



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**NİTRÜRLEME VE AKIMSIZ Ni-P İLE INCONEL 625
KAPLAMANIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

**Ramazan Haldun TOPÇU
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Harun MİNDİVAN**

**BİLECİK, 2019
Ref. No: 10267407**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**NİTRÜRLEME VE AKIMSIZ Ni-P İLE INCONEL 625
KAPLAMANIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

**Ramazan Haldun TOPÇU
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Harun MİNDİVAN**

BİLECİK, 2019



BILECİK
SEYH EDEBALI UNIVERSTY

Graduate School of Sciences
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering

**IMPROVEMENT OF SURFACE PROPERTIES OF
INCONEL 625 COATINGS BY NITRIDING AND
ELECTROLESS Ni-P**

Ramazan Haldun TOPÇU
Master's Thesis

Thesis Advisor
Prof. Dr. Harun MİNDİVAN

BILECİK, 2019



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS
JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 12/06/2019 tarih ve 30/07 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/06/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ramazan Haldun TOPÇU'nun "Nitrürlenme ve Akımsız Ni-P ile Inconel 625 Kaplamannın Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi" başlıklı tez çalışması Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/ oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE : Prof. Dr. Harun MİNDİVAN (TEZ DANIŞMANI)

ÜYE: Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN (JÜRİ BAŞKANI)

ÜYE: Prof. Dr. Şennur CANDAN

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun
.../.../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanması sürecinde yüksek lisans öğrenciliğim boyunca değerli yardımlarını, anlayıőını ve desteklerini esirgemeyen tez danıőmanım hocam Sayın Prof. Dr. Harun MİNDİVAN'a teşekkür ederim.

Bilgi ve desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. şennur CANDAN'a ,deneysel çalıőmalarım sırasında ve yapılan analizlerde desteklerini esirgemeyen Osman ÖZKAN'a, tezin hazırlanmasında emeği geçen, ismini sayamadığım bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bilecik şeyh Edebalı Üniversitesi'nde yapılan analizler esnasında katkılarından dolayı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ferda MİNDİVAN'a, HVOF püskürtme ve pulse plazma nitrürleme proseslerindeki desteklerinden dolayı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ramazan SAMUR'a ve Sayın Dr. Ersin E. KORKMAZ'a teőekkürü borç bilirim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) teőekkürlerimi sunarım.

Beni yetiőtiren ve hayatım boyunca bana destek olan kıymetli annem ve değerli babama őükranlarımı sunarım.

Ayrıca hayatımın her alanında gösterdiği destek, sabır ve anlayıőlarıyla her zaman yanımda hissettiğim değerli eőim Gülüzar TOPÇU'ya teşekkür ederim.

BEYANNAME

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tez içindeki tüm verileri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun olarak sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu Üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

...../...../ 20

Ramazan Haldun TOPÇU

(NİTRÜRLEME VE AKIMSIZ Ni-P İLE INCONEL 625 KAPLAMANIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ)

ÖZET

Yüksek sıcaklık ve yüksek korozif ortam gibi zorlu koşullarda deniz ve petrol endüstrisi gibi çeşitli uygulamalarda nikel esaslı süper alaşımlar içerisinde Inconel 625 yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu malzemelerin aşınma ve korozyon dirençleri nispeten çok düşüktür. Bu nedenle süper alaşım üreticileri servis koşullarında nikel esaslı süper alaşımların aşınma ve korozyon direncini iyileştirmek için çeşitli yöntemler uygulamaktadır. Bu yöntemlerden biri parçanın tümünü aşınmaya ve korozyona dirençli özel malzemelerden imal etmektir, fakat bu da pahalı bir yöntemdir. Ancak, aşınma ve korozyon; yüzey hasarı olduğundan dolayı uygun bir yüzey modifikasyon tekniği ile maliyet azaltılabilir ve nikel esaslı süper alaşımların servis ömrü düşük maliyet ve seri üretim kolaylığı ile uzatılabilir. Son yıllarda yüzey birden fazla işleme tabi tutularak yüzey modifikasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Isıl püskürtme uygulanmış Inconel 625 kaplamalar tekrar yüzey işlemi görerek modifiye edildiklerinde ise servis ömürleri daha uzun ve çalışma performansları daha yüksek olabilir.

Bu çalışmada, düşük karbonlu çelik (St 37) üzerine yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) püskürtme işlemi ile Inconel 625 kaplamanın yapısal, korozyon, mekanik ve aşınma davranışı incelenmiş, elde edilen sonuçlar HVOF Inconel 625 kaplama + pulse plazma nitrürleme ve HVOF Inconel 625 kaplama + akımsız Ni-P kaplamanın birleşimi olan dubleks yüzey işlemleriyle karşılaştırılmıştır. HVOF yöntemi ile püskürtülen Inconel 625 kaplama üzerine pulse plazma ile nitrürasyon işlemi 520 °C işlem sıcaklığı, 12 saatlik işlem süresi ve % 75 N₂ - % 25 H₂ gaz karışım oranında gerçekleştirilirken, akımsız Ni-P kaplama hazırlamak için ticari bir akımsız nikel kaplama banyosu kullanılmıştır. Bu işlemlerden sonra mekanik özelliklerin tespit edilmesi için mikrosertlik ölçümleri, tribolojik özelliklerin belirlenmesi için ileri-geri aşınma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca elektrokimyasal çalışmalar için potansiyostat cihazı, yapısal özelliklerin tespit edilmesi için X-Işınlı Difraksiyonu (XRD), Optik Mikroskop (OM) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, uygulanan pulse plazma nitrürleme ve akımsız Ni-P yüzey işlemleri HVOF püskürtülen Inconel 625 kaplamanın korozyon ve tribolojik özellikleri üzerine olumlu etkileri olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Inconel 625; HVOF; Ni-P Kaplama; Nitrürleme.

**(IMPROVEMENT OF SURFACE PROPERTIES OF INCONEL 625 COATINGS
BY NITRIDING AND ELECTROLESS Ni-P)**

ABSTRACT

Nickel-based superalloys such as Inconel 625, are used in a wide range of applications including the marine and petroleum industries under where it is subjected to harsh conditions such as high temperatures and highly corrosive environments. However, its wear and corrosion resistance are poor. Accordingly, efforts are being made to improve both the anti-wear and the anti-corrosion properties in service. One plausible solution is to construct components entirely from specialty wear and corrosion-resistant materials, but this can be very expensive. Since wear and corrosion are responsible for causing surface material loss, an appropriate surface modification process can be effective for minimizing costs and prolonging the service life of nickel-based superalloys with a low cost and capability of mass production. In recent years, surface modification treatments seemed to repair these problems. When thermally sprayed Inconel 625 coatings are modified by re-surface treatment, their service life may be longer and their working performance may be higher.

In this study, structural, corrosion, mechanical and wear behaviour of Inconel 625 coating prepared by High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF) thermal spraying on low carbon steel (St 37) alloy were investigated. The results were compared against HVOF-sprayed Inconel 625 coating + pulse plasma nitriding and HVOF-sprayed Inconel 625 coating + electroless Ni-P deposition which is a duplex surface treatment. Inconel 625 coating on low carbon alloy substrate by HVOF process was pulsed plasma nitrided at 520 °C for 12 hours in a gas mixture of 75 % N₂ and 25 % H₂, while HVOF-sprayed Inconel 625 coating was used as the substrate for the preparation of electroless Ni-P coating. After these operations, microhardness measurements and reciprocating wear tests were determined in order to describe the mechanical and tribological properties. Structural analysis was performed using X-Ray Diffraction (XRD) analysis, Optical Microscopy (OM) and Scanning Electron Microscopy (SEM), while corrosion performance of the coatings was analysed by using a potentiodynamic polarization scanning (PDS) technique. As a result, it was found that the pulse plasma nitriding and electroless Ni-P surface processes improved the corrosion and tribological properties of the HVOF-sprayed Inconel 625 coating.

Key Words: Inconel 625; HVOF; Ni-P Coating; Nitriding.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEŞEKKÜR
BEYANNAME
ÖZET.....	I
ABSTRACT	II
İÇİNDEKİLER	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR	VIII
1.GİRİŞ	1
1.1. Süper Alaşımlar ve Sınıflandırılması	5
1.1.1. Demir esaslı süper alaşımlar	10
1.1.2. Nikel esaslı süper alaşımlar	11
1.1.3. Kobalt esaslı süper alaşımlar	14
1.2. Inconel 625 ve Uygulama Alanları	16
2. ISIL PÜSKÜRTME	19
2.1. Isıl Püskürtme Kaplama Türleri	21
2.1.1. Alev püskürtme prosesi	22
2.1.2. Ark püskürtme prosesi	23
2.1.3. Detonasyon tabanca prosesi	24
2.1.4. Plazma püskürtme prosesi	25
2.1.5. Yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) prosesi	26
3. PLAZMA NİTRÜRLEME	29
3.1. Plazma Nitürleme İşleminin Mekanizması	30
3.2. Plazma Nitürleme Sonrası Oluşan İç Yapılar	31
4. AKIMSIZ NİKEL FOSFOR KAPLAMA	33
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	35
5.1. Yüzey Hazırlama ve HVOF Isıl Püskürtme Kaplama.....	35
5.2. Pulse Plazma Nitürleme İşlemi	35
5.3. Akımsız Ni-P Kaplama İşlemi	35
5.4. Yapısal Karakterizasyon.....	36
5.4.1. X-Işınları difraktometresi (XRD) çalışmaları.....	36

5.4.2. Optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları.....	36
5.4.3. Yüzey pürüzlüğü ölçümleri	36
5.5. Mekanik Deneyler	36
5.5.1. Mikrosertlik ölçümleri	36
5.5.2. Aşınma deneyleri	37
5.6. Elektrolitik Korozyon Deneyleri	37
6. DENEY BULGULARI VE TARTIŞMA	39
6.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları	39
6.2. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları	42
6.3. Elektrolitik Korozyon Deney Sonuçları	43
6.4. Aşınma Deney Sonuçları	46
7. GENEL SONUÇLAR	49
KAYNAKLAR	50
ÖZ GEÇMİŞ.....

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 1.1. Süper alaşımların bazı uygulama alanları.....	8
Çizelge 1.2. Süper alaşımların sınıflandırılması	9
Çizelge 5.1. Diamalloy-1005 tozunun kimyasal bileşimi.....	35
Çizelge 5.2. Kuru aşınma deney şartları	37
Çizelge 6.1. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları.....	42
Çizelge 6.2. Mikrosertlik ölçüm sonuçları.....	43
Çizelge 6.3. Polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluk değerleri.....	44

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1.	Büyük bir kısmı süper alaşımdan üretilen F119 Gaz türbin motoru..... 7
Şekil 1.2.	Süper alaşımın sektörel olarak dağılımı..... 7
Şekil 1.3.	Uçak motorlarında malzeme kullanımının yüksek sıcaklık mukavemetine bağlı olarak gelişimi..... 8
Şekil 1.4.	Nikel esaslı süper alaşımlarda kullanılan alaşım elementleri. Eleman bloklarının yüksekliği var olabilecek miktarı göstermektedir. Faydalı ve zararlı iz elementleri sırasıyla çapraz tarama ve yatay çizgi tarama ile işaretlenmiştir..... 10
Şekil 1.5.	Nikel esaslı süper alaşımların mikroyapı değerlendirmesine krom içeriğinin etkisi..... 13
Şekil 1.6.	Uçak motor alaşımlarındaki yüksek sıcaklık mukavemeti 17
Şekil 1.7.	Uçak türbin imalatında malzeme kullanımı..... 18
Şekil 1.8.	Al ₂ O ₃ /TiC kesici takımla Inconel alaşımının talaşlı imalatında kesme sıcaklığına kesme hızının etkisi 18
Şekil 2.1.	Çeşitli ısı püskürtme kaplama işlemlerinin sınıflandırılması 19
Şekil 2.2.	Isıl püskürtme kaplama işleminin genel şematik görüntüsü..... 20
Şekil 2.3.	Isıl püskürtme kaplama mikroyapısı..... 20
Şekil 2.4.	(a) Düz bir altlığa uygulanan ısı püskürtülmüş küresel partikülün şematik diyagramı (b) tipik ısı püskürtme splat yapıları..... 21
Şekil 2.5.	Plazma püskürtme elde edilen nikel esaslı kaplamanın kesit görüntüsü ... 21
Şekil 2.6.	Isıl püskürtme işlemlerinin partikül hızına, partikül sıcaklığına ve ortalama başlangıç partikül boyutuna göre sınıflandırılması. Sağ ölçek, her püskürtme işlemine yaklaşık olarak karşılık gelen malzeme aralığını göstermektedir. 22
Şekil 2.7.	Alev püskürtme prosesin şematik görüntüsü 23
Şekil 2.8.	Ark püskürtme prosesin şematik görüntüsü 24
Şekil 2.9.	Detonasyon tabanca püskürtme prosesinin şematik görüntüsü 24
Şekil 2.10.	Plazma püskürtme prosesi şematik görüntüsü 26
Şekil 2.11.	HVOF prosesi şematik görüntüsü 27
Şekil 2.12.	HVOF püskürtme işleminin çok ölçekli özellikleri ... 28

Şekil 3.1.	Plazma nitrürleme işleminin mekanizması	31
Şekil 5.1.	Elektrolitik korozyon deney düzeneğinin şematik gösterimi	38
Şekil 6.1.	HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın kesitinden alınan (a) düşük ve (b) yüksek büyütme optik mikroskop görüntüleri.....	39
Şekil 6.2.	Pulse plazma nitrürleme işlemi gören HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları... ..	40
Şekil 6.3.	Akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın (a) yüzey morfolojisi ve (b) kesit görüntüsü.....	40
Şekil 6.4.	(a) HVOF Inconel 625 kaplama + pulse plazma nitrürleme ve (b) HVOF Inconel 625 kaplama + akımsız Ni-P kaplamaların XRD paternleri	41
Şekil 6.5.	Kaplamalara ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	44
Şekil 6.6.	İşlem görmemiş HVOF püskürtülmüş Inconel 625, pulse plazma ile nitrürlenmiş HVOF Inconel 625 ve akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF Inconel 625 kaplamaların korozyon yüzeyleri.....	45
Şekil 6.7.	Şekil 6.7. İncelenen kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al ₂ O ₃ bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, 2 boyutlu aşınma iz profilleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri.....	47
Şekil 6.8.	İncelenen kaplamaların detaylı SEM görüntüleri... ..	48

SİMGELER ve KISALTMALAR**Simgeler**

Al	: Alüminyum
B	: Bor
°C	: Santrigrat Derece
C	: Karbon
C ₂ H ₂	: Asetilen
C ₃ H ₈	: Propan
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
CrN	: Krom Nitrür
cm	: Santimetre
°F	: Fahrenhiet Derece
Fe	: Demir
g/cm ³	: Gram/Santimetreküp
H ₂	: Hidrojen Gazı
HV	: Vickers Sertlik Değeri
°K	: Kelvin derece
kcal	: Kilokalori
L	: Litre
mbar	: Milibar
MC	: Metal Karbür
mm	: Milimetre
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
m/s	: metre/saniye
N ₂	: Azot gazı
Ni	: Nikel
P	: Fosfor
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
V	: Volt

WC	: Tungsten Karbür
α	: HMK Yapılı Fazı
ε	: SDH Yapılı Fazı
γ	: YMK Yapılı Fazı
μm	: Mikrometre

Kısaltmalar

DC	: Doğru Akım
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işınları Spektrometre
HMK	: Hacim Merkezli Kübik Kafes Sistemi
HSP	: Sıkı Düzen Hegzagonal Yapılı Fazı
HVOF	: Yüksek Hızlı Oksijen-Yakıt
OCP	: Açık Devre Potansiyeli
OM	: Optik Mikroskop
Ppm	: 1 / 1.000.000
PVD	: Fiziksel Buhar Kaplama
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SMAW	: Korumalı Metal Ark Kaynağı
TCP	: Tri-Kalsiyum Fosfat
TTCP	: Tetra Kalsiyum Fosfat
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işınları Difraksiyonu)
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik Kafes Sistemi

1. GİRİŞ

Aşınma ve korozyondan dolayı dünyada her yıl önemli kayıplar olmaktadır. Ülkelerin aşınma ve korozyon nedeniyle kayıpları gayri safi milli hasıllarının % 3,5-5'i arasında değişmektedir. Bu kadar yüksek kayıpların oluşu, buna paralel endüstrinin gelişimi, dayanıklı ve kararlı malzemelere olan ihtiyacı artırmıştır. Malzemelerin dış etkenlere karşı direnci o malzemenin kütleli ve yüzey özellikleri ile ilgilidir. Parçanın kütleli olarak şekil değişimine uğramadan servis koşullarında çalışması parçanın elastisite modülü, akma ve çekme mukavemeti gibi kütleli özelliklerine bağlıdır. Diğer taraftan aşınma ve korozyon gibi yüzeyde oluşabilecek hasarlar o parçanın yüzey özellikleri ile ilgilidir. Hammadde üretimi ve şekillendirilmelerindeki zorluklar fiyatın yüksek oluşuna sebep olduğundan çoğu mühendislik uygulamalarında hem kütleli özelliklerinin hem de yüzey özelliklerinin iyi olduğu malzeme üretmek oldukça zordur. Bu nedenle düşük karbonlu çeliklerin yüzeyleri yüzey modifikasyon işlemleri ile geliştirilebilir (Mindivan ve Mindivan, 2016).

Isıl püskürtme, toz veya tel halindeki metalik veya metalik olmayan malzemelerin eriyik ya da yarı eriyik halde bir altlık üzerine biriktirilmesini mümkün kılan kaplama işlemlerine verilen en genel isimdir. Oluşturulan yüksek özellikli kaplamalar, aşınma, yüksek sıcaklık, çeşitli kimyasallardan ileri gelebilecek saldırılar ve çevresel korozyon gibi durumlara karşı koruma sağlar. Metalik malzemelerin ısıl püskürtme tekniği ile kaplanması düşük maliyet, kolay uygulanabilirlik, proses çeşitliliği ve kullanılabilen malzeme çeşitliliği kriterleri açısından en uygun olanıdır (Sá Brito vd., 2012). Örneğin, Al Fadhli vd., (2005)'e göre, özellikle de petrol ve gaz üretimi petrokimya alanları kullanılan parçalar için ısıl püskürtme tekniğinin kullanımı pratik bir yöntemdir. Isıl püskürtme tekniğinin ikinci bir önemli avantajı ise kaplanacak metalik malzemelere daha sonra kaynak, ısıl işlem ve yüzey modifikasyon işlemleri gibi yüksek işlemlerinin uygulanabilirliğidir.

Son yıllarda yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) püskürtme teknolojisindeki gelişme (yüksek partikül hızı, nispeten düşük partikül sıcaklığı) ile azalan oksidasyonla birlikte daha düşük porozite (< %2) ve daha yüksek kalınlığa (0.3 - 1.0 mm) ve mükemmel mekanik özelliklere ulaşılabilir (Pougoum vd., 2019). Bunun sebebi; düşük maruz kalma süresi ile nispeten düşük alev sıcaklığıyla (2000 m/s gibi yüksek derecede gaz hızı ile toz parçacıklarının 500 m/s'den daha yüksek hızlarda) altlık malzemeye

püskürtülebilmesinden kaynaklanmaktadır (Saaedi vd., 2009). Su jeti, kesici alet nozulu, kâğıt ve folyo üretim merdaneleri, petrokimya valf ve pompaları gibi endüstrinin neredeyse her alanında dayanıklı ve kararlı malzemelere (sert metaller, tungsten karbür, krom karbür, nikel- krom alaşımları, paslanmaz çelik, Al - bronz, süper alaşımlar) olan ihtiyacı artırmıştır (Kuroda vd., 2002).

Sulu çözelti ortamında kaplama kalınlığı boyunca yapıdaki gözenekler veya diğer kusurlar çözeltinin kaplama-altlık ara yüzeyine nüfuz etmesine izin verdiği için ısı püskürtme ile elde edilen kaplama ve döküm/dövme yöntemiyle üretilen kütle malzemenin korozyon direnci aynı değildir (Kawakita vd., 2003; Boudi vd., 2006). Hem düşük gözeneklilik seviyelerinde (hacimce % 2'den az) hem de çok düşük oksit seviyelerinde (ağırlıkça % 2'den az) paslanmaz çelik ve nikel alaşımları dâhil olmak üzere çeşitli alaşım tiplerinde HVOF kaplamalar oluşturulabilir.

Isıl püskürtülen kaplamaların korozyon direncini iyileştirmek için çeşitli karmaşık yüksek sıcaklık işlemleri de (yüksek sıcaklıktaki vakumlu fırın işlemleri veya fırında yeniden eritme) mevcuttur. Bu işlemler ile ısı püskürtülen bir metal kaplamada performansı düşüren ve pasivasyon kapasitesini sınırlayan gözenekler ve lameler sınırlar olarak bilinen kusurları ortadan kaldırarak lameler bir yapıdan kütle benzeri bir yapıya dönüştürmek mümkündür. Ancak, maliyeti önemli ölçüde arttırdığı ve yüzeyde istenmeyen mikroyapı değişikliklerine veya parçanın çarpılmasına neden olabileceği için bu işlemlerin uygulanabilirliği sınırlıdır. Lazer işlemleri, ısı püskürtülmüş metal alaşım kaplamaları yoğunlaştırmak için başka bir seçenektir. Bu işlem korozyon direncinin artırılmasında çok etkili olduğu, ancak yüksek maliyetlerinin yanı sıra kaplama bileşimine ve spesifik lazer tipine bağlı olarak işlem gören yüzeyde çatlağın daha fazla ve daha kolay bir şekilde ortaya çıkması gibi bazı dezavantajları da beraberinde getirebilir. Bu nedenle, bazı durumlarda, uygun işlem parametre aralığı çok dardır ve her bir kaplama malzemesi için uygun ayarların yapılması uzun süre almakta ve pahalı bir süreçtir (Bolelli vd., 2008).

