

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN TRD
YÖNTEMİ KULLANILARAK VC KAPLANABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI

Samet ERTANÇ

Yüksek Lisans Tezi

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri

Malzeme Bilim Dalı

HAZİRAN 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri

Yüksek Lisans Tezi

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN TRD YÖNTEMİ KULLANILARAK VC KAPLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Tez Yazarı
Samet ERTANÇ

Danışman
Prof. Dr. Hüseyin TURHAN

HAZİRAN 2022
ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	Küresel Grafitli Dökme Demirin TRD Yöntemi Kullanılarak VC Kaplanabilirliğinin Araştırılması
Yazarı:	Samet ERTANÇ
İlk Teslim	05.05.2022
Savunma	23.06.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Hüseyin TURHAN Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Ali Kaya GÜR Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Bülent KURT Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik - Mimarlık Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Küresel Grafitli Dökme Demirin TRD Yöntemi Kullanılarak VC Kaplanabilirliğinin Araştırılması ” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

23.06.2022

Samet ERTANÇ



ÖNSÖZ

Makine parçalarının kullanım süreleri aşınma ve korozyon etkisi sebebiyle sınırlı olmaktadır. Aşınma ve korozyon etkisinin ortadan kaldırılması makine parçalarının kullanım sürelerinin arttırılması ve ekonomik olarak da gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Bu amaçla çalışmalar yapılmakta ve yeni malzemeler üretilmektedir. Kullanılan makine parçalarını yenisiyle değiştirmek yerine, üretilen yeni malzemelerle makine parçalarının yüzeylerinin aşınma ve korozyon direnci vb. özelliklerinin geliştirilerek kullanılması daha ekonomik görülmektedir.

Yapılan çalışmada; KGDD, tuz banyosu içinde termo reaktif difizyon yöntemi kullanılarak yüzeyinin VC tabakası ile kaplanması sağlanmıştır. Böylelikle makine parçalarının kullanım ömürlerinin arttırılması amaçlanmaktadır.

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışması süresince bilgisi ile bana yol gösteren ve hiç bir zaman desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin TURHAN hocama bana vermiş olduğu emeklerinden ötürü şükranlarımı sunar ve saygıyla teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmaları sırasında çok kıymetli bilgilerini ve zamanlarını benden esirgemeyerek çalışmalarımda yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Bülent KURT hocama teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam esnasında teknik destek vererek yardımlarını esirgemeyen Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üni. Metalurji ve Malzeme Müh. Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimi süresince manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan kıymetli babama, anneme, sevgili eşime ve biricik oğluma sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Samet ERTANÇ
ELAZIĞ, 2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Dökme Demirler	3
2.1.1. Dökme Demirlerin Sınıflandırması	5
2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirler	9
2.2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirin Kimyasal Bileşimi	10
2.2.2. Sınıflandırma ve Mekanik Özellikler	11
2.2.3. Alaşım Elementleri ve Etkileri	12
2.2.4. Mikroyapısı	14
2.2.5. Üretimi	15
2.2.6. Mühendislik Özellikleri.....	16
2.2.7. Kullanım Alanları.....	17
2.3. Yüzey Kaplama Yöntemleri	17
2.3.1. Kimyasal Buhar Çökeltme Yöntemi	18
2.3.2. Fiziksel Buhar Çökeltme Yöntemi	18
2.3.3. Termal Bariyer Kaplama (TBC).....	19
2.3.4. Termo Reaktif Difüzyon Yöntemi.....	20
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	27
3.1. Giriş	27
3.2. Kaplanacak Ana Malzemenin Hazırlanması.....	27
3.3. Tuz Banyosunun, Karbür Yapıcı ve İndirgeyici Elementlerin Hazırlanması	27
3.4. Tuz Banyosu İçinde TRD Kaplamasında Kullanılacak Malzemeler	28
3.5. Tuz Banyosu Karışımı Oranı	29
3.6. Deney Numunelerinin Hazırlanması	29
3.7. Tuz Banyosu İçeriğinin Hazırlanması ve Kaplama İşlemi	30
3.8. Metalografik İncelemeler	31
3.8.1. TRD Yöntemi İle Tuz Banyosunda Kaplama Yapılan Numunelerin Optik Görüntülerinin Hazırlanması.....	31
3.8.2. TRD Yöntemi İle Tuz Banyosunda Kaplama Yapılan Numunelerin Mikro Sertlik Değerlerinin Analizi	33
3.8.3. TRD Yöntemi İle Tuz Banyosunda Kaplama Yapılan Numunelerin EDS, SEM ve Mapping Analizlerin İncelenmesi.....	34
3.8.4. TRD Yöntemi İle Tuz Banyosunda Kaplama Yapılan Numunelerin XRD Sonuçlarının İncelenmesi.....	35

4. DENEYSEL SONUÇ VE TARTIŞMA	36
4.1. TRD Yöntemiyle Kaplanan Numunelerin Optik Mikro Yapı Analiz Sonuçlarının İncelenmesi ...	36
4.2. TRD Yöntemiyle Kaplanan Numunelerin EDS, SEM ve Mapping İnceleme Sonuçları	42
4.2.1. Kaplanan Numunelerin SEM Analiz Sonuçları	42
4.2.2. Kaplama Yapılan KGDD'in EDS İnceleme Sonuçları	47
4.2.3. Kaplanan KGDD Yüzeyinin Mapping İnceleme Sonuçları	51
4.3. Kaplanan KGDD Yüzeyinin XRD İnceleme Sonuçları	53
4.4. Kaplanan KGDD Yüzeyinin Mikro Sertlik Analiz Değerleri	55
5. GENEL DEĞERLENDİRMELER VE SONUÇ	56
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Küresel Grafitli Dökme Demirin TRD Yöntemi Kullanılarak VC Kaplanabilirliğinin Araştırılması

Samet ERTANÇ

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri
Haziran 2022, Sayfa: xii + 58

Bu çalışmada, küresel grafitli dökme demir yüzeyi TRD yöntemi kullanılarak sırasıyla 850, 900 ve 950 °C işlem sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat sürelerde VC kaplanmıştır. Bu amaçla yüzeyleri parlatılan numuneler, belirtilen sıcaklık ve sürelerde tuz boraks, Al ve Fe-V tozundan oluşan tuz banyosu kullanılarak kapalı bir ortamda kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan kaplama işlemi sonrasında yüzeylerdeki kaplama tabakası kesiti ve geçiş bölgesi incelenmiştir. Böylece kaplama tabakası kesiti optik mikroyapı, SEM, EDS, Mapping ve mikrosertlik analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Aynı zamanda kaplama tabakası faz yapısı tespiti için XRD analizi yapılmıştır. Optik mikroskoba bağlı clemex analiz sistemiyle kaplama tabakası kalınlığı, işlem sıcaklığı ve süreye bağlı olarak 2,62 – 11,80 µm arasında elde edilmiştir. Aynı zamanda, elde edilen kaplamaların morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile belirlenmiş ve noktasal EDS analizleri ile kaplama tabakası ve geçiş bölgesi elementer içeriği tespit edilmiştir. Mikrosertlik analizleri sonucunda ise kaplama tabası yüzey sertliği maksimum 4608 HV olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: VC Kaplama, Dökme Demir, Tuz Banyosu, TRD

ABSTRACT

Investigation of VC Coating of Ductile Graphite Cast Iron Using TRD Method

Samet ERTANÇ

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Metallurgical and Materials Engineering Technologies

June 2022, Pages: xii + 58

In this study, The surface of Ductile Graphite Cast Iron was covered with VC respectively at 850, 900, 950° C for 2, 4, 6 hours by using TRD method. For this purpose, the samples which polished surfaces have been carried out to the coating process in the indoor environment by using salt bath consisting of salt, borax, Aluminum (Al) and Fe-V powder at specified temperatures and times. After the coating process which was made the section of the coating layer on the surface and transition zone were investigated. Thus, the section of the coating layer was investigated by using analysis methods such as; optical microstructure, SEM, EDS, Mapping and micro hardness. At the same time, XRD analysis was made for detection the phase structure of coating layer. Coating layer thickness with the clemex analysis system connected to the optical microscopy was obtained between 2,62 - 11,80 μm depending on temperature and process. At the same time, the morphologies of the obtained coatings were investigated by scanning electron microscopy (SEM) analysis coating layer with dotted EDS analysis and transition zone elements content were determined. As a result of micro hardness analysis, hardness of coating layer surface was investigated the most 4608 HV.

Keywords: VC Coating, Ductile Graphite Cast Iron, Salt Bath, TRD.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Demir-Karbon Denge Diyagramı	4
Şekil 2.2. Beyaz Dökme Demir Yapısı	6
Şekil 2.3. Gri Dökme Demir Yapısı	7
Şekil 2.4. Temper Dökme Demir Yapısı.....	8
Şekil 2.5. Küresel Grafitli Dökme Demirin Yapısı.....	9
Şekil 2.6. Farklı Aşamalarda Küreselleşmiş KGDD'lerin Parlatılmış Haldeki Optik Mikroskop Fotoğrafları.	10
Şekil 2.7. Farklı Mikro Yapılarda Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Optik Mikroskop Görüntüleri	15
Şekil 2.8. CVD İle Kaplama Düzenegi	18
Şekil 2.9. PVD İşlemi Teknikleri	19
Şekil 2.10. TBC Sistemi	20
Şekil 2.11. Termoreaktif Difüzyon Prosesinde İşlem Sırası.....	22
Şekil 2.12. TRD İşlemi Akış Şemasının Gösterimi	23
Şekil 2.13. TRD Yöntemlerinde Kutu Tasarımları	25
Şekil 3.1. 304 Paslanmaz Çelik Pota	28
Şekil 3.2. Isıl İşlem Fırını	28
Şekil 3.3. Hassas Manüel Kesme Cihazı	29
Şekil 3.4. Yarı Otomatik Zımparalama ve Parlatma Cihazı	30
Şekil 3.5. Kaplama İşlemi İçin Hazırlanan Numuneler	30
Şekil 3.6. Bakalit Cihazı	32
Şekil 3.7. Nikon Eclipse MA 100 Marka Optik Mikroskop	33
Şekil 3.8. Mikro Sertlik Cihazı (Future Tech FM-700 Marka).....	34
Şekil 3.9. EDS, SEM ve Mapping Cihazı.....	35
Şekil 3.10. XRD Ölçüm Cihazı	35
Şekil 4.1. 850 °C Sıcaklık ve 2 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı....	36
Şekil 4.2. 850 °C Sıcaklık ve 4 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı....	37
Şekil 4.3. 850 °C Sıcaklık ve 6 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı....	37
Şekil 4.4. 900 °C Sıcaklık ve 2 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı....	38
Şekil 4.5. 900 °C Sıcaklık ve 4 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı....	38
Şekil 4.6. 900 °C Sıcaklık ve 6 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı....	39
Şekil 4.7. 950 °C Sıcaklık ve 2 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı....	40

Şekil 4.8. 950 °C Sıcaklık ve 4 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı....	40
Şekil 4.9. 950 °C Sıcaklık ve 6 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı....	41
Şekil 4.10. 850 °C Sıcaklıkta 2 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü.....	42
Şekil 4.11. 850 °C Sıcaklıkta 4 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü.....	43
Şekil 4.12. 850 °C Sıcaklıkta 6 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü.....	43
Şekil 4.13. 900 °C Sıcaklıkta 2 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü.....	44
Şekil 4.14. 900 °C Sıcaklıkta 4 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü.....	44
Şekil 4.15. 900 °C Sıcaklıkta 6 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü.....	45
Şekil 4.16. 950 °C Sıcaklıkta 2 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü.....	46
Şekil 4.17. 950 °C Sıcaklıkta 4 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü.....	46
Şekil 4.18. 950 °C Sıcaklıkta 6 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü.....	47
Şekil 4.19. 850 °C Sıcaklıkta EDS İnceleme Sonucu.....	48
Şekil 4.20. 900 °C Sıcaklıkta EDS İnceleme Sonucu.....	49
Şekil 4.21. 950 °C Sıcaklıkta EDS İnceleme Sonucu.....	50
Şekil 4.22. 850 °C'de Kaplanan Numunenin Mapping Analiz Sonuçları.....	51
Şekil 4.23. 900 °C'de Kaplanan Numunenin Mapping Analiz Sonuçları.....	52
Şekil 4.24. 950 °C'de Kaplanan Numunenin Mapping Analiz Sonuçları.....	53
Şekil 4.25. Kaplama Yüzeyi XRD Analiz Sonuçları.....	54
Şekil 4.26. Mikro Sertlik İnceleme Sonuçları.....	55

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Dökme Demirlerin Çeşitleri ve Bileşimlerinde Mevcut Elementler	5
Tablo 2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kimyasal Bileşimi	11
Tablo 2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirin TSE Göre Sınıflandırılması	12
Tablo 2.4. Küresel Grafitli Dökme Demirin EN 1563 Avrupa Standartlarına Göre Sınıflandırılması.	12
Tablo 2.5. Farklı Yüzey Sertleştirme Yöntemleri İle Elde Edilmiş Sertlik Değerleri	23
Tablo 3.1 Küresel Grafitli Dökme Demirin (GGG 60) Kimyasal Analizi	27
Tablo 3.2. Fe-V Kimyasal Analizi	28
Tablo 3.3. Tuz Banyosu Karışım Oranı	29
Tablo 4.1. Deneysel Çalışma Sonucu Kaplama Kalınlıkları.....	41

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°C	: Santigrat Derece
mm	: Milimetre
µm	: Mikron/Mikronmetre
Fe	: Demir
C	: Karbon
Cr	: Krom
Si	: Silisyum
Fe ₃ C	: Sementit
Mn	: Mangan
Mg	: Magnezyum
Ni	: Nikel
Ba	: Baryum
Zr	: Zirkonyum
TiC	: Titanyum Karbür
TiCN	: Titanyum Karbonitrür
Ca	: Kalsiyum
Al	: Alüminyum
SiC	: Silisyum Karbür
Mo	: Molibden
Cu	: Bakır
Ce	: Seryum
Ti	: Titanyum
S	: Kükürt
P	: Fosfor
V	: Vanadyum
Fe-V	: Ferro Vanadyum
VC	: Vanadyum Karbür
t	: Zaman
sn	: Saniye
gr	: Gram
dk	:Dakika

Kısaltmalar

GGG 60	: Küresel Grafitli (Sfero) Dökme Demir
TRD	: Termo Reaktif Difüzyon
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
PVD	: Fiziksel Buhar Çöktürme
HV	: Vickers Sertlik Değeri
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektroskopi
KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
DDK	: Dökme Demir Küresel Grafitli
DIN	: Alman Norm Standartları
EN	: Avrupa Norm Standartları
CVD	: Kimyasal Buhar Çöktürme
TBC	: Termal Bariyer Kaplama

1. GİRİŞ

Genellikle kullanılan çelik malzemeler; kimyasal reaksiyonlar ve mekanik etkileşimler sonucunda aşınma ya da korozyon tipi hasarlar nedeni ile kullanım ömrünü bitirerek ülkelerin ekonomisinde yüksek oranda kayıplar oluşturmaktadır. Makinelerin öne çıkan arızaları ve makine parçalarının kısa olan kullanım ömrünün birinci sebebi aşınma olarak karşımıza çıkar. Nasıl ki sürtünme enerji kaybı sebebiyse aşınma da yeniden geri döndürülemeyen madde kaybına sebep olur. Korozyon ve aşınmanın sonucu olan kayıp, ülkelerin ekonomilerinde meydana getirdiği yük endüstriyel ve bilimsel zümrelerin dikkatlerini çekmiş ve daha dayanımlı malzemeleri aramaya itmiştir. Bu sebeple endüstri sektöründe çok fazla kullanılan çelik malzemelerin üzerlerine, kimyasal, fiziksel çökertme ve difüzyonla kaplama yöntemleri geliştirilmiş, 2-10 µm kalınlıklara ulaşan ve sert olan tabakalar üretilmiştir. Seramiğe benzer bir yapıya sahip bu tabakalar; aşınma, yüksek sıcaklık ve korozyona karşı yeterince mukavemetlidir. Bu sebepten sert yüzey kaplama teknikleri endüstriyel ve bilimsel çevrelerde önemli bir konuma gelmiştir [1].

Endüstri sektöründe ihtiyaç duyulan teknolojiler hızlı bir şekilde gelişmekte ve daha iyi derecede korozyon ve aşınma direncine sahip mekaniksel olarak özel bileşenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu özellikleri ulaşabilmek için de kullanılabilecek yollardan biri, herhangi bir standart malzeme üzerine gereken niteliklere sahip film şeklinde ince kaplama tabakaları oluşturmaktır. Sertlik olarak seramiklere benzeyen bu ince film kaplamaların kullanılması, aşınma davranışıyla karşılaşılan ortamlarda çalışan malzemelerin mukavemetlerini arttırmak için etkili bir yöntemdir. Gereken özelliklere sahip uygun kaplama yöntemi ve malzemenin seçilmesiyle ürünün ticari değeri ve kaplanan malzemenin kullanım süresi arttırılabilir. Yapılan bu tip kaplama uygulamaları ile sürtünme katsayısı düşürülebilir [2].

Malzemelerin yüzey özelliklerinin rolü, yakın geçmişte bir çok çalışmanın konusu haline gelmiştir. Bilimsel olarak; yüzeyin gerilmesi, enerjisi, aktivitesi ve yüzey ile ilgili problemlerin önemi yüksek oranda artmıştır. Metallerin ve metal alaşım malzemelerin kütle ve yüzey özelliklerinin aralarındaki ilişki uzun süredir incelenmektedir. Yüzeysel işlemler, malzemelerin; süneklik, sertlik, ısısal-darbesel şok, yorulma, korozyon, aşınma vb. tribolojik ve mekanik özelliklerinin birinin veya bir kaçının geliştirilmesi ve üretim maliyetlerinin azaltılması amacıyla yapılmaktadır. Bu özelliklerden en öncelikli olan, parçaların korozyon ve aşınma dirençlerinin arttırılmasıdır [3].

Malzemelerin yüzeysel niteliklerini geliştirerek amacına uygun kullanım özelliklerine getirmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden biri de TRD (Termo Reaktif Difüzyon) yöntemidir.

TRD (Termo Reaktif Difüzyon) tekniği, çeliklerin ve benzer tür materyallerin yüzeylerinde Nitrür, Karbo-Nitrür ve Karbür vb. aşınma mukavemeti yüksek ve sert olan kaplama tabakalarının üretildiği bir yöntemdir. Söz konusu TRD tekniğinde altlık malzemede Azot, Karbon, Tantal, Krom, Vanadyum, Niyobyum, Tungsten, Molibden vb. Nitrür veya Karbür oluşturan bileşenlerle beraber bir kaplama tabakası sağlamak için difüzyon oluşur. Difüzyon sonucu Azot ve Karbon birikimi olan tabaka üzerinde Nitrür ve Karbür oluşturuca bileşenlerle çelik türü altlık malzemelerin yüzeylerinde metalürjik olarak bağlanan Nitrür ve Karbür kaplamalar reaksiyona girer. TRD yöntemi alışlagelmiş olan yüzey sertleştirme yöntemlerine benzememektedir. Alışlagelmiş olan yüzeylerin sertleştirilmesi yöntemlerinde Azot ve Karbon, altlık malzemelerin yüzeylerini sertleştirmek niyetiyle dış kısımdan difüzyon edilmektedir. Termo Reaktif Difüzyon yöntemindeyse altlık malzemenin yüzeyinde kaplama tabakasının oluşumu sağlanmaktadır. Bazı alışlagelmiş yüzeysel işlem teknikleriyle oluşturulamayacak kadar büyük derecede fretting, abrasiv, adhesiv aşınma tiplerine karşı mukavemetli, oksidasyon ve korozyon direncinin oluşturulabildiği Nitrür kaplamalarının sağlanabilmesi nedeniyle, TRD tekniği endüstri ekipmanları için kullanılabilir olmuştur [4].

Yapılan bu çalışmada, tuz banyosunda TRD yöntemi ile (GGG 60) Dökme Demir numuneleri yüzeyine farklı süre ve sıcaklık değerleri kullanılarak VC kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, (GGG 60) Dökme Demir numunelerine tuz banyosu ortamında TRD yöntemiyle oluşturulan VC kaplamada sıcaklık ve bekleme süresi parametrelerinin artış göstermesiyle beraber kaplama kalınlığının da doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Mikroyapı analiz sonuçlarından, oluşturulan kaplama tabakasının yüzeyde homojen bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Oluşturulan kaplama tabakası üzerinde yapılan noktasal EDS analizleri ile kaplama tabakasının % C ve % V oranı, Mapping analizleri ile ana malzemedeki ve kaplama tabakasındaki element dağılımı saptanmıştır. Oluşturulan kaplama tabakasının yüzeyinden alınan XRD analizi sayesinde ana malzeme yüzeyinde oluşturulan kaplamaların VC fazı olduğu belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Dökme Demirler

Bileşimlerinde kimyasal olarak %2'den fazla Karbon bulunan demir malzemeler grubuna genel olarak Dökme Demir malzemeler denilmektedir. İçeriklerinde yaklaşık olarak %2-4 C ve %1-3 Si bulundurulur. Bu malzemeler son kullanım şekil ve boyutlarına sadece döküm yöntemiyle getirilebildiği için Dökme Demir olarak adlandırılırlar [5].

Çelikler gibi Dökme Demirlerde geniş bir demir alaşımı gurubunu temsil eder. Kimyasal bileşenleri ve özellikleri açısından benzer olan, aynı zamanda üretim yöntemleri açısından ve kullanım alanı birbirlerinden farklı çoğu alaşımlandırılmış çeşidinin genel adı olarak kullanılabilir. Aynı zamanda döküm endüstrisinin en yüksek ağırlığa sahiptirler. Dökme Demirler üretim maliyetleri ve iyi bir mühendislik ürünü olması nedeniyle tercih edilmektedir [6].

Dökme Demirlerin geniş aralıkta değişen mukavemetleri, korozyona karşı direnç, sertlik, işlenebilirliğinin kolaylığı, aşınmalara karşı dayanım ve titreşim absorbe etme gibi nitelikleri bulunmaktadır. Bu niteliklerin yanında üretiminin ucuzluğu döküm demir malzemelere yaygın bir kullanım alanı sunmuştur. Dökme demirlerin tiplerini, katılaşma sonrası Karbonun iç yapıda meydana getirdiği biçim ve şekil belirlemektedir. Döküm demir ürünlerde çeşitliliğin oluşmasını, malzemelerin soğuma hızı, kimyasal karışımı, üretim tekniği, üretim sonrasında uygulanan ısıtma işlem teknikleri gibi faktörler belirlemektedir [7].

Dökme demirler genel olarak %3,5 kadar Silisyum ve %4 kadar Karbon ihtiva ederler. Bunlardan farklı olarak bileşimlerinde Manganez, Kükürt ve Fosfor'da bulunur. Bunların yanında, üretilecek Dökümün çeşidine göre Nikel, Molibden, Magnezyum, Krom, Titanyum, Bakır ve Alüminyum vb. elementler dökümlerin bileşimlerinde mevcut olabilir [8].

Süneklik özelliklerinin olmaması nedeniyle Dökme Demirler, soğuk ve sıcak işlemler uygulanarak şekillendirilemezler. Fakat gerek dökümlerinin kolaylığı gerek üretilen parça nitelikleri ve aşağıdaki özelliklerinden dolayı geniş bir kullanıma sahiptirler.

