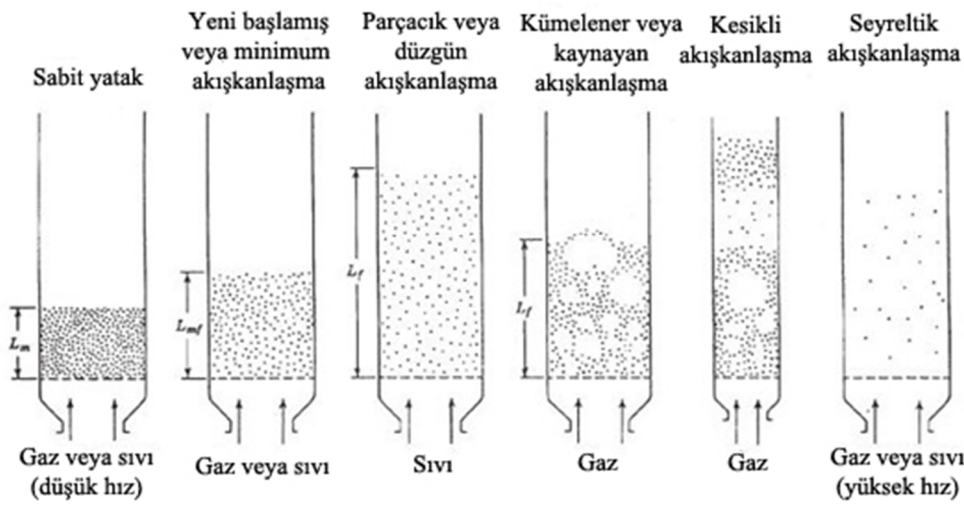
Karbon γ' ve ϵ fazlarının miktarına etki eder. Genellikle nitrürlenmiş çeliklerin karbon miktarı yaklaşık olarak %0.4'tür. Bu çeliklerde nitrürleme sonrası oluşan tabakada γ' ve ϵ faz miktarı birbirine eşittir. Daha yüksek karbon içeren çeliklerde beyaz tabakada ϵ fazı miktarı artmaktadır. Düşük karbonlu çeliklerde ise γ' miktarı arttığı görülmektedir. Beyaz tabakanın kalınlığı süre, sıcaklık ve basınçla bağlı olarak değişmektedir. Çeliğin içerisindeki karbon miktarı kalınlığı etkisi azdır. Fakat karbon miktarı önemli ölçüde beyaz tabakanın kompozisyonunu etkilemektedir. γ' ve ϵ fazlarının hangisinin daha baskın veya eşit miktarda olduğunu belirlemektedir [21].

Beyaz tabakanın kalınlığı seyreltme, iki aşamalı Floe prosesi veya iyon nitürleme ile kontrol edilebilmektedir. Beyaz tabakanın kompozisyonunda bulunan γ' ve ϵ fazlarının miktarı nitrürlenecek malzemenin çalıştığı ortam koşullarına göre ayarlanarak istenilen özellikler elde edilmektedir [24].

3.1.2 Akışkan yataklı fırında nitrürleme

Akışkan yataklı fırın sistemi gaz nitrürleme işlemi için kullanılabilir. Azot kaynağı olarak amonyak gazı kullanılır. Akışkan yataklı fırın sisteminde nitrürleme

teknîği gaz nitrürlemeye, ısı transferi ise tuz banyolarındaki metoda benzerdir. Akışkan yataklı fırın sıvı ile benzer karakteristik özelliğe sahiptir, tek farkı akışkan yataklı fırın ıslak değildir. Akışkan tekniği fırın sistemi içerisinde bulunan çok ince partiküllerin kaynamasıyla, sıvı gibi davranmalarındır. Bu olay sistemden etkili hacim ve basınca sahip gaz geçirilerek mikroskobik olarak ince partiküllerin ayrışma sağlanır. Eğer gaz hacmi ve basıncı çok fazla ise ince partiküller gaz ile beraber taşınarak fırından dışarıya atılır, bu nedenle gaz basıncı ve hacmi çok önemlidir. Akışkanlık için çok fazla hacime sahip gaz gerekmektedir, önemli olan partikülleri ayırabilmesidir. Şekil 3.7’de akışkanlık safaları gösterilmiştir [21, 23].



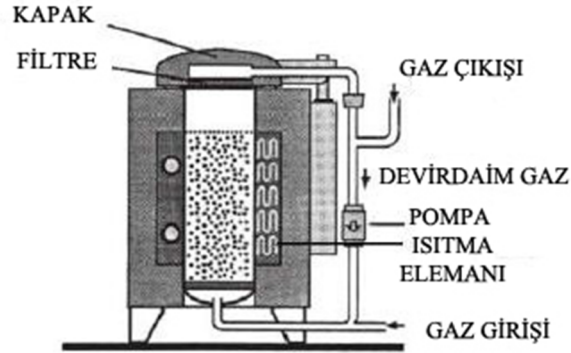
Şekil 3.7 : Akışkan yataklı fırında akışkanlık safaları [21].

Buradaki ince partiküller alüminyum oksittir. Çok iyi ısı transferi sahip olan alüminyum oksit partikülleri, nitrülenecek malzemenin ısınmasından rol oynarlar. Akışkan yatakların en önemli özelliklerinden biri ısı transfer veriminin yüksek olmasıdır. Akışkan yatak fırınındaki partiküllerin türbülanslı hareketi ve hızı dolaşımı ısı transferinin verimliliğinin konvansiyonel tuz banyosunda nitrürleme işlemindeki ile karşılaştırılabilir olmasını sağlar. Partikül boyutu, yatak malzemesi, akışkan oluşturucu gazın hızı ve ısıtma hızı gibi faktörler ısı transferini etkiler [21].

3.1.3 Isıtma metodları

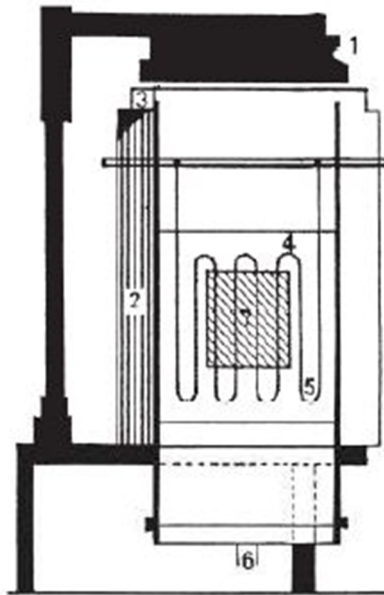
Akışkan yataklı fırın sisteminde kullanılan ısıtma metodları açık atmosfer fırınlarına ya da tuz banyolarına benzer metod kullanılır. Akışkan yataklı fırında ısıtma elektrikli veya gazlı, ve dahili veya harici ısıtma sistemleri sağlanır. Harici direnç ile ısıtma sisteminde alüminyum oksit partikülleri ısıtma sisteminde bulunur ve

malzeme fırın içerisine yerleştirilir. Şekil 3.8’de gösterildiği gibi ısıtma ekipmanları fırın üzerine monte edilmiştir. Azot, metan, endotermik gaz, amonyak ve gaz karışımı (metan-azot yada amonyak-metan) alüminyum oksit partiküllerinin kaynaması için kullanılan gaz çeşitleridir [21, 23].



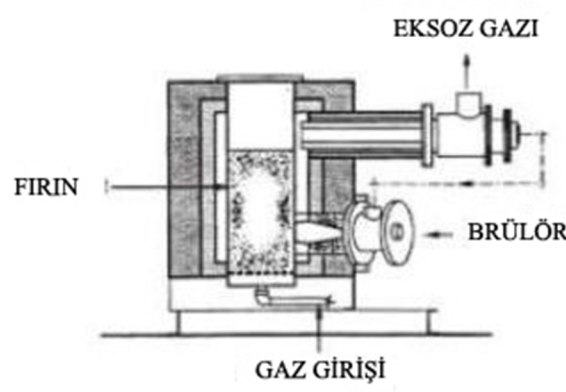
Şekil 3.8 : Nitrürleme Harici direnç ile ısıtılan akışkan yatak fırını [21].

Dahili direnç ile ısıtma metodu tuz banyonlarına benzerdir. Şekil 3.9’da gösterildiği gibi akışkan yataklı fırınlarda kullanılan basit bir yöntemdir ve ısıtıcı ile alüminyum oksit arasında çok iyi ısı transferine sahiptir [21, 23].



Şekil 3.9 : Dahili direnç ile ısıtılan akışkan yataklı fırın (1) kapak, (2) yalıtım malzemesi, (3) refrakter malzemesi, (4) akışkan yatak, (5) ısıtma elemanları, (6) gaz girişi, (7) ısıtılacak numune [21].

Gaz ısıtmalı akışkan yataklı fırın genellikle elektrikle ısıtılanlara göre daha ekonomiktir [21].



Şekil 3.10 : Gaz ısıtmalı (harici) akışkan yataklı fırın [21].

Akışkan yataklı fırın sistemi harici ve dahili ısıtmalı olabilir. Şekil 3.10’da gaz ısıtmalı akışkan yataklı fırın gösterilmiştir [21].

3.1.4 Akışkan yataklı fırınları avantajları

Akışkan yatak fırın sistemleri, diğer sistemlere göre ısıtma işlemi sırasında üstünlüğü ile ön plana çıkmaktadır, ve birçok avantaja sahiptir. Bunlar;

Uniform ısı transferi sağlayarak işlem gören yüzeylerde oldukça homojen kalınlıkta bir işlem tabakası oluşturması. Yüzey temizliği, homojen sertlik dağılımı, yüksek tokluk, darbe direnci gibi mekanik özellikler yüksek kalitede sağlanabilir.

Akışkan yatak fırın teknolojisinin sağladığı özel ortamında, koruyucu gaz atmosferi altında sağlanan yüksek kaliteli ısıtma işlemi malzemeye uygulanabilmektedir.

Akışkan yatak fırın sistemi ekzotermik-endotermik veya sıcaklığa hassas olan reaksiyonların gerçekleşmesine uygundur.

Kurulum, işletim ve bakım masraflarının plazma-bazlı yöntemlere göre daha ucuz olmasıdır. Ayrıca akışkan yatak fırın sisteminin basit olması, kolay kullanıma sahiptir.

Sürekli işletim ile fazla sayıda parçaya hızlı bir şekilde işlem uygulama imkanı sunması ve sağlık ve çevreye herhangi bir toksik atığının olmaması akışkan yatak teknolojisinin en büyük avantajlarıdır [25].

3.1.5 Tuz banyosunda nitrürleme

1930 yıllarının ortasında gaz nitrürleme işlemine alternatif olarak ortaya çıkan bir yöntemdir. Elde edilen tabaka daha uniform ve iyi metalurjik özelliklere sahiptir.

Tabakanın derinliği ve kalitesi tuz banyosunun kimyasal bileşimine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca ısıtma kaynağı azotun elik yüzeyine ulaşması için önem taşımalıdır. Tuz banyolarında nitrürleme gaz nitrrlemeyle aynıdır. Tek farkları tuz banyosunda nitrürleme daha iyi uniform tabaka elde edilmesidir. Dahili ve ya harici ısıtıcı ile ısıtılan tuz banyosunda nitrürleme işleminde tuz eriyerek elik yüzeyine difüze olacak azotu ortaya çıkarır. İşlem sıcaklığında çeliğin tuz banyosu içerisindeyken oluşan reaksiyonlar gaz nitrürleme ile benzerdir. Nitrürleme için kullanılan tuz banyosu karışımı %30 NaCN, %39 KCl, %25 Na₂CO₃ veya K₂CO₃ ve %2 nem içerir. Tuz banyosunda nitrürleme tekniği gaz nitrürlemeye göre daha düşük maliyeti nedeniyle 1950 yıllarında kullanımı yaygınlaşmaya başladı. Ayrıca gaz nitrürlemeye göre daha yüksek sıcaklıkta işlem yapılabilmesiyle (565-585°C) işlem süresinin hızlandırmıştır. Kısaca özetlemek gerekirse tuz banyosunda nitrürleme işleminin düşük çalışma maliyeti, düşük bakım maliyeti, kolay kullanılabilir olması, fazla yer kaplamayan küçük yığın tipi fırınlara ihtiyaç duyulması gibi avantajları vardır [21].

3.1.6 Floe prosesi

Carl Floe 1940 yıllarında geliştirdiği bu yöntem günümüzde hala kullanılmaktadır. Metalurjik olarak malzemenin yüzeyini kontrol etmek diğer konvansiyonel gaz nitrrlemelere göre daha kolaydır. Yüksek sıcaklık işlem sırasında beyaz tabakanın derinliği ve faz içeriği kontrol etmek mümkündür. Bu işlem genellikle vites parçalarına uygulanmaktadır.

