



**HVOF YÖNTEMİYLE KAPLANMIŞ KÜRESEL
GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN SICAK
KOROZYON DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ramazan TUNCER

Danışman
Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Haziran 2018

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HVOF YÖNTEMİYLE KAPLANMIŞ KÜRESEL
GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN SICAK KOROZYON
DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

Ramazan TUNCER

Danışman

Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2018

TEZ ONAY SAYFASI

Ramazan TUNCER tarafından hazırlanan “HVOF Yöntemiyle Kaplanmış Küresel Grafitli Dökme Demirin Sıcak Korozyon Davranışının Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 29/06/2108 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

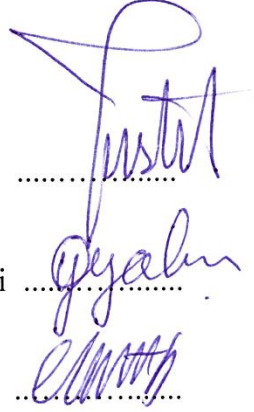
Danışman :Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN

İmza

Başkan :Prof.Dr. Fatih ÜSTEL
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye :Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye :Dr.Öğretim Üyesi Muhammet KARABAŞ
Hakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi



Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım
bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25/07/2018

İmza

Ramazan TUNCER

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

HVOF YÖNTEMİYLE KAPLANMIŞ KÜRESEL
GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN SICAK KOROZYON
DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI

Ramazan TUNCER
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN

Endüstriyel uygulamalardaki yüksek çalışma sıcaklıklarında, malzemelerin ısı ve korozyona direnci önemli bir etkidir. Malzemeleri korozif ortamdan korumak için bazı kaplamalar uygulanmaktadır. Otomobillerin motorlarında, kirli yakıtların vanadyum ve sülfat ihtiva etmesinden dolayı bu tuzlar, yüksek sıcaklıktaki korozif aşınma oranını arttırmaktadır. Bu araştırmada, kaplanmış olan malzemelerin laboratuvar ortamında, yüksek sıcaklıklarda bu istenmeyen tuzlara karşı dayanımı ve meydana gelebilecek olası makro ve mikro yapı değişiklikleri incelenmiştir. Küresel grafitli dökme demir malzemeden hazırlanan numuneler, Termal Püskürtme yöntemlerinden Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) yöntemi ile Amdry 9624 (NiCrAlY) ve Amdry 9951 (CoNiCrAl) metalik tozları ile kaplanmıştır. Kaplama tabakasının yapışma özellikleri Rockwell-C Adhezyon yöntemi ile analiz edilmiştir. Ayrıca kaplama yüzeylerine Vanadyum Pentaoksit (V_2O_5) ve Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) tuz karışımı tatbik edildikten sonra kuyu tipi fırın içerisinde 500 °C, 600 °C ve 700 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta 6 saat bekletilerek Sıcak Korozyon testi uygulanmıştır. Sıcak Korozyon deneyine tabi tutulmuş numunelerin yüzeyindeki makro ve mikro yapı değişiklikleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X Işınları Difraksiyonu (XRD) yöntemleri ile karakterize edilmiştir. Rockwell-C Adhezyon testi sonucunda iki farklı metalik tozdan elde edilen, her iki kaplamanın da yapışma mukavemetinin VDI 3198 prensiplerine göre kabul edilebilir (HF1) kategoride olduğu belirlenmiştir. Amdry 9624 ve Amdry 9951 olmak üzere iki farklı metalik tozun HVOF yöntemiyle kaplanmış, 500 °C’de sıcaklıkta

sıcak korozyon deneyine tabi tutulmuş numunelerde korozif tuzlarla ve atmosfer ile etkileşimi sonucunda herhangi bir korozyon ürünü oluşmadığı tespit edilmiştir. 600 °C ve 700 °C sıcaklıkta ise Amdry 9624 kaplamada, $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$, NaCrV_2O_7 ve AlV_2O_4 , Amdry 9951 kaplamada $\text{CO}_{1.5}\text{Ni}_{1.5}(\text{VO}_4)_2$ ve AlV_2O_4 vanadat bileşiklerinin korozyon ürünü olarak meydana geldiği tespit edilmiştir. Sıcak korozyon deneyine tabi tutulmuş numunelerin yüzeylerinde vanadat bileşikleri halinde meydana gelen korozyon ürünlerinin SEM görüntülerinde ince, uzun ve kolonsal yapılar halinde bulunduğu belirlenmiştir. Her iki kaplamanın da altlık malzemeyi korozif dış etkilere koruduğu ve kaplama tabakasından altlık malzemeye doğru herhangi bir difüzyon mekanizmasının oluşmadığı tespit edilmiştir. Sıcak korozyon deneyi sonrasında kaplama kalınlıklarında bariz bir azalmanın gerçekleşmediği gözlemlenmiştir.

2018, xv + 95 sayfa

Anahtar Kelimeler: Küresel grafitli dökme demirler, Termal spreyl kaplama, Yüksek hızlı oksijen-yakıt, HVOF, Amdry 9624, Amdry 9951, Korozyon, Sıcak korozyon, Vanadyum pentaoksit, Sodyum Sülfat, Tuz, VDI 3198, Rockwell-C Adhezyon.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

AN INVESTIGATION ON HOT CORROSION BEHAVIOR OF SPHERICAL GRAPHITE CAST IRON COATED BY HVOF METHOD

Ramazan TUNCER

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Supervisor: Prof. Yılmaz YALÇIN

Industrial applications have a significant impact on heat and corrosion resistance of materials at high operating temperatures. Some coatings are applied to protect materials from corrosive environment. Since automotive engines contain vanadium and sulphate in dirty fuels, these salts increase the rate of corrosive wear at high temperatures. In this study, the resistance of the coated materials to these undesirable salts at high temperatures in the laboratory environment and the possible macro and microstructural changes that may occur in the field were investigated. Samples prepared from spherical graphite cast iron material were coated with Amdry 9624 (NiCrAlY) and Amdry 9951(CoNiCrAl) metallic powders by High Volume Oxy-Fuel (HVOF) method from Thermal Spraying methods. The adhesion properties of the coating layer were analyzed by Rockwell-C Adhesion method. In addition, Vanadium Pentaoxide (V_2O_5) and Sodium Sulphate (Na_2SO_4) salt mixture was applied to the coating surfaces and then Hot Corrosion test was carried out in a well type oven at 500 ° C, 600 ° C and 700 ° C for 6 hours. Macro and microstructural changes on the surface of the samples subjected to the Temperature Corrosion test were characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD) methods. It was determined that the adhesion strength of both coatings obtained from two different metallic powders as a result of the Rockwell-C adhesion test was in the acceptable (HF1) category according to VDI 3198 principles. Two different metallic powders, Amdry 9624 and Amdry 9951, were coated

by HVOF method and samples tested at 500°C for hot corrosion were found to have no corrosion products with corrosive salts and interaction with the atmosphere. At temperatures of 600°C and 700°C, Amdry 9624 coatings were found to be $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$, NaCrV_2O_7 and AlV_2O_4 , Amdry 9951 coatings $\text{Co}_{1.5}\text{Ni}_{1.5}(\text{VO}_4)_2$ and AlV_2O_4 vanadate compounds as corrosion products. It has been determined that the corrosion products in the form of vanadate compounds on the surfaces of the samples subjected to the hot corrosion test have thin, long and columnar structures in the SEM images. It has been found that both coatings protect the substrate material from corrosive external influences and no diffusion mechanism from the coating layer to the substrate material occurs. It has been observed that there is no obvious reduction in coating thicknesses after the hot corrosion test.

2018, xv + 95 pages

Keywords: Spherical graphite cast irons, Thermal spray coating, High volume oxy-fuel, HVOF, Amdry 9624, Amdry 9951, Corrosion, Hot corrosion, Vanadium pentaoxide, Sodium sulphate, Salt, VDI 3198, Rockwell-C Adhesion.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı değerli hocalarım, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yılmaz YALÇIN'a ve Sayın Dr. Muhammet KARABAŞ 'a, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Dr. Yusuf KAYALI 'ya, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma, numune hazırlama aşamasında özverili şekilde destek veren İso Makina San. ve Tic. Ltd. Şti'nin sahibi Osman AKPINAR'a teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca manevi desteklerinden dolayı değerli eşime ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ramazan TUNCER
AFYONKARAHİSAR, 2018

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
RESİMLER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirler (KGDD).....	5
2.1.1 Dökme Demirlerin Tanımı ve Sınıflandırılması.....	5
2.1.1.1 Beyaz Dökme Demir	7
2.1.1.2 Gri (Lamel Grafitli) Dökme Demir	7
2.1.1.3 Benekli Dökme Demir	8
2.1.1.4 Temper Grafitli Dökme Demir	8
2.1.1.5 Vermiküler (Kompakt) Grafitli Dökme Demir.....	8
2.1.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Tanımı ve Özellikleri	10
2.1.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması ve Mekanik Özellikleri	10
2.1.3.1 Mikroyapıya Göre Sınıflandırma.....	11
2.1.3.2 Mekanik Özelliklere Göre Sınıflandırma	12
2.1.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları	15
2.1.5 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemleri.....	15
2.1.5.1 Yüzey Sertleştirme.....	16
2.1.5.2 Yüzey Kaplama.....	17
2.2 Termal Sprey Kaplama Sistemleri	19
2.2.1 Alev Sprey Kaplama Yöntemi.....	21
2.2.2 Elektrik Ark Sprey Kaplama Yöntemi	21
2.2.3 Atmosferik Plazma Sprey Kaplama Yöntemi (APS)	22
2.2.4 Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtlı (HVOF) Sprey Kaplama Yöntemi	24
2.3 Korozyon	31

2.3.1 Korozyonun Tanımı ve Önemi	31
2.3.2 Korozyon Çeşitleri.....	32
2.3.2.1 Homojen Dağılımlı (Genel) Korozyon	33
2.3.2.2 Galvanik Korozyon.....	34
2.3.2.3 Seçici Korozyon.....	36
2.3.2.4 Kabuk Altı Korozyonu.....	36
2.3.2.5 Aralık Korozyonu	37
2.3.2.6 Oyuklanma Korozyonu (pitting, çukurcuk).....	37
2.3.2.7 Filiform Korozyonu	38
2.3.2.8 Tanelerarası Korozyon.....	39
2.3.2.9 Gerilim Korozyon Çatlaması	40
2.3.2.10 Yorulmalı Korozyon	40
2.3.2.11 Erozyon Korozyonu.....	41
2.3.2.12 Titreşimli Korozyon.....	41
2.3.2.13 Hidrojen Gevrekliği	42
2.3.3 Korozyon Önleme Yöntemleri	42
2.3.3.1 Katodik Koruma	42
2.3.3.2 Anodik Koruma	43
2.3.3.3 Korozyon Önleyici (İnhibitör) Kullanma	43
2.3.3.4 Alaşım Elementi Katma.....	44
2.3.3.5 Uygun Tasarım	44
2.3.3.6 Kaplama	45
2.3.4 Korozyon Hızı Ölçüm Yöntemleri	46
2.3.4.1 Kütle Kaybı Yöntemi.....	47
2.3.4.2 Tafel Extrapolasyon Yöntemi.....	48
2.3.4.3 Lineer Polarizasyon Yöntemi	50
2.3.5 Yüksek Sıcaklık Korozyonu.....	51
3. MATERYAL VE METOT.....	53
3.1 Altlık Malzemelerin Hazırlanması.....	54
3.2 Altlık Malzemelerin Kaplanması.....	54
3.3 Rockwell-C Adhezyon Testi.....	56
3.4 Sıcak Korozyon Deneyi	57
3.5 Sıcak Korozyon Deneyi Sonrası Numunelerin Kaplama Kesit Yüzeylerinin Hazırlanması	62

3.6 SEM, EDX ve XRD Analizlerinin Yapılması	63
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	65
4.1 Kaplamaların Karakterizasyonu.....	65
4.2 Rockwell-C Adhezyon Testi Bulguları.....	68
4.3 Sıcak Korozyon Deneyi Bulguları	70
4.3.1 1 Numaralı Numune	71
4.3.2 2 Numaralı Numune	74
4.3.3 3 Numaralı Numune	78
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	84
5.1 Genel Sonuçlar.....	84
5.2 Öneriler	85
6. KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	95

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

HVOF	Yüksek hızlı oksî-yakıt
V ₂ O ₅	Vanadyum pentaoksit
Na ₂ SO ₄	Sodyum sülfat
C	Karbon
SO ₃	Kükürt trioksit
NaVO ₃	Sodyum Metavanadat
Cr ₂ O ₃	Krom III oksit veya kromia
Co	Kobalt
Ni	Nikel
Al	Alüminyum
Y	İtriyum
APS	Atmosferik plazma sprey
NaCl	Sodyum klorür
KCl	Potasyum klorür
°C	Derece santigrat sıcaklık değeri
K	Kelvin sıcaklık değeri
C ₂ H ₂	Asetilen
C ₃ H ₆	Propen
C ₃ H ₈	Propan
dk	Dakika
mm	Milimetre
cm	Santimetre
µm	Mikrometre
nm	Nanometre
pm	Pikometre
m/sn	Metre/saniye hız değeri
mm ²	Milimetrekare
NaAlO ₂	Sodyum alüminat
ZrO ₂	Zirkonyum oksit
Fe	Demir
B	Bor
O	Oksijen
H	Hidrojen
Mn	Mangan
Si	Silisyum
P	Fosfor
γ	Gama
Fe ₃ C	Demir karbür/Sementit
Mg	Magnezyum
Ce	Seryum
S	Kükürt
F	Ferit
P	Perlit
M	Martenzit

Simgeler (Devam)

MPa	Megapaskal
Kg	Kilogram
NH ₃	Amonyak
W	Volfram
Mo	Molibden
Cu	Bakır
Zn	Çinko
Cl	Klor
HCl	Hidroklorik asit
OH ⁻	Hidroksil radikali
H ₂ O	Su
pH	Potansiyel hidrojen, asidik bazik değer
Pb	Kurşun
Sb	Antimon
Ag	Gümüş
Ti	Titanyum
V	Vanadyum / Volt
N	Newton

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan malzeme test birliği
BCIRA	İngiliz dökme demir araştırma derneği
CNC	Bilgisayarlı numerik kontrol
DIN	Alman standartları
EDX/EDS	Elemental analiz
EIS	Empedans spektroskopisi
HRC	Rockwell-C Sertlik değeri
INCO	Uluslararası nikel şirketi
KGDD	Küresel grafitli dökme demir
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TBC/TBK	Termal bariyer kaplama
TS	Türk standartları
VDI	Alman mühendisleri derneği
XRD	X ışınları difraksiyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Dökme demirlerin oluşum şeması ve sınıflandırılması	5
Şekil 2.2 Dökme demir alaşımların da karbon ve silisyuma göre bölgeleri.....	6
Şekil 2.3 Grafit morfolojisine göre dökme demirler	9
Şekil 2.4 Çatlakları dolduran grafit taneciği	14
Şekil 2.5 Kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması.....	18
Şekil 2.6 Termal sprej prosesi genel görünümü	19
Şekil 2.7 Termal sprej kaplamaların gelişimi, ekipmanları ve süreçlerin grafiksel gösterimi	20
Şekil 2.8 Alev sprej kaplama püskürtme tekniği şematik gösterimi	21
Şekil 2.9 Elektrik ark sprej kaplama püskürtme yöntemi şematik gösterimi	22
Şekil 2.10 Plazma sprej kaplama yöntemi şematik gösterimi	23
Şekil 2.11 Plazma sprej kaplama yönteminde kaplama oluşumu.....	24
Şekil 2.12 HVOF kaplama yöntemi tabancası şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.13 HVOF yöntemi kaplama sistemi.....	25
Şekil 2.14 Partikülün altlık malzemeye mekanik bağlanması.....	26
Şekil 2.15 Oksijen/Yakıt oranı ve yakıt cinsine bağlı olarak alev sıcaklığı grafiği	27
Şekil 2.16 HVOF kaplama yöntemi tabancası şematik gösterimi 2.....	28
Şekil 2.17 Uçağın oluşturduğu ses dalgaları	29
Şekil 2.18 De Laval nozülü	30
Şekil 2.19 Çeliğin korozyon döngüsü	32
Şekil 2.20 Homojen dağılımlı korozyon	33
Şekil 2.21 Galvanik korozyon mekanizması.....	34
Şekil 2.22 Ayrı türden olan metallerin yalıtkan conta ve ara parçaları kullanarak izolasyonu için bir örnek	35
Şekil 2.23 Pirinç (bakır-çinko) malzemelerde seçici korozyon	36
Şekil 2.24 HCl asit ortamında aralık korozyonu başlama mekanizması.....	37
Şekil 2.25 Çukurcuk korozyonu hasar şekillerinin şematik görünümü.....	38
Şekil 2.26 Filiform korozyonu şematik gösterimi.....	39
Şekil 2.27 Paslanmaz çelikte meydana gelen tane sınırlarında krom karbür çökmesi	39
Şekil 2.28 Gerilmeli korozyonun şematik gösterimi.....	40

Şekil 2.29 Yorulmalı korozyonun şematik gösterimi.....	40
Şekil 2.30 Erozyon korozyonu aşamaları.....	41
Şekil 2.31 Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri	49
Şekil 2.32 Polarizasyon direnç yöntemi kullanılarak korozyon hızı belirlenmesinde akım potansiyel eğrisi.....	50
Şekil 3.1 Deneysel çalışma şeması.....	53
Şekil 3.2 Korozyon tuzlarının SEM görüntüleri.....	60
Şekil 3.3 Normal koşullarda ateşlemeli motorun tipik sıcaklık değerleri.....	61
Şekil 4.1 a) Kaplamasız GGG40(1), b) 9624 kodlu kaplama (2), c) 9951 kodlu kaplama (3) yapılmış KGDD'nin X ışınları analizi.....	65
Şekil 4.2 Kesit ve yüzey SEM görüntüleri a) 9624 kodlu kaplama (2), b) 9951 kodlu kaplama (3) ile yapılmış GGG40 küresel grafitli dökme demirin kesit ve yüzey SEM görüntüsü.....	66
Şekil 4.3 a) 9624 kodlu kaplama (2), b) 9951 kodlu kaplama (3) tozu ile kaplanmış GGG40 küresel grafitli dökme demirlerin EDX yüzey alan analizi.....	67
Şekil 4.4 VDI 3198 Adhezyon testi prensipleri.....	68
Şekil 4.5 HVOF yöntemi ile Amdry 9624 (NiCrAlY) kaplanmış GGG40 küresel grafitli dökme demirin (2) Rockwell-C Adhezyon testi sonrası SEM görüntüleri.....	69
Şekil 4.6 HVOF yöntemi ile Amdry 9951 (CoNiCrAlY) kaplanmış GGG40 küresel grafitli dökme demirin (3) Rockwell-C Adhezyon testi sonrası SEM görüntüleri.....	70
Şekil 4.7 Kaplamasız GGG40 (1) küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası XRD grafiklerinin karşılaştırılması.....	72
Şekil 4.8 Kaplamasız GGG40 küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası SEM görüntüleri.....	73
Şekil 4.9 Amdry 9624 metalik toz kaplanmış GGG40 (2) küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası XRD grafiklerini karşılaştırılması.....	74
Şekil 4.10 Amdry 9624 metalik toz kaplanmış GGG40 küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası SEM görüntüleri.....	76
Şekil 4.11 Amdry 9951 metalik toz kaplanmış GGG40 (3) küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası XRD grafiklerinin karşılaştırılması.....	78

Şekil 4.12 Amdry 9951 metalik toz kaplanmış GGG40 küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası SEM görüntüleri.....	79
Şekil 4.13 2-İşlemsiz ve 2-600-6s Kesit SEM görüntüleri.....	81
Şekil 4.14 3-İşlemsiz ve 3-600-6s Kesit SEM görüntüleri.....	82
Şekil 4.15 Kaplama kesit görüntüleri a) 3-700-6s, b) 2-700-6s.....	83



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Mikroyapı ve özelliklerine göre dökme demirlerin sınıflandırılması.....	10
Çizelge 2.2 Ferritik ve perlitik yapıya sahip küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	11
Çizelge 2.3 TS 526 Türk standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	12
Çizelge 2.4 DIN 1693 Alman standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması	13
Çizelge 2.5 Farklı KGDD'lerin mikroyapıları.....	13
Çizelge 2.6 ASTM A-356 standardına göre KGDD'lerin standartları.....	13
Çizelge 2.7 KGDD'nin mühendislik özelliklerinin diğer malzemelerle karşılaştırılması.....	14
Çizelge 2.8 Yüzey sertleştirilmesi için temel yöntemler.....	16
Çizelge 2.9 HVOF yönteminin uygulandığı çeşitli endüstri kolları ve uygulamaları....	28
Çizelge 2.10 Bölgesel korozyonun sınıflandırılması.....	33
Çizelge 2.11 Denizel ortamda kullanılan metaller için tipik galvanik seri.....	35
Çizelge 2.12 Korozyon hızı ölçüm biriminin, ifade ettiği bağıl korozyon direnç ve eşdeğerleri olan metrik birimlerle karşılaştırılması.....	48
Çizelge 3.1 HVOF yöntemi parametreleri.....	55
Çizelge 3.2 Amdry 9624 toz kimyasal içeriği.....	56
Çizelge 3.3 Amdry 9951 toz kimyasal içeriği.....	56
Çizelge 3.4 Numunelerin numaralandırılması.....	57
Çizelge 3.5 Tuzların fiziksel özellikleri.....	60
Çizelge 3.6 Numunelerin kodlanması.....	63
Çizelge 4.1 Numunelerin numaralandırılması.....	70
Çizelge 4.2 Numunelerin kodlanması.....	71
Çizelge 4.3 SEM-EDX analizleri, 2- İşlemsiz, 2-500-6s, 2-700-6s.....	77
Çizelge 4.4 SEM-EDX analizleri, 3- İşlemsiz, 3-500-6s, 3-700-6s.....	80

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 a) Isı değiştiricide atmosferik koşullarda yüksek sıcaklık korozyonu, b) Vanadyum ile yüksek sıcaklık korozyonuna uğramış egzoz valfi	52
Resim 3.1 GGG40 SEM görüntüsü.....	54
Resim 3.2 rnek numune ölçüleri ve görüntüsü	54
Resim 3.3 HVOF yöntemi kaplama sistemi	55
Resim 3.4 Sertlik lme cihazı ve Rockwell-C Adhezyon testinin uygulanması....	57
Resim 3.5 a) Ultrasonik banyo, b) ETV fırını.....	58
Resim 3.6 Numune zerine tuz serilmesi.....	59
Resim 3.7 zerine tuz karışımı koyulmuş numuneler.....	59
Resim 3.8 Kuyu tipi fırın.....	62
Resim 3.9 Metkon marka zımpara ve parlatma cihazı.....	62
Resim 3.10 Numune kesit yüzey görüntüleri.....	63
Resim 3.11 LEO marka 1430 model taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	64
Resim 3.12 Bruker marka D 8 Advance model x ışınları kırınımı cihazı.....	64

1. GİRİŞ

Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD), İngiliz Dökme Demir Araştırma Derneği (British Cast Iron Research Association, BCIRA) ve Uluslararası Nikel Şirketi (İnternational Nikel Company, INCO) tarafından bağımsız olarak geliştirilerek ilk defa Amerikan Dökümcüler Cemiyetinin 1948’de gerçekleşen yıllık toplantısında döküm endüstrisine yeni bir malzeme olarak tanıtıldığından bu yana çeliklerin ve dökme demirlerin özelliklerini bir arada bulundurması sebebiyle otomotiv, tekstil, ziraat, madencilik ve metalürji endüstrisi gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır (Çelik 1996, Gençer 2012, Demirlek 2013, Tanrıverdi 2015).

Endüstride kullanılan mekanik parçaların kullanımı sırasında aşınma ve korozyon sebebiyle önemli derecede ekonomik kayıplar meydana gelmektedir. Bu kaybı ortadan kaldırmak veya azaltmak için malzemenin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Küresel Grafitli Dökme Demir malzemelerin yüksek sıcaklık, aşınma, korozyon ve oksidasyon gibi koşullarda istenilen özellikleri gösteremedikleri veya yetersiz kaldıkları durumlarda yüzeylerine kaplama ve sertleştirme gibi çeşitli yüzey işlemleri uygulanarak mekanik ve tribolojik özelliklerinin bir veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır (Ayday 2013, Barut *et al.* 2014).

Yüksek sıcaklıklarda atmosferik koşullarda oluşan oksidasyon sonucunda ve saldırgan bileşiklere maruz kalan metalik malzemelerin yüzeyinde korozyon ürünü olarak yeni oluşumlar meydana gelmektedir. Bu oluşumlar ana malzemenin yapısını değiştirerek veya bozarak çalışma ortamında sağlanması gereken mekanik özellikleri bertaraf etmektedir. V_2O_5 (Vanadyum pentaoksit) ve Na_2SO_4 (Sodyum sülfat) bileşikleri saldırgan bileşiklere birer örnektir. Gaz türbinlerinde, sıvı yakıtlı fırınlarda ve otomobil motorlarında düşük kaliteli yakıtların içerisinde düşük oranlarda bu bileşikler mevcuttur ve zamanla mekanik parçalar üzerinde birirmektedir. Vanadyum pentaoksit özellikle sodyum sülfat varlığı ile Sodyum Vanadat (sodyum vanadyum oksit) oluşturarak daha agresif hale gelmektedir. Bunun sonucunda ana malzeme veya kaplama yüzeyindeki elementler ile kimyasal reaksiyona girerek yeni bir korozyon ürünü veya metal oksit tabakaları oluşturabilmektedir. (Dudziak 2009, Körpe 2010, Avcı 2015).

Küresel grafitli dökme demirin yüksek sıcaklıklarda bu koroziif çalışma ortamlarında yüksek korozyon dayanımı için, termal sprey kaplama yöntemlerinden biri olan Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) yöntemi de kullanılmaktadır. HVOF yöntemiyle yüksek bağ mukavemetine sahip, temiz, sert ve yoğun yapıda, aşınma ve korozyon direnci yüksek kaplamalar üretilebilmektedir. Ayrıca termal gerilmelerin oldukça düşük olması, karmaşık geometrik şekillerdeki parçalara uygulanabilmesi ve altlık malzemenin 100 °C sıcaklığı aşmayarak malzemedeki çarpılma oluşturmaması, bu yöntemin avantajlarından bazılarıdır. HVOF yöntemiyle, koroziif aşındırıcı ortama ve sıcaklık değerine göre uygun kaplama malzemeleri seçilerek küresel grafitli dökme demir malzemeyi bulunduğu çalışma ortamı için gerekli mekanik ve yüzey özelliklerinin korunması sağlanabilmektedir. V_2O_5 ve Na_2SO_4 tuzlarının yüksek sıcaklıktaki koroziif etkilerinden korunmak için özellikle Kobalt (Co) ve Nikel (Ni) esaslı kaplama malzemelerinin seçimi daha uygun olmaktadır (Stokes 2006, Dudziak 2009, Dokur 2014).

Bu çalışmada; Nikel ve Kobalt esaslı Metco firması tarafından ticari olarak sunulan Amdry 9624 ve Amdry 9951 kodlu kaplama tozları HVOF yöntemi ile Küresel Grafitli Dökme Demir yüzeyine kaplanarak, kaplama yüzeylerinin yüksek sıcaklıklarda saldırgan koroziif aşındırma özeliğine sahip V_2O_5 ve Na_2SO_4 tuzlarıyla etkileşiminin ve kaplama tabakasının yapışma mukavemetinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Mauer ve arkadaşları (2013), termal spreyci kaplama yöntemlerinden yüksek hızlı oksidasyon yakıt (HVOF) ve atmosferik plazma spreyci yöntemi (APS) ile üretilen kaplamaları kıyaslamışlardır. Amdry 9951 (CoNiCrAlY) metalik tozunu her iki yöntemle malzeme yüzeyinde kaplama oluşturmuşlardır. HVOF yöntemini kullanarak APS yöntemine göre parçacıkların daha fazla kinetik enerjiye sahip olduklarını, daha düşük oksidasyon, daha yüksek kaplama yoğunluğuna sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Lai (2007), farklı süperalaşımlara yüksek sıcaklık korozyonu testini uygulamıştır. Krom (Cr) içeriğine sahip alaşımların ve kaplamaların, yüksek korozyon direncine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Vuelas-Rayos ve arkadaşları (2012), yüksek kromlu (%18.53-30.48), yüksek karbonlu (3.82-5.17) dökme demire ve 304 tipi paslanmaz çeliğe 670 °C'de NaCl-KCl tuzları ile yüksek sıcaklık korozyonu testi uygulamışlardır. Farklı krom ve karbon oranına sahip dökme demirlerin 304 tipi paslanmaz çeliğe göre yüksek sıcaklıktaki korozyon miktarlarını kütle kaybı yöntemi ile incelemeye çalışmışlardır. Sonuç olarak; tüm dökme demir numunelerin korozyon miktarının paslanmaz çeliğe göre daha fazla olduğunu, karbon (C) oranı arttıkça korozyon miktarının arttığını ve krom ilavesinin dökme demirlerde bozunma hızını arttırdığını ortaya koymuşlardır.

Sotelo-Mazon ve arkadaşları (2014), demir (Fe), krom (Cr) ve nikel (Ni)'in, 700 °C'de 100 saat NaVO₃ ortamında elektrokimyasal performanslarını test etmişlerdir. Nikelin en iyi performansı ortaya koyduğunu tespit etmişlerdir.

Diaz ve arkadaşları (2015), AISI 309 paslanmaz çeliğini %50 Na₂SO₄ + %50 V₂O₅ tuz karışımında 700 °C sıcaklıkta 5 gün boyunca bekletmişlerdir. Korozyon testlerini empedans spektroskopisi (EIS) ve lineer polarizasyon yöntemleri ile gerçekleştirmişlerdir. Deney sonucunda krom oksit (Cr₂O₃) ve yüzeye yayılan sülfür varlığıyla intergranüler korozyon meydana geldiğini ortaya koymuşlardır.

Cabral-Miramontes ve arkadaşları (2014), yüksek hızlı oksit-yakıt yöntemiyle en uygun püskürtme mesafenin tespiti için Amdry 9951 (CoNiCrAlY) tozları ile malzemeleri kaplamışlardır. Deney sonucunda kaplamanın oksit oranı, yoğunluğu ve mukavemeti gibi özelliklerini göz önüne alarak en uygun sprej mesafesinin 229-254 mm arasında olduğunu tespit etmişlerdir.

Daroonparvar ve arkadaşları (2012), atmosferik plazma sprej yöntemiyle malzemeye inconel 738 / Amdry 9624 (NiCrAlY) / YSZ (itriya-stabilize zirkonya) ve inconel 738 / Amdry 9624 (NiCrAlY) / YSZ / nano-Al₂O₃ (Alümina) içeriğine sahip iki farklı termal bariyer kaplama üretmişlerdir. Bu farklı iki tip kaplamayı %45 Na₂SO₄ + %55 V₂O₅ tuz karışımında 1000 °C sıcaklıkta 52 saat boyunca bekletmişlerdir. Nano alümina tabakasının, korozif tuzların etkisiyle NaAlO₂ bileşiklerin oluşumuyla azaldığını tespit etmişlerdir. En üst katmanı YSZ'den oluşan diğer bariyer kaplamada ise; tuzların YSZ tabakasının içlerine doğru sızdığını ve ZrO₂ ve YVO₄ bileşiklerini meydana getirerek tahrip ettiğini tespit etmişlerdir. Ancak nano alümina üst katmanına sahip bariyer kaplamanın, korozif tuzları YSZ katmanına sızmasını engellediğini ortaya koymuşlardır.

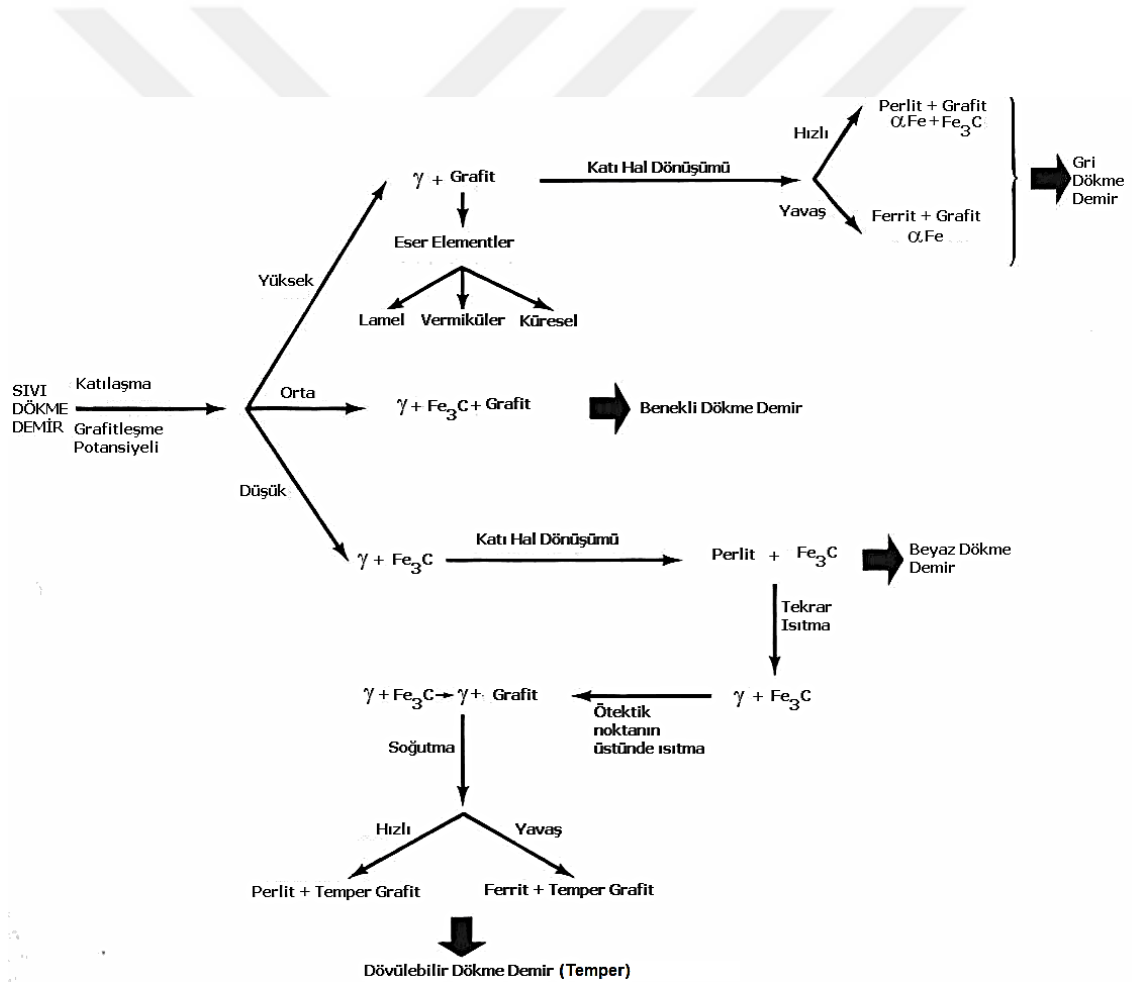
Kaya (2007), atmosferik plazma (APS) ve yüksek hızlı oksit-yakıt (HVOF) termal sprej yöntemlerini kıyaslamak için çelik altlık malzemeyi CrNiBSi + %80 WC-Co ve Cr3C2-NiCr (75/25) tozlarıyla kaplamıştır. HVOF yönteminde, APS yöntemine göre daha yüksek mikro sertlik, yüksek kaplama verimi, kaplamada düşük oksit ve daha fazla aşınma ömrüne sahip kaplamalar üretildiğini tespit etmiştir.