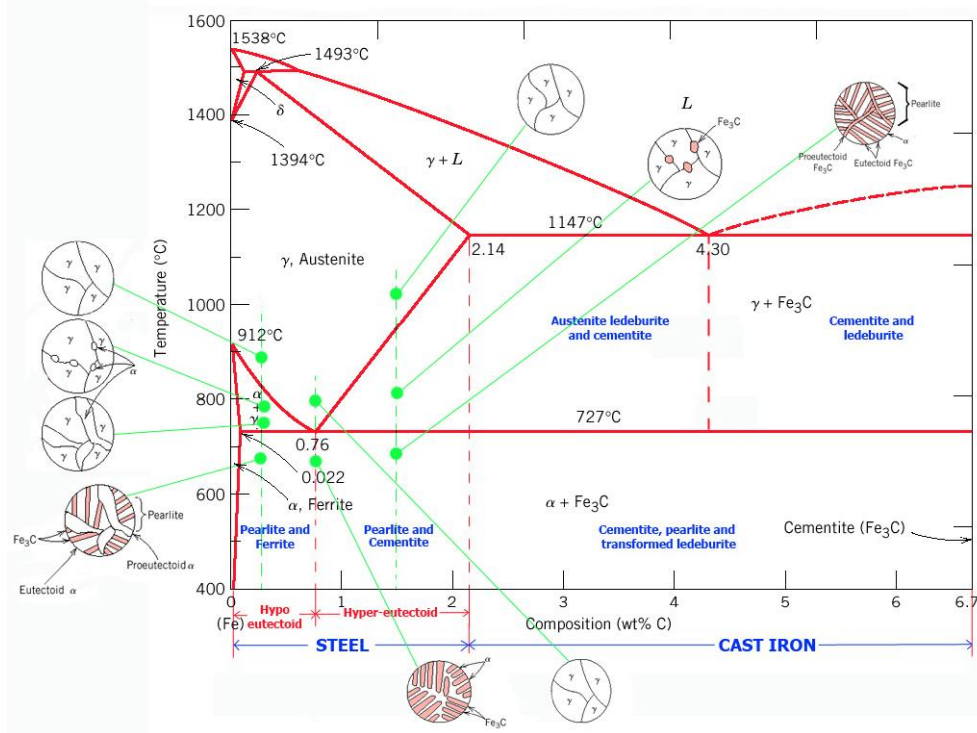
- a. Ergime sıcaklığının düşük olması (1150-1300°C),
- b. Akışkanlığının iyi olması (ötektik bileşime yakın),
- c. Kalıbın şeklini alabilme ve döküm yeteneğinin yüksek olması,
- d. Ergime işlemlerinin kolay ve ucuz olması,
- e. Kimyasal bileşik sınırının geniş belirlenebilmesi,
- f. Karmaşık yapı parçaların bir tek işlemle üretilebilmesi,
- g. Talaşlı imalat yöntemiyle kolay işlenebilmesi,
- h. Titreşimleri absorbe etme özelliğinin yüksek olması,
- i. Yüksek basma mukavemetinin olması,

j. Korozyona ve Aşınmaya dayanıklı olması,

İç yapı oluşumuna, kimyasal karışımların yanında özellikle soğutma hızının yardımıyla ve alaşıma eklenen elementlerle etki edilebilir. Bu şekilde iç yapının hangi fazlardan oluştuğuna ve oluşan fazların şekline ve oranlarına bağlı olarak adlandırılmasıyla beraber genel özelliklerin değişimi sağlanır [9].

Bileşimlerinde %2 oranından az karbon ihtiva eden Dökme Demirler; bazı durumlarda Si ve diğer alaşım elementlerinin, Östenitin Karbon çözünürlüğüne etkisinden ötürü Ötektik reaksiyonlarla katılaşabilirler. Bu tip bileşimlerden oluşan malzemelerde dökme demir olarak ifade edilirler.

Şekil 2.1’de gösterilen Fe-C denge diyagramına bakılarak Dökme Demirler, ergitme işlemlerine, kimyasal bileşime ve soğuma hızına bağlı şekilde, termodinamik bakımdan yarı kararlı Sementit ya da kararlı Grafit sistemlerinde katılaşabilirler. Yarı kararlı veya kararlı Ötektik oluşması; sıvının çekirdeklenme kuvveti, kimyasal bileşim ve soğuma hızı vb. etkenlere bağlıdır. Yarı kararlı sistemde katılaşmanın oluşumunda Ötektikteki bolca olan Karbon fazı Demir Karbür olup; kararlı sistemde katılaşmanın oluşumunda ise Ötektikteki bolca olan Karbon fazı Grafitir. Ötektiğin kimyasal bileşimi ve çekirdeklenme kuvveti aynı zamanda grafitleşme potansiyelini de belirler. Yüksek grafitleşme potansiyeli, zengin Karbon fazı olarak Grafit ihtiva eden bir yapı oluştururken, düşük grafitleşme potansiyeli de yapıda zengin Karbon fazı olarak Demir Karbür oluşmasına sebep olur. Bu iki Ötektik tipi, mekanik özellik açısından birbirlerinden farklılık oluştururlar [10].



Şekil 2.1. Demir-Karbon Denge Diyagramı [11].

2.1.1. Dökme Demirlerin Sınıflandırması

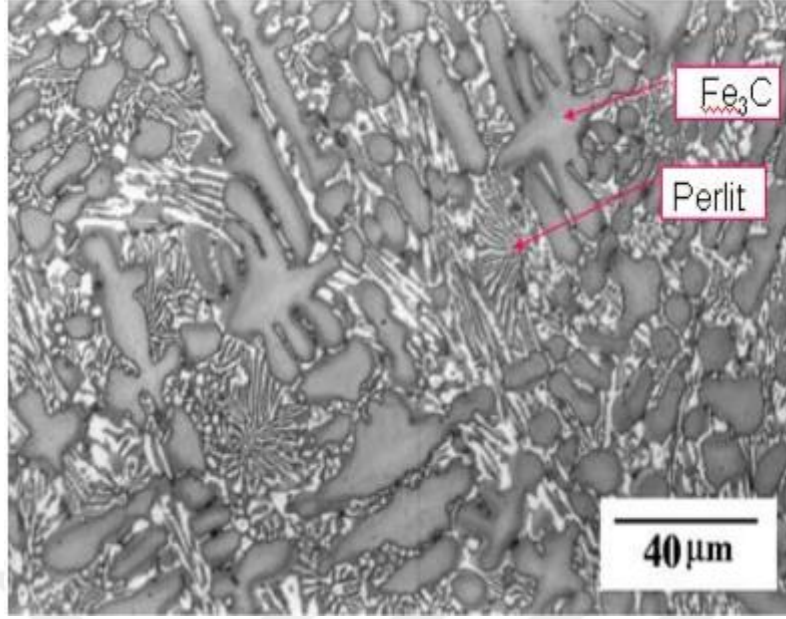
Dökme Demir, mühendislik alanında ifade edilen genel bir terimdir. Dökme Demirlerin sınıflandırılması günümüz endüstrisinde en çok kullanılan ve yaygın kullanımına göre; Küresel Grafitli Dökme Demir, Gri Dökme Demir, Temper Dökme Demir ve Beyaz Dökme Demir olmak üzere dört ana grup şeklinde yapılır [12]. Demir-Karbon denge diyagramına göre Dökme Demirlerin %2-6,67 C içerdiği görülmektedir. Ancak Karbon oranının yüksek olması malzeme yapısını aşırı gevrek yapması nedeniyle, uygulamada bu oranı %2-4 C seviyelerindedir. Tablo 2.1. de dökme demir çeşitleri ve bileşimlerinde mevcut olan elementler gösterilmiştir. Dökme Demirlerde matrisin oluşumu Martensitten Perlite kadar değişiklik gösterir [13].

Tablo 2.1. Dökme Demirlerin Çeşitleri ve Bileşimlerinde Mevcut Elementler [9].

Element	Küresel Grafitli Dökme Demir	Gri Dökme Demir	Beyaz Dökme Demir	Temper Dökme Demir
Karbon	3,0 - 4,0	2,5 - 4,0	1,3 - 3,6	2,00 - 2,60
Silisyum	1,8 - 2,8	1,0 - 3,0	0,5 - 1,9	1,10 - 1,60
Mangan	0,10 - 1,00	0,25 - 1,0	0,25 - 0,80	0,20 - 1,00
Kükürt	0,03 maksimum	0,02 - 0,25	0,06 - 0,20	0,04 - 0,18
Fosfor	0,10 maksimum	0,05 - 1,0	0,06 - 0,18	0,18 maksimum

2.1.1.1. Beyaz Dökme Demir

Beyaz Dökme Demirler, yüksek soğuma hızlarında meydana gelen katılaşmalar ve dönüşümlerle Karbonun Sementit (Fe_3C) olarak meydana geldiği, kırılma yüzeyi beyaz gözüken döküm demir türüdür. Şekil 2.2. de Beyaz dökme demir yapısı gösterilmektedir. Kırılma yüzeylerine göre Beyaz Dökme Demir adı verilirken, kararsız katılaşma ve dönüşümlerin verdiği dominant niteliklerden sebebi ile sert döküm denir [9].



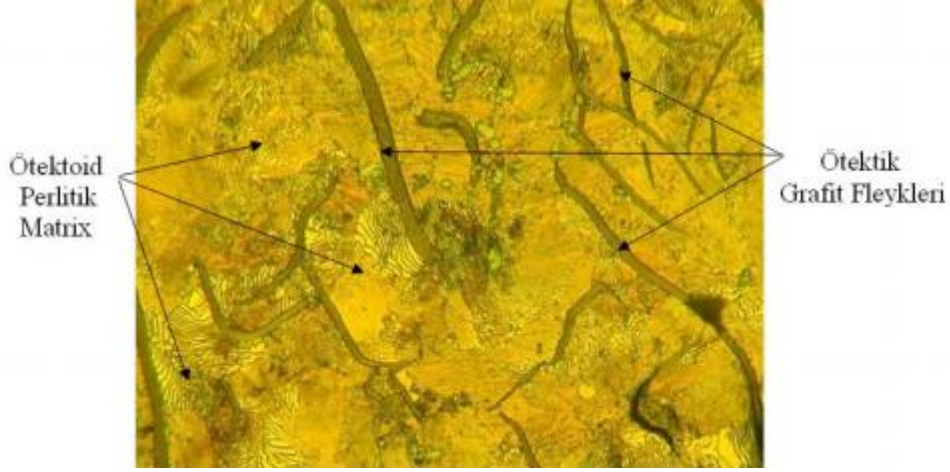
Şekil 2.2. Beyaz Dökme Demir Yapısı [14].

Beyaz Dökme Demirlerin malzeme yapısını oluşturan Sementit'in (Fe_3C) çekirdeklenmesi genel olarak yavaştır. Bunun yanında çekirdeklenmenin meydana geldiği sıcaklık da oldukça düşüktür. Çekirdeklenmenin sonrasında Fe_3C büyümesi hızla oluşur. Grafit ise Fe_3C 'den daha büyük bir sıcaklıkta çekirdekleşip büyür ve Gri Dökme Demir yapısını meydana getirir. Aşırı ani soğumada Fe_3C 'nin Grafitten daha hızlı büyüyeceği genel bir kanıdır [9].

2.1.1.2. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirler

Gri Dökme Demir, dönüşümler ve kararlı katılaşma sonucunda Karbon atomlarının yapı içerisinde grafit kristalleri şeklinde bulunması ve bu nedenle de kırılma yüzeylerinin koyu (gri) görünmesi sebebi ile Gri Dökme Demir olarak isimlendirilmektedir. Yaygın kullanıma sahip olan dökme demir türüdür [9].

Gri Dökme Demir, iyi dökülebilme ve işlenebilme yeteneği ile kabul edilebilir mukavemet gösterir ve özel önemi olmayan parçaların üretiminde çok fazla kullanılmaktadır. Üretim maliyetleri azdır. Gri Dökme Demirlere % 1,90 Si, % 3,25 C, % 0,09 S, % 0,70 Mn, ve % 0,04 P birleşimi örnek olarak gösterilebilir. Bu birleşim Gri Dökme Demirlerin mekanik özelliklerini tanımlamada ölçü olarak kabul edilebilir [12].



Şekil 2.3. Gri Dökme Demir Yapısı [14].

Gri Dökme Demir adlandırması belirli Dökme Demir türünü tanımlıyor olsa da kimyasal içeriği, yapısı ve nitelikleri geniş bir yelpazede değişim gösterebilmektedir. Şekil 2.3. de Gri dökme demir yapısı görülmektedir. Gri Dökme Demir temel olarak " Karbon-Silisyum-Demir " bileşimi olup Ötektik sıcaklıkta Östenit'in katı ergiyik halinde içerdiğinden daha fazla Karbona sahip bileşimdir. Alaşımdaki bu fazla Karbon, Grafit lamelleri şeklinde çöker. Gri Dökme Demir genel olarak % 1-3 Silisyum ve % 1.7-4.5 Karbon ihtiva ederler [9].

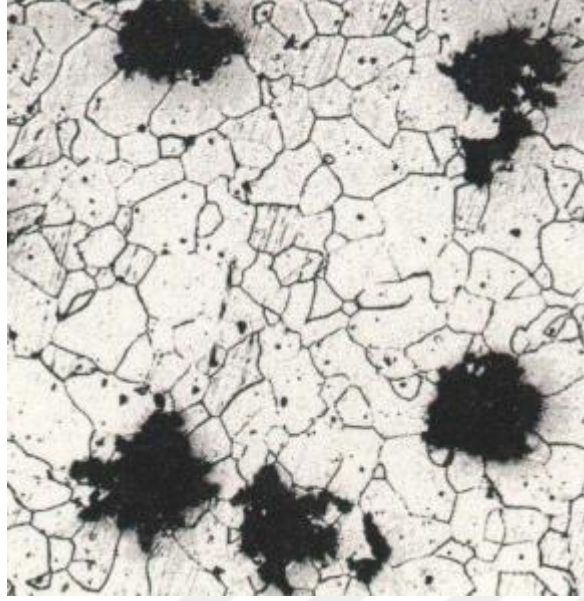
Grafitli Dökme Demir, alaşımdaki Karbon elementinin şekline göre aşağıdaki kısımlara ayrılır:

Lamel Grafitli Dökme Demir: Bileşimindeki Grafit yaprağa benzer lameller (tabaka-pul) şeklinde olan dökme demirlere Lamel Grafitli Dökme Demir adı verilir.

Östenitik Dökme Demir: Uygun ve yüksek miktarda alaşım elementleri ihtiva etmesi nedeniyle temel yapısı Östenit olan ve yapısında genel olarak küresel grafit veya lamel ihtiva eden dökme demirlerdir [15].

2.1.1.3. Temper Dökme Demir

Grafitsiz, sert ve kırılgan olan Beyaz Dökme Demirin temperlenmesi ile Temper Dökme Demir oluşumu sağlanmaktadır. Şekil 2.4. de Temper dökme demir yapısı gösterilmektedir. Isıl işlemler yardımıyla karbür içeriğinin parçalara ayrılması sonucu oluşan; sünek, iyi işlenebilir ve yüksek mukavemet niteliklerine sahiptir [9].



Şekil 2.4. Temper Dökme Demir Yapısı [14].

Temper Dökme Demirlerin sınıflandırması aşağıdaki gibidir:

Siyah Temper Dökme Demir: Kimyasal bileşimindeki Sementit dokulu Beyaz Dökme Demirin nötr bir ortamda belli sıcaklıkta (Östenit alanında) uzun süre ısıtılması ile hazırlanan temper dökümlere Siyah Temper Dökme Demir adı verilir. Kırılma kesiti genel olarak siyah renkte görünmektedir [15].

Beyaz Temper Dökme Demir: Kimyasal bileşimindeki Sementit dokulu Beyaz Dökme Demirin, oksitleyici bir ortamda belli sıcaklıkta (Östenit alanında) uzun süre ısıtılması ile hazırlanan ve kırılmış kesiti genellikle beyaz renkte olan temper dökümlere Beyaz Temper Dökme Demir adı verilir [15].

2.1.1.4. Kompakt Grafitli Dökme Demirler

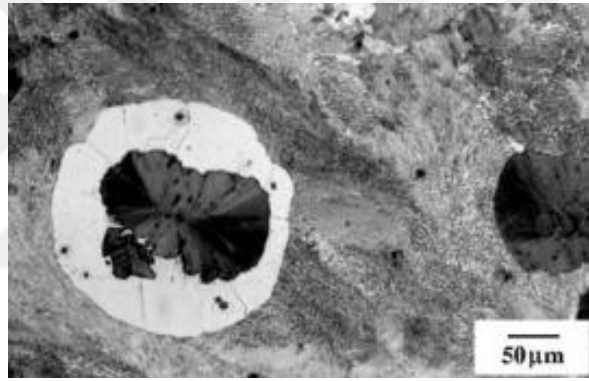
Dökme demirlerin bu türü Vermiküler Grafitli Dökme Demir olarak da adlandırılmaktadır. Sıvı Si-C-Fe bileşimine küçük oranda Mg eklenerek küresel-kompakt- fleyk grafit geçişi sağlanır. Tamamen kompakt grafitli yapı elde edebilmek oldukça zordur. Ti, Ce, Mg alaşımı elementleriyle oldukça yaygın birleşim aralıklarında kompakt yapı üretilebilir. Yalnızca Mg eklenerek tam kompakt yapı üretmek zordur. Küresel grafit veya fleyk oluşturmaya müsait dökme demirlere Ce-Mg-Ti alaşım elementleri kalıplarda ya da pota içinde eklenerek uygulama yapılabilmektedir. Seryum ve Magnezyum, Kükürtle çok kolay reaksiyona girebilmektedir. Cüruf oluşumunun düşük ve ekonomik olması istendiğinde, sıvı alaşım içindeki Kükürt % 0,035'ten az olmalıdır [12].

2.1.1.5. Küresel Grafitli Dökme Demirler

Gri Dökme Demirlerden ayrı olarak, Grafit şeklinin küresel olarak oluşmasından dolayı sfero döküm olarak adlandırılmaktadır. Küresel Grafitli Dökme Demir hakkında detaylı açıklama aşağıdaki genel başlık altında yapılmıştır.

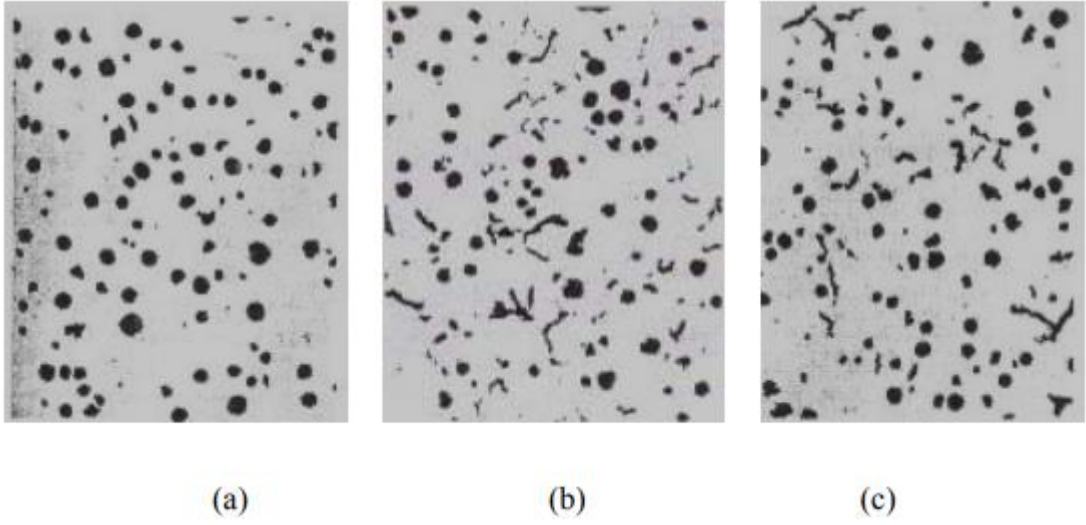
2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirler

Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (KGDD) bağımsız halde bulunan Karbonları, lamelli yapının aksine küre şeklindedir. ABD'de bu sebeple Nodüller Dökme olarak adlandırılır. İngiltere'de ise KGDD ismi ile tanımlanır. Şekil 2.5'de Küresel grafitli dökme demir yapısı görülmektedir. Karbonlarının lamel yapılar değil de küresel şeklinde oluşması için aşılama işlemine tabi tutulur. Küre yapısının oluşmasını sağlamak için döküm aşamasından önce ergimiş halde bulunan demir malzemeye düşük oranda Magnezyum eklenmektedir. Bunun yanında karışıma farklı elementler eklenerek farklı yapılarda ürün elde edilmektedir [9].



Şekil 2.5. Küresel Grafitli Dökme Demirin Yapısı [14].

Küresel Grafitli Dökme Demirlerin kimyasal içeriği Gri Dökme Demirlere benzemektedir. Lamelli yapı yerine Grafitlerin küresel şekilde oluşması, dökme demirlere mukavemet ve süneklik gibi nitelikler sağlar [9]. Şekil 2.6. da farklı aşamalarda küreselleşmiş KGDD'lerin parlatılmış halde optik mikroskop fotoğrafları yer almaktadır.



Şekil 2.6. Farklı Aşamalarda Küreselleşmiş KGDD'lerin Parlatılmış Halde Optik Mikroskop Fotoğrafları.

(a) %99 küreselleşme, (b) %80 küreselleşme, (c) %50 küreselleşme [16].

Gri Dökme Demirlerin grafit yapısının yapraksı görünümde olması nedeni ile kırılgan yapıda olmasının tersine grafitlerinin küresel olması sebebiyle Küresel Grafitli Dökme Demirler büyük oranda mukavemet niteliğine sahiptir. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin diğer bir özelliği ise uzama, çekme ve kopma değerleri açısından geniş bir aralığa sahip olmasıdır. Dökme demirlerin diğer türlerine göre mekanik özellikleri daha iyidir. Bunun en önemli sebebi ise yapısına ilave edilen alaşım elementlerinin çeşit ve miktarıdır. Buna bağlı olarak da oluşan grafitin miktarı, büyüklüğü ve şekli gibi özellikler grafitin mekanik özelliklerini değiştirmektedir [17].

2.2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirin Kimyasal Bileşimi

Dökme demirlerin kullanım amacına uygun üretimi üzerinde kimyasal bileşimin etkisi iki alaşım elementine (C ve Si) ve bunların grafitin oluşumuna olan etkilerine bağlıdır. Tablo 2.2 de küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşimi gösterilmektedir. Bu elementler artan yüzdelerde grafit oluşumunu arttırıcı etki sağlar.

Tablo 2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kimyasal Bileşimi

(TS 526 EN 1563 2000) [18].

Karbon	C	3,00 - 4,00
Silisyum	Si	2,00 - 3,00
Mangan	Mn	0,10 - 0,90
Fosfor	P	0,10 Maks.
Kükürt	S	0,03 Maks.
Magnezyum	Mg	0,030 - 0,080

Karbon, dökme demirde karbür (sementit) halinde ise “birleşik karbon” olarak tanımlanır. Karbon, serbest şekilde grafit halinde de oluşabilir. Bu itibarla, grafitleşme olayı, serbest karbonun çökmesi ya da kimyasal bileşik halindeki karbonun serbest hale dönüşmesi olayıdır. Grafitleştirici elementler grafit oluşumunu arttırmırlar. Kükürdün ve küreselleştirici elementlerin dışında, bileşimdeki Silisyum (Si), Mangan (Mn), Karbon (C) ve Fosforun (P) alaşım özelliğine olan etkisi Gri Dökme Demirin özelliğine olan etkilerine benzer. Alaşımın dayanımı bileşikdeki karbon oranı yükseldikçe azalır. Gri Dökme Demirdeki gibi Küresel Grafitli Dökme Demirde de Fosfor, alaşımda kırılganlık oluşturan bir elementtir. Bu sebeple Fosfor alaşım içinde bulunabildiği en az oranda (%0,10) tutulması zorunludur. Bileşimin kırılganlığını ve sertliğini yükseltmemek için alaşımdaki Mangan miktarı maksimum (%0,50) oranında olmalıdır. Küresel Grafitli Dökme Demirin oluşumunda küreselleştirici elementlerin etkilerinin azalmaması için en az kullanılması gereken element kükürttür. Bileşim içinde (%0,02) den fazla kullanılmamalıdır [18].

2.2.2. Sınıflandırma ve Mekanik Özellikler

Türk Standartları Enstitüsü (TSE)’ne göre KGDD’lerin sınıflandırılması Tablo 2.3. de verilmiştir. DDK olarak ifade edilen kısaltma “Küresel Grafitli Dökme Demir” manasında kullanılmaktadır. DDK kısaltmasından sonra gelen rakamlar ise kg/mm^2 türünden minimum çekme mukavemetini ifade etmektedir [10].

Küresel Grafitli Dökme Demirlerin sınıflandırılışı Alman DIN standartlarında aynen TSE’deki gibidir, fakat işareti GGG olarak ifade edilmektedir [18].

Tablo 2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirin TSE Göre Sınıflandırılması [17].

TS - 526	Çekme Dayanımı Kgf/mm ² min.	Akma Dayanımı Kgf/mm ² min.	Kopma Uzaması (%) min.	Sertlik (HB)	Mikroyapı
DDK - 40	42	28	12	140 - 201	Daha çok ferritik
DDK - 50	50	35	7	170 - 241	Ferritik / Perlitik
DDK - 60	60	40	3	192 - 269	Perlitik / Ferritik
DDK - 70	70	45	2	229 - 302	Daha çok Perlitik
DDK - 80	80	50	2	248 - 352	Perlitik
DDK - 35,3	35	22	22	-	Ferritik
DDK - 40,3	40	25	18	-	

Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Avrupa standartlarında sınıflandırılması, malzemenin mekanik özelliklerine göre yapılmıştır [10]. EN 1563 Avrupa standardında Küresel Grafitli Dökme Demirler EN GJS şeklinde ifade edilmektedir. Tablo 2.4. de küresel grafitli dökme demirin EN 1563 Avrupa standartlarına göre sınıflandırılması verilmiştir. EN GJS ifadesinden sonra gelen sayılar sırasıyla minimum çekme dayanımını ve % uzama değerlerini ifade etmektedir [17].