Floe prosesi iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada 500°C’de %15-30 amonyak ayrışması (atmosferin içerdiği amonyak %70-85) ile gerçekleşir. Bu aşamada yüzeyde azota zengin bileşikler üretilir. İkinci aşamada ise sıcaklık 560°C yükseltilir ve amonyak ayrışımı %75-80 (atmosferin ierdiğin amonyak %15-25) ile gerçekleşir. Ortamdaki azot potansiyeli azalması sonucu elde edilen beyaz tabaka ince bir tabakadır. Bu işlem sırasında işlem sıcaklığı n temperleme sıcaklığını geçmemesine dikkat edilir. Böylece malzemenin göbek sertliğinde herhangi bir değişim olmaz ve oluşan ince tabakayı destekler [21].

3.1.7 Plazma nitrürleme

Plazma nitrürleme tekniği elektriksel boşaltımlı teknoloji kullanılarak yapılan bir çeşit yüzey sertleştirme işlemidir. Bu işlemdede, vakum ortamında ve yüksek voltaj

altında oluşturulan plazma ortamından yararlanılır. Elektriksel boşalma şartları altında azot gazı iyonize olur, azot iyonları elektrostatik alana doğru ivmelenir ve katoda bağlı iş parçasını bombardımana uğratar. 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 olmalarıyla gerçekleşir. Doğru akımın kullanılması plazma ortamının sürekliliğininin sağlanması içindir. Plazma nitürleme işleminde akım yoğunluğu, güç, işlem haznesinin basıncı ve gaz kompozisyonu iyi bir şekilde kontrol edilmelidir. Bu parametrelerin bilgisayar destekli sistemler ile sağlanır. Plazma nitürleme işlemi, temel olarak 4 aşamadan oluşur. İlk olarak işlem haznesi vakum altına alınır. Bu sayede haznede bulunan hava ve diğer kirlilikler ortamdaki uzaklaştırılır. Daha sonra ortam nitürleme sıcaklığına ısıtılır. Isıtma işlemi, çarpışmalardan kaynaklanan plazma enerjisi ile yapılabileceği gibi dirençli ısıtıcılar veya özel katot kaplamaları ile de yapılabilmektedir. İş parçaları istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra, işlem gazı sisteme verilir. Voltaj etkisi altında azot gazı ayrılarak iyonize olur ve iş parçasına doğru hızlanarak çarpar. Çarpışma sonucu kinetik enerji ısı enerjisine dönüşür. Bu ısı parçayı nitürleme sıcaklığına getirmek için ya doğrudan kullanılır veya ısıtma elemanlarına ilaveten yardımcı ısıtma kaynağı olarak kullanılır. Eğer ısı uygulandığında, kullanılan işlem gazı çelik içerisine yayımlanabilirse, nitürleme işlemi gerçekleşir. Nitürleme işlemi bittiğinde işlem gören parçalar inert atmosfer altında soğutulurlar [21, 23]. Nitürlemede amonyak (NH_3) kullanılabileceği gibi, işlem sırasında sadece azot gazı (N_2) veya azotun (N_2) yanında hidrojen (H_2), argon (Ar) gibi malzemeye etkileşime girmeyecek gazlar da kullanılabilir. Hidrojen gazı kullanılarak yapılan nitürlemede, vakumlu ortama yerleştirilmiş parçalar, ilk olarak sadece hidrojen gazının ortama verilmesi ve enerji uygulanması sonucunda akım boşalımı (glow discharge) denilen ve parça yüzeyinin hidrojen bombardımanına tutulması olarak tanımlayabileceğimiz işleme maruz kalırlar. Akım boşalımı sırasında serbest kalan fazla enerjinin bir kısmı, elektron saçılması şeklinde parça yüzeylerinde ışıma meydana getirmektedir. Parça yüzeyinin temizlenmesi aşamasında kullanılan hidrojen gazı, açık mavi bir renkte ışık görülmesine sebep olurken, nitürleme aşamasına geçildiğinde ortama giren azot atomlarının etkisiyle ışığın rengi mor renge dönüşür. Bu renk farkının nedeni ise, her gazın fazla enerjisini verirken açığa çıkan enerjinin farklı olması ve bunun da ışımanın dalga boyunun farklı değerler almasına sebep olmasıdır. Hidrojen atomlarının parça yüzeyine

çarpmaları; parça yüzeyindeki yağ, oksit tabakası gibi nitrürlemeyi olumsuz etkileyebilecek katmanları malzeme yüzeyinden uzaklaştırılmasını sağlar. Hidrojenin böylelikle azot difüzyonunu kolaylaştırıcı etkide bulunduğu, 430°C gibi düşük sıcaklıklarda da azot difüzyonunu arttırıcı etkileri bilinmektedir [21, 26].

Nitrürleme sıcaklığı 400 ile 600°C arasında değişebilmektedir. Diğer nitürleme yöntemlerinde nitrürleme, 550°C sıcaklığın altında pek yapılmazken, plazma nitrürlemeyle çok daha düşük sıcaklıklarda da başarılı nitrürleme işlemleri yapılabilmektedir. Nitrürleme için kullanılan gazın azot veya amonyak olması durumunda sıcaklık artışı sırasında azot difüzyonu meydana gelirken, N_2+H_2 gaz karışımı kullanılması durumunda, sıcaklık artışı sırasında sadece (H_2) ortama verileceğinden, azot (N_2) difüzyonu oluşmaz. Böylelikle sadece istenilen sıcaklıkta nitrürleme yapılmış olunur. Gaz oranları değiştirilerek yüzeyde oluşan tabaka oluşumu kontrol edilebilir. Gerek plazma nitrürleme gerekse diğer yöntemlerle yapılan nitrürleme sonrasında çelik yüzeyinde oluşan nitrür, iki tabakadan oluşmaktadır. Yüzeyde beyaz tabaka adı verilen gevrek, sert ve nispeten ince olan kısım bulunurken, yüzeyden derine inildikçe görülmeye başlanılan kısım difüzyon tabakasıdır [21]. Plazma nitrürleme uygulanan yüzeylerde elde edilen sertlik profili, diğer nitrürleme yöntemlerine benzerdir. Ancak gerek yüzeyde gerekse yüzeye yakın bölgelerde, işlem daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği için daha yüksek yüzey sertlikleri elde edilebilir [26]. Plazma nitrürleme işleminin, çevre dostu gaz kullanımı, yangın riskinin olmaması, sürekli üretimde fırından daha iyi yararlanılması, çok düşük çalışma maliyetleri, operatöre minimum bağlılık, düşük proses gazı tüketimi, tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmesi, seçici nitrürleme kolaylığı gibi avantajları bulunmaktadır [21].

3.2 Nitrürleme İşlemi Uygulanmış Süper Alaşımların Literatür Çalışmaları

AW ve diğ. 1996 yılında yaptıkları çalışmada sıcak dövülmüş, solüsyona alınmış ve yaşlandırılmış Inconel 718 süper alaşımına ilk önce 550, 600, 650, 700 ve 750°C sıcaklıklarda 9 saat süre ile plazma nitrürleme yapılmış, ikinci deneyde ise 600°C sıcaklıkta 1, 4 ve 16 saat sürelerle plazma nitrürleme yapılmıştır. En yüksek mikrosertlik (1290 HK) 600°C 9 saat süreyle yapılan nitrürleme işleminde elde edilmiştir. SEM geri saçılan elektron mikroskobu ile yapılan incelemede 600°C sıcaklıktaki işlem sonucunda nitrürlü tabaka derinliği 7 µm ölçülmüştür. Nitrürlü

tabakanın XRD sonuçlarında ise CrN oluşumu belirlenmiştir. Plazma nitürleme işleminin yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı görülmüştür. Maksimum yüzey pürüzlülüğüne 650°C ulaşılmıştır, bu sıcaklıktan sonra ortalama yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Aşınma testleri sonucunda nitür tabakası Inconel 718 malzemesinin sürtünme katsayısı değerinin 3.7 oranında azalmasını sağlamıştır [27].

Leroy ve diğ 2001 yaptıkları çalışmada nikel esaslı Inconel 690 malzemesine düşük sıcaklıklarda (300°C, 350°C, 400°C) plazma nitürleme uygulanmıştır. Gaz oranının nitürleme üzerinde etkili olduğunu ve nitürlenmiş malzemenin kesit görüntüsü ve XRD grafikleri sonuçları incelediklerinde üç farklı katı eriyik tabakanın (Y_{N1} Y_{N2} Y_{N3}) oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Y_{N1} 1.7 μ m kalınlığında ve azot içeriği %17-20, Y_{N2} 0.7-0.8 kalınlığında ve azot içeriği % 10-17, Y_{N3} difüzyon bölgesi ve azot içeriği %10 daha az olarak ölçülmüştür. Nitürlenmiş bölge de kayma çizgilerin meydana geldiği görülmüştür, nedeni ise nitürlü bölgedeki diskolasyonlar ve istiflenme hataları olarak açıklanmıştır [28].

Y.Sun 2002 yaptığı çalışmada nikel esaslı Inconel 600 malzemesine 400 – 600°C sıcaklıkları arasında 1 ile 40 saatlik değişen sürelerle plazma nitürleme işlemi gerçekleştirmiş ve nitürlenmiş tabakanın büyüme kinetiğine sürenin ve sıcaklığın etkisini incelemiştir. Nitürleme işlemine sıcaklığın etkisi incelendiğinde işlem süresi 5 ve 12 saat olan numunelerin 400 ve 600°C arasında nitürlenmiş tabaka kalınlıkları incelenmiştir. Nitürlenmiş tabaka kalınlığı 5 ve 12 saat işlem yapılan numunelerde 450°C sıcaklıkta maksimum değere ulaşırken, 450°C üzerindeki sıcaklıklarda nitürlenmiş tabaka kalınlığının azalarak sabit kaldığı gözlenmiştir. 450°C ve 600°C sıcaklıklarda nitürlenmiş tabakanın büyüme rejimine sürenin etkisi incelemiştir. Artan süreyle doğrusal olarak, iki farklı rejim (hızlı ve yavaş) belirlemiştir. Bu iki sıcaklıkta nitürlenmiş tabakada büyüme oranı hızlı ve doğrusal olarak ilerlemektedir, kritik süreye ulaştığında ise tabaka büyüme oranında gözle görülür bir yavaşlama meydana gelmiştir. Bu hızlı rejimin yavaş rejime dönüştüğü kritik süre nitürlenme sıcaklığının artmasıyla azalmaktadır. 450°C deki büyüme hızı rejimi 600°C’de yapılan nitürlenme işleminden daha hızlı olduğu belirlenmiş, ve 2 saatten fazla nitürlenme süresinde 450°C sıcaklıkta 600°C’ye göre daha kalın nitürlenmiş tabaka oluşmuştur. 600°C sıcaklıkta nitürlenmiş numunenin, XRD faz analiz sonuçlarında CrN ve CrN₂ fazlarına rastlanmıştır. GDS kimyasal kompozisyon

analizi sonucunda nitürlenmiş tabakanın üç bölgeden oluştuğu belirlenmiştir, bunlar sırasıyla düşük azot içerikli yüzeysel bölge, yüksek azotlu bölge ve nitrürlenmiş malzeme bölgesidir. Yüzeysel bölgenin sıcaklık arttıkça kalınlığının arttığı da saptanmıştır. Yapılan incelemede yüzeysel bölgenin sıcaklık ve süre arttıkça kalınlaştığı gözlenmiştir. XRD sonuçlarında ise yüzeyde bulunan bu bölge belirlenememiştir, GDS sonuçlarına göre nitrürlenmiş bölgeden farklı olduğu ve oksijen içeriğinin yüksek olduğu saptanmıştır [29].

Bu bilgiler doğrultusunda nitrürleme işleminin başlangıcında oluşan bu yüzeysel filmin ince olması nedeniyle azot atomları kolaylıkla malzeme içerisine difüzyon olmaktadır, fakat yeterli kalınlığa ulaştığında ise azot atomların difüzyonunu engelleyerek zorlaştırmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen nitrürleme işleminde bu yüzeysel film yeterli kalınlığa hızlı bir şekilde ulaşmaktadır. Sonuç olarak nitrürleme işleminde hızlı büyüme rejiminden yavaş büyüme rejimine dönüşümün önemli olduğu anlaşılmaktadır, bu dönüşümün süresi sıcaklık arttıkça azalmaktadır.