Jegadeeswaran ve arkadaşları (2013), gaz türbinlerinde kullanılan Ti-31, MDN-121 ve Superco 605 malzemelerine (Cr3C2-25(Ni20Cr)) + Amdry9624(NiCrAlY) bazlı tozlarla HVOF yöntemi ile kaplama oluşturmuşlardır. Kaplanmış malzemelere döngüler halinde 800 °C ' de %50 Na₂SO₄ + %50 V₂O₅ tuzlarında 1 saat bekletip 20 dakikada soğuma şeklinde yüksek sıcaklık korozyonu testleri uygulamışlardır. Deney sonucunda, kaplanmış numunelerin krom oksit tabakası oluşturarak kaplanmamış malzemelere göre daha iyi korozyon direnci sağladıklarını ortaya koymuşlardır.

2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirler (KGDD)

2.1.1 Dökme Demirlerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Yüksek fırında veya diğer tesislerde demir cevherinin indirgenmesi ve ergitilmesi yoluyla elde edilen ve içinde %2'den fazla karbon ve diğer alaşım elementlerini (Mn, Si, P, S, Cr) içeren bir Demir-Karbon (Fe-C) alaşımına pik demir denir. Pik demirin, ergitme fırınlarında tekrar ergitilerek bazı metalurjik işlemlerle değişiklik yapılarak, bir kalıp içine dökülmesine ve kalıp boşluğu şeklini alarak katılaşması ile meydana gelen malzemeye Dökme Demir denir (Fredrikson 2006, Döngel 2008)

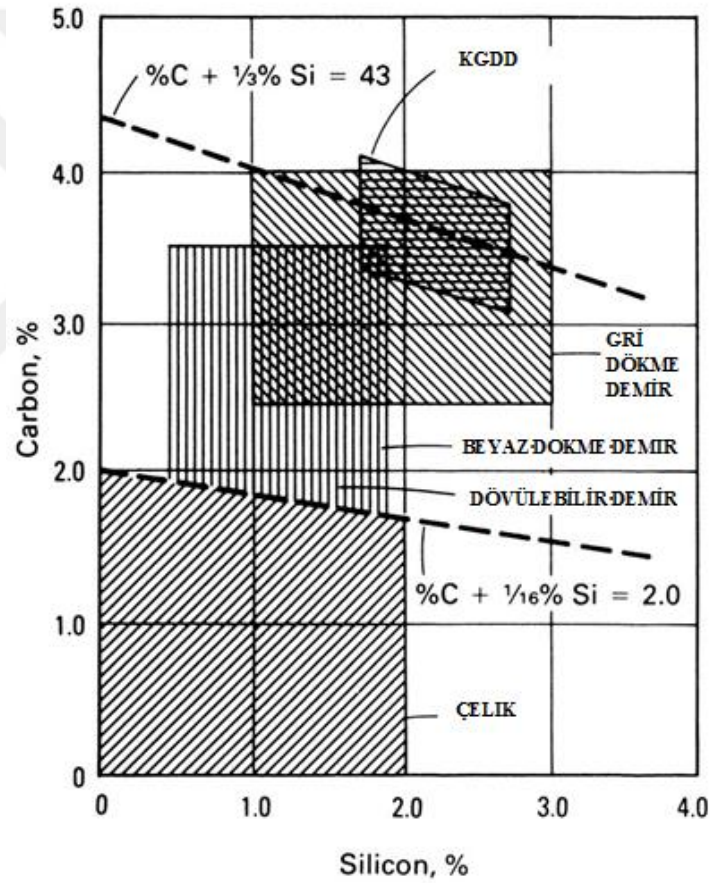


Şekil 2.1 Dökme demirlerin oluşum şeması ve sınıflandırılması (Şen 1997).

Dökme demirler, esasında Demir-Karbon(Fe-C) alaşımlarıdır. Demir içindeki C oranı %2'nin üzerine çıktığında malzeme dökme demir, bu oranın altına düştüğünde çelik

olarak isimlendirilir. Buna göre Fe-C denge diyagramına baktığımızda dökme demirlerin, %2'den %6,67'ye C içerdiği görülür. Ancak yüksek C oranı malzemeyi aşırı kırılgan yapar. Bu sebeple pratikte bu dökme demirler %2-4 C, %1-3,5 Si içerirler. Dökme demirler kolayca ergitilebilir ve genellikle son boyutlarda imal edilen karmaşık şekillerde dökülebirlirler. (Elliott 1988, Söğüt 1998, Yazıcı 2006)

Dökme demirlerde en önemli iki bileşen Karbon (C) ve Silisyumdur (Si). Şekil 2.2’de Karbon ve Silisyum oranlarının dökme demir çeşitlerinin oluşumuna etkileri bölgeler halinde verilmiştir (Ayday 2013).



Şekil 2.2 Dökme demir alaşımlarında karbon ve silisyuma göre bölgeleri.

Dökme demirler, yüksek aşınma dayanımı ve üstün basma dayanımı gibi özellikleri sebebiyle geniş kullanım alanına sahiptirler. Döküm içerisinde bulunan karbonun sementit (Fe_3C) yapmasından dolayı serttir ve biçimlendirmeye elverişli değildirler. Dökme demir içerisinde manganez miktarı fazla ise karbonun tamamı sementit

oluşturur, bu sebeple de sert ve rengi beyaz olur. Manganezi fazla olan dökme demirler kırık rengi beyaz olması sebebiyle Beyaz Dökme Demir adını alır. Silisyumu fazla olan dökme demirlerde ise karbonun büyük bir kısmı serbest halde yani grafit halinde bulunur. Kesit kırılarak incelenecek olursa, renk koyu ve siyaha yakın görülür. Bu sebeple silisyumu fazla olan dökme demirler Esmer Dökme Demir veya Kır (Gri) Dökme Demir adını alırlar. Şekil 2.1’de verilen Gri, Benekli, Beyaz ve Temper olmak üzere 4 tip dökme demir vardır. Grafit yapılarına göre Lamel, Vermiküler, Küresel ve Temper Grafitli Dökme Demirler olarak 4’e ayrılmaktadır. (Davis 1996, Akman 2006, Döngel 2008).

2.1.1.1 Beyaz Dökme Demir

Beyaz dökme demirin içerisinde bulunan karbon sementit (Fe_3C) halindedir. Mikroyapısı perlit ve sementitten oluşur. Katılaşma sıcaklığında hızlı soğutma yoluyla elde edilirler. Bütün beyaz dökme demirler ötektik altı alaşımlardır. Beyaz dökme demirlerin yüksek oranda sementit barındırmasından dolayı yapısı sert ve aynı zamanda aşınmaya karşı dirençlidir. Ayrıca gevrek ve işlenebilmeleri zordur. Aşınma direncinin önemli olduğu ve sünekliğin istenmediği yerlerde kullanılırlar. Beyaz dökme demirlerin düşük darbe dirençleri ve işlenebilme kabiliyetlerinin kötü olması sebebiyle uygulama alanlarını kısıtlıdır (Toptaş 2009).

2.1.1.2 Gri (Lamel Grafitli) Dökme Demir

Dökme demirler arasında en çok kullanılan Gri Dökme Demirlerdir. Bileşimlerinde %2.5-4 arası karbon içermektedir. Karbonun çoğu, grafit lamelleri halinde bulunur. Şekil 2.1’de belirtildiği gibi iki farklı şekilde oluşmaktadır. Katı hal dönüşümünde yavaş soğutulursa yapı Ferrit+Grafit, hızlı soğutulursa Perlit+Grafit şeklinde oluşmaktadır. Bu durum mekanik özelliklerine etki etmektedir. Morfolojisi Ferrit+Grafit halinde en düşük mukavemete sahiptir. Bileşimindeki karbon miktarı arttıkça sertlik ve mukavemeti artmaktadır. Çeşitli özelliklere sahip olabildiklerinden geniş bir kullanım alanına sahiptirler. En üstün özellikleri, titreşim söndürme kabiliyeti, ucuzluk ve yüksek basma dayanımına sahip olmasıdır (Kayalı 2006, Döngel 2008).

2.1.1.3 Benekli Dökme Demir

Hızlı soğuma koşullarında beyaz dökme demirler, nispeten daha yavaş soğuma koşullarında ise, gri dökme demirler ortaya çıkar. Soğuma hızı, dökülen parçanın beyazdan griye geçişinin gerçekleştiği bir aralığa denk gelirse, beyaz ve gri yapıların birlikte ortaya çıktığını görebiliriz. Benekli dökme demirin kesit yüzeyini incelediğimiz zaman beyaz arka plan üzerinde gri adacıklar ortaya çıktığı görülür (Akman 2006).

2.1.1.4 Temper Grafitli Dökme Demir

Uygun sıcaklıklarda sert ve kırılgan beyaz dökme demirin tavlanması ile yapısında bulunan sementit ve perlitin parçalanması sonucu Temper Grafitli Dökme Demirler oluşur. Karbon içeriğinin çoğunluğunu oluşturan ve temper grafit olarak bilinen düzensiz rozetler, serbest kalan karbonun yavaş soğuması ile meydana gelmektedir. Ferritik ve Perlitik olmak üzere iki çeşidi mevcuttur. Endüstriyel uygulamalarda en çok ferritik temper dökme demir kullanılmaktadır. Ferritik temper dökme demirler, üretim metoduna göre siyah temper döküm ve beyaz temper döküm olarak ikiye ayrılır. Beyaz temper döküm, elektrikli ergitme ocaklarında oksitleyici bir ortamda karbonun indirgenmesiyle elde edilir. Siyah temper dökme demir elde etmenin temel prensibi de beyaz dökme demirin dekarbürizasyonu veya oksidasyona yol açmayacak ortamlarda tavlanmasıdır (Şen 1997, Söğüt 1998).

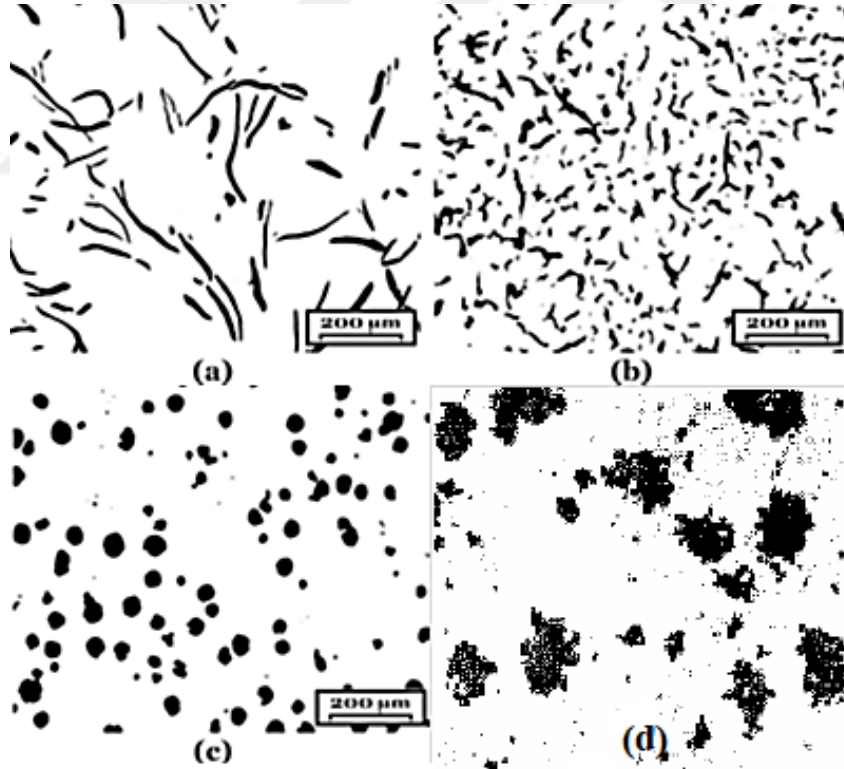
2.1.1.5 Vermiküler (Kompakt) Grafitli Dökme Demir

Gri (lamel grafitli) dökme demir ile küresel grafitli dökme arasında morfolojik bir yapıya sahiptir. Vermiküler (kompakt) grafitli dökme demirin birçok adlandırılması mevcuttur.

- a) Vermiküler grafitli dökme demir
- b) Kompakt grafitli dökme demir
- c) Quasi-Flake dökme demir
- d) Yüksek mukavemetli gri dökme demir

e) Silindirik grafitli dökme demir

Küresel grafitli dökme demirin üretilmesi aşamasında küreselleştirme işlemini gerçekleştiren aşılama elementi Magnezyum (Mg)'un yeterince ilave edilmemesiyle küresel hale gelemeyen grafitler küresel-lamel arası bir grafit yapısı oluşturarak vermiküler grafitli dökme demiri oluştururlar. Mekanik özellikleri gri dökme demirden daha üstündür ve küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerine yakındır. Isı iletkenliği gri dökme demir kadardır ve küresel grafitli dökme demirden yüksektir. Hem yüksek dayanım hem yüksek ısı iletkenliği istenen durumlarda ideal bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Isıl şok dayanımının yüksek olmasından dolayı son yıllarda Vermiküler grafitli dökme demir üretimi ve kullanım alanı gittikçe artmaktadır. Örnek olarak ingot kalıpları, egzoz manifoldları, dizel motor silindir kapakları ve hadde silindiri gibi yaygın kullanım alanına sahiptir (Söğüt 1998).



Şekil 2.3 Grafit morfolojisine göre dökme demirler, a) Lamel grafitli dökme demir, b) Vermiküler grafitli dökme demir, c) Küresel grafitli dökme demir d)Temper grafitli dökme demir (Akman 2006, Ghasemi 2016).

2.1.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Tanımı ve Özellikleri

Küresel Grafitli Dökme Demirde serbest karbon, lamel yerine küresel grafit şeklindedir. Nodüler, sfero ve düktil demir gibi isimlerle bilinir. Döküm işleminden önce ergiyik demire çok küçük miktarda (%0.1) Magnezyum (Mg) veya (%0.02) Seryum (Ce) ilavesi ile sementit oluşumunu engelleyerek küresel grafitler elde edilir. KGDD'in kimyasal kompozisyonu, gri dökme demirin içeriğine benzemektedir. Ancak, kükürt ve fosfor gibi elementlerin miktarları çok azdır. KGDD'ler uygun süneklik derecesine ilave olarak iyi bir akma dayanım aralığına sahiptir ve temper dökme demirin aksine boyutsal olarak geniş bir aralıkta dökülebilirler. Çizelge 2.1'de dökme demir çeşitlerinin mikroyapı ve kırılma özelliklerine göre sınıflandırılması verilmiştir (Çelik 1996, Döngel 2008, Toptaş 2009, Ayday 2013).

Çizelge 2.1 Mikroyapı ve özelliklerine göre dökme demirlerin sınıflandırılması (Toptaş 2009).

Dökme Demir Sınıfları	Karbonca Zengin Faz	Matris *	Kırılma Rengi	Elde Edilme Şekli
Gri Dökme Demir	Lamel Grafit	P	Gri	Katılaşma
Küresel Grafitli D.D.	Küresel Grafit	F, P, Ö	Gümüş-Gri	Katılaşma/Isıl İşlem
Kompakt Grafitli D.D	Kompakt Grafit	F, P	Gri	Katılaşma
Beyaz Dökme Demir	Fe ₃ C	P, M	Beyaz	Katılaşma/Isıl İşlem**
Benekli Dökme Demir	Lamel Grf.+Fe ₃ C	P	Benekli	Katılaşma
Temper Dökme Demir	Temper Grafit	F,P	Gümüş-Gri	Isıl İşlem

*) F; ferrit, P; perlit, O; östenit, M; martenzit, **) Beyaz dökme demir genellikle ısıl işlemsizdir, fakat kalıntı gerilmeleri gidermek ve östenitik dönüşümü sağlamak için ısıl işlem yapılabilir.

2.1.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması ve Mekanik Özellikleri

Küresel Grafitli Dökme Demirler, mekanik özelliklerine ve mikroyapıya göre ayrı şekilde sınıflandırılırlar. Mikroyapıya göre genellikle ferritik ve perlitik olarak sınıflandırılırlar. Ancak östenitik, martenzitik ve beynitik yapıları da mümkündür. Mekanik özelliklerine göre ülkelerin kendi belirlemiş olduğu standartlar mevcuttur (Karamusaoğlu 2009).

2.1.3.1 Mikroyapıya Göre Sınıflandırma

Matris mikroyapısı, döküm şartlarında soğuma hızına ve alaşım içeriğine bağlı olarak ferritik, perlitik ya da ikisinin karışımı şeklinde olabilir. Malzemenin kesit kalınlığı da önemli bir etkidir (Kılınçlı 2004).

Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demir: Grafit kürelerinin ferrit matris içerisine dağılmış halde bulunması halinde ferritik diye tabir edilen yapı oluşmaktadır. Sünek ve darbe direnci yüksek malzemeler olup çekme ve akma mukavemetleri düşük karbonlu çeliklere eşdeğerdir. Uygun oranda magnezyum alaşımı ile küresel grafitli dökme demirin çok yavaş şekilde katılaşması ile elde edilir (Karamusaoğlu 2009).

Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demir: Grafit kürelerinin perlit matris içerisinde dağılması sonucu oluşur. Yüksek mukavemet, yüksek aşınma direnci, süneklik ve yüksek darbe direncine sahiptir. Yaklaşık mekanik özellikler sergileyen çeliklere göre işlenebilirliği daha iyidir. Ayrıca farklı ısıl işlemler uygulanarak beynitik ve martenzitik yapılar da elde edilebilmektedir (Karamusaoğlu 2009).

Ferritik-Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demir: En yaygın şekilde üretilen ve kullanılan yapı türüdür. Grafit küreleri hem perlit, hem ferrit matrisler içerisinde dağılmış haldedir. Üretim maliyetleri düşük ve işlenebilirlik kabiliyetleri yüksektir. Yüksek çekme değeri ve aşınma direncine sahiptirler (Söğüt 1998, Karamusaoğlu 2009).

Çizelge 2.2 Ferritik ve perlitik yapıya sahip küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Özdemir 2007).

Mikro Yapı	Ferritik	Perlitik
Çekme Mukavemeti (MPa)	370-550	650-750
Akma Mukavemeti (MPa)	221-350	360-410
Sertlik (BSD)	120-170	240-255
Kopma Uzaması (%)	12-30	1-8

Martenzitik Küresel Grafitli Dökme Demir: Döküm sırasında yeterince ilave edilen alaşım elementleri ile perlit oluşumu engellenir ve katılaşma sırasında su verme işlemiyle döküm, hızlıca soğutulurak martenzitik yapı elde edilir. Ardından temperleme işlemi yapılır ve temper martenzit yapı elde edilmiş olur, Grafit küreleri de bu martenzit yapı içerisine dağılmış şekilde konumlanır. Martenzit matrisine sahip küresel grafitli dökme demirler düşük süneklik ve tokluğa, yüksek statik dayanıma ve yüksek aşınma direncine sahiptirler (Karamusaoğlu 2009).

Östenitik Küresel Grafitli Dökme Demir: Esasen tek tip yapıya sahip değildir. Östenit matrisi yanında az miktarda perlitten oluşur. Grafit küreleri, şekillerini biraz kaybederler ve bu iki faz içerisinde dağılırlar. Korozyon ve oksidasyon direnci yüksek ve üstün manyetik özellikleri, yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılığa sahip olmasını sağlamaktadır. Yüksek oranda nikel (Ni) ihtiva ederler (Karamusaoğlu 2009).

2.1.3.2 Mekanik Özelliklere Göre Sınıflandırma

Ülkeler, çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik gibi mekanik özelliklere göre kendi standartlarını oluşturmuşlardır. Çizelge 2.3'te TS 526 Türk standardı, Çizelge 2.4'te ise Alman standardı olan DIN 1693 göre küresel grafitli dökme demir standartları ve bazı mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 TS 526 Türk standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması (Şen 1997).

Kısa Gösterimi	İç Yapısı	Çekme Dayanımı (Kg/mm ²)	Akma Dayanımı (Kg/mm ²)	Kopma Uzaması (%)	Brinel Sertlik Değeri
DDK-40	Daha çok Ferritik	42	28	12	140-201
DDK-50	Ferritik+Perlitik	50	35	7	170-241
DDK-60	Perlitik+Ferritik	60	40	3	192-269
DDK-70	Daha çok Perlitik	70	45	2	229-302
DDK-80	Perlitik	80	50	2	248-352
DDK-35.3	Ferritik	35	22	22	-
DDK-40.3	Ferritik	40	25	18	-

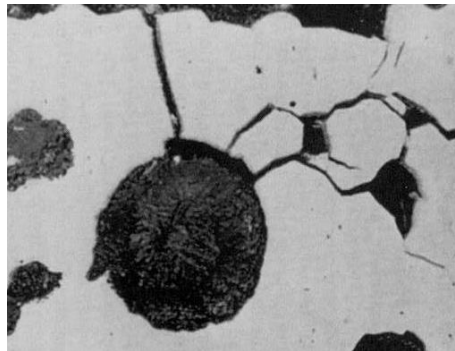
bakımından diğer dökme demirlere benzemektedir (Tanrıverdi 2015).

Çizelge 2.7 KGDD'nin mühendislik özelliklerinin diğer malzemelerle karşılaştırılması (Tanrıverdi 2015).

Özellikler	KGDD	Temper Dökme Demir	Gri Dökme Demir	%0.3 Karbonlu Çelik Döküm	Beyaz Dökme Demir
Dökülebilirlik	1	2	1	5	3
Yüzey Sertleşebilirliği	1	1	1	3	-
Elastisite Modülü	1	2	3	1	-
İşlenebilirlik	2	2	1	3	-
Darbe Direnci	2	3	5	1	-
Aşınma Direnci	2	4	3	5	1
Korozyon Direnci	1	2	1	4	5
Titreşim Sönümleme	2	2	1	4	5
Dayanım/Ağırlık oranı	1	4	5	3	-
Üretim Maliyeti	2	3	1	4	2

Not: Puanlama bareminde 1- En iyi, 5- En kötü.

Endüstri uygulamalarında KGDD kullanımı kritik parçalarda birçok başarılı uygulamaya sahip olması, bu malzemenin çok yönlü olmasını sağlamaktadır. Elastik davranış, statik dayanım, süneklik, sertlik, kırılma tokluğu ve yorulma vb. özellikleri çok yönlü kullanım alanına sahip olmasında önemli derecede etkilidir. Küresel grafitli dökme demirler, içyapı kontrolü sağlanarak farklı özellikler kazanabilir. Bu özellikleri grafit içeriğiyle birlikte matris yapısı (Ferritik, perlitik, martenzitik, temper martenzitik, östenitik) ile belirlenir. Farklı KGDD'lerin ortak özellikleri grafit (%100 Karbon) taneciklerine sahip olmasıdır. Birçok önemli özelliğine sahip olmasında grafitlerin büyük oranda etkisi vardır. Şekil 2.4'te çatlak ilerlemesini engelleyen ve malzemeyi daha sünek hale getiren grafit taneciği verilmiştir (Gençer 2012).



Şekil 2.4 Çatlakları dolduran grafit taneciği (Gençer 2012).

2.1.4 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

Küresel Grafitli Dökme Demirler, üstün özellikleri sayesinde birçok sektörde kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde yüksek yorulma dayanımı, iyi işlenebilirlik, düşük maliyet ve yüksek elastisite modülü özelliklerine sahip olduğundan dolayı krank mili üretiminde, yüksek aşınma direnci ve akma dayanımı özelliklerinden dolayı da dişli üretiminde kullanılır. Darbe sönümleme, aşınma direnci, düşük sıcaklıkta şok özelliği sayesinde ise piston segmanı, silindir bloğu, biyel kolu, silindir başı ve fren parçalarında kullanılır. Ayrıca tekerlek mili, direksiyon bağlantıları, manifoldlar, yüksek güvenlik valfleri, motor bağlantı rotları ve kamyon akslarında kullanılır. Metalürji ve maden endüstrisinde kırıcı gövdeler, sıcak hadde merdaneleri, kalıp, ergitme ve cüruf potalarında kullanılır. Güç üretim sistemlerinde, kompresör gövde ve kafaları, su türbinleri dökme parçaları, gaz türbini kompresör kutuları, sıcağa dayanıklı fırın parçaları ve brülör gövdelerinde kullanılır. İnşaat sektöründe beton karıştırıcıları, kreyn parçaları ve yol inşaat makinalarında kullanılır. (Gençer 2012, Demirlek 2013, Tanrıverdi 2015).

Örnek olarak, en çok kullanılan iki sınıf küresel grafitli dökme demirlerin kullanım sahaları şu şekildedir. DDK-60; pistonlar, şaftlar, çeşitli diskler, yatak gövdeleri, aşınma ve mukavemet gerektiren uçak ve otomotiv parçaları, ziraat aletleri, madencilik, kağıt sanayi, ağır makine aksamaları, tekstil ve çeşitli endüstri alanlarında kullanılır. DDK-40; kompresör gövdeleri, merdaneler, basınca dayanıklı parçalar, bağlantı rotları, pompa gövdeleri, darbe dayanıklılığı gerektiren otomotiv parçaları, ziraat aletleri, gemi mühendisliği malzemeleri, elektrik teçhizatında kullanılır (Karamusaoğlu 2009).

2.1.5 Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemleri

Endüstride kullanılan malzemeler, kullanılacağı alana göre yüzey işlemlerine tabi tutulmaktadır. Uygulanan yüzey işlemlerini yüzey sertleştirme ve yüzey kaplama olarak ikiye ayırabiliriz.

2.1.5.1 Yüzey Sertleştirme

Metal malzemelere uygulanan yüzey sertleştirme işlemleri genel olarak ana malzemenin aşınma ve sürtünmeye karşı özelliklerini geliştirmek, tokluk ve sertliği bütünleştirmek, korozyon direncini arttırmak ve üretim maliyetlerini düşürmek amacı ile yapılmaktadır. Çizelge 2.8’de yüzey sertleştirmede kullanılan temel yöntemler verilmiştir.

Çizelge 2.8 Yüzey sertleştirilmesi için temel yöntemler (Ayday 2013).

Difüzyon (yayınma) Yöntemleri	Lokal Sertleştirme Yöntemleri
Nitrürleme	Alevle sertleştirme
Karbürleme	İndüksiyon ile sertleştirme
Karbonitrürleme	Lazer ile sertleştirme
Borlama	Elektron ışını ile sertleştirme
Toyota difüzyonu	İyon aşılama/İmplantation
Titanyum-karbon difüzyonu	Seçici karbürleme
	Ark lambası ile sertleştirme

Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan yüzey sertleştirme işlemleri Nitrürleme, Alev, İndüksiyon veya Lazerle Yüzey Sertleştirme ve Borlama şeklinde sıralanabilir.

i) Nitrürleme

Küresel grafitli dökme demirlerin 2-3 saat boyunca Amonyak (NH_3) içerisinde bekletilerek ya da Azot gazı ortamında uygun sıcaklıkta (540 - 600 °C) 1-2 saat bekletilerek gerçekleştirilir. Azotun demir kafesindeki boşluklarda çözünmesiyle demir nitrürden oluşan difüzyon tabakası oluşur. Dökme demir içerisindeki alaşım elementleri ve oranlarına göre nitrür tabakasının mekanik özellikleri değişiklik göstermektedir. Bu işlem için yüksek silisyumlu ferritik KGDD’ler uygun değildir. Düşük silisyum ve titan içeren KGDD’ler için daha uygundur. Nitrürleme sonrasında 60 HRC sertlik değerinde ulaşabilmektedir (Değer 1995, Kayalı 2006, Ayday 2013).

ii) Alev, İndüksiyon veya Lazerle Yüzey Sertleştirme

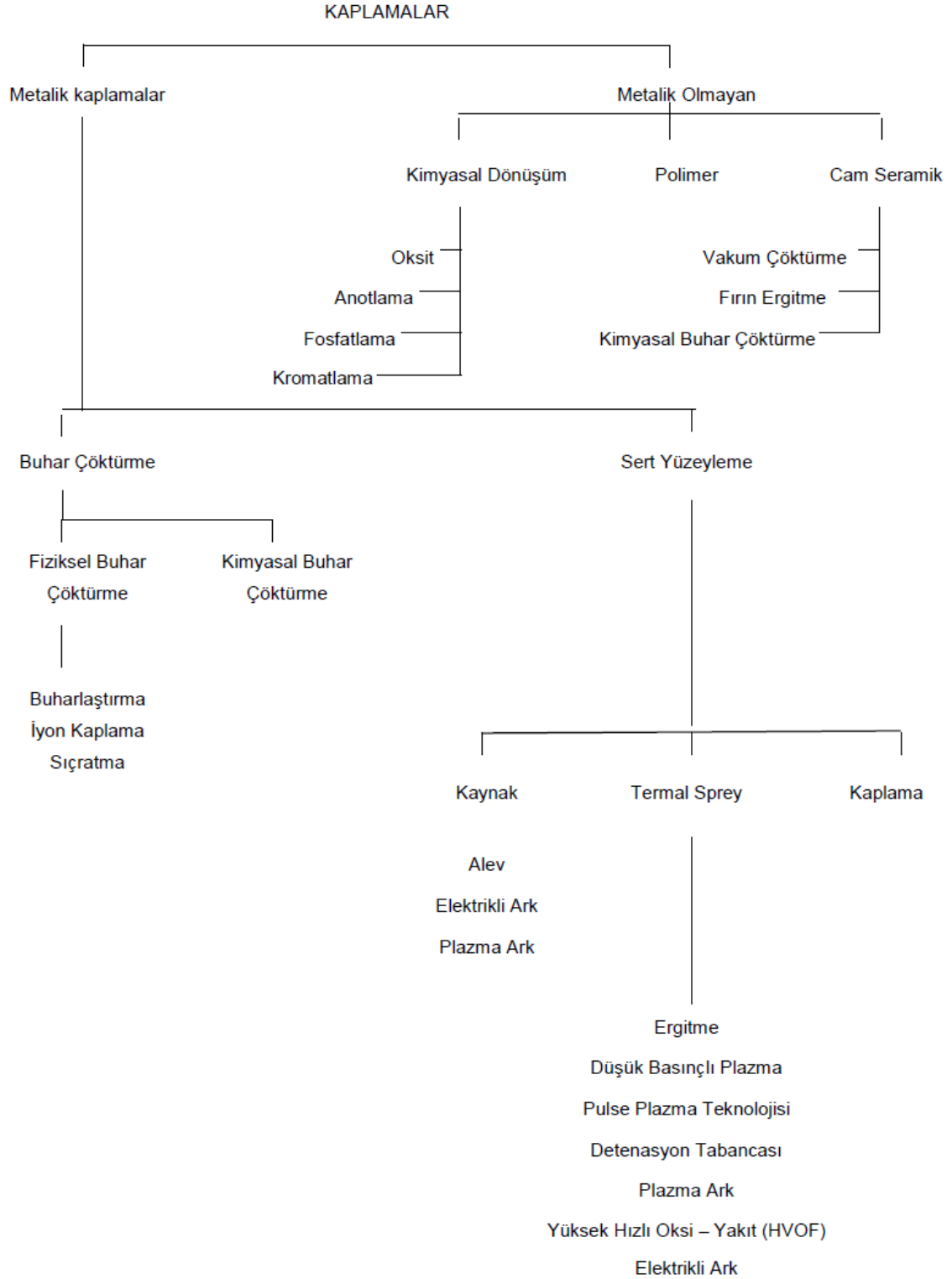
Malzeme yüzeyi östenitleşme sıcaklığına kadar alev, indüksiyon veya lazer ile ısıtılır ve suda soğutularak sertleştirme işlemi gerçekleştirilir. Malzemenin iç kısımları sünekliğini korur. Perlitik KGDD'ler, Ferritik KGDD'lere göre daha uygundur. Bunun sebebi ferritik matrisli küresel grafitli dökme demirleri homojen bir östenit yapıya dönüştürmek için uzun süreler gerektirmesidir. Bu yüzden kısa sürelerde ısıtmak için DDK-70 ve DDK-80 sınıfı küresel grafitli dökme demirler (KGDD) tercih edilmektedir. Sertleştirme sonucunda ulaşılan sertlik değeri 55-60 HRC'dir (Değer 1995, Kayalı 2006)

iii) Borlama

Borlama, difüzyon mekanizmasıyla gerçekleştirilen yüzey sertleştirme işlemlerinden biridir. Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması işlemi 750 - 1000 °C sıcaklık değerleri arasında katı, sıvı ya da gaz olarak bor verici ortamlarda 1–10 saat süre ile bekletilerek gerçekleşmektedir. Yüzeyine bor difüze edilmiş küresel grafitli dökme demirler, çeliklere göre daha düşük sürtünme katsayısı değerine sahiptirler. Yüzey sertlikleri ise oluşan FeB ve Fe₂B fazları sebebiyle 1300–2000 kg/mm² değerine ulaşabilmektedirler. Hareketli mekanizmaya sahip makinaların parçalarında ve birçok kalıpta yüzeyi borlanmış küresel grafitli dökme demirler yaygın şekilde kullanılmaktadır (Uzun 2002, Döngel 2008).

2.1.5.2 Yüzey Kaplama

Kaplama, malzeme yüzeyine bir element ya da bileşiğin biriktirilmesi ve çöktürülmesi işlemine denir. Yüzey kaplamaların amacı, malzemenin kullanıldığı ortamın olumsuz etkilerinden korumak ve estetik görüntüyü iyileştirmektir. Yüzey kaplama işleminde altlık malzeme önemli bir değişken olmadığı için kullanım alanı çok geniş bir prosestir. Yüzey kaplama yöntemleri Şekil 2.5 'te metalik ve metalik olmayan kaplamalar şeklinde iki gruba ayrılarak gösterilmiştir (Ayday 2013).



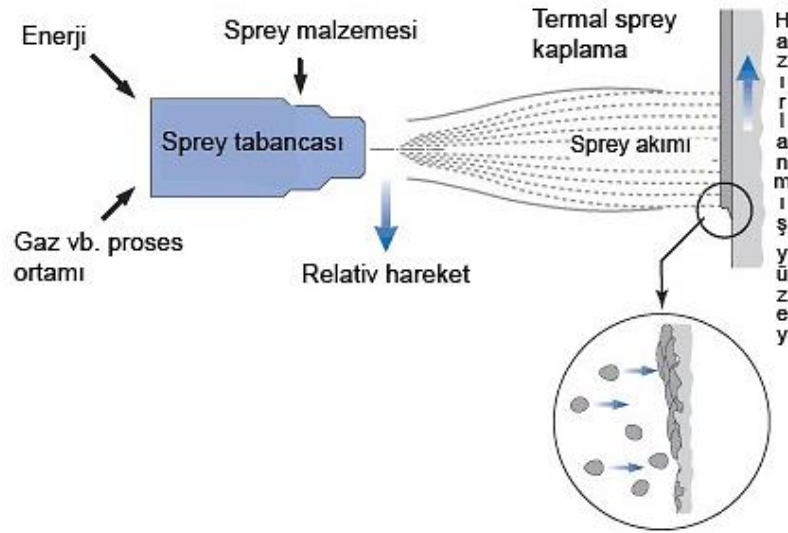
Şekil 2.5 Kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması (Ayday 2013).

Küresel grafitli dökme demirlere birçok kaplama işlemi uygulanabilmektedir. Bu çalışmada Şekil 2.5’te görülen Termal Sprey Kaplama yöntemlerinden Yüksek Hızlı

Oksi-Yakıt yöntemi kullanılarak GGG-40 sınıfı küresel grafitli dökme demir numuneler kaplanmıştır. Termal Sprey Kaplama yöntemleri bir sonraki bölümde detaylı şekilde anlatılacaktır.