Tablo 2.4. Küresel Grafitli Dökme Demirin EN 1563 Avrupa Standartlarına Göre Sınıflandırılması [17].

Malzeme	Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa)	Uzama (%)
EN - GJS - 350 - 22 - LT	350	220	22
EN - GJS - 350 - 22 - RT	350	220	22
EN - GJS - 350 - 22	350	220	22
EN - GJS - 400 - 18 - LT	400	240	18
EN - GJS - 400 - 18 - LT	400	250	18
EN - GJS - 400 - 18	400	250	18
EN - GJS - 400 - 15	400	250	15
EN - GJS - 450 - 10	450	310	10
EN - GJS - 500 - 7	500	320	7
EN - GJS - 600 - 3	600	370	3
EN - GJS - 700 - 2	700	420	2
EN - GJS - 800 - 2	800	480	2
EN - GJS - 900 - 2	900	600	2

2.2.3. Alaşım Elementleri ve Etkileri

Grafit çekirdeklerin kolay oluşmasını sağlamak için ergiyik haldeki demirde, küreleştirici eklenmesinin akabinde grafitleştirici özelliği olan alaşımlar veya elementler aşılama uygulamasıyla demire eklenir. Bu elementler küreselleştirme sağlamanın yanında, istenilen döküm matris yapısının oluşmasına yardım eder ve mekanik özelliklerin artırılmasında rol oynar [19].

Karbon: Karbon, Küresel Grafitli Dökme Demirin yapısında ana alaşım elementi olarak yer alır. Karbon miktarı, grafit çekirdekleşme merkezlerinin sayısı ve alaşım pratiğinin seçimi ile

birlikte grafit kürelerinin boyut ve sayısını etkileyen en önemli etkenlerdendir. Küresel Grafitli Dökme Demirin bileşiminde bulunan Karbon oranı arttıkça, grafit kürelerinin sayısında da artış görülür. Bunların yanında Karbon, akışkanlık ve beslenme niteliklerini de geliştirerek dökülebilirliği artırır [20].

Silisyum: Karbür oluşumunu engellemek ve Grafit oluşumuna katkı sağlamak için, östemperleme işlemi esnasında toz halindeki ferrosilisyum, ergiyik metalin içine veya döküm işleminin yapılacağı kalıp boşluğuna ilave edilir. Bunun sonucunda ötektoid dönüşüm esnasında oluşan ferrit miktarı yükselerek, KGDD'in dayanımı ve sertliği artar, aşınmaya karşı direnci de iyileşir (19). Bunun yanı sıra Silisyum oranı yükseldikçe, ferritik dökme demirdeki sünek-gevrek geçiş sıcaklığı yükselir ve grafitler küresellikten sapmaya başlarlar. Bu yüzden maksimum sünekliğin ve tokluğun sağlanabilmesi için silisyum bileşimi %2'nin altında tutulmalıdır. Artan silisyum oranı ile sertlik, akma ve çekme mukavemetleri yükselir [20].

Manganez: Mangan ilavesi, KGDD'in sertlik değerini yükseltebilmek için yapılır. Lakin Manganın katılaşması esnasında, en son katılaştıran taneler arası bölgelere segregasyon eğiliminin olması ve karbür oluşmasını arttırması nedeni ile eklenecek miktar % 0.3 oranında olmalıdır. Bununla birlikte, % 1.5 oranında Mangan eklenmiş KGDD üretilmekte, kademeli ısı işlemler yardımıyla bu ürünlerdeki Mangan segregasyonu düzeltilebilmektedir [19].

Molibden: KGDD malzemenin sertliğini ve dayanımını yükseltmek için yüksek sıcaklıklarda eklenir. Molibden, özellikle tavlanmış ferritik sınıflarda yüksek sıcaklık çekme dayanımı, sürünme dayanımı (400 °C) ve termal yorulma direncini arttırmaktadır. Molibden sertlik değerini yükseltme açısından Cu ve Ni elementleri ile birlikte eklendiğinde, tek başına eklenmesinden daha etkili sonuç vermektedir. Mn gibi, katılaşma esnasında tane sınırlarına segregare olduğundan, eklenecek Molibden miktarı % 0.2-0.3 oranında olmalıdır [19,20].

Nikel: Sıvı ve katı küresel grafitli dökme demirde çözünebilen bir elementtir. Aynı zamanda, karbonun sıvı veya katı demirde çözünebilirliğini düşürdüğü için bir grafitleştirici olarak da sınıflandırılır. Nikel oranındaki %1'lik bir artı karbonun ergimiş demirdeki çözünürlüğünü %0.05 düşürür ve grafit-östenit geçiş sıcaklığını 3-4 °C yükseltir [20]. Sertleştirme, östemperleme veya temperleme işlemlerinin uygulanacağı dökme demirlerin üretimlerinde sıkça tercih edilmektedir. Özelliklerinin en önemlisi östenit-ferrit dönüşüm sıcaklığını azaltarak bir östenit kararlaştırıcı olarak rol almasıdır [19].

Bakır: KGDD malzemenin sertliğini arttırmak, mikro yapısında perlitik bir matris elde etmek için ve de maliyetinin ucuz olmasından dolayı en fazla tercih edilen alaşım elementidir. Perlitin oluşmasını pozitif etki ettiği için KGDD malzemenin çekme dayanımı, sertliğini ve yorulma dayanımı yükseltirken, darbe dayanımını ve sünekliğini azaltmaktadır. Bakırın malzeme sertliğini yükseltici etkisi Molibden'den düşük ancak Nikelden yüksektir [19].

2.2.4. Mikroyapısı

Ergiyik halde bulunan metale döküm işlemi öncesi uygun karışımda Magnezyum ilave edilerek Küresel Grafitli Dökme Demirler elde edilirler. Grafitlerin, lamelli yerine küresel olarak çökmesi Magnezyum yardımı ile olur. Katılaşma metodu Gri Dökme Demirden tümüyle ayrıdır. Katılaşma yönteminin farklı olması sebebiyle çekme özellikleri açısından Gri Dökme Demirlere göre iyi ve geniş aralıkta Küresel Grafitli Dökme Demir sınıfları oluşmasını sağlar. Farklı özellikler oluşması grafitin morfolojisi sebebiyle oluşmaktadır. Grafit lamellerin oluşturduğu gerilmenin yoğunluğuna küre grafitler sebep olmaz. Böyle olmasının sebebi küresel grafit ile en uyumlu " hacim-yüzey alanı " oranının yakalanmasıdır. Matris yapısı Küresel Grafitli Dökme Demirde ferritten perlit kadar çeşitlilik gösterebilir. Bileşimin, kimyasal karışımın ve ısıtılma işlemin kontrol altında tutulması ile matrisleri farklı Küresel Grafitli Dökme Demir elde edilir [8]. Şekil 2.7. de farklı mikro yapılarda küresel grafitli dökme demirlerin optik mikroskop görüntüleri gösterilmiştir.

Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demir: Normal şartlar altında adi kimyasal bileşimlerin, kesit kalınlığı 50 mm kadar olan iş parçalarında görülen yapılardır. Gri Dökme Demirlerin iki katı çekme mukavemetine sahiptir ve malzeme sert ve kuvvetli olur [8,21,22].

Ferritik - Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demir: Dökme demirlerin bu çeşidinde matris oranı, karışımın ve ya soğutma hızının düzenlenmesiyle kontrol edilebilir [8].

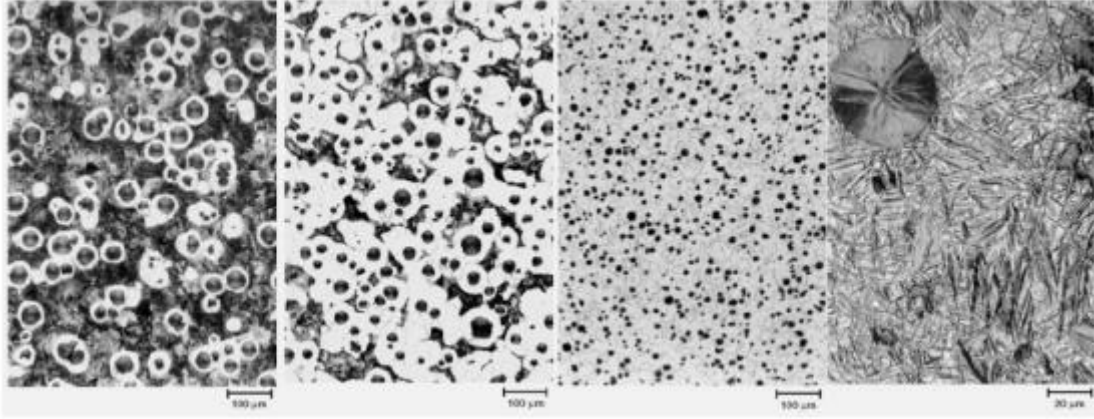
Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demir: KGDD malzemeleri ferrit matrisli olarak üretmek için üç yol mevcuttur. Bunlardan ilki ağırlığına göre dökme demirlere %0,20 oranında Magnezyum alaşımı ilave etmektir. İkincisi yolu ise, perlitik dökme demiri tavlama işlemi uygulamaktır. Bir diğer üçüncü yol olarak, çok yavaş bir şekilde sıvı demir katılaşmasını sağlamaktır. Bu yollar vasıtası ile çok yüksek uzama yeteneğine sahip Küresel Grafitli Dökme Demirler elde edilmektedir [8,21,22].

Östenitik Küresel Grafitli Dökme Demir: Bu tür dökme demir %35'e kadar Ni içeriğine sahiptir ve Küresel Ni – Resist adı ile anılır. Çok yüksek mekanik mukavemeti olup, korozyona karşı direnci yüksektir. Grafitleri küresel şekillerini bir miktar kaybederler. Matrisleri östenitten ve çok az perlitten meydana gelmiştir [8,21,22].

Beynitik (İğneli) Küresel Grafitli Dökme Demir: Küresel Grafitli Dökme Demirin yapısı su verme ve temperleme işlemi ile değiştirilerek beynitik matris içinde küresel grafitler olan bir yapı elde edilir. Bu tip dökme demirlerin yüksek mekanik mukavemeti ve sertliği mevcuttur [8,21,22].

Martenzitik Küresel Grafitli Dökme Demir: Bu tip dökme demirlere alaşım elementi eklenerek ya da ısıtılma işlem uygulaması yaparak Küresel Grafitli Dökme Demirin martenzit bir yapıda oluşması sağlanır. Çok gevrek ve sert bir fazdır. Küresel grafitli dökme demirlerin aşınmaya karşı dirençlerini yükseltir. Bu tip dökme demirler küçük sıcaklıkta temperlenebilir. Temperlemenin

işlem sıcaklığına göre başka mekanik nitelikler sağlanabilir. Molibden, Manganez, Krom, Nikel, Bakır ve Kalay sertleşebilirliğini arttırıp martenzit oluşmasını sağlar [8].



Şekil 2.7. Farklı Mikro Yapılarda Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Optik Mikroskop Görüntüleri (Matris yapısına göre soldan sağa; perlitik-ferritik, ferritik-perlitik, ferritik, beynitik KGDD) [8].

2.2.5. Üretimi

Küresel Grafitli Dökme Demir üretiminde iki temel aşama vardır. Bunlardan birincisi küreleştirici ilavesidir. Küreleştirici element olarak Magnezyum en etkili ve ekonomik olanıdır. Bileşim içinde min. % 0,015-0,05 Mg yeter kabul edilir. Üretimin diğer kademesiyse aşılama işlemidir. Bu kademedeki ergiyik metale en uygun aşılama başlatıcıları olan ferro silisyum alaşımları eklenerek aşılama taneciklerinin katılma başlatıcıları kadar erimeden kalmasıyla üzerinde katılmanın başlayacağı çekirdekler sağlanır. Nihayetinde grafitleşme merkezi miktarı arttıkça daha çok grafit küresi oluşmasını sağlanmaktadır. Aşılama bu açıdan, grafit oluşturma eğiliminin artması ve karbür oluşmasının önüne geçilmesini sağlar [23].

Küreselleştirme işlemini ergitme ve yapıyorsa kükürt giderme işlemi takip eder. Küreselleştirici olarak Magnezyum oranı, büyük ölçüde malzemenin bileşimindeki Kükürt ve Oksijen miktarına bağlıdır. Genellikle metalurjik şartları daha iyi sağlamak için magnezyum başka elementlerle alaşımlandırılır. Bazı uygulamalarda küreselleştirici ilavesi öncesinde ergiyik metale ön hazırlık işlemi uygulanır. Bu ön uygulamada SiC (Silisyum Karbür) kullanılması küreselleştirmenin başarı oranını arttırmakta ve karbür oluşum eğilimini de düşürmektedir [20].

Küreselleştirme işlemi ile birlikte veya daha sonra yapılan aşılama işlemi ise, metalde üzerinde katılma oluşacak çekirdekleri sağlamak amacıyla uygulanmaktadır. Çekirdek işlevi görecektanecikler katılma fazla aynı yapıda olabileceği gibi bir başka yapıda da olabilir. Bu tanecikler eklendikleri ergiyik metal içerisinde katılma başlatıcıları kadar erimediklerinde kristallerin oluşması ve büyümesi için en uygun ortam sağlanır. Aşılama; grafitleşmenin artmasına, hücrelerarası segregasyonun ve karbür oluşumunun azalmasına neden olmaktadır. Aşılama ile yapısal

üniformluk sağlandığı için yapısal özellikler de artmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerde en verimli aşılایıcılar Al, Ca, Ba, Mn, Zr ve %50 ile %80 silisyum içeren ferro silisyum alaşımlarıdır. Aşılama işlemi; potada yapılan aşılama, döküm sırasında akışta yapılan aşılama ve kalıpta aşılama olarak üç şekilde yapılabilmektedir [20].

2.2.6. Mühendislik Özellikleri

KDDD malzemelerin nitelikleri dökme demirler ile çelik arasındadır. Mekanik bakımdan çeliğe benzerken, fiziksel ve kimyasal bakımdan dökme demirlerle benzerlik göstermektedir. Bu sebeple çok geniş kullanım alanına sahiptirler [9].

Çekme mukavemeti

Uygulanan ısı işlem ve alaşımlandırma işlemine göre çekme mukavemeti, 40 kg/mm² ile 80 kg/mm² aralığında değişir. Gerilme ve uzama diyagramları çeliğe benzer. Akma noktası ise temper döküme göre yüksektir. Bu sebeple Küresel Grafitli Dökme Demirler ağırlıkça büyük yükleri taşıyabilirler. Elastikiyet özellikleri oldukça yüksektir [9].

Yorulma mukavemeti

Çekme mukavemetinin yorulma mukavemetine oranı olarak isimlendirilen dayanma oranı Dökme Karbonlu Çeliklere göre büyüktür. Gerilim değişme faktörü çeliklere göre düşük olduğundan dolayı şaft imali için çok uygundur [9].

Aşınma direnci

Aşınmaya karşı direnç, dökme demirlerin kendilerine özgü genel özelliğidir. Küresel Grafitli Dökme Demirler de aşınma dirençleri yüksek malzemelerdir. Sabit ve hareketli yükler altında geliş güzel dağılımlı gerilimlere karşı çok iyi direnç gösterirler. Bu sebeple Küresel Grafitli Dökme Demirler dişli çarkların üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır [9].

Titreşim Sönümleme

Grafitlerinin küresel halde bulunması sebebi ile titreşim söndürme özelliği Kır Dökme Demirlere göre daha iyidir [9].

Termal Şok

Gri Dökme Demirlerin termik şok dirençleri çok düşüktür. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde ise termik şok dirençleri yüksektir. Ani sıcaklıklara maruz kalan dökme demir malzemeler çatlayabilir ve bu çatlamalar malzemelerin iç kısımlarına doğru ilerleyebilir. İlerleyen bir çatlağın ucuna delik açılırsa çatlağın ilerlemesi durdurulmuş olur. Çatlak ilerlemek için yeni bir başlangıç noktası bulmak zorundadır. Aynı görevi Küresel Grafitli Dökme Demirlerde yapıda bulunan küre grafitler yapar [9].

Korozyona Direnç

Korozyon direnci açısından Kır Dökme Demirler ile Küresel Grafitli Dökme Demirler aynı korozyon direncine sahiptir. Zayıf asitlere, alkalilere ve deniz suyuna karşı dirençleri yüksektir.

Çeliklerden beş kat fazla korozyon direncine ve yüksek mukavemetli olduğundan dolayı kimya, petrol ve denizcilik endüstrilerinde kullanılır [9].

2.2.7. Kullanım Alanları

Küresel Grafitli Dökme Demir günümüzde çeşitli endüstri alanlarında uygulama imkânlarına ulaşmış bir malzeme türüdür. Aşağıda bu kullanım alanları ve parça adları ile ilgili bilgi verilmiştir [22].

Madencilik ve Metalürji: Pres makineleri, kırıcı gövdeler, pompa gövdeleri, konveyör dirsekleri, cüruf potaları, alüminyum ve kurşun ergitme potaları, sıcak hadde merdaneleri, kalıplama dereceleri, vb.

Makina: Akslar, dişliler, silindirler, hidrolik presler, dövme preslerinin kafa ve silindir kısımları, eğme makinaları çerçeveleri, krank presleri dişlileri, vb.

Ziraat: Ön tekerlek çatalları, transmisyon kutuları, traktör parçaları, pedallar, vb.

İnşaat: Yol inşaat makinaları, beton karıştırıcı parçaları, kreyn parçaları, vb.

Kimya: Doğalgaz boru hatları, rafineri valfleri, valflar, pompalar, plastik ekstrüzyon silindirleri, kurutma silindirleri, plastik karıştırıcılar, vb.

Ulaştırma: Diferansiyel dişli kutusu, uçak konstrüksiyonu, volanlar, dişli kutuları, dişli selektör çatalları, tekerlek kalıpları, vb.

Güç: Kontrol halkaları, su türbinleri dökme parçaları, gaz türbini kompresör kutuları, brülör gövdeleri, kompresör gövde ve kafaları, sıcağa dayanıklı fırın parçaları, vb. [9,22].

2.3. Yüzey Kaplama Yöntemleri

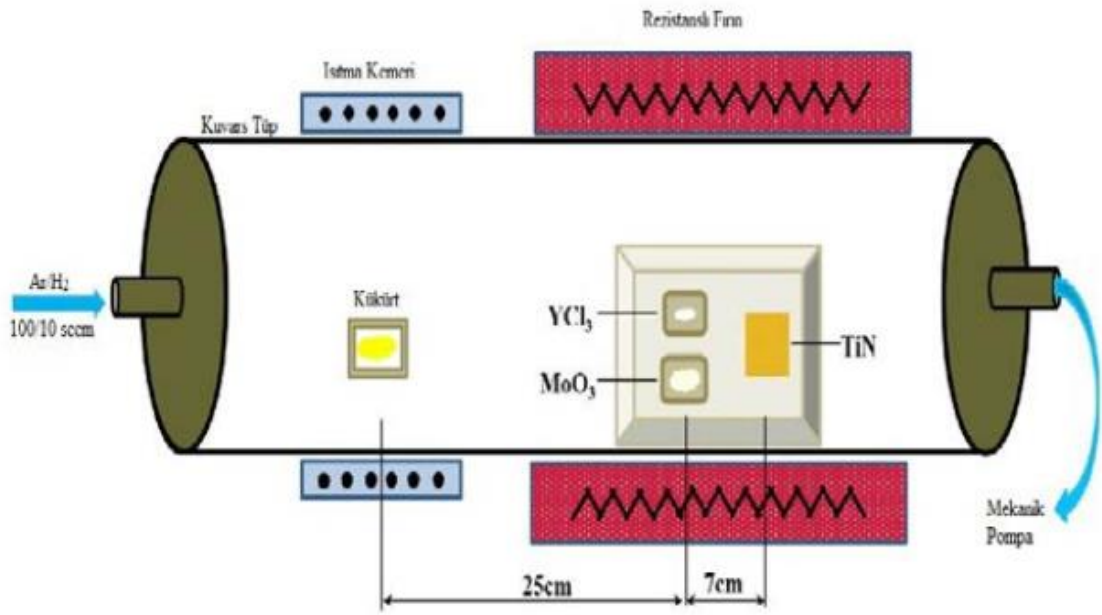
Malzemelerin yüzeylerinde, termo reaktif difüzyon, termal bariyer kaplama, kimyasal buhar çöktürme ve fiziksel buhar çöktürme yöntemleri gibi yüzey kaplama yöntemleri kullanarak yüzey özellikleri geliştirilebilmektedir. Yapılan kaplama işlemi sonrasında malzemelerin yüzeylerinde sertlik değerinde artış, aşınmaya karşı direnç ve korozyona karşı dayanım gösteren bir kaplama tabakası oluşturulmaktadır. Yapılan bu yüzey kaplamalarında amaç, malzemelerin özelliklerini geliştirmektir. Malzeme yüzeylerine uygulanan kaplama yöntemleri ile oluşturulan yüzeyler, aşınma direnci yüksek olurken, mekanik özelliklerde de pozitif yönde gelişim olmaktadır. Bu yöntemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir. Bunlar;

1. Fiziksel Buhar Çöktürme Yöntemi (PVD) İle Kaplama,
2. Kimyasal Buhar Çöktürme Yöntemi (CVD) İle Kaplama,
3. Termal Bariyer Kaplama Yöntemi (TBC),
4. Termo Reaktif Difüzyon Yöntemi (TRD) İle Kaplamadır [24].

2.3.1. Kimyasal Buhar Çökeltme Yöntemi

Kimyasal buhar çöktürme yöntemi (CVD) (Chemical Vapour Deposition), malzemenin kapalı bir kapta tutularak ve kap içindeki malzemenin yüzeyinin sıcaklığı artırılarak, buhar halinde kabın içine tatbik edilen taşıyıcı gazla malzeme yüzeyinin kimyasal reaksiyonu sonucunda oluşan katı bir malzemeyle, malzeme yüzeyinin kaplanması esasına dayanır. Şekil 2.8. de CVD ile kaplama düzeneği görülmektedir.

Kimyasal buhar çökeltme yöntemiyle yapılan kaplamalar, genellikle 900 ila 1100 °C sıcaklıklarda, 2 ila 4 saat süren işlemlerle, esas malzeme yüzeyinde 10-30 p kaplama tabakası oluşturabildiğinden dolayı bu yöntem maliyetli görünmektedir. Bunun yanında aşırı sıcaklıkta tepkime zincirlerine ve vakumlama işlemlerine ihtiyaç duyulabilir. Bununla birlikte malzemeler aşırı sıcaklıklarda bütünlüğünü korur ve yüksek enerjiden dolayı oldukça mukavemetli yüzey kaplamaları oluşur. Bu sebepten kimyasal buhar çökeltme yöntemi ile oluşturulan yüzeyleri kaplanmış malzemeler askeri alanlarda, uzay ve havacılık gibi alanlarda kullanılmaktadır [25].



Şekil 2.8. CVD İle Kaplama Düzeneği [24,26].