Singh ve Meletis 2006 yılında yaptıkları çalışmada Inconel 718 süperalaşımına yaklaşık olarak 450°C ve 490°C sıcaklıklarda plazma nitrürleme işlemi yapılmıştır. Nitrürlenmiş malzemenin yüzey pürüzlülüğünü artırdığı belirlenmiştir. 3 saat süre ile yapılan işlem sonrasında nitrasyon tabakası 4 µm ölçülmüştür. XRD incelemesine göre CrN ve m fazlarının olduğu saptanmıştır. m fazı daha önce östenik paslanmaz çeliklerde görülen S fazıyla benzer özelliklerde olduğu belirlenmiştir. Azot atomlarının arayer olarak yüzey kübik merkezli latis içerisinde çözünmesiyle latis genişlemesine, distorsiyona ve istiflenme hatalarına sebep olmaktadır. SEM mikroskobu ile kesit görüntüsünde kayma çizgileri olduğu görülmüştür. Bu kayma çizgileri dislokasyon ve istiflenme hataları nedeniyle oluşur, bu durum genel yüzey merkezli kübik alaşımların yapısal özelliklerindendir. 490°C sıcaklıktaki işlem sonrasında numunenin yüzey sertliği 4 kat artmıştır ve azotun penetrasyon derinliğini 25 µm ölçülmüştür. Yapılan aşınma ve korozyon testleri sonucunda plazma nitrürlenmiş malzemenin önemli ölçüde daha yüksek aşınma ve korozyon direnci olduğu görülmüştür [30].

Akşit 2008 yılında yaptığı çalışmada Inconel 718 malzemesine 550°C sıcaklıkta 1, 4, 9, ve 16 saat süreyle plazma nitrürleme işlemi uygulamıştır. Nitrürleme sonrasında artan nitrürleme süresine bağlı olarak numunenin yüzey morfolojisi ve yüzey

pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Yüzeyden alınan sertlik değerleri işlem süresine bağlı olarak artış göstermiştir, en yüksek mikro sertlik değeri 2700 (Hv) olarak ölçülmüştür. Plazma nitrülenmiş numunelerin kesit görüntüsü incelendiğinde ise yüzeyde 6-8 μm civarında CrN tabakası olduğu gözlenmiştir. CrN tabakasının varlığı XRD analizi ile kanıtlanmıştır. Inconel 718'in oksidasyon kinetiğini, 1000°C , 1075°C ve 1150°C sıcaklıklarda, 1, 6, 12, 24, 48, 72, 96, 120 ve 144 saat çevrimli oksidasyon yöntemi ile fırın atmosferinde oksitlenerek inceleme yapılmıştır. Inconel 718 süper alaşımının aktivasyon enerjileri karşılaştırıldığında nitrüleme işleminin Inconel 718 malzemesinin oksidasyon direncini ilk 12 saat yükselttiği görülmüş. 24. saatten sonra özellikle 1150°C sıcaklıkta kırılğan Cr_2O_3 fazın oluşumu, ve sonra ısıtılan bu faz CrO_2 ve CrO_3 fazlarına dönüşmesi nedeniyle kütle kazancı yerine kütle kaybı olduğu tespit edilmiştir. Nitrülenmiş numunenin oksidasyondan önce CrN sertliği 2700 HV iken 144 saat oksidasyon süresi sonunda bozunmuş yapıda 50 HV sertlik ölçülmüştür. Yüksek sıcaklık oksidasyon sonrasında yeni fazların (Cr_2O_3 , Al_2O_3 , NbO_2) olduğu XRD faz analizi ile belirlenmiş, ayrıca ısıt işlem nedeniyle tane boyutunda büyüme meydana geldiği gözlemlenmiştir. 1000°C'nin üzerindeki oksitleyici atmosferik ortamlar plazma nitrür tabakasının bozunmasına dolayısıyla bariyer görevini yitirmesine neden olduğu tespit edilmiştir [31].

Kahraman 2008 yılında yaptığı çalışmada nikel bazlı süperalaşım olan Wiroloy malzemesine 400, 450, 500 ve 550°C sıcaklıklarda 4, 6, 10, 15 ve 10 saat süreyle plazma nitrüleme işlemi yapılmıştır. İşlem sırasında %15 H_2 ve %85 N_2 gaz karışımı kullanılmıştır. Nitrülenmiş malzemelerin kesit görüntüsü incelendiğinde işlem sıcaklığına ve süresine bağlı olarak iki farklı nitrür tabakası oluştuğu görülmüştür. Maksimum nitrür tabaka kalınlığı 450°C'de 15 saat nitrülenen malzemede 4 μm ölçülmüştür. XRD faz analizine göre tüm numunelerde en üstteki tabakada CrN fazı γ_1 , üst tabakaya yakın olan γ_2 Cr_2N fazı belirlenmiştir. Yüksek işlem sıcaklıklarında ve uzun işlem sürelerinde γ_2 Cr_2N görülmemiştir. En yüksek sertlik değeri 400°C'de 100 saat nitrülenen numune de 1573 HV ölçülmüştür. Düşük sıcaklıklarda yapılan nitrüleme işlemlerinde elde edilen tabakaların sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [32].

Borowski ve diğ. 2009 yılında yaptıkları çalışmada Inconel 625 malzemesine 560°C'de ($\text{N}_2:\text{H}_2 = 4:1$) gaz karışımı ve 6 saat süre ile yük boşalımı tekniği ile nitrüleme işlemi uygulanmıştır. Inconel 625 malzemesini kesit görüntüsü

incelendiğinde nitr rl nmiş tabakanın kalınlığı 5  m civarında ve %16 azot içerdiği ölçülmüştür. Nitrürleme işleminden sonra malzemenin yüzey sertliği 1480 (HV_{0.05})  l  lm şt r. Malzeminin yüzey p r zliğ  de arttığı belirlenmiştir. XRD faz analizi sonuçlarında kübik yüzey merkezli ve orthorombik CrN fazları ve östenitik  _N fazı nitr rl nmiş tabakada tespit edilmiştir. Yapılan aşınma, yorulma ve korozyon deneyleri sonuçlarında Inconel 625 malzemesinin aşınma ve korozyon direncinin arttığı, yorulma dayanımı değeri ise 10⁵ çevrim için 680 MPa'dan 750 MPa yükseldiği belirlenmiştir [33].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada kullanılan malzeme yüksek sıcaklık uygulamalarında (uçak motoru, gaz türbinleri vs.) yaygın olarak kullanılan, kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de verilen nikel demir bazlı süper alaşım olan Inconel 718’dir. Akışkan yataklı fırın kullanılarak nitrürleme AMS 5662 ve AMS 5663 ısıt işlemleri uygulanmış Inconel 718 alaşımlarının yüzey özelliklerine etkileri incelenmiştir. AMS 5662 Inconel 718 solüsyona alma ısıt işlemi, AMS 5663 Inconel 718 ise solüsyona alma ve yaşlandırma ısıt işlemleri uygulanmıştır.

Çizelge 4.1 : Inconel 718 alaşımı % ağırlıkça kimyasal kompozisyonu.

Element	INCONEL 718 % ağı.
Ni	53.39
Cr	18.56
Fe	17.79
Mo	3.02
Nb+Ta	5.29
Ti	0.96
Nb	5.29
C	0.03
Co	0.12
Al	0.57

4.1 Numunelerin Hazırlanması

Numuneler çapı 10 mm olan AMS 5662 ve AMS 5663 Inconel 718 çubuğundan kesilmiştir. Fırın içerisinde numunelerin bir tel yardımıyla asılabilmesi için numunelere yaklaşık olarak 3 mm çapında delik açılmıştır. Numuneler kesildikten sonra yüzeyleri metalografik yöntemler uygulanarak zımparalanıp parlatılmıştır.

Daha sonra numuneler oksit kırıcı ve saf su çözeltisi içerisinde ultrasonik banyoda temizlenerek nitrürleme işlemine uygun hale getirilmiştir.

4.2 Nitrürleme İşlemi

Metalografik yöntemler ile hazırlanan ve temizlenen numunelere akışkan yataklı fırın ortamında 375, 400, 450 ve 500°C sıcaklıklarında 10 saat süre ile %60 NH₃ - %40 N₂ gaz karışımı ile nitrürleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Fırın işlem sıcaklığına ulaşana kadar sisteme sadece hava verilmiştir. İşlem sıcaklığına ulaştıktan sonra sisteme belirli bir süre azot gazı verilerek ortamdan hava uzaklaştırılmıştır. Bu işlem sırasında fırın içerisinde bulunan alümina (Al₂O₃) partikülleri ortamdaki gaz nedeniyle hareketlenmeye başlamıştır. Daha sonra numuneler fırın içerisine yerleştirilerek sisteme belirli orandaki amonyak ve azot gaz karışımı verilmiştir. İşlem sırasında fırın kapağının üst kısmından çıkan atık gazları ateşleyici sistem yardımıyla yakılarak atmosfere verilmiştir. Nitrürleme işlemi süresinin bitiminde fırın sistemindeki amonyak gazı kesilerek, azot gazı ortamında numuneler fırın içerisinden çıkarılarak havada soğutulmuştur.

4.3 Nitrürlenmiş Yüzeylerin Yapısal Karakterizasyonu

Nitrürleme işlemi yapılan numunelere öncelikle yüzeyinde oluşan ince oksit filmi kaldırmak için kısa süreli parlatma işlemi yapılmıştır. Daha sonra numuneler nitrürlenmiş yüzeye dik yöndeki kesit boyunca kesilerek bakalite alınmıştır. Fazla bakaliti yüzeyden almak için önce kaba zımparalama yapılmıştır. Daha sonra sırasıyla 400, 500, 800, 1000, 1200 ve 2400 gritlik zımpara kağıtları ile, her bir aşamada numune çevrilerek bir önceki zımparanın çizikleri giderilerek zımparalanmıştır. Son olarak 3 µm'luk elmas süspansiyon ile parlatılmıştır. Parlatılan numuneler, 20 ml HCl + 25 ml De ionize su + 1 ml HF + 4 ml H₂O₂'lik kimyasal dağlayıcı ile oda sıcaklığında 30 saniye bekletilerek dağlanmış. Kesit mikroyapıları Hitachi TM100 masaüstü taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

4.3.1 X-Ray difraksiyon (XRD) analizi

Nitrürlenmiş Inconel 718 numunelerin yüzeyinde oluşan fazların analizi için, 2° geliş açısına sahip Cu Kα ışınları altında ($\lambda=0,154$ nm), 30-80° tarama aralığında Philips PW 3710 X-ışınları difraktometresi (XRD) ile belirlenmiştir.

4.3.2 Sertlik ölçümü

Nitrürlenmiş numunelerin yüzey sertlikleri 250 mN yük altında, elmas piramit batıcı uç kullanılarak CSM derinlik duyarlıklı mikro sertlik cihazında ölçülmüştür. Ayrıca yüzey sertlikleri 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 10000 mN değişen yükler altında Shimadzu HVM-2 mikro sertlik cihazında ölçülmüştür.

4.4 Nitrürlenmiş Yüzeylere Sıcaklığın ve Tutma Süresinin Etkisi

AMS 5662 ve 5663 Inconel 718 süper alaşımının nitrürlenmiş ve nitrülenmemiş numuneler 600 ve 700°C sıcaklıklarda sırayla 3, 6, 12, 18, 24, 48, 72, 96 saat süreyle ve 800°C sıcaklıkta sırayla 10, 20, 30, 60 ve 120 dakika süreyle fırın içerisinde tutularak sıcaklığın ve sürenin etkisi incelenmiştir.

4.5 Yüksek Sıcaklık Aşınma Analizi

AMS 5662 ve 5663 Inconel 718 süper alaşımının nitrürlenmiş ve nitrülenmemiş numunelerin yüksek sıcaklık aşınma davranışı, 600°C sıcaklıkta CSM High Temperature Tribometer marka cihaz kullanılarak incelenmiştir. Analiz için gerekli olan parametreler; aşındırıcı alümina bilyanın dairesel olarak, 200m mesafe 2cm/s lineer hızla katedecek şekilde seçilmiştir. 5,5 mm yarıçapında dairesel aşınma izi 2N yük etkisi altında oluşmuştur.