2.2 Termal Sprey Kaplama Sistemleri

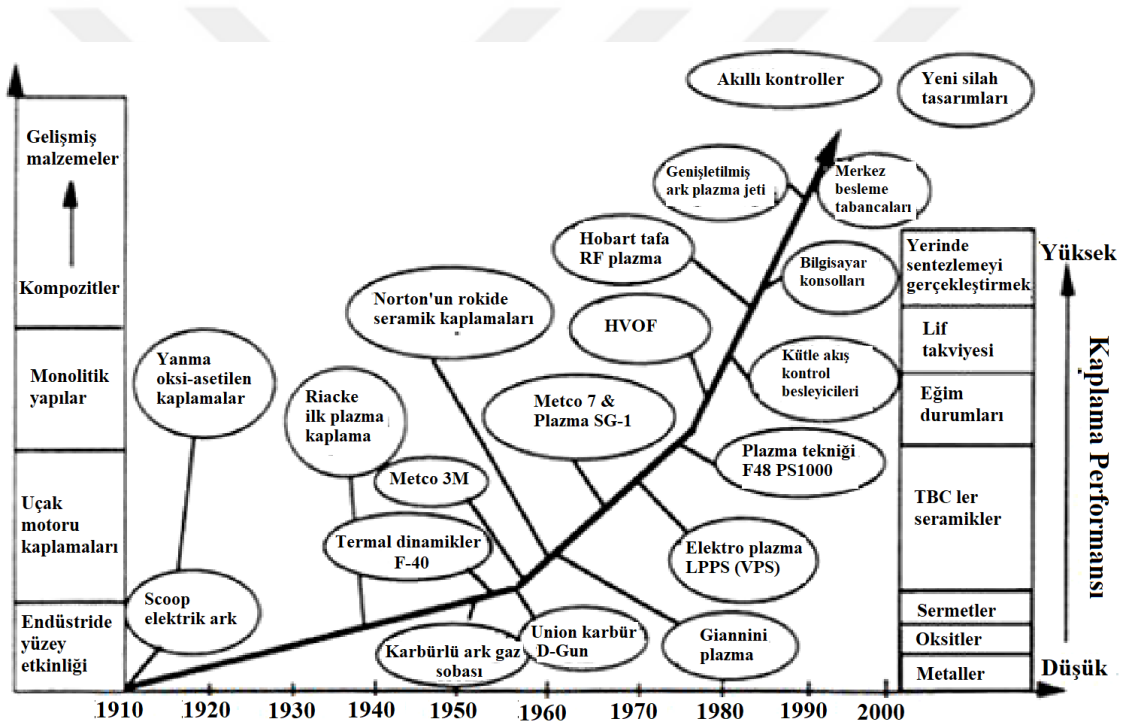
Şekil 2.6’da şematik gösterimi verilen Termal Sprey Kaplama Sisteminin temeli, metalik veya metalik olmayan çeşitli malzemelerin altlık üzerine yüksek sıcaklık alevi ile eriyik ya da yarı eriyik formda çok hızlı şekilde gönderilerek biriktirilmesi esasına dayanmaktadır. Amaç malzemeyi çevresel koşullara karşı korumak olan kaplama yöntemlerinden biridir. Sonuçta üzerinde biriken kaplama, altlık malzemeyi yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon ve aşınma vb. üstün özelliklere sahip olmasını sağlamalıdır. Kaplanacak malzemeler tel, çubuk veya toz şeklinde olabilir. Isı kaynağı ve püskürtme şekli farklılıklarına göre alev sprej, elektrik ark sprej, plazma sprej ve yüksek hızlı oksij-yakıt (HVOF) olmak üzere 4 gruba ayrılmaktadır (Meşekıran 2006, Minisker 2009).



Şekil 2.6 Termal sprej prosesi genel görünümü (Diltemiz 2010).

1900’lü yılların başında Dr. M. Schoop tarafından icat edilen püskürtme yöntemi ilk olarak top yüzeyine kurşun püskürtme ile başlamıştır. Isı kaynağı olarak O_2 ve C_2H_2 kullanılmıştır ve basit bir yapıda püskürtme tabancası tasarlanarak termal sprej kaplama

sistemi ortaya çıkmıştır. Zamanla teknolojik gelişmelerle hem daha modern yöntemler icat edilmiş, hem de mevcut yöntemler daha da geliştirilmiştir. İlk olarak icat edilen püskürtme yöntemi Alev Sprey Tekniği adını almıştır. Daha sonra ark sprej yöntemi icat edilmiştir. Püskürtme işlemini gerçekleştiren tabanca sistemleri geliştikçe 1958 yılında R. C. Eschenbach, J. E. Pelton ve G. H. Smith tarafından yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) yöntemi icat edilip patenti alınmıştır, 1962 yılında ise D. M. Yenni, R. M. Gage ve O. H. Nestor tarafından plazma sprej yöntemi geliştirilip patenti alınmıştır. Aralarında en çok önem arz eden yöntem ise HVOF yöntemidir. Şekil 2.7’de zaman içerisinde termal sprej kaplamaların gelişimi, ekipmanları ve süreçlerin grafiksel gösterimi verilmiştir. (Meşekıran 2006).

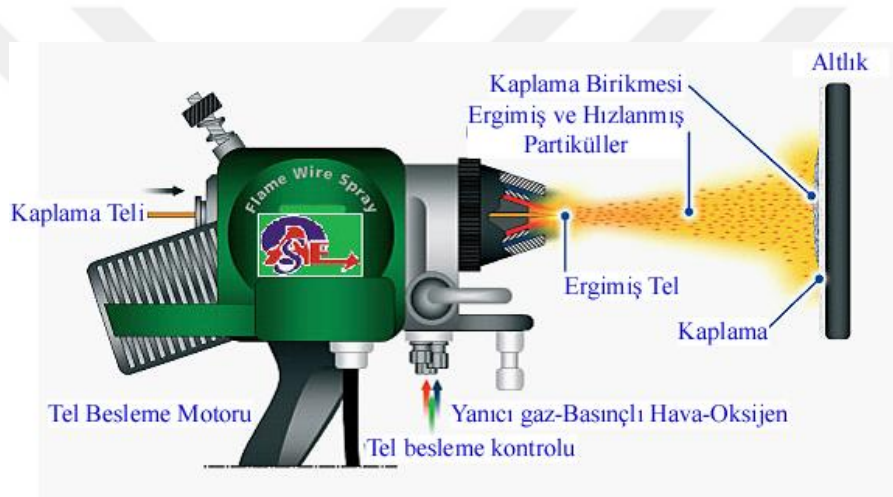


Şekil 2.7 Termal sprej kaplamaların gelişimi, ekipmanları ve süreçlerin grafiksel gösterimi (Meşekıran 2006).

Tüm termal sprej yöntemlerinde, eriyik ya da yarı eriyik şekilde parçacıklar altlık malzemeye hızlıca çarparak kaplama tabakasını oluşturur. Deforme olan parçalar birbirine kenetlenerek kendi içinde katılaşırlar ve mekanik, metalürjik veya difüzyonla malzemeye tutunurlar. Parçacıklar ne kadar hızlı gönderilirse o kadar iyi tutunma gerçekleşir (Diltemiz 2010).

2.2.1 Alev Sprey Kaplama Yöntemi

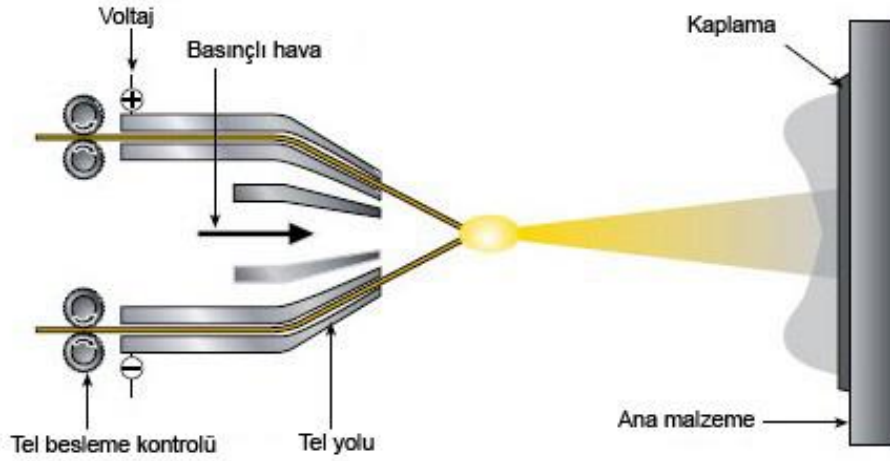
Termal sprej kaplamalar arasında en eski, en ucuz ve en basit olanı alev sprej kaplama yöntemidir. İlk uygulamalarında ergime sıcaklığı düşük olan malzemeler kaplanabilmiştir. Teknolojinin de gelişmesiyle artık seramik malzemeler bile kaplanmaya başlanmıştır. Şekil 2.8’de alev sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi verilmiştir. Tel veya toz halinde olan malzeme tabanca içerisinde geçirilir ve yanan yakıtın sıcaklığı ile ergitilerek püskürtülür. Bu sistemde asetilen, metil-asetilen, propadien, propan, propilen, doğal gaz vb. yakıtlar kullanılabilir. Bu kullanılan yakıtlarla birlikte oksijen kullanılarak proses gerçekleşir (Easter 2008, Diltemiz 2010).



Şekil 2.8 Alev sprej kaplama püskürtme tekniği şematik gösterimi (Easter 2008).

2.2.2 Elektrik Ark Sprey Kaplama Yöntemi

Bu kaplama tekniğinde iki zıt kutuplu olan tellerin birlikte beslenirken anot ve katot olarak iki farklı elektriksel kutup arasında ark oluşturulması ve kaplama malzemesini açığa çıkan enerji ile ergitmesi esasına dayanmaktadır. Teller basınçlı havanın önünde kesişmesiyle kontrollü bir ark meydana gelir. Oluşan ark ve basınçlı hava yardımıyla ergiyen malzeme altlık malzemeye hızla çarparak yapışır. Ayrıca, basınçlı hava kullanılmasından dolayı elektrik ark yöntemindeki kaplamalarda oksit oranı yüksektir. Ark sprej kaplama prosesi için partikül hızı 50-100 m/s ve çalışma sıcaklığı 4000 - 5000°C arasında değişmektedir. Şematik gösterimi Şekil 2.9’da verilmiştir (Easter 2008, Diltemiz 2010).



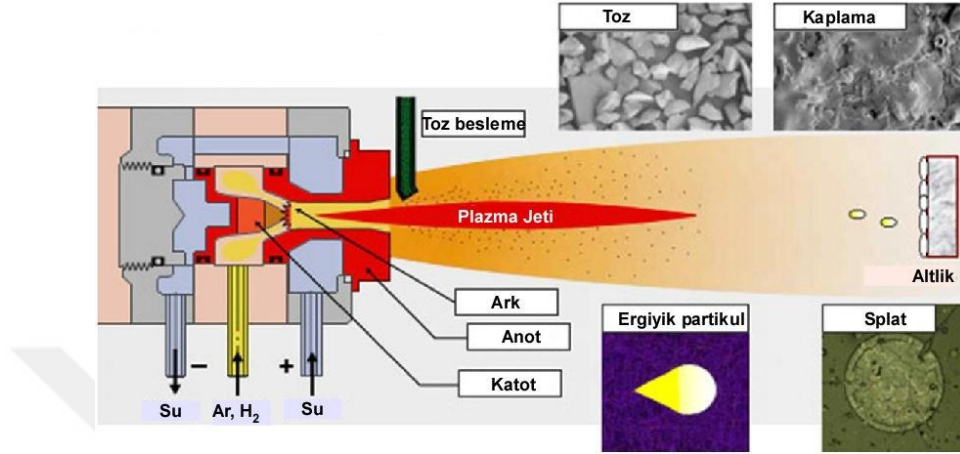
Şekil 2.9 Elektrik ark spray kaplama püskürtme yöntemi şematik gösterimi (Diltemiz 2010).

Elektrik ark spray, kaplama malzemesi olarak tel formunda üretilen malzemelerin kullanıldığı ve sadece elektrik iletkenliği olan bir kaplama yöntemidir. Uygulamalarda genellikle alaşımlı veya saf metalik malzemeler veya seramik esaslı partiküller içeren özlü teller kullanılır. Diğer termal spray yöntemlerine göre elektrik ark spray yöntemi bazı avantajlara sahiptir; yüksek verimlilik, yüksek püskürtme oranı, düşük işletim ve yatırım maliyeti, kontrol parametrelerinin azlığına bağlı olarak kolay kullanım, altlığın deforme olmaması, boyutsal kullanım kolaylığı sağlaması, elektrotlar için sulu soğutmaya gereksinim olmaması ve yüksek kalitede kaplama üretimine olanak sağlaması olarak sıralanabilir. Elektrik Ark Spray, aşınma ve korozyon direnci yüksek, metalik esaslı kaplama üretmek amacıyla tercih edilen bir yöntemdir. Oldukça kaliteli ve yüksek hızda kaplama üretilmesi, kolay ve taşınabilir şekilde uygulanabilmesinden dolayı birçok sektörde kullanımı giderek artan bir termal spray kaplama teknolojisidir (Easter 2008, Pierre *et al.* 2014).

2.2.3 Atmosferik Plazma Spray Kaplama Yöntemi (APS)

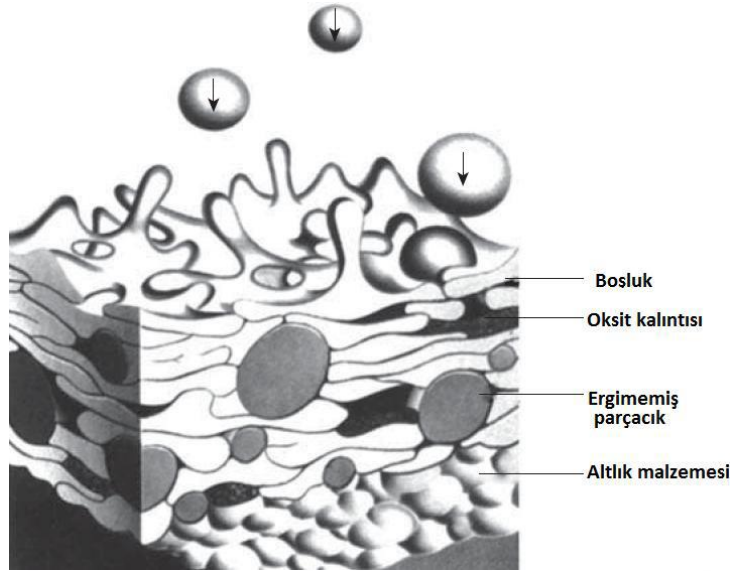
Fiziksel olarak maddenin 3 hali olarak katı, sıvı ve gaz olarak bilinmektedir. Maddedeki atomlar arasındaki bağların enerjisi atomların enerjisinden yüksek ise katı halde bulunurlar. Farklı yöntemlerle atomların enerjisi bağ enerjisinden fazla hale geldikten sonra madde sıvı ve sonrasında gaz fazına geçer. Gaz halindeki atomların enerjisi arttıkça, elektronlar çekirdekten kurtularak serbest kalabilir ve sonrasında madde negatif

yüklü elektronlar ve pozitif yüklü iyonlarla yüklü bir hale gelir. Plazma olarak bilinen yeni bir faz oluşur. Plazma fazı da maddenin dördüncü halidir ve dış ortama karşı nötr durumdadır (Ohmori 1996, Pierre *et al.* 2014).



Şekil 2.10 Plazma sprej kaplama yöntemi şematik gösterimi (Pawlowski 2008).

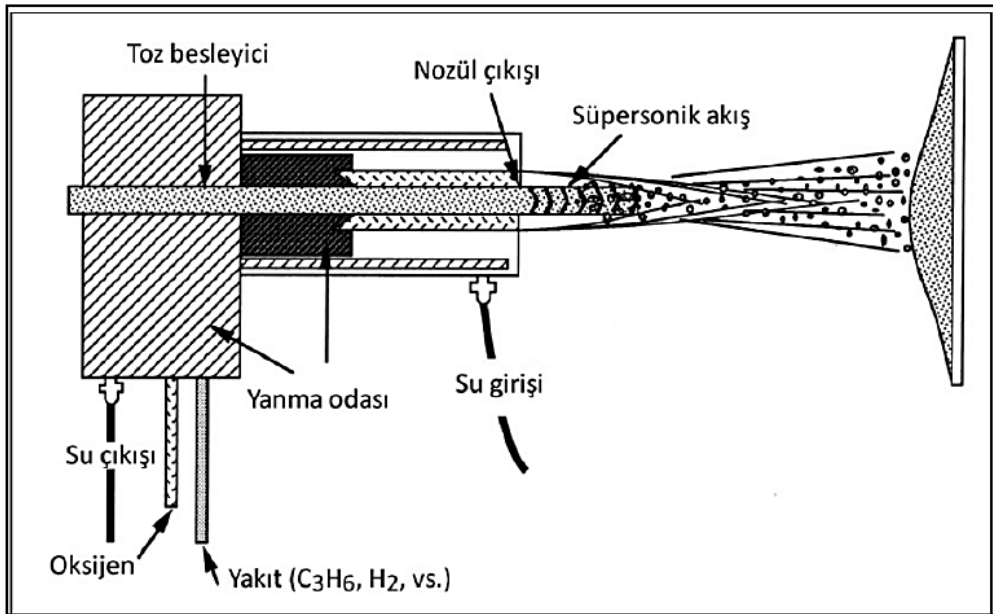
Plazma Sprej Kaplama yönteminde kullanılan tabancanın içerisinde, Tungsten katot ve Bakır anot elektrotlar bulunmaktadır. Şekil 2.10'da şematik gösterimi verilmiştir. Elektrotları soğutmak için etrafında suyun dolaşmasını sağlayan su kanalları ve su giriş çıkış bağlantıları bulunmaktadır. İki elektrot arasında elektrik enerjisi ile ark oluşturulur. Oluşan ark, içerisine inert gazlardan argon, helyum, hidrojen, nitrojen gazları ve bir gaz karışımı ile stabilize edilir. Ark enerjisi ile ısıtılan gazların bir kısmı iyonize olarak plazma ortamını oluşturur. Plazma terimi, yüksek sıcaklıkta atomların iyonizasyonu için serbestçe eşit konsantrasyonu bulunan pozitif ve negatif şarjların taşındığı bir toparlanma durumudur. 12000 K veya daha yüksek sıcaklıklara ulaşıldığında plazma çekirdek bölgesi oluşur. Toz partikülleri, bir taşıyıcı gaz vasıtasıyla plazma jeti içerisine beslenir, plazma jeti içerisinden geçen toz partikülleri ergir veya yarı ergir ve kaplanacak yüzeye doğru hızlıca hareket edip çarparak yüzeyde katılır. Toz partiküllerinin hızı toz besleme hızına bağlı olarak 600 m/s değerine kadar ulaşabilmektedir. Şekil 2.11'de kaplama oluşum mekanizması verilmiştir. Fiziksel olarak proses birçok işlem parametresi ile kontrol edilebilir. Yüzey pürüzlülüğü, porozite oranı, yapışma mukavemeti, kalınlık gibi birçok kaplama karakteristiği bu parametrelerin seçimi ile değişebilir. Plazma sprej kaplama yöntemi sadece toz kullanılabilme sınırlılığına sahiptir (Güleç 2006, Pawlowski 2008, Pierre *et al.* 2014).



Şekil 2.11 Plazma sprej kaplama yönteminde kaplama oluşumu (Avcı 2015).

2.2.4 Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtlı (HVOF) Sprej Kaplama Yöntemi

Yüksek hızlı oksijen yakıtlı sprej kaplama yöntemi (HVOF) alev sprej kaplama yönteminin neredeyse aynısıdır. Sadece alev sprej yöntemine göre daha yüksek sıcaklık ve daha hızlı püskürtmeye sahiptir. Zaman içerisinde en iyi kaplamayı nasıl üretebiliriz fikri üzerine geliştirilmiş bir yöntemdir (Aytaç 2014).



Şekil 2.12 HVOF kaplama yöntemi tabancası şematik gösterimi (Pawlowski 2008).

HVOF yönteminde kullanılan tabancanın Şekil 2.12’ de görülen şematik gösteriminde oksijen ve propan vb. yanıcı gazlar yüksek basınçlarda (60-120 psi) yanma odasında karışır ve patlayarak yanmaya başlar. Oluşan yüksek basınçlı alev 8 ila 30 cm uzunluğundaki nozüle iletilerek nozül ucundan çıkarken süpersonik hızlara (1525-1825 m/sn) ulaşır. Toz halindeki kaplanacak olan malzeme, besleyici kanal yardımıyla sisteme dahil olur. Yüksek hızda aleve maruz kalan tozlar ergiyik ya da yarı ergiyik şekilde hızlanarak altlık malzemeye çarpar. Püskürtülen toz partiküllerinin sıcaklığı 2300 °C – 3000 °C arası sıcaklıklara, hızları ise 1350 m/sn gibi bir süpersonik hıza ulaşmaktadır. Bu yöntemde oluşan kaplama kalınlığı 0.2-2 mm arası ve püskürtme mesafesi de ekipman değişkenlerine bağlı olarak 220-380 mm arası değişmektedir (Stokes 2006, Avcı 2015).

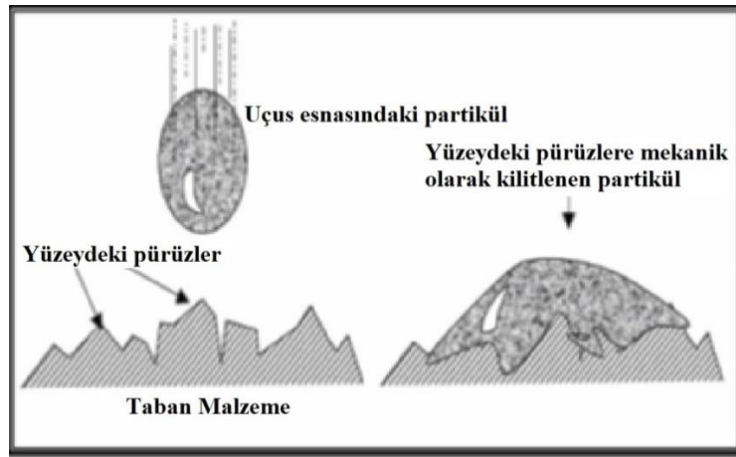


Şekil 2.13 HVOF yöntemi kaplama sistemi (Gök 2015).

HVOF yöntemi kaplama sistemi Şekil 2.13’te verilmiştir. Bu sistemde, kullanılan gazın debisini ayarlamak için Gaz Kontrol ünitesi, toz miktarını ayarlamak için Toz Besleme Ünitesi, basınçlı hava temini için Kompresör, tabancayı fazla ısınmaya karşı korumak için Soğutma Ünitesi ve sistemin en önemli parçası olan HVOF Kaplama Yöntemi Püskürtme Tabancası bulunur. HVOF sisteminde yanıcı gaz olarak etilen, propilen, doğalgaz, propan gibi hidrokarbonlar kullanılır. Tozlar 20-120 gr/dk aralığında bir hızla

beslenebilmektedir ve kaplamada partiküllerin boyutları 4-45 mikron arasında olabilmektedir. Tabanca içerisine tozları taşımak için de azot ve argon gazı taşıyıcı gaz olarak kullanılmaktadır. (Gök 2015).

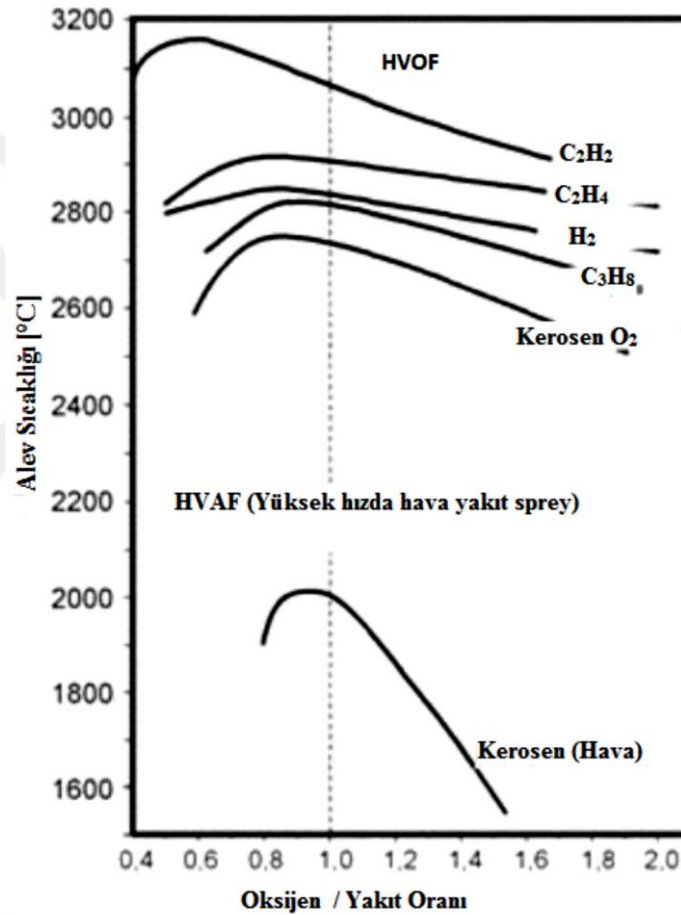
HVOF yönteminde, ulaşılan gaz ve alev hızı Alev Sprey ve Plazma Sprey Yöntemine göre çok daha fazladır. Yüksek hızda altlık malzemeye çarpan partiküller deforme olur ve mekanik olarak birbirine bağlanarak daha yoğun bir kaplama oluşturmaktadır. Plazma sprej yönteminde göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşen proseste partiküllerin oksitlenme dereceleri daha düşüktür. Altlık malzemeye süpersonik hızda çarpan partiküller yüksek yapışma mukavemetine sahiptirler. Şekil 2.14'te püskürtülen partikülün yüzeydeki pürüzlere mekanik bağlanması şematik olarak verilmiştir. HVOF termal sprej kaplama yönteminin en önemli özellikleri; yüksek korozyon direnci, yüksek aşınma direnci ve yüksek bağ mukavemetine sahip, temiz, sert ve yoğun yapıda kaplamalar üretilebilmesi, karmaşık geometrik şekillere sahip malzemelerin kaplanmasını mümkün kılması, ısısal kalıntı gerilmelerin düşük seviyede olması, sıvı yakıtların kullanımına da olanak sağlaması ve sistemin tam otomatik olarak kullanılabilir olması şeklinde sıralanabilir. Diğer bir avantaj da altlık malzemenin 100 °C sıcaklığı aşmamasıdır, böylelikle altlık malzemede çarpılma oluşmamaktadır (Stokes 2006, Dokur 2014).



Şekil 2.14 Partikülün altlık malzemeye mekanik bağlanması (Dokur 2014).

HVOF yönteminde çeşitli gazların stokiometrik oranlarına göre alev sıcaklıkları ve oksijen/yakıt oranları Şekil 2.15 'te verilmiştir. İstenen sıcaklığa göre sisteme dakikada

beslenen oksijen ve yakıt miktarı çok önemlidir. Bunun sebebi tozların ergimesi için gereken ısı miktarını, toz alevi terk edinceye kadar alması gerekmektedir. Şekil 2.15'te görüleceği üzere sistemde yakıt olarak kerosen kullanılması durumunda oksijen yerine hava kullanılabilir. Böyle bir durumda HVAF adını almaktadır. Örnek olarak, asetilen (C_2H_2) yakıt olarak kullanılırsa yaklaşık 0.6 O/Y oranında, propan (C_3H_8) yakıt olarak kullanılırsa yaklaşık 0.8 O/Y oranında en yüksek sıcaklığa ulaşmaktadır (Karabulut 2014).



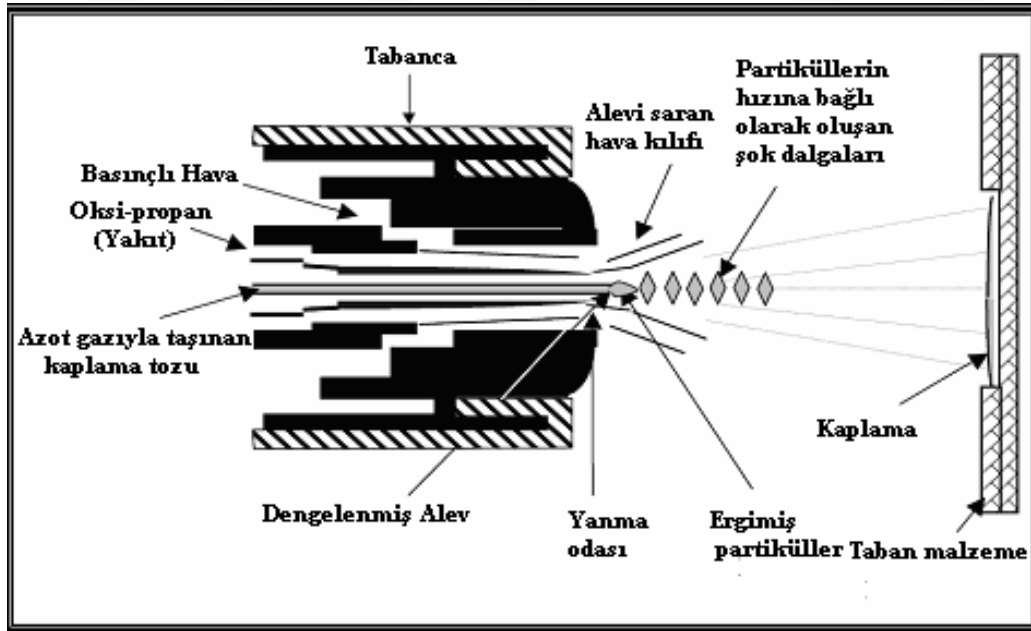
Şekil 2.15 Oksijen/Yakıt oranı ve yakıt cinsine bağlı olarak alev sıcaklığı grafiği (Karabulut 2014).

Bu yöntem, termal enerjiyi minimuma düşürebildiği ve kinetik enerjiyi maksimuma çıkarabildiği için yoğun, oldukça az poroziteli ve bağ mukavemetinin yüksek olduğu kaplamalar üretir. Çoğu sektörde, aşınma ve sürtünme dayanımı ihtiyacına yönelik sert krom kaplama bu yöntem ile yapılabilir. HVOF yöntemi uygun maliyeti ve

yönteminin esnekliği sebebiyle, çoğu endüstri kolunda kullanılmaktadır. HVOF yönteminin kullanıldığı endüstri kolları Çizelge 2.9’da gösterilmiştir (Özörak 2017).

Çizelge 2.9 HVOF yönteminin uygulandığı çeşitli endüstri kolları ve uygulamaları (Özörak 2017).

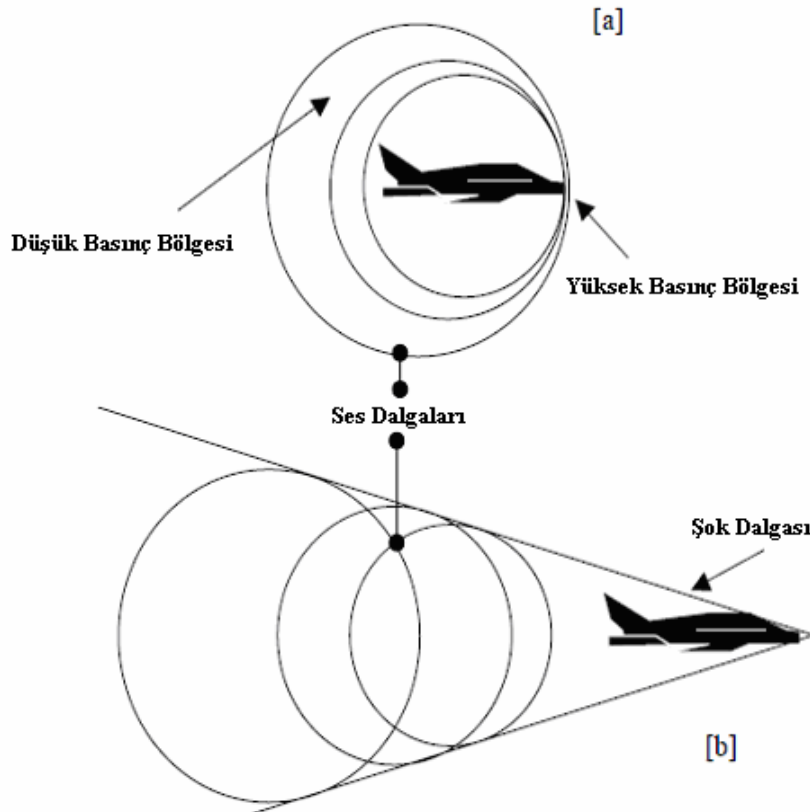
ENDÜSTRİ KOLU	UYGULAMA	MALZEME
Kağıt Endüstrisi	Çeşitli Merdaneler	WC-Co-Cr, Cr_2O_3
Çelik endüstrisi	Konveyör makaraları, Fırın	Cr_3O_2 -NiCr
Basım Endüstrisi	Ölçme makaraları	Cr_2O_3
Tekstil Endüstrisi	Taşıma rulosu	Al_2O_3 -TiO ₂
Tesisat Takımlarında	Kapama vanaları	WC-Co+WC-Ni, Cr_3C_2 -NiCr
Elektronik Endüstrisi	İletken kablolar	Cu
Fabrika Konstrüksiyonu	Miller, Kimyasal araçlar, Ayırıcılar	Al_2O_3 , Mo
Otomotiv Endüstrisi	Sürtünme diskleri	Mo



Şekil 2.16 HVOF kaplama yöntemi tabancası şematik gösterimi 2 (Minisker 2009).

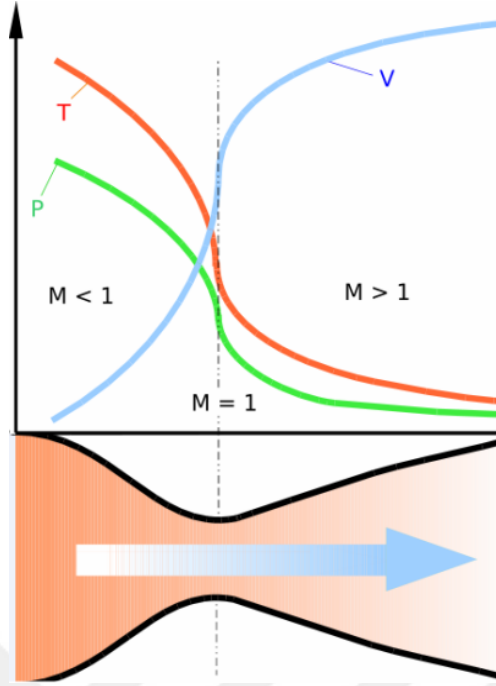
HVOF yönteminde kullanılan yakıt ve oksijenin etkisiyle, basınçlı yanma odasında gerçekleşen yanma olayı sonucunda süpersonik hızlarda gaz ve alev çıkışı

gerçekleşmektedir. Normal şartlarda ses hızı 343.2 m/s olarak ölçülmüştür. Malzemenin bulunduğu şartlardaki ortamda oluşan ses hızına 'Mach' Sayısı denir. HVOF yönteminde gaz hızının ulaştığı değer Mach-4 yani ses hızının yaklaşık 4 katı olarak tespit edilmiştir. Uçaklarda olduğu gibi ses hızını geçildiği zaman, Şekil 2.16'da görülen elmas şeklinde şok dalgaları oluşmaktadır. Yanma prosesi ve yüksek hızda gaz çıkışını mümkün kılan tabanca sisteminin yapısı uçaklardaki gaz türbinli jet motoruna benzemektedir. HVOF yöntemi için çeşitli tabancalar tasarlanmaktadır, tabancanın fiziksel tasarımına göre ulaşılabilecek gaz hızı değerleri farklılık göstermektedir.