2.3.2. Fiziksel Buhar Çökeltme Yöntemi

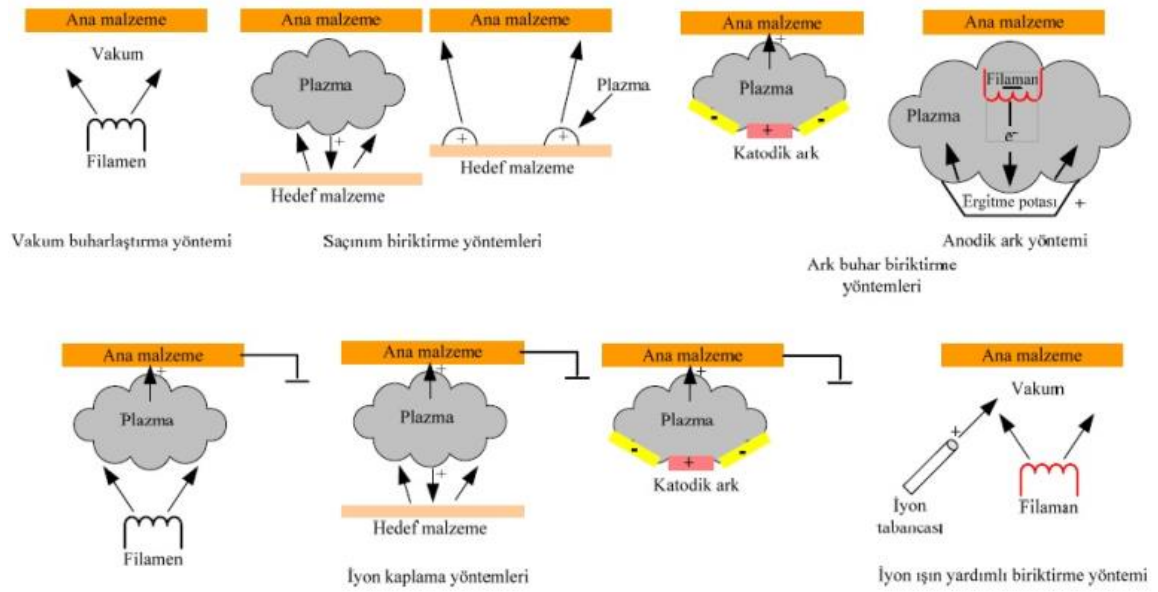
Geçmişten bu yana endüstri sektöründe kullanılan fiziksel buhar çökeltme yönteminde (Physical Vapor Deposition, PVD); vakumlu bir ortamda kaplama yapılan malzeme yüzeylerinde ince bir film tabaka şeklinde birikmesi istenen kaplayıcı malzeme; rezistans, elektron

bombardmanı, indüksiyon akımı ve katodik ark yöntemi vb. uygulamalarla buharlaşması sağlanır. Başka bir deyişle, yüksek enerjiyle plazma haline getirilen kaplama maddesi, kaplama yapılacak malzeme yüzeyine kaplanır. Şekil 2.9 da PVD işlem teknikleri gösterilmektedir.

Fiziksel buhar çökeltme işleminde yüksek basınca ihtiyaç duyulur. Bu sebepten malzeme basınca karşı dayanıklı olmalıdır. Ancak bu kaplama yöntemi ile elde edilen kaplamalar kimyasal buhar çökeltme yöntemiyle oluşturulan kaplamalara göre dayanıksızdır. Çünkü fiziksel buhar çökeltme yönteminde kaplama malzemesi yüzeye yapışırken, kimyasal buhar çökeltme yönteminde kaplama malzemesi ana malzemeye difüze olur [25].

PVD yöntemleri aşağıdaki dört şekilde uygulanmaktadır. Bunlar;

- İyon Kaplama Yöntemi,
- Ark Buhar Çökeltme Yöntemi,
- Püskürtme Çökeltme Yöntemi,
- Vakum Buharlaştırma Yöntemidir [24,27].



Şekil 2.9. PVD İşlemi Teknikleri [24,27].

2.3.3. Termal Bariyer Kaplama (TBC)

İleri seviye türbinli motorlarda yanma odaları ve türbin gibi sıcak bölümlerinde, motor parçalarını sıcak gazların negatif etkilerinden korunması amacı ile termal bariyer kaplamalar kullanılır. İki veya daha fazla katmandan oluşan koruyucu kaplamalardır [28].

Şekil 2.10. da görüldüğü üzere Termal bariyer kaplama yöntemleri genel olarak; Ni bazlı bir süper alaşım altlıktan, sıcaklık yalıtımı oluşturan seramik bir üst kaplamadan, seramik üst kaplamanın metalik altlığa yapışmasını sağlayan ve altlığı oksitlenmeye karşı koruyan bir bağ kaplamadan (BC-Bond Coat) ve kaplama uygulaması sırasında oluşan ve servis sırasında bağ kaplamanın oksitlenmesiyle “termal büyüyen oksit”ten (TGO - Thermally Grown Oxide) oluşur [28,29].



Şekil 2.10. TBC Sistemi [24,28,30].

Genel olarak İtiryum Oksit ile kısmen kararlı hale getirilmiş Zirkonyum Oksitten oluşmuş seramik üst kaplamanın, iletkenliği düşüktür. Seramik üst kaplama yanmış gaz atmosferine karşın kimyasal eylemsizliğe ve Ni bazlı süper alaşımlardaki gibi yüksek termal genleşme katsayısına sahiptir. Türbinlerin kanatlarını çevrenin olumsuz etkilerinden korumak için üst kısımlarına oksitlenme direnci olan bağ kaplamalar tatbik edilir. Bağ kaplamalar seramik üst kaplamanın altlığa yapışmasını engellemek amacı ile tasarlanmış olmakla birlikte, seramik üst kaplamayla metalik altlık arasında esas bağlayıcı tabaka tercihen ve genel olarak α-Alüminyum Oksitten (Al₂O₃) oluşan termal büyüyen oksittir (TGO). Termal bariyer kaplama yöntemlerinin bu dört elemanı (bağ kaplama, altlık, termal büyüyen oksit ve üst kaplama) yapısal olarak birbirleriyle etkileşimli ve dinamik durumundadırlar [28].

2.3.4. Termo Reaktif Difüzyon Yöntemi

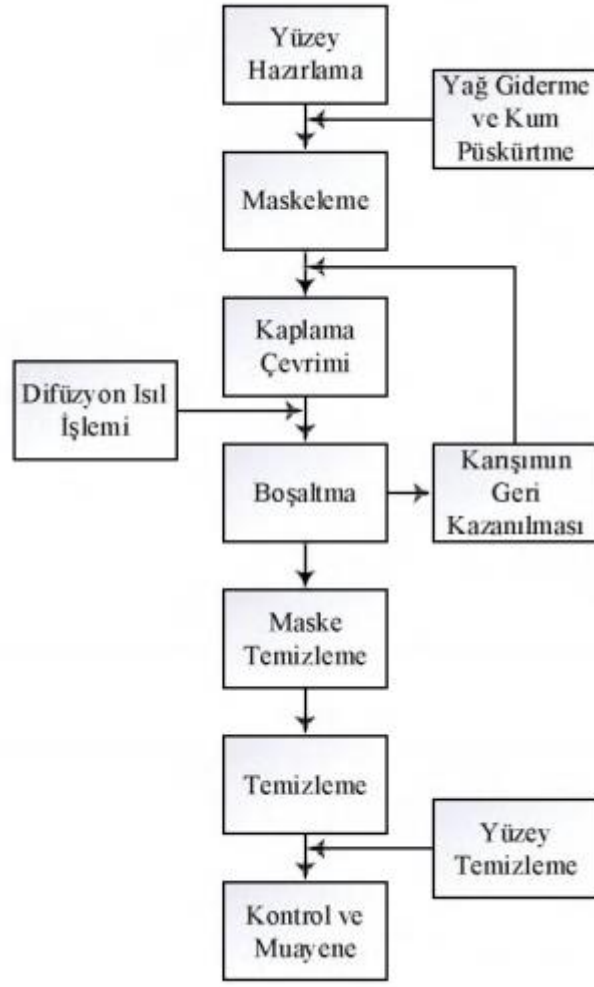
Makine sanayisinde metaller ve alaşımlarıyla çalışılmaktadır. Bu sebeple, aşınma, kimyasal tepkimeler ve korozyon sonucunda metal ve metal alaşımı malzeme olumsuz etkilenecek zamanla uygulama yapılmayacak duruma gelmektedir. Bu olumsuz durumlar, başta ülkelerin ekonomileri

olmak üzere fabrikaların verimliliğini düşürerek ekonomilere de önemli ölçüde zarar vermektedir. Bu nedenle bilim ve endüstri çevreleri ekonomik kayıpları azaltmak adına bu alandaki çalışmalara önem vermiştir. Bunun sonucunda 1970'lerde Japonya'da difüzyon yöntemlerinden olan ve endüstri camiasında Toyota difüzyon tekniği olarak da isimlendirilen termo reaktif difüzyon (TRD) tekniği geliştirilmiştir [25].

TRD (Termo reaktif difüzyon) tekniği; çelik malzeme yüzeylerinde Karbo-Nitrür, Nitrür ve Karbür gibi aşınma direnci yüksek ve sert olan tabakaların oluşturulduğu bir yöntemdir. TRD tekniğinde çelik altlık ve ana malzeme yüzeyinde, Azot ve Karbon; Vanadyum, Titanyum, Tantalum, Neobyum, Molibden, Krom ve Tungsten gibi Nitrür veya Karbür yapıcı elementler ile birikebilen bir kaplama tabakası oluşturmak için difüze olur. Difüze olan Azot ve Karbon biriken kaplama tabakasında Nitrür ve Karbür oluşturu elementler ile altlık malzemenin yüzeylerinde metalürjik olarak bağlanarak yoğun bir Nitrür ve Karbür kaplamalar oluşturulacak şekilde reaksiyona girer [31].

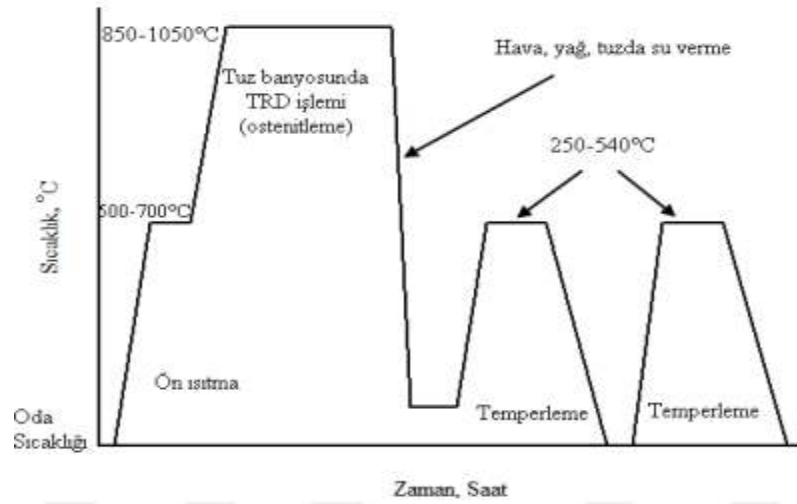
TRD tekniği alışılagelmiş yüzey sertleştirme yöntemlerine benzememektedir. Çünkü alışılagelmiş yüzey sertleştirme yöntemlerinde altlık malzemenin yüzeyinin sertleştirilmesi amacıyla Karbon ve Azot, dış kısımdan difüze edilmektedir. TRD tekniği, konvansiyonel difüzyon yöntemine benzemesine rağmen, bu teknikte altlık malzeme yüzeyinde kaplama tabakası oluşması gerçekleşmektedir [32].

TRD yöntemi termo kimyasal bir uygulama olmakla birlikte katı, sıvı ya da gaz ortamlarda Karbür yapıcı elementlerin çeliğe yayılımını içerir. Temel üç bileşenden oluşan termo reaktif difüzyon tekniğinde, kaplanan numunelerin içerisine gömülen tozlar büyük önem teşkil etmektedir. Kaplama işlemi, kaplamanın element kaynağı karışım tozlarının birbirleri ile sinterlenmemesi için bir aktivatör vasıtasıyla yapılır. Silisyum Oksit (SiO_2) veya Al_2O_3 genellikle inert malzeme iken, NH_4O ise aktivatör olarak kullanılır. Genellikle difüzyon tekniği ile kaplanan numunelere, kapalı bir kutu içinde, fırında 900 ila 1000 °C'de 2 ila 5 saat süreler boyunca kaplama işlemi uygulanır. Kaplamaların türüne ve malzemenin kalınlıklarına göre sıcaklık ve süre değişebilmektedir. Kaplama yapılan malzeme kutu tozlarında soğutulabildiği gibi fırının dış kısmında da soğutulabilmektedir. Bunun yanında altlık malzemenin mukavemetinin artırılması amacıyla ısıtım işlemi uygulanan ve TRD yöntemiyle fırında soğutularak oluşan kaplamalar, 800 - 850 °C de tuz banyosunda da tutulabilirler. Şekil 2.11. de termo reaktif difüzyon prosesinde işlem sırası görülmektedir. Yapılan bu kaplama işlemi ile, yeterli Karbon içeriğine sahip çelik parçaların yüzeylerinde 5-12 μm 'lik bir refrakter karbür tabakası oluşturulabilir [25].



Şekil 2.11. Termoreaktif Difüzyon Prosesinde İşlem Sırası [25,33].

Yüksek derecede sertlik, darbelere karşı dayanım ve aşınmaya karşı direnç TRD işlemleriyle yapılabilir. TRD yöntemiyle malzemenin yüzeyinde TiC ve TiCN'e oranla oldukça sert ve yüzeyle bağı daha iyi olan kaplamalar oluşturulabilir. Oluşan bu kaplamalar takım malzemelerinin ömrünü artırılırken yağlayıcı kullanımında azalma olur. Aşınma direncinin, sertliğin yüksek olması ve yağlayıcıya olan ihtiyacın az olması vb. nitelikler termo reaktif difüzyon yöntemiyle yapılabildiğinden otomotiv sanayisinde, pres takımlarında günümüze kadar kullanılmış ve halen kullanımı sürmektedir. Fakat TRD tekniğinin kullanılması otomotiv sanayisiyle kısıtlanmamış; vida, cıvata, şaft, mil yatağı, kılavuz, pim vb çoğu mühendislik malzemesi içinde uygulanmıştır [33].



Şekil 2.12. TRD İşlemi Akış Şemasının Gösterimi [33].

Parçalara TRD yöntemi uygulanmadan önce distorsiyonu en aza indirmek ve işlemin süresini azaltmak amacıyla ön ısıtma uygulaması yapılmaktadır. Kaplanmış malzemeler soğutulduktan sonra, sertleştirmek için tekrar ısıtılabilir veya banyo sıcaklığı östenitleşme sıcaklığında termo reaktif difüzyon işlemi uygulanabilir. Termo reaktif difüzyon işlemi sonrasında parçalara, hava ortamında tuz ya da yağda sert altlık malzeme üretmek için su verilebilir. Temperleme işlemi su verme işleminden sonra gerçekleştirilir. Şekil 2.12. de TRD işlem akış şeması gösterilmektedir. Neticede çelik malzeme yüzeyinde 5 μm - 12 μm kalınlığında tabakaya ve 3000 HV değerinde yüksek bir sertliği olan kaplama tabakası oluşur. Malzemelerin yüzeylerinde sağlanan sertlik değeri, diğer sertleştirme tekniklerine göre daha yüksektir [33]. Tablo 2.5. de farklı yüzey sertleştirme yöntemleri ile elde edilmiş sertlik değerleri verilmiştir.

Tablo 2.5. Farklı Yüzey Sertleştirme Yöntemleri İle Elde Edilmiş Sertlik Değerleri [33].

Yüzey Sertleştirme Yöntemi	Yüzey İşlemi Gören Malzeme	Ort. Sertlik Değeri (HV)
Karbürleme	Çeliklerin geniş bir bölümü	850
Karbonitrürleme	Karbon çelik	850
	Cr-Mo çelik	650
Nitrürleme	Cr-Mo-V çelik	900
	Cr-Mo-Al çelik	1100
	Yüksek alaşımlı çelik	1100
İndüksiyon ve Alev ile Sertleştirme	% 0,4 C içeren çelik	500-600
	% 0,5 C içeren çelik	600-700
Borlama	Yumuşak çelik, takım çelikleri	1500
Kromlama	Karbon çelikleri, takım çelikleri	1500
Termo Reaktif Difüzyon	Takım çelikleri	3000-4000

2.3.4.1. Termo Reaktif Difüzyon (TRD) Yönteminde Karbürleme Ortamı

Katı, sıvı ya da gaz ortamlarında karbür yapıcı elementlerin çelik malzemeye yayılması olarak tanımlanan termo kimyasal işleme karbürleme denir. Karbür tabakaları, termo reaktif difüzyon işlemi ile aşağıdaki ortamlarda oluşturulur [31].

1. Tuz Banyosu Ortamlarında TRD Yöntemiyle Karbür Kaplama
2. Katı Ortamlarda TRD Yöntemiyle Karbür Kaplama
3. Tuz Banyosu Ortamlarında TRD Yöntemiyle Birden Fazla Karbür Kaplama [24].

2.3.4.1.1 Tuz Banyosu Ortamlarında TRD Yöntemiyle Karbür Kaplama

Tuz banyosu yönteminde parçalarda çarpılmayı en aza indirmek ve işlemin süresini kısaltmak için başlarda 500-700 °C sıcaklıkları arasında parçalar ısıtılır. Akabinde elektrikli tuz banyosunda ya da gaz ile ısıtılan fırınlarda erimiş boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ veya $\text{Na}_2\text{O}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$), uygun karbür ya da nitrür yapıcı elementler ve bor karbür, alüminyum vb. indirgeyici katkı malzemeleri ilave edilerek 850 - 1050 °C sıcaklıkları arasında 0,5 - 10 saat süre ile uygulama gerçekleştirilir. Banyo sıcaklığı belirlenirken tercih edilen altlık malzemelerin sertleşme sıcaklık derecesine uygunluğuna dikkat edilir. Sürenin seçilmesinde malzeme yüzeyinde istenilen kaplama kalınlığı ve altlık malzemelerin çeşidi önem arz eder [33].

Nitrür ya da karbür oluşturu element ilave edilmesi işleminde ferro alaşım tozları ya da bu elementlerin oksitleri kullanılabilir. Nitrür ya da karbür oluşmasında; Vanadyum, Titanyum, Niyobyum, Wolfram, Molibden, Krom vb. elementler erimiş boraks banyosunda çözünerek, altlık malzemedeki Karbon ya da Azot'da kaplama tabakasına yayılarak 2 ila 20 µm kalınlıklarında kaplamalar oluşturulur [33].

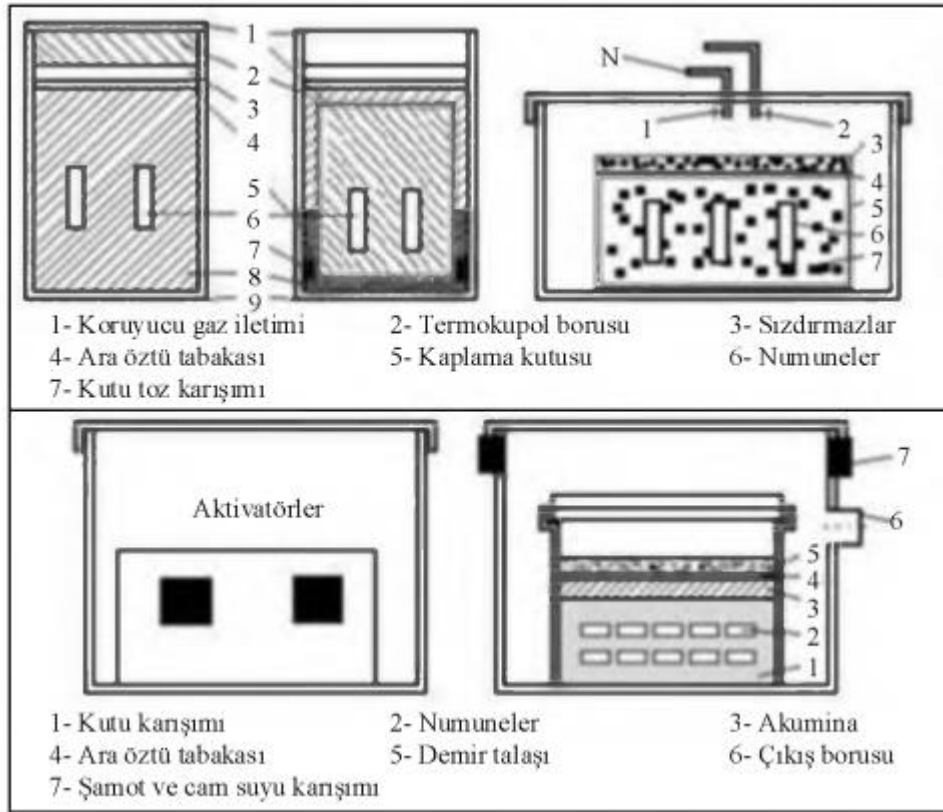
Kaplama işleminden sonra malzemede boyutsal kararlılığın sağlanması ve çarpımalara engel olmak için hava, su ya da yağ ortamında soğutma ile 150 ila 200°C ya da 500 ila 600 °C sıcaklıkları arasında bir ya da iki kademeli menevişleme işlemi uygulanır. TRD işleminden sonra malzemede tam sertlik değerleri sağlanması için ısıtım işlemler, koruyucu atmosfer, vakum, koruyucu tuz vb. ortamda uygulanabilir [33].

2.3.4.1.2 Katı Ortamlarda TRD Yöntemiyle Karbür Kaplama

Katı ortamlarda karbürleme, genel olarak kutu sementasyon benzeri bir tekniktir. Yarı kapalı ya da kapalı kutu içersine koyulan toz halinde karbür tabakası oluşturacak malzemeye, uygulama yapılacak numunelerin gömülerek, belirli sıcaklıklarda belirli sürelerde tutulmasıyla işlem yapılır. Şekil 2.13. de TRD yöntemlerinde kutu tasarımları gösterilmektedir. Kutu içindeki toz karışımı aşağıdaki malzemelerden oluşmaktadır [31].

- a. Karbür kaynağı element olarak mikron boyutta saf ya da ferro - alaşım şeklinde metal tozları (Fe – Nb, Fe - Cr, Fe - Ti, Fe - V).

- b. Kaplama tabakasının düzenli büyümesine etkisi olan NaX ve NH₄X gibi aktivatörler (X; Klor (Cl), Flor (F), İyot (I) ve Brom (Br) temsil etmektedir).
- c. Serbest kalan metalin hava ile temasını önleyen ve oksijeni tutan oksidanlar (katı ortam karbürlemede difenil (C₁₂H₁₀), naftalin (C₁₀H₈), antrasin vb. hidro karbonlar).
- d. Refrakter killerden oluşan inert dolgu malzemeler (Al₂O₃, SiO₂, Mg₂O₃); hem karbür oluşturan element parçacıklarının toplanmasını ve numune yüzeyine yapışmasını önler hem de ortamdaki oksijenini tutucu olarak görev yaparlar [31].



Şekil 2.13. TRD Yöntemlerinde Kutu Tasarımları [25].

2.3.4.1.3 Tuz Banyosu Ortamlarında TRD Yöntemiyle Birden Fazla Karbür Kaplama

Tuz banyosu içine aşırı oranda karbür yapan element ilave edilmesiyle malzemenin yüzeylerinde birden çok karbür içeriği olan kaplama oluşturulması yöntemidir. Kaplama işlemi sonrasında yüzeyde yüksek sertlik ve aşınmaya karşı dayanıklı kaplamalar elde edilmektedir. Malzemelerin yüzeylerindeki sertlik, banyo içine eklenen ferro alaşım oranlarına göre farklılık göstermektedir [24].

TRD yöntemiyle tuz banyosu içerisinde birden çok karbür ihtiva eden yüzeylern elde edilmesine ana malzeme, sıcaklık ve süre etken olarak görülmezken, banyo içerisine ilave edilen ferro alaşım karışımları etkilidir [24].

2.3.4.2. TRD Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Avantajları;

- Önceden hazırlanmış bir fırına gerek olmadığı için her türlü fırında yapılabilir,
- Basit bir donanımına sahiptir ve uygulaması kolaydır,
- Atık, zehirli gaz yoktur ve çevreye zararlı değildir,
- Girinti çıkıntı olan bölgelerde uniform kaplama gerçekleştirilebilir,
- Az sayıda ve büyük parçalar için ekonomiktir,
- Yağlayıcıya gerek yoktur ya da yağlayıcıdan tasarruf edilir,
- Malzemeye yapışan toz kolay temizlenebilir,
- Karbürlemeden sonra sementle edilen malzemelere sertleştirme işlemi gerçekleştirilebilir [33,34].

Dezavantajları;

- İnce karbonlama derinliklerinde toleranslar hassas değildir,
- Yüzeyin karbon miktarı tam olarak kontrol edilemez,
- Karbonlama bileşiği ve kutu hacminin, parçaların ısınma ve soğuma hızının azalması nedeni ile işlem süresi uzar [33].

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Giriş

Yapılan bu çalışmada KGDD malzeme yüzeyi TRD yöntemi ile tuz banyosu içinde VC ile kaplanması işlemi uygulanmıştır. Yapılan işlemde çalışma parametreleri, 850, 900 ve 950 °C sıcaklık olarak seçilmiş, numuneler 2, 4 ve 6 saat sürelerde ısıtılma işlemi fırını içinde bekletilmiştir. Fırın içerisinden çıkarılan numuneler daha sonrasında yağ ortamında soğutulmuştur.