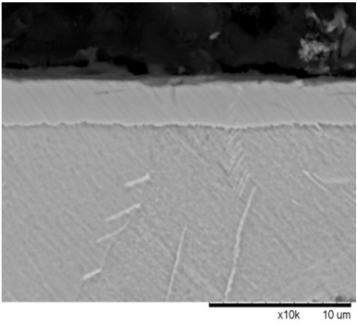
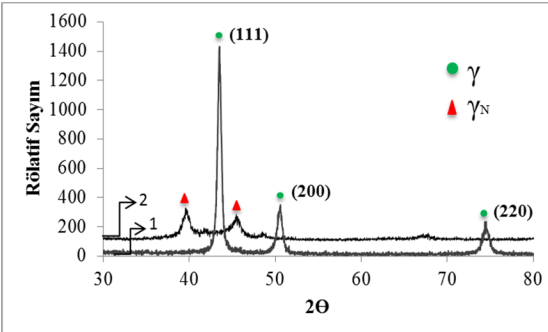
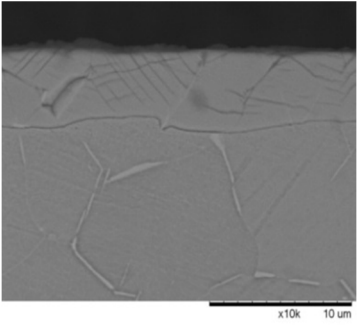
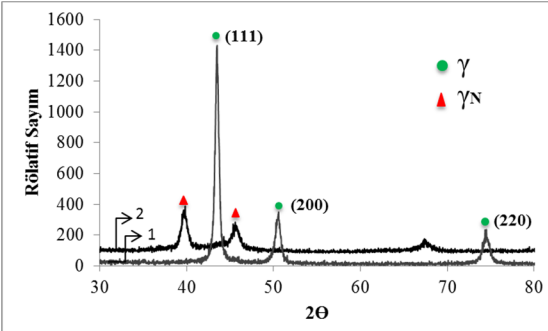
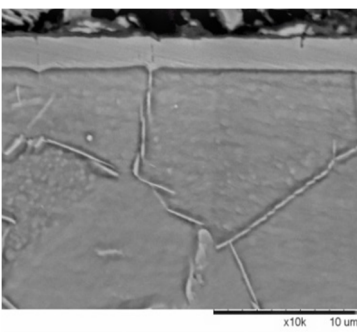
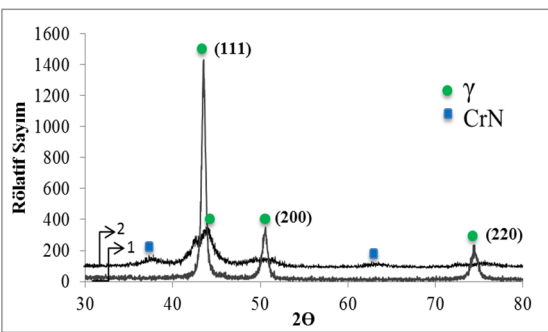
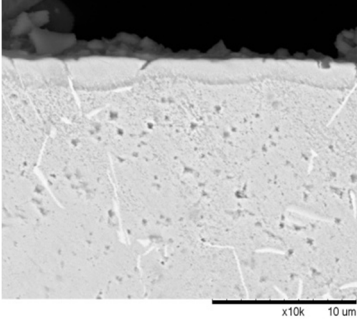
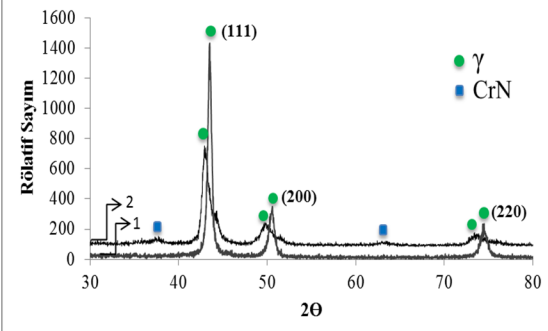
Aşınma izlerinin topografik profilleri Veeco Dektak 6M profilometresi yardımı ile çıkarılmıştır. Dairesel şekilli aşınma izi her numune için 90 açılarda 4 farklı bölgeden ölçüm alınmıştır. Her bir aşınma izi için aşınma hacim kaybı hesaplanılmıştır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

5.1 Nitrürlenmiş Yüzeylerin Yapısal Karakterizasyonu

AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımının nitrürleme işlemi sonrası SEM ile kesit incelemesiyle elde edilen kesit mikroyapı görüntüleri ile AMS 5662 ve nitrülenmiş AMS 5662 numunelerin XRD paternleri Şekil 5.1’de verilmiştir. SEM ile incelenen kesit mikroyapılarında nitrülenmiş tabaka kalınlıkları söz konusu sıcaklıklar için farklı kalınlıklarda oldukları tespit edilmiştir. 375 ve 400°C sıcaklıklarda nitrülenmiş AMS 5662 numunelerinin X-ışınları paternlerinde, γ piklerinin AMS 5662 numunesinin piklerine göre sola kaydığı ve genişlediği tespit edilmiştir. Bu sonuç, nitrülenmiş numunelerin yüzey bölgesinde genişlemiş γ_N fazı katı eriyik tabakasının oluştuğunu göstermektedir. Azot atomlarının arayer olarak yüzey kübik merkezli latis içerisinde çözünmesiyle latis genişlemesine, distorsiyona ve istiflenme hatalarına sebep olmaktadır. Singh ve Meletis yaptıkları çalışmaya göre Inconel 718 alaşımının 450°C ve 490°C sıcaklıklarda plazma nitrürleme işlemi sonrası X ışınları paternlerinde paslanmaz çeliklerde görülen S fazına benzer özellik gösteren azot atomu içeren yüzey merkezli kübik m fazının yüzeyde oluştuğu tespit etmişlerdir. SEM ile kesit görüntüsü incelendiğinde nitrülenmiş tabakada kayma çizgileri olduğu görülmüştür [30]. Leroy ve diğ göre; nikel esaslı Inconel 690 malzemesine düşük sıcaklıklarda (300°C, 350°C, 400°C) plazma nitrürlemesi sonucunda X ışınları paternlerinde üç farklı azot içerikli katı eriyik tabaka oluştuğunu ve nitrülenmiş tabakada kayma çizgilerinin olduğunu tespit etmişlerdir [28].

450 ve 500°C sıcaklıklarda nitrürlenmiş numuneleri X ışınları paternlerinde herhangi bir kayma ve genişleme tespit edilememiştir. Bu sıcaklıklarda nitrürlenmiş numunelerin kesit görüntüleri incelendiğinde ince bir tabaka oluştuğu gözlenmiştir. X ışınları paternlerinde ise yüzeyde oluşan bu ince tabakanın CrN fazından oluştuğu tespit edilmiştir.

İşlem Sıcaklığı	SEM	X-Işınları Paterni
375°C		
400°C		
450°C		
500°C		

Şekil 5.1 : Nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718 SEM kesit mikroyapıları ve XRD paternleri; (1) AMS 5662 XRD paterni, (2) Nitrülenmiş AMS 5662 XRD paterni

Y.Sun göre; nikel esaslı Inconel 600 malzemesine 450°C ve üzeri sıcaklıklarda plazma nitrüleme işlemi sonrasında yüzeyde ince bir filmin ve CrN ve CrN₂

fazlarının olduğunu tespit etmiştir. Yaptığı incelemeler doğrultusunda nitrürleme işleminin başlangıcında oluşan bu yüzeysel filmin ince olması nedeniyle azot atomları kolaylıkla malzeme içerisine difüzyon olmaktadır, fakat yüzeysel film yeterli kalınlığa ulaştığında ise azot atomlarının malzeme içerisine difüzyonunu engellemektedir. Rapor edilen bu çalışmaya benzer şekilde Inconel 718 süper alaşımının 450°C ve 500°C sıcaklıklarda nitrürleme sonrasında yüzeysel ince bir filmin oluştuğu SEM kesit görüntülerinde açıkça görülmektedir [29].

SEM ile incelenen kesit mikroyapılarında nitrürlenmiş tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. En kalın nitrürlenmiş tabaka 400°C sıcaklığında nitrürleme işlemi uygulanan malzemede ölçülmüştür. Çizelge 5.1’de Nitrürleme sıcaklığına bağlı olarak nitrürlenmiş AMS 5662 numunelerin tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Farklı sıcaklıklarda nitrürlenmiş AMS 5662 numunelerin tabaka kalınlıkları

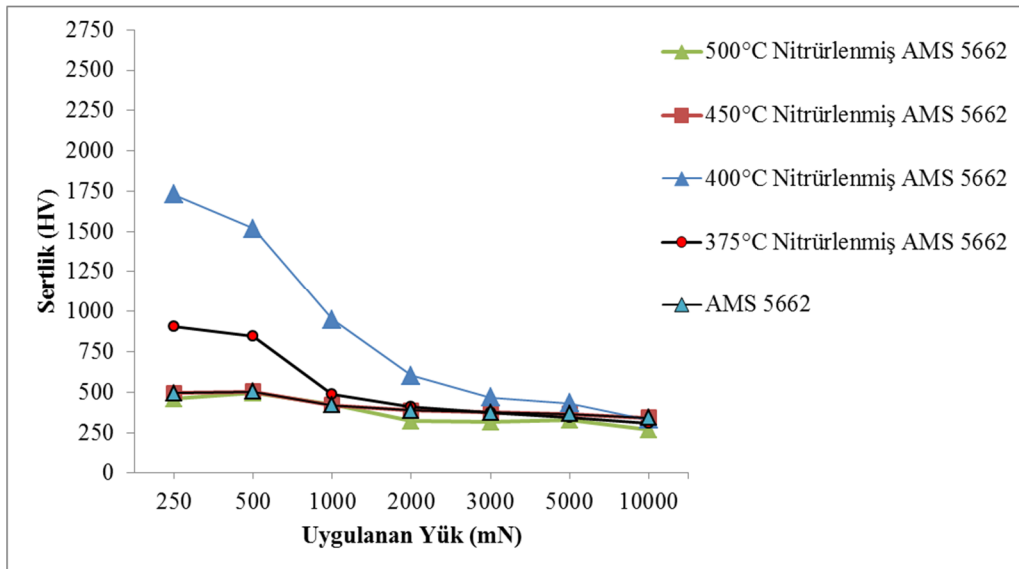
İşlem Sıcaklığı	Nitrürlenmiş Tabaka kalınlığı
375°C	2-3 µm
400°C	5-6 µm
450°C	1-2 µm
500°C	1-2 µm

250mN ve 10000 mN yükleri arasında, AMS 5662 ve nitrürlenmiş AMS 5662 Inconel 718 numunelerinin yüzey mikrosertliklik değerleri ölçülmüştür. Farklı yükler altında ölçülen ortalama yüzey mikrosertlik değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Yüzey bölgesinde katı eriyik nitrürlenmiş tabaka oluşan, 400°C’de nitrürlenmiş numunenin sertlik (ortalama 1731 HV) en yüksek değer elde edilmiştir. 375°C nitrürlenmiş numune de işlem sonrası sertlik değeri artmıştır. 450 ve 500 °C nitrürleme sıcaklıklarında elde edilen sertlik değerlerinde herhangi bir değişim olmadığı görülmüştür. Sertlik değerlerinin değişmemesinin nedeni bu sıcaklıklarda yüzeyde ince bir filmin oluşması ve azot atomunun malzeme içerisine difüze olmasını engellemesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum Y.Sun [29] yaptığı çalışmada rapor edilmiştir.

Çizelge 5.2 : Farklı yükler altında ölçülen ortalama yüzey mikrosertlik değerleri

DENEY YÜKÜ	NİTRÜRLEME SICAKLIĞI				AMS 5662 INCONEL 718
	375°C	400°C	450°C	500°C	
250 mN	906.8	1731	495.5	459.5	495.75
500 mN	846.6	1516.75	505	494	504.5
1000 mN	486.4	948	418.75	423.75	418.75
2000 mN	408.6	601	387.75	320.25	387.5
3000 mN	373.8	469	375.5	313.75	375.5
5000 mN	343.2	431	367	326.25	367
10000 mN	309.4	329.5	341.5	267.25	341.5

375 ve 400°C sıcaklıkta nitrürlenmiş AMS 5662 numunelerini 250-5000 mN yükleri arasında ortalama yüzey sertlik değerleri AMS 5662 numuneye göre daha yüksek olduğu ölçülmüştür. Artan yükler altında nitrürlenmiş tabaka yüzey mikrosertliğini 5000 mN'a etkisini sürdürmektedir, ancak 10000 mN yükte nitrürlenmiş AMS 5662 numunenin ortalama yüzey mikrosertlik değeri ile AMS 5662 numunenin sertlik değeri yakın değerlerde ölçülmüştür. Bu yük altında batıcı ucun bıraktığı iz nitrürlenmiş tabakanın derinliğini aşarak altlığa ulaşmıştır. Şekil 5.2'de AMS 5662 ve farklı sıcaklıklarda nitrürlenmiş AMS 5662 numunelerin artan yük altında sertlik değişimi verilmiştir.



Şekil 5.2 : AMS 5662 ile farklı sıcaklıklarda nitrürlenmiş AMS 5662 numunelerin artan yük altında yüzey mikrosertlik değerleri.