Şekil 2.17 Uçağın oluşturduğu ses dalgaları; a) Ses hızına göre daha düşük hızda hareket eden bir uçağın meydana getirdiği ses dalgaları (b) Ses hızını aşan bir uçağın meydana getirdiği ses dalgaları (Minisker 2009).

Gaz hızı ses hızını aştıktan sonra De Laval isminde nozül sayesinde süpersonik hızlara ulaşır. HVOF sisteminde kullanılan tabancalarda ses hızını geçtikten sonra N tipi şok dalgaları meydana gelir. Şok dalgalarının etkisiyle basınç düşmeleri meydana gelerek yanma ürünleri tabancadan çıkarken genişleyen ve daralan dalgalar oluşur ve gaz Mach-4 hızına kadar yükselir (Minisker 2009).



Şekil 2.18 De Laval nozülü (Minisker 2009).

HVOF yönteminde ulaşılan yüksek hızlar sebebiyle yanma odasında türbülans oluşur. Bunun sonucunda diğer yöntemlere göre toz partiküller, daha verimli ve üniform şekilde ısıtılarak kaplama kalitesini olumlu yönde etkilemektedir. Şekil 2.18’de verilen grafiğin alt kısmında De Laval nözülünün yapısı görülmektedir. Yüksek gaz hızlarına ulaşma kabiliyeti olan bu nozül çeşidinde grafikte görüldüğü üzere nozül daraldıkça gaz hızı artarak ses hızına ulaşmakta, basınç ve sıcaklık azalmaktadır. Dar kesitten geçtikten sonra gaz genleşmeye başlar ve süpersonik hıza ulaşır. Yine aynı zamanda basınç ve sıcaklık giderek azalmaktadır. De laval nozülünde, gaz akışı sabit entropi değerine sahip ve ortam neredeyse sürtünmesizdir (Minisker 2009).

2.3 Korozyon

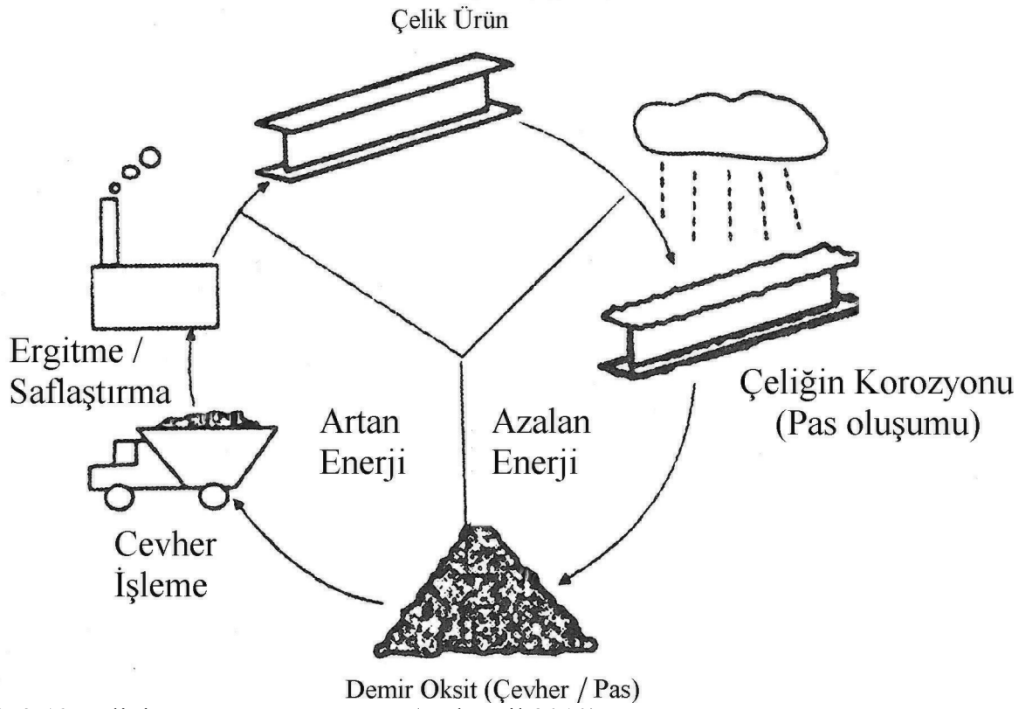
2.3.1 Korozyonun Tanımı ve Önemi

Korozyon, metallerin ve alaşımların içinde bulunduğu katı, sıvı ya da gaz ortamı ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonu sonucu metalik özelliklerini kaybetmesidir. Son yıllarda yapılan araştırmalar metal olmayan malzemelerin de korozyona uğradığını göstermektedir. Bu nedenle korozyon, yapı malzemesi özelliğindeki bütün malzemelerin, içinde bulundukları ortamın etkisiyle bozunmasını kapsamaktadır. Kimyasal korozyon, gaz ortamında metal ve alaşımların oksitlenmesi, elektrokimyasal korozyon ise metal ve alaşımların sulu ortamlarda yükseltgenmesidir. Korozyon oluşumuna en çok rastlanan malzeme türü elektrokimyasal reaksiyonlara eğilimi yüksek olması sebebiyle metallerdir (Çağlaroğlu 2006, Kayalı 2011).

Latince, çevresi tarafından aşındırma anlamına gelen 'corrosus' dan türetilmiş olan korozyon kelimesi DIN 50900'de şu şekilde tanımlanmaktadır: "Hammaddenin ölçülebilir bir değişme göstermesine neden olan ve metal bir yapı parçasının veya bir bütün sistemin fonksiyonuna zarar veren, metal malzemenin çevresiyle reaksiyonudur" (Sarıköse 2015)

Normal çalışma ortamlarında bile kolaylıkla korozyona uğrayabilmelerinin sebebi, metallerin karşı konulamaz biçimde kararlı hallerine geri dönme eğiliminde olmalarıdır. Metallerin hemen hemen hepsi doğada düşük enerjili oksit bileşikleri halinde yani kararlı halde bulunmaktadır. İnsanoğlunun ilk örnekleri tarih öncesi dönemlere dayanan metal madenciliği sayesinde doğadaki metal madenlerini işleyerek onları doğada olmadığı biçimlerde elde etmeyi başararakla birlikte korozyon probleminin de temeli atılmıştır. Madenlerden çıkarılmış olan metal oksitlere, yüksek fırınlarda oksijenlerden ayrılmaları için büyük miktarlarda ısı enerjisi aktarılarak metaller termodinamik açıdan kararsız bir halde bulunmaya zorlanır. Bu aktarılan fazla enerji daha sonralarda çeşitli korozyon reaksiyonlarının başlamasındaki itici gücü oluşturmaktadır. Korozyon reaksiyonu tamamlandığında fazla enerji serbest kalarak metal tekrardan kararlı yani oksitli haline dönerek Şekil 2.19'da gösterilmiş olan çevrimi tamamlamış olur. Her yıl

metallerin korozyonunun sebep olduğu ekonomik kaybın dünya genelindeki faturasının trilyon dolarlar seviyesinde olduğu ve dünyanın gayrisafi milli hasılasının yüzde 3'ünden fazla olduğu düşünülmektedir (Thompson *et al.* 2007).



Şekil 2.19 Çeliğin Korozyon Döngüsü (Gökergil 2010).

2.3.2 Korozyon Çeşitleri

Korozyon mekanizması tek düze (homojen dağılımlı) ve bölgesel (lokal) olarak ele alınır. Mühendislik açısından daha mühim olan bölgesel korozyon 3 ana başlık altında incelenmektedir. Bölgesel korozyonun sınıflandırılması Çizelge 2.10'da verilmiştir (Doğan 2014):

- 1) Göz ile gözlemlenebilen (Makro Korozyon)
- 2) Mikroskopla gözlemlenebilen (Mikro Korozyon)
- 3) Karışık korozyon (Mikro+Makro Korozyon)

Çizelge 2.10 Bölgesel korozyonun sınıflandırılması (Doğan 2014).

1-Makro Korozyon	2- Mikro Korozyon	3- Makro+Mikro Korozyon
Galvanik korozyon	Tanelerarası korozyon	Erozyon korozyonu
Seçici korozyon	Gerilim korozyon çatlaması	Titreşimli korozyon
Kabuk altı korozyon	Yorulmalı korozyon	Hidrojen çatlaması
Aralık korozyonu		
Oyuklanma korozyonu		
Filiform korozyonu		

2.3.2.1 Homojen Dağılımlı (Genel) Korozyon

Metal yüzeylerinde, sıvı ve kirli bir ortama maruz kaldıklarında kimyasal bir etki ile atmosferik şartlarda oluşan en basit ve en yaygın korozyon şekline homojen (genel, uniform) dağılımlı korozyon denir. Bu korozyonda uzun sürelerde hesaplanan ortalama korozyon hızı malzemenin her bölgesinde aynı olduğu kabul edilmektedir. Homojen dağılımlı korozyonun sebep olduğu metal malzeme kaybı diğer korozyon türlerine nazaran çok daha yüksektir. Fakat diğerlerine göre daha az korkulan korozyon türü olarak görülmektedir ve homojen dağılımlı korozyonun hızı basit laboratuvar deneyleri ile belirlenebilir (Kayalı 2011).

Tamamı aynı cins malzemeden üretilmiş, farklı çevresel etkenlerden etkilenmeyen metaller atmosfer ortamında homojen dağılımlı korozyona uğrar. Korozif ortamın etkilerinin azaltılması, katodik koruma ve yüzey kaplamaları gibi önlemlerle homojen dağılımlı korozyon kontrol altına alınabilir (Güler 2007, Görener 2007).

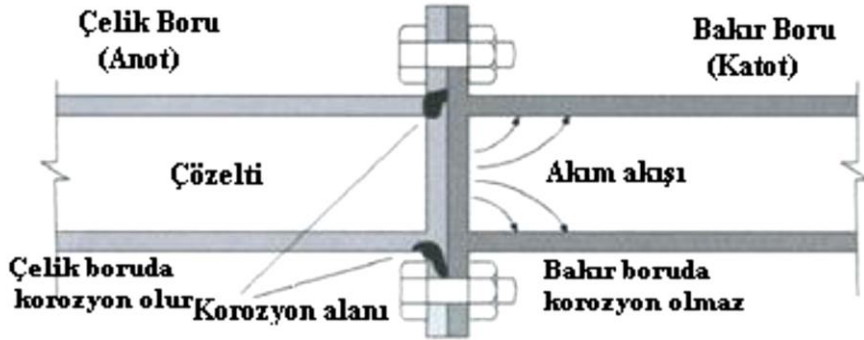


Şekil 2.20 Homojen dağılımlı korozyon (Görener 2007).

2.3.2.2 Galvanik Korozyon

Farklı türlerde ve birbirleri ile temas halinde olan iki metal veya alaşım, iletken bir çözelti içine daldırıldığında, genellikle farklı korozyon potansiyellerine sahip olurlar. Aktif olan metal veya alaşımın korozyonu hızlanırken, daha soy olan metal veya alaşımın korozyonu yavaşlar. Yani diğer bir deyişle az dayanıklı metal anot, dirençli metal ise katot olarak davranır. Katot olarak davranan metal çok az korozyona uğrar. Ancak, değişen sıcaklık ve kimyasal ortamda bu dayanıklılık sırası değişebilir. Şekil 2.21’de galvanik korozyonun şematik gösteriminde bakır boru katot, çelik boru anottur (Üçüncü 2006, Sarıköse 2015, Erek 2016).

Çizelge 2.11’de verilen malzemelerin galvanik serileri yani birbirlerine kıyasla daha aktif ya da soy olma durumu verilmiştir. Bu çizelgeye göre çelik, bakıra göre daha aktiftir. Buna göre çelik malzeme korozyona uğrarken bakır boruda korozyon oluşmayacaktır. Standart koşulları temel alan elektrokimyasal seri, iki veya daha çok metal veya alaşımdan oluşan korozyon hücrelerinin çalışma koşulları hakkında kaba bir fikir verebilir (Üçüncü 2006, Sarıköse 2015, Erek 2016).



Şekil 2.21 Galvanik korozyon mekanizması (Kayalı 2011).

Çizelge 2.11’de malzemelerin birbirlerine göre aktiflik durumlarını gösterilmektedir. Birbiriyle temas halinde olan malzemelerde bu galvanik seriye göre malzeme seçimi yapılmaktadır. Aşınmasını istemediğimiz esas malzeme diğer malzemeye göre daha pasif olmalıdır.

Aktif		Pasif
	Magnezyum	
	Çinko	
	Alüminyum(Ticari)	
	Kadmiyum	
	Duralumin($4\frac{1}{2}$ %Cu ile Al)	
	Yumuşak çelik	
	Dökme demir	
	Paslanmaz çelik(Tip 430; 18%Cr)	AKTİF
	Paslanmaz çelik(Tip 304; 18%Cr 10%Ni)	AKTİF
	Kurşun-Kalay lehimler	
	Kursun	
	Kalay	
	Nikel	
	Pirinç	
	Bakır	
	Bronz	
	Bakır nikel alaşımı	
	Gümüş lehimler (70% Ag 30%Cu)	
	Nikel	PASİF
	Paslanmaz çelik (Tip 430)	PASİF
	Paslanmaz çelik (Tip 304)	PASİF
	Gümüş	
	Titanyum	
	Grafit	
	Altın	
Soy	Platin	

CONTA

METAL A

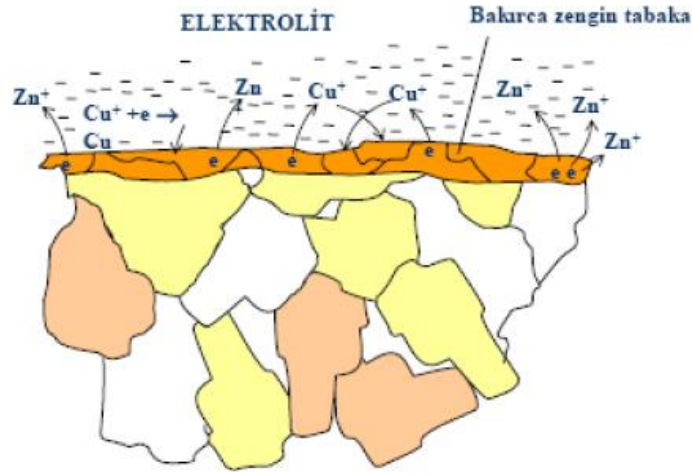
METAL B

ARALIK PARÇALARI

35

2.3.2.3 Seçici Korozyon

Alaşımlarda belirli bir faz veya bir metal üzerinde yoğunlaşarak, öncelikli olarak çözünmelerine neden olan korozyon türü seçici korozyondur. Prensip olarak, elektrokimyasal gerilim dizisinde birbirlerinden çok uzak metallere oluşan alaşımlarda seçici korozyon mekanizması meydana gelir. Pirinç alaşımında çinko, bakırdan evvel yükseltgenerek korozyona uğrar ve uzaklaşır. Şekil 2.23'te örnek olarak gösterilen pirinç (bakır-çinko) alaşımlarında görülen çinko kaybı, dökme demirde ana yapının çözülmesi ile gelişen grafitleşme olayı, bu tür korozyon için verilebilecek önemli örneklerdir (Üçüncü 2006, Kayalı 2011).



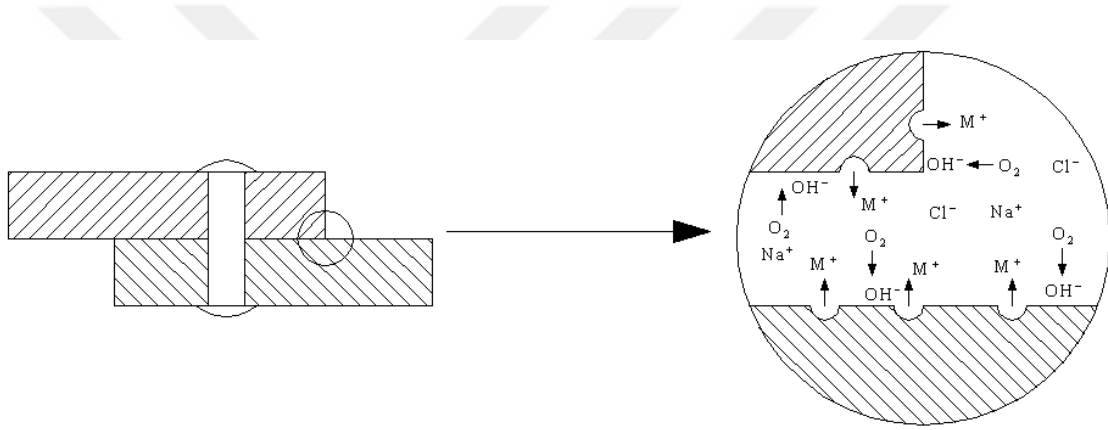
Şekil 2.23 Pirinç (bakır-çinko) malzemelerde seçici korozyon (Üçüncü 2006).

2.3.2.4 Kabuk Altı Korozyonu

Metallik malzeme yüzeyindeki herhangi bir şekilde oluşan veya üretilen kabuk tabakalarının altında meydana gelen korozyon türüdür. Kabuk tabakasının alt kısmının yeterince oksijen alamaması ve rutubetli olması durumlarında meydana gelir. Kabuk çevresi katot olarak korunma sağlanırken, alt kısmı ise anot olarak korozyona uğramaktadır. Sıvı hareketinin kabuğun alt kısmında olmamasından dolayı çatlak korozyonuna benzeyen bir ortam oluşur (Arı 2008).

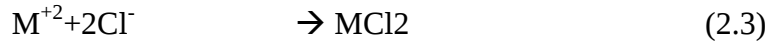
2.3.2.5 Aralık Korozyonu

Perçin, cıvata vb. bağlantı elemanlarının bulunduğu sistemlerde malzemeler arası ya da perçin veya cıvata parçalarının malzeme ile temas ettiği çok dar bölgelere korozif sıvının girmesiyle aralık korozyonu meydana gelmektedir. Örtülü yüzeylerin altında, durgun çözelti ortamlarında veya aralıklarda oluşmaktadır. Korozyonun meydana gelmesi için aralık kısımlarda sıvının girebileceği kadar mesafe olması gerekmektedir. Perçin ve cıvata yerine kaynak yapılarak oluşturulan bağlantılar tercih edilerek aralık korozyonu önlenabilir. Şekil 2.24'te perçinli bağlantıda aralık korozyonunun oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 2.24 HCl asit ortamında Aralık korozyonu başlama mekanizması (Şahin 2009).

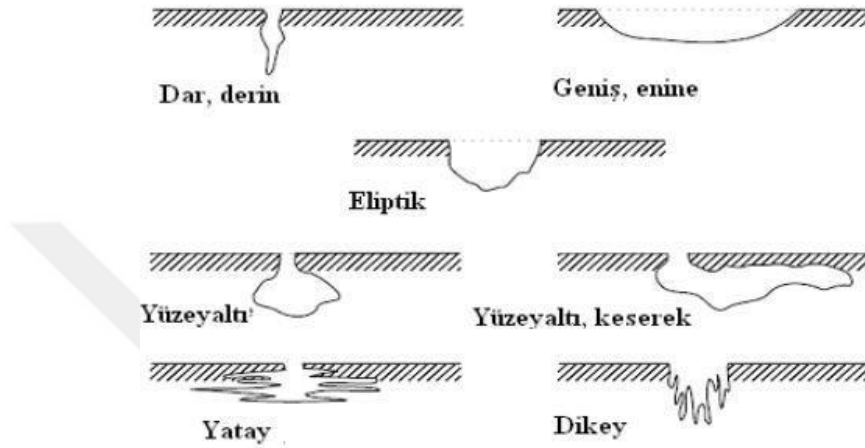
Aralık korozyonun oluşma mekanizması, metalin çözünmesi ve oksijenin hidroksil (OH⁻) iyonuna indirgenmesi ile olur (Kurt 2008).



2.3.2.6 Oyuklanma Korozyonu (pitting, çukurcuk)

Durgun çözeltilerdeki metal yüzeyindeki bazı noktaların, çeşitli sebeplerle daha aktif hale gelerek mikro çukurlar haline dönüşmesi ve otokatalitik mekanizma ile giderek

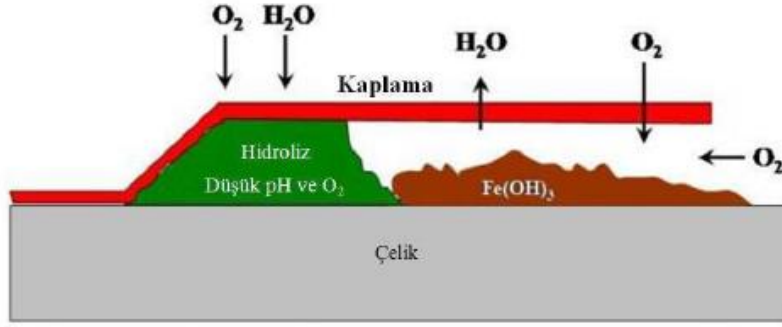
büyümesi olayına oyuklanma korozyonu nedir. Anot ve katot bölgeleri keskin bir şekilde ayrılmış korozyon türüdür. Şekil 2.25'te meydana gelen çukurun iç kısmındaki dar bir bölge anot, çukurun çevresi katottur. Çukur bölge derinleştikçe korozyona uğrayarak daha da derinleşmesi hızlanmaktadır. Bu sebeple en tehlikeli korozyon türü oyuklanma korozyonudur (Uysal 2006).



Şekil 2.25 Çukurcuk korozyonu hasar şekillerinin şematik görünümü (Khantakhtı 2014).

2.3.2.7 Filiform Korozyonu

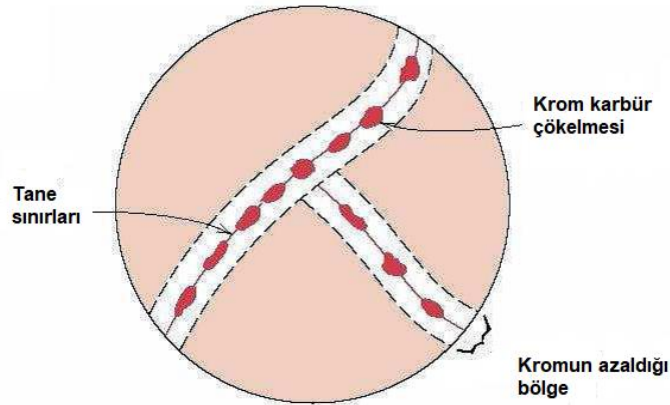
Metal malzeme yüzeyinde kaplama veya boya tabakalarının alt kısmında ilerleyen korozyon türüdür. Filiform korozyon, kabul altı korozyonu ve çatlak korozyonunun da bir türü olarak kabul edilebilir. Korozyon mekanizması kabuk tabakasının alt kısmında Şekil 2.26'da gösterildiği gibi solucan hareketlerine benzer bir şekilde hareket etmektedir. Çatlak korozyonunun oluşum mekanizmasına benzemektedir. Kaplamanın zayıf bir noktasından başlayan korozyon kabul altına su ve oksijen girmesine sebebiyet verir. Kaplama su geçirmezse korozyon olayı meydana gelmez. Oksijen konsantrasyonu, maksimum olduğu korozyonun başladığı noktadan, korozyonun ilerlediği yöne gittikçe azalmaktadır. Kabuk altında gerçekleşen korozyon olayı sonucunda hidrojen iyonları ve metal hidroksit oluşarak uç kısımlar korozyon ilerlemesinin devamı için elverişli bir ortam (düşük pH ve düşük oksijen konsantrasyonu) haline gelir. Bu sebeple korozyon olayının hareket şekli uç noktadan ileriye doğru olur (Arı 2008, Doğan 2014).



Şekil 2.26 Filiform korozyonun şematik gösterimi (Demirel 2013).

2.3.2.8 Tanelerarası Korozyon

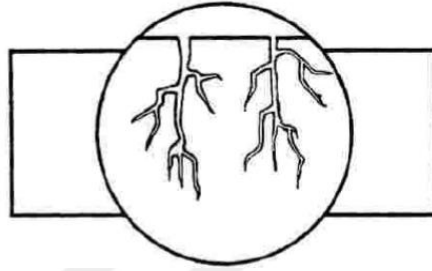
Tane sınırlarının amorf olmasından dolayı potansiyelinin daha düşük olması ve bu nedenle potansiyel farkı meydana gelmesiyle element kayıplarının oluşması sonucu Tanelerarası Korozyon meydana gelir. Tanelere göre tane sınırları daha aktif yapıya sahip olduklarından dolayı iki farklı ortam oluşturur. Tanelerarası korozyon, örnek olarak en tipik paslanmaz çeliklerde görülür. Yüksek sıcaklıkta paslanmaz çeliklere ısıtıl işlem uygulanırsa veya kaynak yapılsa, bünyesindeki Cr, C ile tepkimeye girer ve Şekil 2.27’de şematik olarak gösterilen karbürleri (Cr_{23}C_6) oluşturur. Karbürlerin (Cr_{23}C_6) kendisi korozyona uğramaz. Oluşan bu karbürler tane sınırlarına çöker, dolayısıyla tane sınırı Cr konsantrasyonu düşer ve bu bölgeler Cr konsantrasyonu yüksek tane içleri ile bir galvanik çift oluşturarak bu bölgeleri korozyon açısından zayıf bir hale getirirler (Kayalı 2011).



Şekil 2.27 Paslanmaz çelikte meydana gelen tane sınırlarında krom-karbür (Cr_{23}C_6) çökmesi (Kayalı 2011).

2.3.2.9 Gerilim Korozyon Çatlaması

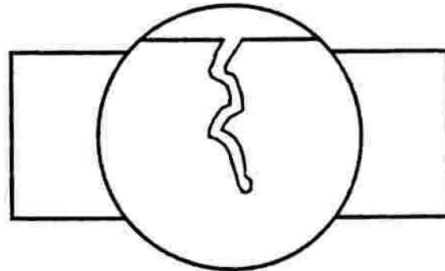
Bir metal, statik bir gerilme altında ve aynı zamanda Korozif bir ortamdaysa, metalin çatlak oluşarak kırılması çabuklaşır. Metal yüzeyinde mevcut halde çatlak veya çukur varsa gerilime duyarlı hale gelir ve korozyon mekanizmasının başlaması için uygun ortam sağlanmış olur. Gerilmeli korozyonun ortaya çıkabilmesi için, malzemeye çekme veya basma yönünde gerilme uygulanıyor olmalı, mevcut bir çatlak başlangıcı ve olayı destekleyici bir elektrolit bulunmalıdır. Genelde koruyucu bir kabuk haline gelen korozyon ürünleri stres altındayken koruyucu kabuk oluşturamazlar. Nihayetinde korozyon hızlı şekilde devam eder ve o bölgede metalin çatlmasına sebep olur. Şekil 2.28’de şematik olarak verilmiştir (Arı 2008, Kayalı 2011).



Şekil 2.28 Gerilmeli korozyonun şematik gösterimi (Doğan 2014).

2.3.2.10 Yorulmalı Korozyon

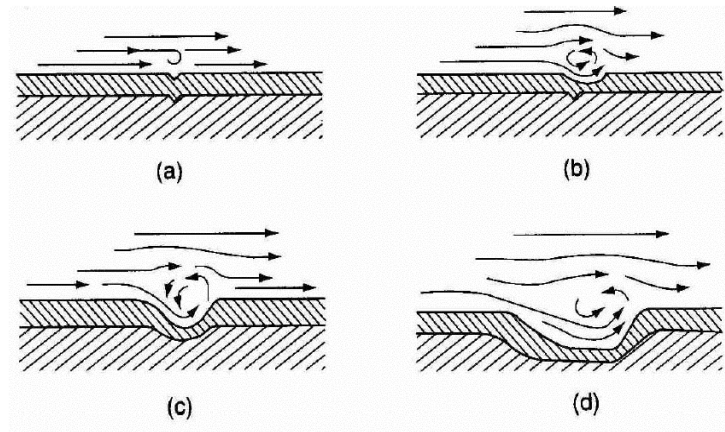
Malzemede dinamik yük ve korozyonun etkisiyle Şekil 2.29’da görülen çatlaklar oluşur ve bu korozyona yorulmalı korozyon denir. Neredeyse bu koşullara maruz kalmış tüm metallerde bu çatlaklar oluşur. İlk etapta dinamik yüklerin ve korozif ortamın etkisiyle çatlak veya oyuklar meydana gelir ve sonrasında korozif ortam ortadan kalksa bile oluşan çatlak mevcut yük etkisiyle ilerlemeye devam eder (Anatürk 2012).



Şekil 2.29 Yorulmalı korozyonun şematik gösterimi (Doğan 2014).

2.3.2.11 Erozyon Korozyonu

Malzeme yüzeyi ile ortam arasındaki temas yüzeyindeki hız farkından dolayı oluşan korozyona Erozyon Korozyonu denir. Erozyon etkisi, yüksek akma hızlarında, türbülans ve çarpma olaylarının fazla olduğu durumlarda çok fazla görülmektedir. Örnek olarak hızlı aşınma sonucu iç basınca dayanamayacak kadar incelen borular çatlayarak görevlerini yapamaz hale gelirler. Metal kaybı metalin iyonlarına dönüşmesi veya yüzeyde oluşan oksit tabakalarının uzaklaştırılarak ortama karışması ile gerçekleşir. Şekil 2.30'da görüldüğü gibi bozulan yüzeylerin görünümü akım doğrultusuna yönelik fazla derin olmayan yumuşak engebelerden oluşur (Üneri 1998, Schweitzer 2007, Görener 2007, Kayalı 2011, Aslan 2015)



Şekil 2.30 Erozyon korozyonu aşamaları (Aslan 2015).

2.3.2.12 Titreşimli Korozyon

Titreşimli korozyon, dolaylı olarak fretting aşınması sonucu meydana gelmektedir. Birbirine göre izafi olarak hareket halinde bulunan ve temas halinde olan iki parçanın temas yüzeyleri arasında sürtünme oluşturarak aşınma meydana gelir. Özel bir aşınma prosesi olan fretting olayı, temas halinde ve belirli yük altında iki yüzeyde düşük genlikli titreşim nedeniyle oluşan bağıl kayma (10^{-6} cm) hareketi sonucu meydana gelir. Bu tür temas, genellikle makina titreşimlerinin birbirlerine sabit olarak tespit edilen elemanlar arasında çok küçük hareketlere neden olması neticesinde ortaya çıkmakta ve korozyon, aşınma ve yorulma çatlak başlaması ile hasara neden olmaktadır.

Mühendislik açısından önemli olan yorulma çatlak gelişiminin mümkün olduğu bir ortamda fretting'in meydana gelerek makina elemanlarında yorulma olayını başlatması ve yorulma ömrünü önemli derecede azaltmasıdır. Bu olay fretting yorulması olarak bilinmektedir (Çağlaroğlu 2006).

2.3.2.13 Hidrojen Gevrekliği

Metal yüzeyinde, katodik koruma uygulamasında veya korozyon reaksiyonu sonucunda hidrojen atomları oluşur. Bu oluşumlar metal yüzeyinde absorbe edilir. Yüzeyde toplanan atomların bir bölümü $H+H \rightarrow H_2$ şeklinde birleşip, hidrojen moleküllerini oluşturarak ortamı terk eder. Hidrojen atomlarının bir kısmı da metal içerisine girerek boşluklara yerleşir. Bu durum, hidrojen atomlarının hidrojen molekülü oluşturarak önemli ölçüde hacim artışına sebep olur. Metal içerisine difüzlenme imkânı olmadığı için yerleştiği boşluklarda yüksek basınç meydana getirerek metalin çatlamasına sebebiyet verir (Elyiğit 2011).

2.3.3 Korozyon Önleme Yöntemleri

Korozyonu korunmak veya korozyonu önlemek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin bir kısmı aşağıda kısaca açıklanmıştır.

2.3.3.1 Katodik Koruma

Katodik korumanın temel prensibi, korozyona uğrayan metallerin katot olarak polarizasyonudur. Korunacak olan metalden daha aktif bir metal ile (galvanik anot) eşleme işlemiyle ya da harici akım uygulayarak da gerçekleştirilmektedir. Bu prensibe göre, metal yüzeyindeki anodik bölgelerin katot haline dönüşümü sağlanarak korozyon oluşumu önlenir. Galvanik anot ile koruma yönteminde koruma için lazım olan doğru akım, galvanik anot ve korunan metal çiftinin oluşturduğu hücre tarafından üretilir. Zamanla galvanik anotlarda çözünme gerçekleşir ve malzeme kaybı oluşur. Bu yüzden belirli aralıklarla yenilenmesi gerekmektedir. Harici akım verme yönteminde ise galvanik anot ve metal çiftinin akım üretmesine gerek yoktur. Bu yöntemde, çözünme

miktarı oldukça düşüktür ve ekonomik olarak uygun anot malzemeler kullanılabilir (Anatürk 2012, Doğan 2014).

Katodik koruma mekanizmalarında galvanik anotlu koruma yönteminde kullanılan anot malzeme genellikle magnezyum, çinko ve alüminyumdur. Gemilerdeki katodik yöntemle korunma sistemlerinde pervane veya dümen kısmında çinko ve magnezyum anotları, su tanklarında ve su ısıtıcılarında katodik koruma uygulaması için yaygın olarak magnezyum anotlar kullanılır. Harici akım kaynaklı katodik koruma uygulamalarında Pb-Sb-Ag, Fe-Si, Ti bazlı anotlar kullanılır (Çolak 2010, Doğan 2014).

2.3.3.2 Anodik Koruma

Korunacak olan metali korozyon potansiyeline göre daha anodik hale getirerek korozyon hızını azaltma işlemine anodik koruma denir. Anodik koruma bir pasifleşme işlemi olarak kabul edildiğinden, yalnız pasifleşebilen metallere uygulanır. Nikel, krom, demir, titan ve bu metallerin alaşımları gibi aktif - pasif geçişi sergileyen metallere kontrollü şekilde anodik akım uygulanırsa belirli bir potansiyelden sonra metal pasif hale gelir ve metalde çözünme hızı azalır. Metalin akım-potansiyel karakteristikleri iyi bilinmelidir. Pasif haldeyken uygulanan potansiyel, metalin daha fazla aşınmasını önler. Metal başlangıçta bir miktar çözünerek yüzeyde pasif bir tabaka oluşturur. Uygulanan anodik pasif potansiyel ile oluşan pasif tabakanın devamlılığı sağlanır. Kontrolsüz şekilde yapılan bir anodik koruma uygulaması çok büyük zararlara yol açabilir (Azazi 2007, Kayalı 2011).

2.3.3.3 Korozyon Önleyici (İnhibitör) Kullanma

İnhibitörler, korozyon ortamının etkisini önlemek veya azaltmak için korozyon ortamına eklenen maddelerdir. Eklenen bu maddeler genellikle yüzeyde koruyucu bir tabaka meydana getirerek korozyonu önlerler. Otomobillerde ısıtma sisteminde kullanılan suyun içerisine veya antifriz karışımının içine inhibitör eklenir. Örnek olarak; korozyon ortamına oksitleyici maddelerle mangan, alüminyum ve krom gibi metallerin

yüzeylerinde oksit film tabakaları oluşturulur ve böylece bu metallerin korozyondan korunması sağlanmış olur. (Şahin 2009, Doğan 2014).

2.3.3.4 Alaşım Elementi Katma

Metallere, uygun alaşım elementleri ekleyerek korozyon direnci artırılabilir. Örnek olarak, östenitik paslanmaz çeliklerin 880 ile 1380 °C arasındaki sıcaklıklardan soğutulması işleminde karbon oranını düşürerek ya da karbürleri daha kararlı bir hale getirerek tane sınırlarında krom karbürlerin çökmesini önlenabilir. Çökme engellenemezse, çeliği taneler arası korozyona duyarlı hale getirir. Bu amaçla çeliğe kolombiyum ve titanyum eklenir. Bu elementler, yüksek sıcaklıkta östenit fazı içinde çözünmeyen daha kararlı karbürler meydana getirirler. Sonuç olarak, krom ile birleşebilecek çok az miktarda karbon kalır ve çeliğin stabilize olması sağlanmış olur. Bazı alaşım elementleri de malzemenin yüzeyinde gözeneksiz oksit filmleri oluşturarak veya oluşmasını destekleyerek malzemenin korozyon direncini artırırlar. Örneğin; çeliğe katılan molibden ve alüminyuma katılan magnezyum bu malzemelerin korozyon dirençlerini artırır (Çolak 2010, Kayalı 2011).