Servis koşullarında aşırı zorlanmaya maruz kalacağı düşünülen yüzeylere yüksek sertlik, mukavemet, aşınma direnci kazandırmak ve kimyasal hasarı önlemek için HVOF püskürtme + pulse plazma nitrürleme ve HVOF püskürtme + akımsız Ni-P kaplamaların birleşimi olan dubleks yüzey işlemleri uygulamak mümkündür. Altlık malzemenin plastik deformasyona uğramasını önlemek ve üst kaplama tabakasına

yeterli mekanik destek sağlanmak için HVOF tabaka gibi bir yük taşıyıcı ara tabaka sayesinde bölgesel Hertzian hasarı en aza indirilebilir (Pougoum vd., 2019). Nitrürleme gibi difüzyon ile sertleştirme işlemlerinde bir difüzyon bölgesinin oluşması sonucu üst tabakanın hemen altındaki yüzeyin de mukavemeti artmaktadır. Akımsız Nikel (Ni) kaplamalar kaplama bileşimine göre Ni-P, Ni-B ve diğer çoklu alaşım kaplamalar olarak sınıflandırılır. Akımsız Ni kaplamalar; çelik, paslanmaz çelikler, magnezyum ve alüminyum alaşımları gibi pek çok malzemede uygulanabilmektedir (Wang vd., 2013). Ancak paslanmaz çelik gibi süper alaşımların üzerindeki pasif oksit tabakasından dolayı akımsız Ni-P kaplama oluşturmada ve kaplama kalınlığını arttırmada problemler yaşanmaktadır. Yapılan bir çalışmada (Şen, 2009), AISI 304 paslanmaz çeliğin katalitik yüzey özelliği kazanması için önce watts Nikel banyosu kullanılarak elektrolitik Ni ile kaplanmıştır ve sonrasında akımsız Ni-B kaplama çözeltisine daldırılmıştır. Tekdüze kalınlık, ideal sertlik, iyi aşınma ve korozyon özelliklerinin amaçlandığı düşük karbonlu çelik üzerine HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplama için akımsız kaplama yöntemi en basit ve ucuz yöntem olduğu düşünülmektedir.

Nikel esaslı alaşımlar, kimyasal ve elektrokimyasal direnci istenen çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Özellikle oyuklaşma (pitting) ve aralık korozyon direnci yüksek olan Ni-Cr alaşımları sulu ortamlarda uygulama alanı bulmaktadır. Örneğin, açık deniz petrol çıkarma tesislerinde kullanılan hidrolik sistemlerde kaynakla oluşturulmuş Ni-Cr kaplamalar korozyona karşı dirençlidir. Hidrolik pistonlar gibi bu parçaların bazıları, aşınma ve korozyonun beraber geliştiği tribokorozyona maruz kalmaktadır. Böyle bir durumda, Ni-Cr alaşımları, düşük sertlikleri ve genel olarak zayıf tribolojik özellikleri nedeniyle önemli ölçüde malzeme kaybı oluşmaktadır. Tribokorozyon davranışını iyileştirmek için pulse plazma nitrürleme (Espallargas ve Mischler, 2011) ve akımsız dubleks kaplama (Mindivan, 2019) gibi alternatif yüzey işlemleri önerilmektedir.

Klasik nitrürleme işlemleri (gaz nitrürleme) paslanmaz çeliklerin sertliğini arttırmak için başarıyla kullanılmıştır. Ancak, 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda nitrürlenmiş malzemelerin düşük korozyon direnci göstermesi, yüzeyde CrN bileşenlerinin oluşması sonucu tabakada kromun tükenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu problemi çözmek için son yıllarda plazma nitrürleme ve pulse plazma nitrürleme işlemleri gibi yeni teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler klasik nitrürleme işleminin

sıcaklığını ve sürecin süresini azaltarak CrN çökmesini önleyerek ve böylece iyileştirilmiş korozyon özellikleri sergileyen yüksek sertliğe sahip difüzyon tabakasının oluşmasına izin vermektedir (Espallargas ve Mischler, 2011). Ayrıca, Inconel 600 gibi nikel esaslı alaşımlar paslanmaz çeliğe alternatif bir malzeme olarak yerini aldığı için nitrürlemeye karşı dirençli olan Inconel 600 alaşımın nitrürleme kinetiği incelenmiştir (Sudha vd., 2013). Ancak, plazma nitrülenmiş Ni-Cr kaplamaların nitrürleme ve tribolojik davranışları ile ilgili çalışma bulunmamaktadır.

Mindivan ve Mindivan (2013), Inconel 600 alaşımına hem geleneksel plazma nitrürleme hem de pulse plazma nitrürleme işleminin yapısal ve aşınma davranışına etkisini incelemiştir. En yüksek mikrosertlik pulse plazma nitrürleme işleminde elde edilmiştir. Optik mikroskop incelemesi pulse plazma nitrürleme sonucunda nitrür tabaka derinliği 7 µm olarak ölçülmüştür. Nitrür tabakasının XRD sonuçlarında ise genişlemiş Ni ve CrN fazları belirlenmiştir. Aşınma testleri sonucunda nitrür tabakası Inconel 600'ün sürtünme katsayısının azalmasını ve aşınma direncinin artmasını sağlamıştır. Plazma ve pulse plazma nitrürleme işlemi yapılan numunelerin aşınma derinliği nitrür tabakasındaki difüzyon bölgesine ulaşamamıştır (Mindivan ve Mindivan, 2013).

Sandhu ve Shahi (2016), yaptıkları çalışmada AISI 304L östenitik paslanmaz çelik plakaların yüzeyi metal ark kaynak işlemi (SMAW) kullanılarak tek katmanlı Inconel 625 ile kaplanmıştır. Disk üzeri pin tekniği kullanılarak kaplanmış kaplamalar üzerinde yapılan iki elemanlı abrasif aşınma deneyleri sonucunda düşük metal seyreltilmiş kaplamaların yüksek metal seyreltilmiş kaplamalara göre daha iyi aşınma direnci sergilemiştir. Yüksek çevrimli yorulma çalışmaları, Inconel 625 içeriğince zengin tabakanın daha iyi yorulma dayanımına sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır (Sandhu ve Shahi, 2016).

Al-Hamed vd., (2016), petrol ve gaz endüstrilerindeki aşınma ve korozyondan kaynaklanan hasarı önlemek için ekonomik ve hızlı çözüm olarak HVOF ısı püskürtme kaplamalar (aşınma etkilerini azaltmak için özellikle tungsten karbür-kobalt ve korozyonu önlemek için Inconel 625 tozlarından oluşan karışım) hazırlamıştır. Nanoyapılı tungsten karbür-kobalt ilavesiyle bimodal (nano ve mikro boyutlu partiküllerden oluşan) tozlarının geliştirilmesine yönelik yeni araştırma eğilimi umut vaat etmektedir. WC-12Co ve Inconel 625 toz karışımında nanoyapılı WC-12Co'nun

içeriğinin artması ile elde edilen kompozit kaplamada iyileştirilmiş mekanik kenetleme ve çatlak oluşma olasılığı azalarak altlık/kaplama ara yüzeyinde WC nano boyutlu tanelerin güçlü bağlanmasından dolayı sertlik, eğme ve akma mukavemeti artmıştır (Al-Hamed vd., 2016).

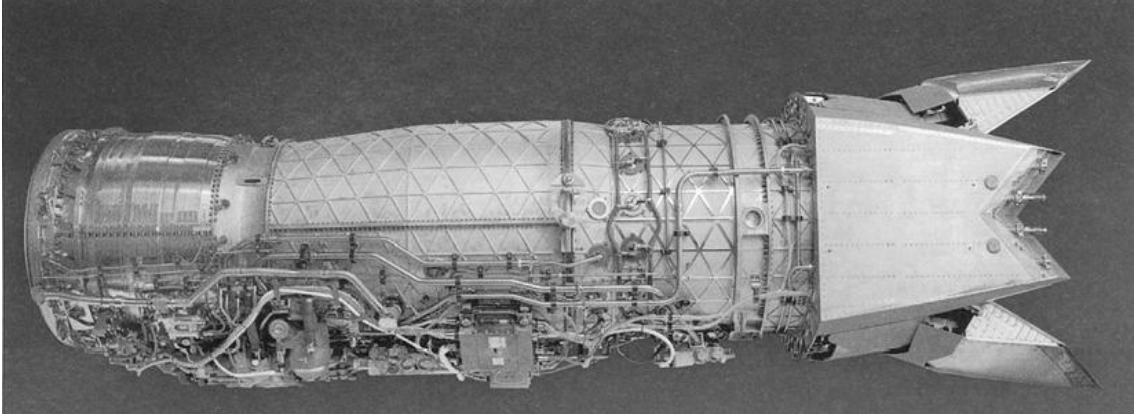
Önemi günden güne daha belirginleşmekte olan HVOF püskürtülen Inconel 625 kaplamalar tekrar yüzey işlemi görerek modifiye edildiklerinde ise servis ömürleri daha uzun olabilir ve çalışma performansları artırılabilir. Bu çalışma, temelde çok katmanlı bir yapıya sahip olan HVOF püskürtme sonrası daha önce uygulaması yapılmamış ve ilk defa uygulanacak nitrüleme veya akımsız Ni-P kaplama yöntemi ile iki ayrı yüzey işleminin uygulanması ile ilgilidir. Böylece HVOF püskürtülen Inconel 625 kaplamaya nazaran yük taşıma kabiliyetinde ve korozyon direncinde önemli bir düşme olmaksızın aşınma direncinin geliştirilmesine olanak sağlayacak yeni bir yüzey modifikasyon işlemi önerilecektir.

1.1. Süper Alaşımlar ve Sınıflandırılması

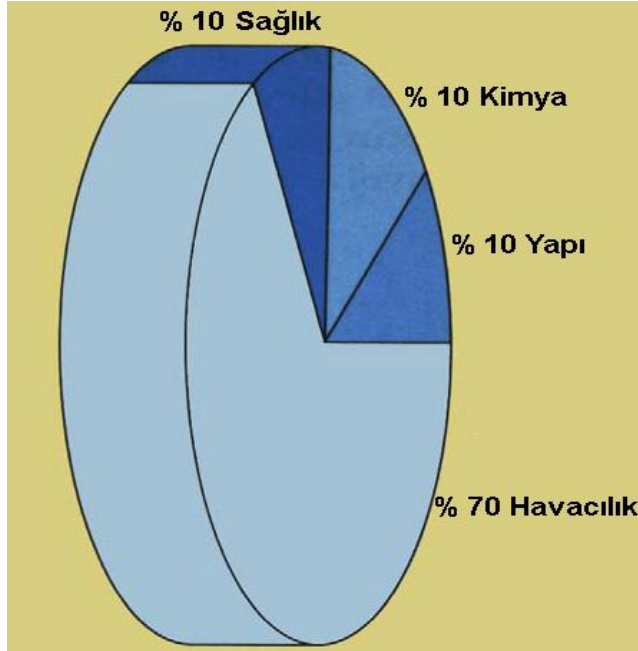
Süper alaşımlar, genellikle yaklaşık 540 °C' nin (1000 °F) üzerindeki sıcaklıklarda kullanılan şiddetli plastik deformasyona ve yüzey yapısı değişimlerine karşı ısıl direnci yüksek, korozyon ve oksidasyona karşı dirençli nikel, demir-nikel ve kobalt esaslı yüzey merkezli bir kübik (fcc, östenitik) yapıya sahip alaşımlardır (Davis, 2000). Bu özellikler sayesinde havacılık ve nükleer endüstride gaz türbin parçaları, uzay araçları, roket motoru, denizaltılar, buhar santralleri ve petrokimya donanımları gibi endüstriyel uygulamaları bulunmaktadır (Bhatt vd., 2010). Günümüzde kullanılan dövme süper alaşımların büyük çoğunluğu % 80 nikel ve % 20 krom'dan oluşmaktadır ve 50 yılın üzerinde elektriksel olarak direnç gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Süper alaşım, tarihte ilk olarak 1940'larda az miktarda titanyum ve alüminyum ilave edilerek dikkate değer oksidasyon direnci ile sürünme kopma mukavemetinden ötürü uçak türbin motorlarında ve turbo şarjlarda kullanım için geliştirilmiştir. İlk üretilen süper alaşım Nimonic 80 olup daha sonra bu alaşım kısa sürede Nimonic 80 A olarak geliştirilmiştir. % 20 kobalt ilave edilerek elde edilen Nimonic 90, Nimonic 80A'ya nazaran yaklaşık 50 °C gibi sıcaklık avantajı sunmuştur. Yüksek sıcaklık kabiliyetini artırmak amacıyla türbin motor tasarımcıları titanyum ve alüminyum ilavesi yanı sıra molibden de ilave ederek katı eriyik sertleşmesi ile Nimonic 105 ve 115 gibi alaşımlar geliştirmiştir. 1940'ların sonunda Pratt and Whitney

Havacılık ve General Elektrik Şirketi tarafından Waspaloy ve M-252 adında iki önemli dövme nikel esaslı alaşım ortaya çıkmıştır. Rene 41 ve 95 süper alaşımları kaynak uygulamalarında kullanılan yüksek mukavemetli çökelme sertleşmeli sac alaşımlarıdır. Inconel 718 kaynakta deformasyon yaşanması çatlamaına karşı direnç istenen ve orta yüksek sıcaklık mukavemet gerektiren demir içeren alaşımdır. Inconel 901 diğer bir nikel-demir esaslı alaşım olup, bu alaşımlar Waspalloy ve Astroloy gibi türbin disk servis sıcaklığında yüksek mukavemet istenen türbin disklerinde önemli uygulama alanı bulmaktadır. Nikel esaslı süper alaşımlardaki gelişme süreci, sadece bileşim değil aynı zamanda ergitme yöntemi, ısıl işlem prosesinin optimizasyonu ve uygulanan sıcak işlem şartları ile ilgilidir (Ezugwu vd., 1999).

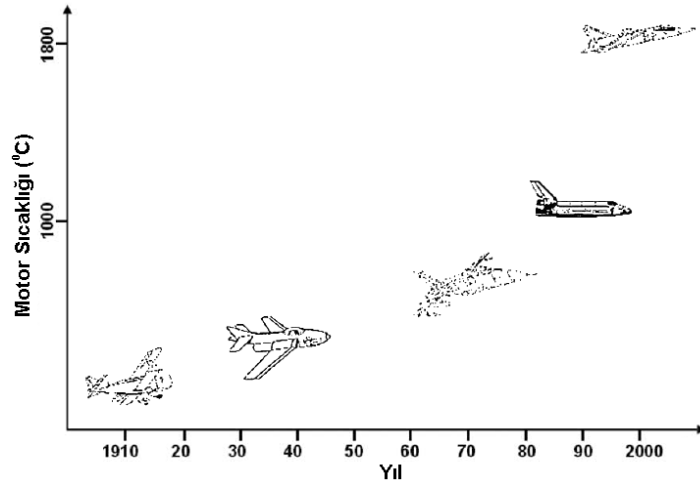
1950’de bir uçak gazı türbini motorunun toplam ağırlığı sadece % 10'unu süperalaşımlardan oluşurken bu rakam 1985’e kadar % 50’ye yükselmiştir. Gelişen teknolojik araştırmalarla uçak ve uzay sanayi alanında süper alaşımlar vazgeçilmez olmaya devam etmektedir. Metal ve diğer alaşımlarına göre süper alaşımların en önemli avantajları yüksek sıcaklıkta dahi yüksek spesifik mukavemet, sürünme ve yorulma dayanımı, yüksek spesifik elastik modülü, yüzey kararlılığı, şekillenebilirlik gibi özelliklerini sürdürebilmesi nedeniyle yüksek performans istenen F119 motor gibi uygulama alanlarda süper alaşımlar tercih edilmektedir (Şekil 1.1). Şekil 1.2’de süperalaşım üretiminin üçte ikisinin, özellikle uçak motorlarının ve kara tabanlı türbinlerin sıcak ucunda, jet motorları ve ilgili bileşenlerin üretimi için havacılık endüstrisi tarafından tüketildiğini göstermektedir. Şekil 1.3’de daha sıcak, daha güçlü ve daha etkili uçak motorlarına olan talebin süper alaşımlarının geliştirilmesine zemin hazırladığı görülmektedir (Ezugwu, 2005). Ayrıca Çizelge 1.1’de görüldüğü gibi korozyon direnci ile beraber yüksek mukavemet istenen biyomedikal cihaz uygulamaları ve sıfır altı sıcaklık uygulamaları gibi farklı endüstriyel alanlarda süper alaşımlar birçok geniş kullanım alanına sahiptir (Donachie ve Donachie, 2002). Çizelge 1.2’de süper alaşım grupları, yapılarındaki alaşım elementlerine göre isimlendirilmiş şekilde verilmiştir (Choudhury ve El-Baradie, 1998). Çizelgede görüldüğü üzere Inconel 625 alaşımı, nikel esaslı alaşımlar grubunda yer almaktadır.



Şekil 1.1. Büyük bir kısmı süper alaşımdan üretilen F119 Gaz türbin motoru (Donachie ve Donachie, 2002).



Şekil 1.2. Süper alaşımın sektörel olarak dağılımı (Ezugwu, 2005).



Şekil 1.3. Uçak motorlarında malzeme kullanımının yüksek sıcaklık mukavemetine bağlı olarak gelişimi (Ezugwu, 2005).

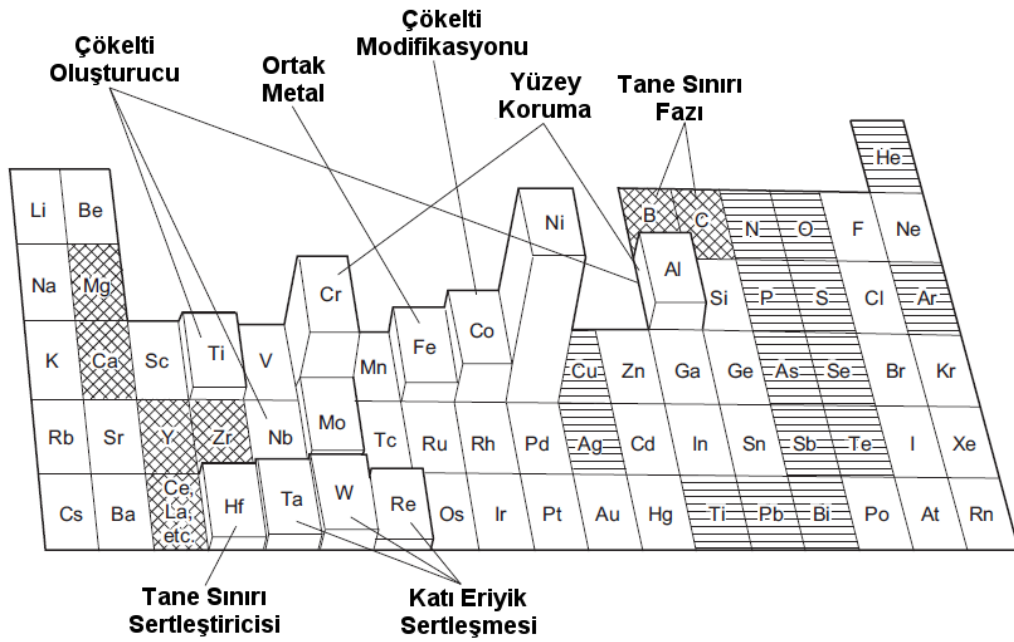
Çizelge 1.1. Süper alaşımların bazı uygulama alanları (Donachie ve Donachie, 2002).

Uçak/endüstriyel gaz türbin parçaları	Diskler, civatalar, şaftlar, muhafaza kapları, pervane kanatçıkları, vanalar, yanma odaları
Buhar türbini enerji santrali parçaları	Civata, bıçak, baca gazı ısıtıcılar
Muhtelif otomotiv parçaları	Turboşarjlar, egzoz valfleri
Metal şekillendirme	Sıcak iş takımları ve kalıplar, döküm kalıplar
Tıbbi uygulamalar	Diş, protez ekipmanları
Uzay araçları	Aerodinamik ısı kalkanı, roket motor parçaları
Isıl işlem ekipmanları	Tepsiler, Fikstür, konveyör bantları
Nükleer güç sistemleri	Kontrol çubuğu sürücü mekanizmaları, akış valfleri, yaylar
Kimya ve petrokimya endüstrisi	Civatalar, valfler, reaksiyon tankları, borular, pompalar

Çizelge 1.2. Süper alaşımların sınıflandırılması (Choudhury ve El-Baradie, 1998).

Demir Esaslı	Nikel Esaslı	Kobalt Esaslı
-Incoloy (800, 801, 802, 807, 825, 903, 907, 909) -A-286 -Alloy 901 -Discaloy -Haynes 556 -H-155 -V-57	-Inconel (587, 597, 600, 601, 617, 625, 706, 718, X750) -Nimonic (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE.11, PE.16, PK.33) -Rene (41, 95) -Udimet (400, 500, 520, 630, 700, 710, 720) -Pyromet 860 -Astroloy -M-252 -Hastelloy (C-22, G30, S, X) -Waspaloy -Unitemp AF-2 IDA6 -Cabot 214 -Haynes 230	-Haynes 188 -L-605 -MAR-M918 -MP35N -MP159 -Stellite 6B -Elgiloy

650°C üzerindeki sıcaklıklarda kobalt esaslı ve nikel esaslı (ikinci fazla güçlendirilmiş) alaşımlara göre demir esaslı alaşımlar, kompleks demir-nikel-krom-kobalt alaşımlar ve nikel esaslı katı eriyik ile sertleştirilmiş alaşımların mukavemetleri daha düşüktür. Ergime noktalarına bağlı olarak, kobalt esaslı alaşımların 1100 °C üzerindeki sıcaklıklardaki mukavemeti, nikel esaslı alaşımlara oranla daha yüksektir. Kobalt esaslı döküm alaşımlar yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahiptir ve matrisleri içerisinde kompleks karbür oluşturuçular mevcuttur (Çay ve Ozan 2005). Süper alaşımlara katılan bazı elementlerin kazandırdığı özellikler Şekil 1.4’de verilmektedir.