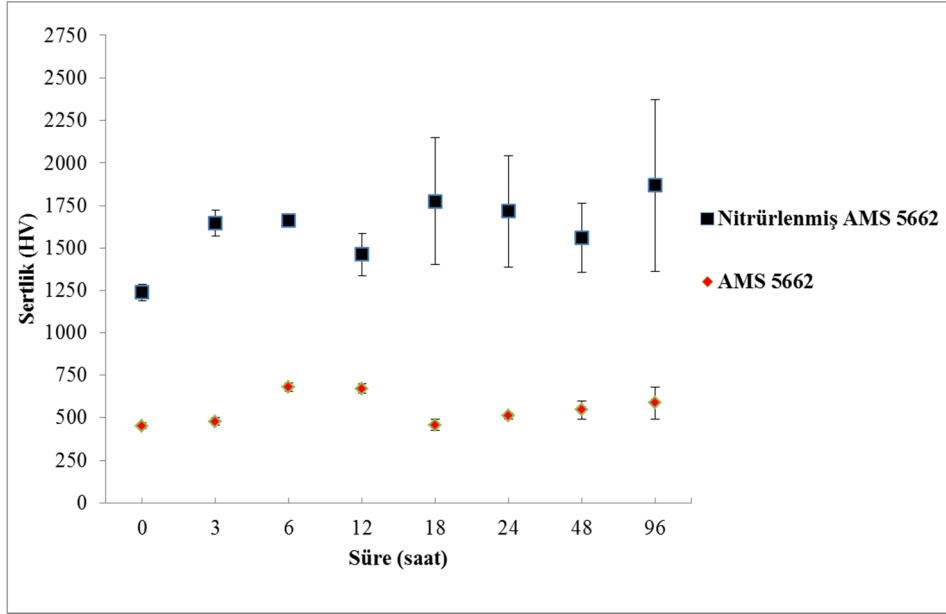
5.2 Nitrürlenmiş Yüzeylere Yüksek Sıcaklığın ve Tutma Süresinin Etkisi

Nitrürlenmiş numunelere yüksek sıcaklığın ve tutma süresinin etkisini incelemek için, nitrüleme sonucu en yüksek sertliğe ve en kalın nitrürlenmiş tabakaya sahip olan 400 C’de nitrürlenmiş AMS 5662 ve 5663 ile nitr rlenmemiş AMS 5662 ve 5663 Inconel 718 numuneleri 600 ve 700 C sıcaklıklarda sırasıyla 3, 6, 12, 18, 24, 48, 72, 96 saat süreyle, 800 C sıcaklıkta sırasıyla 10, 20, 30, 60 ve 120 dakika süreyle fırın içerisinde tutulmuştur. Belirli zaman aralıklarıda tutulan numuneler fırın içerisinden çıkarılarak havada soğutulmuş ve yüzeylerinden yüzey mikrosertlik ölümleri yapılmıştır.

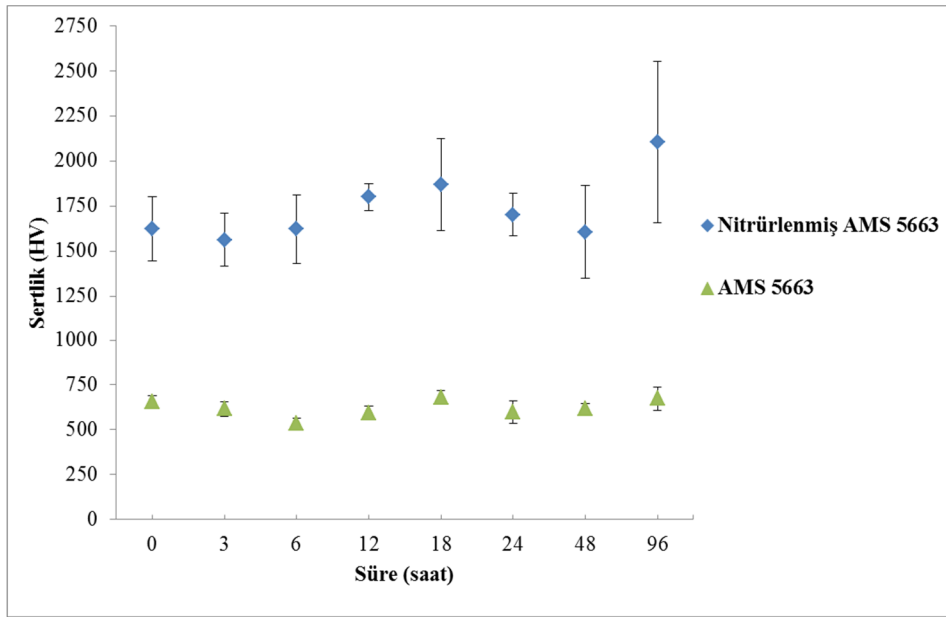
600 C sıcaklıkta AMS 5662 ve 5663 numuneler ile 400 C’de nitrürlenmiş AMS 5662 ve 5663 numuneler sırasıyla 3, 6, 12, 18, 24, 48, 72, 96 saat süreyle fırın içerisinde bekletildikten sonra havada soğutulmuştur. 600 C’de 3-96 saat sürelerde fırın içerisinde tutulan AMS 5662 ve 5663 ile nitrürlenmiş AMS 5662 ve 5663 numunelerin 250 mN yük altında  l len ortalama yüzey mikrosertlik değerleri ve tutma süresine bağlı değişimi şekil 5.3’de verilmiştir.

600 C sıcaklıkta fırın içerisinde bekletilen nitrürlenmiş AMS 5662 Inconel 718 numunesinin yüzey sertliğinin süreye bağlı olarak bir miktar artış gösterdiği ve değişmediği görülmektedir, AMS 5662 numunenin yüzey sertliğinde ise önemli bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir. 400 C nitrüleme işlemi ile AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımının yüzeyindeki nitrürlenmiş tabaka ile yüzey sertlik değeri 3-4 katı kadar artmıştı, yüzeyde bulunan bu nitrürlenmiş tabaka 600 C gibi yüksek sıcaklıkta uzun sürelerde tutulmasından sonra tabakanın yüzeyde kararlılığını koruyarak  zellikliğini kaybetmediği g r lm ştur.

600 C sıcaklıkta fırında bekletilen bir diğer grup ise yaşlandırılmış durumdaki AMS 5663 Inconel 718 numuneleridir. Bu gruba aynı şekilde 400 C sıcaklıkta nitrüleme işlemi yapılmıştır. Bu sıcaklıkta AMS 5663 ve nitrürlenmiş AMS 5663 Inconel 718 numuneleri 3-96 saat sürelerde fırın içerisinde bekletirek, havada soğutulmuştur. Bu numunelerin 250 mN yük altında  l len yüzey mikrosertliği ve tutma süresine bağlı değişimi şekil 5.3’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.3 : 600°C sıcaklık ve sürenin sertliğe etkisi; (a) AMS 5662 ve nitrürlenmiş AMS 5662 Inconel 718, (b) AMS 5663 ve nitrürlenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımları.

600°C sıcaklıkta fırında bekletilen AMS 5663 ile nitrürlenmiş AMS 5663 Inconel 718 numunelerin sertliğinin süreye bağlı olarak bir miktar artış gösterdiği ve 96 saat sonunda numunelerin yüzey sertliğinde ise önemli bir değişimin olmadığı tespit edilmiştir. Yüzey mikrosertlik değerlerini kıyasladığımızda ise nitrürlenmiş AMS 5663 Inconel 718 numunesinde, nitrürlenmiş AMS 5662 Inconel 718 numunesine

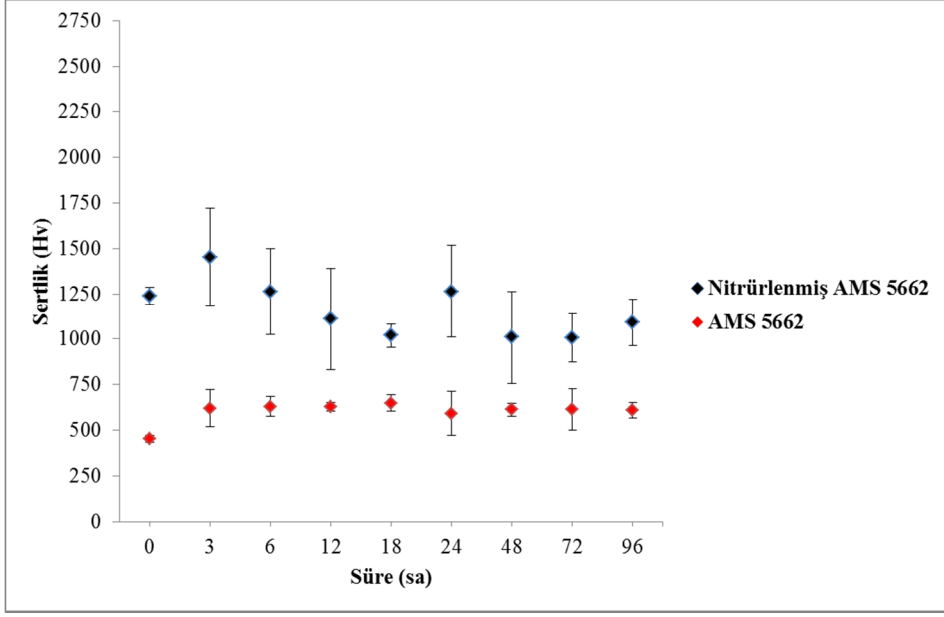
benzer sonuçlar elde edilmiştir. Aynı şekilde yüzeydeki nitrürlenmiş tabaka AMS 5663 numunelerinin 600°C yüksek sıcaklıkta uzun sürelerde fırın içerisinde tutulmasından sonra yüzey sertliğini koruyarak kararlılığına devam ettiği tekrar tespit edilmiştir.

Deney parametrelerinden yüksek sıcaklık etkisini anlayabilmek için sıcaklık değiştirilerek, nitrürlenmiş tabakaya ve malzemenin sertliğine etkisini tespit edilebilmek için numuneler fırın içerisinde aynı sürelerde tekrar bekletilmiş, havada soğutulmuştur.

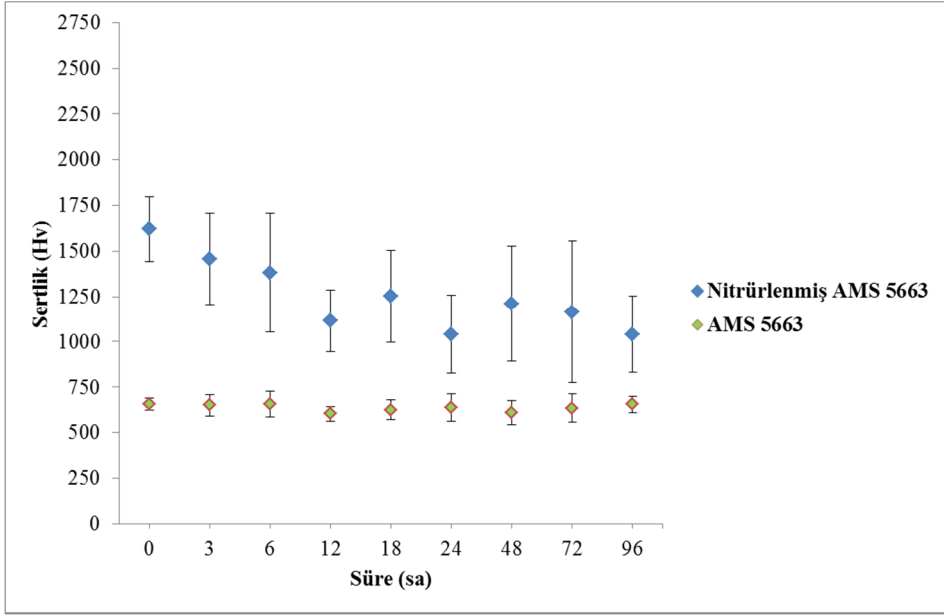
700°C sıcaklıkta AMS 5662 ve 5663 numuneler ile 400°C’de nitrürlenmiş AMS 5662 ve 5663 numuneler sırasıyla 3, 6, 12, 18, 24, 48, 72, 96 saat süreyle fırın içerisinde bekletildikten sonra numunelerin 250 mN yük altında yüzey mikrosertlik değerleri ölçülmüştür.

700°C’de 3-96 saat sürelerde fırın içerisinde tutulan AMS 5662 ve 5663 numuneler ile 400°C’de nitrürlenmiş AMS 5662 ve 5663 numunelerin ortalama yüzey mikrosertlik değerleri ve bekletilme süresine bağlı değişimi Şekil 5.4’de verilmiştir.

700°C sıcaklıkta bekletilen nitrürlenmiş AMS 5662 numunesinin yüzey sertliğinin süreye bağlı olarak bir miktar düşüş gösterdiği görülmektedir, AMS 5662 numunesinin yüzey sertliğinde ise önemli bir değişimin olmadığı görülmektedir. 700°C’de 96 saat süreyle fırın içerisinde tutulan nitrürlenmiş tabaka sertliğini bir miktar düşmesine rağmen, AMS 5662 numunesine göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. 700°C gibi yüksek sıcaklıkta fırın içerisinde uzun sürelerde bekletilen AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımının yüzeyinde bulunan nitrürlenmiş bölgenin yüzey sertliğinde bir miktar azalma oluşmaktadır fakat nitrürlenmiş sert tabaka hala özelliğini koruyabilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.4 : 700°C sıcaklık ve sürenin sertliğe etkisi; (a) AMS 5662 ve nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718, (b) AMS 5663 ve nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımları.