2.3.3.5 Uygun Tasarım

Korozyona yol açıcı koşulların uygun tasarımla azaltılması veya tamamen giderilmesinde etkili ve korozyonu önleme yöntemlerinin en ucuzudur. Sadece yapılması gereken, malzemenin korozyon ortamıyla temasını minimuma indirmek için uygun tasarım yapmaktır. Potansiyel farkları yüksek olan elementler arasında temas durumundan kaçınılmalıdır. Şayet bu başılamazsa, galvanik korozyonu önleme amacıyla kauçuk veya plastik kullanılarak metal malzemelerin teması engellenmelidir. (Şahin 2009, Çolak 2010).

Perçinli ve cıvatalı bağlantılar aralık korozyonu için elverişli dar bölgeleri oluştururlar. Bu nedenle korozyonun beklendiği koşullarda kullanılmamaları, bunun yerine lehim ve kaynak gibi bağlantı türlerine öncelik verilmesi gerekir. Kazan ve depoların taşıyıcı ayaklar üzerine oturtulmasında aralık korozyonuna yol açıcı ve havalanmayı engelleyici

tasarımlardan kaçınılmalıdır. Aşırı yükleme ve yüksek iç gerilimler metal ve alaşımların gerilimli korozyon çatlaması ve yorulmalı korozyon ile bozunmalarına yol açar. Bu tür bozunmalara duyarlılık gösteren malzemelerin kullanılması halinde, dıştan uygulanan yükler sınırlanmalı ve yüksek iç gerilimlerin doğmasına yol açacak tasarım ve imalat usullerinden kaçınılmalıdır. Uygun tasarım ve yalıtım ile sıcaklık dağılımının homojen olması yönünde çalışmalar yapılmalıdır. Sıcaklık yükseldikçe korozyon hızı yerel olarak artar, sıcaklık düştükçe de korozyon bakımından olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilir (Çolak 2010).

2.3.3.6 Kaplama

Metal veya alaşımlarını ikinci bir metal ile kaplama, malzemenin yüzeyini korozyona dirençli hale getirmenin en sık başvurulan yöntemlerinden biridir. Elektrokimyasal tutum bakımından metalik kaplamaları (a) aktif kaplamalar ve (b) soy kaplamalar olarak iki gruba ayrılmaktadır. Kaplama işlemi uygulanacak metale göre soy ve aktif kaplamaların seçiminde galvanik diziden faydalanılır. Örnek olarak çeliğe göre pasif tutumları nedeni ile bakır, gümüş, kalay, kurşun, nikel ve krom soy, kadmiyum ve çinko ise aktif metalik kaplamalar olarak belirirler. Ancak bu seçimde ortamın etkisini de gözden kaçırmamak gerekir (Gürlek 2009).

Kaplama malzemesi seçiminde hangi metalin seçileceği, aşağıdaki faktörler dikkate alınarak ekonomik değerlendirme ile karar verilir (Gülensoy 2006).

1. Korozyon şiddeti
2. Malzemenin biçimi ve boyutları
3. Yapının ömrü
4. Mekanik faktörler
5. Yüzeyin dekoratif görünümü

Örneğin, çelik üzerine uygulanan kalay veya alüminyum kaplamaların, bazı ortamlarda aktif tutum takındıkları görülür. Korozyonun elektrokimyasal oluşum düzeni, her iki kaplama türünün hangi koşullarda koruyucu olduğunu kesinlikle belirler. Buna göre,

soy kaplamaların koruma kabiliyeti metal ile saldırgan ortam arasında etken bir bariyer oluşturmasına bağlıdır. Eğer kaplama içerisinde boşluk veya çatlak türünden hatalar mevcutsa korozyonun o noktalarda başlaması ve metalin kaplama altında korozyona uğraması engellenemez. O halde, soy kaplama elementlerinin kullanılabilmesinin ön koşulu boşluksuz uygulanabilmeleridir (Gürlek 2009).

Bu sakıncaya karşın aktif kaplamalarda bulunan hatalardan koruma kabiliyetinde bir değişiklik yaşanmaz. Çünkü koruma esasen katodik korumadır. Bu durumda ana malzemeden ziyade aktif kaplamalar korozyona uğrarlar. znen kaplamanın kalınlığı, yeterince azalmadıka metalin korozyona uğraması nlenmiş olur. Ancak bu şekilde sağlanan korumanın yüzeydeki yaygınlığı ortamın elektrik iletkenliğine bağlıdır (Gürlek 2009).

Metal kaplamalar elektro kaplama, difüzyon sıcak daldırma, ve mekanik kaplama gibi yöntemlerle yapılır. Metalik kaplamaların başarılı görev yapmalarında en önemli etken, kaplanacak metal yüzeyinin kaplamaya hazırlanmasıdır. Metal yüzeyleri yağ, kir, oksit, boya gibi maddelerle kaplı olabilir. Yüzeyin mekanik, ısı, kimyasal, elektrokimyasal olarak temizlenmesi, kaplama metali ile yüzey arasında iyi bir bağ oluşmasını ve kaplamanın devamlılığını sağlayarak koruma etkinliğini artırır (Gülensoy 2006, Gökergil 2010)

2.3.4 Korozyon Hızı lm Yöntemleri

Metalin, birim zamanda çözünme ya da malzeme kaybı miktarı korozyon hızını verir. Korozyon hızının kontrol altına alınması ve hızının belirlenmesi, korozyon tepkimelerinin önlenmesinde ve hatta durdurulmasında çok faydalıdır. Korozyon olayı, metal ve etkileştiği ortamın türüne göre şekillenir. Ancak, korozyonun türünü ve hızını etkileyen pek çok faktör vardır. Bölgesel korozyonun söz konusu olduğu sistemlerde korozyon hızı, korozyonun derinlemesine ilerleme biçiminde verilebilir. Korozyon hızının hemen ölçülebilmesi, elektrokimyasal yöntemlerle yapılabilmekte ve bu yöntemlerde korozyon hızı, akım yoğunluğu olarak verilmektedir. Korozyon hızını

belirlemede en çok kullanılan yöntemler Kütle Kaybı, Tafel Ekstrapolasyon ve Lineer Polarizasyon yöntemleridir. (Soncu 2008, Kayalı 2011).

Hiçbir yöntemle ölçülemeyen korozyon türleri de mevcuttur. Malzeme yüzeyinde korozyon ürünlerinin birikmesi gerçekleşmiş olabilir, ya da oluşan korozyon ürünleri sadece Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM) ve X Işınları Difraksiyonu (XRD) analiz yöntemleri ile karakterize edilebilirler.

2.3.4.1 Kütle Kaybı Yöntemi

Kütle kaybı yönteminde, test için hazırlanmış ve yüzeyi temizlenmiş numune tartıldıktan sonra belirli bir süre korozif ortamda bekletilir. Korozyon ürünleri, temizlendikten sonra yeniden tartılan numunenin gram, miligram veya yüzde ağırlık azalmasına göre korozyon hızı tayin edilir (Kayalı 2011).

Malzemedeki kütle kaybının en belirgin birimleri yılda inç, ayda inç, yılda milimetre ve yılda mil(mpy)'dir. Endüstride kullanılan metallerin korozyon hızı yaklaşık olarak 1 ile 200 mpy arasında değiştiğinden pratikte yılda mil incelme anlatımı üstün tutulmaktadır. Böylece korozyon verilerini ondalık sayılara gereksinim duymadan vermek olanaklıdır. Yılda mil (mpy) olarak korozyon hızı, korozif ortama bırakılan metalin ağırlık azalmasından aşağıda verilen bağıntı kullanılarak kolayca hesaplanır (Gerengi 2008).

$$mpy = \frac{534W}{DAT} \quad (2.5)$$

Burada;

D	=	Örneğin yoğunluğu (g/cm ³)	T	=	Süre (saat)
W	=	Ağırlık azalması (mg)	A	=	Örneğin yüzeyi (inç ²)

Yılda mil olarak verilen korozyon hızı aşağıdaki bağıntılarla metrik sisteme çevrilir (Kayalı 2011):

$$mpy = 0.254 \frac{mm}{yıl} = 25.4 \frac{\mu m}{yıl} = 2.90 \frac{nm}{saat} = 0.805 \frac{pm}{saniye} \quad (2.6)$$

Genellikle endüstride kullanılan dayanıklı gereçlerin korozyon hızları 1–200 mpy ve onun metrik sistemdeki eşdeğerleriyle birlikte korozyon dayanım durumlarını sınıflandırmak üzere verilmiştir. Çizelge 2.12 'de, malzemelerin korozyon dirençleri, farklı birimlerle ifade edilmiştir (Üneri 1998).

Çizelge 2.12 Korozyon hızı ölçüm biriminin, ifade ettiği bağıl korozyon direnç ve eşdeğerleri olan metrik birimlerle karşılaştırılması (Üneri 1998, Gerengi 2008).

Yaklaşık Metrik Eşdeğerler					
Bağıl Korozyon Direnci	mpy	$\frac{mm}{yıl}$	$\frac{\mu m}{yıl}$	$\frac{nm}{saat}$	$\frac{pm}{saniye}$
Çok çok iyi	<1	<0.02	<25	<2	<1
Çok iyi	1 – 5	0.02 – 0.1	25 – 100	2 – 10	1 – 5
iyi	5 – 20	0.1 – 0.5	100 – 500	10 – 50	5 – 20
Orta	20 – 50	0.5 – 1	500 – 1000	50 – 150	20 – 50
Zayıf	50 – 200	1 – 5	1000 – 5000	150 – 500	50 – 200
Kabul Edilemez	200+	5+	5000+	500+	200+

2.3.4.2 Tafel Extrapolasyon Yöntemi

Çözelti ile metal arasında, karşılıklı iki elektrokimyasal tepkimenin dengeye ulaşması sonucu korozyon oluşur. Reaksiyonların biri çözelti ortamında bulunan O_2 veya H^+ 'nın indirgenmesi ile oluşan katodik reaksiyon, diğeri ise metalin çözünmesiyle oluşan anodik reaksiyondur. Anodik reaksiyon sonucu meydana gelen elektronlar katodik reaksiyonda indirgenmede kullanılır. Stern-Geary eşitliği, Hem katodik hem de anodik Tafel eşitlikleri ile birleştirildiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilir (Arı 2008):

$$I = I_{corr} \cdot \{ \exp[2,303(EA - E_{corr}.)] - \exp[2,303(EK - E_{corr}.)] \} \quad (2.7)$$

Burada;

I_{corr} : Korozyon akımı, korozyon hızının bir ölçüsü (amper)

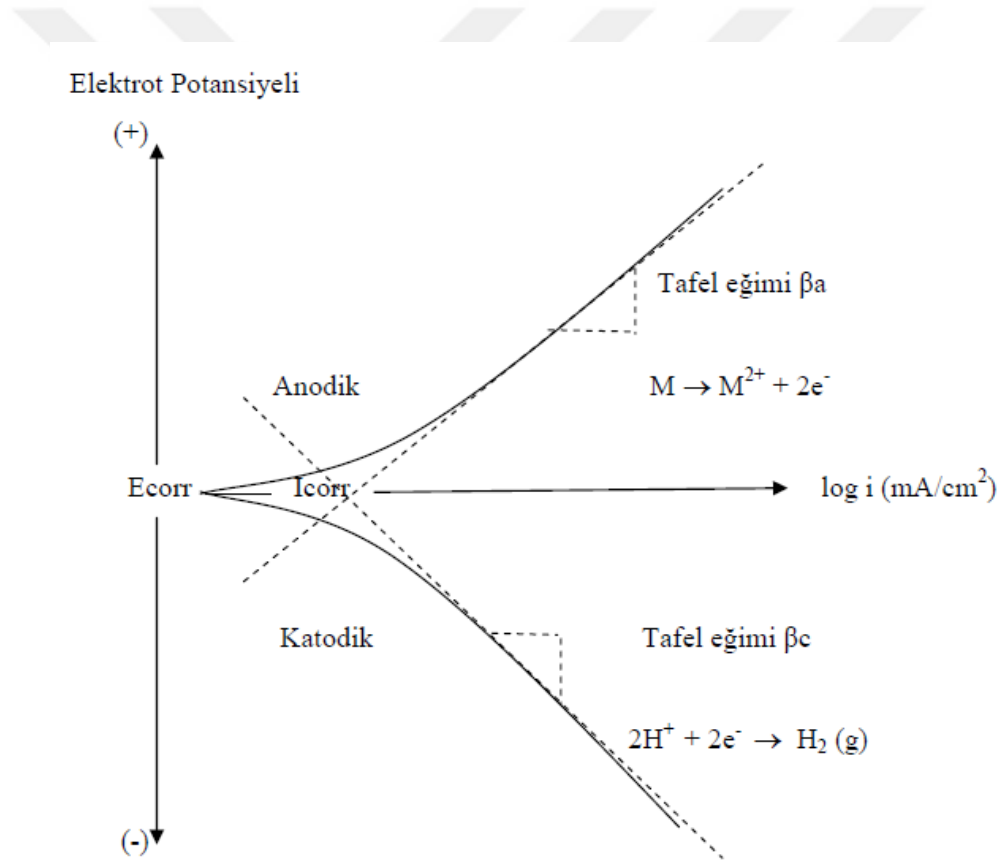
I : Ölçülen hücre akımı (amper)

E_{corr} : Korozyon potansiyeli (volt)

E_K : Elektroda uygulanan katodik gerilimdir (volt)

E_A : Elektroda uygulanan anodik gerilim (volt)

Sekil 2.31'de elektrokimyasal olarak elde edilen bir Tafel polarizasyon diyagramı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere E-logI polarizasyon eğrilerinde, uygulanan harici akım belirli bir değere eriştikten sonra polarizasyon eğrileri lineer (doğrusal) çizgi halini almaktadır. Dış akımın logaritmasının lineer hale geldiği bu bölgelere Tafel bölgesi denir. Bu bölgede Tafel doğrusunun eğimi, korozyon hızının belirlenmesinde kullanılır (Arı 2008).



Şekil 2.31 Anodik ve Katodik Polarizasyon Eğrileri (Yakar 2006).

Korozyona uğrayan bir elektrotta anodik ve katodik reaksiyonlar, elektrot yüzeyinde aynı anda ilerler. Bu durumda elektrot potansiyeli bir karma potansiyel değerine (E_{corr}) erişir. Bu potansiyele karşılık gelen akıma korozyon akımı (I_{corr}) denir. Tafel ekstrapolasyonu yönteminde korozyona uğrayan metal için anodik ve katodik Tafel

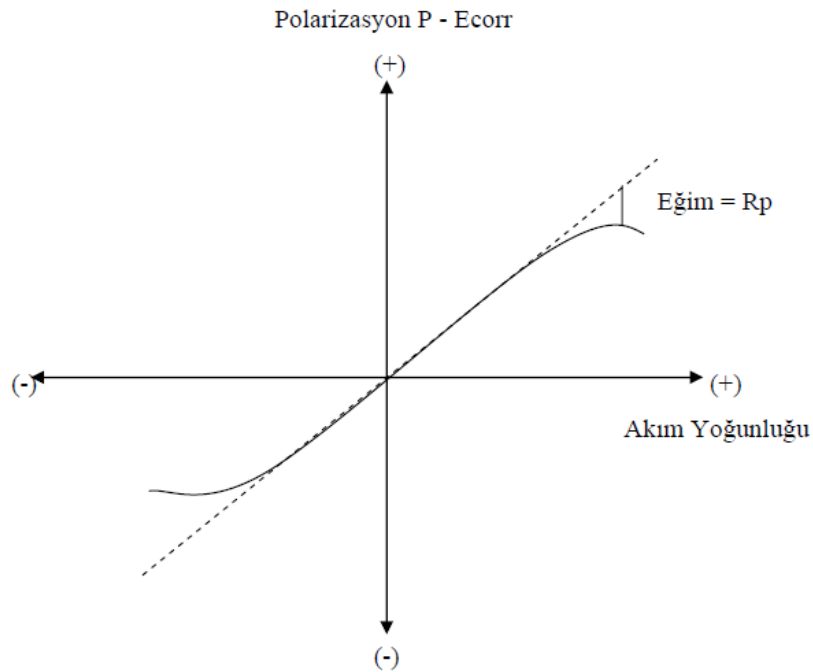
eğrileri oluşur ve bunların doğrusal olan kısımları uzatılarak kesim noktaları yardımıyla o sistem için korozyon hızı (I_{Corr}) ve korozyon potansiyeli (E_{Corr}) bulunur (Arı 2008).

2.3.4.3 Lineer Polarizasyon Yöntemi

Şekil 2.31'deki polarizasyon eğrileri grafiğindeki doğrusal akım-potansiyel eğrisinin eğiminden polarizasyon direnci bulunur ve Stern-Geary eşitliğinde yerine yazarak korozyon hızı belirlenebilir.

$$i_{kor} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \left(\frac{\Delta I}{\Delta E} \right) = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \left(\frac{1}{R_p} \right) = \frac{B}{R_p} \quad (2.8)$$

Burada i_{kor} korozyon akımı, β_a ve β_c ise anodik ve katodik Tafel doğrularının eğimleridir. Akım-potansiyel eğrisinin eğiminin ($\Delta I / \Delta E$) tersi ise R_p polarizasyon direncini ifade etmektedir. Şekil 2.32'de Polarizasyon direnç yöntemi kullanılarak korozyon hızı belirlenmesinde akım potansiyel eğrisi verilmiştir (Çiftçi 2009).



Şekil 2.32 Polarizasyon direnç yöntemi kullanılarak korozyon hızı belirlenmesinde akım potansiyel eğrisi (Yakar 2006).

Eşitlik 2.5'deki bağıntı en çok 10 mV'a kadar uygulanabilir. Fakat 7 mV'dan sonra doğrusallıktan sapmalar meydana gelir. Lineer polarizasyon yönteminde potansiyelin değişme hızı (0,1-10 mV) arasındadır. Yavaş potansiyel değişimlerinde daha doğru sonuçlar elde edilmektedir. Eğer anodik ve katodik tepkimelerin Tafel sabitleri β_a ve β_c bulunursa korozyon hızı denklemden doğrudan hesaplanabilir. β_a ve β_c değerleri bilinmiyor ise literatüre göre $\beta_a=\beta_c=0,12V$ değerleri alınarak B katsayısı 0,026 V kabul edilir (Yakar 2006, Kayalı 2011).

2.3.5 Yüksek Sıcaklık Korozyonu

Alaşımlar ve saf metallerin oksitleyici atmosfer koşullarındaki kullanımında termodinamik olarak kararsız alaşımlar ve oksijen arasındaki reaksiyon sonucu yüzeyde oksitler meydana gelmektedir. Sıcaklık arttıkça reaksiyon hızla artmaktadır. Bu sebeple yüksek sıcaklıklardaki uygulamalarda, metallerin kullanılması, malzeme azalmasından dolayı kısıtlanmaktadır. Bu tür problemlere birçok uygulamada rastlanmaktadır. Resim 2.1'de ısı değiştiricilerdeki yüksek sıcaklık korozyonu ve vanadyum ile yüksek sıcaklık korozyonuna uğramış egzoz valfinin görüntüleri verilmiştir. (Körpe 2010). Yüksek sıcaklık korozyonunun önem arz eden koşulları ve endüstri kollarından bazıları şöyledir;

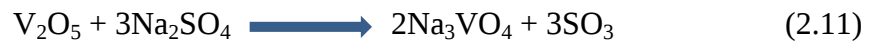
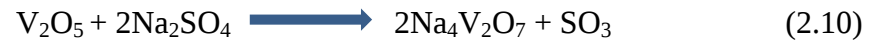
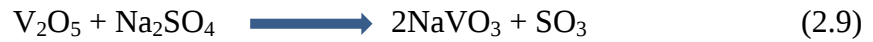
- i) Kimyasal endüstride yüksek sıcaklık işlemleri, örneğin amonyak üretimi, petro-kimyasal endüstri vb.
- ii) Metal üretimi ve işlenmesi, örneğin ısıtma işlemleri ve sıcak çalışma işlemleri vb.
- iii) Yanma içeren işlemler, örneğin dizel motorları, gaz türbinleri, yakma fırınları vb.

Yüksek sıcaklık korozyonu tip-1 ve tip-2 olarak ikiye ayrılır. Tip-1 korozyon 800-950 °C, Tip-2 ise 670-750 °C sıcaklıkları arasında gerçekleşir (Lai 2007).



Resim 2.1 a) Isı değiştiricide atmosferik koşullarda yuğsek sıcaklık korozyonu, b) Vanadyum ile yuğsek sıcaklık korozyonuna uğramış egzoz valfi. (MEB 2007).

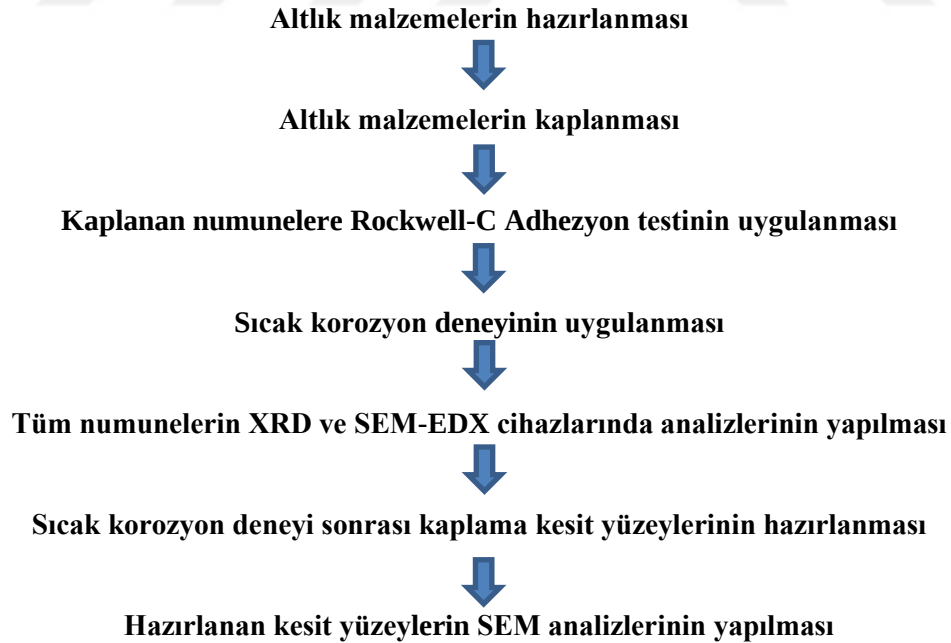
Yuğsek sıcaklıklarda atmosferik koşullarda oluşan oksidasyon sonucu meydana gelen yeni oluşumlar korozyon uğrunu olarak adlandırılmaktadır. Korozyon denilince ilk akla gelen oksidasyon sonucu oluşan metal oksitlerdir. Metal oksitlerin yanı sıra yuğsek sıcaklıklarda agresif bileşiklere maruz kalan metalik malzemelerin yuğzeyinde saldırgan bileşik ve ana metalin reaksiyonu ile meydana gelmiş oluşumları da gormek moomkondur. Bu oluşumlar da korozyon uğruneudur. V_2O_5 (Vanadyum pentaoksit) ve Na_2SO_4 (Sodyum sulfat) bileşikleri agresif ve saldırgan bileşiklere birer ornektir. Gaz turbinlerinde, sıvı yakıtlı fırınlarda ve otomobil motorlarında duşuk kaliteli yakıtların içerisinde bu bileşikler mevcuttur. Vanadyum pentaoksit ozellikle sodyum sulfat varlığı ile Sodyum vanadat (sodyum vanadyum oksit) oluşturarak daha agresif hale gelmektedir. Bu bileşiklerin korozyonuna, kobalt ve nikel bazlı alaşımların daha direnėli oldukları, krom ve nikel bazlı ėeliklerin daha az direnėli oldukları gormulmuştur. Bu iki saldırgan bileşiğin reaksiyonla oluşturabileği bileşikler aşağıda verilmiştir (Dudziak 2009).



Bu ėalıřmada Vanadyum Pentaoksit ve Sodyum Sulfat agresif bileşiklerin, Krom, Nikel ve Kobalt bazlı kaplamalara yuğsek sıcaklıkta ne gibi etkileri olduğu, kendi aralarında ve kaplama metalı arasında hangi bileşikleri oluşturduğu gozlemlenecektir.

3. MATERYAL VE METOT

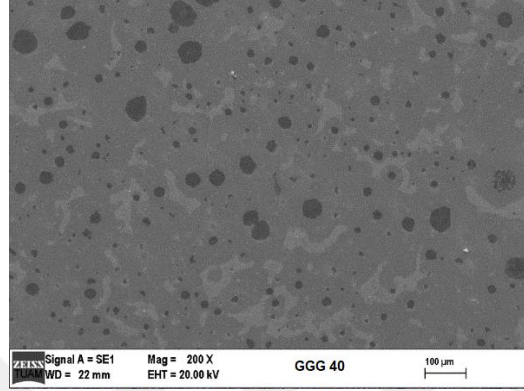
Bu çalışmada; küresel grafitli dökme demir altlık malzemeye HVOF (yüksek hızlı oksit yakıt) kaplama yöntemi ile Amdry 9624 (NiCrAlY) ve Amdry 9951 (CoNiCrAl) tozları kaplanmıştır. Literatür bilgileri bölümünde vurgulanan sıcak korozyona karşı Ni ve Co esaslı kaplamaların sıcak korozyon dayanımlarına ilişkin olumlu sonuçlar referans alınarak farklı bir prosese tabi tutmak üzere bu tozlar tercih edilmiştir. Bu kaplanan numunelerin, kaplama yapılmış yüzeylerine V_2O_5 (vanadyum pentaoksit) ve Na_2SO_4 (sodyum sülfat) tuzları tatbik edilerek, kuyu tipi fırında 500 °C, 600 °C ve 700 °C sıcaklıklarda 6 saat bekletilerek Sıcak Korozyon testleri uygulanmıştır. Ayrıca kaplamalara Rockwell-C sertlik ölçme cihazı ile Adhezyon testleri gerçekleştirilmiştir. Sıcak korozyon ve Rockwell-C Adhezyon testi uygulanan numune yüzeylerinin karakterizasyonu Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X Işınları Difraksiyonu (XRD) cihazları ile yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar Şekil 3.1’de şema halinde verilmiştir.



Şekil 3.1 Deneysel çalışma şeması.

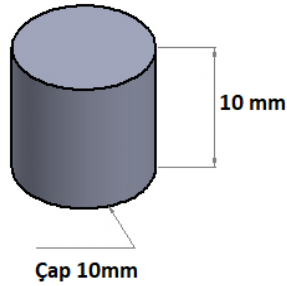
3.1 Altlık Malzemelerin Hazırlanması

Bu çalışmada altlık malzeme olarak GGG40 Küresel Grafitli Dökme Demir malzeme seçilmiştir ve bu malzemenin SEM görüntüsü Resim 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1) GGG40 SEM görüntüsü.

GGG40 malzemeleri CNC torna cihazı ile dikdörtgen prizma blok şeklinden silindir şekline getirilmiştir. Ölçüler ve örnek numune görüntüsü Resim 3.2’de verilmiştir.



Resim 3.2 Örnek numune ölçüleri ve görüntüsü.

3.2 Altlık Malzemelerin Kaplanması

Kaplama yapmak için metalik kaplamaların üretiminde en başarılı yöntemlerden birisi olan HVOF yöntemi seçilmiştir. Altlık malzeme olarak hazırlanan dökme demirler, çift taraflı bant vasıtası ile bir plakaya yapıştırılmış ve kumlama işlemine tabii tutulmuştur. Kumlama işleminde 50-80 mesh boyutunda alümina kumu kullanılmış ve 15 cm

mesafeden kumlama tabancası altlık malzemelere dik konumda olacak şekilde kumlama işlemi yapılmıştır. Kumlama işleminin amacı, kaplanacak yüzeyleri pürüzlü hale getirmek ve temizlemektir. Kumlama işlemi kaplamaların yapışmasını ve birikme verimini oldukça etkilemektedir.

Kumlama işlemi sonrasında dökme demir altlık malzemeler ultrasonik temizleyici ile teknik etanol içerisinde 30 dakika temizlenmiş ve kumlama işlemi esnasında oluşan yüzey kirliliği giderilmiştir. Temizlenen numuneler Resim 3.3'te gösterilen HVOF yöntemi kaplama sistemindeki hareketli tablaya bağlanmış ve kaplama işlemi için hazır hale getirilmiştir.



Resim 3.3 HVOF yöntemi kaplama sistemi.

Kaplama tozları, toz besleme ünitesine yerleştirilmiş ve 3 eksen CNC tezgaha bağlı Metco DJ2700 HVOF tabancası kullanılarak kaplama işlemi 90°'lik sprej açısı ile metalik toz kaplamalar HVOF yöntemi kullanılarak ve Çizelge 3.1'de verilen parametreler sabit tutularak yapılmıştır.

Çizelge 3.1 HVOF yöntemi parametreleri.

Malzeme	Başınç (bar)			Akış Hızı (SCFH)			İşlem	
Amdry 9624	Oksijen Propan			Oksijen Propan			Sprey	Besleme
Amdry 9951	Hava			Hava			mesafesi	Hızı
	10,3	6,2	7,2	24	40	50	250 mm	50 gr/dk

Bu sistemde, tabanca hareketleri ve numunelerin dönüş hızları kontrol edilebildiğinden,

kaplamalar istenilen kalınlıklarda elde edilebilmektedir. Hava-propan gaz karışımı oksijen ile yakılarak elde edilen enerji yardımıyla tozlar altlık malzemeye kaplanmıştır.

Küresel grafitli dökme demirler üzerine kaplama malzemesi olarak Metco tarafından ticari olarak sunulan Amdry 9624 (NiCrAlY) ve Amdry 9951(CoNiCrAlY) tozları kaplama malzemesi olarak seçilmiştir. Kaplama tozlarına ait Metco tarafından sunulan kimyasal bileşimler Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3.'te verilmiştir. Amdry 9951 kobalt içerirken, Amdry 9624 kobalt içermemektedir. Bu durum tozların kaplama üretimi esnasında davranışlarını etkileyecek ve farklı bileşimde ve yapıda kaplamalar elde edilmesini sağlayacaktır.

Çizelge 3.2 Amdry 9624 toz kimyasal içeriği.

Malzeme	Ağırlık Yüzdesi			
	Ni	Cr	Al	Y
Amdry 9624	Bal.	21-23	9,0-11,0	0,8-1,2

Çizelge 3.3 Amdry 9951 toz kimyasal içeriği.

Malzeme	Ağırlık Yüzdesi						
	Co	Ni	Cr	Al	Si	Y	Other(max)
Amdry 9951	Bal.	29-35	18-24	5-11	---	0,1-0,8	1,0

Her bir metalik tozdan 8 adet numune kaplanmış olup toplamda 16 adet kaplama üretilmiştir. Numunelerin 12 tanesi sıcak korozyon deneyinde, 4 tanesi ise Rockwell-C Adhezyon testinde kullanılmıştır. Kaplamaların karakterizasyonunu belirlemek için SEM görüntüleri alınmıştır, SEM-EDX ve XRD analizleri yapılmıştır.

3.3 Rockwell-C Adhezyon Testi

Ergimemiş partiküllerin, Rockwell-C sertlik ölçme aparatının kaplama tabakasına homojen şekilde temasını engellemesi sebebiyle numunelerin kaplama tabakası önce 1200 numaralı zımpara ile çok kısa süre zımparalanmıştır. Sonrasında Daimler-Benz Rockwell-C test yöntemiyle 1471 N (yaklaşık 150 kg) yük uygulayarak kaplama tabakasında 3'er adet iz oluşturulmuştur. Test işlemi, Afyon Kocatepe Üniversitesi,

Teknoloji Fakültesi, Mekanik Test ve Isıl İşlemler laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Resim 3.4’te sertlik ölçme test cihazı ve Rockwell-C Adhezyon Testi uygulaması görülmektedir. Oluşturulan izler Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile görüntülenerek kaplama türleri arasındaki farklar gözlemlenmiştir ve Daimler-Benz VDI 3198 standartlarına göre kabul edilebilir olup olmadığı belirlenmiştir.



Resim 3.4 Sertlik ölçme cihazı ve Rockwell-C Adhezyon testinin uygulanması.

3.4 Sıcak Korozyon Deneyi

Deneyisel çalışmalara başlamadan önce, kaplama yapılmış ve yapılmamış numuneler Çizelge 3.4’te verildiği şekilde numaralandırılmıştır. Deneyisel çalışmaların tüm aşamalarında işlemler Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı bünyesindeki çeşitli laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.4 Numunelerin numaralandırılması.

No	Malzeme
1	Kaplamasız GGG40
2	Amdry 9624 toz Kaplamalı GGG40
3	Amdry 9951 toz Kaplamalı GGG40

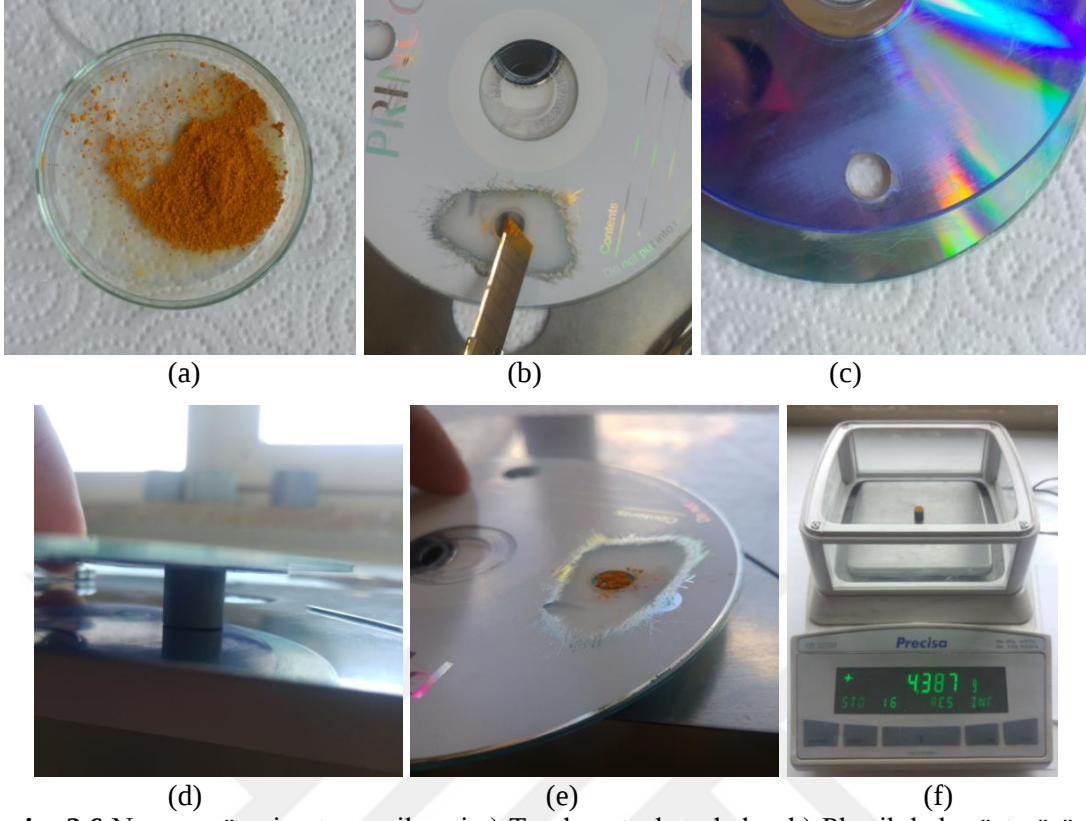
Otomobillerin motorlarında yakıttan gelen eser miktarda Vanadyum ve Sodyum tuzları yanma esnasında oluşan yüksek sıcaklık neticesinde motor bloğunu, egzoz valfini ya da diğer motor içi bileşenlerini korozyon ürünü oluşturarak tahrip etmektedir. Gaz türbinlerinde de aynı koroziif tuz etkisiyle tahribat yaşanmaktadır (Avcı 2015). Normal oda sıcaklığında atmosferik oksijen, çelik ve dökümler üzerinde fazla koroziif etkiye sahip değildir. Sayfa 51'deki Resim 2.1'de ısı değıştiricide atmosferik koşullarda yüksek sıcaklık korozyonu ve vanadyum ile yüksek sıcaklık korozyonuna uğramış egzoz valfi verilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda bunlara benzer birçok koroziif tahribata rastlamak mümkündür.