Şekil 1.4. Nikel esaslı süper alaşımlarda kullanılan alaşım elementleri. Eleman bloklarının yüksekliği var olabilecek miktarı göstermektedir. Faydalı ve zararlı iz elementleri sırasıyla çapraz tarama ve yatay çizgi tarama ile işaretlenmiştir (Davis, 2000).

1.1.1. Demir esaslı süper alaşımlar

Demir esaslı alaşımlar, ana element olarak yüksek oranda demir ihtiva edip, ilaveten önemli miktarda krom, nikel ve çok az miktarda da molibden veya tungsten içermektedir. Demir esaslı süper alaşımlar karbür, intermetalik çökeltme ve/veya katı-eriyik tarafından mukavemetlendirilir. İntermetalik çökelti genellikle $Ni_3(Al,Ti)$ γ' fazı tipindedir. Bu grubun Ni-Cr oranları ve mukavemetlendirme mekanizmaları, paslanmaz çeliklerle aynı değildir. Demir esaslı süperalaşımlar % 20 den daha fazla Ni içermekte iken (% 25-35), paslanmaz çeliklerde ise % 12-25 Cr ve % 0-20 Ni içermektedir (Çay ve Ozan 2005). Demir esaslı süper alaşımlar, paslanmaz çelik teknolojisinin bir uzantısıdır ve genellikle dövmedir, oysa Ni ve Co esaslı süper alaşımlar, ilgili uygulamaya ve bileşime bağlı olarak dövme veya döküm yapılabilir (Davis, 2000). Demir esaslı alaşımlarda en yaygın çökelti, γ' fazı A-286, V-57 veya Inconel 901 alaşımlarında bulunmaktadır. Diğer demir esaslı süper alaşımlar, esas olarak katı eriyik sertleşmesi ile mukavemetlendirilmiş modifiye paslanmaz çeliklerden oluşmaktadır (Donachie ve Donachie, 2002).

Demir esaslı süper alaşımlar kimyasal bileşenlerine ve sertleştirme mekanizmalarına göre çeşitli gruplara ayrılmaktadır. Demir esaslı süper alaşımlara örnekler; A-286, 901, Discaloy, Haynes 556, Incoloy (800, 801, 802, 807, 825, 903, 907, 909), N-155, V-57, 19-9 DL, 16-25-6 (Davis, 2000). A-286 ve V-57 grubu % 25-35 Ni içeriğine sahiptir. A-286 ve V-57 grubu yüzey merkezli kübik (YMK) γ' fazı ile sertleştirilmiş demir esaslı süper alaşımlardır. Bu grup γ' fazı Ti'ca zengin içeriğe sahiptir, ancak burada Ti/Al oranı dikkate alınmalıdır. Yüksek miktarda Ti/Al oranı YMK yapıdaki γ' faz yerine hegzagonal sıkı paket yapısında $\gamma\text{Ni}_3\text{Ti}$ fazının oluşmasına sebep olmakta ve bu fazın mukavemete etkisi daha azdır. A-286 süper alaşımı türbinlerde kullanılmaktadır. Inconel X750 ve Inconel 901 alaşımları ikinci grup için örnek verilebilir, en az % 40 Ni içeriğine ve yüksek oranda çökelti oluşturan elementlere ve katı eriyik mukavemetlendiriciye sahiptir. Başka bir grup ise YMK γ' fazı ile sertleştirilmiş demir-nikel-kobalt esaslı Inconel 903, 907, 909, Pyromet CTX-1 ve Pyromet CTX-3 alaşımlarıdır. 650 °C sıcaklıkta demir esaslı bu alaşımlar düşük ısıl genişleme ve yüksek dayanım özelliği ile kullanılmaktadır. Demir esaslı bu alaşımlarda düşük miktarda Ti ile yaşlandırma sırasında matriste yarı kararlı $\gamma'(\text{Ni}_3\text{Ti},\text{Al})$ fazının oluşmasına neden olur ve γ' fazına göre sertleşmeye daha az etkisi vardır. Bu alaşımlar genellikle gaz türbin motorlarının gövde kısımlarında, dönen ve sabit parçaların arasında ve türbin disklerinde kullanılmaktadır (Turan, 2013).

1.1.2. Nikel esaslı süper alaşımlar

Nikel esaslı alaşımlar, 550 °C' yi aşan yüksek sıcaklıklarda üstün mukavemet ve oksidasyon direncinden dolayı tercih edilirler (Ribeiro ve Bahia, 2011). En az % 50 oranında Ni içeren alaşımlar nikel esaslı alaşımlar olarak adlandırılır. Ek olarak, silikon, fosfor, kükürt, oksijen ve azot gibi zararlı elementler uygun eritme uygulamaları ile kontrol edilmelidir. Selenyum, bizmut ve kurşun gibi diğer elementler kritik parçalarda çok küçük (ppm) seviyelerde tutulmalıdır. Nikel esaslı süper alaşımlar % 10–20 Cr, yaklaşık % 8'e kadar Al ve Ti, % 5–15 Co ve az miktarda bor, zirkonyum, magnezyum ve karbon içerirler. Diğer katkı maddeleri molibden, niyobyum ve tungsten olarak ön plana çıkar. Yüzey kararlılığını artırmak için krom ve alüminyum gereklidir (Choudhury ve El-Baradie, 1998). Nikel esaslı süper alaşımları katı eriyik sertleştirici elementler ile mukavemetlendirilmiş, çökelti ile sertleştirilen ve oksit-dağılım ile mukavemetlendirilmiş olmak üzere üç grupta inceleyebiliriz. Katı eriyik alaşımlar

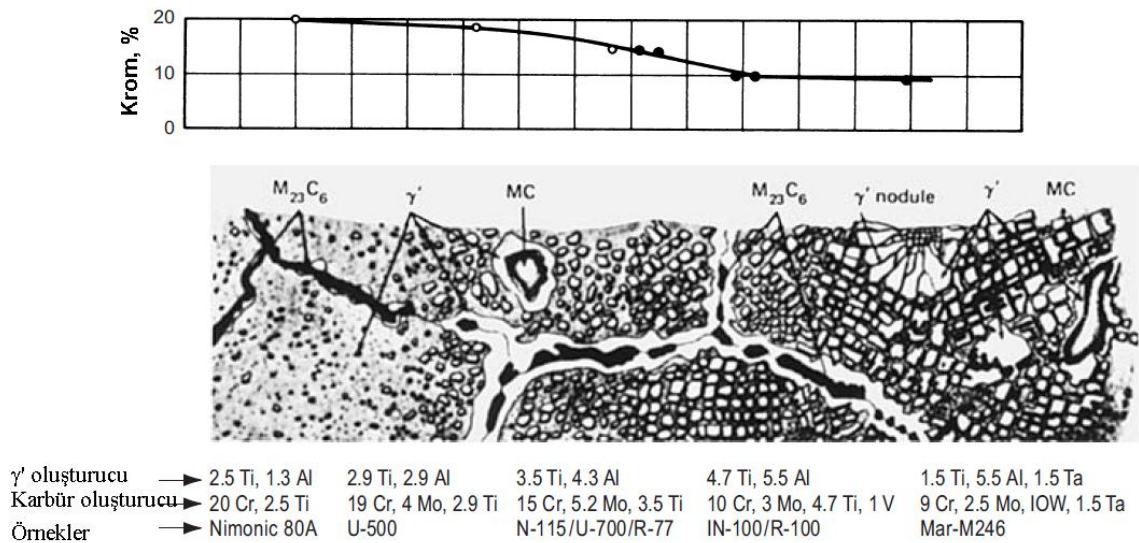
içeriğinde ya hiç ya da çok düşük miktarda, alüminyum, titanyum ve niyobyum bulundurmaktadır. Çökelti ile sertleştirilen alaşımlar ise alüminyum ve titanyumun yanı sıra yüksek miktarda niyobyum içermektedirler. Oksit dağılım ile sertleştirilen alaşımlarda ise bir miktar ince oksit partiküller bulunmakta ve bu partiküller toz metalurji yöntemi ile üretilmektedirler (İnanır, 2012).

Katı eriyik sertleştirilmiş nikel esaslı süper alaşımlar en önemli sınıf nikel esaslı süper alaşımlar olmasına rağmen, bir östenitik YMK matrisinde intermetalik bileşik çökeltmesi ile kuvvetlendirilir. γ' fazı titanyum ve alüminyum alaşımları için mukavemetlendirme çökeltisidir. Bu alaşımları örneklersek, dövme alaşımlar için Waspaloy, Astroloy, U-700 ve U-720 veya döküm alaşımlar için Rene 80, Mar-M-247 ve IN-713'dir. γ'' fazı niyobyum ile mukavemetlendirilmiş nikel esaslı süper alaşımlar için, mukavemetlendirme çökeltisidir. Bu γ'' fazı mukavemetlendirilmiş alaşımlar IN-718 ile tanımlanmıştır. Bazı nikel esaslı alaşımlar, niyobyuma ilaveten titanyum ve / veya alüminyum içerebilir ve γ' ve γ'' fazlarının her ikisi de mukavemetlendirme de çökelti olarak kullanılabilir. Bu tip alaşımlar IN-706 ve IN-909'dur. Bu üç alaşım (IN-718, IN-706 ve IN-909) bazen demir nikel esaslı süper alaşımları olarak listelenmiş olabilir. Esas olarak katı eriyik mukavemetlendirilmiş nikel esaslı süper alaşımlar Hastelloy X ve Inconel 625 alaşımlarıdır. Katı eriyik ile mukavemetlendirilmiş nikel esaslı alaşımlarında karbür ve / veya intermetalik bileşik çökeltmesinden dolayı bir miktar ilave mukavemet elde edebilir (Donachie ve Donachie, 2002). Nikel esaslı süper alaşımlar YMK yapıya sahip olduklarından dolayı yüksek sıcaklık uygulamalarında yer alırlar. Bu da atomlar arasındaki bağdan oluşan kohezif enerjinin artmasıyla birlikte tokluk ve sünekliliği sağlamaktadır. Bununla birlikte YMK formunda oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar kararlılık gösteren nikel bu koşullarda faz dönüşümünün olmaması sonucunda yapıda yüksek sıcaklık bileşeni olarak kullanımına imkân vermektedir (İnanır, 2012). Nikel esaslı alaşımlar, bir uçak motorunun imalatında gerekli olan toplam malzemenin % 45-50'sini oluşturmaktadır. Nikel esaslı alaşımlar döküm, dövme ve sinterleme (toz metalurjisi) yöntemleri ile üretilmektedir. Nikel esaslı alaşımlar, östenitik paslanmaz çelikte olduğu gibi hızlı şekillendirildiğinde kendiliğinden sertleşme özelliği sergilemektedir. Böylece talaşlı imalat sırasındaki yüksek basınç, bütünlük ve tolerans istenen işlenmiş küçük kalınlıktaki parçalarda şekil

bozukluğuna neden olabilecek bir sertleşme etkisi oluşturabilir (Ribeiro ve Bahia, 2011).

Nikel esaslı alaşımların talaşı imalatı sırasında ortaya çıkan problemler, takım ömrünün kısalığı ve metalürjik hasarlardır. Nikel esaslı alaşımlar, aşırı yüksek sertlikte olmamalarına rağmen (250-350 HV), yüksek ısıl gerilmelerinden ve ısıl sertliklerinin etkisinden dolayı işlenebilirlikleri zordur. Deformasyon sertleşmesi eğilimleri, yüksek kesme kuvvetleri ve çapak oluşumuna sebep olmaktadır (Ezugwu, 1999).

Nikel ve krom kombinasyonu, nikel esaslı alaşımlara önemli derecede oksidasyon direnci kazandırır. Şekil 1.5.'te nikel esaslı süper alaşımlarda krom içeriğinin mikroyapıya etkisi gösterilmektedir (Turan, 2000). Nikel esaslı süper alaşımlar 650 °C' yi aşan sıcaklıklarda mekanik dayanım açısından paslanmaz çelikten daha üstündür. Nikel esaslı süper alaşımlar; oksidasyon ve korozyona karşı yüksek dirençlerinden dolayı yüksek dayanım ve direnç gerektiren uygulama alanlarında genişçe kullanılmaktadırlar.



Şekil 1.5. Nikel esaslı süper alaşımların mikroyapı değerlendirmesine krom içeriğinin etkisi (Davis, 2000).

Oksidasyon dayanımını arttırmak için krom ilave edilirken, tane sınırında oluşan $M_{23}C_6$ ve M_6C karbürler sayesinde yüksek sıcaklıklarda çatlak yayılımını azaltmaya yardımcı olur. Bor, karbon ve zirkonyum yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirirken,

Bor'un ayrıca yorulma dayanım sınırını artırıcı etkisi de mevcuttur. Bor ve Zirkonyum karbür kabalaşmasını engelleyerek tane sınırı dayanımını iyileştirmektedir.

Nikel esaslı alaşımlar enerji jeneratörlerinde, nükleer enerji fabrikalarında (buhar üretici tüpler ve reaktör karotların yapısal bileşenleri), fosil yakıt fabrikalarında (ısıtıcı tüpler, kül-alıcı sistemler ve ısı-korozyon ihtiyacı duyulan parçalar) yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Çay ve ozan, 2005).

1.1.3. Kobalt esaslı süper alaşımlar

Kobalt esaslı süper alaşımlar, ana element olarak kobalt içermektedir. Ayrıca önemli miktarda nikel, krom, tungsten az miktarda molibden, niobiyum, tantal, titanyum ve bazen demir gibi elementler de içermektedir (Çay ve Ozan 2005). Uzun yıllar boyunca, ısıya dayanıklı alaşımların en yoğun kullanan sektör gaz türbini endüstrisidir. Uçak gaz türbini elektrik santrallerinde kullanılan malzemelerden istenenler sırasıyla yüksek sıcaklık dayanımı, ısı yorulma direnci ve oksidasyon direncidir. Tipik olarak düşük dereceli yakıtları yakan ve daha düşük sıcaklıklarda çalışan karada kullanılan gaz türbinlerde sülfidasyon direnci en büyük endişe kaynağı olmuştur. Günümüzde, fosil yakıtların ve atıkların yakılmasında daha fazla verimlilik istendiğinden ve yeni kimyasal işleme teknikleri geliştirildikçe ısıya dayanıklı alaşımların kullanımı daha genişlemektedir. Kobalt esaslı alaşımlar, yüksek sıcaklıktaki uygulamalarda nikel ve nikel-demir alaşımları kadar yaygın olarak kullanılmamasına rağmen, kobalt esaslı ısıya dayanıklı alaşımlar, sülfidasyona karşı mükemmel dirençleri, sıcak korozyon ve nikel ve nikel-demir alaşımlarında γ' ve γ'' çökeltilerinin çözüldüğü sıcaklıklarda dayanıklılıkları nedeniyle önemli bir rol oynamaktadır. Stellite 21 esas olarak aşınma direnci istenen yerlerde kullanılan kobalt esaslı ısıya dayanıklı bir alaşımdır. Stellite 21'in ilk kullanımından bu yana, kobalt esaslı ısıya dayanıklı malzemeler yüksek sıcaklık kapasitelerini artırmak için çeşitli geliştirme aşamalarından geçmiştir. Molibden, orta miktarda nikel ve krom içeriği, daha düşük karbon içeriği ve nadir toprak ilaveleri yerine günümüz kobalt esaslı yüksek sıcaklık alaşımları tungsten (veya tantal) içermektedir (Davis, 2000).

Kobalt esaslı dökme ısı dayanımlı alaşımlar ikinci dünya savaşı sırasında ilk kez yüksek gerilmeler altında çalışan gaz türbin bıçaklarında kullanılmıştır. Kobalt esaslı ilk alaşım, yüksek gerilme altında sürünme ve kırılma özellikleri açısından diğer alaşımlarla kıyaslandığında Fe-Cr-Ni ve Fe-Ni-Cr alaşımlarının kullanıldığı sıcaklıklar

kadar yüksek sıcaklıklarda kullanılmasa da yüksek gerilme altında sürünme ve kırılma özellikleri açısından memnun edici sonuçlar vermiştir (Sarıköse, 2015).

Kobalt esaslı alaşımları; aşınma karşı direnç istenen yerler için tasarlanmış yüksek karbonlu alaşımlar, yüksek sıcaklıkta dayanım istenen yerler için tasarlanmış düşük karbonlu alaşımlar ve korozyon veya aynı zamanda korozyon ve aşınma karşı direnç istenen yerler için tasarlanmış düşük karbonlu alaşımlar olarak üç grupta sınıflandırabiliriz (Davis, 2000). Kobalt esaslı süper alaşımlar, karbürlerin ve katı eriyik sertleştiricilerin bir kombinasyonu ile mukavemetlendirilir. Bu alaşımlardaki temel ayırım döküm ve dövme yapılar arasındadır. Döküm alaşımları olarak X-40, dövme alaşımları ise L-605 (HA-25) olarak sınıflandırılmaktadır. Nikel veya demir nikel esaslı süper alaşımlarda γ' çökeltisi kadar aynı derecede fayda sağlayan intermetalik bir bileşik kobalt esaslı sistemlerde geniş bir aralıkta etkili olduğu gözlenmemiştir (Donachie ve Donachie, 2002).

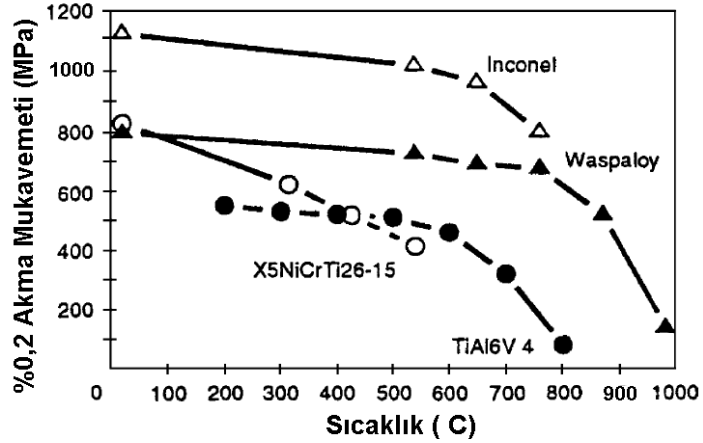
Alaşımların özelliklerinin birçoğu (özellikle gerilmeye verdiği tepki); krom, tungsten ve molibdenin katı eriyik mukavemetlendirici etkileri; metal karbürlerin oluşumu ve krom tarafından verilen korozyon direnci ile kobaltın kristalografik yapısından kaynaklanmaktadır. Genel olarak, daha yumuşak ve daha tok bileşimdeki alaşımlar gaz türbini kanatları ve kovaları gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için tercih edilmektedir. Daha sert türleri ise aşınma karşı direnç istenen yerlerde kullanılır. (Davis, 2000). Kobalt'ın ergime sıcaklığı (1495 °C) ve yoğunluğu (8.90 g/cm³) gibi bir çok fiziksel özelliği nikel benzer. Oda sıcaklığında sıkı paket hegzagonal (SPH) yapısına sahip olan kobalt, 417 °C' de allotropik dönüşüme uğrayarak YMK kafes yapısına dönüşür. Döküm kobalt esaslı süper alaşımlar; % 50-60 Co, % 20-30 Cr, %5-10 W ve % 0.1-1.0 C içermektedir. Bu alaşımların dengesi nikel, tantal, demir, niobyum vb. gibi elementlerle sağlanmaktadır. Kobaltın krom, nikel, tungsten, karbon ve diğer alaşım elementleri ile alaşımlanarak elde edilen karmaşık süper esaslı kobalt alaşımları, ilk olarak 1943 yılından bu yana gaz türbini motorlarında kullanılmaya başlandığından beri büyük gelişim göstermiştir. Genel olarak kobalt esaslı süper alaşımlar ısı işleme tabi tutulmaz. Fakat kaynak veya talaşlı imalat istendiğinde bu kural bozulabilir. Kobalt esaslı süperalaşımlar ikincil karbür fazları veya intermetalik bileşikleri içerdiklerinden dolayı hiçbiri tam katı-eriyik alaşımı değildir. Bu durum kobalt esaslı süperalaşımlarda yaşanmaya ve oda sıcaklığında süneklik kaybına da sebep olmaktadır (Bircan, 2014).

Kobalt esaslı süper alaşımlar; nispeten düşük gerilmelerde ve yüksek sıcaklıklarda uzun ömürlü olması istenen statik parçalarda kullanım alanı bulmuşlardır. Kobalt esaslı süper alaşımların tercih nedenlerini başlıca sıralarsak; ergime sıcaklığının yüksek olması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda, demir ve nikel esaslı süper alaşımlara kıyasla daha yüksek dayanım gösterirler, bileşimlerdeki yüksek krom nedeni ile mükemmel sıcak korozyon direncine sahiptirler. Bu nedenle de gaz türbinlerindeki atmosferde çalışacak parçalar için uygun malzemelerdir. Nikel esaslı süper alaşımlara göre çok daha mükemmel termal yorulma direncine sahiptirler ve kaynak edilebilirler. Kobalt esaslı süperalaşımlarda vakumda ergitilme ihtiyacı olmadığı için nikel esaslı süperalaşımlara göre daha düşük maliyetlidir. Bu alaşımların oksidasyon dirençleri nikel esaslı alaşımlara göre daha düşüktür ve özellikle yüksek sıcaklıklarda korozyon dirençleri küçüktür. Kobalt esaslı alaşımların yorulma dayanımları da düşüktür ve bundan dolayı yüksek sıcaklık düşük gerilmelerin olduğu, endüstriyel türbinlerin vana ve nozul gibi statik çalışan ve uçak motorlarının diğer parçalara göre daha düşük gerilmelerin olduğu parçaların üretiminde kullanılırlar (Kahraman, 2013).