700°C sıcaklıkta diğer grup olan yaşlandırılmış AMS 5663 ile 400°C sıcaklıkta nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 numuneleri aynı şekilde bu sıcaklıkta 3-96 saat süreyle fırın içerisinde bekletilmiştir. 700°C’de 3-96 saat sürelerde fırında tutulan AMS 5663 ve nitrülenmiş AMS 5663 numunelerin oda sıcaklığında 250 mN yük

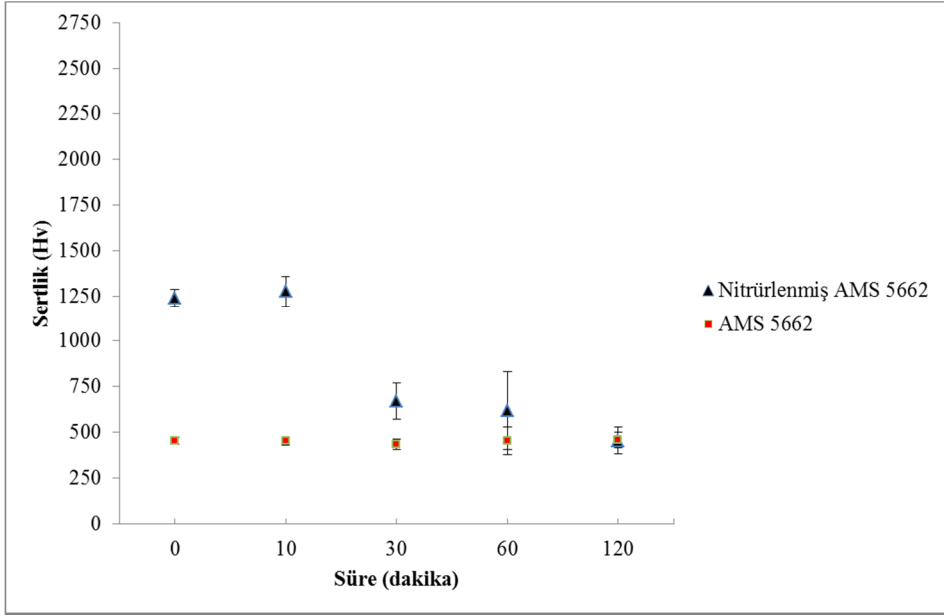
altında ölçülen ortalama yüzey mikrosertlik değerleri ve tutma süresine bağlı değişimi Şekil 5.4’de verilmiştir.

700°C sıcaklıkta fırın içerisinde bekletilen bu grupta nitrülenmiş AMS 5663 numunenin sertliğinin tutma süresine bağlı olarak bir miktar düşüş gösterdiği fakat sertliğini koruyabildiğini, AMS 5663 numunesinin sertliğinde ise önemli bir değişimin olmadığı görülmektedir. 96 saat süreyle tutma sonunda nitrülenmiş tabaka en düşük sertliğe ulaşmaktadır, fakat AMS 5663 numunesinin sertliğine göre sertlik değeri nitrülenmiş numunede daha yüksektir. Nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 malzemesinin yüzeyinde bulunan nitrülenmiş tabaka 700°C yüksek sıcaklıkta uzun sürelerde fırın içerisinde tutulmasına rağmen sertliğini korumakta ve sert tabaka özelliğine devam etmektedir.

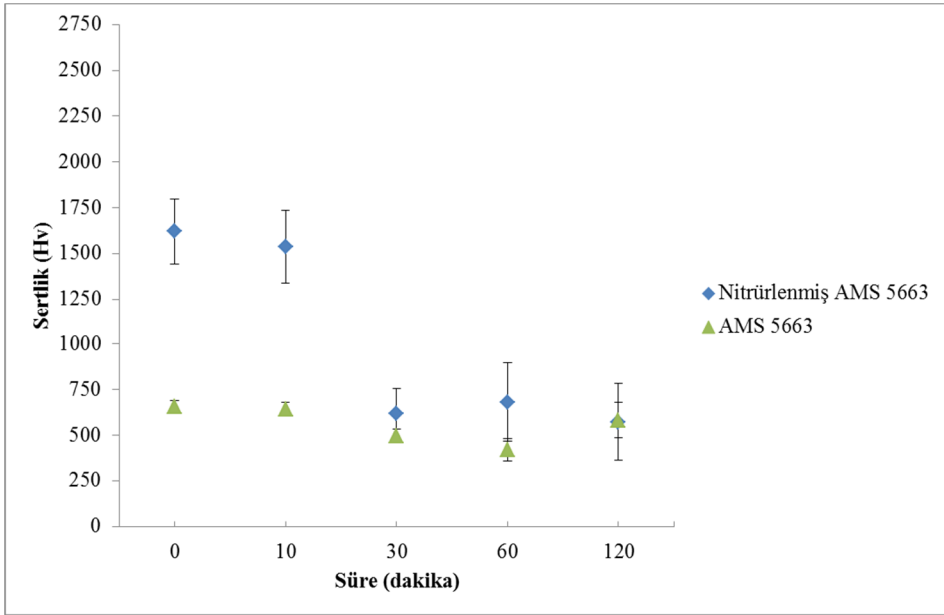
Bu yüksek sıcaklıklara kadar malzeme yüzeyindeki nitrülenmiş tabakanın özelliğini koruyabildiği anlaşıldıktan sonra deney sıcaklığını 800°C çıkartılarak, AMS 5662 ve 5663 ile 400°C sıcaklıkta nitrülenmiş AMS 5662 ve 5663 numuneleri fırın içerisinde tutulmuştur. Daha önceki çalışmalardaki tecrübelerle dayanarak; 800°C sıcaklığın Inconel 718 süper alaşımının mekanik özelliklerine etkisinin çok kısa zamanlar içerisinde gerçekleştiğinin bilinmesi üzerine fırın içerisinde tutma süreleri azaltılmıştır.

800°C sıcaklıkta AMS 5662 ve 5663 ile 400°C sıcaklıkta nitrülenmiş AMS 5662 ve 5663 numuneleri sırasıyla 10, 20, 30, 60 ve 120 dakika süreyle fırın içerisinde tutulduktan sonra havada soğutulmuş ve numunelerin yüzey mikrosertlik değerleri ölçülmüştür.

800°C’de 10-120 dakika sürelerde tutulan AMS 5662 ve 5663 ile 400°C sıcaklıkta nitrülenmiş AMS 5662 ve 5663 numunelerin oda sıcaklığında 250 mN yük altında ölçülen ortalama yüzey mikrosertlik değerleri ve tutma süresine bağlı değişimi Şekil 5.5’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.5 : 800°C sıcaklık ve sürenin sertliğine etkisi; (a) AMS 5662 ve nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718, (b) AMS 5663 ve nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımları.

800°C sıcaklıkta bekletilen 10. dakikadan sonra nitrülenmiş AMS 5662 numunesinin sertliğinin süreye bağlı olarak düşüş gösterdiği görülmektedir ve 120 dakika sonrasında ise sertlik değerinin AMS 5662 numunesi ile aynı değere ulaştığı görülmektedir. 800°C sıcaklıkta Inconel 718 malzemesinin yüzeyindeki nitrülenmiş tabaka sertlik değerini ilk 10 dakika koruyabilmektedir. 10 dakika sonrası ve üzeri

sürelerde ise sertlik değeri azalmaktadır, nitrülenmiş sert tabaka özelliğini kaybetmektedir. AMS 5662 numunesinin sertlik değeri artan tutma süresine bağlı olarak önemli bir değişim göstermemektedir.

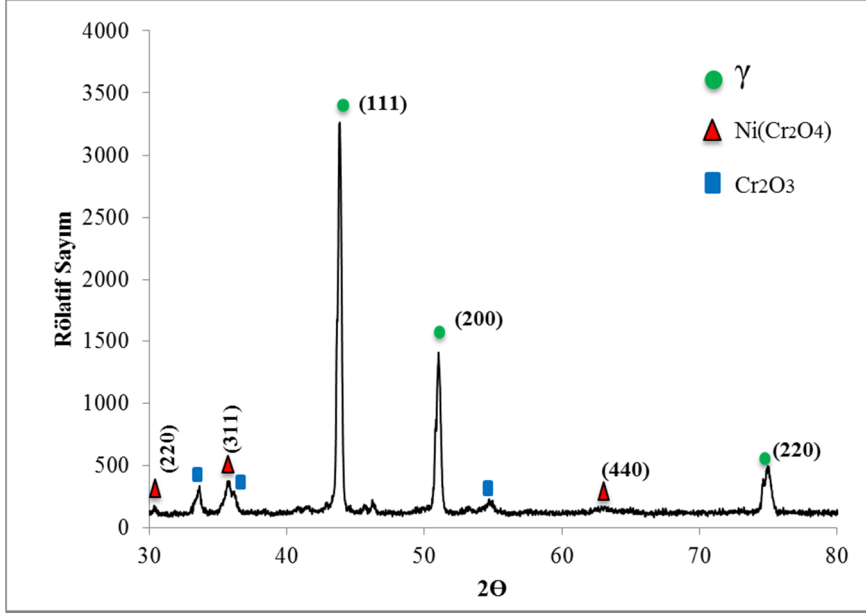
800°C sıcaklıkta diğer grup olan yaşlandırılmış AMS 5663 ile 400°C sıcaklıkta nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 numuneleri fırında 10-120 dakika süreyle bekletilmiştir ve havada soğutulmuştur. 800°C’de 10-120 dakika sürelerde fırında tutulan AMS 5663 numune ile nitrülenmiş AMS 5663 ortalama yüzey mikrosertlik değerleri ve tutma süresine bağlı değişimi Şekil 5.5’de verilmiştir.

Bu sıcaklıkta bekletilen nitrülenmiş AMS 5663 numunesi benzer şekilde 10. dakikadan sonra sertliğinin tutma süresine bağlı olarak düşüş gösterdiği görülmektedir ve 120 dakika sonrasında ise sertlik değerinin AMS 5663 numunesi ile aynı değere ulaştığı görülmektedir. Nitrülenmiş AMS 5663 numunesinin yüzeyinde oluşan sert nitrülenmiş tabaka 10. dakikaya kadar özelliğini koruyabilmektedir, daha uzun sürelerde fırın içerisinde bekletildiğinde ise bu özelliği kaybolmaktadır. AMS 5663 numunesi 10-120 dakikalık fırında tutma süreleri sonunda sertlik değerlerinde önemli bir değişim olmadığı tespit edilmiştir.

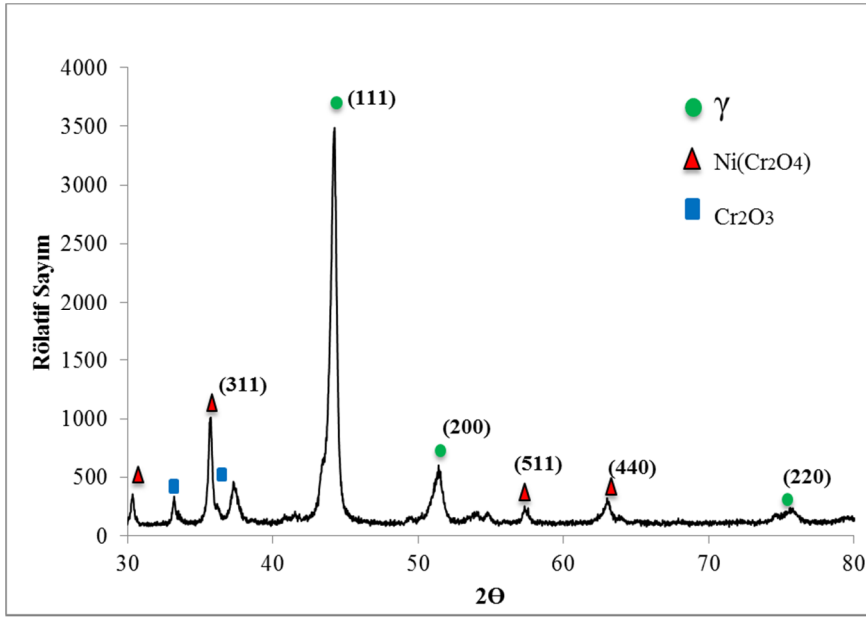
Nitrülenmiş numunelerin 800°C sıcaklıkta tutulması sonrası yüzey mikrosertlik değerinin değişmesinin nedenini daha iyi anlayabilmek için XRD analizi yapılmıştır. 800°C sıcaklıkta 96 saat süreyle fırın içerisinde tutulan nitrülenmiş AMS 5662 ve 5663 Inconel 718 süper alaşımlarının XRD paternleri Şekil 5.6’da verilmiştir. AMS 5662 ve 5663 numunelerinin X-ışınları paternlerinde $\text{Ni}(\text{Cr}_2\text{O}_4)$ ve Cr_2O_3 fazlarının olduğu belirlenmiştir.

Yüksek sıcaklık oksidasyon sırasında Ni-%20Cr alaşımları yüksek miktarda krom elementi nedeniyle malzeme yüzeyinde Cr_2O_3 koruyucu tabaka meydana gelmektedir. Bu tabaka malzemeyi oksidasyon ve metal kaybına karşı korumaktadır. Ayrıca oksidasyon sırasında daha karmaşık oksitler $\text{Ni}(\text{Cr}_2\text{O}_4)$ oluşmaktadır [34].