TRD yöntemi ile tuz banyosu içinde kaplanan KGDD numunelerin yüzeylerinde metalografik incelemeler yapılmıştır. KGDD numunelerin kaplanan yüzeyleri orta noktasından iki parçaya bölünerek kesitinde optik mikro yapısı incelenmiş, SEM incelemesi yapılmış, kaplama ve kaplama kalınlıkları tahlil edilmiştir. X-RAY, EDS ve Mapping incelemeleri ile kaplama tabakasında meydana gelen karbür fazları ile ana malzemede mevcut fazların belirlenmesi sağlanmıştır. Yüzeyleri kaplanan numunelerde görüntüleme ve mevcut fazların tespitinden sonrasında kaplama yapılan yüzeylerde mikro sertlik değeri ölçülmüştür. Bu çalışmada yüzey kaplamasından sonra malzemenin mekanik özelliklerin iyileşmesi amaçlanmıştır.

3.2. Kaplanacak Ana Malzemenin Hazırlanması

Yapılan bu uygulamada KGDD'in (GGG 60) kimyasal bileşenlerinin % ağırlık bileşeni Tablo 3.1. de verilmiştir. Çalışmada 15x15x10 mm boyutunda numuneler, 150x150x200 mm ölçülerindeki kütükten hassas kesme cihazıyla kesilerek hazırlanmıştır.

Tablo 3.1 Küresel Grafitli Dökme Demirin (GGG 60) Kimyasal Analizi [35].

GGG - 60 Dökme Demir Kimyasal Analizi							
%C	%Si	%P	%S	%Mn	%Cu	%Mg	%Cr
3,6	2,388	0,022	0,01	0,462	0,516	0,058	0,046
%Ni	%Al	%Co	%Ti	%Nb	%V	%Mo	%Fe
0,043	0,007	0,009	0,011	0,001	0,007	0,026	92,794

3.3. Tuz Banyosunun, Karbür Yapıcı ve İndirgeyici Elementlerin Hazırlanması

Yapılan uygulamada tuz banyosu hazırlanması için, Eti Maden Bor işletmelerinden temin edilen boraks kullanılmıştır. Karbür oluşumu sağlayan element olarak ise BC Teknoloji San. Tic. Ltd. Şti. şirketinden satın alınan 43 µm altı Fe-V tozu kullanılmıştır. Karbür yapıcı Fe-V tozu kimyasal bileşimi Tablo 3.2. de gösterilmiştir. Alüminyum ise indirgeyici element olması adına işleme alınmıştır.

Tablo 3.2. Fe-V Kimyasal Analizi [36].

Kimyasal	%V	%C	%Al	%P	%S
Analiz	82	0,25	1,5	0,03	0,03

3.4. Tuz Banyosu İçinde TRD Kaplamasında Kullanılacak Malzemeler

Yapılan deney içerikli çalışmada, TRD yöntemi kullanılarak tuz banyosunda yapılan kaplamada kullanılan malzemeler, ısıtıl işlem fırını ve 304 paslanmaz çelik potadır. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2. de 304 paslanmaz çelik pota ve ısıtıl işlem fırını görülmektedir.



Şekil 3.1. 304 Paslanmaz Çelik Pota



Şekil 3.2. Isıl İşlem Fırını

3.5. Tuz Banyosu Karışımı Oranı

Yapılan deneysel uygulamada, kullanılan tuz banyosu karışımı oranı Tablo 3.3 de gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Tuz Banyosu Karışım Oranı

Element	Boraks	Fe-V	Al
Karışım % Oranı	84	13	3

3.6. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Yapılan deneysel çalışmada kullanılan KGDD numuneler, hassas manuel kesme cihazı ile (Metkon Metacut 250 markalı) 15x15x10 mm boyutlarında kesme işlemi yapılmıştır. Kesilen numunelerin yüzeyleri kaplama işleminden önce 240, 800 ve 1200 mesh zımpara ile Mikro Test markalı yarı otomatik zımparalama cihazı yardımı ile zımparalanmıştır. Yapılan zımparalama uygulamasından sonra yüzeylerinin oksitlenmesini engellemek için numune yüzeyleri alkol ile temizlenmiş ve kaplama işlemi için hazır hale getirilmiştir.

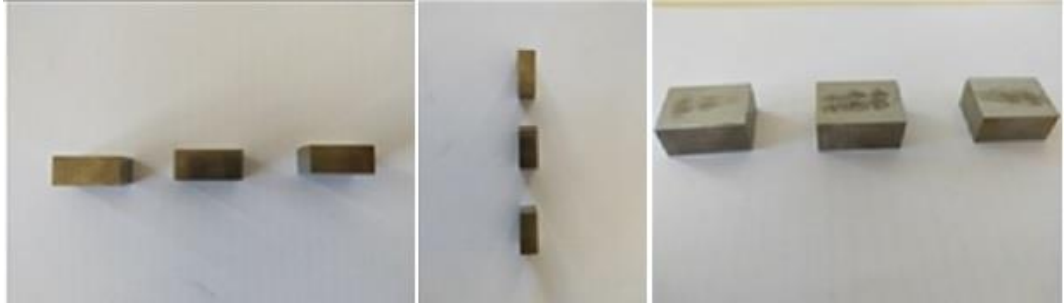
Hassas manuel kesme cihazı Şekil 3,3’de, zımparalama parlatma cihazı Şekil 3,4’de, kaplama öncesi hazırlanan numuneler Şekil 3,5’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Hassas Manüel Kesme Cihazı



Şekil 3.4. Yarı Otomatik Zımparalama ve Parlatma Cihazı



Şekil 3.5. Kaplama İşlemi İçin Hazırlanan Numuneler

3.7. Tuz Banyosu İçeriğinin Hazırlanması ve Kaplama İşlemi

Tuz banyosunun hazır edilmesi için yapılan bu çalışmada tablo 3.3 (Tuz banyosu karışımı) de gösterilen oranda boraks, paslanmaz pota içinde 850 °C sıcaklıkta 30 dk. süre tutularak ergiyik hale getirilmiştir. Sonrasında Al ve 43 mikron altı Fe-V ilave edilmiştir. Tuz banyosunun homojenliği için 304 çelik pota dış ortamda 3 dak. karıştırılıp tuz banyosu ergiyiği hazırlanmıştır. Tuz banyosunda TRD yöntemi 850, 900 ve 950 °C sıcaklık 2, 4 ve 6 saatlik sürelerde uygulanmıştır. Numune yüzeylerinin kaplanması işleminden sonra yağda soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yağda soğutma işleminden sonra ise numune yüzeylerinde oluşan tuz ve yağ kalıntıları 80 mesh ölçüsünde su zımparası ile temizlenmiştir.

3.8. Metalografik İncelemeler

Tuz banyosu içerisinde TRD yöntemi ile yüzeyleri kaplanan numunelere aşağıdaki işlemler uygulanmıştır.

1. Kaplama yapılan numunenin optik görüntüsünün hazırlanması
2. Kaplama yapılan numunenin mikro sertlik değerinin analizi
3. Kaplama yapılan numunenin EDS , Mapping ve SEM analizlerinin incelenmesi
4. Kaplama yapılan numunenin XRD sonucunun incelenmesi

3.8.1. TRD Yöntemi İle Tuz Banyosunda Kaplama Yapılan Numunelerin Optik Görüntülerinin Hazırlanması

TRD yöntemi ile Tuz banyosunda kaplama yapılan KGDD (GGG 60); Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üni. Metalurji ve Malzeme Müh. bölümü bünyesinde bulunan metalografik inceleme laboratuvarında, hassas kesme cihazı ile kesme işlemi yapılmıştır. Daha sonra bakalit cihazı (Metkon Ecopress 50 markalı) ile bakalit işlemi yapılmıştır. Bakalit işlemi sonrasında yarı otomatik zımparalama ve parlatma makinesi (Mikro Test markalı) kullanılarak zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Zımparalama uygulamasında sırasıyla 240, 320, 600, 800, 1200 ve 2500 mesh ölçülerinde zımparalar ile zımparalama işlemi yapıldıktan sonra çuha ile birlikte parlatma işlemi uygulanmıştır. Zımparalama uygulamasında 300 devir/dk. hızla 1,5 bar basınçta 15 dk. zımpara işlemi gerçekleştirilmiş olup, parlatma işlemi için 150 devir/dk. hızla 0,8 bar basınç altında 2 mikron alümina süspansiyon ile 3 dk. süreyle yüzey parlatılarak dağlama işlemine hazır hale getirilmiştir. Kaplama tabakası kesitinin ve ana malzemenin mikro yapı analizi amacıyla parlatılan yüzey, %3 oranında nital dağlayıcı ile dağlanmıştır. Yapılan dağlama uygulamasından sonra kaplamanın kalınlık ve mikroyapı fotoğrafları için dijital kamera monte edilmiş (Clemex tipli) ışık mikroskobu (Nikon Eclipse MA 100 model) ile kaplamanın kalınlık ve mikroyapı fotoğrafları tahlil edilmiştir. Şekil 3.6. da bakalit alma cihazı, Şekil 3.7. de Nikon Eclipse MA 100 marka optik mikroskop görülmektedir.



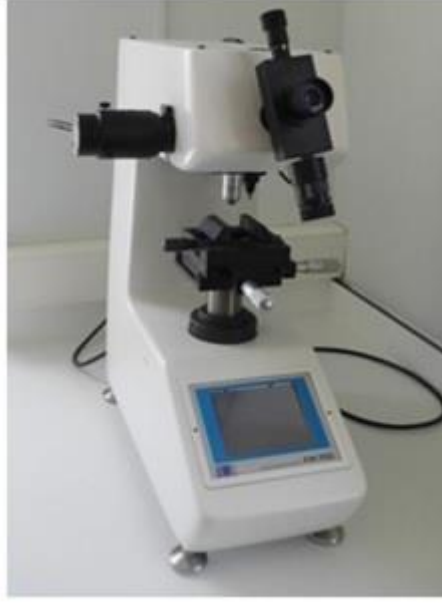
Şekil 3.6. Bakalit Cihazı



Şekil 3.7. Nikon Eclipse MA 100 Marka Optik Mikroskop

3.8.2. TRD Yöntemi İle Tuz Banyosunda Kaplama Yapılan Numunelerin Mikro Sertlik Değerlerinin Analizi

TRD yöntemi ile tuz banyosunda kaplama yapılan KGDD (GGG 60) numunelerin yüzeylerindeki mikro sertlik değerlerinin ölçülebilmesi için Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üni. Metalurji ve Malzeme Müh. bölümü bünyesinde bulunan metalografi laboratuvarında mevcut mikro sertlik cihazı (Future Tech FM-700 model) kullanılmıştır. Mikro sertlik ölçümlerinde Vickers yöntemi kullanılmıştır. Sertlik değerlerinin 4 ayrı bölgeden alınan ortalaması alınmıştır. Mikro sertlik için ölçüm yapılacak yüzeye 10 gr'lık yük altındaki sert elmas ucun, 10 sn süre ile iz bırakması sağlanarak mikro sertlik değerleri tespit edilmiştir. Şekil 3.8. de Future Tech FM-700 marka mikrosertlik cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Mikro Sertlik Cihazı (Future Tech FM-700 Marka)

3.8.3. TRD Yöntemi İle Tuz Banyosunda Kaplama Yapılan Numunelerin EDS, SEM ve Mapping Analizlerin İncelenmesi

Tuz banyosu ortamında TRD yöntemi kullanılarak kaplama yapılan numunelerin esas malzemenin iç yapı görüntüleri ile kaplama yüzeyi görüntü tespiti için, Bartın Üni. Merkezi Araştırma Lab. mevcut olan, üretimi Tescan firması marifetiyle yapılmış MAIA3 analitik SEM (taramalı elektron mikroskobu), çok büyük görüntü kalitesinde, kaplama yapılan yüzeylerinin görüntüleri analiz edilmiştir. SEM cihazı içinde bulunan EDS dedektörü yardımı ile, kaplanan numune yüzeyinde kimyasal element analiz yapılmıştır. Mapping incelemesiyle de kaplamadaki homojenliğin ve elementler belirlenmesi sağlanmıştır. Şekil 3.9. da EDS, SEM ve Mapping ölçümlerinin yapıldığı cihaz gösterilmiştir.



Şekil 3.9. EDS, SEM ve Mapping Cihazı

3.8.4. TRD Yöntemi İle Tuz Banyosunda Kaplama Yapılan Numunelerin XRD Sonuçlarının İncelenmesi

TRD yöntemi ile kaplama yapılan numuneler, kaplamanın yapıldığı yüzeyde oluşmuş elementlerin tespit edilmesi için Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üni. Bilim, Tekn., Uyg. ve Araş. Merkezi bünyesinde mevcut olan, Miniflex 600 modeli cihazda (Rigaku marka) XRD incelemeleri yapılmıştır. XRD ölçüm cihazı Şekil 3.10. da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. XRD Ölçüm Cihazı

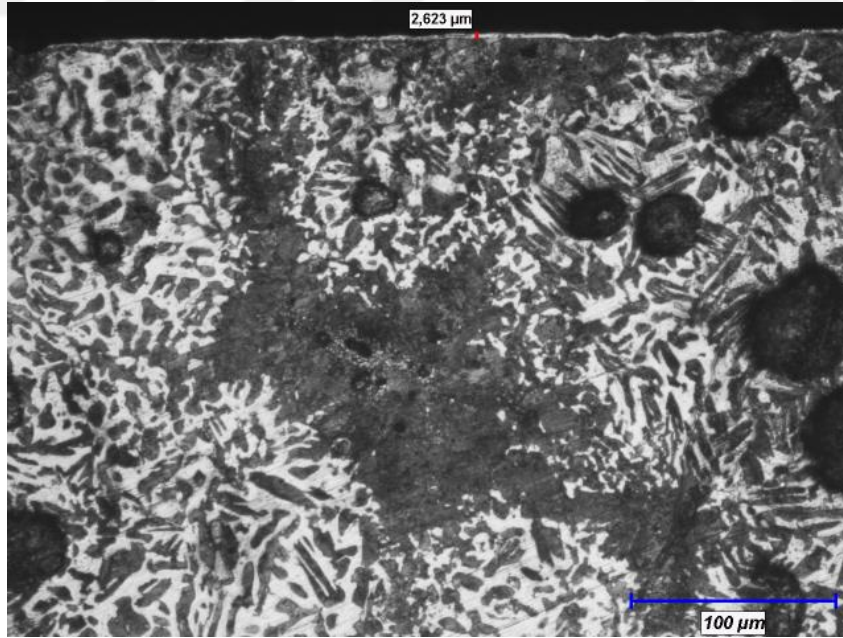
4. DENEYSEL SONUÇ VE TARTIŞMA

Küresel Grafitli Dökme Demirin (GGG 60) Termo Reaktif Difüzyon (TRD) Tekniği Kullanılarak Vanadyum Karbür (VC) Kaplanabilirliğinin Araştırılması konulu tez çalışmasının deneysel sonuç bölümünde aşağıdaki başlıklar incelenmiştir.

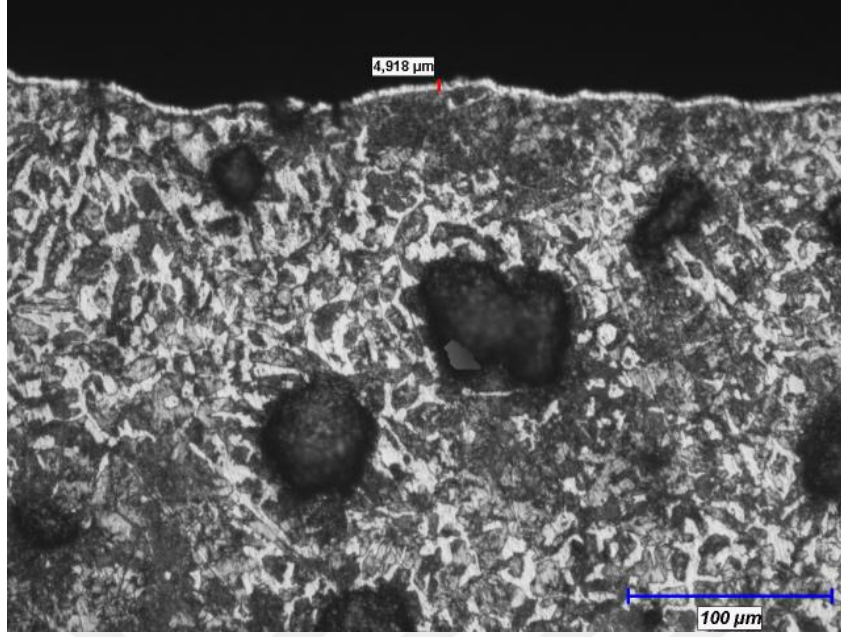
1. Kaplanan numunelerin optik mikro yapı analiz sonuçlarının incelenmesi
2. Kaplanan numunelerin EDS, SEM ve Mapping analizi sonuçlarının incelenmesi
3. Kaplamanın XRD analizi sonuçlarının incelenmesi
4. Kaplamanın mikrosertlik analizi sonuçlarının incelenmesi

4.1. TRD Yöntemiyle Kaplanan Numunelerin Optik Mikro Yapı Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

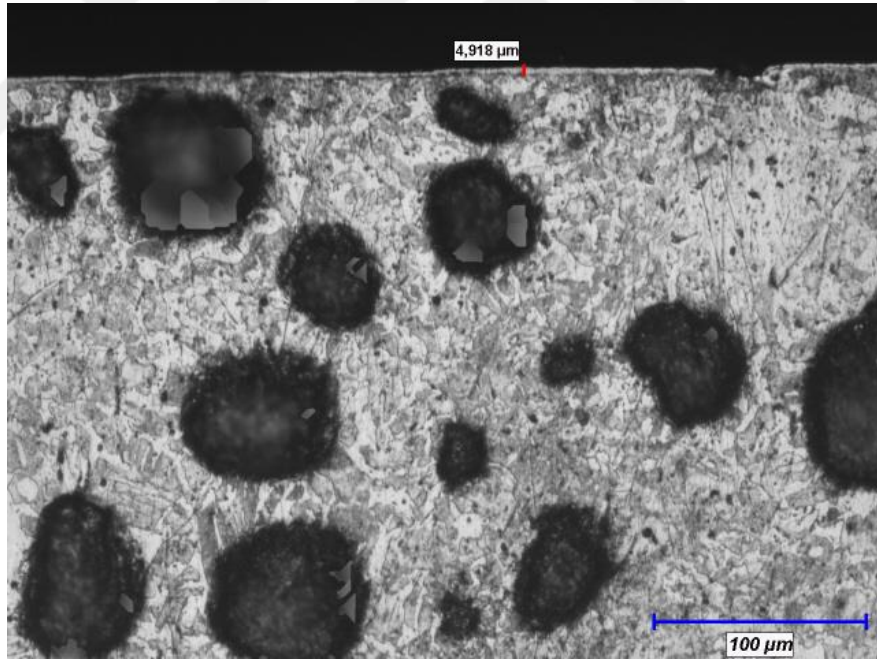
Yapılan çalışma, Küresel Grafitli Dökme Demirin (GGG 60) TRD yöntemi ile VC kaplanmasında işlem parametreleri; 850, 900 ve 950 °C sıcaklıkla birlikte 2, 4 ve 6 saatlik bekleme süresi olarak seçilmiştir. Seçilen bu sıcaklık ve zaman diliminde gerçekleştirilen çalışmaya ait optik görüntüleri aşağıda gösterilmiştir. Yapılan deneysel çalışmanın belirtilen parametreler sonucunda oluşturulan kaplama kalınlık değerleri ise Tablo 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. 850 °C Sıcaklık ve 2 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı



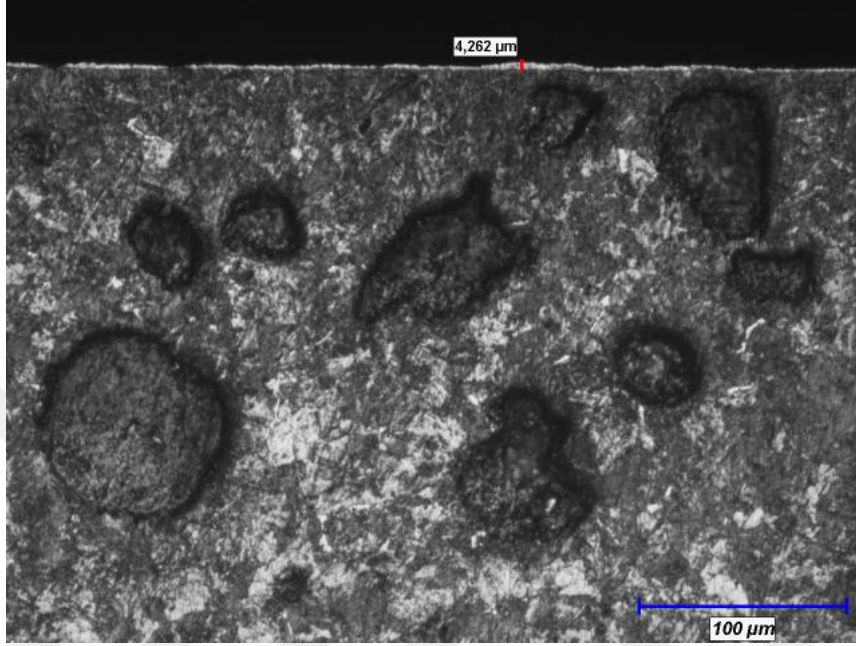
Şekil 4.2. 850 °C Sıcaklık ve 4 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı



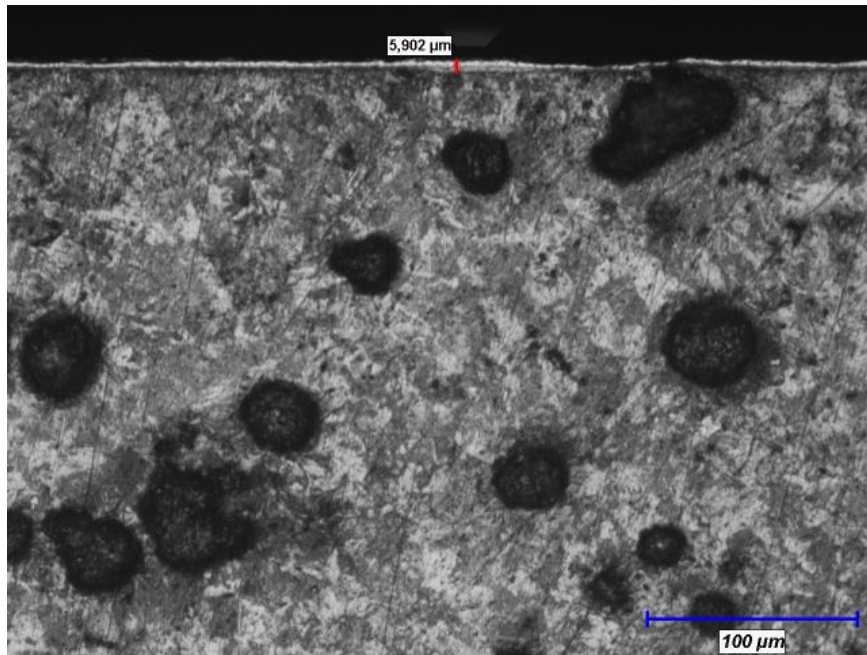
Şekil 4.3. 850 °C Sıcaklık ve 6 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı

Şekil 4.1., 4.2. ve 4.3. de 850°C de 2, 4 ve 6 saat sürelerde oluşturulan kaplamanın mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. TRD tekniği kullanılarak tuz banyosunda KGDD'e (GGG 60) 2, 4 ve 6 saat sürelerle 850 °C sıcaklıkta VC kaplama işlemi sonucunda, numunelerde sırasıyla 2.62, 4.92 ve 4.92 μm kaplama kalınlıkları tespit edilmiştir. Kaplama kalınlığının, artan kaplama süresiyle