1.2. Inconel 625 ve Uygulama Alanları

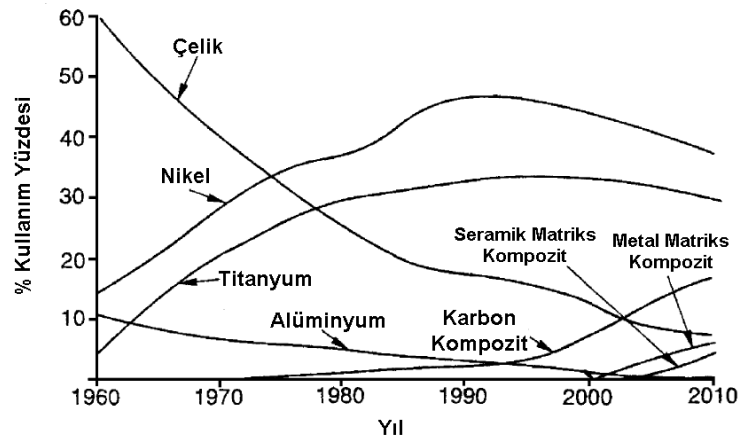
Inconel 625, ilk kez 1960'lı yılların başında üretildi. Inconel 625 mükemmel mekanik mukavemet, ısıl deformasyona direnç, iyi yüzey kararlılığı ve oksidasyona karşı direnç gösteren nikel esaslı bir süper alaşım olarak tanımlanabilir. Inconel 625, molibden, niyobyum ve demir gibi diğer alaşım elementleriyle çoğunlukla nikel (ağırlıkça % 61,0) ve kromdan (ağırlıkça % 21,5) oluşmaktadır. Inconel 625 parçalar, döküm, toz metalurjisi, püskürtme ile şekillendirme, kaynakla kaplama ve boru bileşenlerinin eş kalıp ekstrüzyonu gibi çeşitli geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmektedir (Gonzalez vd., 2019). Başlangıçta ultra kritik buhar boruları için düşünülse de atmosferik ortam, deniz suyu, nötr tuzlar ve alkali ortamlar gibi ılıman ortamlardan, yakma fırını veya süper kritik su oksidasyon işlemlerinin gerçekleştiği şiddetli ortamlara kadar geniş bir yelpazede uygulama alanına sahiptir. Inconel 625 hafif ortamlarda, örneğin atmosferik ortam, tatlı su ve deniz suyu, nötr tuzlar ve alkali ortamlarda korozyona uğramaz (Arteaga vd., 2010). Esas olarak Ni-Cr matrisindeki niyobyum ve molibden gibi refrakter elementlerin katı eriyik ile sertleştirilmesi sonucu elde edilen nikel esaslı bir süper alaşım olan Inconel 625, üstün yüksek çekme ve sürünme dayanımı, mükemmel üretim kabiliyeti, kaynaklanabilirlik ve yüksek servis

sıcaklıkları altında korozyona karşı dirençli olması nedeniyle kimya, petrokimya, havacılık ve nükleer enerji tesislerinde de tercih edilmektedir. Uçak motorunda kullanılan alaşımların artan sıcaklıkla akma mukavemetindeki azalma Şekil 1.6'de verilmektedir ve Inconel alaşımı diğer alaşımlara göre daha yüksek sıcak mukavemet sergilemektedir.



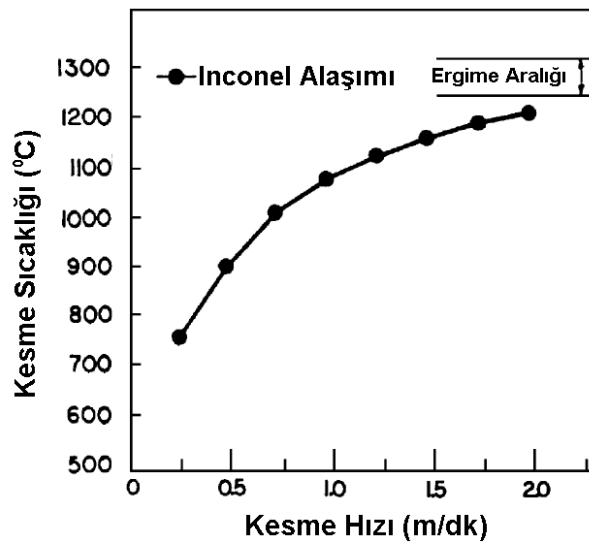
Şekil 1.6. Uçak motor alaşımlarındaki yüksek sıcaklık mukavemeti (Ezugwu vd., 2003).

Artan enerji tüketimi ve karbondioksit emisyonundaki çevresel kaygılar nedeniyle hafif, yüksek sıcaklık ve çok eksenli gerilme koşullarında çalışan ileri uçak motor ve mikro-türbin ve ısı eşanjör boru üretimi için de Inconel 625 alaşımı uygulanabilecek potansiyele sahiptir (Wang vd., 2016; Zhang vd., 2018). Şekil 1.7'de uçak türbin imalatında kullanılan her bir malzemenin kullanım yüzdesi verilmektedir. 20. yüzyılın sonuna kadar nikel esaslı ve titanyum alaşımlarının kullanımında artan bir ivme mevcut olup havacılık sektöründe rekabetten kopmayacağı görülmektedir (Ezugwu vd., 2003). Inconel 625'in gerilmeli korozyon çatlağına karşı olağanüstü direnç göstermesi deniz suyu uygulamalarında, nükleer su reaktörlerinde reaktör çekirdeği ve kontrol çubuğu parçası olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Badiger vd., 2015).



Şekil 1.7. Uçak türbin imalatında malzeme kullanımı (Ezugwu vd., 2003).

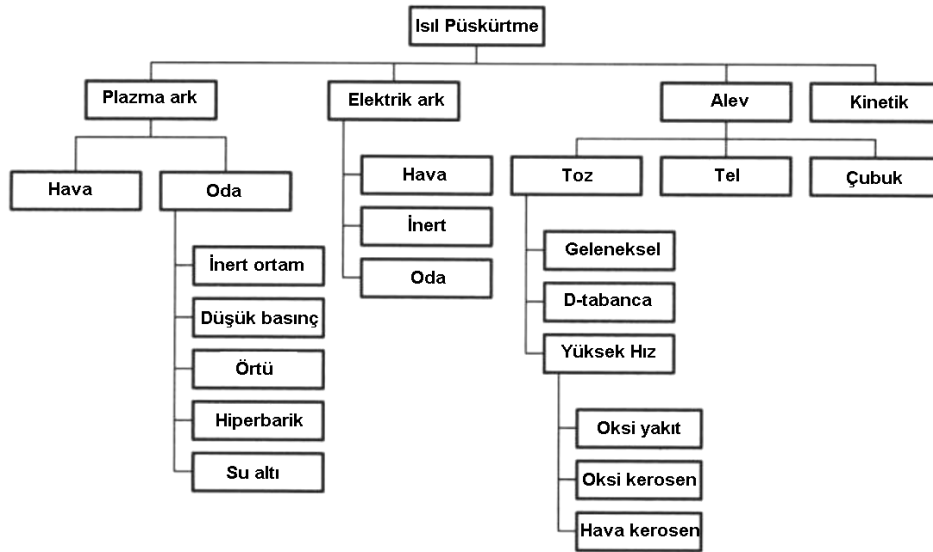
Geleneksel imalat yöntemleriyle Inconel alaşımlarının talaşlı imalat sırasında aşırı takım aşınması ve düşük talaş kaldırma kabiliyeti gibi sorunlar yaşanmaktadır. Takım-talaş arayüzey sıcaklığının alaşımın ergime noktasına yaklaştığı kesme hızı aralığında seramik takımın sahip olduğu sıcak mukavemet ile nikel esaslı süper alaşımın işlenebilirliği sınırlı değildir (Şekil 1.8). Yüksek kesme hızlarında kesme kenarı sıcaklığındaki artışla işlenen malzeme kesici takımın kesme kenarı üzerine kaynakla yapışmaktadır. Ardından kaynaklanan malzemenin rastgele ayrılması seramik takımın aşınmasını hızlandırmaktadır (Ezugwu vd., 2003).



Şekil 1.8. Al_2O_3/TiC kesici takımla Inconel alaşımının talaşlı imalatında kesme sıcaklığına kesme hızının etkisi (Ezugwu vd., 2003).

2. ISIL PÜSKÜRTME

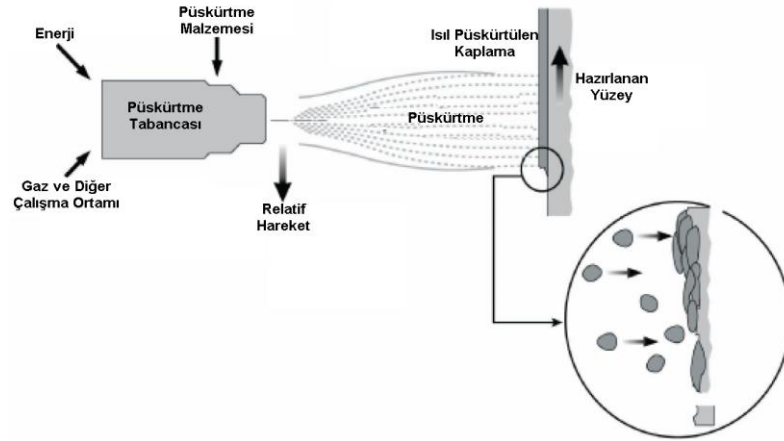
Isıl püskürtme, otomotiv, havacılık, enerji üretimi, petrokimya ve denizcilik dâhil olmak üzere birçok önemli endüstriyel sektörde yüzeyde birkaç milimetreye kadar aşınmaya ve korozyona dayanıklı kaplamaların uygulanması için iyi bilinen bir teknolojidir. Isıl püskürtme ilk olarak 1911'de İsviçre'de Dr. Schoop tarafından gerçekleştirilen alev püskürtme prosesine dayanmaktadır. Son yıllarda, ekipman ve malzeme kalitesindeki iyileştirmeler, ısıl püskürtme işlemlerinin teknik güvenilirliğini artırmış, örneğin biyomedikal, dielektrik ve elektronik kaplamalar gibi yeni pazarlarda önemli bir büyüme sağlamıştır. Sonuç olarak, püskürtme kaplama tedarikçisine, ısıl püskürtme ekipmanı, kaplama malzemeleri ve gaz seçimi açısından birçok seçenek vardır, ancak bunlar genellikle kaplamanın maruz kaldığı ortama bağlıdır (Al-Fadhli, 2003; Tjong, 2013; Amin ve Panchal, 2016). Isıl püskürtme işlemleri, ısı kaynağına bağlı olarak plazma ark, elektrik ark, alev ve kinetik olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.1).



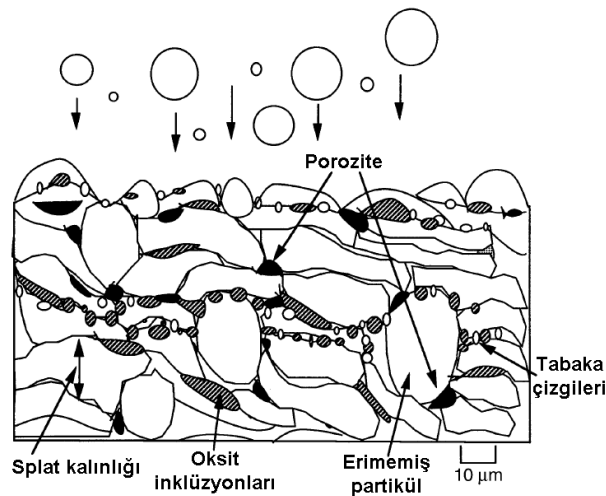
Şekil 2.1. Çeşitli ısıl püskürtme kaplama işlemlerinin sınıflandırılması (Amin ve Panchal, 2016).

Isıl püskürtmede, toz veya tel formundaki malzemeler eritilir ve bir kaplama oluşturmak için metal altlık yüzeyine gönderilir (Şekil 2.2). Isıl püskürtülen kaplama yapısı lamelli veya tabakalı splat yapısı, erimemiş veya yeniden katılmış partiküller, gözenekler, oksit inklüzyonlar, taneler, fazlar, çatlaklar ve bağ arayüzlerinden oluşmaktadır (Şekil 2.3). Isıl püskürtme sistemleri tipik olarak yanıcı gazlar veya bir

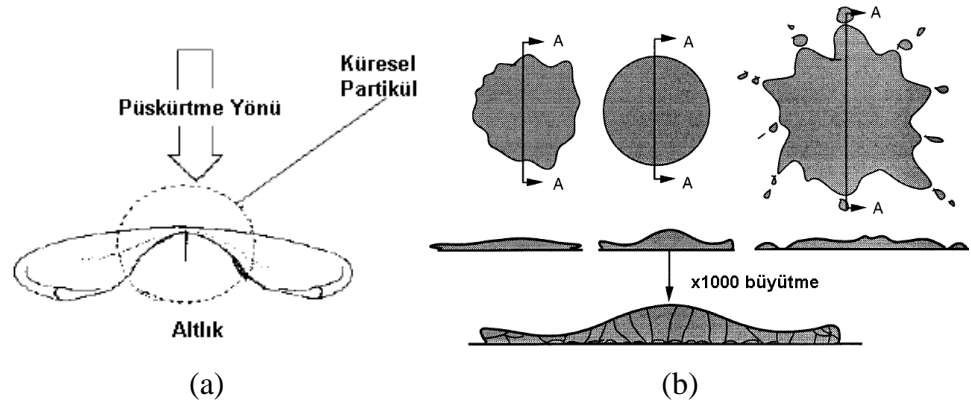
elektrik arki; gaz kontrol konsolu veya güç kaynağı; ve bir toz veya tel besleyicinin birarada bulunduğu bir tabancadan oluşmaktadır. Püskürtme ekipman türü ve kaplama malzemesi (tel veya toz) ne olursa olsun, ısı püskürtme esasen erimiş veya yarı erimiş partiküllerin altlık malzemesine püskürtülmesi işlemidir. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi “splat” yüzeye çarpan bir damla/partiküle verilen terimdir. Altlık yüzeye yaklaşan erimiş partiküller genellikle küreseldir ve altlığa çarptığında alttaki aralıkları (boşlukları) doldurmaktadır. Şekil 2.5’de kaplama kesit görüntüsünde erimiş partiküller yüzeye hızla çarptıkça düzleşir ve ince splatler veya lameller oluşmaktadır. Splatler ısısını altlığa vererek katılaşmakta, birbirleri ile temas haline gelerek yassılaştırmış tabakalar kaplamayı oluşturmaktadır.



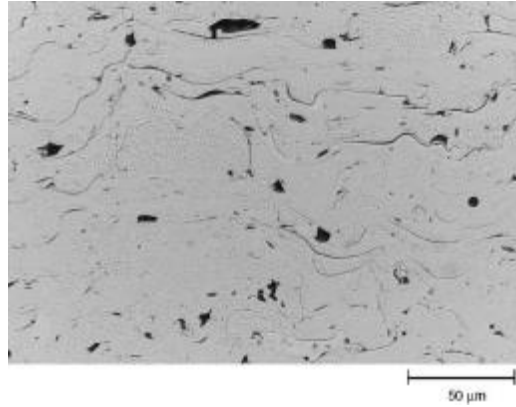
Şekil 2.2. Isıl püskürtme kaplama işleminin genel şematik görüntüsü (Amin ve Panchal, 2016).



Şekil 2.3. Isıl püskürtme kaplama mikroyapısı (Davis, 2004).



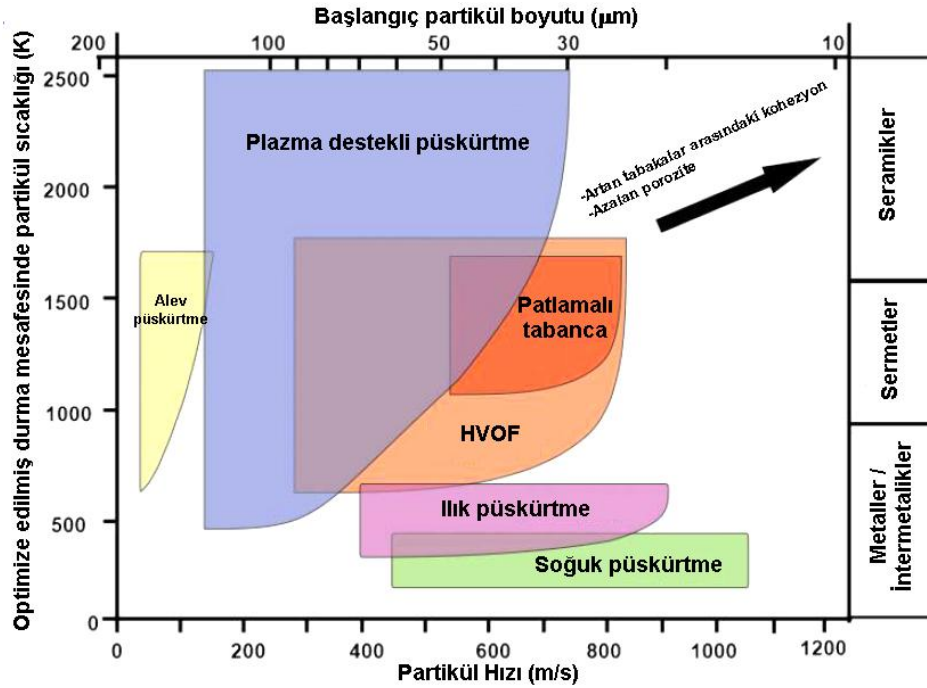
Şekil 2.4. (a) Düz bir altlığa uygulanan ısıl püskürtülmüş küresel partikülün şematik diyagramı (b) tipik ısıl püskürtme splat yapıları (Al-Fadhli, 2003; Davis, 2004).



Şekil 2.5. Plazma püskürtme elde edilen nikel esaslı kaplamanın kesit görüntüsü (Davis, 2004).

2.1. Isıl Püskürtme Kaplama Türleri

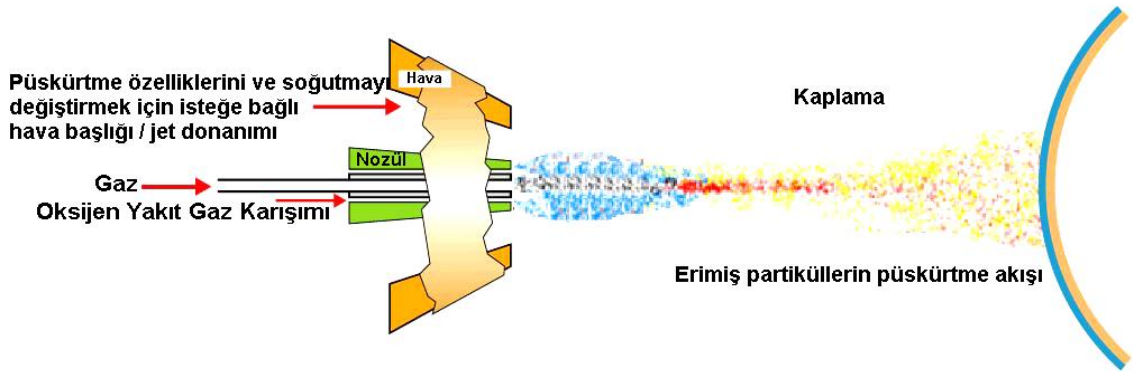
Isıl püskürtme kaplama prosesleri başlıca alev püskürtme, ark püskürtme, plazma püskürtme, detonasyon tabanca püskürtme ve HVOF püskürtmeden oluşmaktadır. Şekil 2.6'de elde edilebilir partikül hızı, partikül sıcaklığı ve başlangıç partikül boyutu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu proses haritası geleneksel sıcaklık-hız haritasından üç açıdan farklıdır: (i) sıcaklık ve hız, ortamdaki ziyade optimize edilmiş partiküller cinsinden temsil edilmiştir, (ii) sağ tarafta kaplama malzeme sınıfını ve (iii) logarimik ölçekte başlangıç partikül boyutu dikkate alınmıştır (Ang ve Berndt, 2014).



Şekil 2.6. Isıl püskürtme işlemlerinin partikül hızına, partikül sıcaklığına ve ortalama başlangıç partikül boyutuna göre sınıflandırılması. Sağ ölçek, her püskürtme işlemine yaklaşık olarak karşılık gelen malzeme aralığını göstermektedir (Ang ve Berndt, 2014).

2.1.1. Alev püskürtme prosesi

Alev püskürtme (Şekil 2.7), düşük sermaye yatırımı, yüksek kaplama hızı ve verimliliği, göreceli kullanım kolaylığı ve ekipman bakım maliyeti ile karakterize edilen ısıl püskürtme işlemlerinin en eskisidir. Alev püskürtme işleminde kaplama malzemesini eritmek için bir ısı kaynağı olarak yanıcı gaza ihtiyaç vardır. Bu proses temel olarak bir kaplama oluşturmak için erimiş malzemenin yüzeye püskürtülmesidir. Kaplama malzemesi olarak toz, tel ve çubuk formundaki çok çeşitli malzemeler püskürtülebilir. Isı kaynağı olarak yakıt gaz-oksijen alevi kullanılmaktadır. Asetilen (C_2H_2) ve propan (C_3H_8) dâhil olmak üzere farklı yakıt gazları da kullanılabilir. Partikül hızı (40 m/sn) nispeten düşük basınç ve düşük akış nedeniyle düşüktür. Alev püskürtme tabancaları ve bileşenlerin büyük çoğunluğu maneldir (Al-Fadhli, 2003; Amin ve Panchal, 2016).