Bu bilgiler ve referanslar ışığında sıcaklık korozyonu için deneysel numuneler öncelikle Resim 3.5a'daki Alex marka ultrasonik banyoda etil alkol içerisinde 10 dakika temizlenmiştir. Sonra, Resim 3.5b'deki ETÜV fırın içerisinde 80 °C'de 20 dakika bekletilerek kurutulmuştur.



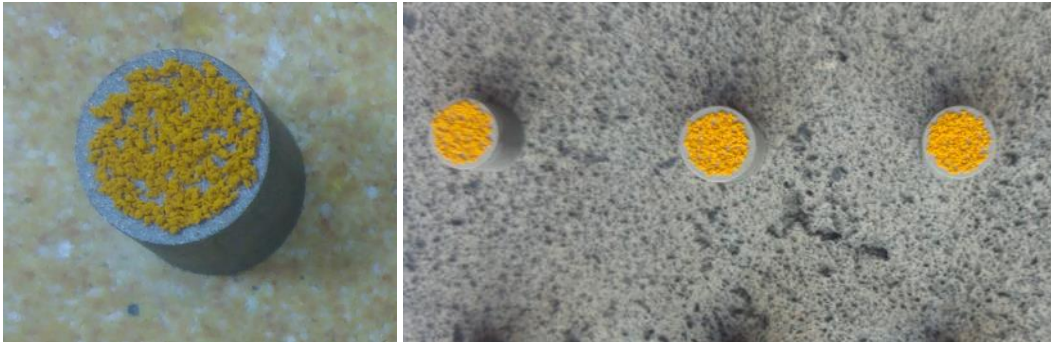
Resim 3.5 a) Ultrasonik banyo, b) ETÜV fırını.

Test için numunelerin üzerine tozların homojen olarak serilmesi Resim 3.6'da görölmektedir. Önce hassas terazide tartılan tozlar beher içerisinde ahşap bir çubuk yardımıyla mümkün olduğunca homojen hale gelinceye kadar karıştırılmıştır. Üzerine delik açılan ikili plastik cd'lerin kalıp olarak kullanılmasıyla, her numune yüzeyine %50 V_2O_5 + %50 Na_2SO_4 oranında tuz karışımı 16 mg/cm^2 ölçütünde, aynı alanda, aynı miktarda toz karışımı bir maket bıçağı yardımıyla serilmiştir. Tuzların tartımında Resim 3.6f'de görölen Precisa xb320m marka hassas terazi kullanılmıştır.



Resim 3.6 Numune üzerine tuz serilmesi a) Tuz karıştırılmış beher b) Plastik kalıp üst görüntü c) Plastik kalıp alt görüntü d) Numuneye kalıp ile tuz koyarken yan görüntü e) Numuneye tuz koyarken üst görüntü f) Hassas terazi.

Yıkayıp kurutulan numunelerin kaplanmış yüzeylerine %50 V_2O_5 + %50 Na_2SO_4 oranında tuz karışımı 16 mg/cm^2 miktarında Resim 3.7’de görüldüğü gibi üzerine serilmiştir. Eriyen tuzların akmaması için numune kenarlarından takriben 1 mm kadar boşluk bırakılmıştır.



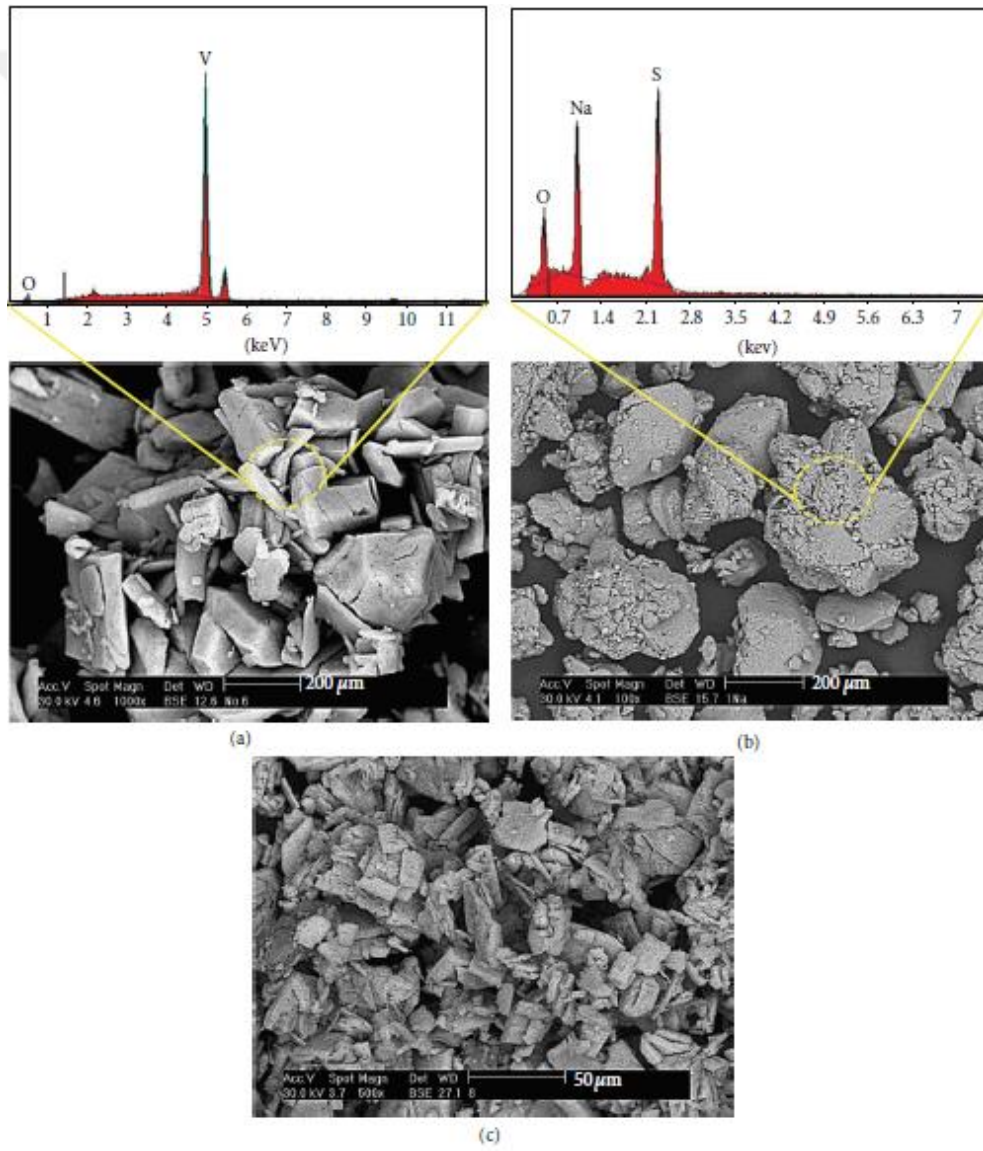
Resim 3.7 Üzerine tuz karışımı koyulmuş numuneler.

V_2O_5 ve Na_2SO_4 tuzların bazı fiziksel özellikleri Çizelge 3.5’te verilmiştir. Şekil 3.2’de

Vanadyum pentaoksit (V_2O_5), Sodyum sülfat (Na_2SO_4) ve %55 V_2O_5 + %45 Na_2SO_4 karışım tuzların SEM görüntüleri verilmiştir (Daroonparvar et. al. 2012, Avcı 2015).

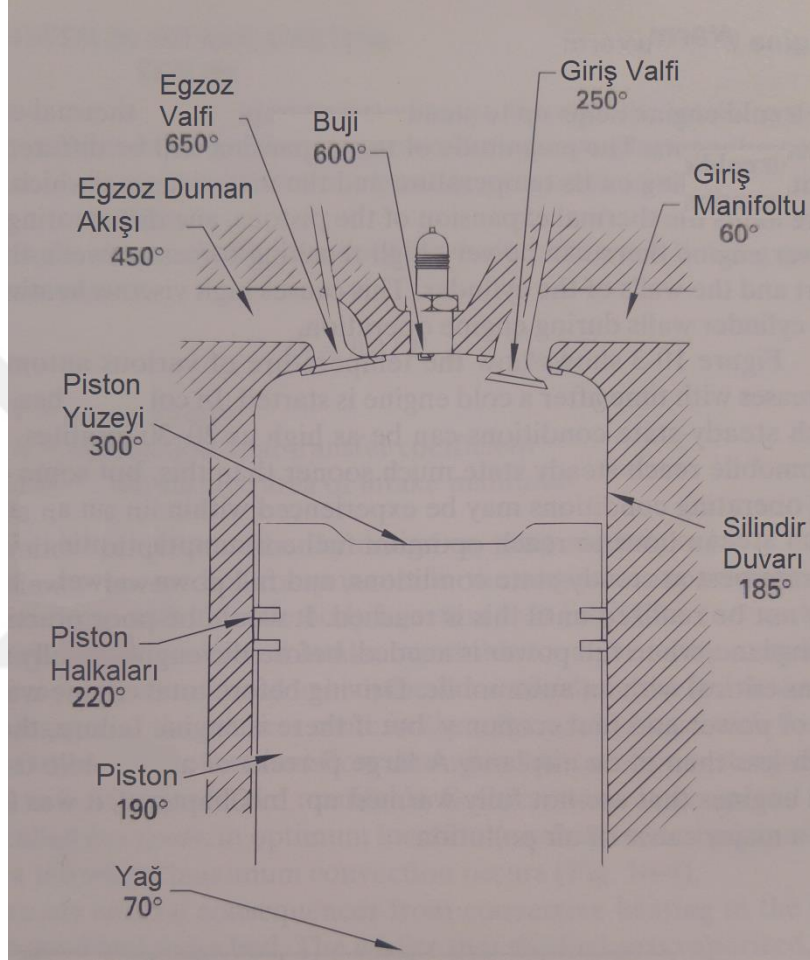
Çizelge 3.5 Tuzların fiziksel özellikleri (Avcı 2015).

TUZLAR	Ergime Noktası ($^{\circ}C$)	Yoğunluk (gr/cm^3)
V_2O_5 (Vanadyum Pentaoksit)	690	3,3
Na_2SO_4 (Sodyum Sülfat)	884	2,7



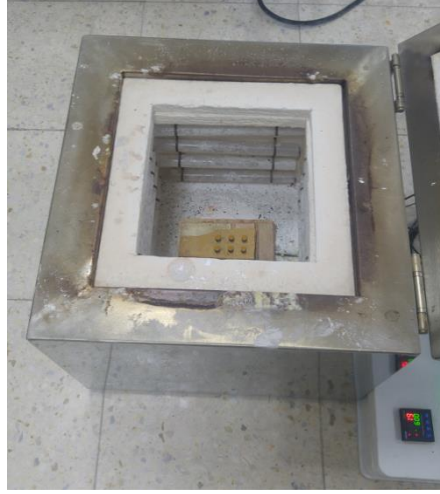
Şekil 3.2 Korozyon tuzlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri a) V_2O_5 , b) Na_2SO_4 , c) %55 V_2O_5 + %45 Na_2SO_4 tuzlarının ağırlık yüzdesi olarak karışımı (Daroonparvar et. al. 2012).

Bu çalışmada otomobil motorlarının çalışma sıcaklıklarındaki tahribatlar baz alınarak sıcak korozyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere motor içi ortalama sıcaklıklara bakılırsa en yüksek sıcaklıklar sırasıyla 650 °C ile egzoz valfi, 600 °C ile buji, 450 °C ile Egzoz akış bölümlerinde oluşmaktadır.



Şekil 3.3 Normal koşullarda ateşlemeli motorun tipik sıcaklık değerleri, Derece santigrat cinsindendir. (Taylor 1977).

Sıcak korozyon deneyi, Şekil 3.3'te verilen motor içi ortalama çalışma sıcaklıkları referans alınarak, 500 °C, 600 °C ve 700 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta, 6 saat boyunca, her sıcaklık için 6'şar adet numune, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Isıl İşlem Teknolojileri Laboratuvarındaki Resim 3.8'de görülen kuyu tipi fırın içerisinde farklı zamanlarda bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Fırının ısıtma parametresi 20 °C/dakika'dır. Soğutma işlemi hava ortamında fırının gücünü kesip kapağını açıp kapatarak manuel şekilde gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık olarak soğuma işlemi 40 °C/dk olarak hesaplanmıştır.



Resim 3.8 Kuyu tipi fırın.

Fırından çıkarılan numunelerin üzerindeki tuzlar, önce maket bıçağı ile kazınmıştır, sırasıyla 800, 1000, 1200 numaralı kağıt zımparalarla zımparalanmıştır. Ardından tekrar ultrasonik banyoda 30 dk bekletilerek fazla tuz atıklarından temizlenerek SEM ve XRD analizleri için hazır hale getirilmiştir.

3.5 Sıcak Korozyon Deneyi Sonrası Numunelerin Kaplama Kesit Yüzeylerinin Hazırlanması

Sıcak korozyon deneyi sonrasında, korozif tuzların kaplamaya ve altlık malzemeye etkilerini araştırmak ve incelemek için, numuneler reçine kalıba alınmıştır ve numunelerin kesit yüzeylerinden sırasıyla 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı zımparalar ile Resim 3.9’da görülen Metkon marka zımpara ve parlatma cihazı yardımıyla birkaç milimetre kadar orta kısmına doğru zımparalanmıştır.



Resim 3.9 Metkon marka zımpara ve parlatma cihazı.

Yine aynı cihazda zımpara aparatı çıkartılarak, çuha takılmıştır. Çuhanın üzerine alümina sıvısı dökülerek numune kesit yüzeylerinin parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.. Kesit yüzeyi metalografik olarak hazırlanmış numune örneği Resim 3.10’da verilmiştir.



Resim 3.10 Numune kesit yüzey görüntüleri.

3.6 SEM, EDX ve XRD Analizlerinin Yapılması

Numune yüzeylerine %50 V_2O_5 + %50 Na_2SO_4 karışım tuzları serilip 500 °C, 600 °C ve 700 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta fırın içerisinde 6’şar saat bekletilerek gerçekleştirilen sıcak korozyon deneyi sonrasında, fırından çıkarılıp fiziksel temizleme ve ultrasonik banyo işlemlerinden sonra numuneleri tekrar kodlama ihtiyacı doğmuştur. Kodlama yapıldıktan sonra 9 farklı numune varyasyonu Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Numunelerin kodlanması.

MALZEME	İŞLEM		
	500 °C’de 6 saat bekletilmiş	600 °C’de 6 saat bekletilmiş	700 °C’de 6 saat bekletilmiş
1	1-500-6s	1-600-6s	1-700-6s
2	2-500-6s	2-600-6s	2-700-6s
3	3-500-6s	3-600-6s	3-700-6s

Numunelerin SEM görüntü çekimleri ve SEM-EDX elemental analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezindeki (TUAM) LEO marka 1430 VP model Taramalı elektron mikrobunda (Resim 3.11), XRD

analizleri ise aynı merkezdeki Resim 3.12’de gösterilen Bruker marka D 8 Advance model X ışınları kırınımı cihazında yapılmıştır.



Resim 3.11 LEO marka 1430 VP model taramalı elektron mikroskobu (SEM).

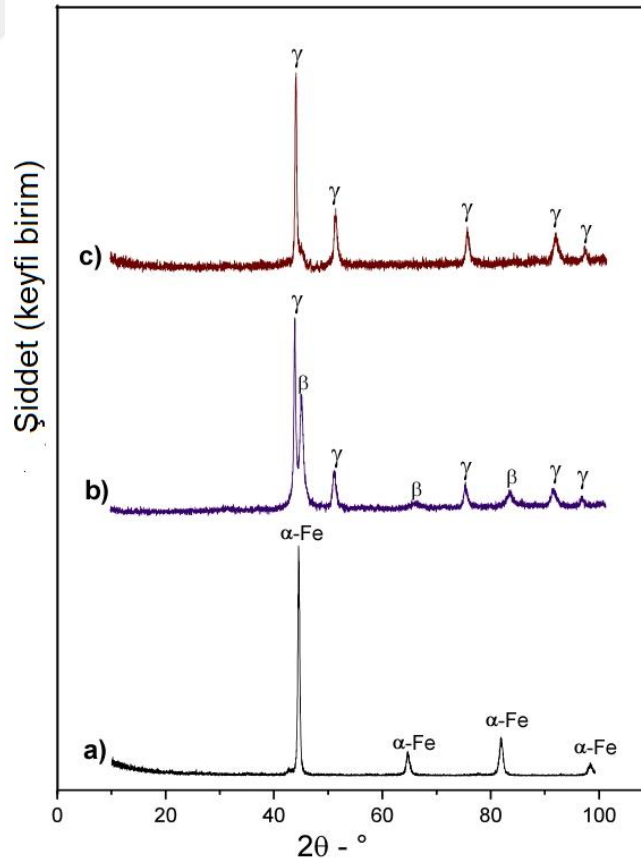


Resim 3.12 Bruker marka D 8 Advance model x ışınları kırınımı cihazı (XRD).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Kaplamaların Karakterizasyonu

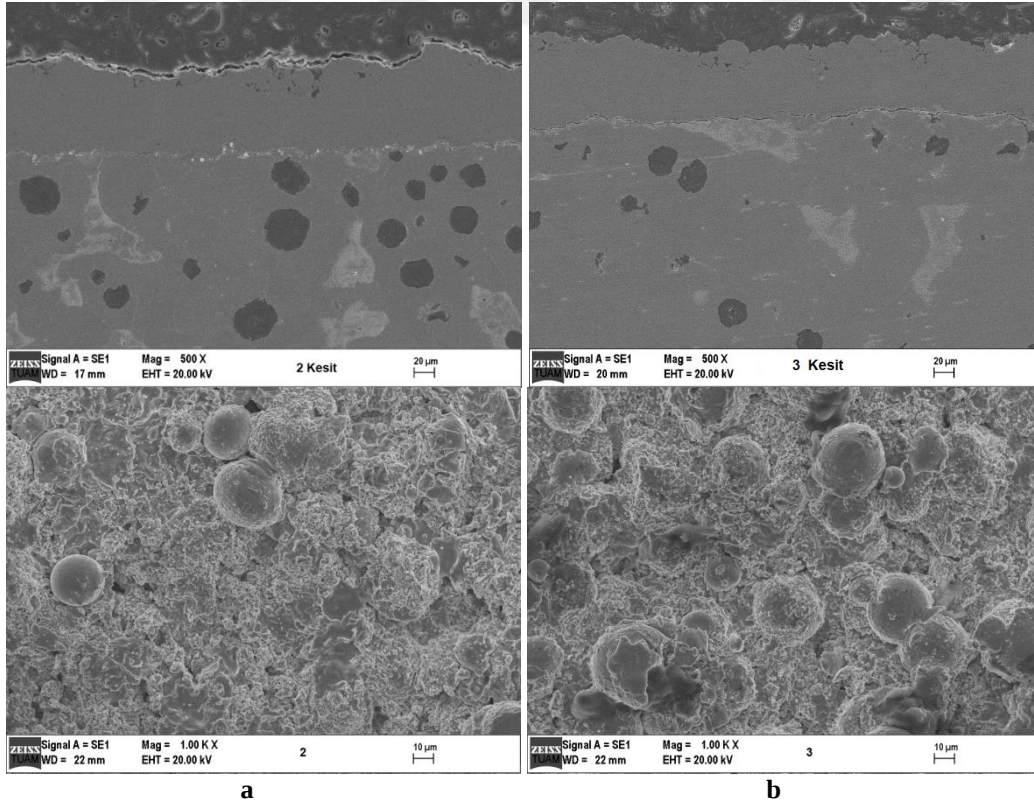
KGDD numunelerin, kaplama işleminden önceki ve iki farklı malzeme ile kaplanması sonucu yüzeyden elde edilen X Işınları Difraksiyonu (XRD) kırınım grafikleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1a kaplama öncesi dökme demirden elde edilen XRD grafiğidir ve α -Fe fazına ait XRD pikleri elde edilmiştir. Şekil 4.1b'de ise Amdry 9624 (NiCrAlY) tozu ile elde edilen kaplamaya ait XRD grafiği verilmiştir. Bu XRD grafiğine göre HVOF yöntemi ile üretilen kaplama β ve γ olmak üzere iki farklı fazdan oluşmaktadır. β fazı, Cr ve Ni elementlerinin tek başına veya birlikte Al ile yaptığı intermetalik bileşiklerdir (Al_3Ni_2 , Al_3Ni ve AlNi) (XRD referans kodları sırasıyla 00-002-1265, 00-002-0416, 03-065-0420) ve hacim merkezli kübik (HMK) kafes yapısındadır. γ fazı ise Co, Ni, Cr ve Al elementlerinin katı çözeltilisidir ve yüzey merkezli kübik (YMK) kafesi yapısındadır (Saeidi et. al. 2009, 2011)



Şekil 4.1 a) Kaplamasız GGG40 (1), b) Amdry 9624 Kodlu Kaplama (2), c) Amdry 9951 Kodlu Kaplama (3) yapılmış Küresel Grafitli Dökme Demirin X-Işınları Analizi.

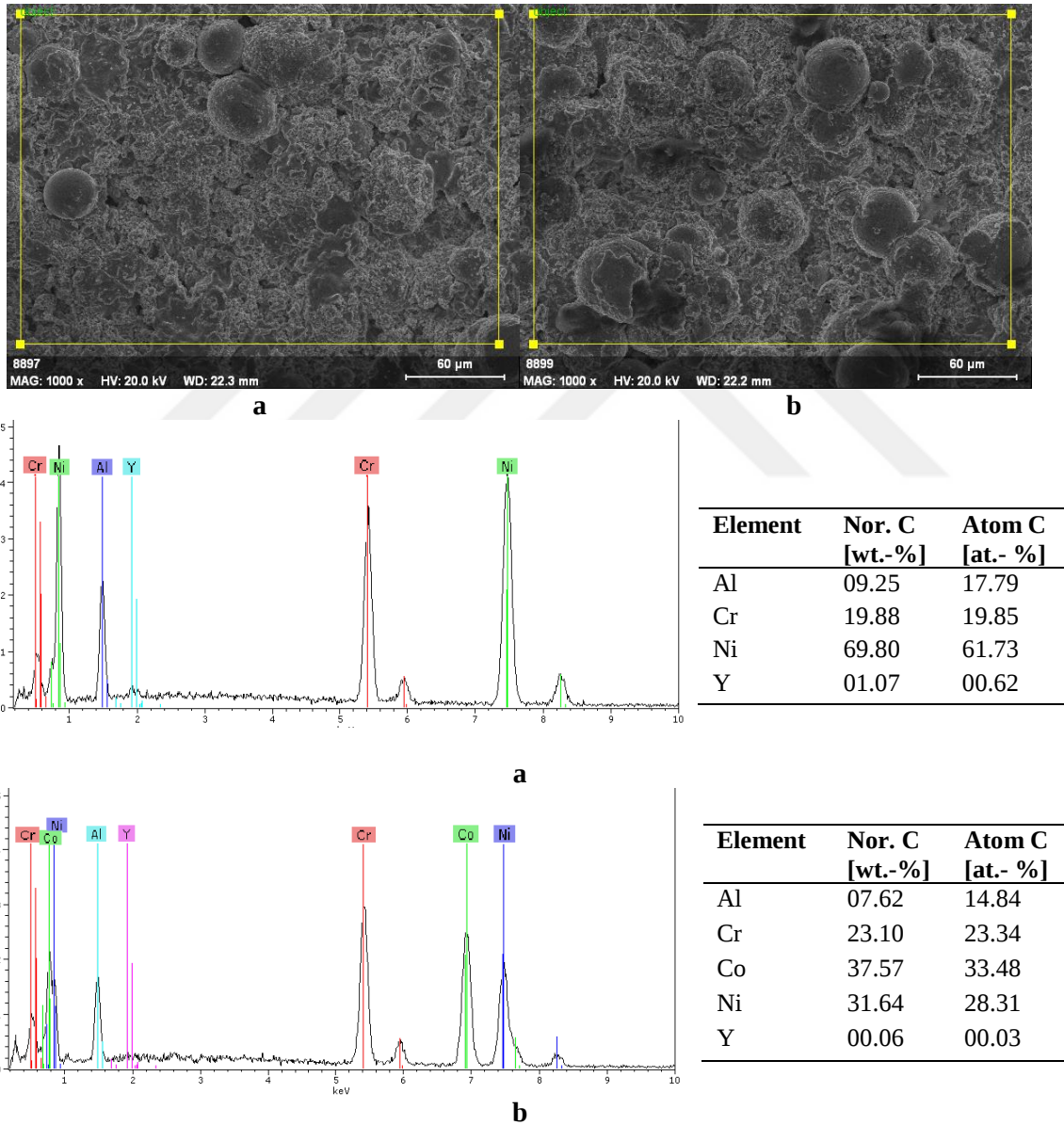
Şekil 4.1c’de ise Amdry 9951 tozu (CoNiCrAlY) ile üretilmiş kaplamaya ait XRD grafiği görülmektedir. Elde edilen kaplama γ katı çözültisi olarak ve β ((Ni,Co)₃Al₄ (XRD referans kodu: 00-044-0922) ve AlCo (XRD referans kodu: 00-029-0021)) intermetalik fazlarını ihtiva etmektedir. Ancak β fazı çok düşük seviyeli pikler halinde bulunduğu için, belirgin bir konum işaretlenemediğinden grafik üzerinde belirtilememiştir. Amdry 9624 metalik tozuna göre farklı olması, aynı HVOF parametreleri ile püskürtülen iki tozun HVOF alevi içerisinde farklı davranış sergilediğini ve altlık malzemeye ulaştıklarında farklı katılaşma rejimlerine sahip olduklarını göstermektedir (Saeidi et. al. 2009, Saeidi et. al. 2011).

Şekil 4.2’de, Amdry 9624 ve Amdry 9951 kodlu tozların GGG40 dökme demir malzeme üzerine HVOF yöntemi ile püskürtülmesi sonucu elde edilen kaplamalara ait kesit SEM görüntüleri verilmiştir. Dökme demir altlık malzemede, küresel şekilde rastgele dağılmış grafitler net şekilde görülmektedir. Her iki toz için de sürekli, yoğun ve çok az poroziteli kaplama tabakası elde edilmiştir. Kaplama, her iki toz için de yaklaşık 80 μ m olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.2 Kesit ve yüzey SEM görüntüleri a) 9624 Kodlu kaplama (2), b) 9951 Kodlu kaplama (3) ile yapılmış GGG40 Küresel Grafitli Dökme Demir.

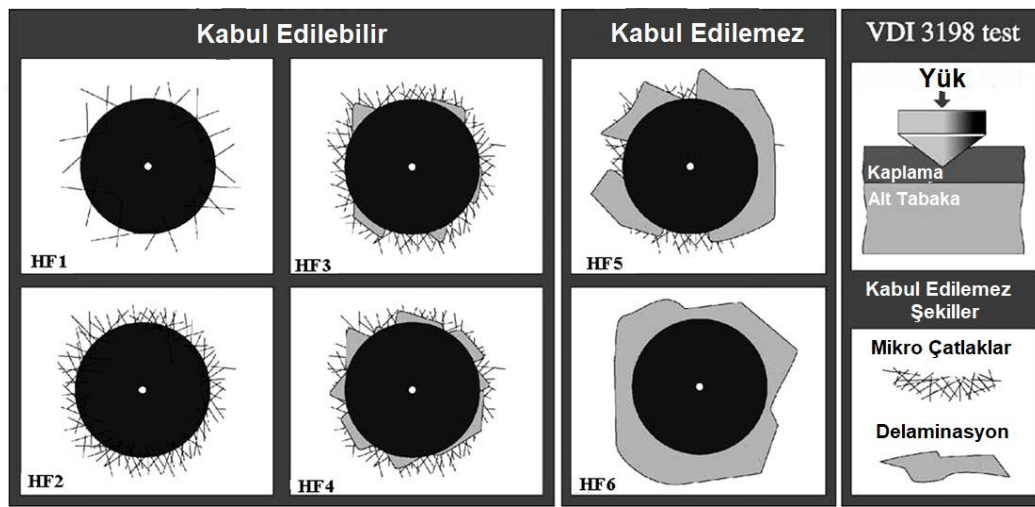
Şekil 4.3'te, GGG40 küresel grafitli dökme demir numunelere Ni esaslı Amdry 9624 ve Co-Ni esaslı Amdry 9951 tozlarından elde edilen kaplamaların SEM-EDX analiz alan görüntüsü, diyagram ve elementlerin yüzdelik dilimlerini gösteren çizelge verilmiştir. Şekil 4.3'teki EDX analizine bakılacak olursa tozların ihtiva ettiği, XRD diyagramlarında gözlemlenen bileşikleri oluşturan elementlerin, mevcut olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca HVOF yöntemiyle üretilen Co ve Ni esaslı kaplamaların SEM görüntülerinde ergimemiş partiküllerin mevcut olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3 a) 9624 Kodlu kaplama (2), b) 9951 Kodlu kaplama (3) tozlu ile kaplanmış GGG40 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin EDX yüzey alan analizi.

4.2 Rockwell-C Adhezyon Testi Bulguları

Küresel grafitli dökme demir numunelerin yüzeyine uygulanan kaplama işleminin ardından, kaplama tabakasının yapışma mukavemetini ölçmek için Rockwell-C Adhezyon testi uygulanmıştır. Kaplamaların Adhezyon testi sonucunda oluşan çatlak ve delaminasyon oluşumlarına göre kabul edilebilir ya da kabul edilemez olduğunu anlamak için Alman Mühendisler Derneğinin (VDI 3198) belirlediği Rockwell-C Adhezyon testinin prensipleri Şekil 4.4’de verilmiştir.

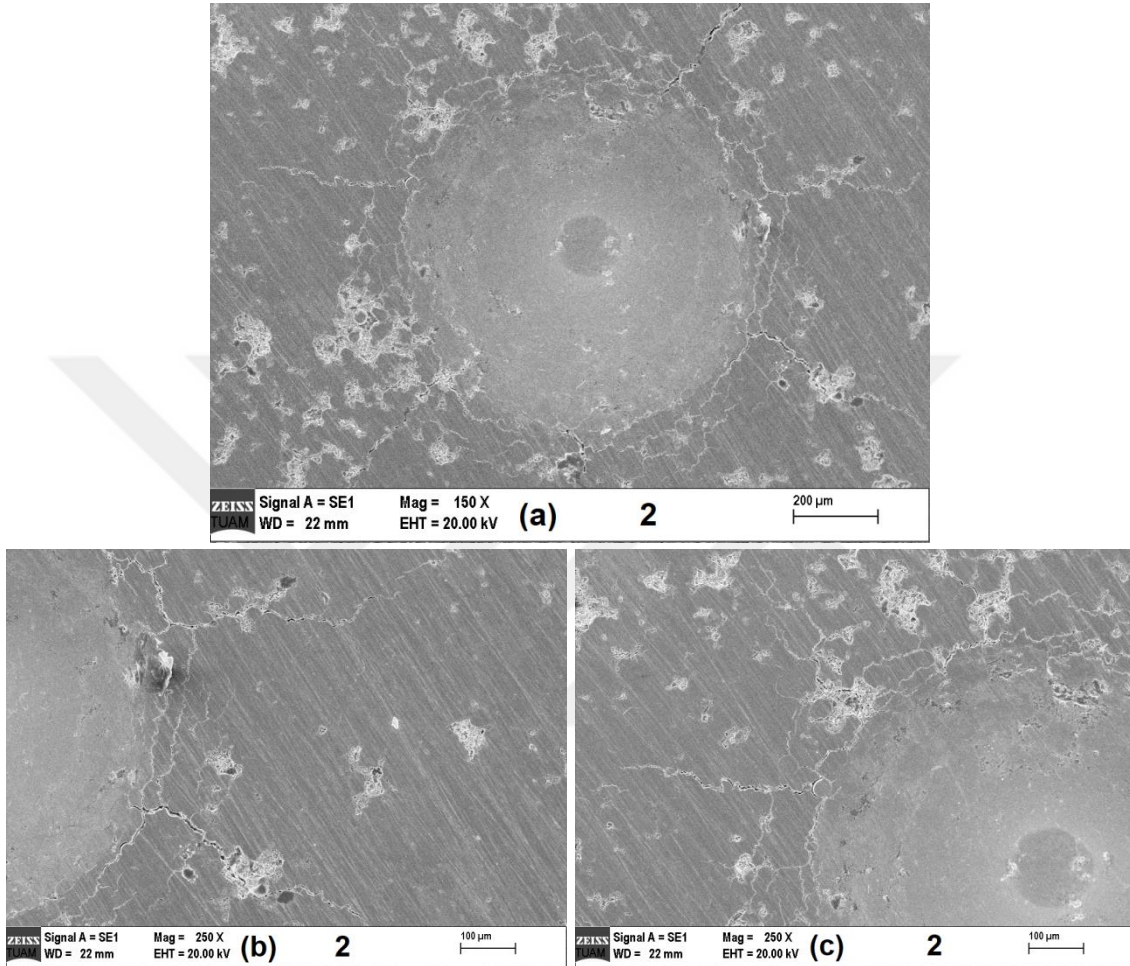


Şekil 4.4 VDI 3198 Adhezyon testi prensipleri (Kayalı *et al.* 2011).

Şekil 4.4’teki VDI 3198 prensipleri şemasında, test sonrasında kaplamada oluşan çatlak ve delaminasyon durumuna göre HF1, HF2, HF3 ve HF4 kabul edilebilir olduğunu, HF5 ve HF6 kabul edilemez olduğunu göstermektedir. Yine aynı şemada delaminasyon miktarı arttıkça kaplamanın adhezyon testi açısından kabul edilemez kısma doğru geçtiğini göstermektedir.

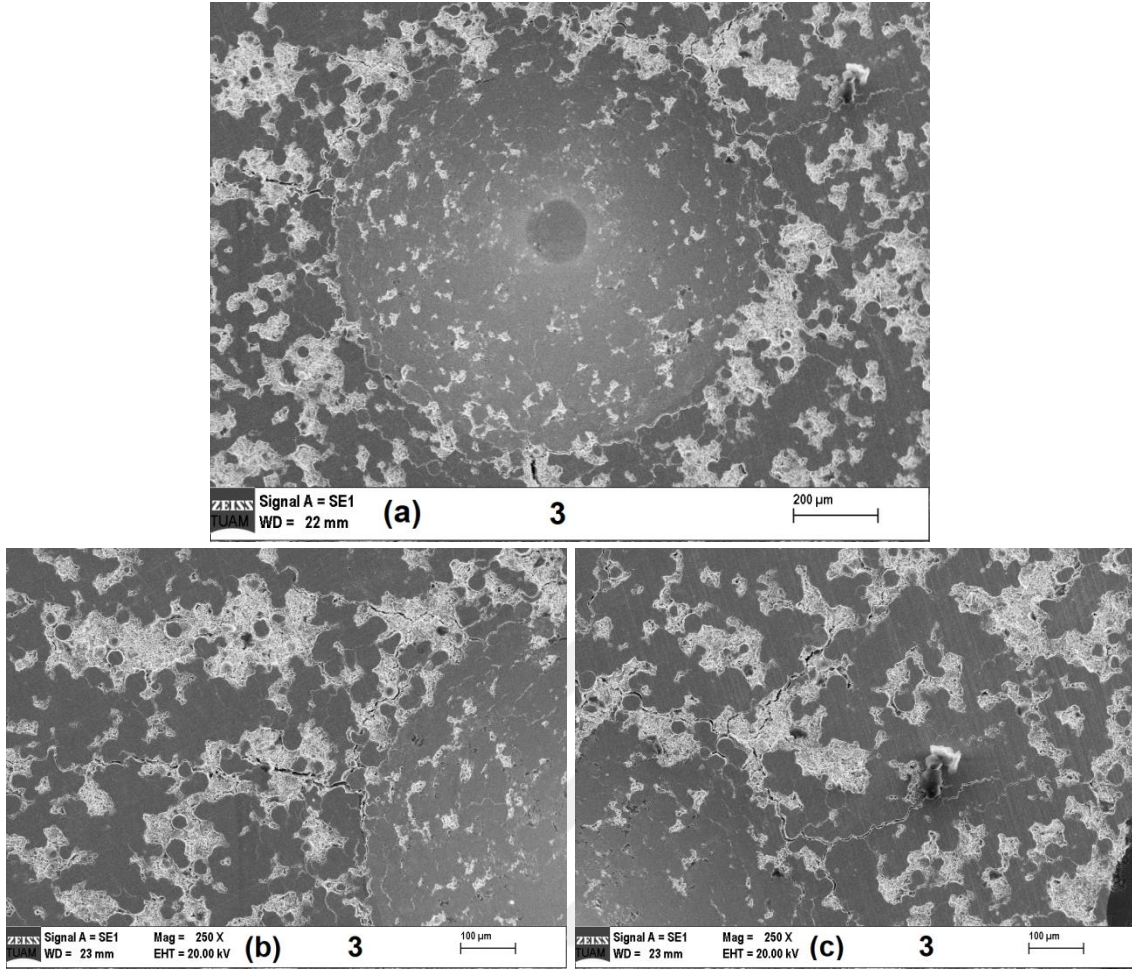
Şekil 4.5’te HVOF yöntemi ile Amdry 9624 (NiCrAlY) metalik tozu kaplanan GGG40 küresel grafitli dökme demirin (2 numaralı numune) Rockwell-C Adhezyon testi sonrası SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.5a’da test yükü uygulanan bölgenin tamamı gösterilmiştir. Şekil 4.5b ve şekil 4.5c’de çatlakların büyütülmüş görüntüleri verilmiştir. Numunede radyal çizgilere paralel şekilde ilerleyen mikro-çatlaklar ve yük uygulanan bölgeden dışa doğru uzanan mikro-çatlaklar olduğu tespit edilmiştir. Yük

uygulanan bölgenin etrafında delaminasyon oluşumu görülmemiştir. Bu kaplamanın Şekil 4.4'te verilen Daimler-Benz VDI 3198 Adhezyon testi prensiplerine göre HF1 tipine benzediği ve kabul edilebilir bir kaplama olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.5 HVOF yöntemi ile Amdry 9624 (NiCrAlY) kaplanmış GGG40 küresel grafitli dökme demirin (2) Rockwell-C Adhezyon testi sonrası SEM görüntüleri.

Şekil 4.6'da HVOF yöntemi ile Amdry 9951 (CoNiCrAlY) kaplanan GGG40 küresel grafitli dökme demirin (3 numaralı numune) Rockwell-C Adhezyon testi sonrası SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.6a'da test yükü uygulanan bölgenin tamamı gösterilmiştir. Şekil 4.6b ve Şekil 4.6c'de çatlakların büyütülmüş görüntüleri verilmiştir. Numunede radyal çizgilere paralel şekilde ilerleyen mikro-çatlaklar ve yük uygulanan bölgeden dışa doğru uzanan mikro-çatlaklar olduğu tespit edilmiştir. Yük uygulanan bölgenin etrafında delaminasyon oluşumu görülmemiştir. Bu kaplamanın Şekil 4.4'te verilen Daimler-Benz VDI 3198 Adhezyon testi prensiplerine göre HF1 tipine benzediği gözlemlenmiştir ve kabul edilebilir bir kaplama olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.6 HVOF yöntemi ile Amdry 9951 (CoNiCrAlY) kaplanmış GGG40 küresel grafitli dökme demirin (3) Rockwell-C Adhezyon testi sonrası SEM görüntüleri.

4.3 Sıcak Korozyon Deneyi Bulguları

Küresel Grafitli Dökme Demir (GGG40) numunelere Amdry 9624 (NiCrAlY) ve Amdry 9951 (CoNiCrAlY) kod numaralı metalik tozlar kaplanmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız numunelerin Kod numaraları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Numunelerin numaralandırılması.

No	Malzeme
1	Kaplamasız GGG40
2	Amdry 9624 toz kaplamalı GGG40
3	Amdry 9951 toz kaplamalı GGG40

Numunelerin kaplanmış yüzeylerine %50 V₂O₅ + %50 Na₂SO₄ tuz karışımı koyarak fırın içerisinde 500 °C, 600 °C ve 700 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta farklı numuneler 6’şar saat bekletilmiştir. Çizelge 4.1’de verilen 3 farklı numune, 3 farklı sıcaklıkta sıcak korozyon deneyine maruz kaldıktan sonra Çizelge 4.2’deki verildiği gibi 9 adet farklı numune elde edilmiştir.

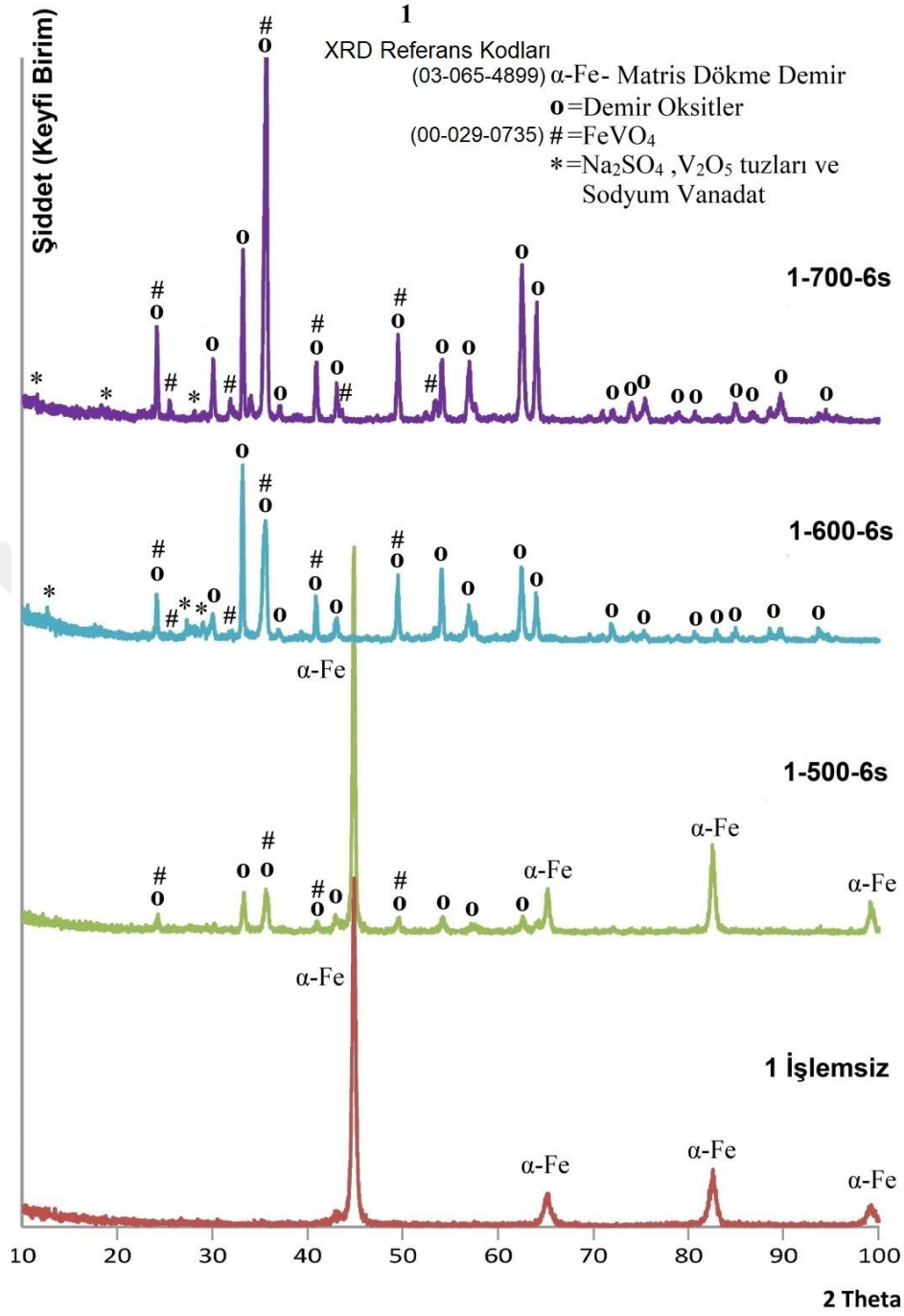
Çizelge 4.2 Numunelerin kodlanması.

İŞLEM				
(Malzeme yüzeyine %50 V ₂ O ₅ + %50 Na ₂ SO ₄ tuz serilerek)				
Malzeme	İşlem	500 °C’de 6 saat	600 °C’de 6 saat	700 °C’de 6 saat
	görmemiş	bekletilmiş	bekletilmiş	bekletilmiş
1	1-İşlemsiz	1-500-6s	1-600-6s	1-700-6s
2	2-İşlemsiz	2-500-6s	2-600-6s	2-700-6s
3	3-İşlemsiz	3-500-6s	3-600-6s	3-700-6s

Çizelge 4.2’de verilen 9 farklı sıcak korozyon numunesi ve 3 farklı sıcak korozyon deneyine tabi tutulmamış numune ile birlikte toplamda 12 farklı numune elde edilmiştir. 12 numunenin farklı büyütme oranlarında, Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) yüzey görüntüleri çekilmiştir, elementel analizi (EDX) yapılmıştır ve X-Işınları Difraksiyonu (XRD) yöntemi ile numune yüzeylerinin son hali karakterize edilmiştir. Sıcak korozyon deneyine tabi tutulmamış işlemsiz numunelerin kaplama karakterizasyonu ve kaplanmamış numuneler ile kıyaslamaları “Kaplama Karakterizasyonu” bölümünde verilmiştir.

4.3.1 1 Numaralı Numune

Şekil 4.7’de kaplamasız GGG40 dökme demir numunenin sıcak korozyon deneyine tabi tutulmamış (1-İşlemsiz) ve 500 °C, 600 °C, 700 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen Sıcak Korozyon deneyine tabi tutulmuş numunelerin karşılaştırmalı XRD diyagramları verilmiştir. Diyagramda belirtilen kısaltmalar Çizelge 4.2’de tayin edilen kodlamalar referans alınarak belirtilmiştir.

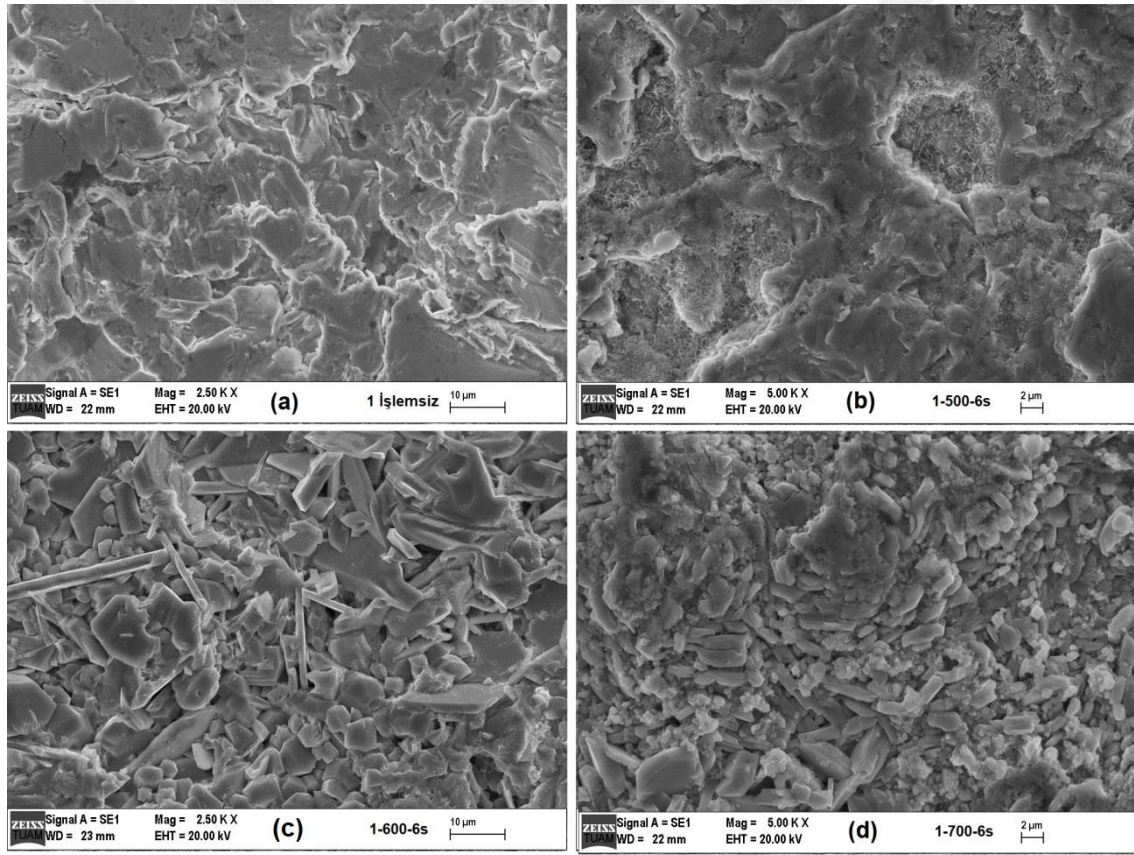


Şekil 4.7 Kaplamasız GGG40 (1) küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası XRD grafiklerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.7’de 1-işlemsiz kodlu, sıcak korozyon deneyine tabi tutulmamış numunede α -Fe fazına ait XRD pikleri görülmektedir. 1-500-6s, 1-600-6s, 1-700-6s kodlu numunelerde, içeriğindeki demirin yükseltgenmesi ile oluşan Hematit (Fe₂O₃), Magnetit (Fe₃O₄) vb. demir oksitlerine (○) ve FeVO₄ (Demir Vanadat) (#) bileşiğine ait XRD pikleri görülmektedir. 1-500-6s kodlu numunede α -Fe fazı, demir oksitler ve demir vanadat

pikleri oluşurken, 1-600-6s ve 1-700-6s kodlu numunelerde ise α -Fe fazı kaybolarak demir oksitler (o), demir vanadat (#) ve '*' (Tuz kalıntıları ve sodyum vanadatlar) bileşiklerinin XRD pikleri görülmektedir. Sıcaklık arttıkça demir oksitlerin ve demir vanadatların miktarının arttığı, yüzeyin tamamını kapladığı tespit edilmiştir. Şekil 4.7'de demir oksitler ve sodyum vanadat bileşiklerinin birden fazla varyasyonu mevcut olduğundan, XRD referans kod numaraları verilememiştir.

Şekil 4.8'de Kaplamasız GGG40 küresel grafitli dökme demir altlık malzemenin 1-işlemsiz, 1-500-6s, 1-600-6s, 1-700-6s kod numaralarına sahip numunelerinin SEM görüntüleri verilmiştir.

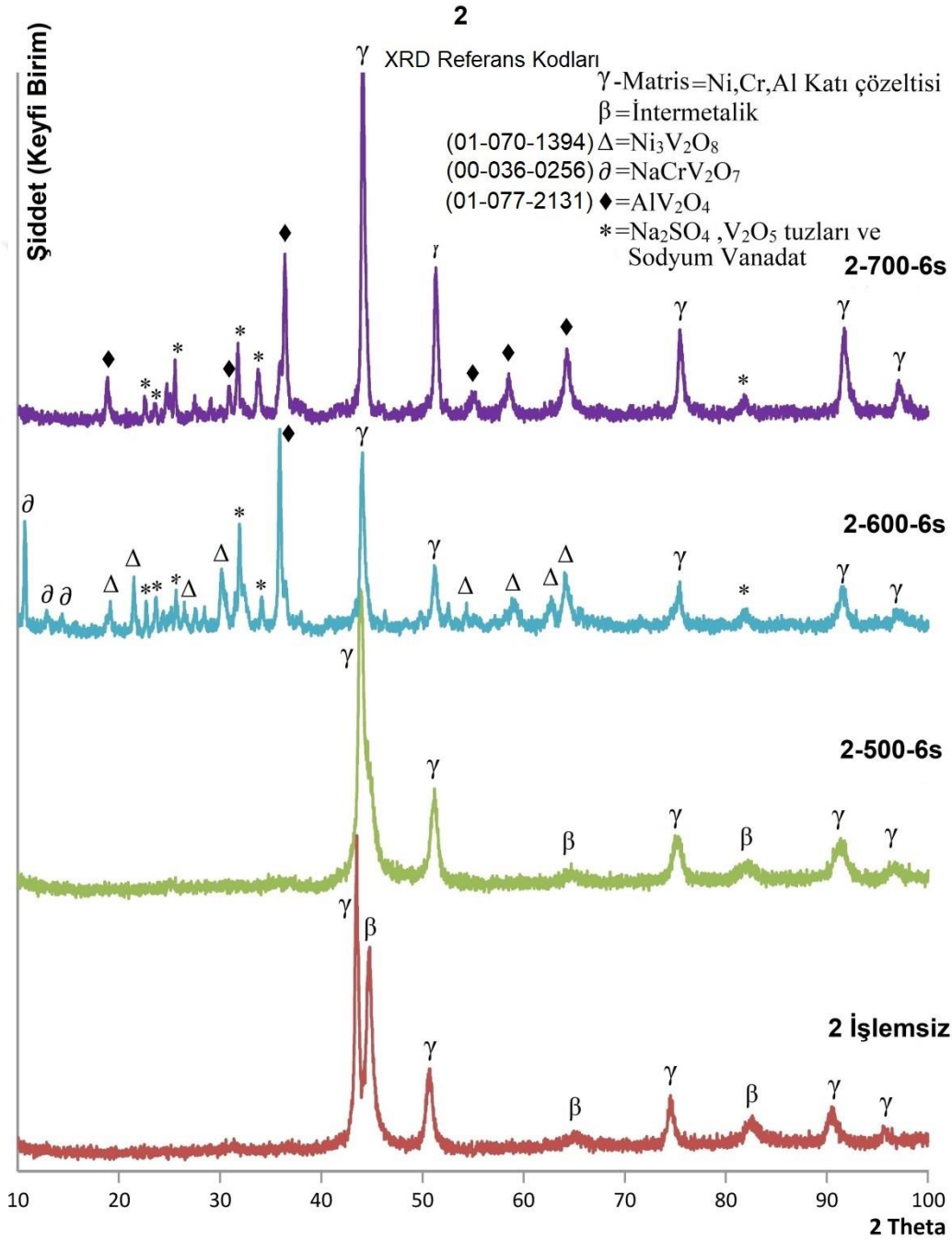


Şekil 4.8 Kaplamasız GGG40 küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası SEM görüntüleri a)1-işlemsiz, b)1-500-6s, c)1-600-6s, d)1-700-6s.

1-işlemsiz kodlu numunede sadece α -Fe fazına ait görüntüler görülmektedir. 1-500-6s kod numaralı numunede Şekil 4.7'de belirtilen yapılar gözlemlenmiştir. 1-600-6s ve 1-700-6s kod numaralı numunelerde α -Fe fazı kaybolurken, 'o' (demir oksitler), '#'

(FeVO₄) ve ‘*’ (Tuz kalıntıları ve sodyum vanadat bileşikleri) yapılarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Vanadat bileşikleri SEM görüntülerinde kolonsal yapılar halinde görülmektedir.

4.3.2 2 Numaralı Numune



Şekil 4.9 Amdry 9624 metalik toz kaplanmış GGG40 (2) küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası XRD grafiklerinin karşılaştırılması.

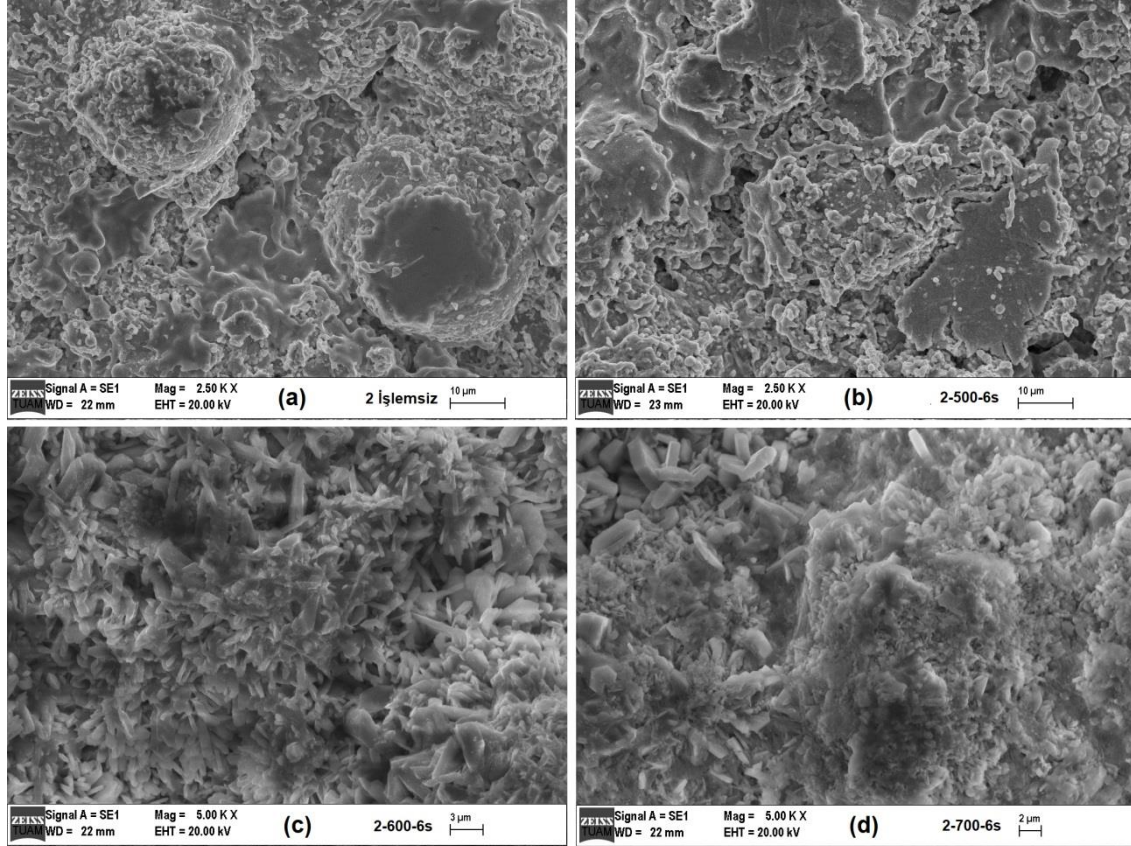
Şekil 4.9’da Amdry 9624 (NiCrAlY) metalik tozu ile kaplanmış GGG40 KGDD’in 2- işlemsiz, 2-500-6s, 2-600-6s, 2-700-6s kod numaralı, %50 V_2O_5 + %50 Na_2SO_4 tuz karışımına maruz kalarak sıcak korozyon deneyine tabi tutulmuş numunelerin XRD diyagramları karşılaştırmalı şekilde verilmiştir.

Şekil 4.9’da verilen karşılaştırmalı XRD diyagramında, 2 işlemsiz kodlu numunede “Kaplama Karakterizasyonu” bölümünde verildiği şekilde intermetalik β (Al_3Ni_2 , Al_3Ni ve $AlNi$) fazı ve Ni, Cr ve Al’un katı çözeltileri olan γ -matris fazı gözlemlenmiştir. 2-500-6s kodlu numunenin korozif tuzlardan etkilenmediği, herhangi bir bileşik oluşturmadığı ve işlemsiz numuneye benzer şekilde XRD piklerinin meydana geldiği görülmüştür. 2-600-6s kodlu numunede Ni, Cr ve Al’un oluşturduğu katı çözelti olan γ -matris fazının yanı sıra $Ni_3V_2O_8$ (Δ), $NaCrV_2O_7$ (∂) ve AlV_2O_4 ($\diamond$) Metal Vanadat bileşiklerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. 2-700-6s kodlu numunede ise γ -matris fazı ve AlV_2O_4 ($\diamond$) bileşiğinin oluştuğu tespit edilmiştir. 600 °C ve 700 °C sıcaklıkta gerçekleşen sıcak korozyon numunelerinde “*” şeklinde gösterilen kalıntı tuzlar ve iki tuzun birlikte oluşturduğu sodyum vanadat bileşikler görülmektedir. Şekil 4.9’da gösterilen intermetalik bileşiklerin XRD referans kodları Kaplamaların Karakterizasyonu bölümünde verilmiştir. Sodyum vanadat bileşiklerinin birden fazla varyasyonu mevcut olduğu için XRD referans kodları gösterilememiştir.

Genel olarak XRD karşılaştırmalı diyagramda numunelere uygulanan Amdry 9624 metalik kaplamasının 500 °C sıcaklıkta atmosferik ortamdan ve korozif tuzlardan etkilenmediği gözlemlenmiştir. Fakat 600 °C ve 700 °C sıcaklıkta ise saldırgan tuzların etkisiyle kaplama içerisindeki metallerin korozif tuzlarla etkileşime girerek korozyon ürünü olan bileşikler meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.10’da 2-işlemsiz (a), 2-500-6s (b), 2-600-6s (c) ve 2-700-6s kod numaralı numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülere bakıldığında 2-İşlemsiz (a) kodlu numunede “Kaplama Karakterizasyonu” bölümünde verildiği gibi HVOF yöntemiyle elde edilen Amdry 9624 kaplama tabakası görülmektedir. 1-500-6s kod numaralı numunede de XRD analizinde verildiği gibi korozif tuzlarla herhangi bir etkileşim sonucu bileşikler meydana gelmediği ve SEM görüntülerinin, deneye tabi

tutulmamış kaplama tabakasınıninkine benzer durumda olduğu tespit edilmiştir. 2-600-6s ve 2-700-6s kod numaralarına sahip sırasıyla 600 °C ve 700 °C sıcaklıkta sıcak korozyon deneyine tabi tutulmuş numunelerin SEM görüntülerinde Sodyum Vanadat, $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$, NaCrV_2O_7 ve AlV_2O_4 bileşiklerinin varlığı gözlemlenmiştir. Vanadat bileşiklerinin sivri, ince ve uzun kolonsal şekilde yapılar oluşturduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.10 Amdry 9624 metalik toz kaplamalı GGG40 küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası SEM görüntüleri a) 2-işlemsiz, b) 2-500-6s, c) 2-600-6s, d) 2-700-6s.

SEM görüntülerinde gözlemlenen, (Şekil 4.10) yüzeyde gerçekleşen değişimler ve meydana gelen yapıların Şekil 4.9’da verilen XRD karşılaştırmalı diyagramda gözlem ve tespitlerle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Amdry 9624 metalik tozdan elde edilen kaplama, dökme demirleri oksit oluşumundan korumuştur ve 500 °C gibi bir çalışma ortamında atmosferik şartlardan ve korozyif tuzlardan etkilenmemiştir. 600 °C ve 700 °C sıcaklıklardaki çalışma ortamlarında da küresel grafitli dökme demiri korozyif ortamdan korudukları, ancak korozyon ürünü olarak vanadat bileşikleri oluşturdukları tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3'te 2 numaralı numunenin, farklı sıcaklıklardaki sıcak korozyon deneyi numunelerinin yüzey SEM-EDX analizlerinin tablosu verilmiştir. Tabloya göre XRD ve SEM görüntü analizlerinde gerçekleştiği gözlemlenen bileşiklerin ağırlık ve atomik yüzdelikleri birbiriyle tutarlı ve uyumlu oldukları tespit edilmiştir. Örneğin deney sıcaklığı arttıkça yüzeyde oluşan korozyon ürünleri olarak vanadatlar gözlemlenmişti ve SEM-EDX analizlerinde de sıcaklık arttıkça oksijen ve vanadyum oranlarının da doğru orantılı şekilde arttığı görülmektedir.

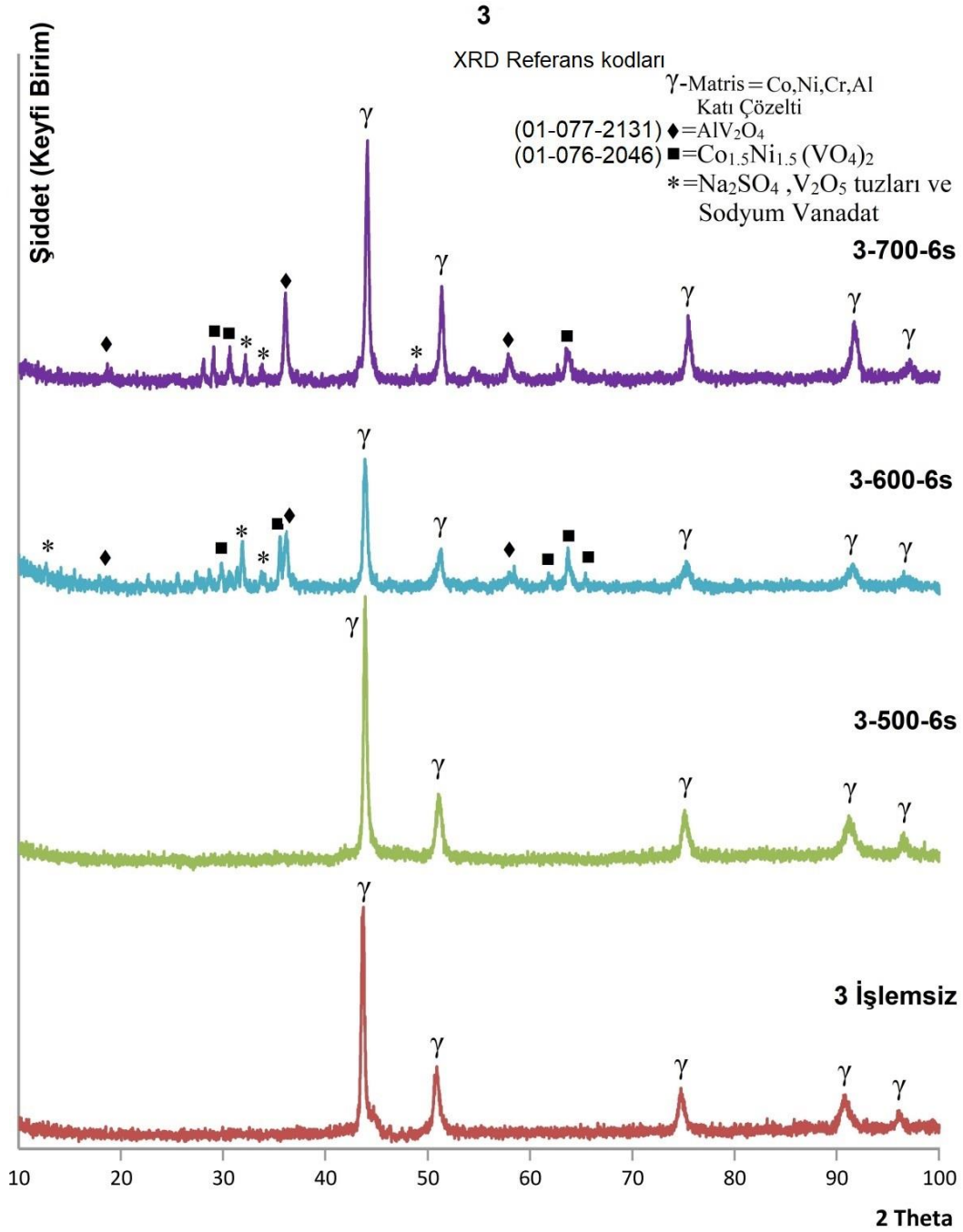
Çizelge 4.3 SEM-EDX analizleri, 2-işlemsiz, 2-500-6s, 2-700-6s.

Element	2 - İşlemsiz		2 – 500 - 6s		2 – 700 - 6s	
	[wt.-%]	[at.-%]	[wt.-%]	[at.-%]	[wt.-%]	[at.-%]
Alüminyum	09.25	17.79	8.89	15.40	05.21	06.45
Krom	19.88	19.85	17.80	15.99	19.93	12.82
Nikel	69.80	61.73	64.42	51.27	34.58	19.70
İtiryum	01.07	00.62	01.18	00.62	00.94	00.35
Oksijen	-	-	04.46	13.03	21.31	44.54
Sodyum	-	-	00.63	01.29	05.06	07.35
Sülfür	-	-	00.01	00.01	00.72	00.75
Vanadyum	-	-	02.61	02.39	12.25	08.04

Sıcak korozyon deneyinde numunelerin yüzeylerini korozyon ürünü olan bileşiklerin kapladığı ve EDX analiz sonuçları (Çizelge 4.3) yüzeyden alındığı için Ni ve Al gibi elementlerin yüzde ağırlık oranlarında azalma gözlemlenmiştir. Meydana gelen vanadat bileşiklerinin miktarı arttıkça doğru orantılı olarak içeriğindeki oksijen oranının da artmasıyla, diğer elementlerin yüzde ağırlık oranlarının azaldığı tespit edilmiştir. Sodyum sülfat (Na_2SO_4) tuzu korozif bileşen olarak kullanılmasına rağmen, sıcak korozyon deneyi sonrasında yok denecek kadar az miktarda sülfür bulunduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi de sodyum sülfat bileşiğinin kaplama tabakasıyla ve vanadyum pentaoksit (V_2O_5) ile reaksiyon gerçekleştirmiş olması ve sülfür'ün herhangi bir etkileşimde bulunmaması olarak söylenebilir. Artakalan sülfür ve kalan sodyum sülfat tuzunun bir kısmı, deney sonrası mekanik ve ultrasonik temizlik işlemiyle yüzeyden uzaklaştırılmıştır.