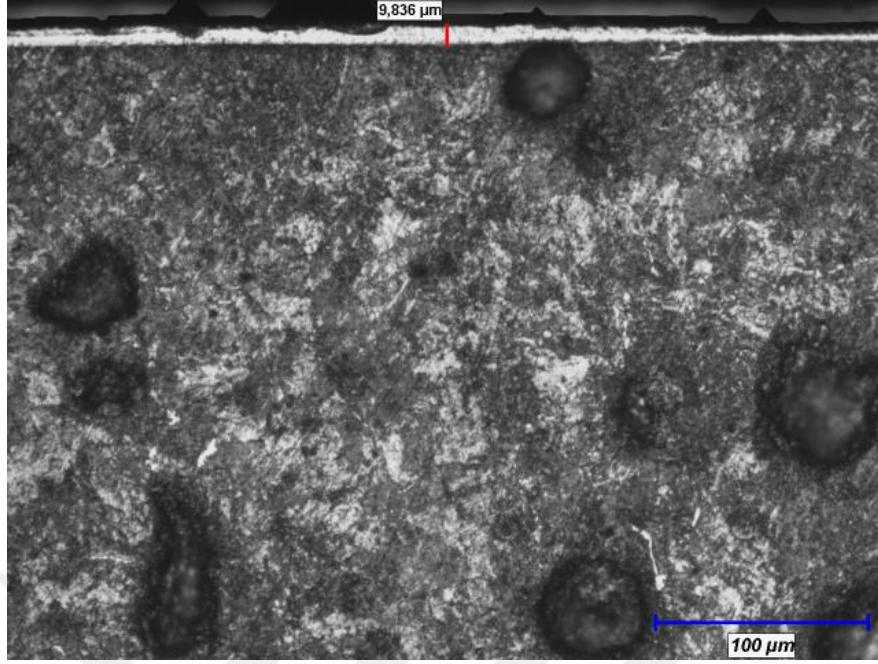
birlikte yüzeyde daha homojen dağılım sergilediği görülmüştür. Kaplama kalınlığının artan süreyle birlikte bir miktar arttığı, daha sonra kaplama işlem süresi devam etse dahi kaplama kalınlığının sabit kaldığı saptanmıştır. Ana malzemenin mikro yapısının soğutma hızına göre küresel grafitlerle birlikte ferrit + perlitik mikroyapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. 900 °C Sıcaklık ve 2 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafi

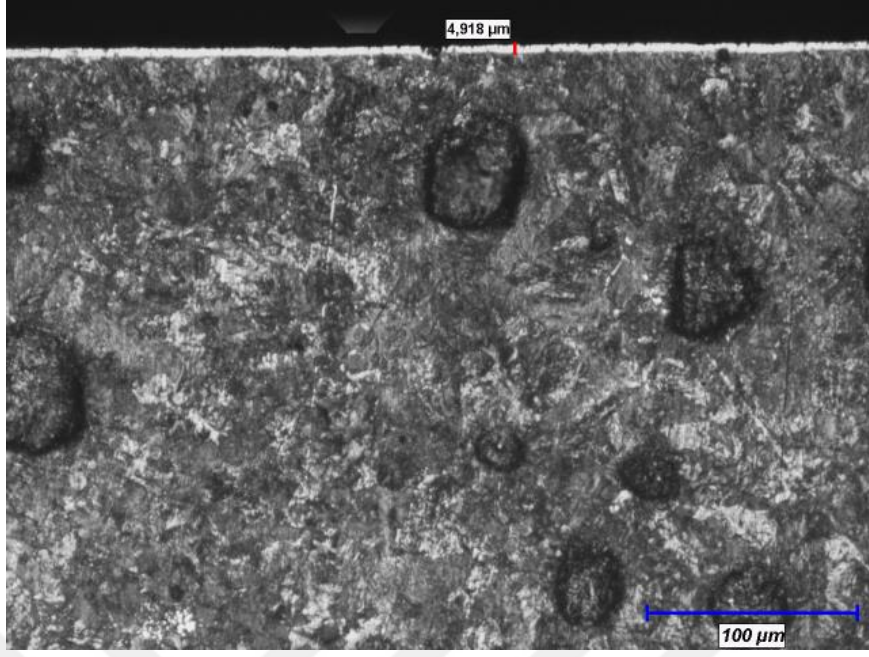


Şekil 4.5. 900 °C Sıcaklık ve 4 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafi

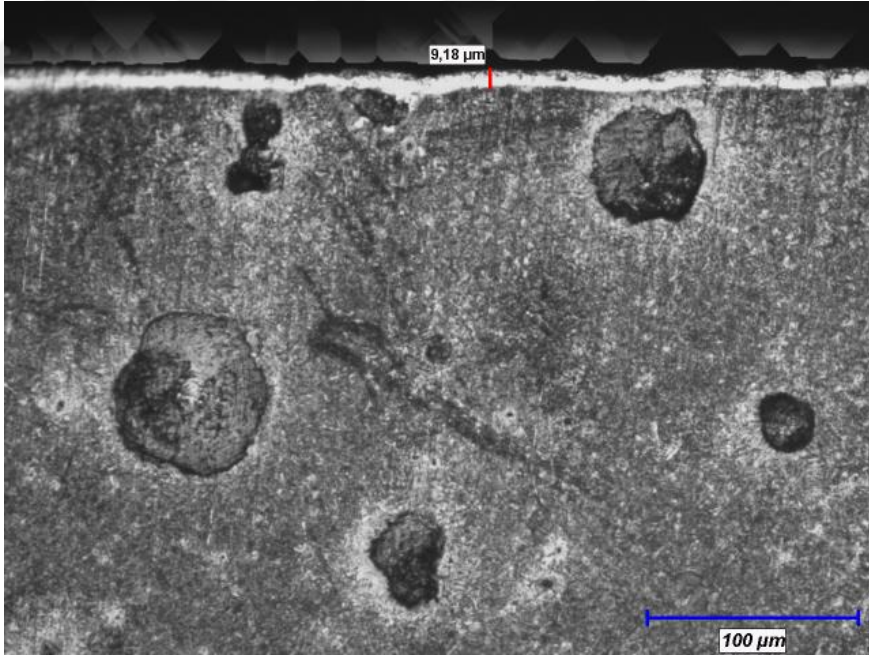


Şekil 4.6. 900 °C Sıcaklık ve 6 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafi

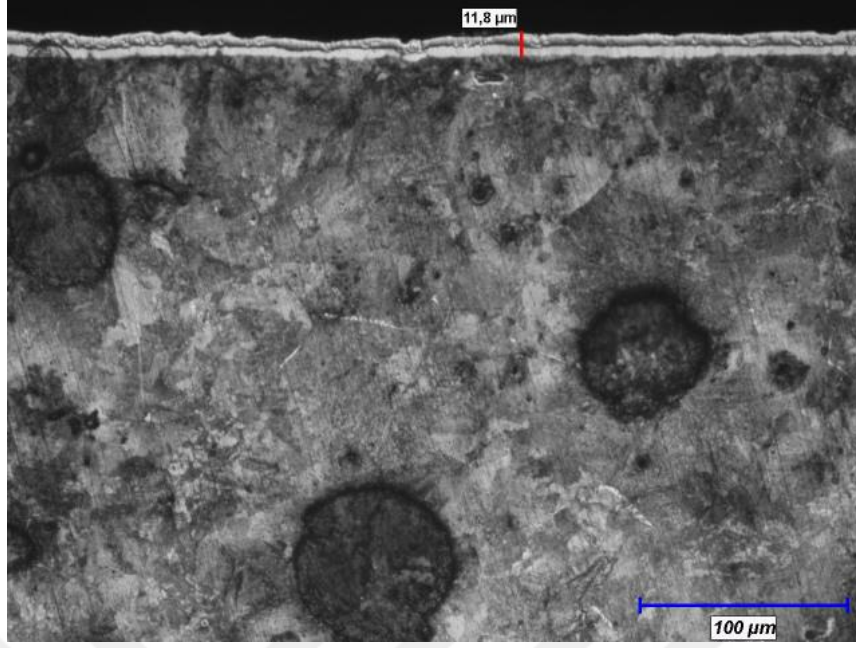
Şekil 4.4., 4.5. ve 4.6. da 900 °C sıcaklık ve 2, 4 ve 6 saat süreyle oluşturulan VC kaplamanın optik mikro yapı fotoğrafları görülmektedir. TRD yöntemi kullanılarak tuz banyosunda KGDD'e (GGG 60) 2, 4 ve 6 saat sürelerle 900 °C sıcaklıkta VC kaplama işlemi sonucunda, numunelerde sırasıyla 4.26, 5.90 ve 9.84 μm değerlerinde kaplama kalınlıkları saptanmıştır. Oluşturulan kaplamanın kalınlığı, kaplanan yüzeyin tamamında homojen olduğu görülmüştür. Kaplamanın kalınlığının artan süreyle beraber arttığı saptanmıştır. Ana malzemenin mikro yapısının soğutma hızına göre küresel grafitlerle birlikte perlitik mikro yapının hakim olduğu görülmüştür.



Şekil 4.7. 950 °C Sıcaklık ve 2 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafi



Şekil 4.8. 950 °C Sıcaklık ve 4 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafi



Şekil 4.9. 950 °C Sıcaklık ve 6 Saat Süreyle Oluşturulan VC Kaplamanın Optik Mikro Yapı Fotoğrafı

Şekil 4.7., 4.8. ve 4.9. da 950 °C sıcaklık ve 2, 4, 6 saat süreyle oluşturulan VC kaplamanın optik mikro yapı fotoğrafı gösterilmektedir. TRD yöntemi kullanılarak tuz banyosunda KGDD'e (GGG 60) 2, 4 ve 6 saat sürelerle 950 °C sıcaklıkta VC kaplama işlemi sonucunda, numunelerde sırasıyla 4.92, 9.18 ve 11.80 μm değerlerinde kaplama kalınlıkları saptanmıştır. Oluşturulan kaplamanın kalınlığı, kaplanan yüzeyin tamamında homojen olduğu görülmüştür. Kaplamanın kalınlığının artan süreyle beraber arttığı saptanmıştır. Deneysel çalışma sonucu kaplama kalınlıkları Tablo 4.1. de verilmiştir. Ana malzemenin mikro yapısının soğutma hızına göre küresel grafit ve perlitik matristen oluştuğu görülmüştür.

Tablo 4.1. Deneysel Çalışma Sonucu Kaplama Kalınlıkları

Sıcaklık	Kaplama Yüzey Kalınlığı		
	2 Saat	4 Saat	6 Saat
850 °C	2.62 μm	4.92 μm	4.92 μm
900 °C	4.26 μm	5.90 μm	9.84 μm
950 °C	4.92 μm	9.18 μm	11.80 μm

Yapılan deneysel çalışma sonucunda; Tablo 4.1'de görüldüğü üzere kaplama yüzey kalınlıkları artan kaplama süresi ve sıcaklığa bağlı olarak artış göstermiş olup, kaplama kalınlığının maksimum 11,80 μm değerinde ölçülmüştür.

Daha önce yapılan benzer çalışmalara bakıldığında TRD yöntemiyle tuz banyosunda 950, 1000, 1050 C° sıcaklıklarda ve 2, 4, 6 saat sürelerde VC kaplanan Armox 500 zırh çeliğinin kaplama kalınlığı minimum 1,19 µm, maksimum 7,38 µm olarak belirtilmiştir [24].

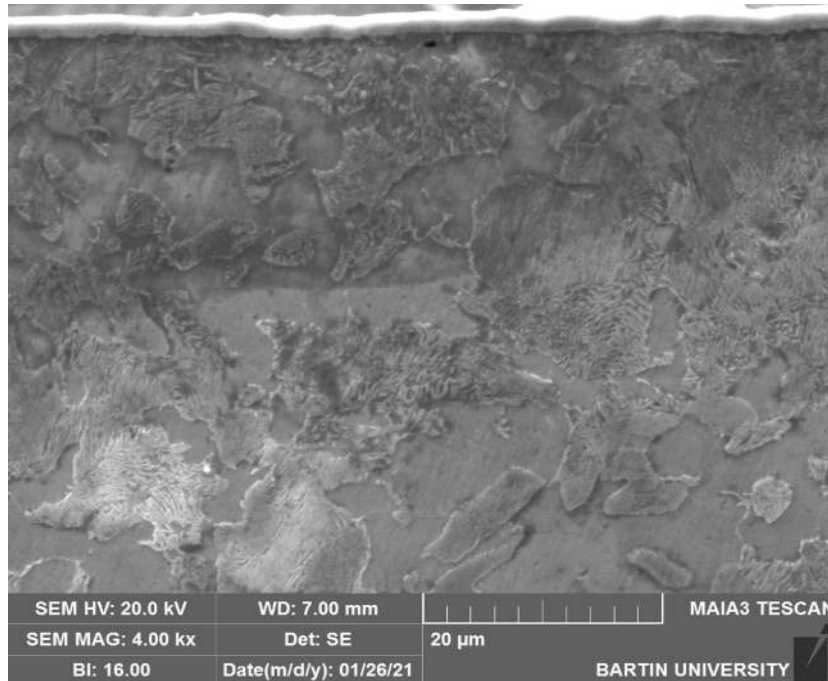
Yine başka bir çalışmada TRD yöntemi kullanılarak tuz banyosunda 850, 900, 950 C° sıcaklıkta ve 2, 4, 6 saatlik süre ile TiC kaplaması yapılan KGDD (GGG70) kaplama kalınlıkları min / maks. 5µm / 8,3 µm ölçüldüğü belirtilmiştir [37].

4.2. TRD Yöntemiyle Kaplanan Numunelerin EDS, SEM ve Mapping İnceleme Sonuçları

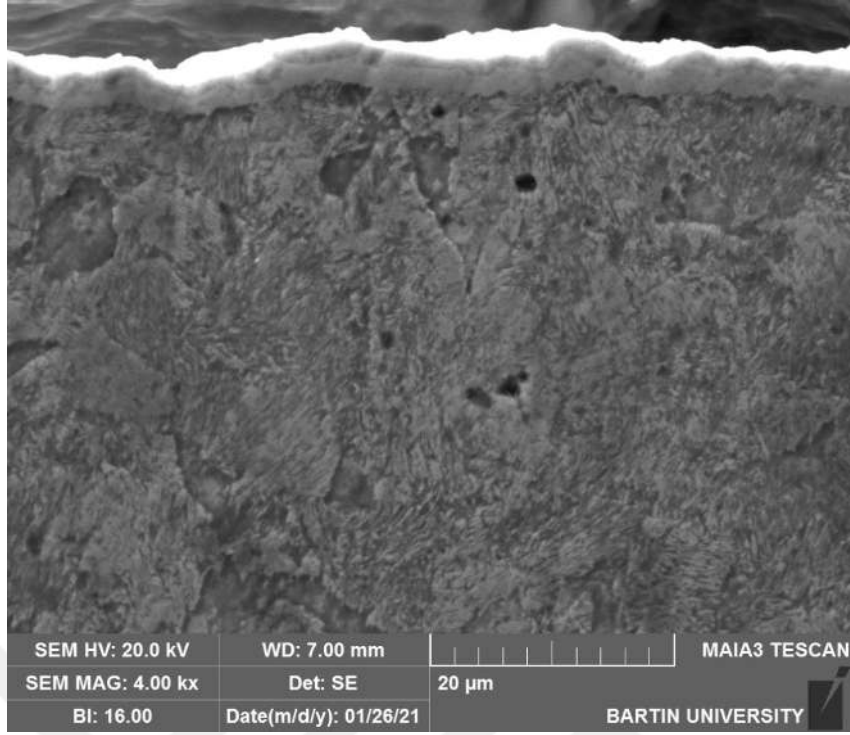
Çalışma sonucunda yapılmış olan kaplama tabakalarının SEM fotoğrafları tetkik edilmiş olup ana malzeme ve kaplama tabakası arasındaki etkiler tartışılmıştır. Kaplama tabakası element oranları noktasal EDS incelemeleriyle belirlenmiştir. Kaplama ve ana malzeme element dağılımı da Mapping incelemeleri ile tespit edilmiştir.

4.2.1. Kaplanan Numunelerin SEM Analiz Sonuçları

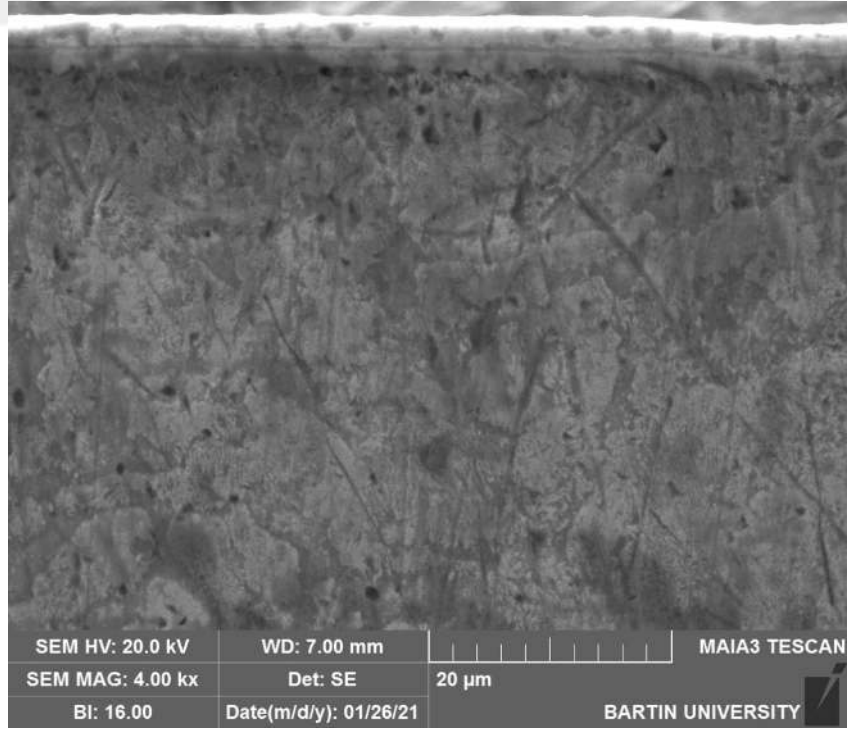
Küresel Grafitli Dökme Demir yüzeyine 850, 900 ve 950 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saatlik süreler sonucunda oluşturulan VC kaplamalarının kaplama kesitinin SEM fotoğrafları görülmektedir.



Şekil 4.10. 850 °C Sıcaklıkta 2 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü



Şekil 4.11. 850 °C Sıcaklıkta 4 Saatte Oluşturulan VC Kaplamanının SEM Görüntüsü

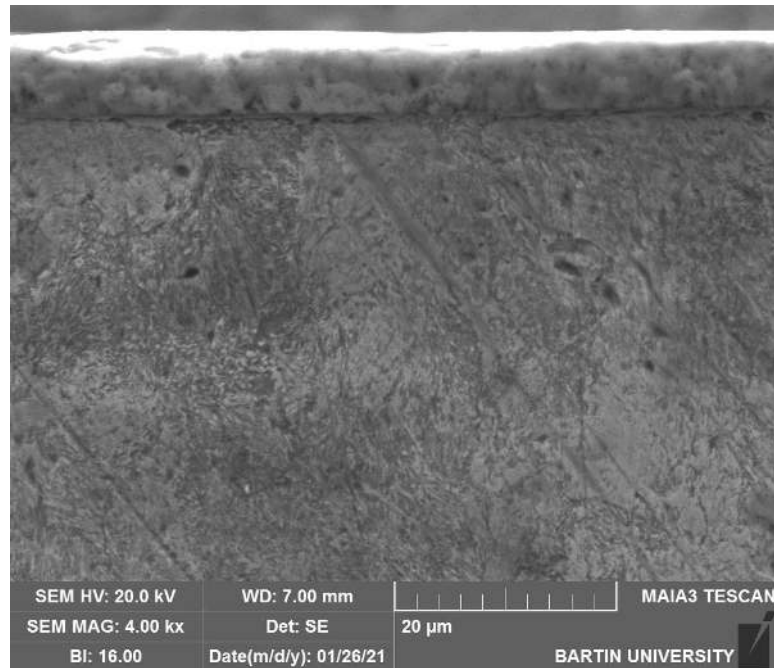


Şekil 4.12. 850 °C Sıcaklıkta 6 Saatte Oluşturulan VC Kaplamanının SEM Görüntüsü

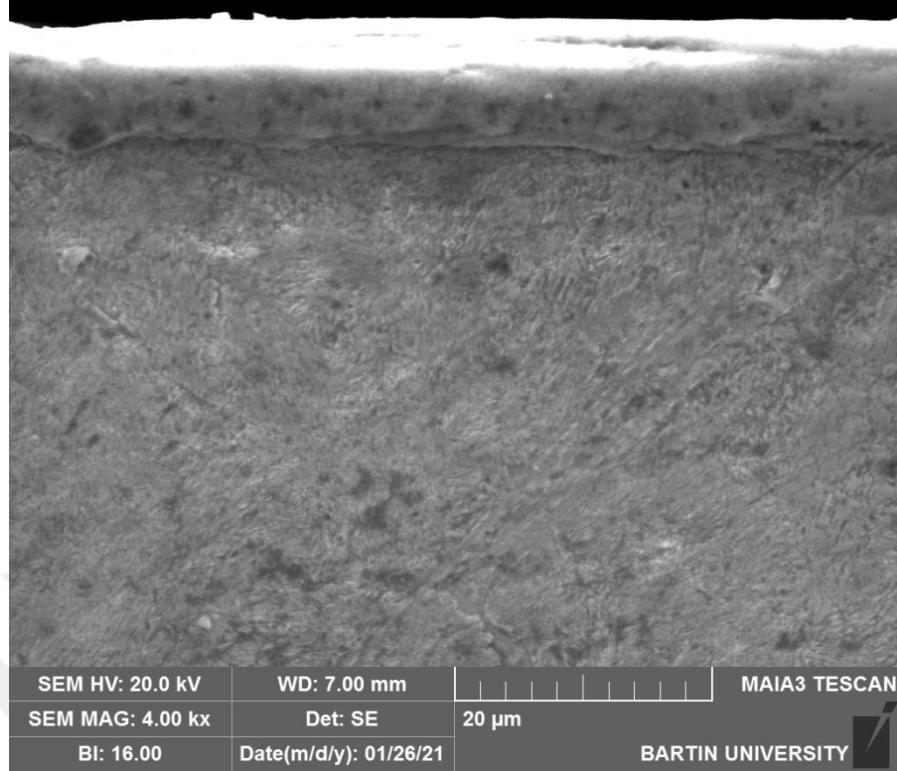
Şekil 4.10., 4.11. ve 4.12.de 850 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerle yapılan çalışmada SEM görüntülerine bakıldığında kaplama tabakasının yüzey boyunca homojen dağılım sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.13. 900 °C Sıcaklıkta 2 Saatte Oluşturulan VC Kaplamanının SEM Görüntüsü