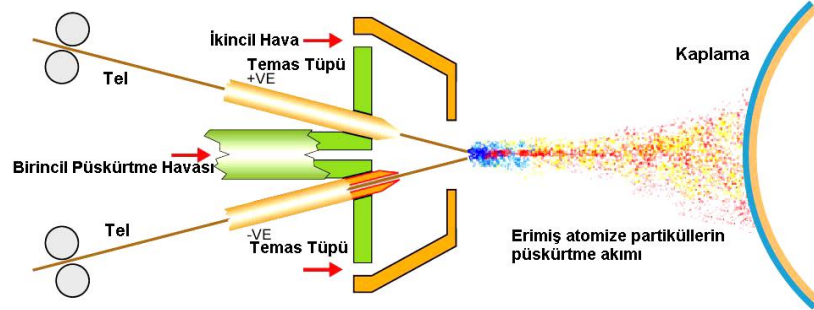
Şekil 2.7. Alev püskürtme prosesinin şematik görüntüsü (Al-Fadhli, 2003).

2.1.2. Ark püskürtme prosesi

Ark püskürtme prosesinde yüksek doğru akım (DC) güç kaynağına bağlı bir çift iletken elektrot tel tabancaya beslenir ve aralarında tellerin uçlarını eriten bir ark oluşturarak eritilir (Şekil 2.8). Proses enerji açısından verimlidir, çünkü enerjisi girdisinin tamamı metali eritmek için kullanılmaktadır. Erimiş malzeme basınçlı hava ile atomize edilir ve altlık yüzeyine doğru gönderilir. Altlık üzerine çarpan erimiş partiküller hızlı bir şekilde kaplama tabakası oluşturmak için katılışlar. Püskürtme hızları temel olarak çalışma akımı tarafından tahrik edilir ve hem erime noktası hem de iletkenliğin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Altlık sıcaklığı çok düşük olabilir, çünkü altlığa doğru sıcak gaz püskürtülmez. Elektrik ark püskürtme ile elde edilen kaplamalar normalde alev püskürtme kaplamalarından daha yoğun ve daha mukavemetlidir. Bu yöntemin düşük işletme maliyeti, yüksek püskürtme hızı ve verimliliği sayesinde geniş alanları yüksek üretim hızlarında kaplamak mümkündür. Elektrik ark püskürtme işlemi ayrıca inert gazlar kullanılarak veya kontrollü bir atmosferde yapılabilir (Al-Fadhli, 2003; Amin ve Panchal, 2016).

Elektrik ark püskürtme prosesinin dezavantajları ise sadece elektriksel olarak iletken tellerin püskürtülebilmesi ve altlığın ön ısıtılması durumunda ayrı bir ısıtma kaynağına ihtiyaç duyulmasıdır. Bununla birlikte, özlü tellerin kullanımı, sermetleri ve amorf malzemeleri içerecek şekilde malzeme yelpazesini genişletmiştir. Özlü teller, çekirdekte toz, boru şeklinde metalik bir kılıftan oluşmaktadır. Bu tozlar genellikle karbür veya amorf alaşımlardır. Özlü teller, farklı bir alaşımın bir kılıfı ile daha küçük bir telin sarılmasıyla da yapılabilir (Davis, 2004). Ark püskürtme prosesinin ana

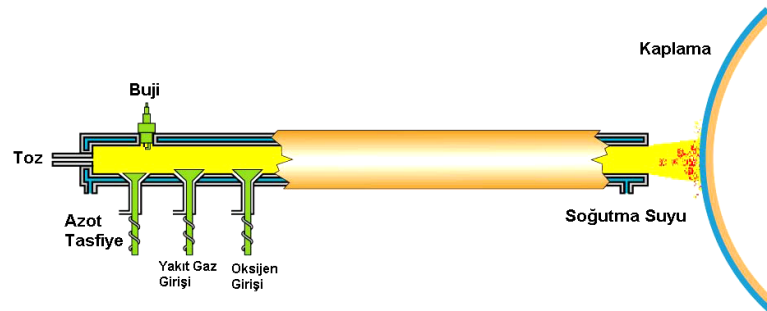
uygulamaları çinko ve alüminyumdan oluşan korozyon önleyici kaplamalar ve büyük parçalar üzerine makine elemanıdır (Al-Fadhli 2003).



Şekil 2.8. Ark püskürtme prosesinin şematik görüntüsü (Al-Fadhli, 2003).

2.1.3. Detonasyon tabanca prosesi

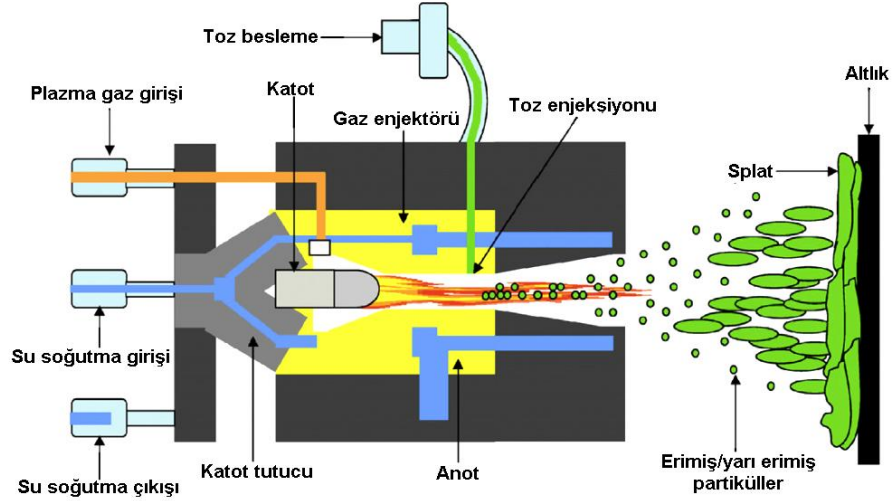
Detonasyon tabancası temel olarak gaz ve toz giriş valflerine sahip uzun su soğutmalı bir haznedir (Şekil 2. 9). Oksijen ve yakıt (genellikle asetilen) hazne içine ölçülü miktarda toz ile birlikte beslenir. Gaz karışımını ateşlemek için bir kıvılcım kullanılır ve ortaya çıkan patlama tozu ısıtır ve haznedeki süpersonik hızla gönderir. Her bir patlamadan sonra uç kısmını temizlemek için bir azot atımı kullanılır. Bu işlem saniyede birçok kez yapılır. Çalışma frekansı nispeten düşük püskürtme hızı (0,3 ile 0,9 kg/saat) olacak şekilde saniyede 4 ile 8 devirdir. Sıcak toz partiküllerin altlığa çarpmasıyla ortaya çıkan yüksek kinetik enerji çok yoğun ve sert bir kaplama oluşmasına neden olur. Bu kaplama prosesi, altlık ile kaplama tozu arasında iyi bir bağlanma ve düşük porozite sağlamaktadır. HVOF tekniğiyle porozite değeri detonasyon tabanca prosesinden çok daha fazladır (Al-Fadhli, 2003; Saini vd., 2017).



Şekil 2.9. Detonasyon tabanca püskürtme prosesinin şematik görüntüsü (Al-Fadhli, 2003).

2.1.4. Plazma püskürtme prosesi

Plazma püskürtme, en gelişmiş ve çok yönlü ısı püskürtme yöntemlerinden biridir. Plazma püskürtme prosesinde, püskürtme ısı kaynağı olarak görev yapan yüksek sıcaklık iyonize olmuş plazma gaz akışını sağlamak için bir DC elektrik arkı kullanılmaktadır. Plazma püskürtme prosesi temel olarak bir kaplama oluşturmak üzere erimiş veya ısı ile yumuşatılmış malzemenin bir yüzeye püskürtülmesidir (Al-Fadhli, 2003). Toz şeklindeki malzeme çok yüksek sıcaklıkta plazma alevine gönderilir ve burada hızlı bir şekilde ısıtılır ve ~400-800 m/s hızlarına çıkarılır (Şekil 2.10). Kullanılan gaza bağlı olarak gazın sıcaklığı 15.000 °C – 20.000 °C arasında olabilir. Sıcak malzeme altlığa çarpar ve hızlı bir şekilde kaplama oluşturarak soğumaktadır. Plazma sırasında, ergime sıcaklığındaki veya yakınındaki tüm malzemelerin yüksek kimyasal aktivite göstermesi nedeniyle atmosfer ortamında gazlar ile partiküller reaksiyona girmektedir. Bu işlem tipik olarak atmosferik plazma püskürtme olarak adlandırılmaktadır. Kaplama malzemelerinin oksidasyonunu en aza indirmek için, plazma tabancası ve aparatı, inert bir atmosfer içeren bir düşük basınçlı odaya veya bir vakum odasına yerleştirilir ve bu kaplama prosesi düşük basınçlı veya vakum plazma püskürtme olarak adlandırılır (Tjong, 2013). Plazma püskürtme ile tungsten gibi refrakter metaller ve zirkonya benzeri seramikleri püskürtebilmek mümkündür. Plazma püskürtmeli kaplamalar HVOF ve detonasyon prosesleri hariç, yüksek püskürtme hızından dolayı diğer ısı püskürtmelerden çok daha yoğun, mukavemetli ve daha temizdir. Plazma püskürtme kaplamaları muhtemelen en geniş ısı püskürtme uygulama yelpazesine sahiptir ve bu da prosesi çok yönlü kılmaktadır. Plazma püskürtme yönteminin dezavantajı nispeten yüksek maliyet ve prosesin karmaşıklığıdır. Diğer bir zayıf yönü ise amorf kalsiyum fosfat ve Tetra Kalsiyum Fosfat (TTCP), Tri-Kalsiyum Fosfat (TCP) gibi biyoaktif kalsiyum fosfat fazı ve kaplamanın mekanik ve yapışma kararsızlığına neden olabilecek oksidasyon gibi yarı kararlı kristalin ürünlerin oluşmasıdır (Al-Fadhli, 2003; Amin ve Panchal, 2016).



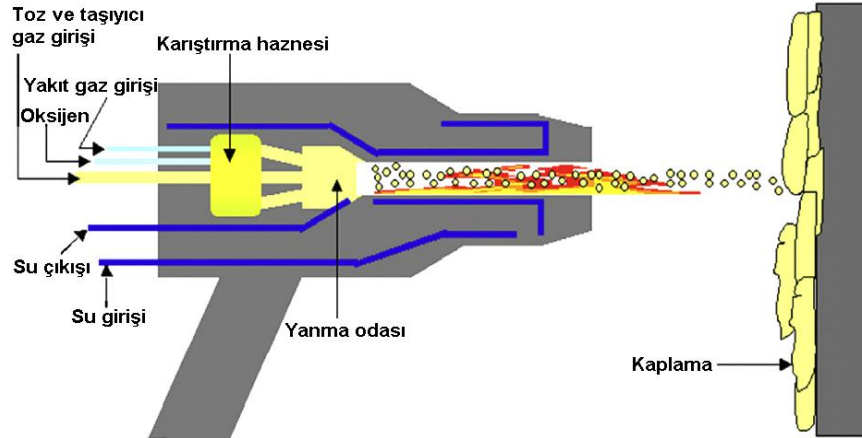
Şekil 2.10. Plazma püskürtme prosesi şematik görüntüsü (Tjong, 2013).

2.1.5. Yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) prosesi

HVOF ısı püskürtme işlemi, temel olarak toz alev püskürtme işlemi ile aynıdır, ancak bu işlem son derece yüksek püskürtme hızı üretmek üzere geliştirilmiştir. Şekil 2.11’de görüldüğü gibi HVOF sistemi su soğutma, partikül enjeksiyonu ve yanma gazlarının süpersonik genişlemesini sağlayan bir nozül denibarettir. Partikül ısı transferi ve verimliliği kalma süresiyle artar. Geleneksel alev veya plazma püskürtmeye göre HVOF tarafından üretilen yüksek gaz hızının partikül hızını artırması kaplama yoğunluğunda ve kaplama yapışmasında bir artış sağlamıştır. Plazma püskürtme ile karşılaştırıldığında daha düşük ortalama partikül sıcaklıkları partikül ergime ve oksidasyon derecesini azaltır. Düşük ortalama partikül sıcaklığına rağmen, erimemiş partikülleri deforme eden HVOF’un yüksek partikül çarpma hızları sayesinde hala yüksek kaplama yoğunlukları elde etmek mümkündür. Bazı partiküllerin ısınması, kinetik enerjinin ısı enerjisine dönüşmesiyle meydana gelir ve bu da yoğun kaplamalar üretmeye yardımcı olur (Davis, 2004). Bu proses diğer ısı püskürtme yöntemlerine kıyasla nispeten yenidir. Yakıt (kerosen, asetilen, propilen, propan ve hidrojen) ve oksijen hazneye beslenir, yanma prosesi hızı arttıran bir nozül çıkışından zorlanan sıcak yüksek basınçlı alev üretmektedir. Yüksek yanma sıcaklığıyla birleştiğinde çok miktarda gaz akışı, nozül çıkışında 1500 ila 2000 m/s aralığında gaz hızları oluşturmaktadır. Alev sıcaklığı, 2900 °C düzeyinde nispeten düşüktür, bu da seramik ve refrakter metallerin püskürtülmesini zorlaştırmaktadır (Al-Fadhli, 2003). Bekleme süresi (tozun alevde olduğu zaman) kısa olduğundan, büyük toz partiküllerine ısı

transferi yeterli olmayabilir. Diğer işlemlerden daha ince ve daha dar partikül boyut dağılımı gerekmektedir.

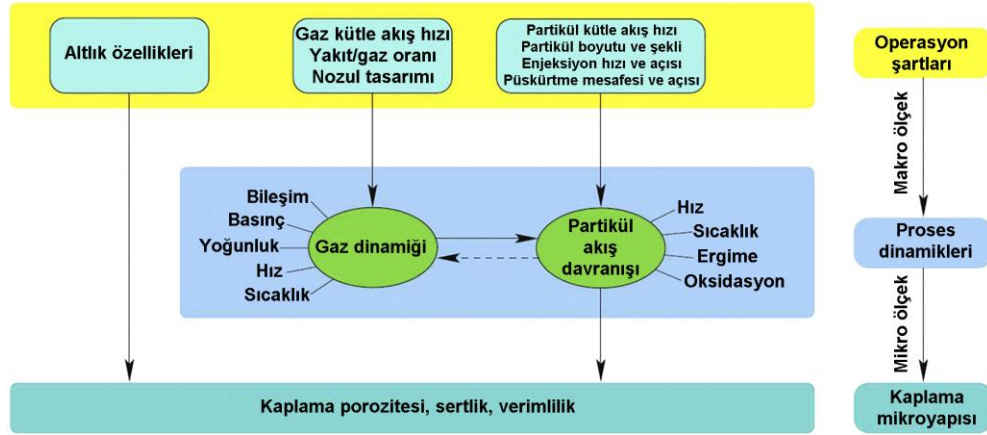
Sıkıştırılmış hava, alevi hızlandırır ve HVOF tabancası için soğutma görevi üstlenir. HVOF ile elde edilen kaplamalar detonasyon proses ile elde edilen kaplamalara benzer davranış gösterir. HVOF kaplamalar çok yoğun ve mukavemetli olup düşük kalıntı çekme gerilmesi veya bazı durumlarda diğer proseslere daha önceden mümkün olandan daha kalın kaplamalara olanak sağlayan basma gerilmesi oluşturmaktadır (Al-Fadhli, 2003; Saini vd., 2017). Bu nedenle, 2 mm'ye kadar yoğun HVOF kaplamalar elde etmek mümkündür (Ang ve Berndt, 2014). Altlık yüzeyine çarpan partiküllerin çok yüksek kinetik enerjisi, yüksek kaliteli HVOF kaplamalar oluşturmak için partikülleri tamamen eritmeyebilir. Bu kesinlikle karbür tipi kaplamalar elde etmek için bir avantajdır. HVOF kaplamalar diğer birçok ısıl püskürtme proseslerinde bulunmayan en yüksek yoğunluk ve mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Daha önce ısıl püskürtme kaplamalar için uygun olmayan yeni uygulamalar kullanabilir hale gelmektedir.



Şekil 2.11. HVOF prosesi şematik görüntüsü (Tjong, 2013).

HVOF püskürtme prosesinin çok ölçekli özellikleri ve ilgili operasyon parametreleri Şekil 2.12'de verilmiştir. Püskürtülen kaplamaların genel mikroyapısı, partikül deformasyon derecesine, splatlerin sinterlenmesine ve kaplama tabakasının katılma hızına, altlığın özelliklerine (ör., altlık sıcaklığı) ve aynı zamanda altlığa çarpma noktasında partiküllerin fiziksel ve kimyasal durumuna (sıcaklık, hız, erime oranı ve oksit içeriği, püskürtme mesafesi vb.) bağlıdır. Partiküllerin akış davranışı,

püskürtme parametreleri (yakıt-oksijen oranı ve toplam gaz akış hızı) ile ayarlanabilen gaz karışımının dinamik durumu ile ilgilidir (Ghadami ve Aghdam, 2019).



Şekil 2.12. HVOF püskürtme işleminin çok ölçekli özellikleri (Ghadami ve Aghdam, 2019).

3. PLAZMA NİTRÜRLEME

Malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için farklı yüzey işlemleri ve sert koruyucu kaplamalar kullanılmaktadır. Nitrürleme, yüzey mühendisliği için en popüler ve yaygın yöntemlerden biridir. Nitrürleme genellikle çeliğe uygulanır, ancak aynı zamanda dökme demir, alüminyum, titanyum ve paslanmaz çeliğe de uygulanmaktadır. Nitrürlü çelikler, üstün sertlik ve yüksek yüzey sertlikleri, yorulma ömürleri ve tribolojik özellikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak sert, ince kaplamaların uzun süreli kullanımını sınırlayan engel, kaplama altlık sisteminin yük taşıma kapasitesidir. Sert kaplama çok ince olduğunda, altlık malzeme uygulanan yükün çoğunu taşımaktadır. Altlık malzeme, temas yükünü taşıma ve kaplamayı destekleme kapasitesine sahip değilse kaplamanın erken hasara uğramasına yol açan plastik deformasyon gerçekleşecektir (Wang, 2005).

Nitrürleme işlemi sıcaklık-zaman rejimine bağlı olarak 430 °C ile 590 °C sıcaklık aralığında (500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çökeltilerin veya 450 °C'nin altında arayer katı çözeltilsinin oluşmasına izin verecek şartlarda) azotça zengin bir ortamda atomik azotun malzeme yüzeyine yayılımı ile elde edilen bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir. Yüzey sertliği ve sertleşme derinliği öncelikle işlem süresine, sıcaklığa, gaz karışımına ve iş parçasının bileşimine bağlıdır. Bu işlem düşük sıcaklık nedeniyle en az şekil değişimi ve mükemmel boyutsal kontrol sağlanmasına imkân verir. Azot demir içinde yayılarak nitrürler oluşturur. Nitrürler, mikroskopla görülemeyecek kadar küçük partiküller halinde yapıya dağılmıştır. Yapıyı sertleştiren bu nitrürlerdir (Kutschmann vd., 2019).

Temel olarak tuz banyosu, gaz ve plazma nitrürleme olmak üzere üç farklı nitrürleme işlemi vardır. Endüstride gaz nitrürleme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu işlemde, 500 - 590°C arasında ısıtılan altlık malzeme üzerine atomik azotun yayılmasını sağlamak için amonyak gazı çözünür. Çözünen amonyak, altlık üzerinde nitrür oluşturmak için Al, Cr gibi alaşım elementleriyle reaksiyona girer. Nitrürleme sonrası ϵ (HSP) ve γ (YMK) fazlarını içeren kırılğan beyaz tabaka oluşma eğilimindedir. Bu iki fazın farklı kafes yapıları içermesi yüksek iç gerilmeler doğurur ve mikroçatlakların bu bölgelerde oluşmasına sebep olur (Mittemeijer, 2013).

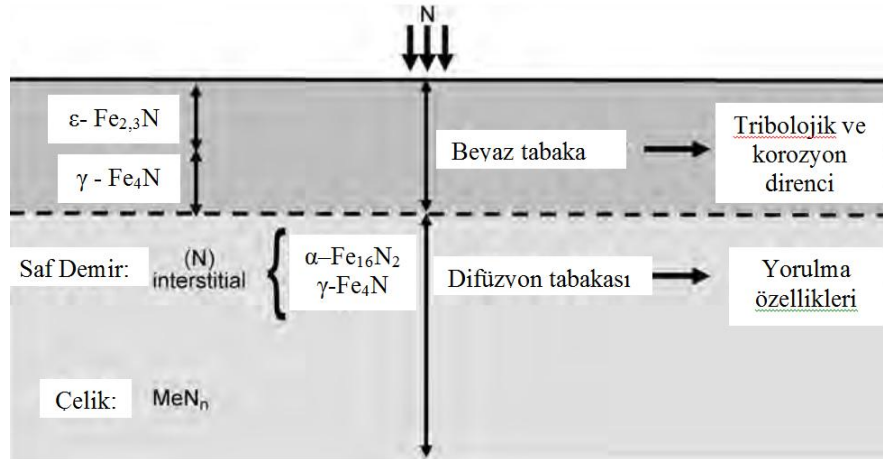
Plazma nitrürlemede, elektriksel boşalma (glow discharge) şartlarında iyonize olan azotun elektrostatik alana doğru yönlendirilmesi ve ardından katoda bağlı altlığı

bombardıman etmektedir. Bu proses, 1-10 mbar basınçlı vakumda 400-1000 V gerilim altında uygulanan doğru akımın azotu iyonlarına ayırması ve iyon haline gelen azot atomlarının malzeme yüzeyine çarparak yüzeye doğru yayınmasıyla gerçekleşmektedir. Bu yöntemde, malzeme yüzeyine iyonize edilmiş azotu yaymak için aktif ve reaktif plazma hali kullanılır. İşlem teorik olarak, elektriksel bakımdan iletken malzeme yüzeyine arayer azot atomunun yayınma işlemidir. Plazma nitrüleme işlemi N_2 , H_2 , Ar ve NH_3 gaz ortamında, 350-590°C arasında gerçekleştirilebilir. Yüzeyi sertleştirilecek iş parçasının Cr, Al, V, Mo ve Ti gibi alaşım elementleri içermesi yüzey sertliğini daha da artıracaktır. Bu nedenle geleneksel nitrüleme işlemi nitrür oluşumunu destekleyecek alaşım elementleri içermeyen karbon çelikleri ve dökme demirlerde kullanılmaz. Plazma nitrüleme işlemi sonrası en dışta beyaz tabaka ve onun altında da difüzyon tabakası olarak adlandırılan yapılar oluşur ve yüzeyde yüksek basma kalıntı gerilmelere sahip ince ve sert bir tabaka meydana gelir.