4.3.3 3 Numaralı Numune

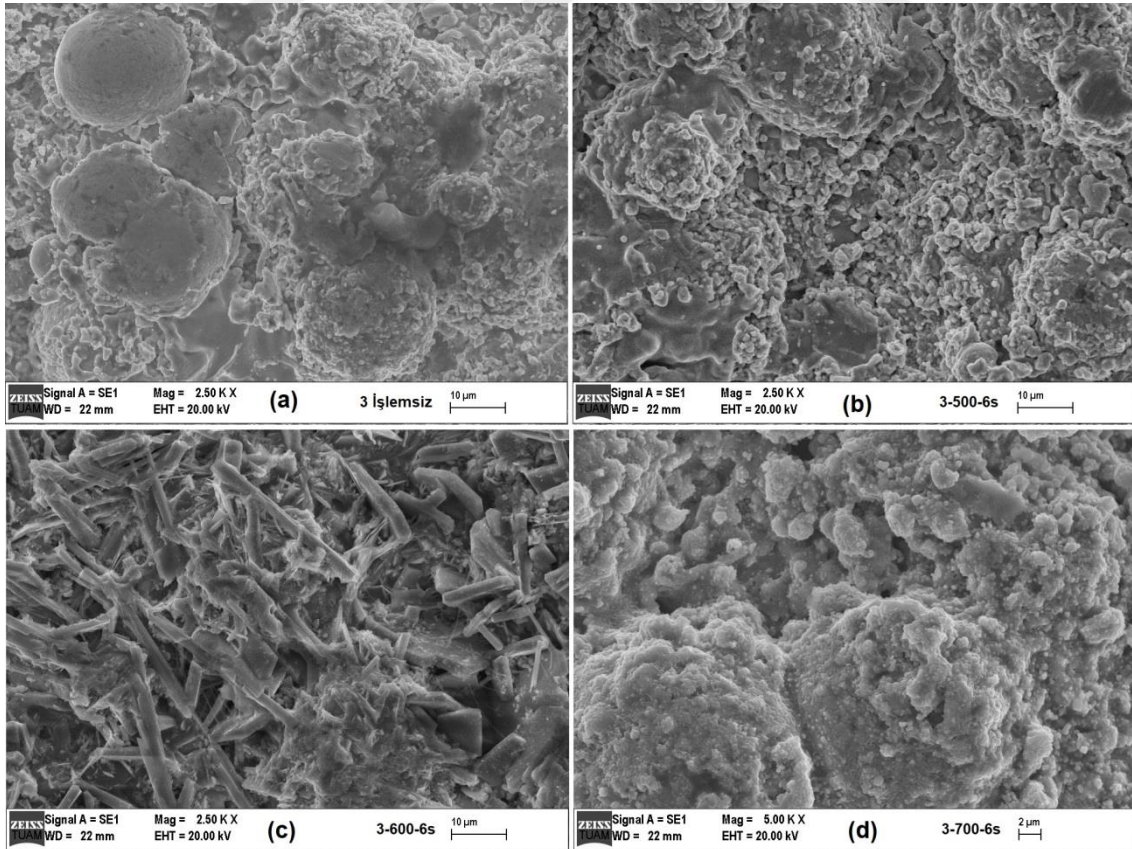
Şekil 4.11’de Amdry 9951 (CoNiCrAlY) metalik tozu ile kaplanmış GGG40 KGDD’in 3-işlemsiz, 3-500-6s, 3-600-6s ve 3-700-6s kod numaralı, %50 V₂O₅ + %50 Na₂SO₄ tuz karışımına maruz kalarak sıcak korozyon deneyine tabi tutulmuş numunelerin XRD diyagramları karşılaştırmalı şekilde verilmiştir.



Şekil 4.11 Amdry 9951 metalik toz kaplanmış GGG40 (3) küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası XRD grafikleri karşılaştırılması.

Şekil 4.11’de verilen karşılaştırmalı XRD diyagramında ‘3 işlemsiz’ kodlu numunede “Kaplamaların Karakterizasyonu” bölümünde verildiği şekilde Co, Ni, Cr ve Al’un katı çözeltileri olan γ -matris fazı gözlemlenmiştir. 3-500-6s kodlu numunenin korozyif tuzlardan etkilenmediği, herhangi bir bileşik oluşturmadığı ve işlemsiz numuneye benzer şekilde XRD piklerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. 2-600-6s ve 2-700-6s kodlu numunelerde, Co, Ni, Cr ve Al’un oluşturduğu katı çözeltiler olan γ -matris fazının yanında $\text{CO}_{1.5}\text{Ni}_{1.5}(\text{VO}_4)_2$ (■) ve AlV_2O_4 (◆) Vanadat bileşiklerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. 600 °C ve 700 °C sıcaklıkta gerçekleşen sıcak korozyon numunelerinde ‘*’ şeklinde gösterilen kalıntı tuzlar ve iki tuzun birlikte oluşturduğu Sodyum Vanadat bileşikler görülmektedir. Şekil 4.11’de sodyum vanadat bileşiklerinin birden fazla varyasyonu olması sebebiyle XRD referans kodları verilememiştir.

Şekil 4.12’de 3-işlemsiz (a), 3-500-6s (b), 3-600-6s (c) ve 3-700-6s kod numaralı, numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.12 Amdry 9951 metalik toz kaplamalı GGG40 küresel grafitli dökme demirin sıcak korozyon deneyi sonrası SEM görüntüleri a) 3-işlemsiz, b) 3-500-6s, c) 3-600-6s, d) 3-700-6s.

Görüntülere (Şekil 4.12) bakıldığında 3-İşlemsiz (a) kodlu numunede “Kaplama tabakası” bölümünde verildiği gibi HVOF yöntemiyle elde edilen Amdry 9951 kaplama tabakası görülmektedir. 3-500-6s kod numaralı numune XRD analizinde (Şekil 4.11) verildiği gibi korozif tuzlarla herhangi bir etkileşime girmemiştir ve SEM görüntülerinin, deneye tabi tutulmamış kaplama tabakasınıninkine benzer durumda olduğu tespit edilmiştir. 3-600-6s kod numaralı 600 °C sıcaklıkta sıcak korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntülerinde Sodyum Vanadat, $\text{CO}_{1.5}\text{Ni}_{1.5}(\text{VO}_4)_2$ ve AlV_2O_4 bileşiklerinin kolonsal ve sivri şeklindeki yapıları tespit edilmiştir. 3-700-6s numaralı numunede ise kolonsal olmayan korozyon ürünleri gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.4’te 3-İşlemsiz, 3-500-6s ve 3-700-6s kod numaralı numunelerin SEM-EDX analizleri verilmiştir. Elde edilen XRD ve SEM görüntü analizleri ile uyumlu ve tutarlı sonuçlar ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

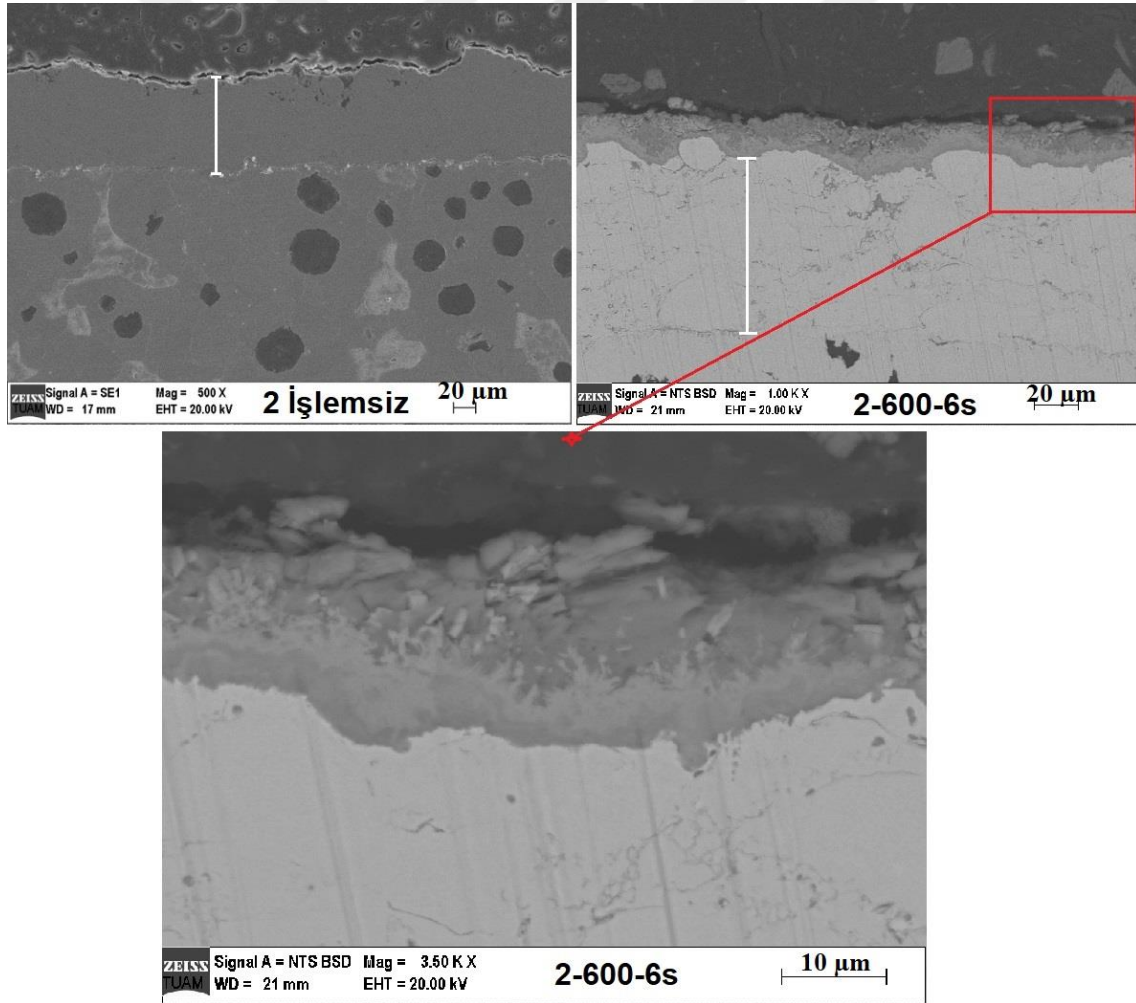
Çizelge 4.4 SEM-EDX analizleri, 3-işlemsiz, 3-500-6s, 3-700-6s.

Element	3 - İşlemsiz		3 – 500 - 6s		3 – 700 - 6s	
	[wt.-%]	[at.-%]	[wt.-%]	[at.-%]	[wt.-%]	[at.-%]
Alüminyum	07.62	14.84	06.79	12.09	05.40	06.59
Krom	23.10	23.34	20.79	19.20	29.96	18.98
Nikel	31.64	28.31	30.58	25.02	14.58	08.18
Kobalt	37.57	33.48	35.57	28.82	20.21	11.30
İtiryum	00.06	00.03	00.00	00.00	00.00	00.00
Oksijen	-	-	04.09	12.28	23.66	48.72
Sodyum	-	-	00.31	00.65	02.73	03.91
Sülfür	-	-	00.00	00.00	00.20	00.21
Vanadyum	-	-	02.07	01.95	03.26	2.11

Sıcak korozyon deneyinde numunelerin üzerini korozyon ürünü olan bileşikler kaplamıştır, EDX analiz sonuçları yüzeyden alındığı için Ni ve Co gibi elementlerin yüzde ağırlık oranlarında azalma gözlemlenmiştir. Meydana gelen vanadat bileşiklerinin miktarı arttıkça, doğru orantılı olarak içeriğindeki oksijen oranının da artmasıyla, diğer elementlerin yüzde ağırlık oranlarının azaldığı tespit edilmiştir. Sodyum sülfat tuzu

korozif bileşen olarak kullanılmasına rağmen sıcak korozyon deneyi sonrasında numunede yok denecek kadar az miktarda sülfür miktarı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, Sodyum Sülfat bileşiğinin Vanadyum Pentaoksit bileşiği ile reaksiyonundan Sodyum Vanadat bileşiklerinin oluşması ve artakalan sülfür ve kalan sodyum sülfat tuzunun bir kısmının deney sonrası mekanik ve ultrasonik temizlik işlemiyle yüzeyden uzaklaştırılmış olması olarak söylenebilir.

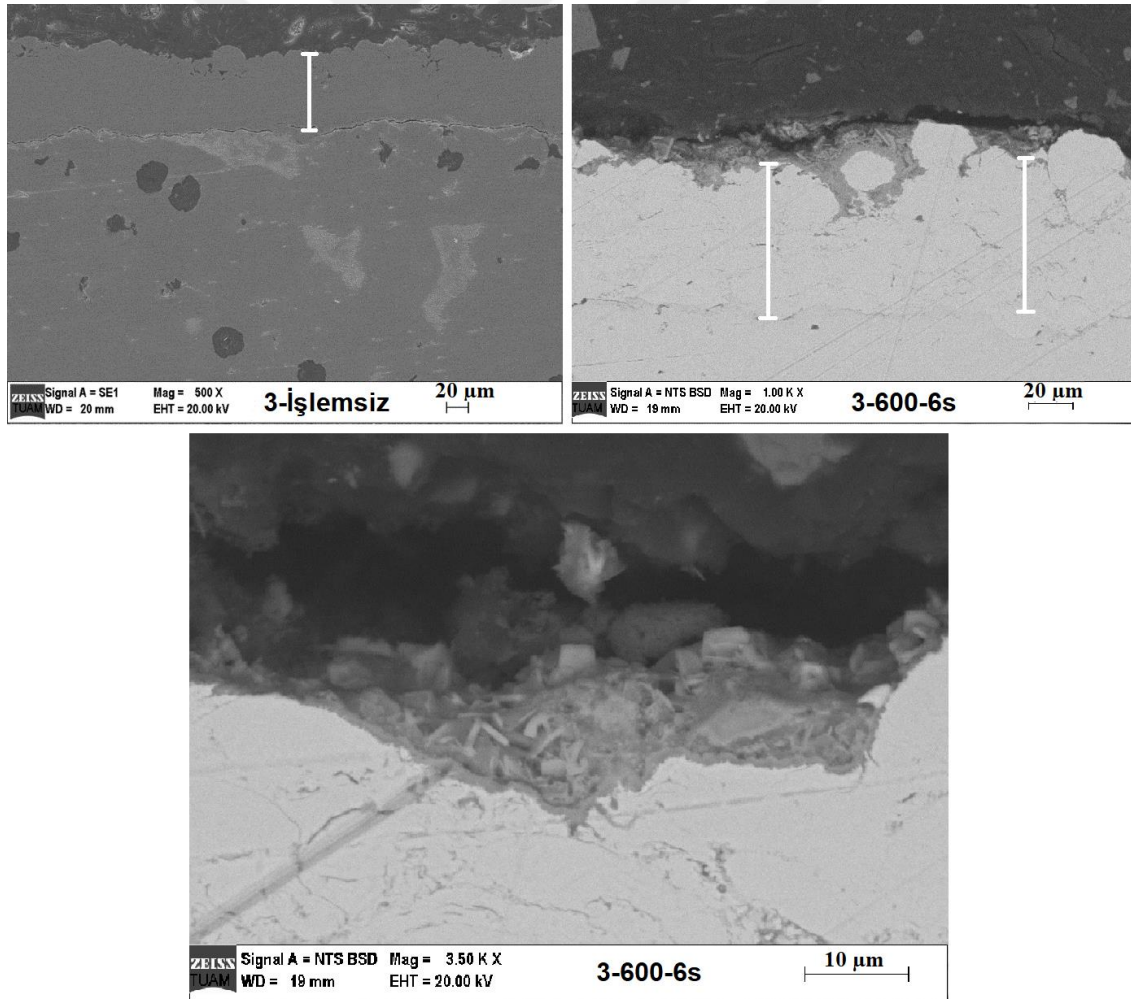
Şekil 4.13'te kesit SEM görüntüleri verilen 2-İşlemsiz ve 2-600-6s kodlu numunelerin kaplama tabakalarında bariz bir kalınlık farkı tespit edilmemiştir. Sıcak korozyon deneyi sonrasında kaplama yüzeyinde XRD grafiklerinde ve SEM görüntülerinde tespit edilen oluşumların ince bir tabaka halinde mevcut olduğu Şekil 4.13'te görülmektedir.



Şekil 4.13 2-İşlemsiz ve 2-600-6s Kesit SEM görüntüleri.

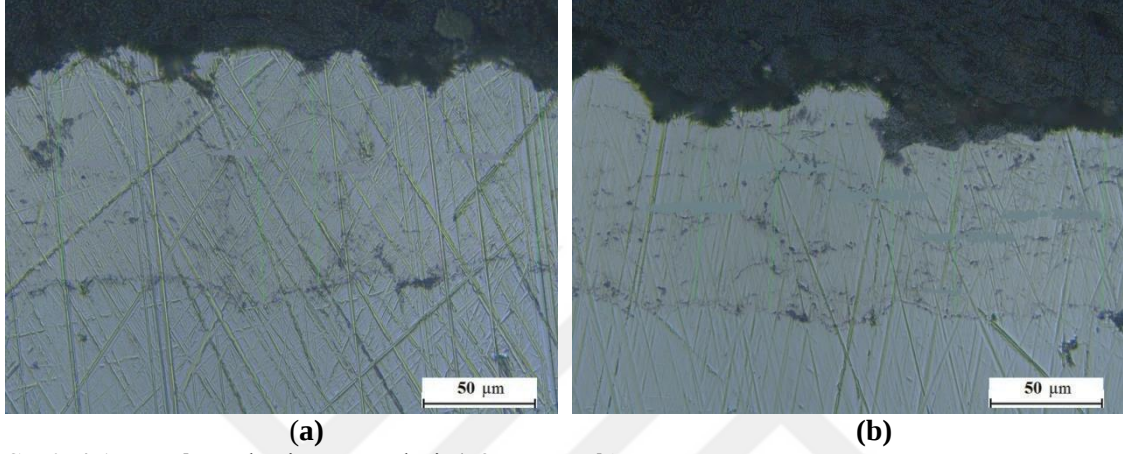
2-600-6s kodlu numunenin SEM görüntülerinde kaplama tabakasında difüzyon mekanizması görülmemiştir. Sıcak korozyon deneyi numunelerinde korozyon hızını kütle kaybı ve diğer yöntemlerle ölçmek mümkün olmamıştır. Kütle kaybının aksine sıcak korozyon deneyinde kaplama olmayan dökme demir yüzeylerinin oksitlenmesi sebebiyle yapılan ölçümlerde ağırlık artması tespit edilmiştir.

Şekil 4.14'te 3-İşlemsiz ve 3-600-6s kodlu numunelerin kesit SEM görüntüleri verilmiştir. 3-işlemsiz ve 3-600-6s numunelerinin kaplama kalınlıkları arasında bariz bir fark görülmemiştir. Bu durum sıcak korozyon deneyi sonrasında kaplama kalınlığının belirgin şekilde azalmadığı anlamına gelmektedir. 3-600-6s kod numaralı numunenin yüzeyinde, ince bir tabaka halinde korozyon ürünü oluşumlar meydana gelmiş fakat difüzyon mekanizmasına rastlanmamıştır.



Şekil 4.14 3-İşlemsiz ve 3-600-6s SEM Kesit görüntüleri.

Şekil 4.15'te kesit görüntüleri verilen 2-700-6s ve 3-700-6s kodlu numunelerdeki bulguların, 2-600-6s ve 3-600-6s kodlu numunelerdeki bulgular ile aynı olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama kalınlığında bariz bir azalmanın olmadığı ve altlık malzemeye doğru difüzyon mekanizmasının gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Her iki kaplama türünün de, altlık malzemeyi korozif ortamdan koruduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.15 Kaplama kesit görüntüleri a) 3-700-6s, b) 2-700-6s.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Genel Sonuçlar

Küresel grafitli dökme demir çeşitlerinden, Alman standardına göre GGG40 olarak adlandırılan altlık malzemeye, yüksek hızlı oksı-yakıt yöntemi (HVOF) ile Amdry 9624 (NiCrAlY) ve Amdry 9951 (CoNiCrAlY) kaplama tozlarıyla kaplanan altlık numuneye uygulanan Rockwell-C Adhezyon testi ve %50 V₂O₅ + %50 Na₂SO₄ tuz karışımına maruz bırakılarak 500 °C, 600 °C, 700 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen Sıcak Korozyon deneyinin sonuçları şu şekilde sıralanabilir;

- ✓ GGG40 küresel grafitli dökme demirin HVOF yöntemi ile kaplanabilir olduğu gözlemlenmiştir.
- ✓ HVOF yöntemi ile Amdry 9624 ve Amdry 9951 metalik tozların, altlık malzemeye kaplanması sonucunda sürekli, yoğun ve çok az poroziteli kaplama tabakası elde edilmiştir.
- ✓ Amdry 9624 tozunun HVOF yöntemi ile kaplanmasıyla, Al₃Ni₂, Al₃Ni ve AlNi intermetalik bileşiklerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- ✓ Amdry 9951 tozunun HVOF yöntemi ile kaplanması sonucunda, ((Ni,Co)₃Al₄ ve AlCo intermetalik bileşiklerinin oluştuğu tespit edilmiştir.
- ✓ Uygulanan Rockwell-C Adhezyon testi sonrası, Amdry 9624 ve Amdry 9951 kodlu metalik kaplamaların her ikisinin de yüzeyinde delaminasyon meydana gelmediği ve kaplamaların iyi düzeyde yapışma mukavemetine sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- ✓ Sıcak korozyon deneyinde uygulanan Amdry 9624 ve Amdry 9951 kodlu kaplama tabakalarının altlık malzemeyi korozif etkilere koruduğu, altlık malzeme ile korozif ortam arasında etkileşim olmadığı gözlemlenmiştir.
- ✓ 500 °C sıcaklıkta gerçekleşen Sıcak Korozyon deneyinde, iki kaplama türünün de korozif ortamdan etkilenmeyerek kimyasal ve fiziksel yapılarını koruduğu tespit edilmiştir.
- ✓ 600 °C ve 700 °C sıcaklıklarda uygulanan sıcak korozyon deneyinde, Amdry 9624 kaplama tabakası ile korozif tuzlar ve atmosferin etkileşimi sonucunda

Sodyum vanadatlar, $\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$, NaCrV_2O_7 ve AlV_2O_4 bileşiklerinin ve Amdry 9951 kaplama tabakası ile atmosfer ve korozyon tuzların etkileşimiyle Sodyum vanadatlar, $\text{CO}_{1.5}\text{Ni}_{1.5}(\text{VO}_4)_2$ ve AlV_2O_4 bileşiklerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir.

- ✓ Sıcak korozyon deneyinde oluşan korozyon ürünlerinin, XRD grafiklerindeki pik şiddetlerinin Amdry 9624 kodlu kaplamada, Amdry 9951 kodlu kaplamaya göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu kıyaslamaya göre Amdry 9951 kodlu kaplamanın daha yüksek korozyon direncine sahip olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Her iki kaplamada da sıcak korozyon deneyinde altlık malzemede difüzyon yolu ile korozyon aşınma meydana gelmediği ve kaplama kalınlığında bariz bir azalma olmadığı gözlemlenmiştir.

5.2 Öneriler

- ✓ Bu çalışmada aynı kaplama malzemesi ve aynı tuzların kullanılmasıyla uygulanan sıcak korozyon deneyi daha yüksek sıcaklıklarda ve daha uzun sürelerde gerçekleştirilebilir.
- ✓ Altlık malzemeye Amdry 9624 ve Amdry 9951 metalik tozların HVOF yöntemi ile kaplanmasıyla kaplama tabakasına çeşitli mekanik ve kimyasal testler uygulanabilir.
- ✓ Sıcak korozyon deneyinde kullanılan korozyon ortam için V_2O_5 ve Na_2SO_4 tuzları değiştirilerek KCl ve NaCl tuzları ile testler gerçekleştirilebilir.
- ✓ HVOF kaplama yönteminin parametreleri değiştirilip aynı metalik tozlarla farklı karakterlerde kaplamalar üretilerek korozyon direnci araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akman, C. (2006). GG 22 Lamel Grafitli Dökme Demirden Üretilen Motor Silindir Gömleklerinin CNC Torna Tezgahında İşlenebilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Altun, H. (2004). Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu ve FBB Kaplamaların Korozyon Davranışlarına Etkisi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Anonim, 2007. MEB, Yüksek Sıcaklık ve Erozyon Korozyonu, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi (MEGEP), Ankara.
- Arı, N. (2008). Elektrokimyasal Polarizasyon Yoluyla Yumuşak Çelik Yüzeyinde Biriktirilen Polianilin Korozyon Özelliklerinin Farklı Kaplama Parametrelerine Göre İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aslan, O. (2015). Plazma Sprey Kaplama Yöntemiyle Tek ve Çift Katmanlı Kaplanan AISI 316 L Paslanmaz Çeliğinin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Avcı, A. (2015). Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon ve Sıcaklık Korozyonu Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ayday, A. (2013). Elektrolitik Plazma Teknolojisi İle Küresel Grafitli Dökme Demir Malzemesinin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Aytaç, İ. (2014). Termal Püskürtme Yöntemi İle Üretilmiş Kompozit Esaslı Kaplamalar ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Azazi, S. (2007). Yumuşak ve Paslanmaz Çelik Elektrot Yüzeylerinin Elektrokimyasal Olarak O-Toluidin Polimeri İle Kaplanması ve Korozyon Performanslarının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya.
- Çağlaroğlu, İ. (2006). AISI 1045 Çeliğin Fretting Yorulmasına ve Korozyon Davranışına Fosfat Kaplamanın Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Çelik, O. N. (1996). Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Cu, Ni ve Mo Alaşım Elementlerinin Östempereleme Sonucu Beynit Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi ve Sinirsel Ağ Modeli İle Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Çelikkilek, M. (2015). EN-JS1020 Küresel Grafitli Dökme Demirin Delme İşleminde Yüzey Pürüzlülüğünün İstatistiksel Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Daroonparvar, M., Yajid, M. A. Z., Noordin, M. Y., and Hussain, M. S., (2013). The Role of Nanostructured Al₂O₃ Layer in Reduction of Hot Corrosion Products in Normal YSZ Layer. *Journal of Nanomaterials*, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/251921>.
- Davis, J.R., Classification and Basic Metallurgy of Cast Irons, Cast Irons-ASM Speciality Handbook,. ASM International, Materials Park, OH., 1996: p. 12.
- Değer, M. (1995). Perlitik-Ferritik Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı Üzerine Mikro Yapı ve Yüzey İşlemlerinin Etkisi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Demirel, Ç. (2013). AISI 8640 ve GS 60 Çelik Malzemelerin Abrasif Aşınma ve Korozyon Davranışına Borlama İşleminin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Demirlek, M. (2013). Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yüksek Çevrimli Yorulma Davranışına Silisyum Oranının Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Diaz, E. F., Cuevas-Arteaga, C., Flores-García, N., Mejía Sintillo, S., and Sotelo-Mazón, O., (2015). Corrosion Performance of AISI-309 Exposed to Molten Salts V2O5-Na2SO4 at 700 °C Applying EIS and R_p Electrochemical Techniques. *Journal of Spectroscopy*, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/826759>.
- Diltemiz, S. F. (2010). Plazma Sprey Termal Bariyer Kaplamaların Isıl ve Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Doğan, H. (2014). Farklı Kalitelerdeki Düşük C'lu Cr-Mo Çeliklerinin Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Dokur, M. M. (2014). Çok Katmanlı CYSZ / Al2O3 ve CYSZ / Al2O3+YSZ Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Isıl-Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Döngel, A. (2008). Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Dudziak, T. (2009). High Temperature Corrosion Studies and Interdiffusion Modelling in TiAl Based Alloys Coated with High Performance Surface Layers. Doctoral Thesis, Northumbria University , Newcastle.
- Easter, G. (2008). Thermal Spraying: Plasma, Arc and Flame Spray Technology. Wexford College Press, p. 216.
- Elliott, R. (1988). Cast Iron Technology. Butterworth-Heinemann. 1. Edition.
- Elyiğit, A. (2011). Bor Kaplamalı Betonarme Çeliğinin Korozyona Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Erek, H. B. (2016). Toz Metalürjisi Yöntemi İle Üretilen AA7075 Alüminyum Alaşımına Ti ve B4C İlavesinin Korozyon ve Elektrik İletkenliğine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

- Fredriksson, H.A.U.Å. (2006). *Materials Processing During Casting*. John Wiley & Sons Inc.
- Gençer, M. (2012). Farklı Bileşimlerdeki Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikroyapı ve İşlenmiş Yüzey Kalitelerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Gerengi, H. (2008). Tafel Polarizasyon (TP), Lineer Polarizasyon (LP), Harmonik Analiz (HA) ve Dinamik Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (DEIS) Yöntemleriyle Düşük Karbon Çeliği (AISI 1026), Pirinc-MM55 ve Nikalium-118 Alaşımlarının Yapay Deniz Suyunda Korozyon Davranışları ve Pirinç Alaşımlarına Benzotriazol'un İnhibitor Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ghasemi, R. (2016) The Influence of Microstructure on Mechanical and Tribological Properties of Lamellar and Compacted Irons in Engine Applications. Doctoral Thesis, School of Engineering, Jönköping University, Department of Materials and Manufacturing, SE-551 11 Jönköping, Sweden.
- Gök, M. G. (2015). Çok Katmanlı ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş CYSZ/GD₂Zr₂O₇ Esaslı Yeni Nesil Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gökergil, H. M. (2010). Çinko, Nikel ve Nikel/Kobalt Kaplanmış Yüksek Karbonlu Çeliğin Korozyon Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Görener, A. (2007). Al-Si Matrisli Malzemelerin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Güleç, A. (2006). Termal Püskürtme Tekniği İle Yüksek Performanslı Zn/Al (85/15) Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Gülensoy, B. A. (2006). Doğalgaz Boru Hatlarında Uygulanan Korozyon Tedbirleri ve Kayseri Doğalgaz Hatlarındaki Uygulamaların İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

- Güler, H. (2007). Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Korozyon Davranışına Alaşım Elementlerinin Etkisinin Yapay Sinir Ağıyla Tahmini. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Gürlek, Z. K. (2009). Asidik ve Bazik Akımsız Nikel Kaplamaların Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Jegadeeswaran, N., Ramesh, M. R., and Bhat, K. U. (2013). Combating Corrosion Degradation of Turbine Materials Using HVOF Sprayed 25% (Cr₃C₂-25(Ni₂₀Cr)) + NiCrAlY Coating. *International Journal of Corrosion*, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/824659>.
- Kalay-Üçüncü, E. (2006). Overhole Giren Gemilerde Görülen Korozyon Hasarları ve Bu Hasarların Giderilme Yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karabulut, A. (2014). Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme (HVOF) Teknolojisi İle Hidroksiapatit Kaplama. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Karamusaoğlu, H. A. (2009). Küresel Grafitli Dökme Demir'in (GGG-60) İşlenmesinde Kesici Takım Geometrisinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Kaya, A. Ö. (2007). Plazma Püskürtme ve HVOF Yöntemleri Kullanılarak, Cr₃C₂-NiCr (75/25) ve CrNiBSi+80 WC-Co Tozlarıyla Kaplanan Çeliğin Yapısı ve Yüzey Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Kayalı Y. (2011). Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Kayalı, Y. (2006). Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Mekanik Özellikleri ve Aşınma Davranışının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.

- Kayalı, Y., Yalçın, Y., Taktak Ş. (2011). Adhesion and wear properties of boron-tempered ductile iron. *Journal Materials and Design*, **32**: 4295-4303.
- Kılıçlı, V. (2004). Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Kısmi Östenitleme ve Östempereleme Isıl İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kurt, R. (2008). Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi İle Üretilmiş Titanyumun Yapay Tükürük Ortamında Korozyon Davranışının İncelenmesi. Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Lai, G.Y., (2007). High Temperature Corrosion and Materials Application. ASM Publishing, Chapter 9.
- Mauer, G., Sebold, D., Vaben, R., (2013). MCrAlY Bondcoats by High-Velocity Atmospheric Plasma Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume **23(1-2)**:140-146.
- Meşekıran, N. (2015). Farklı Kaplama İçeriğine Sahip Termal Bariyer Kaplamaların (TBC) Oksidasyon Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- Minisker, M. A. (2009). Termal Sprey Yöntemiyle Oluşturulan Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ohmori, A. (1996). Thermal spray technology. *Journal of Japanese Society of Tribologists*. **41**(11): p. 899-904.
- Özdemir, Ö. (2007). Otomotiv Sektöründe Kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimine Etki Eden Parametrelerin Teorik İncelenmesi Ultrasonik Ses Hızı Yöntemiyle Tahribatsız Kontrolü ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Özorak, E. (2017). Weldox Çeliği Yüzeyinde HVOF İle Üretilen Kaplamaların Mikroyapı ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.

- Öztürk-Körpe, N. (2010). Cr ve Y Katkılı Fe-Al-W Esaslı Alaşımların Mekanik ve Yüksek Sıcaklık Gaz Korozyonu Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Pawlowski, L. (2008). The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. John Wiley & Sons, Inc.
- Pierre L. Fauchais, J.V.R.H., Maher I. Boulos (auth). (2014). Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part. Springer Science & Business Media.
- Saeidi, S., Voisey, K. T. and McCartney, D. G. (2009). The Effect of Heat Treatment on the Oxidation Behavior of HVOF and VPS CoNiCrAlY Coatings. *Journal Thermal Spray Technology*, **18**(2):p. 209-216.
- Saeidi, S., Voisey, K. T. and McCartney, D. G. (2011). Mechanical Properties and Microstructure of VPS and HVOF CoNiCrAlY Coatings. *Journal of Thermal Spray*, **20**(6): p. 1231-1243.
- Sarıköse, S. (2015). Fe Esaslı Süperlaşımın Tuz Banyosunda Korozyon Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Schweitzer, P.A. (2007). Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and media corrosion of metals, Chapter 1-6, **2th** ed., New York: CRC press.
- Soncu, M. (2008). G-X 10 Crnimonb 18-10 Östenitik Paslanmaz Çeliğin Asidik Çözeltilerdeki Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Sotelo-Mazón, O., Porcayo-Calderon, J., Cuevas-Arteaga, C., Ramos- Hernandez, J. J., Ascencio-Gutierrez, J. A., and Martinez-Gomez, L., (2014). EIS Evaluation of Fe, Cr, and Ni in NaVO₃ at 700 °C. *Journal of Spectroscopy*, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/949168>.
- Söğüt, A. (1998). Küresel Grafitli Dökme Demirde Küreleşme Oranının Mekanik Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Stokes, J. (2006). The Theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process. Publisher Dublin City University, p. 204.
- Şahin, C. (2009). Bazı Mühendislik Malzemelerinde Korozyonun Doğal Frekans ve Sönümlenmeye Olan Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Şen, U. (1997). Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borlanması ve Özellikleri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tanrıverdi, A. (2015). Küresel Grafitli Dökme Demirin Delme İşleminde Yüzey Kalitesi, Takım Aşınması ve Daireselliğin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Taylor, C. F. (1977). Engineering Fundamentals of The Internal Combustion Engine in Theory and Practice, **Vol 2**, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA.
- Thompson, N. G., Yunovich, M., & Dunmire, D. (2007). Cost of corrosion and corrosion maintenance strategies. Corrosion Reviews, **25(3-4)**, 247-262.
- Topal, E. (2016). Alüminyum İçin Korozyon İnhibitörü Olarak Kullanılan Bazı Proton Pump İnhibitörlerinin Kuantum Kimyasal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Toptaş, M. (2009). Farklı Isıl İşlemlerin Küresel Grafitli Dökme Demirin Yorulma Davranışına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Uzun, H. A. (2002). Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Üneri, S., (1998). Korozyon ve Önlenmesi, Korozyon Derneği Yayınları, Ankara, Türkiye, **3-4**, 122-127, 243-287.

- Vuelvas-Rayó, S., González-Rodríguez, J.G., Porcayo-Calderón, J., Salinas-Bravo, V. M., and Maldonado-Ruiz, S. I. (2012). Hot Corrosion Behavior of High-Chromium, High-Carbon Cast Irons in NaCl-KCl Molten Salts. *International Journal of Corrosion*, doi:10.1155/2012/479761.
- Yakar, E. (2006). Elektropolimerizasyon Yöntemiyle Polipirol ve Polianilin İle Kaplanmış Alüminyumun Asidik Korozyonunun Önlenmesinde Farklı Anyonların Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Yazıcı, A. M. (2006). Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bortemperlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ramazan TUNCER
Doğum Yeri : Acıpayam/DENİZLİ
Doğum Tarihi : 31/07/1988
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : rtuncer88@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Acıpayam Lisesi, (2002-2005)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim
Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, (2007-2011)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Anabilim Dalı, (2012-2018)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Milli Eğitim Bakanlığı, Öğretmen, (2014-Devam
Ediyor)