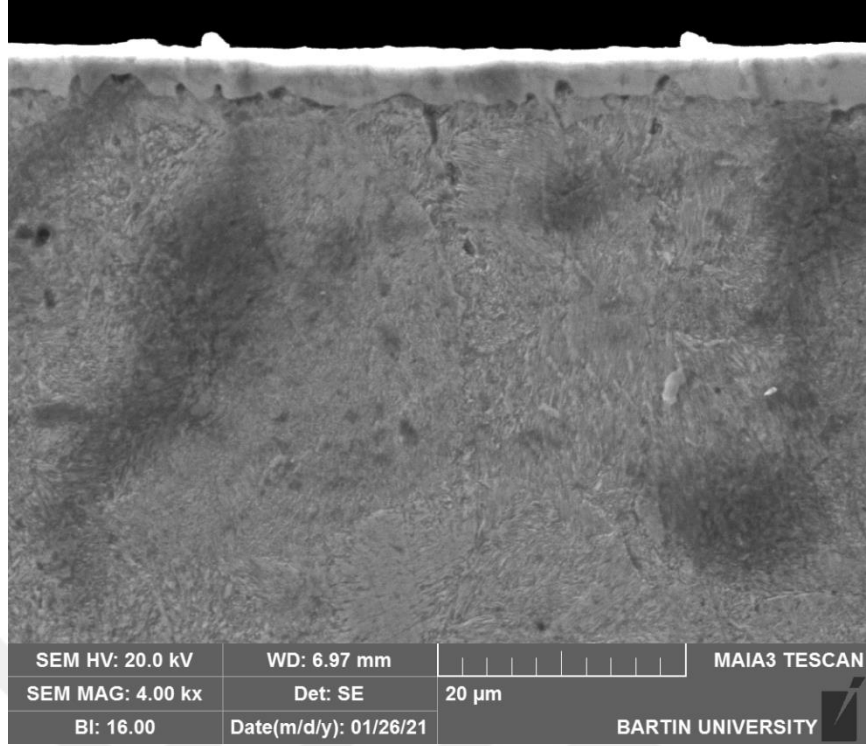


Şekil 4.14. 900 °C Sıcaklıkta 4 Saatte Oluşturulan VC Kaplamanının SEM Görüntüsü

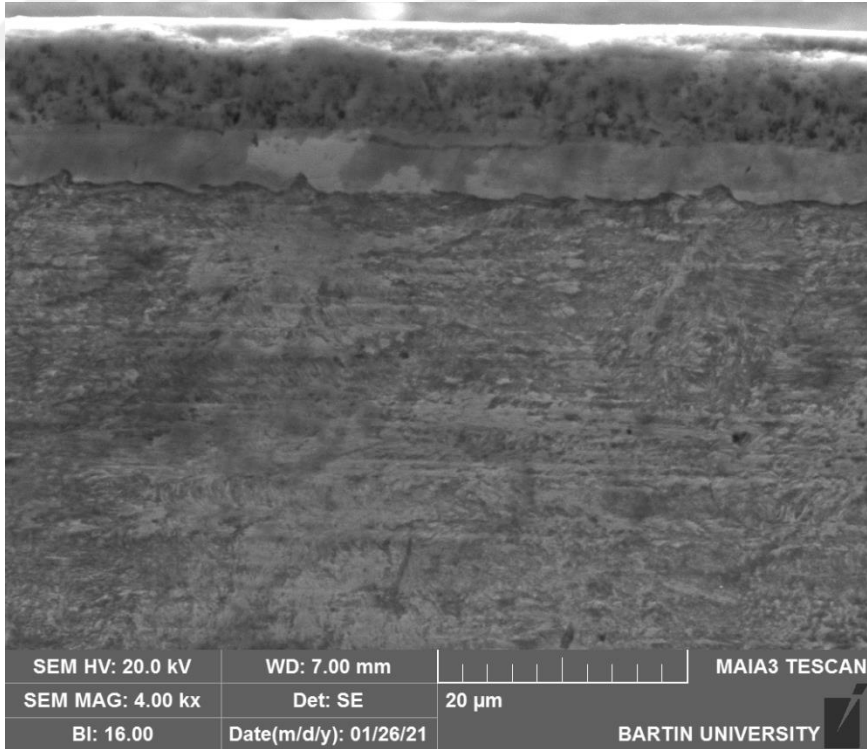


Şekil 4.15. 900 °C Sıcaklıkta 6 Saatte Oluşturulan VC Kaplamanının SEM Görüntüsü

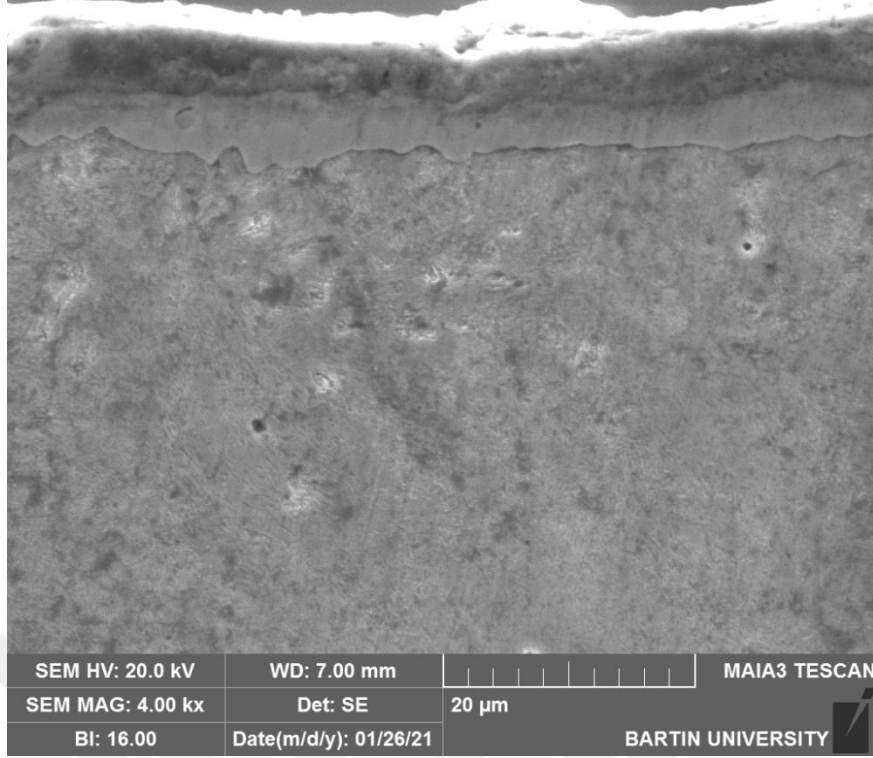
Şekil 4.13., 4.14. ve 4.15. te 900 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerle yapılmış olan çalışmada SEM görüntülerine bakıldığında, kaplama tabakasının yüzey boyunca homojen dağılımı ile birlikte ana malzeme ve kaplama tabakasında herhangi bir geçiş bölgesi oluşumunun meydana gelmediği görülmektedir. Fakat kaplama tabakası ile ana malzemeyi birbirinden ayıran kesin bir çizgi oluşumu da gözlenmemektedir. Bu durum kaplama tabakası ile ana malzemenin sıkı bir bağa sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.16. 950 °C Sıcaklıkta 2 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü



Şekil 4.17. 950 °C Sıcaklıkta 4 Saatte Oluşturulan VC Kaplamasının SEM Görüntüsü

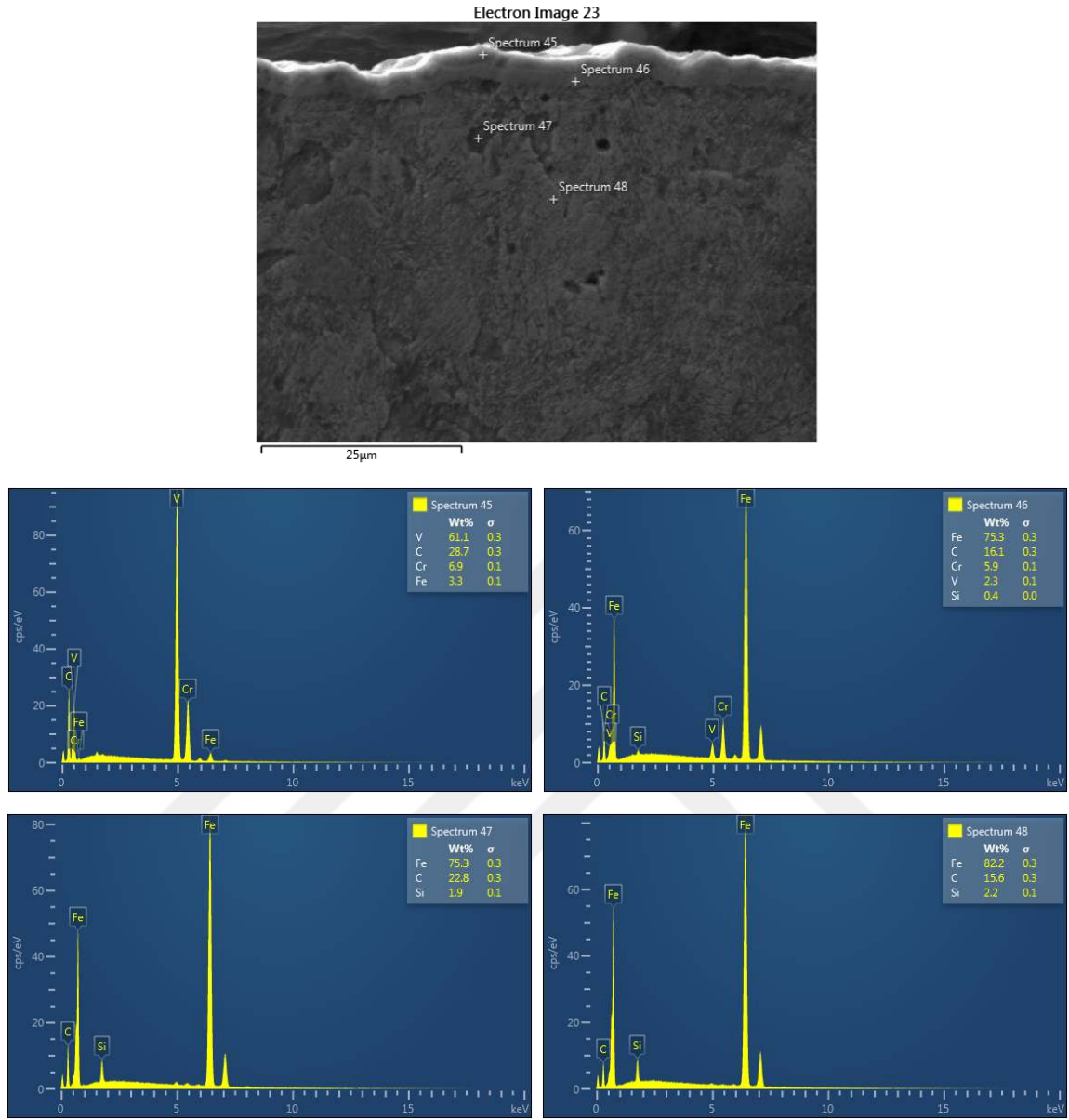


Şekil 4.18. 950 °C Sıcaklıkta 6 Saatte Oluşturulan VC Kaplamanının SEM Görüntüsü

Şekil 4.16., 4.17. ve 4.18. de görüntülere bakıldığında 950 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerle yapılan çalışmada SEM görüntülerinden artan süreyle birlikte kaplama tabaksı üst kısmının gözenekli bir form aldığı tespit edilmiştir. Böylelikle artan sıcaklık ile birlikte iki farklı kaplama tabakasının oluştuğu görülmektedir. Yine hemen hemen bütün kaplama parametrelerinde ana malzemenin perlitik matris yapısına sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun kaplama sonrasında numunelerin nispeten hızlı soğumasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

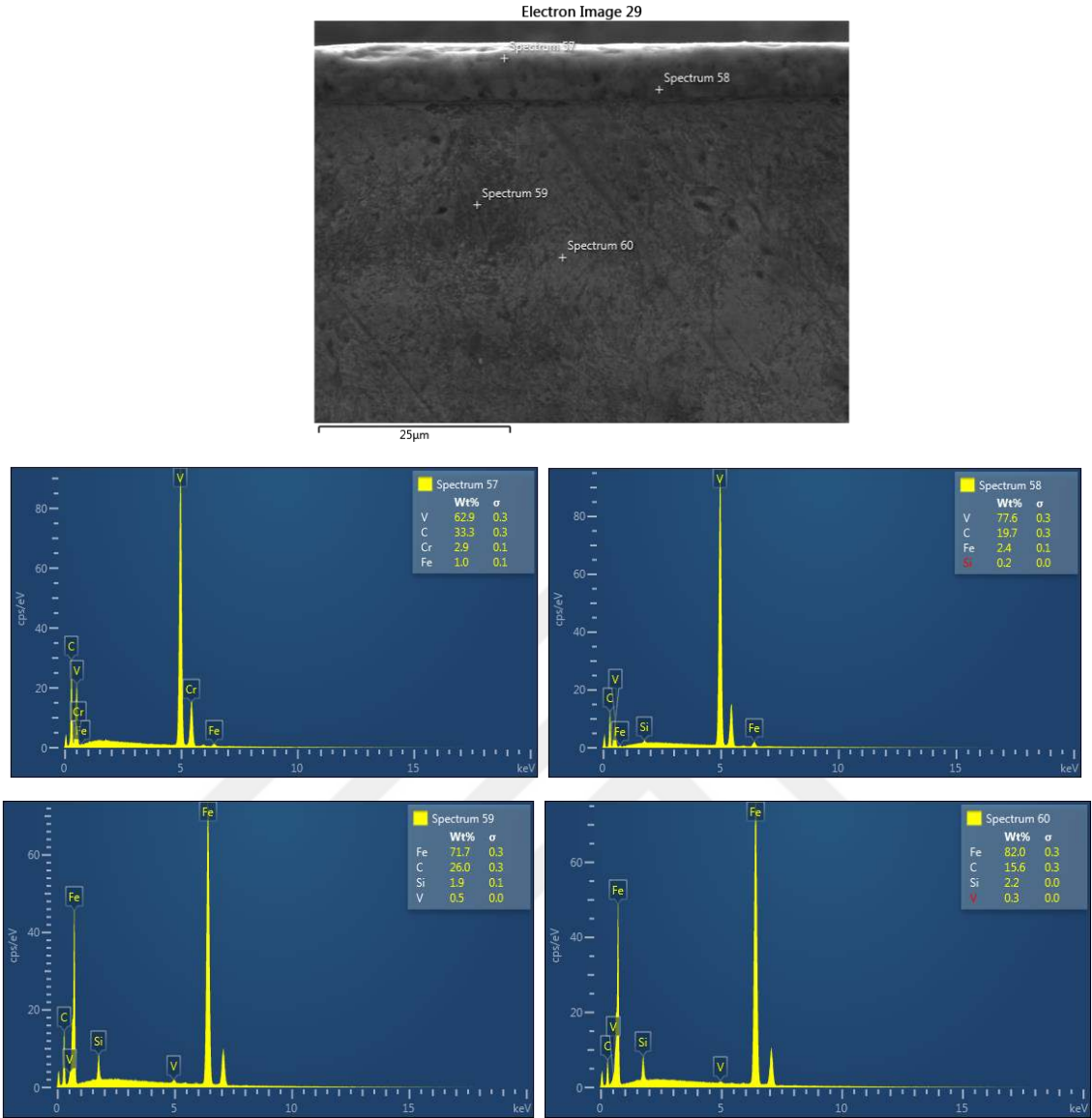
4.2.2. Kaplama Yapılan KGDD'in EDS İnceleme Sonuçları

850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda ve 4 saatlik sürenin sonucunda VC kaplanan Küresel Grafitli Dökme Demirin kaplama kesit alanından elde edilen EDS inceleme sonuçları aşağıda Şekil 4.19., 4.20. ve 4.21. de görülmektedir.



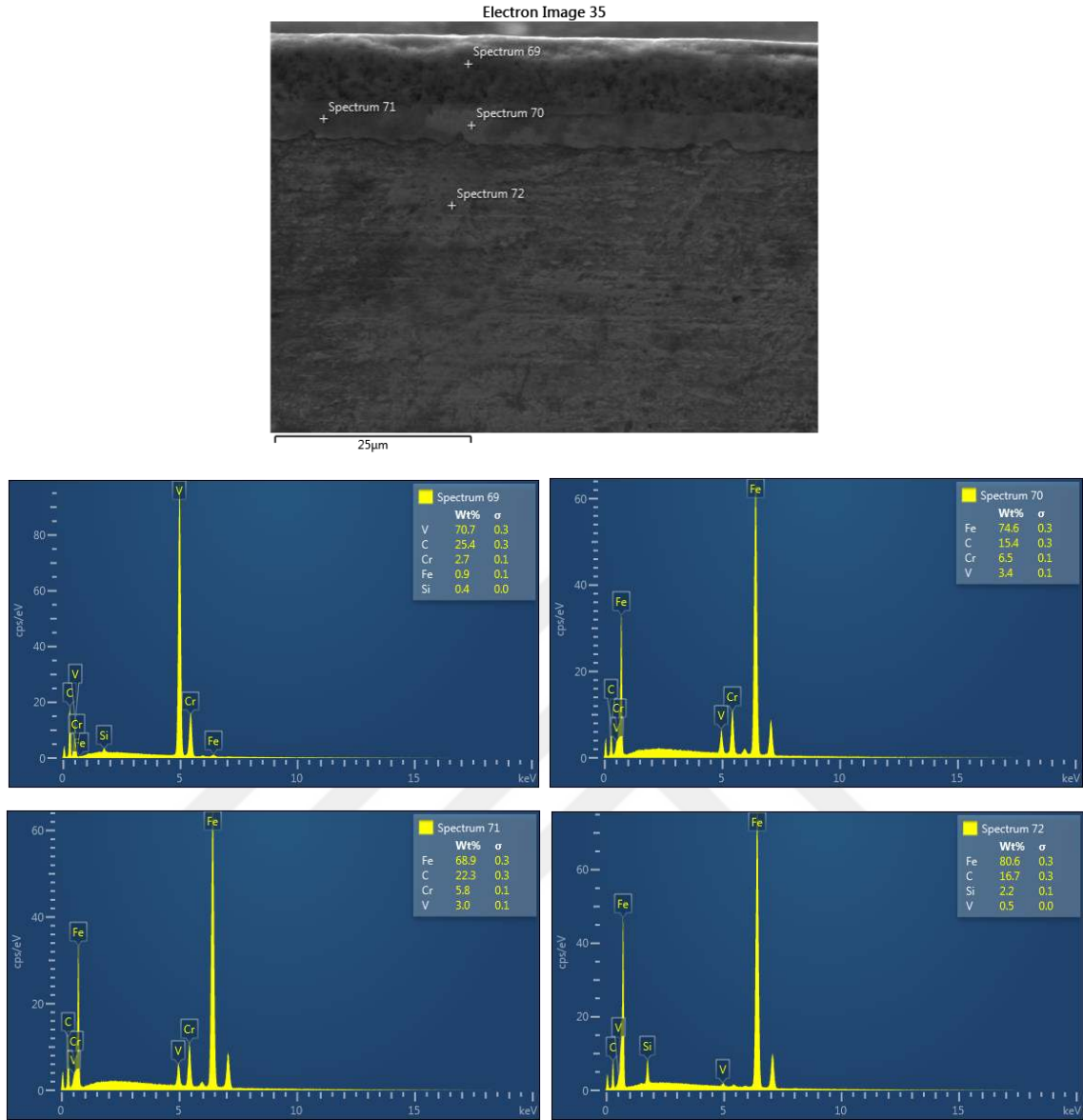
Şekil 4.19. 850 °C Sıcaklıkta EDS İnceleme Sonucu

Şekil 4.19. incelendiğinde 850 °C sıcaklıkta 4 saatlik süre ile oluşturulan kaplama tabakasından elde edilen noktasal EDS inceleme sonucuna göre, kaplama tabakasında ağırlıkça % 61.1 V, % 28.7 C, % 6.9 Cr ve % 3,3 Fe saptanmıştır. Kapsama tabakası üzerinden edinilen bu sonuçlar yapılan kaplamanın VC kaplama olduğunu göstermektedir. Kaplanan tabakanın esas malzemeye yakın olan alanından alınan EDS incelemesinin nihayetinde ise % Fe oranının yükseldiği, ağırlıkça % V, % C ve % Cr oranının düştüğü ve ana malzemeden kaplama tabakasına ağırlıkça % 0.4 Si difüze olduğu gözlemlenmiştir. Ana malzemeden alınan EDS analizleri sonucunda ise % 75.3 - 82.2 aralığında Fe oranına, % 15.6 - 22.8 aralığında C oranına ve % 1.9 - 2.2 aralığında Si oranına rastlanmıştır.



Şekil 4.20. 900 °C Sıcaklıkta EDS İnceleme Sonucu

Şekil 4.20. incelendiğinde 900 °C sıcaklıkta 4 saatlik süre ile oluşturulan kaplama tabakasından elde edilen noktasal EDS inceleme sonucuna göre, kaplama tabakasında ağırlıkça % 62.9 V, % 33.3 C, % 2.9 Cr ve % 1 Fe oranı saptanmıştır. Kapsama tabakası üzerinden edinilen bu sonuçlar yapılan kaplamanın VC kaplama olduğunu göstermektedir. Kaplanan tabakanın esas malzemeye yakın olan alanından alınan EDS incelemesinin nihayetinde ise % Fe ve % V oranlarının yükseldiği, ağırlıkça % C oranının düştüğü ve ana malzemeden kaplama tabakasına ağırlıkça % 0.2 Si difüze olduğu gözlemlenmiştir. Ana malzemeden alınan EDS analizleri sonucunda ise % 71.7 - 82 aralığında Fe oranına, % 15.6 - 26 aralığında C oranına, % 0.3 - 0.5 aralığında V oranına ve % 1.9 - 2.2 aralığında Si oranına rastlanmıştır.

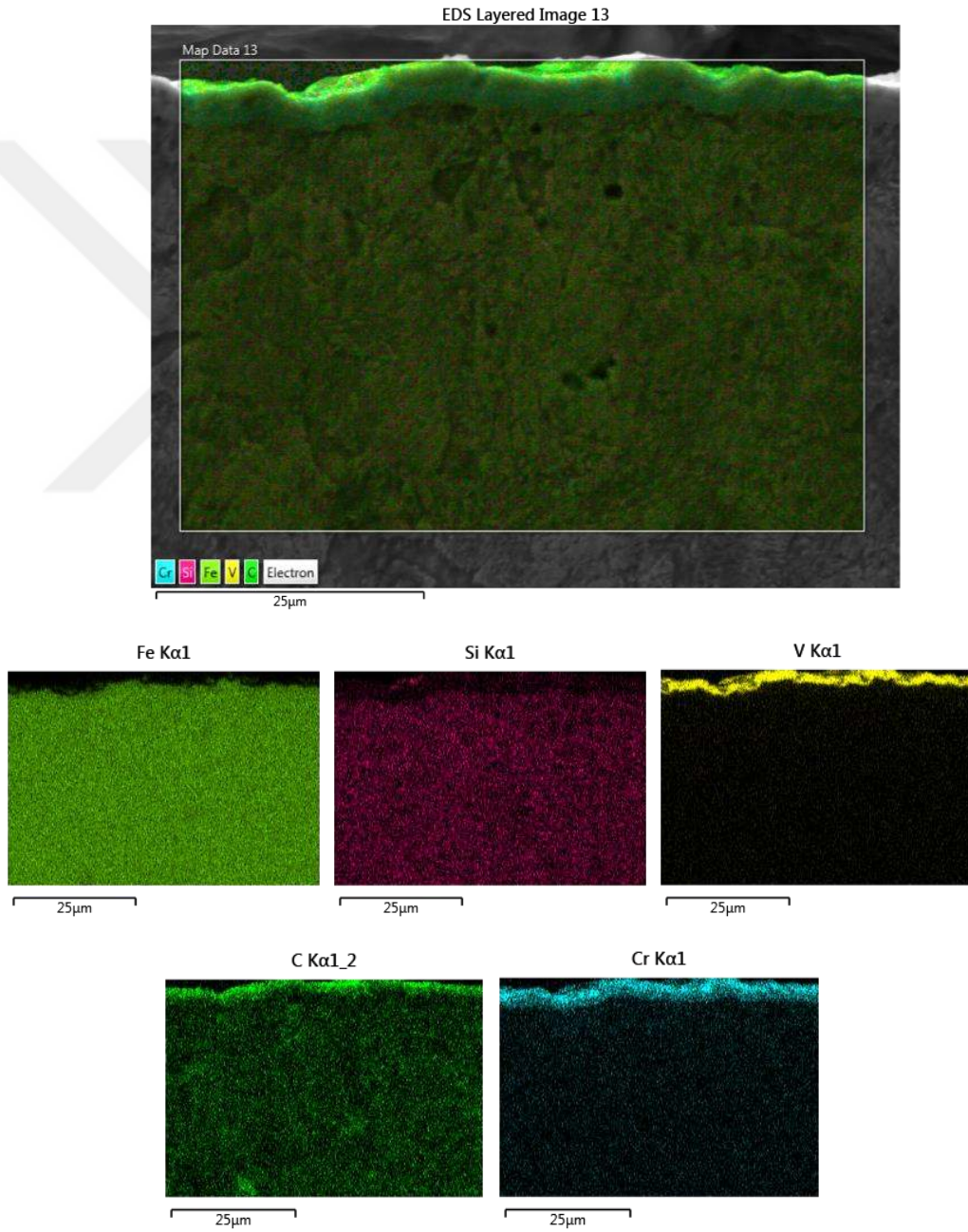


Şekil 4.21. 950 °C Sıcaklıkta EDS İnceleme Sonucu

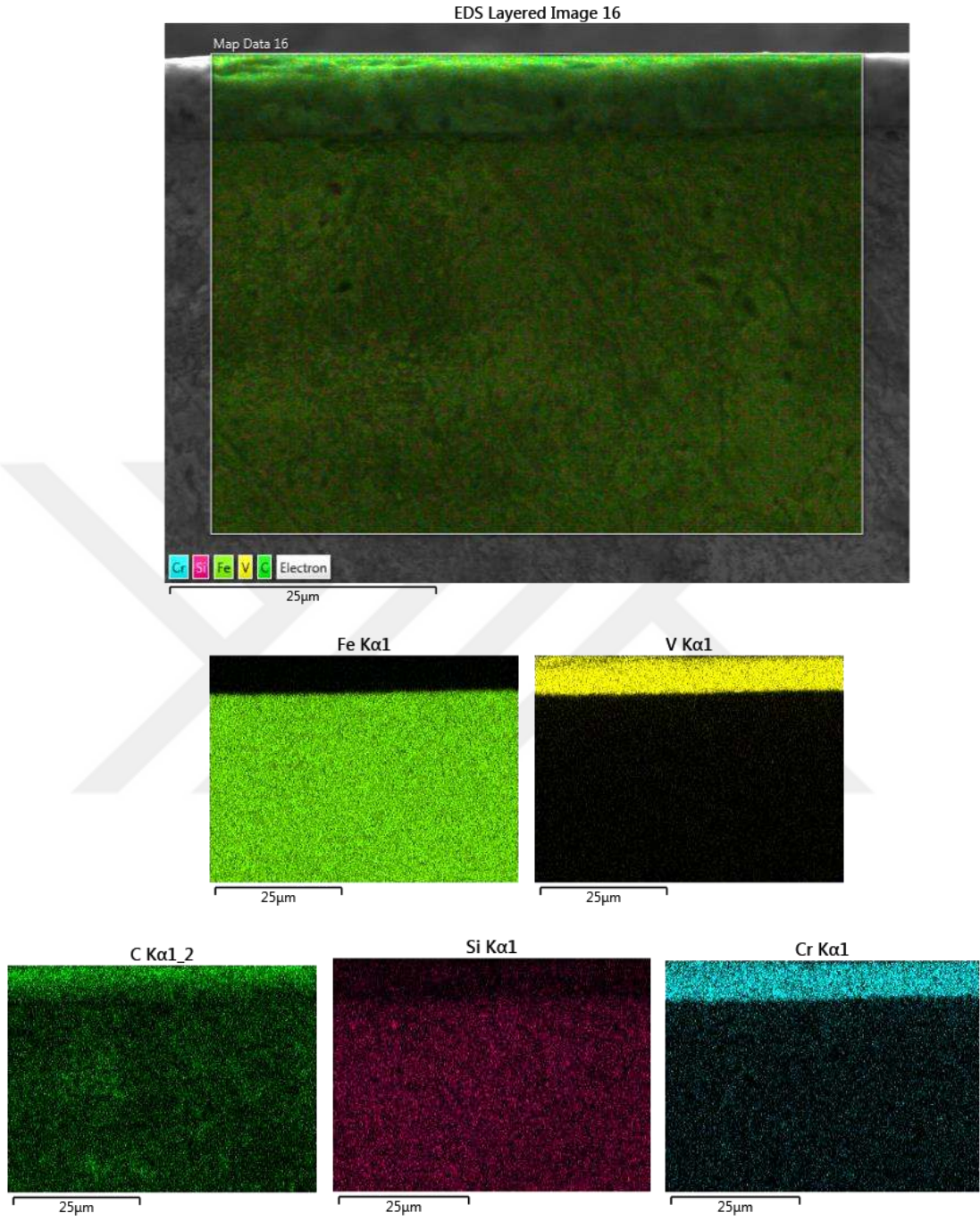
Şekil 4.21. incelendiğinde 950 °C sıcaklıkta 4 saatlik süre ile oluşturulan kaplama tabakasından elde edilen noktasal EDS inceleme sonucuna göre, kaplama tabakasında ağırlıkça % 70.7 V, % 25.4 C, % 2.7 Cr, % 0.4 Si ve % 0.9 Fe oranı tespit edilmiştir. Kplama tabakası üzerinde elde edilen bu sonuç yapılan kaplamanın VC kaplama olduğunu göstermektedir. Kaplanan tabakanın esas malzemeye yakın olan alanından alınan EDS analizlerinin nihayetinde ise % Fe ve % Cr oranlarının yükseldiği, ağırlıkça, % C ve % V oranının düştüğü gözlemlenmiştir. Ana malzemeden alınan EDS analizi sonucunda ise % 80.6 Fe oranına, % 16.7 C oranına, % 0.5 V oranına ve % 2.2 Si oranına rastlanmıştır. Numune yüzeyinin TRD yöntemi ile VC kaplanması için artan çalışma sıcaklığına karşın kaplama yüzeyinde ağırlıkça % Fe oranının düştüğü gözlemlenmiştir.