3.1. Plazma Nitrüleme İşleminin Mekanizması

Plazma nitrüleme, gazlaştırılmış bir ortamda yer alan iki elektrota bir voltaj uygulanması suretiyle elektriksel boşalma şartları altında iyonize olan gaz atomlarının nitrülenecek iş parçası yüzeyine hızla gönderilmesiyle gerçekleştirilen bir işlemdir. Azot iyonları elektrostatik alana doğru ivmelenir ve katoda bağlı iş parçasını bombardımana uğratar. Yüzeye çarpan iyonlar, yüzeyde yüksek sıcaklıklar oluşturarak buharlaşmaya yol açar. Bunun sonucu olarak iş parçası yüzeyindeki demir ve diğer alaşım elementleri, metalik olmayan element atomları (karbon, oksijen, azot) ile elektronlar yüzeyden saçılır. Yüzeye çarpan iyonların ancak çok az bir kısmı iş parçasına yayılır. Bu iyonların büyük bir kısmı saçılma olayını sağlar. Saçılan demir atomları ile yüksek enerjili azot atomları, yüzeye yakın FeN şeklinde biraraya gelip metal yüzeyinde birikmektedir. FeN sıcak metal yüzeyinde kararsızdır ve kararlı diğer nitrürlere (Fe_2N , Fe_3N , Fe_4N) dönüşür (Şekil 3.1).

Dönüşme sırasında serbest kalan azot atomları ya metale yayılır ya da plazmaya döner (kimyasal absorpsiyon). Saçılma ve yoğunlaşma işlemleri büyük ölçüde kullanılan gaza bağlıdır. Ayrıca basınç ve gerilim gibi diğer parametrelerin değiştirilmesiyle de etkilenir (Mittemeijer, 2013).



Şekil 3.1. Plazma nitrürleme işleminin mekanizması (Mittemeijer, 2013).

3.2. Plazma Nitrürleme Sonrası Oluşan İç Yapılar

Sıcaklık, zaman ve gaz karışım oranı gibi parametrelerin değişimiyle iyon nitrürleme sonrası aşağıdaki yapılar meydana gelir (Mittemeijer, 2013).

Beyaz Tabaka: Azot demir içerisinde kısmi olarak çözünebilmektedir. Azot içeriği yaklaşık olarak % 6'ya çıktığında ferrit fazı ile bir katı eriyik oluşturan γ (YMK) olarak adlandırılan Fe_4N formunda bir bileşiğin oluştuğu durumda bu yapıya “beyaz tabaka” (metalografik olarak hazırlanıp dağlandıktan sonra bu bölge tamamen beyaz olarak görülür) adı verilir. Azot içeriğinin % 8'den fazla olması durumunda denge reaksiyonu HSP yapıda ϵ (Fe_3N) bileşiği oluşmaktadır.

Beyaz tabaka olarak, sadece ϵ (HSP) veya γ (YMK) nitrürlerinden biri oluşuyorsa mekanik özelliklerin daha iyi olduğu görülmüştür. Çok fazlı beyaz tabaka, ϵ ve γ birleşimi olup, aynı zamanda bileşik tabaka olarak da isimlendirilmektedir. Farklı kafes yapılarından dolayı geçiş bölgelerinde iç gerilmeler oluşur. Bu durumda çok az bir kuvvet uygulanması halinde bile mikroçatlaklar oluşabilir. Ayrıca tabaka kalınlığı arttıkça sünekliğinin düştüğü bilinmektedir. Bu iki faktöre bağlı olarak optimum özellikler, tek fazlı ve minimum kalınlıklı beyaz tabakada elde edilir.

Difüzyon tabakası: Beyaz veya bileşik bölgenin altında, sertliği ve azot yoğunluğu az olan bölgedir. Yüzeyden malzemenin içine doğru bir geçiş sağlar. Difüzyon bölgesinde, metal nitrürlerin çökmesi, azotla α -fazının doyması, kalıntı gerilmelerin dağılımı, karbonun yeniden dağılımı ve tane sınırı fazının oluşumu gibi birkaç olay meydana gelir. Difüzyon bölgesi, azotun (N) ; krom (Cr), vanadyum (V),

molibden (Mo), tungsten (W) ve alüminyum (Al) gibi nitrür yapıcı elementlerle reaksiyonu ile oluşan kararlı nitrürlerden ibarettir.

Isıl püskürtme kaplamalarında ilave bir yüzey aktivasyon aşaması olmadan difüzyon esaslı kaplama yapmak mümkündür. Isıl püskürme kaplama yapısındaki açık gözeneklilik, azotça zengin ortamdan atomik azotun yüzeye girmesine izin vermektedir (Park vd., 2013; Mindivan ve Mindivan, 2016, Mindivan, 2018, Kutschmann vd., 2019). Kaplamada yapısında bulunan splat kenarlarında homojen olmayan bir difüzyon zenginleşmesi meydana gelecektir. Yüzeyden uzaklaştıkça difüzyon derinliği azalacaktır. Bu çalışmanın amaçlarından biri de HVOF püskürtülen Inconel 625 kaplama için pulse plazma nitrüleme işleminin modifikasyonu üzerine odaklanmaktadır.

4. AKIMSIZ NİKEL FOSFOR KAPLAMA

Modern dünyada korozyon, aşınma, yorulma ve kırılmadan dolayı parçaların bakımı veya erken hasara uğraması nedeniyle önemli finansal kayıplar oluşmaktadır. Yüzeyin hasara uğraması birçok sanayi sektörünü etkilemektedir ve gelişmiş ekonomilerde Gayri Safi Yurtiçi Hasıla'nın % 3 - 4'üne karşı gelmektedir. Malzeme yüzeyinin hasara uğraması çevre ve servis koşullarının etkisini azaltacak, servis ömrünü ve ekipmanın güvenilirliğini artıracak bir kaplamanın stratejik olarak uygulanmasıyla engellenebilir.

1946'da Brenner ve Riddell, Ni banyosuna bir indirgeyici madde olarak sodyum hipofosfit ekleyerek "otokatalitik" veya "akımsız" bir metal biriktirmeyi keşfetti. Brenner tarafından yapılan çalışmalar, Ni-P kaplama prosesinin geliştirilmesine öncülük etti ve ilk önce alaşım oluşum mekanizmasını ve kaplama optimizasyonunu belirlemeye çalıştı. Brenner'in ilk çalışmalarından sonra birçok araştırmacı, alaşımın birçok yararı nedeniyle alaşım oluşturma yollarını inceledi ve kaplama koşullarının mikroyapı ve özellikler üzerindeki etkisini incelemeyi sürdürmüştür. Akımsız Ni-P kaplamaların daha sert olduğu ve elektrolitik kaplama ile elde edilenlerden daha iyi korozyon direncine sahip olduğu bildirilmiştir (Lelevic ve Walsh, 2019).

Yüksek lehmlenebilirlik, sertlik, aşınma ve korozyon direnci gibi dikkate değer ve mükemmel özellikleri nedeniyle akımsız Ni-P kaplamalar, çeşitli endüstrilerde koruyucu ve fonksiyonel kaplama olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bunlar otomotiv, kimya, petrol ve gaz, elektronik ve havacılık sektörlerini içermektedir. Günümüzde ticari olarak kullanılan ikili Ni-P kaplamalar ağırlıkça % 3 ila 14 arasında fosfor içeriğinden oluşabilir. Akımsız Ni-P kaplamalar fosfor içeriklerine bağlı olarak düşük (\leq ağırlıkça % 5), orta (ağırlıkça % 5-8) ve yüksek (\geq ağırlıkça % 9) olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilir. Düşük fosfor içeren kaplamalar az miktarda amorf faz içeren mikro-kristal Ni'den veya sadece kristal Ni fazdan oluşabilir. Orta fosfor içeren kaplamalar ya tamamen amorf ya da amorf ve mikro kristal Ni faz karışımından meydana gelmektedir. Yüksek fosfor içeren kaplamalar orta fosfor kaplamalara benzer olabilir ve ayrıca bir veya daha fazla bileşik fazdan oluşabilir. Akımsız kaplamaların özellikleri ve mikroyapıları kaplamadaki fosfor içeriğine bağlıdır. Isıl işlem görmemiş akımsız Ni-P kaplamaların sertliği azalan fosfor içeriği ile artmaktadır. Sertlik değeri fosfor içeriğine bağlı olarak 500 ila 700 HV arasında değişmektedir. Düşük fosfor

seviyesine sahip kaplamalardaki yüksek sertlik değerinin nedeni muhtemelen yüksek kalıntı gerilmelerden kaynaklanmaktadır. Akımsız Ni-P kaplamada fosfor varlığından dolayı iyi korozyon önleyici özelliklere sahip olduğu gözlenmiştir. Fosfor içeriği arttıkça akımsız Ni-P kaplamanın korozyon önleyici özelliği artmaktadır (Lelevic ve Walsh, 2019). Akımsız Ni-P kaplamaların özelliklerinin uygun ısı işlemlerle değiştirilebileceği genel olarak bilinmektedir. Sebebi ise kaplamaların amorf yapısı ısı olarak kararsızdır ve orta sıcaklıklarda (240-400 °C) amorf fazdan kristal faza geçişin olmasıdır. Kaplama sertliğini arttırmak için ısı işlem uygulanması durumunda, en yüksek sertliğe ulaşmak için uygulanması gereken sıcaklık yaklaşık 400 °C'de 1 saatlik izotermal ısıtma ile elde edilir. Fosfor içeriğine ve ısıtma durumuna bağlı olarak elde edilen en yüksek sertlik 1100 HV_{0.1} olup, sert kromun sertliğine yakındır. Sertliğin artması, kristalizasyon işlemi sırasında ince Ni kristallerin ve intermetalik Ni₃P kararlı fazın oluşumundan kaynaklanmaktadır. İnce Ni₃P fazının daha yüksek mukavemet ve kayma modülüne sahip olduğu ve sertlik artışında etkisi olduğu bilinmektedir. Ayrıca artan ince çökelti taneciklerin (Ni ve Ni₃P) ve kusurların artan sertleşmeden sorumlu olduğu ifade edilmektedir (Keong vd., 2003). Optimum koşullarda elde edilen akımsız Ni-P kaplama ağırlıkça % 5,37 P içeriğine ve amorf-nanokristal yapıya sahip olduğunda kavite erozyona karşı direncide büyük ölçüde arttığı tespit edilmiştir (Park ve Kim, 2019).

Akımsız Ni-P kaplamalar; çelik, paslanmaz çelikler, magnezyum ve alüminyum alaşımları gibi pek çok malzemede uygulanabilmektedir. Ancak paslanmaz çelikler gibi süper alaşımlar yüzeyindeki pasif oksit tabakasından dolayı akımsız Ni-P ile kaplama oluşturmada ve kaplama kalınlığını arttırmada problemler yaşanmaktadır. Bu nedenle süper alaşımlar kaplamadan önce farklı ön işlemlere tabi tutulmaktadır. Örneğin numunelerin anot ve kurşunun inert bir katot olarak kullanıldığı aktivasyon işlemiyle paslanmaz çelik, nikel, kobalt ve demir esaslı süper alaşımlar aktive edilmektedir (Allahyarzadeh vd., 2016). Bu çalışmada ise akımsız kaplama için tercih edilen ve uygulaması kolay olan çelik altlık, HVOF püskürtme ile Inconel 625 kaplamayla irtibatlandırılmıştır. Böylece bir yüzeyi çelik altlık diğer yüzeyi Inconel 625 kaplama aynı kaplama banyosu içine daldırarak süper alaşımın katalitik olarak pasifliği basitçe ortadan kaldırılmış olacak ve HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplama yüzeyine herhangi bir ön işlem uygulamaya gerek kalmamıştır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Yüzey Hazırlama ve HVOF Isıl Püskürtme Kaplama

Bu çalışmada, St 37 düşük karbonlu çelik, altlık malzeme olarak kullanılmıştır. Düşük karbonlu çelik altlık numuneler 100 mm x 50 mm x 4 mm boyutunda olacak şekilde kesilmiştir. 1200 grite kadar zımparalanarak hazırlanan numuneler HVOF ısıp püskürtme tekniğı kullanılarak ara bağlayıcı ile (80/20 NiCr) kaplanmıştır. Ara bağlayıcı kaplamanın tutunma miktarının artırılması yanı sıra iyileştirilmiş kırılma tokluğu ve korozyon direnci artırma amaçlıdır (Mindivan, 2010). Ara bağlayıcı kaplanan çelik numuneler daha sonra Sulzermetco firmasından temin edilen partikül boyut aralığı -45 ila +11 µm arasında olan küresel ve gaz atomize toz (Diamalloy-1005) ile kaplanmıştır. Bu tozlar Inconel 625'in bileşimi (Çizelge 5.1) ve özelliklerini taşımaktadır.

Çizelge 5.1. Diamalloy-1005 tozunun kimyasal bileşimi.

Toz Malzeme	Kimyasal Bileşim				
	Ni	Cr	Mo	Fe	Co
Inconel 625	66.5	21.5	8.5	3	0.5

Inconel 625 kaplamaların yüzeyleri tekrar zımparalanıp kaplamanın kalınlığı her yerde aynı miktara indirildikten sonra 1 mikron Al₂O₃ yardımı ile parlatılmıştır. Bu aşamada kaplama yüzeyinin yaklaşık 0,08 µm pürüzlülüğe sahip olduğu görülmüştür.

5.2. Pulse Plazma Nitrürleme İşlemi

Düşük karbonlu çelik altlık malzeme yüzeyinde oluşturulan Inconel 625 kaplama yüzeyi 0,00025 MPa basınç altında 75 % N₂ ve 25 % H₂ ortamda 520°C' de 12 saat nitrürleme işlemine tabi tutulmuştur.

5.3. Akımsız Ni-P Kaplama İşlemi

Akımsız Ni-P kaplamadan önce zımpara ve parlatma işlemleriyle 0,08 mikron pürüzlülüğe getirilen HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın yüzeyi, kalıntıları gidermek amacıyla su ve aseton ile temizlenmiştir. Numuneleri hazırladıktan sonra akımsız kaplama yöntemiyle Ni-P ile kaplanmıştır. Bu çalışmada, 5 g/L nikel, 40 g/L NaH₂PO₂, uygun miktarlarda katkı maddesi ve dengeleyici içeren ticari Ni-P akımsız

banyo (Durni-Coat DNC 520-9) kullanılmıştır. Kaplama, ısı ve hız kontrollü manyetik karıştırıcı üzerine kurulmuş düzenek üzerinde 20 mm uzunluğunda ve 5 mm çapında bir politetrafloroetilen (PTFE) kaplı mıknatıs balık bulunan 100 ml'lik bir termostatlı çift cidarlı beher içerisinde 250 r/dak karıştırma hızında 90° C'de ve pH 4.6 kaplama şartlarında 11,5 µm'lik bir kalınlığına ulaşmak için gerçekleştirildi.

5.4. Yapısal Karakterizasyon

5.4.1. X-Işınlari difraktometresi (XRD) çalışmaları

Kaplamaların faz analizleri Bilecik Şeyh Edebalı Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde bulunan Panalitikal X-ışını kırınım ölçer (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümlerinde $\lambda = 1,54059 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip CuK_α ışınımı kullanılmıştır.

5.4.2. Optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları

Kaplamaların yapısı, korozyon ve aşınma deneyleri sonrası yüzey görünümüleri enerji dağılımlı x-ışınları spektrometre (EDS) donanımlı Zeiss Supra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Nikon marka Eclipse LV150 model optik metal mikroskobu (OM) kullanılarak incelenmiştir.

Yüzeyde oluşan kaplama kalınlığının belirlenmesi amacıyla numuneler soğuk kalıba alınarak zımparalanıp parlatıldıktan sonra kesit morfolojisi optik mikroskop ile incelenmiştir.

5.4.3. Yüzey pürüzlüğü ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo Surttest SJ-400 marka profilometrede numune yüzeyinde 1000 µm mesafede tarama yapılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için üç farklı ölçüm alınmıştır. Cihazda alınan yüzey pürüzlüğü sonuçlarının ortalaması alınmıştır.

5.5. Mekanik Deneyler

5.5.1. Mikrosertlik ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri kaplanan yüzeye dik yöndeki kesit buyunca kesilip metalografik işlemlerle hazırlandıktan sonra Shimadzu HVM mikro sertlik cihazında

Vickers batıcı uç kullanılarak 50 gram yük altında yapılmıştır. Her bir numune için en az 5 ölçüm alınarak ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır.

5.5.2. Aşınma deneyleri

HVOF püskürtme işlemi ile Inconel 625 kaplama, HVOF püskürtme + pulse plazma nitrüleme ve HVOF püskürtme + akımsız Ni-P kaplamaların aşınma deneyleri 5 N'luk normal yük altında oda şartlarında doğrusal zıt yönlü düzlem-bilye aşınma (reciprocating ball-on-flat) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karşı malzeme olarak 10 mm çaplı alümina (Al_2O_3) bilye kullanılmıştır. Sürtünme kuvveti bilgisayar tarafından aşınma cihazındaki yük hücresi (loadcell) ile sürekli olarak kaydedilmiştir. Aşınma deneyi sonrasında aşınma izlerinin profili Mitutoyo Surtest SJ-400 profilometre cihazı ile ölçülmüştür. Her bir numune için 2 adet aşınma izi topografik profilleri çıkarılmıştır. Aşınma deneylerine ait diğer şartlar Çizelge 5.2'de verilmiştir.

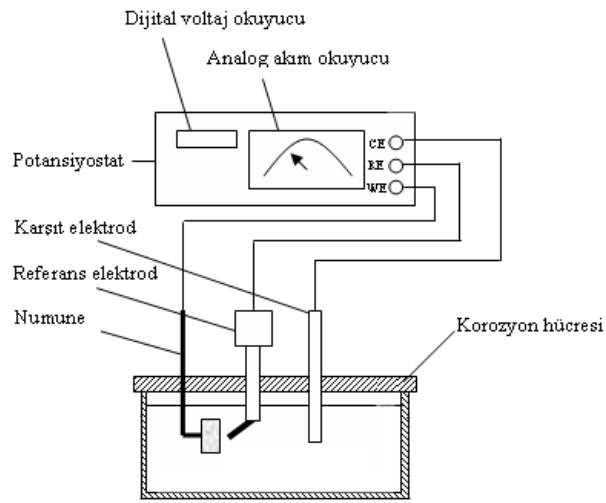
Çizelge 5.2. Kuru aşınma deney şartları.

Normal Yük (N)	5
Aşınma izi uzunluğu (mm)	10
Kayma hızı ($cm\ s^{-1}$)	1,7
Aşındırma süresi (s)	2880
Aşındırma mesafesi (m)	50
Nem (%)	35±5
Sıcaklık (°C)	20±5

5.6. Elektrolitik Korozyon Deneyleri

Elektrolitik korozyon deneylerinde, çalışma elektrodu olan kaplanmış numunelerin yaklaşık $0,5\ cm^2$ 'lik yüzey alanı çözeltiliye temas ettirilmiştir. Deney çözeltisi olarak %3,5'lik NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Elektrolitik korozyon deneylerinde bilgisayar kontrollü bir potansiyostat/galvonostat cihazı kullanılmıştır. Korozyon deney hücresi içerisine, çalışma elektrotu olarak deney numuneleri, karşıt elektrot olan platin tel (% 99,99 saflıkta) ve referans elektrot olarak da doygun Ag/AgCl elektrodu yerleştirilmiştir. Korozyon hücresinin şematik görünüşü Şekil 5.1'de verilmiştir.

Elektrokimyasal deneylerin tümünde başlangıçta önce denge potansiyeline (E_{kor}) 1800 sn süresince ulaşılması beklenmiş, denge potansiyeline ulaşıldıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri $-0,8$ V'dan $-0,2$ V'a kadar 1 mV/s tarama aralığında katodikten anodik yöne doğru potansiyeli tarayarak çizilmiştir. Tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli (E_{kor}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}) hesaplanmıştır.

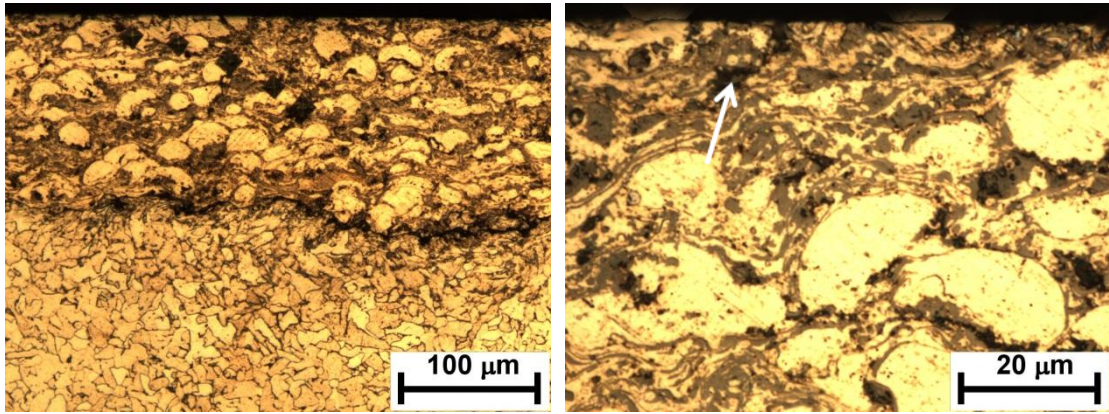


Şekil 5.1. Elektrolitik korozyon deney düzeneğinin şematik gösterimi.

6. DENEY BULGULARI ve TARTIŞMA

6.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları

HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın düşük ve yüksek büyütme optik mikroskop görüntüsü Şekil 6.1’de verilmiştir. Yaklaşık 350 μm kalınlığında HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın yoğun (düşük poroziteli) bir yapıya sahip olduğunu ve altlığa ara yüzeyde herhangi bir süreksizlik oluşturmayacak şekilde iyi bağlandığını ortaya çıkarmıştır. Ayrıca HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın kesit görüntüsü incelendiğinde ergimemiş, yeniden katılmış splatler, oksitler ve gözenekler mevcuttur. Splatler arayüz boyunca çoğunlukla bulunan siyah bölgeler, gözenek olarak tanımlanmıştır (Şekil 6.1, beyaz okla gösterildiği gibi).

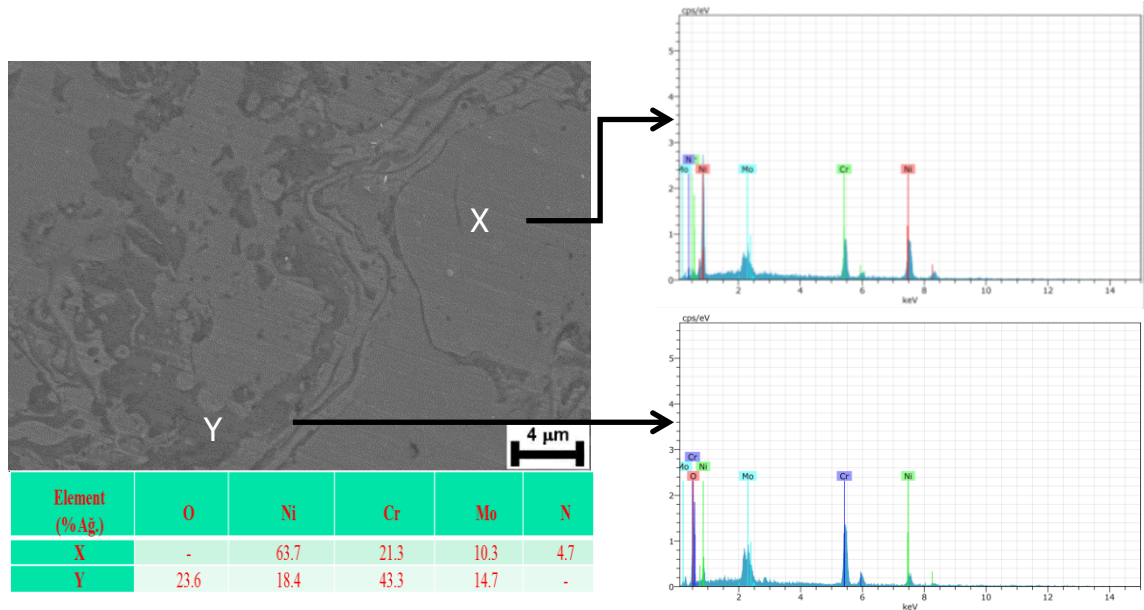


(a)

(b)

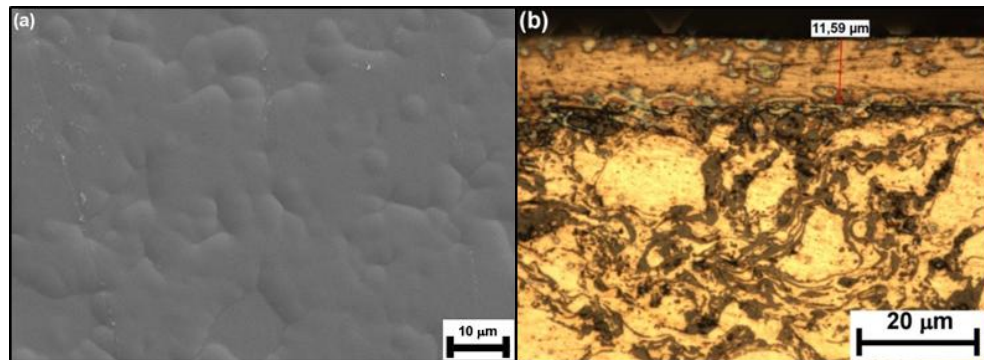
Şekil 6.1. HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın kesitinden alınan (a) düşük ve (b) yüksek büyütme optik mikroskop görüntüleri.

Pulse plazma nitrüleme işlemi gören HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın yüzeyinde EDS analizi yapılarak mikroyapı bileşenleri belirlenmiştir (Şekil 6.2). Açık renkli alan Ni, Cr, Mo ve N elementlerinden oluşmaktadır, gri renkli alan ise Cr, O, Ni ve Mo’den oluşmaktadır. EDS sonuçlarına göre, açık renkli bölgelerde azotun difüze olduğunu ve gri renkli bölge ise oksit tabakalarının nitrüleme işlemi zorlaştırdığı görülmektedir.



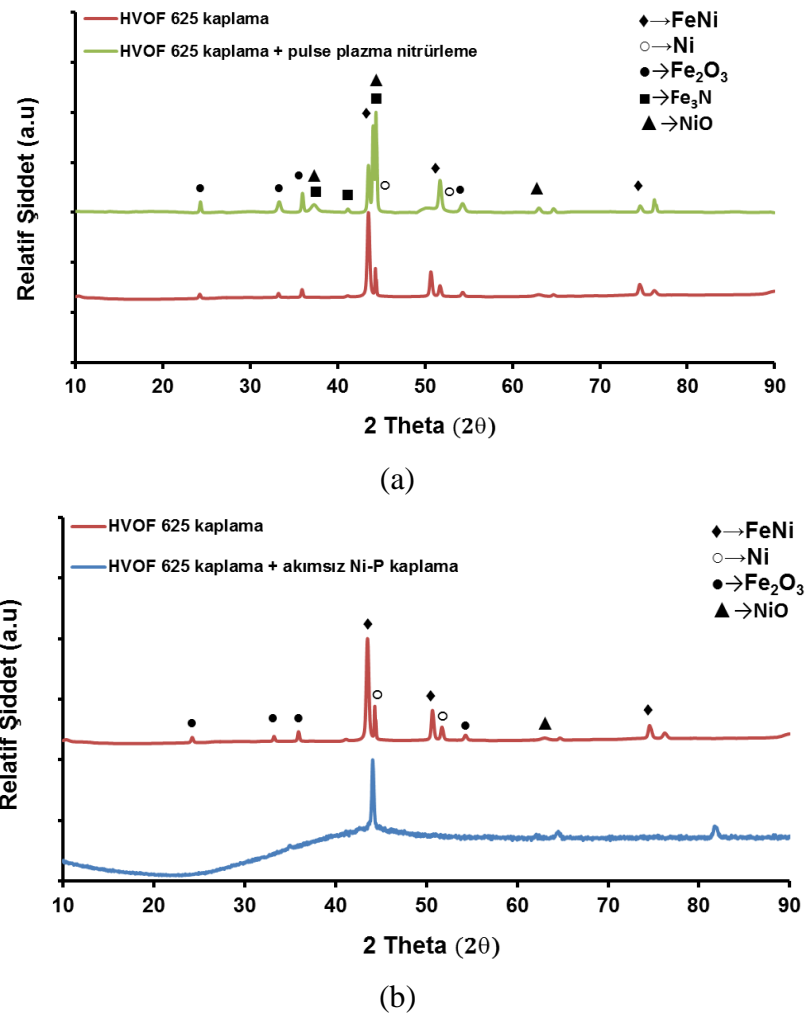
Şekil 6.2. Pulse plazma nitrüleme işlemi gören HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları.

Şekil 6.3'de Ni-P kaplamanın yüzey morfolojisi ve kesit görüntüsü verilmektedir. Ni-P kaplamadaki düşük nodül miktarı nedeniyle (Şekil 6.3 a), Ni-P kaplı yüzeyin düşük pürüzlülük değeri $R_a = 0,16 \mu\text{m}$ olduğu görülmektedir. EDS analizi kullanılarak, elde edilen Ni-P kaplada ağırlıkça % 13 fosfor ve % 87 nikel bulunduğu belirlenmiştir. Yaklaşık $11,5 \mu\text{m}$ kalınlığındaki Ni-P kaplama, gözeneklik gibi makro kusur içermeyen oldukça kompakt yapı sergilemekte ve HVOF ile püskürtülmüş Inconel 625 kaplama yüzeyine nispeten iyi bir yapışma göstermiştir (Şekil 6.3 b).



Şekil 6.3. Akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın (a) yüzey morfolojisi ve (b) kesit görüntüsü.

İşlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplama, HVOF Inconel 625 kaplama + pulse plazma nitrüleme ve HVOF Inconel 625 kaplama + akımsız Ni-P kaplamanın birleşimi olan dubleks kaplamaların XRD sonuçları Şekil 6.4’de verilmiştir. İşlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplamanın XRD paterninde FeNi, Ni, Fe₂O₃ ve NiO fazları belirlenmiştir. Pulse plazma nitrüleme işlemi görmüş HVOF Inconel 625 kaplamada ise HVOF püskürtme ile elde edilen Inconel 625 kaplamada tespit edilen fazlara ilaveten Fe₃N fazının oluştuğu gözlemlenmektedir. Akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF Inconel 625 kaplamanın XRD paterni incelendiğinde HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplama üzerinde kristal yapı bir büyüme değil, amorf yapı bir büyümenin gerçekleştiği ve Ni-P kaplama tabakasının yüzeyi tamamen örttüğü görülmektedir.



Şekil 6.4. (a) HVOF Inconel 625 kaplama + pulse plazma nitrüleme ve (b) HVOF Inconel 625 kaplama + akımsız Ni-P kaplamaların XRD paternleri.

İşlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplama, pulse plazma nitrürleme işlemi ve akımsız Ni-P kaplama yüzeyleri Mitutoyo Surtest SJ-400 yüzey profilometresi cihazı ile yüzey pürüzlülüğü analizleri yapılmıştır (Çizelge 6.1). Pulse plazma nitrürleme işlemi ve akımsız Ni-P kaplama işlemi öncesi 0,08 μm yüzey pürüzlülüğüne sahip işlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplamada pürüzlülüğün, pulse plazma nitrürleme işlemi ile pürüzlülüğün değişmediği ancak akımsız Ni-P kaplama sonrasında 0,16 μm seviyelerine çıktığı görülmüştür.

Çizelge 6.1. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları.

Kaplama Koşulu	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)			
	Ra	Ry	Rz	Rq
HVOF Inconel 625 kaplama	0,08	1,3	1,0	0,12
HVOF Inconel 625 kaplama + pulse plazma nitrürleme	0,08	1,1	0,9	0,11
HVOF Inconel 625 kaplama + akımsız Ni-P kaplama	0,16	1,0	0,9	0,21

6.2. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Çizelge 6.2’de incelenen kaplamaların mikrosertlik ölçüm sonuçları verilmiştir. Pulse plazma nitrürleme işlemine tabi tutulmuş HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın kesitinde $401 \pm 54 \text{ HV}_{0,05}$ sertlik elde edilmiştir. İşlem görmemiş HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamada gerçekleştirilen enine kesit mikrosertlik ölçümleri sonucunda kesit sertliği $355 \pm 26 \text{ HV}_{0,05}$ olarak elde edilmiştir. Ancak akımsız Ni-P kaplama, işlem görmemiş HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamaya kıyasla sertlikte 1,16 kat artış tespit edilmiştir. HVOF püskürtülmüş kaplamanın pulse plazma nitrürleme işlemine tabi tutulması sonucunda enine kesit sertliği oldukça geniş aralıkta değişmektedir. Yaklaşık 20 μm ’lik sabit mesafedeki sertlik artışı Fe_3O_4 ve Fe_3N fazlarının oluşmasından ve pulse plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan kaplamanın sertliğinde gözlenen geniş sertlik saçılması difüzyon tabakasındaki oksit tabakalarının azotun yayılımını engellemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

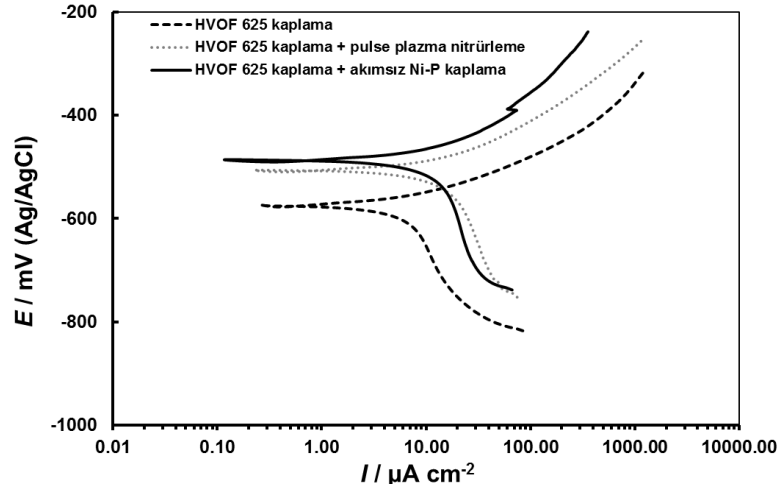
Çizelge 6.2. Mikrosertlik ölçüm sonuçları.

Kaplama Koşulu	Mikrosertlik HV_{0,05}
HVOF Inconel 625 kaplama	355 ± 26
HVOF Inconel 625 kaplama + pulse plazma nitrürleme	401 ± 54
HVOF Inconel 625 kaplama + akımsız Ni-P kaplama	415 ± 1

6.3. Elektrolitik Korozyon Deney Sonuçları

İşlem görmemiş HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplama, pulse plazma ile nitrürlenmiş ve akımsız Ni-P kaplanmış HVOF Inconel 625 kaplamanın elektrolitik korozyon deneyleri sonucunda elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri ve elektrokimyasal korozyon parametreleri sırasıyla Şekil 6.5 ve Çizelge 6.3’de verilmiştir. Pulse plazma nitrürleme işlemi sonucunda HVOF Inconel 625 kaplamanın korozyon potansiyeli (E_{kor}) işlem görmemiş HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamaya (-575 mV) göre bir miktar daha pozitif değere (-506 mV) artmıştır ve bununla birlikte nitrürlenmiş kaplamanın anodik akım yoğunluğu ($2,91 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) işlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplamanın akım yoğunluğuna ($3,38 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) göre düşük olduğu görülmektedir. İşlem görmemiş HVOF püskürtülen Inconel 625 kaplama ile akımsız Ni-P kaplanmış HVOF Inconel 625 kaplamanın korozyon sonuçları karşılaştırıldığında ise HVOF püskürtülen Inconel 625 kaplamanın korozyon potansiyeli ve korozyon akımı yoğunluğu sırasıyla -575 mV ve $3,38 \times 10^{-6} \text{ Acm}^{-2}$ iken akımsız Ni-P kaplamadan sonra korozyon potansiyeli ve korozyon akımı yoğunluğu değişmektedir. Akımsız Ni-P kaplama sonucu korozyon potansiyeli -487 mV olup, HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamaya göre 88 mV pozitif yönde değişmektedir. Ayrıca, akımsız Ni-P kaplama sonrası korozyon akım yoğunluğu ise $2,04 \times 10^{-6} \text{ Acm}^{-2}$ olup, yine işlem görmemiş HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın korozyon akım yoğunluğuna göre $1,34 \times 10^{-6} \text{ Acm}^{-2}$ kadar azalma gerçekleşmiştir. Korozyon potansiyeli numunenin korozyon eğilimini göstermektedir. Bu değer ne kadar negatif olursa, elektrokimyasal korozyon meydana gelme olasılığı o kadar yüksektir. Korozyon akım yoğunluğu ise numune korozyona maruz kaldığında ne kadar hızlı korozyona uğrayacağını temsil etmektedir. Bu nedenle, Şekil 6.5 ve Çizelge 6.3’de verilen analiz sonuçlarından, akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF Inconel 625 kaplamanın, pulse

plazma nitrülemeye tabi tutulmuş HVOF Inconel 625 kaplama ve işlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplamaya kıyasla daha iyi korozyon direnci göstermesi mikrosertlik ölçüm sonuçlarıyla (Çizelge 6.2) ortaya çıkan yoğun ve gözeneksiz kaplama yapısına atfedilebilir. Sonuçlar, akımsız Ni-P kaplamanın diğer iki kaplamadan daha koruyucu olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlarla uyumlu olarak, amorf yüksek P içerikli Ni-P (\geq ağırlıkça % 9) kaplamanın korozyon direncindeki bu önemli gelişme, tane sınırlarının bulunmamasından ve EDS analiz sonuçlarına göre koruyucu Ni-P kaplamanın ağırlıkça % 13 P içermesinden kaynaklanmaktadır (Lelevic ve Walsh, 2019).



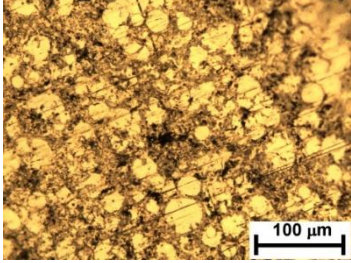
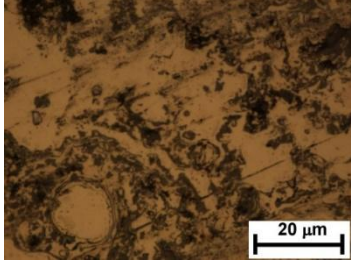
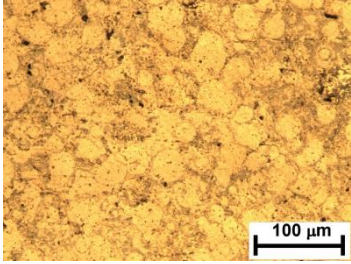
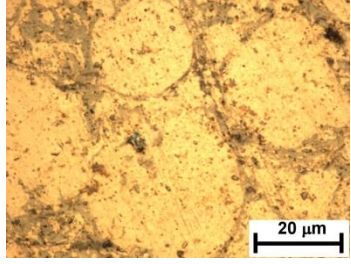
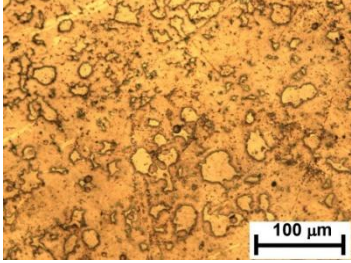
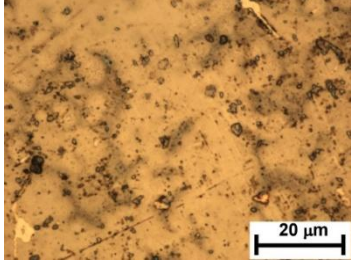
Şekil 6.5. Kaplamalara ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

Çizelge 6.3. Polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluk değerleri.

Kaplama Koşulu	E_{kor} , (mV)	I_{kor} , $Acm^2(x10^{-6})$
HVOF Inconel 625 kaplama	-575	3,38
HVOF Inconel 625 kaplama + pulse plazma nitrüleme	-506	2,91
HVOF Inconel 625 kaplama + akımsız Ni-P kaplama	-487	2,04

Yapılan OM incelemeleri sonucunda HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplama ile pulse plazma ile nitrülenmiş HVOF Inconel 625 kaplamanın yüzeyinde değişik boyut ve morfolojilerde oyuklar meydana gelmiştir ve her iki kaplamada etkin korozyon

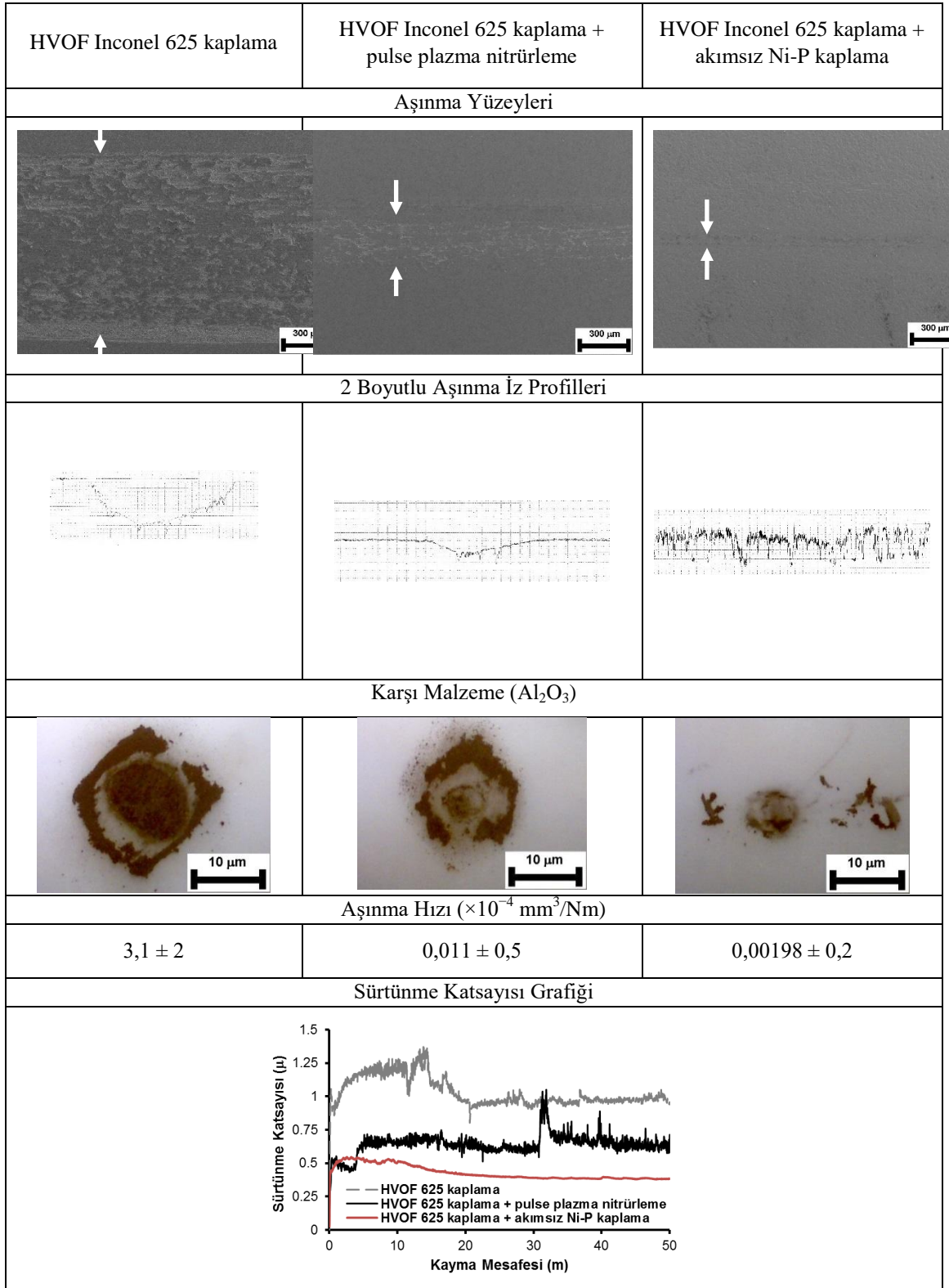
mekanizmasının çukurcuk tipi (pitting) korozyon olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 6.6). Pulse plazma nitrülenmiş HVOF Inconel 625 kaplama yüzeyinde daha az hasar söz konusu iken, işlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplama yüzeyinde önemli oranda dar ve derin oyuklar meydana gelmektedir (Şekil 6.6). Ancak akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplama yüzeyinde herhangi bir korozyon işaretine raslanmamıştır (Şekil 6.6). Bu çalışmada kaplama yapısındaki gözeneklilik ve oksit seviyesinin korozyona yatkınlığını önemli ölçüde etkileyebileceği açıktır. Gözenekli bir kaplamanın korozyona karşı duyarlı olması, elektrolitin gözenek boyunca kaplamaya nüfuz etmesi ve bu boşluklarda bulunan çözelti korozyon için elverişli bir ortam sunmaktadır (Al-Fadhli, 2003).

Kaplama Koşulu	Düşük Büyütme (x200)	Yüksek Büyütme (x1000)
HVOF Inconel 625 kaplama		
HVOF Inconel 625 kaplama + pulse plazma nitrüleme		
HVOF Inconel 625 kaplama + akımsız Ni-P kaplama		

Şekil 6.6. İşlem görmemiş HVOF püskürtülmüş Inconel 625, pulse plazma ile nitrülenmiş HVOF Inconel 625 ve akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF Inconel 625 kaplamaların korozyon yüzeyleri.

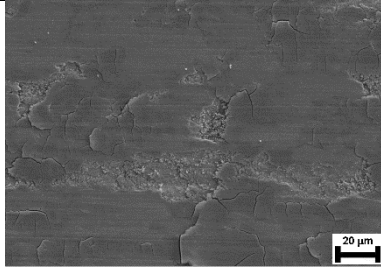
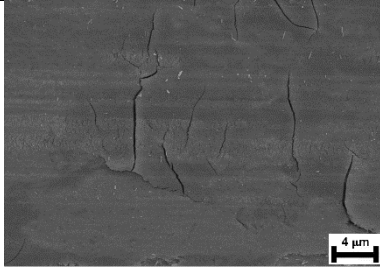
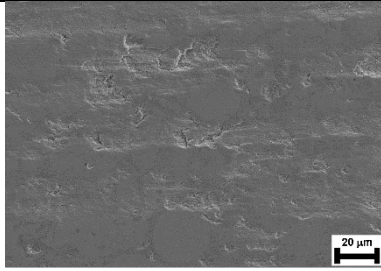
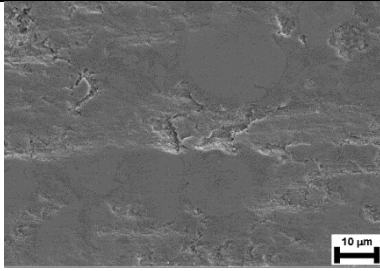
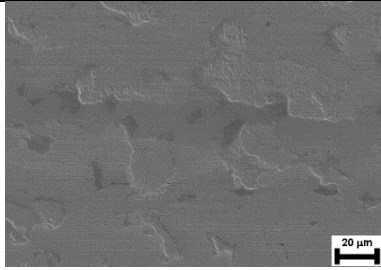
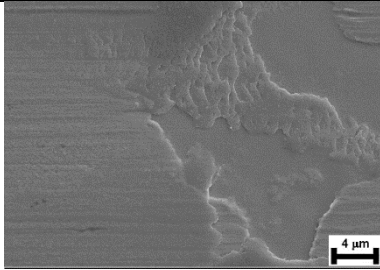
6.4. Aşınma Deney Sonuçları

Şekil 6.7 kuru ortam aşınma deneylerinde kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, aşınma izlerinin profil görüntüleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri karşılaştırmalı olarak verildiğinde, Al_2O_3 bilye ile oluşturulan aşınma iz derinliği ve geniş yüzey hasarından dolayı işlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplama daha yüksek aşınma hızı ($3,1 \times 10^{-4} \pm 2 \text{ mm}^3/\text{Nm}$) sergilemektedir. HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamada ergimiş partikül ve sert oksit tabakaların üst üste istiflenmesinden dolayı, HVOF ile elde edilen Inconel 625 kaplama döküm yöntemi üretilmiş Inconel 625'e göre daha düşük aşınma hızı ($3,3 - 3,7 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) göstermiştir (Espallargas ve Mischler, 2011). Düşük aşınma hızı sergileyen akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF Inconel 625 kaplamanın aşınma yüzeyi ile karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyenin aşınma iz büyüklüğü, işlem görmemiş HVOF Inconel 625 ve pulse plazma nitrülenmiş HVOF Inconel 625 kaplamaların aşınma yüzeyleri ve kullanılan karşı malzeme Al_2O_3 bilyelere göre belirgin aşınma izi oluşmamıştır. Akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF Inconel 625 kaplama ile pulse plazma nitrülenmiş HVOF Inconel 625 kaplamanın aşınma iz derinlikleri sırası ile ortalama $1,4 \mu\text{m}$ ve $2,8 \mu\text{m}$ iken, işlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplamada ise ortalama iz derinliği $15,1 \mu\text{m}$ 'dur. İşlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplama ile pulse plazma nitrülenmiş HVOF Inconel 625 kaplamanın sürtünme katsayısı değerleri daha yüksek değerlerde ve yüksek gürültüyle sırasıyla $0,975 \pm 0,10$ ve $0,65 \pm 0,07$ karşımıza çıkarken, akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF Inconel 625 kaplama en düşük sürtünme katsayısı değerinde ve düşük gürültüyle $0,38 \pm 0,05$ değiştiği görülmektedir. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda akımsız Ni-P kaplama işlemi ile daha düşük aşınma hızı ve düşük sürtünme katsayısına ulaşılabileceğini söylemek doğru olacaktır.



Şekil 6.7. İncelenen kaplamaların ve karşı malzeme olarak kullanılan Al₂O₃ bilyelerin aşınma yüzey görüntüleri, 2 boyutlu aşınma iz profilleri, aşınma hızı ve sürtünme katsayısı grafikleri (Oklar aşınma izini göstermektedir).

Şekil 6.8 işlem görmemiş HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplama, pulse plazma ile nitrürlenmiş ve akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF Inconel 625 kaplamaların aşınma yüzeylerine ait detaylı SEM görüntüleri verilmektedir. Aşınma yüzey görüntülerinden, işlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplamanın yüzeyi üzerinde kayma yönüne dik yorulma çatlaklarının oluştuğu görülmektedir. Pulse plazma nitrüleme işlemine tabi tutulmuş HVOF Inconel 625 kaplamanın aşınma yüzeyinde plastik deformasyon sonucu olarak spletlerin düzleştiği görülmektedir. Ayrıca bu yüzey görüntüsü temas yüzeyinde Al_2O_3 bilye tarafından bazı spletlerin dövme işlemine maruz kaldığını göstermektedir. Akımsız Ni-P ile kaplanmış HVOF Inconel 625 kaplamanın düzgün olmayan yüzeyinde herhangi bir plastik deformasyon, çatlaklar, delaminasyon ve splet kaybı gibi oluşumlar gözlenmemiştir.

Kaplama Koşulu	Düşük Büyütme	Yüksek Büyütme
HVOF Inconel 625 kaplama		
HVOF Inconel 625 kaplama + pulse plazma nitrüleme		
HVOF Inconel 625 kaplama + akımsız Ni-P kaplama		

Şekil 6.8. İncelenen kaplamaların detaylı SEM görüntüleri.

7. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada ticari kalitede düşük karbonlu çelik üzerine HVOF püskürtme ile Inconel 625 kaplama, HVOF Inconel 625 kaplama + pulse plazma nitrüleme ile HVOF Inconel 625 kaplama + akımsız Ni-P kaplamaların birleşimi olan dubleks yüzey işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu kaplamalarda yapılan mikroyapı incelemeleri, mikrosertlik ölçümleri, korozyon ve aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

1. Pulse plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamada azotun difüze olduğunu ancak kaplama yapısındaki oksit tabakalarının nitrüleme işlemi zorlaştırdığından sertlik dağılımının uniform olmadığı gözlenmiştir.

2. HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplama ve ardından pulse plazma nitrülenmiş kaplama, işlem görmemiş HVOF Inconel 625 kaplamaya göre daha yüksek sertlik, korozyon ve kuru ortam aşınma direnci sergilemiştir.

3. HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplama üzerine uygulanan akımsız Ni-P kaplamanın amorf yapıda büyüdüğü tespit edilmiştir. Akımsız Ni-P banyosunda farklı malzemelerden oluşmuş çelik altlık üzerine HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplama başarıyla kaplanmıştır ve tüm yüzeylerinde homojen kaplama tabakası elde edilmiştir.

4. Potansiyodinamik polarizasyon deney sonuçlarına göre uygulanan akımsız Ni-P kaplama işleminin HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın korozyon direncinde önemli bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmadaki sonuçlara göre HVOF ile püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın yetersiz olan aşınma ve korozyon özellikleri pulse plazma nitrüleme ve akımsız Ni-P kaplama işlemi ile geliştirilmiştir. Mevcut çalışma farklı tribokorozyon ortamlarında yapılarak özellikle HVOF püskürtülmüş Inconel 625 kaplamanın havacılık, deniz ve petrol endüstrisi gibi alanlarda kullanımı konusunda performansı test edilebilir.

KAYNAKLAR

- Amin, S., & Panchal, H. (2016). Review on Thermal Spray Coating Processes. *International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER) e-ISSN. 2455–1392* Volume 2 Issue (4), 556-563.
- Al Fadhli, H.Y. (2003). *Performance evaluation of (HVOF) thermal spray coating using Inconel-625 powder*. Master of science, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran, Saudi Arabia.
- Al Fadhli, H.Y., Stokes, J., Hashmi, M.S.J. & Yilbas, B.S. (2005). Post Test Analysis of Inconel-625 (HVOF) Coating Using SEM and EDS after Exposure to Erosion-Corrosion Test. *Microsc Microanal 11 (Suppl 2), 1996-1997*.
- Al-Hamed, A. A., Benyounis, K. Y., Al-Fadhli, H. Y., Yilbas, B. S., Hashmi, M. S. J., & Stokes, J. (2016). Enhancement of conventional WC-Co and Inconel-625 HVOF thermal spray coatings by the addition of nanostructured WC-Co for wear/corrosion applications in the oil/gas industry. *Advances in Materials and Processing Technologies, 2*, 93-102.
- Allahyarzadeh, M. H., Aliofkhazrae, M., & Sabour Rouhaghdam, A. (2016). Electrodeposition on superalloy substrates: a review. *Surface Review and Letters, 23* (3), 1630001-14.
- Ang, A.S.M. & Berndt, C. C. (2014). A review of testing methods for thermal spray Coatings. *International Materials Reviews, 59*(4), 179-223.
- Arteaga, C. C., Verhelst, D. & Alfantazi, A. (2010). Performance of alloy 625 under combustion gas environments-A review. *ECS Transactions, 28* (24), 61-76.
- Badiger, R. I., Narendranath, S. & Srinath, M.S. (2015). Joining of Inconel-625 alloy through microwave hybrid heating and its characterization. *Journal of Manufacturing Processes 18*, 117–123.
- Bhatt, A., Attia, H., Vargas, R. & Thomson, V. (2010). Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718. *Tribology International, (43)*, 1113–1121.
- Bircan, B. (2014). *Inconel 718 alaşımının katı partikül erozyon davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bolelli, G., Lusvarghi, L. & Giovanardi R. (2008). A comparison between the corrosion resistances of some HVOF-sprayed metal alloy coatings. *Surface & Coatings Technology, 202*, 4793–4809.
- Boudi, A.A., Hashmia, M.S.J. & Yilbas, B.S. (2006). ESEM evaluation of Inconel-625 thermal spray coating (HVOF) onto stainless steel and carbon steel post brine exposure after tensile tests. *Journal of Materials Processing Technology, 173*, 44–52
- Choudhury, I.A. & El-Baradie, M.A. (1998). Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology, 77*, 278–284

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Çay, V.V. & Ozan, S. (2005). Süperalaşım ve uygulama alanları. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, Elazığ, 178-188.
- Davis, J.R. (2000). *ASM Specialty Handbook, Nickel, Cobalt and Their Alloys*, ASM International, USA, 1-421.
- Davis, J.R. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM International, USA, 1-327.
- Donachie, M.J. & Donachie, S.J. (2002). *Superalloys: A Technical Guide, Second Edition*, ASM International, USA, 1-408.
- Espallargas, N. & Mischler, S. (2011). Dry wear and tribocorrosion mechanisms of pulsed plasma nitrided Ni–Cr alloy. *Wear*, 270, 464-471.
- Ezugwu, E.O., Wang, Z.M. & Machado, A.R. (1999). The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 86, 1-16.
- Ezugwu, E.O, Bonney, J. & Yamane, Y. (2003). An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 233-253.
- Ezugwu, E. O. (2005). Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 1353–1367
- Gonzalez, J.A., Mireles, J., Stafford S.W., Perez, M.A., Terrazas, C.A. & Wicker, R.B. (2019) Characterization of Inconel 625 fabricated using powder-bed-based additive manufacturing technologies. *Journal of Materials Processing Tech.*, 264, 200–210
- Inanır, Z. (2012). *Yüksek çalışma sıcaklıklarının Inconel 718 alaşımının yapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kahraman, F. (2008). *Süperalaşımın nitrülendirilerek yüzey özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kawakita, J., Kuroda, S. & Kodama, T. (2003). Evaluation of through-porosity of HVOF sprayed coating. *Surface and Coatings Technology*, 166, 17–23.
- Kuroda, S., Fukushima, T., Sasaki, M. & Kodama, T. (2002). Microstructure and corrosion resistance of HVOF sprayed 316L stainless steel and Hastelloy C coatings. *Materials Transactions*, 43, 3177-3183.
- Kutschmann, P., Lindner, T., Börner, K., Reese, U. & Lampke, T. (2019). Effect of adjusted gas nitriding parameters on microstructure and wear resistance of HVOF-sprayed AISI 316L coatings. *Materials*, 12, 1-9.
- Lelevic, A. & Walsh, F.C. (2019). Electrodeposition of Ni-P alloy coatings: A review. *Surface & Coatings Technology*, 369, 198–220.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Mindivan H. (2010). Wear behavior of plasma and HVOF sprayed WC-12Co+6% ETFE coatings on AA2024-T6 aluminum alloy. *Surface & Coatings Technology*, 204, 1870-1874.
- Mindivan, F. & Mindivan, H. (2013). Comparisons of wear performance of hardened Inconel 600 by different nitriding processes. *Procedia Engineering*, 68, 730-735.
- Mindivan, F. & Mindivan, H. (2016). Surface properties and tribocorrosion behaviour of a thermal sprayed martensitic stainless steel coating after pulsed plasma nitriding process. *Journal Advances in Materials and Processing Technologies*, 2 (4), 514-526.
- Mindivan, H. (2019). Tribocorrosion behavior of electroless Ni-P/Ni-B duplex coating on AA7075 aluminum alloy. *Industrial Lubrication and Tribology*, Baskıda.
- Mindivan, H. (2018). Investigating tribological characteristics of HVOF sprayed AISI 316 stainless steel coating by pulsed plasma nitriding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 295, 1-7.
- Mittemeijer, E.J. (2013). Fundamentals of nitriding and nitrocarburizing, ASM Handbook, Volume 4 A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes, 619-646.
- Park, C. & Kim, S.J. (2019). Cavitation erosion behavior in seawater of electroless Ni-P coating and process optimization using Taguchi method. *Applied Surface Science*, 477, 37-43.
- Pougoum, F., Qian, J., Martinu, L., Klemberg-Sapieha, J., Zhou, Z., Li, K.Y., Savoie, S., Lacasse, R., Potvin, E. & Schulz, R. (2019). Study of corrosion and tribocorrosion of Fe₃Al-based duplex PVD/HVOF coatings against alumina in NaCl solution. *Surface and Coating Technology*, 357, 774-783.
- Ribeiro, M.V. & Bahia A.L.H. (2011). Study of the turning nickel base alloy pyromet 31V (SAE HEV8). *Advanced Materials Research*, 278, 312-320.
- Sá Brito, V.R.S., Bastos I.N. & Costa, H.R.M. (2012). Corrosion resistance and characterization of metallic coatings deposited by thermal spray on carbon steel. *Materials and Design*, 41, 282-288.
- Saaedi, J., Coyle, T.W., Arabi, H., Mirdamadi, S. & Mostaghimi, J. (2009). Effects of HVOF process parameters on the properties of Ni-Cr coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 19, 521-530.
- Saini, H., Kumar, D. & Shukla, V.N. (2017). Hot Corrosion behaviour of Nanostructured Cermet based Coatings Deposited by Different Thermal Spray Techniques: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 4, 541-545.
- Sandhu, S., Shahi, A.S. (2016). Metallurgical, wear and fatigue performance of Inconel 625 weld claddings. *Journal of Materials Processing Technology*, 233, 1-8.
- Sarıköse, S. (2015). Fe esaslı süperalaşımın tuz banyosunda korozyon davranışının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Sudha, C., Anand, R., Thomas Paul, V., Saroja, S., & Vijayalakshmi, M. (2013). Nitriding kinetics of Inconel 600, *Surface & Coatings Technology*, 226, 92-99.
- Şen, E. (2009). *Banyo bileşenlerinin akımsız Ni-B kaplamanın, kaplama hızı, bor miktarı ve sertlik değerlerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
- Tjong, S.C. (2013). Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets. *Materials Science and Engineering R*, 74, 281–350.
- Turan, T. (2013). *Inconel 718 süper alaşımının nitrürlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Wang, H.L., Liu, L.Y., Dou, Y., Zhang, W.Z. & Jiang, W.F. (2013). Preparation and corrosion resistance of electroless Ni-P/SiC functionally gradient coatings on AZ91D magnesium alloy. *Applied Surface Science*, 286, 319-327.
- Wang, P., Zhang, B., Tan C.C., Raghavan, S., Lim, Y.F., Sun, C.N., Wei , J. & Chi, D. (2016). Microstructural characteristics and mechanical properties of carbon nanotube reinforced Inconel 625 parts fabricated by selective laser melting. *Materials and Design*, 112, 290–299.
- Zhang, Y.C., Jiang, W., Tu, S.T., Zhang, X.C., Ye Y.J. & Wang, R.Z. (2018). Experimental investigation and numerical prediction on creepcrack growth behavior of the solution treated Inconel 625 superalloy. *Engineering Fracture Mechanics*, 199, 327–342.

ÖZ GEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ramazan Haldun TOPÇU
Doğum Yeri ve Tarihi : Kadıköy 14.06.1983

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Sakarya Üniversitesi/Makine Mühendisliği
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

İş Deneyimi

Stajlar : ALSTOM / AREVA / GENERAL ELECTRIC,
REHAU GmbH,

İletişim

Adres : Merkez / BİLECİK
E-Posta Adresi : halduntopcu11@gmail.com

Akademik Çalışmaları

- Ramazan Haldun Topcu, Harun Mindivan (2018). Preparation and Performance of Electroless Nickel on HVOF (High-Velocity Oxygen Fuel) Sprayed Inconel 625 Nickel Coating for Corrosion Protection Applications, *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 2, 19-24.

Tarih: 27/06/2019