600 ve 700°C sıcaklıklarda 96 saat süreyle tutulmuş numunelerin makro yüzeyleri incelendiğinde ise AMS 5662 ve AMS 5663 numunelerin yüzeylerinde oksit tabakaları ve renk değişimi meydana gelmiştir. Nitrülenmiş AMS 5662 ve AMS 5663 numunelerinin yüzeylerinde ise homojen ve koyu renkte bir değişim olduğu görülmüştür.



(a)



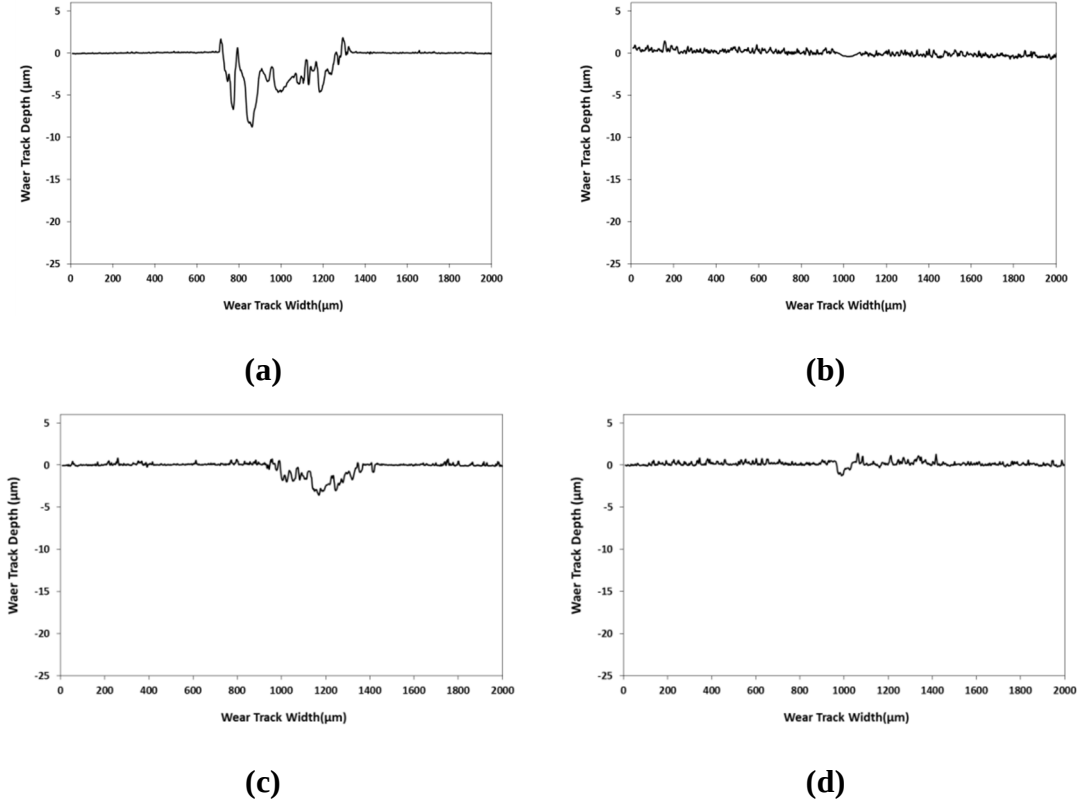
(b)

Şekil 5.6 : 800°C sıcaklık 96 saat süreyle fırında tutulan (a) nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718, (b) nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımlarının XRD paternleri.

400°C’de nitürleme sonrası AMS 5662 ve 5663 Inconel 718 süper alaşımlarının yüzeyinde oluşan nitrülenmiş sert katı eriyik tabaka 700°C sıcaklığına kadar uzun sürelerde koruyabildiği tespit edilmiştir. Nitrülenmiş numuneler 800°C sıcaklıkta ise 10. dakikadan sonra yüzeydeki nitrülenmiş sert tabakanın özelliğini kaybettiği tespit edilmiştir.

5.3 Yüksek Sıcaklık Aşınma Analizi

AMS 5662 ve 5663 ile 400°C’de nitrürlenmiş AMS 5662 ve 5663 numunelerin yüksek sıcaklık aşınma davranışı 600°C sıcaklıkta yapılan test ile incelenmiştir. Aşınma deneyleri öncesinde numuneler 600°C sıcaklıkta 96 saat süreyle fırın içerisinde tutulmuştur. 600°C sıcaklık aşınma sonrası numunelerin yüzey profilleri Şekil 5.7’de verilmiştir.



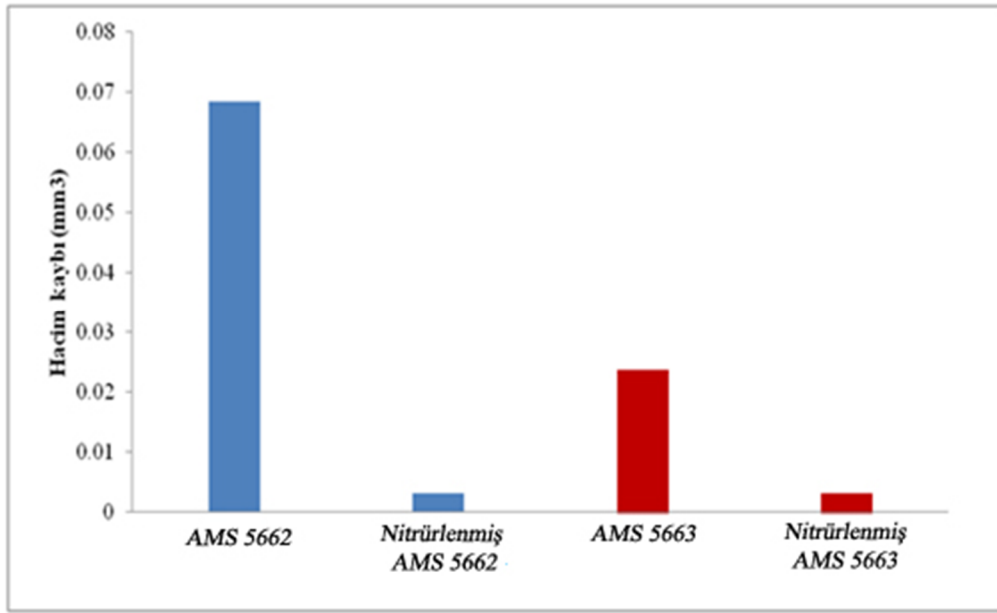
Şekil 5.7 : 600°C sıcaklık aşınma sonrası yüzey profil izleri; (a) AMS 5662, (b) 400°C’de nitrürlenmiş AMS 5662, (c) AMS 5663, (d) 400°C’de nitrürlenmiş AMS 5663.

Yüksek sıcaklık aşınma izi profillerinden aşınma izinin ortalama genişliği ve derinliği ölçülmüştür. Çizelge 5.3’de aşınma izi ortalama genişlik ve derinlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Aşınma izi ortalama genişlik ve derinlik değerleri.

	AMS 5662	Nitrürlenmiş AMS 5662	AMS 5663	Nitrürlenmiş AMS 5663
Genişlik (µm)	553	125	454	105
Derinlik (µm)	4,56	0,90	1,92	1,1

600°C sıcaklıkta gerçekleştirilen aşınma analizi sonrası AMS 5662 ve 5663 ile nitrürlenmiş AMS 5662 ve 5663 numunelerin aşınma hacim kaybı değerleri Şekil 5.8’de verilmiştir.



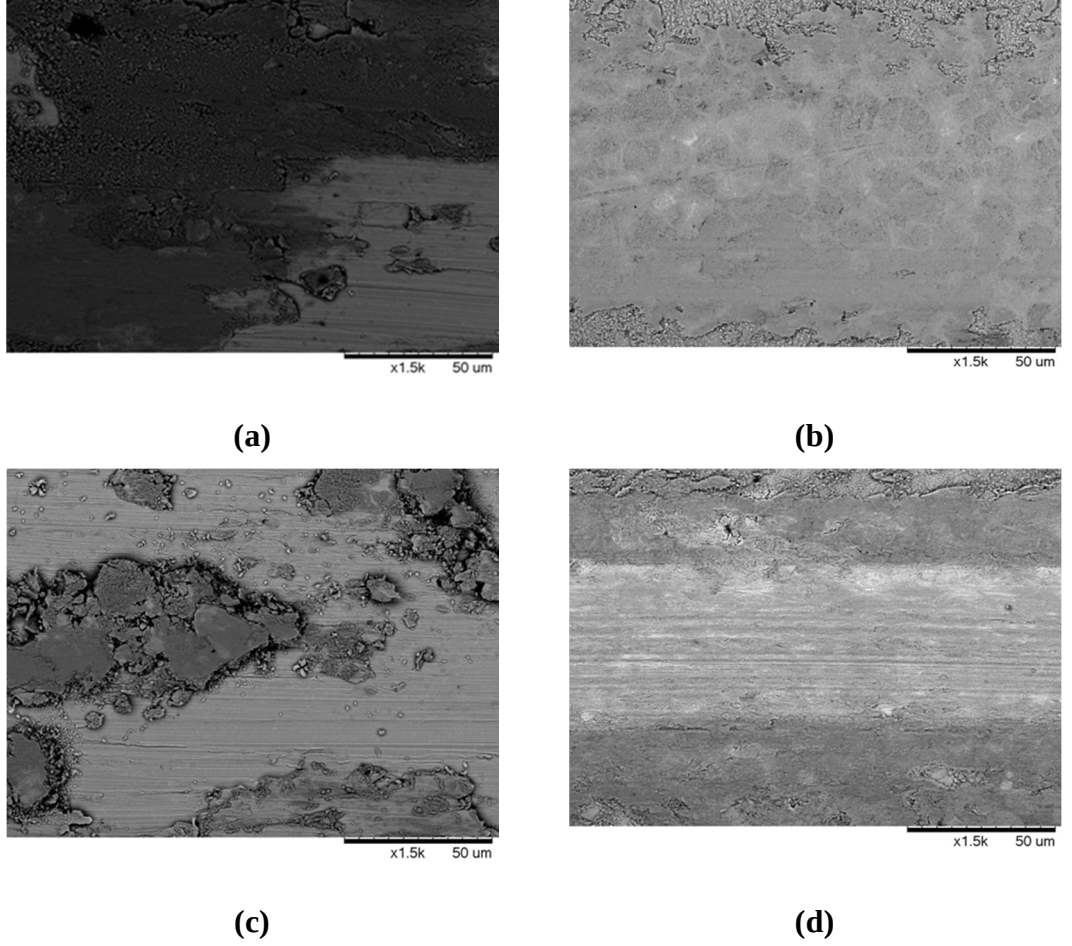
Şekil 5.8 : 600°C sıcaklıkta aşınma sonrası AMS 5662 ve 5663 ile nitrürlenmiş AMS 5662 ve 5663 numunelerin aşınma hacim kaybı değerleri.

Analizler sonrası AMS 5662 ve AMS 5663 Inconel 718 numunelerde aşınma hacim kaybı nitrürlenmiş numunelere göre daha çok olduğu görülmüştür.

Aşınma davranışı daha detaylı incelemek için ve aşınma mekanizmasını saptayabilmek amacıyla aşınma izlerine SEM ve optik mikroskop görüntü analizleri yapılmıştır. Şekil 5.9’da AMS 5662, AMS 5663, AMS 5662 400°C’de nitrürlenmiş ve AMS 5663 400°C’de nitrürlenmiş numunelerin yüksek sıcaklık aşınma izi SEM görüntüleri verilmiştir.

Aşınma izlerinin SEM fotoğrafları incelenmesiyle, AMS 5662 ve AMS 5663 numunelerin aşınma yüzeylerinde oksit odacıklarının mevcut olduğu görülmüştür. Bu durum aşınma mekanizmasının oksidatif aşınma olduğunu belirtmektedir. Nitrürlenmiş AMS 5662 ve AMS 5663 numunelerinin yüzeylerindeki aşınma izi

görünümleri karşı yüzeyin parlatma etkisinde (polishing effect) bulunduğunu göstermektedir. AMS 5662 ve 5663 numunelerinin 400°C sıcaklıkta nitrürleme sonrası yüzeyinde oluşan sert katı eriyik tabaka nedeniyle malzemelerin aşınma dirençlerinde artış meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 5.9 : 600°C sıcaklık aşınma sonrası aşınma izi SEM görüntüleri, (a) AMS 5662, (b) nitrürlenmiş AMS 5662, (c) AMS 5663, (d) nitürlenmiş AMS 5663.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, akışkan yatak tipi fırında uygulanan düşük sıcaklıklarda AMS 5662 ve AMS 5663 ısıtıl işlemlerine tabi tutulmuş Inconel 718 süper alaşımlarının nitrürleme işlemi sonrası yüzey özellikleri, nitrürlenmiş numunelere yüksek sıcaklığın etkisi ve yüksek sıcaklık aşınma davranışı incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımının yüzey bölgelerinde, 375 ve 400°C sıcaklıklarda genişlemiş azot içeren γ_N fazı, 450 ve 500°C sıcaklıklarda ise CrN fazı oluşmuştur.
2. 400°C sıcaklıkta nitrürlenmiş AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımının kesit görüntülerinde ve XRD piklerinin meydana gelen öteleme ve genişleme, azot atomlarının östenitik latisde çözünerek latis genişlemesine ve distorsiyonuna sebep olmasıyla ilişkilidir.
3. SEM incelemesiyle AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımının 400°C sıcaklıkta nitrürleme işlemi sonucunda en yüksek kalınlığa sahip nitrürlenmiş tabaka elde edilmiştir. Tabaka kalınlığı 5-6 μm arasında değişmektedir.
4. Mikrosertlik sonuçlarına göre 250 mN yük altında en yüksek yüzey mikrosertlik değeri ortalama 1621 HV olarak, 400°C sıcaklıkta nitrürlenmiş AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımında ölçülmüştür.
5. Nitrürlenmiş yüzeylere yüksek sıcaklığın etkisi incelendiğinde; 600°C sıcaklıkta fırında uzun süre bekletilen numunelerin sertlik değerlerinin değişmediği görülmüştür. AMS 5662 ve 5663 Inconel 718 süper alaşımlarının nitrürlenmiş yüzeylerinde tabaka kararlılığını 600°C sıcaklıkta koruduğu anlaşılmıştır. 700°C sıcaklıkta fırında uzun süre bekletilen numunelerde ise sertlik bir miktar düşüş göstermiştir, fakat AMS 5662 ve 5663 numunelerine göre hala daha yüksek sertlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir. 800°C'de bekletilen nitrürlenmiş numunelerin ilk 10 dakika sertliklerini koruduklarını, fakat 10 dakika ve üzeri sürelerde sertliklerinin

düştüğü tespit edilmiştir. Nitürleşmiş tabakanın özelliği 10. dakikadan sonra özelliğini kaybettiği anlaşılmıştır.

6. 600°C sıcaklıkta yapılan aşınma analizleri sonucunda 400°C’de nitrürleme işlemi AMS 5662 ve 5663 Inconel süper alaşımlarının aşınma direncini arttırdığı tespit edilmiştir.
7. Düşük sıcaklık nitrasyonu gerek sertlik ve gerekse de aşınma direnci açısından Inconel süper alaşımında uygulanabilecek bir yüzey sertleştirme işlemi olup, bu alaşım 600°C’de üstün yüzey özelliklerini uzun süreler emniyetli olarak koruyabilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Davis, J. R.**, (2000). Nickel, Cobalt and Their Alloys, *ASM International*, USA.
- [2] **Thomas, A., El-Wahabi, M., Cabrera, J. M., Prado, J. M.**, (2006). High Temperature Deformation of Inconel 718, *Journal of Materials Processing Technology*, **177**, 469-472.
- [3] **Ezugwu, E. O., Bonney, J., Yamane, Y.**, (2003). An Overview of The Machinability of Aero Engine Alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, **134**, 233-253
- [4] **Metals Handbook Volume 1** (1990). Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys, *ASM International*, USA.
- [5] **Donachie, M. J., Donachie, S. J.**, (2002). Superalloys: A Technical Guide, *ASM International*, Second Edition, USA.
- [6] **Campbell, F. C.**, (2006). Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, *Elsevier*.
- [7] **Reed, R. C.**, (2006). The Superalloys: Fundamentals and Applications, *Cambridge University Press*, Cambridge, UK.
- [8] **Boyer, R. R.**, (1996). An Overview on the Use of Titanium in Aerospace Industry, *ASM Journal of Material Science and Engineering*, **134**, 233-253.
- [9] **Çay, V. V., Ozan, S.**, (2005). Süperalaşımlar ve Uygulama Alanları, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları* , Elazığ.
- [10] **Metals Handbook Volume 9**, (2004). Metallography and Microstructures of Heat Resisting Alloys, *ASM International*, USA.
- [11] **Bassford, T. H., Hosier, J.**, (2006). Nickel and Its Alloys, *Inco Alloys International*, Inc. Huntington, 235-256.
- [12] **Akmandor, İ. S., Erdem, M. S.**, (2004). Uçak Motoru ve Elektrojen Gruplarındaki Gaz Türbini Teknolojisindeki İlerlemeler, Malzeme, Yüzey Teknolojileri ve İmalat Süreçlerindeki Gelişmeler, *Mühendis ve Makina*, **528**, 9-15.
- [13] **Daniel F. P., Schirra, J. J.**, (2001). Alloy 718 at Pratt & Whitney Historical Perspective and Future Challenges, *TMS (The Minerals, Metals and Materials Society)*.
- [14] **Ezugwu, E. O., Wanga, Z. M., Machado, A. R.**, (1998). The Machinability of Nickel-Base Alloys: A Review, *Journal of Materials Processing Technology*, **86**, 1-16

- [15] **Gustafsson, D.**, (2008). Constitutive Modelling of The Nickel Base Superalloy IN718; A Preparatory Study, *Master Thesis*, Linköpings University, Linköpings, SWEDEN.
- [16] **Metals Handbook Volume 4**, (1991). Heat Treating, *ASM International*, USA.
- [17] **Saunders, N., Guo, Z., Li, X., Miodownik, A. P., Schille J-Ph.** (2004). Modelling the Material Properties and Behaviour of Ni-Based Superalloys, *TMS (The Minerals, Metals and Materials Society)*.
- [18] **Taşhyan, A., Acarer, M., Şeker, U., Gökkaya, H., Demir, B.**, (2007). Inconel 718 Süper Alaşımının İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvveti Üzerindeki Etkisi, Gazi Uni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [19] **Loria, E. A.**, (1992). Recent Developments in the Progress of Superalloy 718, *JOM Volume 44*, 33-36.
- [20] **Url-1** <http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/pdf/aerospace/> , alındığı tarih: 25.04.2013.
- [21] **Pye, D.**, (2003). Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing, *ASM International*, USA.
- [22] **Polat, Ş., Atapek, Ş. H., Topaç, H.**, (2011). Gaz Nitrasyon ile Yüzey Sertleştirilmiş AISI 4140 ve DIN 1.2344 Çeliklerinde Mikroyapısal Karakterizasyon, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey.
- [23] **Totten, G. E.**, (2006). Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies 2nd edition, *Taylor and Francis Group*. Portland, USA.
- [24] **Reynoldson, R. W.**, (1993). Heat Treatment in Fluidized Bed Furnace, *ASM International*, USA.
- [25] **Gupta, C. K., Sathiyamoorthy, D.**, (1999). Fluidized Bed Technology in Materials Processing, *CRC Press LLC*, USA.
- [26] **Özdemir, U., Erten, M.**, (2003). Plazma (İyon) Nitrürleme Yöntemi ve Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, **2**, 41-48.
- [27] **Aw, P.K., Batchelor, A.W., Loh N.L.**, (1997). Structure and Tribological Properties of Plasma Nitrided Surface Films on Inconel 718, *Surface and Coatings Technology*, **89**, 70-76.
- [28] **Leroy, C., Czerwec, T., Gabet C., Belmonte, T., Michel, H.**, (2001). Plasma Assited Nitriding of Inconel 690, *Surface and Coatings Technology*, **142-144**, 241-247.
- [29] **Sun, Y.**, (2003). Kinetics of Layer Growth During Plasma Nitriding of Nickel Based Alloy Inconel 600, *Journal of Alloys and Compounds*, **351**, 241-247.
- [30] **Singh, V., Meletis, E.I.**, (2006). Synthesis, Characterization and Properties of Intensified Plasma-Assisted Nitrided Superalloy Inconel 718, *Surface and Coatings Technology*, **201**, 1093-1101.

- [31] **Akşit, İ.**, (2008). Plazma Nitrülenmiş İnconel 718'in Yüksek Sıcaklık Oksidasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [32] **Kahraman, F.**, (2008). Süperalaşımların Nitrülenerek Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [33] **Borowski, T., Brojanowska, A., Kost M., Garbacz, H., Wierzchon, T.**, (2009). Modifiying The Properties of The Inconel 625 Nickel Alloy by Glow Discharge, *Vacuum*, **83**, 1489-1493.
- [34] **Stott F. H.**, (1998). The Role of Oxidation in The Wear of Alloys, *Tribology International*, **31**, 61-71.

EKLER

EK A: Oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri.

EK B: 600,700 ve 800°C’de fırın içerisinde 96 saat süreyle tutulan numunelerin yüzey makro görüntüleri.

EK A

Çizelge A.1 : 600°C’de 3-96 saat sürelerde fırında tutulan AMS 5662 ve 400°C’de nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri.

Ortalama Sertlik (HV)		
Süre (sa)	Nitrülenmiş AMS 5662	AMS 5662
0	1240±47	453±17
3	1649±77	478±21
6	1663±31	678±24
12	1464±125	670±27
18	1776±371	458±32
24	1716±327	511±18
48	1561±201	546±54
96	1869±505	587±93

Çizelge A.2 : 600°C’de 3-96 saat sürelerde fırında AMS 5663 ve 400°C’de nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımlarının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri.

Ortalama Sertlik (HV)		
Süre (sa)	Nitrülenmiş AMS 5663	AMS 5663
0	1621±178	655±32
3	1563±148	616±32
6	1622±190	534±40
12	1799±76	594±38
18	1868±256	679±38
24	1702±119	599±61
48	1605±256	616±32
96	2105±446	673±62

Çizelge A.3 : 700°C’de 3-96 saat sürelerde fırında tutulan AMS 5662 ve 400°C’de nitrülenmiş AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımlarının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri.

Ortalama Sertlik (HV)		
Süre (sa)	Nitrülenmiş AMS 5662	AMS 5662
0	1240±46	453±17
3	1453±270	619±102
6	1261±237	630±54
12	1109±280	628±24
18	1019±65	649±43
24	1264±255	590±120
48	1009±253	612±35
72	1008±133	614±112
96	1093±128	608±42

Çizelge A.4 : 700°C’de 3-96 saat sürelerde fırında AMS 5663 ve 400°C’de nitrülenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımlarının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri.

Ortalama Sertlik (HV)		
Süre (sa)	Nitrülenmiş AMS 5663	AMS 5663
0	1621±178	655±32
3	1455±251	650±58
6	1379±327	657±70
12	1116±171	602±41
18	1251±255	625±55
24	1042±215	638±75
48	1210±316	608±67
72	1164±390	634±79
96	1042±209	654±46

Çizelge A.5 : 800°C’de 10-120 dakika sürelerde fırında tutulan AMS 5662 ve 400°C’de nitrürlenmiş AMS 5662 Inconel 718 süper alaşımlarının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri.

Ortalama Sertlik (HV)		
Süre (dk)	Nitrürlenmiş AMS 5662	AMS 5662
0	1240±47	453±17
10	1275±83	451±23
30	670±98	433±27
60	617±213	453±77
120	453±73	458±43

Çizelge A.6 : 800°C’de 10-120 dakika sürelerde fırında AMS 5663 ve 400°C’de nitrürlenmiş AMS 5663 Inconel 718 süper alaşımlarının oda sıcaklığındaki ortalama yüzey mikrosertlik değerleri.

Ortalama Sertlik (HV)		
Süre (dk)	Nitrürlenmiş AMS 5663	5663
0	1621±178	655±32
10	1535±199	643±36
30	619±138	670±40
60	682±215	617±61
120	573±213	453±97

EK B



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil B.1: 600°C sıcaklıkta 96 saat süreyle tutulması sonrası numunelerin yüzeyleri; (a) AMS 5662, (b) 400°C’de nitrürlenmiş AMS 5662, (c) AMS 5663, (d) 400°C’de nitrürlenmiş AMS 5663.



(a)



(b)

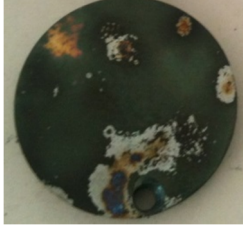


(c)



(d)

Şekil B.2: 700°C sıcaklıkta 96 saat süreyle tutulması sonrası numunelerin yüzeyleri; (a) AMS 5662, (b) 400°C’de nitrürlenmiş AMS 5662, (c) AMS 5663, (d) 400°C’de nitrürlenmiş AMS 5663.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil B.3: 800°C sıcaklıkta 96 saat süreyle tutulması sonrası numunelerin yüzeyleri; (a) AMS 5662, (b) 400°C’de nitrülenmiş AMS 5662, (c) AMS 5663, (d) 400°C’de nitrülenmiş AMS 5663.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Tuncay Turan
Doğum Yeri ve Tarihi: Kdz.Ereğli, 22.08.1986
Adres: Maltepe/ İstanbul
Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi / Metalürji ve Malzeme Mühendisliği