4.2.3. Kaplanan KGDD Yüzeyinin Mapping İnceleme Sonuçları

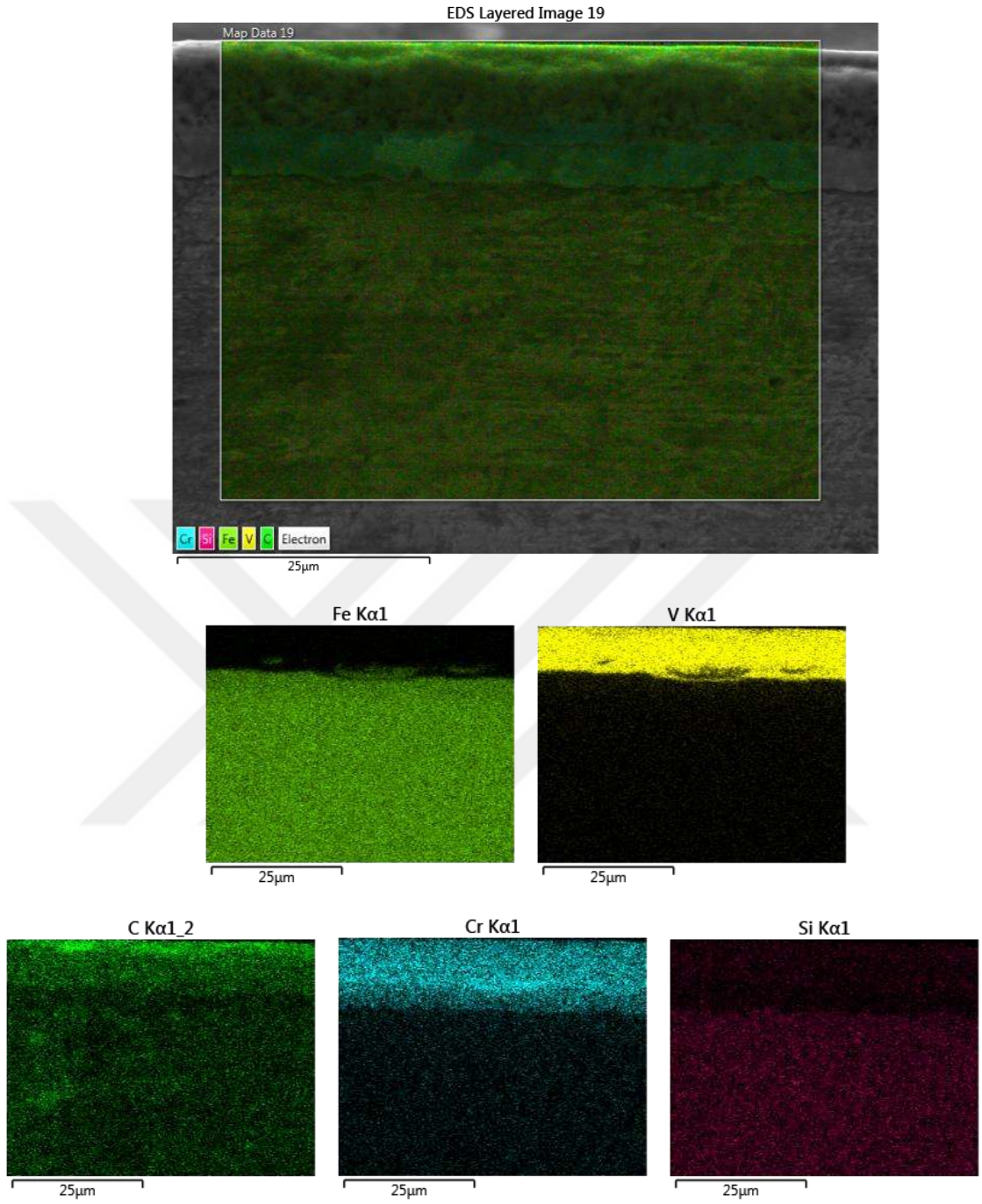
Şekil 4.22., Şekil 4.23 ve Şekil 4.24. de kaplama işlemi uygulanan KGDD numunelerinin 850, 900 ve 950 °C sıcaklıkta Mapping inceleme sonuçları gösterilmektedir. Kaplanan numunelerin Mapping inceleme sonuçlarına baktığımızda kaplanan yüzeyde V ve C homojenliği gözlemlenmiştir. Kaplama yüzeyinde az da olsa Si elementi dağılmış vaziyette gözlenmiştir. Artan sıcaklıkla birlikte kaplama bölgesinde Fe yoğunluğunun ve Si elementinin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.22. 850 °C'de Kaplanan Numunenin Mapping Analiz Sonuçları



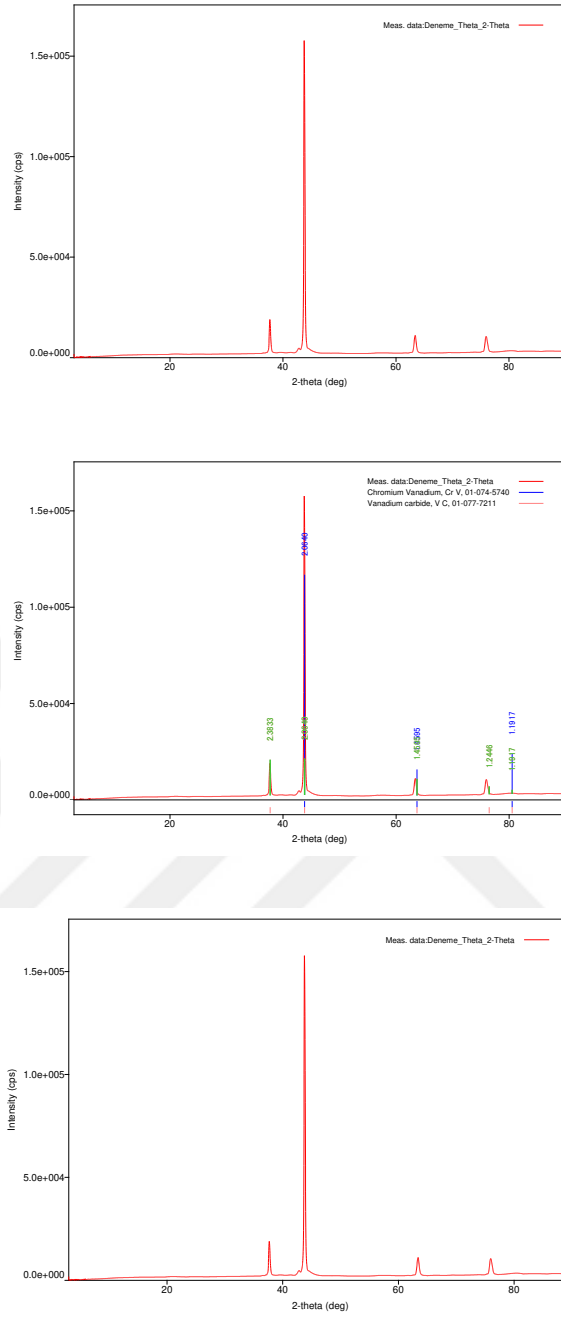
Şekil 4.23. 900 °C'de Kaplanan Numunenin Mapping Analiz Sonuçları



Şekil 4.24. 950 °C'de Kaplanan Numunenin Mapping Analiz Sonuçları

4.3. Kaplanan KGDD Yüzeyinin XRD İnceleme Sonuçları

850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda VC kaplanan KGDD numunesinin kaplama yüzeyinden alınan XRD analiz sonuçları aşağıdaki Şekil 4.25. de gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Kaplama Yüzeyi XRD Analiz Sonuçları

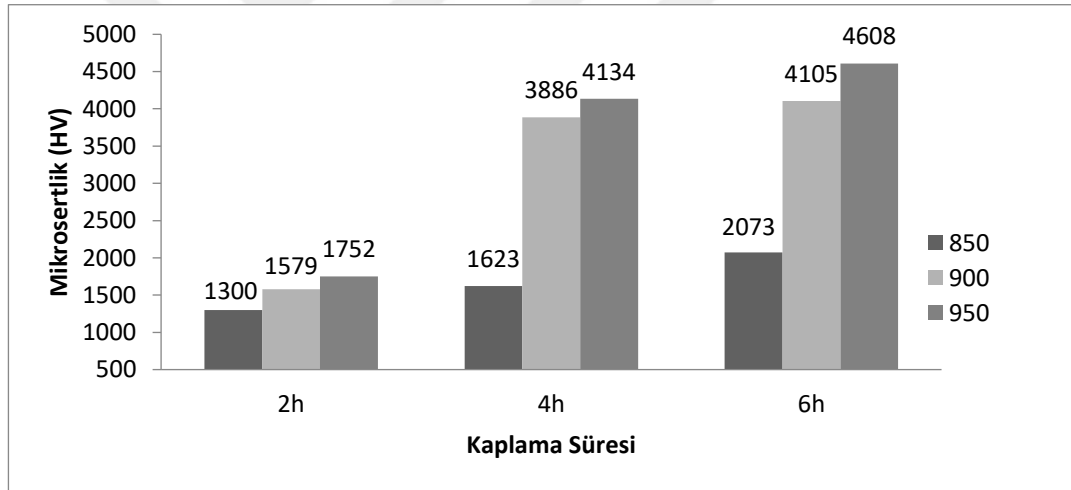
Kaplama yapılan yüzeyden alınan XRD analiz sonuçları ile elde edilen pikler üç kaplama sıcaklığında da VC fazının meydana geldiğini ispat etmiştir. Bu durum aynı zamanda kaplama tabakası üzerinden alınan noktasal EDS analiz sonuçlarını da desteklemektedir.

4.4. Kaplanan KGDD Yüzeyinin Mikro Sertlik Analiz Değerleri

Kaplanan numune yüzeylerinden elde edilen Vickers mikro sertlik değerlerinin ortalamaları aşağıdaki Şekil 4.26. da gösterilmektedir. Mikro sertlik değerlerinden artış gösteren sıcaklık ve süre ile beraber mikro sertlik değerinin yükseldiği ve sertlik değerinin maksimum 950 °C sıcaklık ve 6 saatlik süre parametresi ile birlikte 4608 HV değerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca sertlik değeri minimum 850 °C sıcaklıkta ve 2 saatlik süre parametresi ile birlikte 1300 HV olarak elde edilmiştir. Artan kaplama sıcaklığı ve süreyle birlikte mikro sertlik değerleri de artmıştır.

Yapılan benzer bir çalışmada TRD yöntemi kullanılarak TiC ile 900, 1000, 1100 C° sıcaklık aralığında ve 1, 2, 3 saat sürelerle kaplanan orta karbonlu çeliğin kaplama tabakası sertlik değerleri min/maks. 1089,5 / 2335,6 HV olarak ölçülmüştür [31].

Yine başka bir benzer çalışmada TRD yöntemi kullanılarak tuz banyosunda 850, 900, 950 C° sıcaklıkta ve 2, 4, 6 saatlik süre ile TiC kaplaması yapılan KGDD (GGG70) kaplama tabakası sertlik değerleri min / maks. 804 / 2087 HV ölçüldüğü belirtilmiştir [37].



Şekil 4.26. Mikro Sertlik İnceleme Sonuçları

5. GENEL DEĞERLENDİRMELER VE SONUÇ

Yapılmış olan bu çalışmamızda KGDD (GGG 60) numunesi, Termo Reaktif Difüzyon Yöntemi (TRD) kullanılarak VC ile kaplama yapılmış ve artış gösteren süre ve sıcaklıkla birlikte kaplama tabakası ve ara yüzeyinde inceleme yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda optik mikro yapı, EDS, SEM, XRD ve mikro sertlik inceleme sonuçları, süre ve sıcaklık parametrelerine göre değerlendirmesi yapılmıştır.

Kaplama yapılan numunenin optik mikro yapı inceleme sonuçlarına bakıldığında süre ve sıcaklıkla birlikte 2,62 – 11,80 µm arasında kaplama kalınlıkları saptanmıştır. Yükselen süre ve sıcaklık ile beraber kaplama kalınlığı da artmıştır.

Kaplama yapılan numunenin SEM analiz sonuçlarına bakıldığında esas malzeme ile uyum sağlayan bir kaplama tabakası oluşturulmuştur.

Kaplanan numunenin kaplama yapılan tabakasından elde edilen EDS incelemeleri sonucunda 850 °C sıcaklıkta ağırlıkça % 61.1 V, % 28.7 C, % 6.9 Cr ve % 3,3 Fe oranı, 900 °C’de ağırlıkça % 62.9 V, % 33.3 C, % 2.9 Cr ve % 1 Fe oranı ve 950 °C sıcaklıkta ağırlıkça % 70.7 V, % 25.4 C, % 2.7 Cr, % 0.4 Si ve % 0.9 Fe oranı tespit edilmiştir. Artan çalışma sıcaklığına karşın kaplama yüzeyinde ağırlıkça % Fe oranının düştüğü belirlenmiştir. Kaplama tabakası üzerinde elde edilen bu sonuç yapılan kaplamanın VC olduğuna işaret etmektedir.

Kaplama yapılan numunenin kaplanan tabaka kesit alanından elde edilen Mapping analizlerine bakıldığında kaplama yapılan tabakada V ve C elementlerinin homojen ve yoğun olduğu açıkça görülmüştür. Kaplamanın yüzeyinden elde edilen XRD incelemesi nihayetinde kaplanan tabakanın VC fazı olduğu saptanmıştır.

Kaplama yapılan numunenin kaplanan tabakası yüzeylerinden elde edilen mikro sertlik inceleme sonucuna bakıldığında kaplanan yüzeyde minimum sertlik değeri 1300 HV, maksimum sertlik değeri 4608 HV olarak saptanmıştır. Yükselen süre ve sıcaklıkla beraber mikro sertlik değeri artış göstermiştir.

Bu çalışmalar sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde KGDD malzemenin Termo Reaktif Difüzyon yöntemi kullanılarak tuz banyosunda VC kaplanabilirliğinin sağlanabilmesi için uygun olan parametreler 950 C° ve 6 saat işlem süresi olarak görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Arai, T., Thermoreactive Deposition/Diffusion Process for Surface Hardening of Steels, ASM Metals Handbook Vol 4: Heat Treating, ASM International 1991: 1000-1004.
- [2] Braic, M., Balaceanu, M., Braic, V., Vladescu, A., Pavelescu, G., & Albulescu, M. (2005). Synthesis and characterization of TiN, TiAlN and TiN/TiAlN biocompatible coatings. *Surface and Coatings Technology*, 200(1-4), 1014-1017.
- [3] Hocking, M. G. (1989). Metallic and Ceramic Coatings/Hocking MG, Vasantasree V., Sidky PS. L.: *Longman Group UK Limited*, 518.
- [4] Kekik, İbrahim Fatih, Et Al. Termo-Reaktif Difüzyon (Trd) Tekniği İle Cr-Ti-N Esaslı Kaplamaların Gerçekleştirilmesi Ve Özelliklerinin İncelenmesi. 2015.
- [5] Campbell, J. (2003). *Castings*. Elsevier.
- [6] Aydoğuş, Abdullah. *Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Aşılaiıcıların Mekanik Özellikler Mikroyapı Ve Kükürt Üzerine Etkisi*. Konya : Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [7] Stefanescu, D. M. (1988). Handbook, vol. 15: Casting, ASM International, p.
- [8] Demirlek, Merve. *Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yüksek Çevrimli Yorulma Davranışına Silisyum Oranının Etkisi*. İstanbul : İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [9] Yıldız, Muhterem. Dökme Demirlerde Nicel Faz Analiz Tekniklerinin İncelenmesi. 2014.
- [10] Ateş, Barış. Katı Çözeltili Sertleşmesinin Küresel Grafitli Dökme Demirin Dönel Eğmeli Yorulma Davranışına Etkisi. 2013. Phd Thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [11] İrfan Ay, Öğr. Gör. Fahrettin Kapusuz. *Malzeme Teknolojisi-I (Ders Notları)*. Balıkesir : Balıkesir Üniversitesi, 2008-2009.
- [12] Akgül, Bekir. *Gri Dökme Demirde Kalayın Mikroyapıya Ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması*. Konya : Selçuk Üniversitesi, 2018.
- [13] Kazdal, Gürkan. *Maden Kırıcılarda Kullanılan Beyaz Dökme Demirlerde Bor Katkısının Ve Isıl İşlemin Mekanik Özelliklere Etkisi*. İstanbul : İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [14] <https://Cdn.Bartın.Edu.Tr/Metalurji/D7ee7cd9-F063-4669-8e1c-393503ed6ffb/14.-Hafta-Dokum-Teknolojisi.Pdf>.
- [15] Sağlam, Cenk. *Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direncine Alaşım Elementleri İlavesinin Etkisi*. İstanbul : İstanbul Teknik Üniversitesi, 2009.
- [16] Handbook, A. S. M. (1992). Volume 13 of the 9th Edition Metals Handbook. *fourth printing*, 16.
- [17] Tuzer, Ahmet. Farklı Mekanik Özelliklerdeki Dökme Demirlerin İşlenebilirliklerinin Karşılaştırılması. 2020. Master's Thesis. Bursa Uludağ Üniversitesi.
- [18] Kırçalı, Kadir Kaan. Farklı Matriks Yapılara Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması. 2006. Master's Thesis. Uludağ Üniversitesi.
- [19] Prihti, T. (2011). *Wear behaviour of ductile irons in continuous sliding motion* (Master's thesis).
- [20] Çelik, Özgür, Et Al. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışları. 2001. Phd Thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [21] <http://Www.Haddemetal.Com/Tr/Download/Dokmedemirler.Pdf>.
- [22] Uzunova, Tayfun. Küresel Grafitli Dökme Demir. *Madencilik*.
- [23] Aytaçoğlu, Lütfü Cihan, Et Al. Dökme Demirlerde Termal Analiz Ve Matematiksel Yaklaşım. 2012.
- [24] Başar, Murat. *Armox 500 Zırh Çeliğinin Tuz Banyosunda Trd Yöntemiyle Vc Kaplanabilirliğinin Araştırılması*. Nevşehir : Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [25] Çelik, Y. H., Ertem, M., Gür, A. K., Kurt, B., Caligulu, U., Özay, Ç., & Yildiz, T. (2021). Investigation of microstructure properties of NbC-B coated hardox 400 steel by TRD method and evaluation of wear behavior by Taguchi method. *Surface Review and Letters*, 28(12), 2150115-740.
- [26] Yi, J., Li, M. L., Zhou, H. X., Rosenkranz, A., Wang, B., Song, H., & Jiang, N. (2020). Enhanced tribological properties of Y/MoS₂ composite coatings prepared by chemical vapor deposition. *Ceramics International*, 46(15), 23813-23819.
- [27] Mattox, D. M. (2002). Physical vapor deposition (PVD) processes. *Metal Finishing*, 100, 394-408.
- [28] Lau, H., Leyens, C., Kaden, U., Schulz, U., Münzer, J., Friedrich, C., & Cosack, T. (2002). Influence of Bondcoat Pre-Treatment on the Thermal Cyclic Lifetime of EB-PVD TBCs.
- [29] Davis, J. R. (Ed.). (2004). *Handbook of thermal spray technology*. ASM international.
- [30] Peters, M., Leyens, C., Schulz, U., & Kaysser, W. A. (2001). EB-PVD thermal barrier coatings for aeroengines and gas turbines. *Advanced engineering materials*, 3(4), 193-204.
- [31] *Termoreaktif Difüzyon (Trd) Yöntemiyle Ferro Titanyum Kaplanan Orta Karbonlu Çeliğin Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi*. Yıldırım, Yasin Buğra. Elazığ : Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [32] *Termo-Reaktif Difüzyon (Trd) Tekniği İle Aısı 1010 Ve Aısı M2 Çeliklerinin Titanyum Nitrür (Tin) Kaplanması*. Deniz, Gürhan. Sakarya : Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos 2004.
- [33] Pehlivan, Emre. *Küresel Grafitli Dökme Demir Yüzeyinin Tıbc Tabakasıyla Kaplanabilirliğinin Araştırılması*. Nevşehir : Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- [34] Kon, Özkan. Termo-Reaktif Difüzyon (Trd) Yöntemiyle Tıbcn Kaplanmış Wc-Co Kesici Takımların Ve Çeliklerin Aşınma Özellikleri. 2006. Master's Thesis. Sakarya Üniversitesi.
- [35] Gündoğan, Kadir Ve Gıtmış, Mustafa. Sıkı Geçme Bağlantısı Yapılan Ggg-60 Döküm Malzeme İle S275jr Ve S355jr Çeliğinin Malzeme Etkisinin Deneysel Ve Sonlu Elemanlar Metodu İle İncelenmesi. Vol, 2: 7-19.
- [36] <https://Www.Bcteknoloji.Com/Urun/1/Ferro-Vanadium>. [Çevrimiçi]
- [37] Ferveren, Çağrı Ve Kurt, Bülent. Küresel Grafitli Dökme Demirin Tuz Banyosu Trd Yöntemiyle Tic Kaplanabilirliğinin Araştırılması. 2021. Master's Thesis. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi.