T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NİTRASYON VE FİZİKSEL BUHAR DEPOLAMA (PVD) YÖNTEMLERİ İLE KAPLANMIŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN MEKANİK, AŞINMA VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Emre ÜNALSAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Emre ÜNALSAN tarafından hazırlanan "Nitrasyon ve fiziksel buhar depolama (PVD) yöntemleri ile kaplanmış küresel grafitli dökme demirlerin mekanik, aşınma ve korozyon özelliklerinin incelenmesi" adlı tez çalışması 13/10/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Doç. Dr. Mustafa KOCABAŞ	……..
Danışman Doç. Dr. Özlem ALTINTAŞ YILDIRIM	……..
Üye Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ARICI	……..

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Emre ÜNALSAN

Tarih: 12/10/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

NİTRASYON VE FİZİKSEL BUHAR DEPOLAMA (PVD) YÖNTEMLERİ İLE KAPLANMIŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN MEKANİK, AŞINMA VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Emre ÜNALSAN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Özlem ALTINTAŞ YILDIRIM

2023, 60 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Özlem ALTINTAŞ YILDIRIM
Doç. Dr. Mustafa KOCABAŞ
Dr. Öğr. Üy. Gökhan ARICI

Çeşitli mühendislik uygulamaları ve makine parçalarındaki en büyük sorun malzemelerin aşınması ve korozyona uğramasıdır. Korozyon ve aşınma malzemenin yüzeyinde meydana gelmektedir. Fakat çeşitli yüzey modifikasyonları ile malzemelerin aşınma ve korozyon özelliklerinin iyileştirilebilmesi mümkündür.

Bu çalışmada GGG50 (EN-GJS-500-7) ve GGG70 (EN-GJS-700-2) kalite küresel grafitli dökme demir malzemelere ayrı ayrı; akımsız Ni-B kaplama, TiN PVD kaplama, gaz nitrasyonu ve plazma nitrasyonu işlemleri uygulanmıştır. GGG50 numunelerin gaz nitrasyon ile kaplama işlemi sonucunda yüzeylerinde oluşan nitrür tabakanın kalınlığı ~8,9±0,5 µm iken plazma nitrasyon ile kaplama sonucunda yüzeylerinde ~6,6±0,4 µm kalınlıkta nitrür tabaka oluştuğu gözlemlenmiştir. GGG70 numunesinin gaz ve plazma nitrasyon ile kaplanmaları ile yüzeylerinde oluşan nitrür tabaka kalınlıkları ise sırası ile ~7,0±0,3 µm ve ~3,9±0,4 µm olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar GGG50 ve GGG70 küresel grafitli dökme demirlerin gaz ve plazma nitrasyon işlemleri ile başarılı bir şekilde kaplandıklarını göstermektedir.

Her bir uygulama sonrası numunelerin; mikroyapısal, sertlik, aşınma ve korozyon özellikleri incelenmiştir. Kaplama sonucunda numune yüzeyinde oluşacak fazların belirlenmesi için yapılan XRD analizleri sonuçlarına göre nitrasyon yapılan numunelerde Fe_3N ve Fe_4N fazları, akımsız Ni-B kaplamada NiB_3 fazı, PVD kaplamada ise TiN fazının oluştuğu tespit edilmiştir. Kaplanmamış GGG50 küresel grafitli dökme demir 178 HB sertliğe sahipken bu numunelerin gaz ve plazma nitrasyon ile kaplanmaları sonucunda ortalama sertlik değerlerinin sırası ile 838±23 HB ve 809±14 HB'ye yükseldiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde kaplanmamış halde 222 HB sertliğe sahip GGG70 numunesinin sertlik değerinin gaz nitrasyon ile kaplama sonucunda 817±19 HB ve plazma nitrasyonla kaplama ile 832±27 HB değerine arttığı belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre her iki kaplama türünün de küresel grafitli dökme demirlerin sertlik değerlerinde önemli artışa sebep oldukları görülmüştür. Ayrıca nitrürlenmiş numuneler işlem öncesi ve sonrası çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testleri ile gaz nitrürleme işleminden sonra numunelerin yüzeyinde oluşan sert nitrür tabakasının akma dayanımını arttırdığı, çekme dayanımı ve uzama değerlerini önemli ölçüde düşürdüğü gözlenmiştir.

Numunelerin aşınma dirençleri kıyasladığında ise TiN PVD kaplanmış numunelerin aşınma direncinin iyileştiği gözlemlenirken Ni-B kaplama sonrasında numunelerin aşınma direncinde önemli bir iyileştirme görülmemiştir. Yapılan çekme testleri ile gaz nitrasyon işlemi sonrası numunelerin yüzeyinde oluşan sert nitrür tabakanın akma dayanımını arttırdığı, çekme dayanımı ve uzama değerlerini ise belirgin oranda azalttığı gözlemlenmiştir. Kısacası numuneler bir miktar kırılganlaşmıştır.

Yapılan korozyon testleri neticesinde GGG50 ve GGG70 kalite Sfero malzemelerin kaplama sonrası farklı korozyon dirençleri gösterdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada yapılan uygulamalar içerisinde GGG50 kalite numunelerde akımsız Ni-B kaplama en düşük korozyon direncine sahip iken, GGG70 kalite numunelerde akımsız Ni-B kaplama yapılmış numune yüksek korozyon direncine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akımsız Ni-B kaplama, Gaz Nitrürleme, Küresel grafitli dökme demirler, Plazma nitrürleme, PVD Kaplama.

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL, WEARING AND CORROSION PROPERTIES OF GLOBULAR GRAPHITE CAST IRON COATED BY NITRATION AND PHYSICAL VAPOUR DEPOSITION (PVD) METHODS

Emre ÜNALSAN

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Metallurgical and Materials Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ozlem Altintas Yildirim

2023, 60 Pages

Jury
Assoc. Prof. Özlem ALTINTAŞ YILDIRIM
Assoc. Prof. Mustafa KOCABAŞ
Asst. Prof. Gökhan ARICI

The biggest problem in various engineering applications and machine parts is the wear and corrosion of materials. Corrosion and wear occur on the surface of the material. However, it is possible to improve the wear and corrosion properties of materials with various surface modifications.

In this study, GGG50 (EN-GJS-500-7) and GGG70 (EN-GJS-700-2) quality spheroidal graphite cast iron materials were examined separately; Electroless Ni-B coating, TiN PVD coating, gas nitriding and plasma nitriding processes were applied. While the thickness of the nitride layer formed on the surfaces of GGG50 samples as a result of gas nitriding coating was ~8.9±0.5 µm, it was observed that a ~6.6±0.4 µm thick nitride layer was formed on their surfaces as a result of plasma nitriding coating. The nitride layer thicknesses formed on the surfaces of the GGG70 sample by coating it with gas and plasma nitriding were determined as ~7.0±0.3 µm and ~3.9±0.4 µm, respectively. These results show that GGG50 and GGG70 spherical graphite cast irons were successfully coated by gas and plasma nitriding processes.

After each application, the samples; microstructural, hardness, wear and corrosion properties were examined. According to the results of the XRD analysis performed to determine the phases that will form on the sample surface as a result of the coating, it was determined that Fe3N and Fe4N phases were formed in the nitrided samples, NiB3 phase was formed in the electroless Ni-B coating, and TiN phase was formed in the PVD coating. While uncoated GGG50 spheroidal graphite cast iron has a hardness of 178 HB, it was observed that as a result of coating these samples with gas and plasma nitriding, the average hardness values increased to 838±23 HB and 809±14 HB, respectively. Similarly, it was determined that the hardness value of the GGG70 sample, which had a hardness of 222 HB in its uncoated state, increased to 817±19 HB after coating with gas nitriding and to 832±27 HB after coating with plasma nitriding. According to these results, it was observed that both coating types caused a significant increase in the hardness values of spheroidal graphite cast irons. In addition, nitrided samples were subjected to tensile testing before and after the process. It was observed through tensile tests that the hard nitride layer formed on the surface of the samples after the gas nitriding process increased the yield strength and significantly reduced the tensile strength and elongation values.

When the wear resistance of the samples was compared, it was observed that the wear resistance of the TiN PVD coated samples improved, while there was no significant improvement in the wear resistance of the samples after Ni-B coating. With the tensile tests, it was observed that the hard nitride layer formed on the surface of the samples after the gas nitriding process increased the yield strength and significantly reduced the tensile strength and elongation values. In short, the samples have become somewhat brittle.

As a result of the corrosion tests, it was determined that GGG50 and GGG70 quality ductile iron materials showed different corrosion resistance after coating. Among the applications carried out in this study, it was determined that the electroless Ni-B coating on GGG50 quality samples had the lowest corrosion resistance, while the electroless Ni-B coating on GGG70 quality samples had the highest corrosion resistance.

Keywords: Electoless Ni-B coatting, Gas nitriding, Nodular graphite cast irons, Plasma nitriding, PVD Coating.

ÖNSÖZ

Öncelikle tez konusunu seçerken bana yardımcı olan, tez çalışmamın araştırılmasında, yürütülmesinde ve deneysel faaliyetlerinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Mehmet Yıldırım'a ve değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Özlem Altıntaş Yıldırım'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli annem Kezban ÜNALSAN başta olmak üzere, neşesi ile hayatıma değer katan kıymetli arkadaşım Damla KOCAOĞLU'na teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Emre ÜNALSAN
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **vi**

ÖNSÖZ ..... **viii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **xi**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirler. 4
2.1.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması 4
2.1.2. Yapılarına Göre Küresel Grafitli Dökme Demirler 6
2.1.3. Çeliklere Göre Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Avantajları. 7
2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemleri 7
2.2.1. Nitrasyon 8
2.2.1.1. Plazma nitrürleme (İyon nitrürleme) 9
2.2.1.2. Gaz nitrürleme 11
2.2.1.2.1. Amonyak kullanımı ile gaz nitrürleme 12
2.2.1.2.2. Amonyak, azot veya hidrojen kullanımı ile gaz nitrürleme 12
2.2.1.2.3. Amonyak veya hidrokarbon kullanımı ile gaz nitrürleme 13
2.2.1.2.4. Sıvı (Tuz banyosunda) nitrürleme 13
2.2.1.2.5 Toz ile nitrürleme 13
2.2.2. PVD Kaplama 13
2.2.2.1. Buharlaştırma yöntemi (Evaporation) 14
2.2.2.1.1. Endüktif ve rezistans ile buharlaştırma yöntemleri 15
2.2.2.1.2. Elektron demeti kullanılarak buharlaştırma yöntemi 15
2.2.2.1.3. Katodik ark yöntemi kullanarak buharlaştırma 16
2.2.2.2. Sıçratma (Sputtering) 17
2.2.2.2.1. Diyot sıçratma 19
2.2.2.2.2. Triyot sıçratma 20
2.2.2.2.3. Manyetik alanda sıçratma 21

3. MATERYAL VE YÖNTEM **23**

3.1. Altlık Malzemeler 24
3.2. Yüzey İşlemleri ve Kaplamalar 24
3.2.1. Gaz Nitrasyonu 24
3.2.2. Plazma Nitrasyonu 25
3.2.3. Akımsız Ni-B Kaplama 26
3.2.4. PVD Kaplama 28
3.3. Karakterizasyon Çalışmaları 30
3.3.1 Kimyasal Analiz 30
3.3.2. Faz Analizi 30
3.3.2. Mikroyapı Analizi 30
3.3.3. Çekme Testi 31

3.3.4. Sertlik Testi 31
3.3.5. Aşınma Testi 32
3.3.6. 2D Yüzey Pürüzlülük Ölçümü 33
3.3.7. Korozyon Testi 33

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 34

4.1. Altlık Küresel Grafitli Dökme Demirler 34
4.5. Gaz ve Plazma Nitrasyon Yüzey İşlemleri 38
4.4. Akımsız Ni-B ve PVD Kaplama 44
4.5. Aşınma Testi 46
4.5. Korozyon Testi 52

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 56

5.1. Sonuçlar 56
5.2. Öneriler 57

KAYNAKLAR 58

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

% ağ.	: Ağırlıkça yüzde
C	: Karbon
Ce	: Seryum
°C	: Celcius derecesi
Cu	: Bakır
Cr	: Krom
cm	: Santimetre
cm^3	: Santimetre küp
dk	: Dakika
Ekor	: Korozyon potansiyeli
eV	: Elektronvolt
Fe	: Demir
Fe_3C	: Sementit
FeN	: Demir Nitrür
GPa	: Gigapascal
Hz	: Hertz
ikor	: Korozyon akım yoğunluğu
KCN	: Potasyum siyanür
kgf	: Kilogram kuvvet
m	: Metre
mg	: Miligram
mm	: Milimetre
µm	: Mikrometre
µΩ	: Mikroohm
MPa	: Megapascal
mV	: Milivolt
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
µm	: Mikrometre
NaCN	: Sodyum siyanür
Ni	: Nikel
N	: Newton
P	: Fosfor
Pb	: Kurşun
sa	: Saat
s	: Saniye
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
V	: Vanadyum

W	: Watt
WC	: Tungsten Karbür

Kısaltmalar

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Kurumu
BCIRA	: British Cast Iron Research Association
CVD	: Chemical Vapour Deposition
Çes	: Karbon Eşdeğeri
DDK	: Dökme Demir Küresel
EDS	: Enerji saçılım spektrometresi
EIS	: Elektrokimyasal empedans spektroskopisi
HV	: Vickers sertliği
INCO	: International Nikel Company
PN	: Plazma Nitrürleme
PVD	: Physical Vapor Deposition
PN	: Plazma Nitrürleme
XRD	: X-Işını Difraksiyon

1. GİRİŞ

İnsanlık ihtiyaçlarına bağlı olarak, taş devrinden bu yana el aletleri ve makine düzenekleri geliştirmiştir. Günümüzde ise dünyamızda daralan hammadde kaynakları, aşırı nüfus sebebi ile üretilen malzemelerin daha dayanıklı ve ekonomik olmalarını gerektirmektedir. Günümüzde malzeme bilimi; yapılan mühendislik çalışmaları ile üretimde kullanılan malzemelerin istenilen kimyasal, mekanik ve fiziksel dayanıklılıklarının arttırılması, duruma göre yeni malzeme geliştirme gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Üretilen mühendislik ürünlerinin zaman içerisinde ortam şartları ya da maruz kaldığı kuvvetler etkisi ile korozyon veya aşınma gibi sebepler ile hasara uğraması sonucu kullanılamaz hale gelmesi en çok karşılaşılan sorunlardandır. Bu sorunlar üretilen ürünün ekonomik olmamasına ve kullanım ömrünün azalmasına neden olmaktadır.

Amerikan Ulusal Teknoloji Enstitüsü'nün verilerine göre 1982 yılında yerel korozyon ve aşınma nedeninden oluşan yapı, makine ve ekipman zararının gayri safi milli hâsılanın %6'sını (178,5 milyar dolar) kapsadığı belirtilmiştir. Bu rakamların dünya genelinde ise 4,4 trilyon dolara ulaştığı belirtilmektedir. Bu sebeple aşınma ve korozyonu engellemek ve bu konuda daha fazla bilgi edinmek amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. (Ludema, 1996).

DIN 50320 ve ASTM G40–05 standartlarına göre aşınma: kullanılan malzemelerin, farklı diğer malzemeler ile bulunduğu temas ve akabinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük malzemelerin ayrılması neticesinde meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması şeklinde ifade edilmektedir. (Bağcı 2010; Ludema, 1996).

Mühendislik ürünlerinde korozyon ve aşınma gibi maruziyetler parçanın yüzeyinde görüldüğü göz önüne alındığında bu parçaların yüzeyinde modifikasyonların yapılması gerekliliği kaçınılmazdır. Öte yandan bu parçalarda farklı malzeme seçiminde alternatif bir çözümdür. Mühendislik tasarımlarında asıl olan en ekonomik yöntem ile en iyi tasarımı üretmektir. Modifikasyonlar ile yapılacak olan yüzey işlemleri bu bağlamda büyük önem göstermektedir. Yapılacak uygun yüzey işlemleri ile geliştirilen malzemeler farklı kullanım alanlarına olanak sağlamaktadır.

Günümüzde en yaygı kullanılan yüzey sertleştirme yöntemleri Çizelge 1.1'de gösterilmiştir. Bazı yöntemlerin işlem maliyetleri ise Şekil 1.1'de gösterilmiştir.

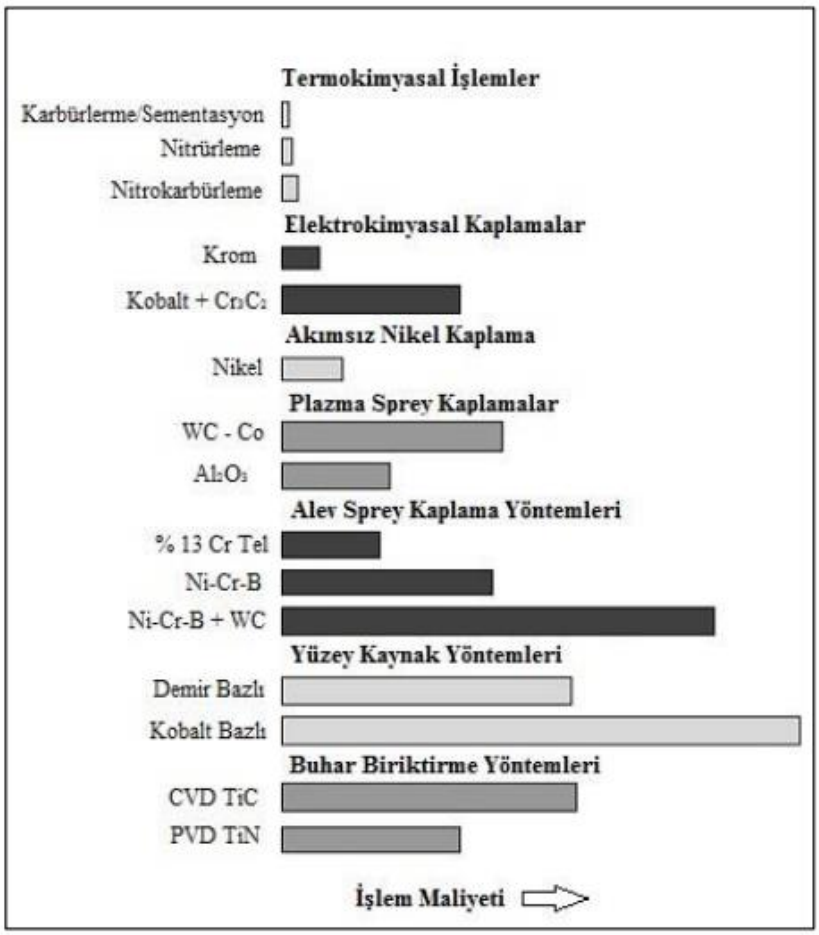
Çizelge 1.1. Yüzey sertleştirme işlemleri kapsamında geliştirilen mühendislik yöntemleri

Grup	Genel Tanım	Örnekler
I	**Termal Yöntemler** Yüzey özelliklerini yalnızca ısı ile değiştiren yöntemler.	Alevle Yüzey Sertleştirme İndüksiyon ile Yüzey Sertleştirme Lazer ile Yüzey Sertleştirme.
II	**Kaplama Yöntemleri** Malzeme yüzeyinde katmanlar oluşturarak yapılan yöntemler.	Kaynak Yöntemi ile Yüzey Sertleştirme Akımsız Ni Kaplama Termal Sprey Kaplama PVD (Physical Vapor Deposition) CVD (Chemical Vapour Depositio) Sert Krom Kaplama
III	**Termokimyasal Yöntemleri** **(Difüzyon Yöntemleri)** Difüzyon ile yüzey özelliklerin değiştirilmesi.	Borlama Nitrürleme Nitrokarbürleme Karbürleme/Sementasyon Karbonitrürleme

Çizelge 1.1'de gösterilen tüm işlemlerin esas nedeni, işlem sonrası gerekli tokluk ve sertliğin malzemenin çekirdeğinde korunmasını sağlarken, yüzeyde ise yüksek aşınma direnci ve korozyon dayanımı gibi özellikler gösteren malzemeler elde etmektir. Bu işlemler içerisinde en çok uygulaması yapılan proses ekonomikliği sayesinde nitrürleme prosesidir. Genellikle 420°C ile 630°C sıcaklık aralığında gerçekleşen nitrürleme işlemi uygulama sıcaklığının düşük olması nedeniyle yöntemin ekonomik olmasını sağlar.

Nitrürleme; uygulama yapılacak parçanın yüzeyinden çekirdeğine doğru gerçekleşen atomik boyutta azot difüzyonu neticesinde yapılan yüzey sertleştirme işlemidir.

Ayrıca işlem sonunda hızlı soğutma gereksinimi olmaması süreye bağlı üretim maliyetlerinin düşmesine neden olur.



Şekil 1.1. Yüzey modifikasyon işlemleri işletme maliyetlerinin karşılaştırılmasını şematik olarak vermektedir. (Davis, 2002)

Şekil1.1'de görüldüğü üzere fiziksel buhar biriktirme (physical vapour deposition) kaplama yöntemi ile gerçekleştirilen yüzey işlemleri maliyetleri neticesinde endüstride hızla yaygınlaşan ve gelişen proseslerden biri olmuştur. Fiziksel buhar biriktirme ile kaplama tekniği malzemelere:

- Titanyum karbür nitrür (Ti(C,N))
- Titanyum nitrür (TiN)
- Titanyum karbür (TiC)
- Titanyum alüminyum nitrür ((Ti,Al)N)
- Titanyum zirkon nitrür ((Ti,Zr)N)
- Titanyum alüminyum vanadyum nitrür (Ti,Al,V)N gibi kaplama tabakalarının uygulanması mümkündür.

Tez kapsamında yapılan çalışmada GGG50 ve GGG70 altlık malzeme üzerindeki; nitrürleme, PVD TiN kaplama ve akımsız nikel kaplamanın GGG50 ve GGG70 altlık malzeme üzerindeki özellikleri incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirler

Küresel grafitli dökme demir, farklı çalışmalarda bulunan İngiliz dökme demir araştırma derneği ve uluslararası nikel şirketince (INCO) geliştirilmiş ve ilk olarak 1948 yılında ABD'de gerçekleştirilen ve sektörün ileri gelen firmalarının oluşturduğu toplantıda 'döküm dünyasında yeni bir malzeme buluşu' olarak belirtilmiştir. Zaman içinde yeni ortaya çıkan bu malzeme için grafitlerin şeklinden dolayı 'nodüler (sfero)' ya da 'küresel grafitli dökme demir' olarak isimlendirilmiştir. (ŞEN 1997)

Küresel grafitli dökme demirlerin (KGDD) yapısı gri dökme demirler gibi olsa da farkı grafitlerin küre biçiminde olmasıdır. Grafitlerin bu geometrisi KGDD'lerin mekanik özeliklerini büyük oranda değiştirmektedir.

1150 °C'de ağırlıkça %4,3 karbon oranına sahip alaşımın demir karbon denge diyagramı incelendiğinde bu noktanın ötektik reaksiyon olduğu gözlemlenir. Bu bileşime sahip alaşımlardan daha fazla karbon içeren alaşımlara ötektik üstü, daha az karbon içeren alaşımlara ise ötektik altı alaşımlar denilmektedir. Silisyum (Si) elementi KGDD'lerde ötektik noktayı en çok değiştiren elementtir. Silisyum ile ötektik nokta değeri düşmektedir. Bu duruma karbon eşdeğerliği denilmektedir (Ceş).

Karbon eşdeğerliğinin hesaplamalarında 'Ceş = (%C +(1/3Si + 1/3%P))' formülü kullanılmaktadır. (Schumann ve Kristallgeometrie, 1974).

Çeşitli ülkelerde karbon eşdeğerliği yerine doyumluk oranı kullanılmaktadır. Bu iki terim arısında basit bir bağlantı vardır. 'S.C. = ((% C toplam) / 4,3 – K.E. + % C)' KGDD'ler, Türk standartlarına göre dökme demir küresel şeklinde ifade edilir. 'S.C.' doyumluk oranı, 'K.E.'ise karbon eşdeğeri ifade etmektedir. (Schumann ve Kristallgeometrie, 1974).

2.1.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Dökme demir küresel (DDK) türleri isimlendirilirken sonuna gelen sayılar minimum çekme mukavemetini kg/mm^2 olarak temsil eder. Örnek isimlendirmeler Çizelge 2.1.'de gösterilmiştir. (Kuş, 2007).

Çizelge 2.1. KGDD'lerin TSE' ye göre tanımlanması. (Demirlek, 2013).

AD	Çekme Dayanımı. (MPa)	Akma Dayanımı. (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HBW)	Mikroyapı
DDK 40	42	28	12	140-201	Çoğunlukla Ferritik
DDK50	50	35	7	170-241	Ferritik+Perlitik
DDK60	60	40	3	192-269	Ferritik+Perlitik
DDK70	70	45	2	229-302	Çoğunlukla Perlitik
DDK80	80	50	2	248-352	Perlitik
DDK35.3	35	50	22	-	Ferritik
DDK40.3	40	22	18	-	Ferritik

Avrupa standardı EN 1563 standardında küresel grafitli dökme demirler GJS olarak adlandırılır. Bu adlandırmada ilk rakamları minimum çekme mukavemetini ikinci rakamlar ise minimum % uzama değerlerini gösterir. Çizelge 2.2'de örnek verilmiştir.

Çizelge 2.2. KGDD'lerin EN 1563 standardına göre isimlendirilmesi. (ÇETİN, 2016)

Sınıf	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HBW)	Mikroyapı
EN-GJS-350-22	350	220	22	160'dan az	Ferritik
EN-GJS-400-18	400	250	18	130-175	Ferritik
EN-GJS-450-10	450	310	10	160-210	Ferritik
EN-GJS-500-7	500	320	7	170-230	Ferritik+Perlitik
EN-GJS-600-3	600	370	3	190-270	Perlitik+Ferritik
EN-GJS-700-2	700	420	2	225-305	Perlitik

DIN 1693 standartlarında küresel grafitli dökme demirlerin çekme-akma dayanımları, % uzama değerleri ve Brinell sertlikleri esas alınmıştır. Çizelge 2.3'te gösterilen bu sınıflandırmada küresel grafitli dökme demir kısaca GGG olarak belirtilmektedir (Çelik, 2001).

Çizelge 2.3. DIN 1693 standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması (Çelik, 2001).

Sınıf	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HBW)	Mikroyapı
GGG 35-3	350	220	22	-	-
GGG 40-3	400	250	18	-	-
GGG 40	400	250	15	120	Ferritik
GGG 50	500	320	7	156	Ferritik+Perlitik
GGG 60	600	380	3	170	Perlitik+Ferritik
GGG 70	700	440	3	302	Perlitik
GGG 80	800	500	2	210	Perlitik

2.1.2. Yapılarına Göre Küresel Grafitli Dökme Demirler

KGDD malzemeleri ısıl işlem prosesi uygulamaksızın üç şekilde inceleyebiliriz:

- **Ferritik yapıdaki KGDD;** Bu tür dökme demirlerde grafitler ferrit fazı içerisindedir. Bu malzemelerin özellikleri: işlenebilirlik, yüksek korozyon direnci, magnetik geçirgenlik, yüksek darbe direnci ve göreceli şekilde termal iletkenliktir.
- **Ferritik – Perlitik yapıdaki KGDD;** Bu tür dökme demirler endüstride üretim maliyetlerinin düşük olması nedeni ile en fazla kullanılan türdür. Küresel grafitler ferrit ve perlit karışımında bulunur. Bu malzemelerin özellikleri ferritik ve perlitik KGDD'ler arasındadır.
- **Perlitik yapıdaki KGDD;** Bu tür dökme demirlerde ise küresel grafitler perlit ana fazının içindedir. Bu malzemelerin özelikleri: yüksek aşınma direnci, iyi işlenebilirlik, süneklik ve yüksek mukavemettir.

Her üç türdeki KGDD'ler için yüksek histerisiz kaybı özelliği ön plandadır. Ferritik, Perlitik ve Ferritik–Perlitik yapıdaki dökme demirler dışında gelişen mühendislik ihtiyaçları neticesinde östenitik, martensitik ve östemper KGDD çeşitleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bu KGDD'lerin maliyetleri diğerlerine nispeten daha fazladır. Özellikle martenzitik KGDD'lerin döküm halleri çok sert ve kırılgandır. Temperlenmiş martenzit ise yüksek aşınma direnci ve mukavemet özellikleri gösterir. (ASM Handbook 1)

2.1.3. Çeliklere Göre Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Avantajları

KGDD'lerin hem çeliğe yakın hem de dökme demirlerin özeliklerine sahip olması nedeni ile endüstride kullanımı her geçen gün artmaktadır. KGDD'lerin bazı özellikleri şu şekildedir:

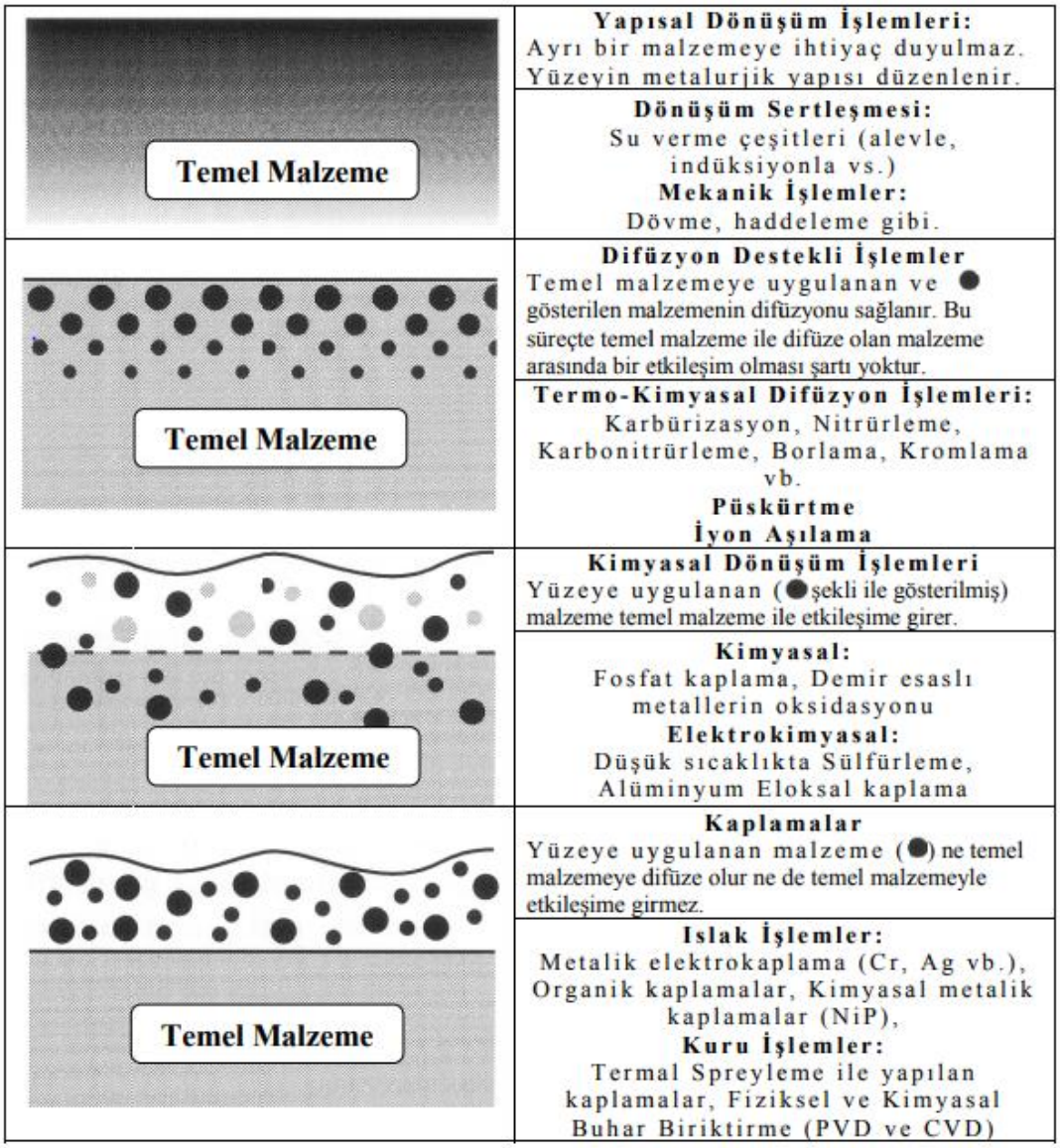
a. Çeliklere nispeten Küresel grafitli dökme demirler ~ %7 daha hafiftirler.
b. KGDD'den yapılan dişliler, çelik dişlilerden daha sessiz çalışmaktadır.
c. Çeliklerdeki yüzey çentik hassasiyeti KGDD'lerde nispeten daha düşüktür. Bu nedenle yüzey işlemleri çelikler kadar maliyetli değildir.
d. Hammadde ve üretim yöntemi olarak KGDD'ler çeliklerden daha ekonomiktir.
e. Son şekli verilmiş dişli tarzı parçaların döküm ile üretilmesinde çeliklere göre KGDD'ler daha uygundur.
f. KGDD'ler çeliklere nispeten daha az işleme ucu sarfiyatı ile işlenebilir ve daha ekonomik işleme imkânı sunar.
g. KGDD'lerin işlenmesi sırasında gerekli olan enerji çeliklere göre yaklaşık %50 daha azdır. (DİKEÇ 1985)

2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemleri

KGDD'lere farklı birçok yüzey modifikasyonu uygulanabilmektedir. Bu işlemler uygulama sonrası yüzeydeki durumlarına ve metotlara göre:

- yapısal dönüşüm,
- difüzyon destekli,
- termokimysal – difüzyon,
- kimyasal dönüşüm,
- kaplama olarak sınıflandırılabilir.

Metotlara göre yüzey işlemleri ve kaplamalarının genel türleri ve bazı uygulama yöntemler Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Yüzey işlemlerinin uygulamalarına göre temel tipleri (Polak ve Wicox 2003)

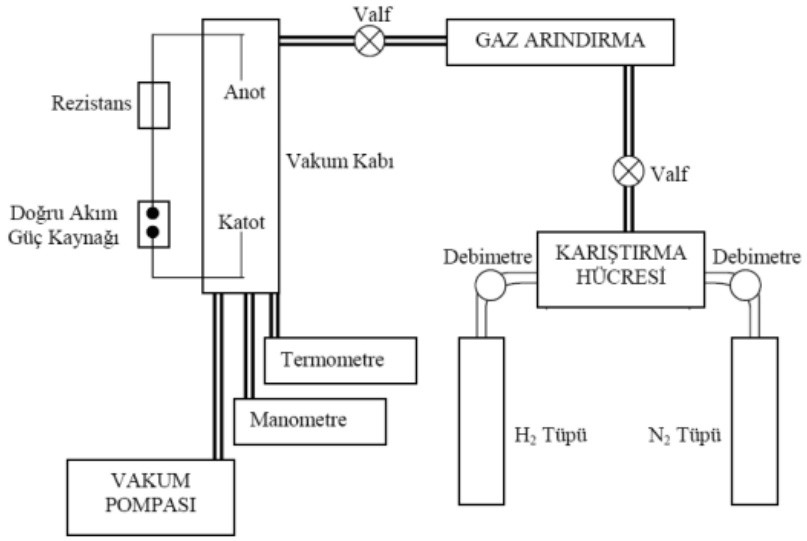
2.2.1. Nitrasyon

Nitrasyon demir esaslı malzemelerde endüstride sık kullanılan bir uygulamadır. Nitrasyon işlemi temelinde azot atomlarının demir içine difüzyonu ile malzemenin mikroyapısında metal-nitrür bileşiklerinin oluşturulmasıdır.

Nitrürlemenin avantajları: Aşınma direncinde artış, yüksek yüzey sertliği ve korozyon direncinde artış olarak sıralanabilir.

2.2.1.1. Plazma nitrürleme (İyon nitrürleme)

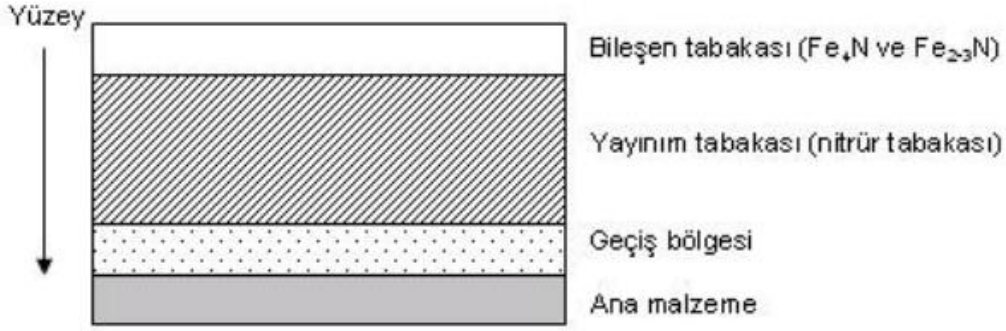
İyon nitrürleme yönteminde vakum yapılmış bir ortama N_2 veya NH_3 gazları doldurulur ve uygulama yapılacak parça- anot arasına yüksek gerilim uygulanır. Gaz ortamının iyonlaştırılması ve oluşan azot iyonlarının uygulama yapılan parça üzerine hızlandırılarak çarptırılması yöntemi ile nitrürleme işlemi gerçekleşmektedir. Örnek bir plazma nitrürleme sistemi Şekil 2.2'de gösterilmiştir



Şekil 2.2. Plazma nitrürleme ünitesi şematik gösterimi.

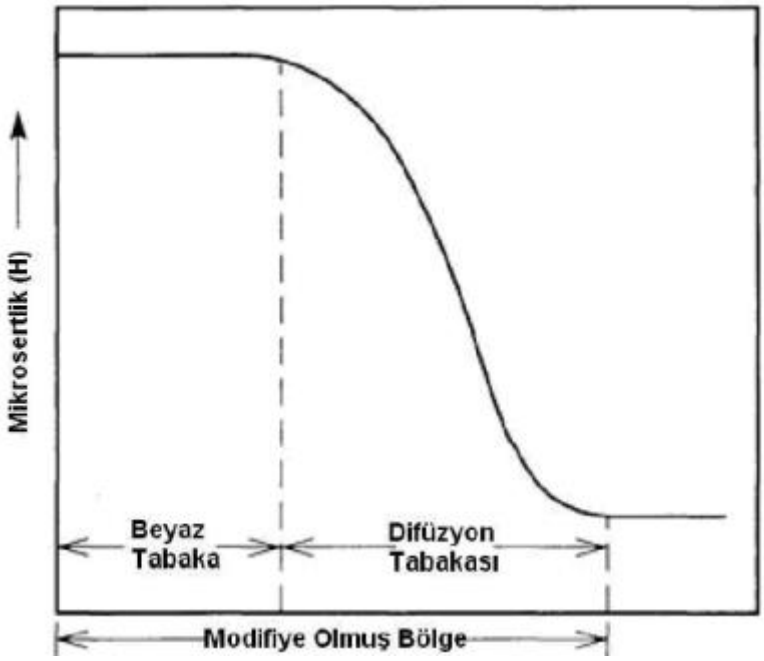
İyon nitrürleme ile elde edilen malzeme yüzeyinin mikro yapısı ve tribolojik özellikleri, nitrürleme değişkenlerine göre farklılık gösterir. Bu değişkenler içerisinde mikroyapı ve tribolojik modifikasyonlar üzerinde en etkili olanları, nitrürleme sıcaklığı, nitrürleme süresi, gaz karışım oranları ve uygulama yapılan malzemenin türüdür. (Özdemir ve Erten 2003).

Uygulama yapılan malzemenin yüzey bölgesinde Fe_4N ve/veya $Fe_{2-3}N$ fazlarından meydana gelen ince bir bileşen tabakası, bu tabakanın hemen altında ise N atomlarının kısmen eridiği daha kalın bir difüzyon tabakası şeklinde iki katmandan oluşan bir yapı Şekil 2.3'deki gibi meydana gelmektedir. Nitrürleme sonrası değişime uğramış bölgenin sertlik dağılımı Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. PN sonrası oluşan içyapılar. (http://www.ermir.com.tr/tr/technical.asp, son erişim tarihi: Haziran 2022)

Plazma nitrürleme değişkenlerine bağlı olarak işlem sonrasında bir difüzyon tabakası ve beyaz tabaka oluşur. Ayrıca işlem sırasında oluşan beyaz tabaka ise her zaman olmamakla birlikte sıklıkla oluşmaktadır. (Topçu 2010).



Şekil 2.4. İyon nitrürlenen bölgenin sertlik dağılımı.

Beyaz tabaka ismi verilen bölge demir esaslı malzemeler için (KGDD'ler gibi) metal-nitrür bulunduran, malzemenin en dış kısmında, kimyasal dağlama işleminden etkilenmeyen tabakadır.

En üst tabakada bulunun beyaz bölge dağlamadan etkilenmediğinde farklı fazların karışımından ibarettir. Bu bahsedilen fazlar genellikle Al, Cr, Mo, V, W, Ti gibi elementlerin nitrür biçimleridir. Bir ya da birçok farklı nitrür fazı bulundurabilir. Bu bölge malzemede sertlik ve mukavemeti arttırır. İhtiyaç doğrultusunda ana malzemedeki

alaşım durumuna göre uygulama parametreleri değiştirilerek beyaz tabaka kalınlığı arttırılıp azaltılabilir. Bu sayede malzeme yüzeyinde sürtünmeye ve yorulmaya karşı çok yüksek mukavemet sağlanabilir.

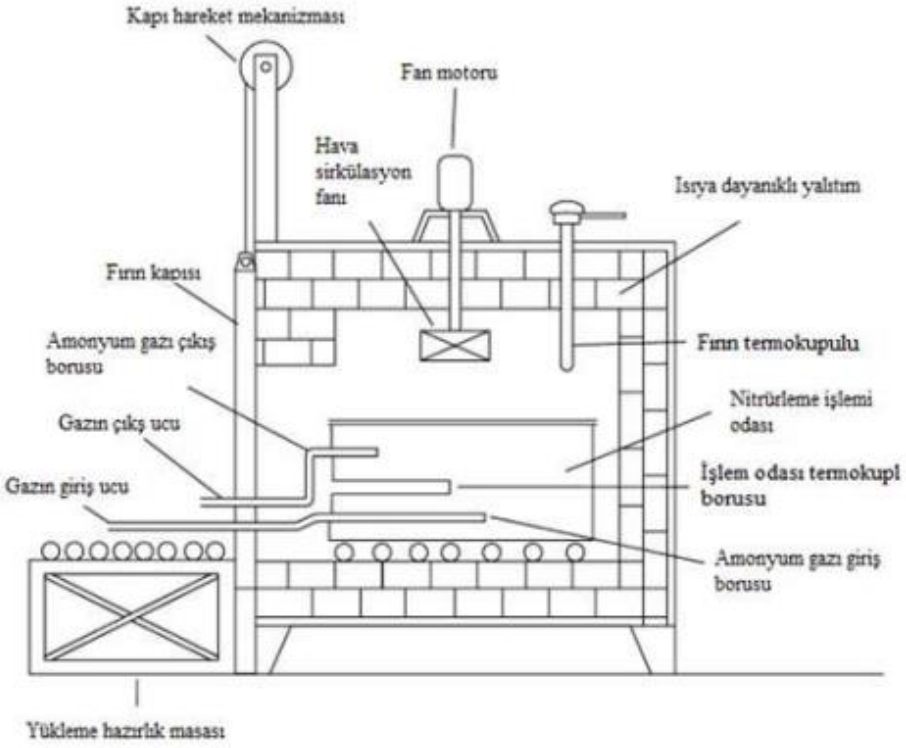
Beyaz tabaka altındaki tabaka ise difüzyon tabakasıdır. Difüzyon tabakasında ince ve sıkıca dağılmış sert ve nispeten kırılgan nitrür fazları bulunmaktadır.

Geleneksel nitrürleme işlemlerinde azot yüksek enerji bölgeleri olan tane sınırlarına difüze olarak, tane sınırlarında bulunan karbür fazları ile çok gevrek olan karbonitrürleri oluşturmaktadır. İyon nitrürlemede ise uygulama sırasında karbonsuz nitrürleme gazı kullanılarak yüzey ve yüzeye yakın yerlerde karbon saçılması sayesinde karbon miktarının azalmasını sağlamak mümkün olmaktadır. Bu nedenle gevrek karbonitrür fazları yüzeyde görülmeksizin iç kısımlara doğru itilerek yüzeyin aşınma ve yorulmaya karşı mukavemeti artar. Difüzyon bölgesi kalınlığı malzeme türüne ve işlem değişkenlerine bağlı olarak 500-600 µm veya daha derinlere inebilir. Difüzyon tabakası oluşumu ve derinliği, zamanın ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcaklık ve zaman ile doğru orantılı artmaktadır. (Singh ve Alphonsa 2005).

2.2.1.2. Gaz nitrürleme

Gaz nitrürleme: yaygın olarak amonyak gazı ihtiva eden bir ortamda ve 550 – 600^0C gibi nitrürleme için uygun bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Uygulama yapılacak malzemenin yüzeyine azotun difüze olmasıyla yapılan bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Şekil 2.5’de gaz nitrürleme işleminde kullanılan tipik bir fırın şematik olarak gösterilmektedir.

510 °C’de amonyak ($2NH_3 \rightarrow 2N+3H_2$) reaksiyona göre ayrışmakta ve reaksiyon sonunda oluşan atomik yapıdaki azot ise malzemenin yüzeyinden içine doğru yayınarak nitrürleme işlemi gerçekleşmesi sağlanmaktadır. 0,2- 0,7 mm arasında etkin sertleştirme derinliği istenen malzemelerde gaz nitrürleme işlemi kullanılabilir. (Jung, 2011)



Şekil 2.5. Gaz nitrürleme fırınının şematik görünümü.

Gaz nitrürleme prosesinde azot ile birlikte farklı gaz karışımları da kullanılmaktadır. Bunlar;

- Amonyak
- Amonyak-azot veya amonyak- hidrojen
- Amonyak veya hidrokarbonla gaz nitrürlemedir.

2.2.1.2.1. Amonyak kullanımı ile gaz nitrürleme

Amonyak ile gaz nitrürlemede uygulama yapılacak malzeme üzerine amonyağın yaklaşık 510 ^{0}C sıcaklıkta fırın içine dolmasına izin verilir. ($2NH_3 \rightarrow 2NFe + 3H_2$) Reaksiyonuyla ayrışan azot malzeme tarafından absorbe edilir. Bu sayede nitrürleme gerçekleşir.

2.2.1.2.2. Amonyak, azot veya hidrojen kullanımı ile gaz nitrürleme

Amonyak, azot veya hidrojen kullanımı ile gaz nitrürleme çok tercih edilen bir yöntem değildir. Genelde %20 amonyak ve %80 azot içeren bir gaz karışım kullanılır.

Mikrosan'ın çalışmalarına göre düşük amonyak miktarı, düşük bir azot aktivitesi meydana getirir. Bu durum ise daha tok bir tabakanın oluşmasını sağlamaktadır. Ayrıca sadece hidrojen veya amonyak ilave edilerek yapılan nitrürleme işleminde, amonyağın ayrışma miktarındaki artış ile benzer sonuçlar elde edilmesi mümkündür. (Mikrosan, 2012)

2.2.1.2.3. Amonyak veya hidrokarbon kullanımı ile gaz nitrürleme

Amonyak veya hidrokarbon kullanımı ile gaz nitrürleme işlemi amonyakla gaz nitrürleme yöntemindeki proses ile aynıdır. Fakat hidrokarbonlar ve havada oluşturulan saf propan da gaz içerisine genellikle ilave edilir. (Mikrosan, 2012)

2.2.1.2.4. Sıvı (Tuz banyosunda) nitrürleme

510 – 590 °C sıcaklık aralıklarında NaCN ve KCN gibi azot ve karbon iyonları bulunduran tuz banyolarında sıvı nitrürleme yapılır.

2.2.1.2.5 Toz ile nitrürleme

Nitrürlenecek malzemeler; toz ile nitrürleme işleminde yeterli miktarda toz tabakası bulunan kutu içerisine yerleştirilerek nitrürleme işlemi yapılır. Kapalı kutu içindeki nitrürlenecek malzeme fırına gönderilir. İşlem 520-572 °C olan fırın içerisinde gerçekleştirilir. (Mikrosan, 2012)

2.2.2. PVD Kaplama

Faraday'ın 1850 yıllarında yaptığı araştırmalar sonucu başlayan ve günümüze kadar geliştirilerek gelen yöntemlerden birisi de PVD (physical vapour deposition) yani fiziksel buhar biriktirmedir. Bu yöntem kaplama malzeme yüzeyindeki atomları buharlaştırarak uygulama yapılacak yüzeye iyonik ya da atomik bileşikler şeklinde biriktirilmesi yöntemidir. (Savaş 2004)

PVD metodunun yaygınlaşmasına katkıda bulunan avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kaplamaların yüzey kalitelerinin iyi olması,

- gerçekleştiği sıcaklık aralığının oldukça geniş olması,
- şekil olarak kompleks parçaların kaplanabilmesi,
- zehirli atık üretmeyip çevre dostu olması,
- seramik, metal, alaşım, polimer gibi kaplamaların elde edilebilmesi,
- oldukça yüksek üretim hızına sahip olması,
- sökülerek tekrar kaplanabilir olması,
- yapışma kalitesinin oldukça iyi olması,
- geniş kullanım alanına sahip olmasıdır.

Bu yöntemin ne yazık ki sınırlamaları mevcuttur. Bunlar:

- Nötr parçacıkların ve iyonların enerjilerini kontrol etmek hız yüksek olduğunda zordur.
- Elektro kaplama gibi sistemlere göre daha maliyetli bir işlemdir. Bunun sebebi PVD iyon kaplama işleminin düşük verimli olmasıdır.
- Çalışması için yüksek vakum değerinde olmalıdır. (Sert, H., Can, A., Samancı, A., Toprak, H.,2005.)

Uygulama yöntem ikiye ayrılır. Bunlar;

− Buharlaştırma (Evaporation)

− Sıçratma (Sputtering)

2.2.2.1. Buharlaştırma yöntemi (Evaporation)

Buharlaştırma yöntemi kullanılarak yapılan PVD kaplamada katı yahut sıvı fazdaki kaplanacak malzemenin; endüksiyon, elektron bombardımanlı, rezistanslı ve katodik arklı sistemler ile buharlaştırılması gerçekleştirilir. Bu yöntemlerde buhar fazı, 10,5 – 10,6 Torr seviyelerinde vakum yapılmış vakum tüpleri içinde gerçekleştirilir. Elde edilen buhar fazındaki atomlar uygulama yapılacak malzemeye yolculuğu esnasında moleküller ya da diğer atomlar ile çarpışarak enerjilerini sönümleyebilirler.

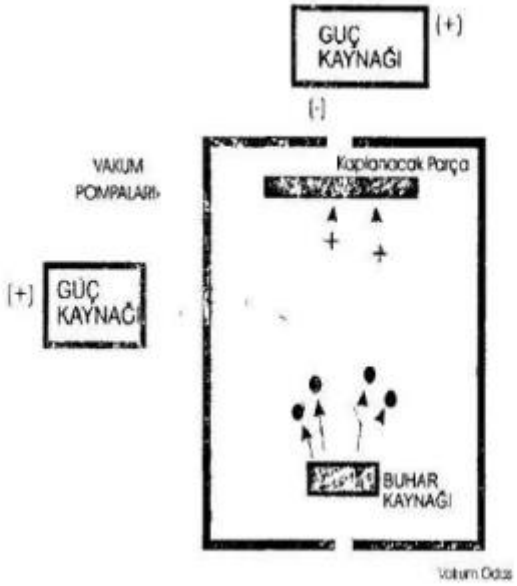
Buharlaştırma yönteminde reaktif gaz da kullanılabilir. Bu tekniğe reaktif buharlaştırma denilir. Reaktif buharlaştırmada tepkime, kaplama malzemesi ile uygulama yapılacak malzeme yüzeyinde gerçekleşir. Bu tür buharlaştırmada parçaya yakın bölgeye konulan bir elektrot ile plazma oluşumu sağlanır.

Reaktif iyon kaplama; kaplanacak parçaya da negatif potansiyel (Bias) uygulanır ve plazmadaki pozitif yüklü iyonların yüzeye doğru ilerlemeleri hızlanır. (Wasa, 1992)

2.2.2.1.1. Endüktif ve rezistans ile buharlaştırma yöntemleri

Endüktif ve rezistans ile buharlaştırma yönteminde buhar fazı oluşturulacak kaplama malzemesi, yüksek sıcaklıklara mukavemetli potalar içine konulur. Bu potaların yüksek sıcaklığa dayanıklı olması önemlidir. Rezistanslı sistemde ısı enerjisi pota çevresine sarmalanmış rezistanslar sayesinde elde edilir. Isıtmanın indüksiyon ile sağlanacağı taktirde su soğutmalı bakır tel ile sarılmış potalara radyo frekansı akımı uygulanır.

Bu yöntem artık popülerliğini yitirmiştir. Bunun sebebi sadece düşük buharlaşma sıcaklığına sahip malzemeler için kullanılabilmesi, yüzey geometrisinin kaplamada önemli role sahip olması, malzemeyle birlikte potanın da buharlaşıp kaplamaya karışma riskine sahip olmasıdır. (Wasa, 1992)



Şekil 2.6. Rezistans ile buharlaştırmalı PVD sistemi.

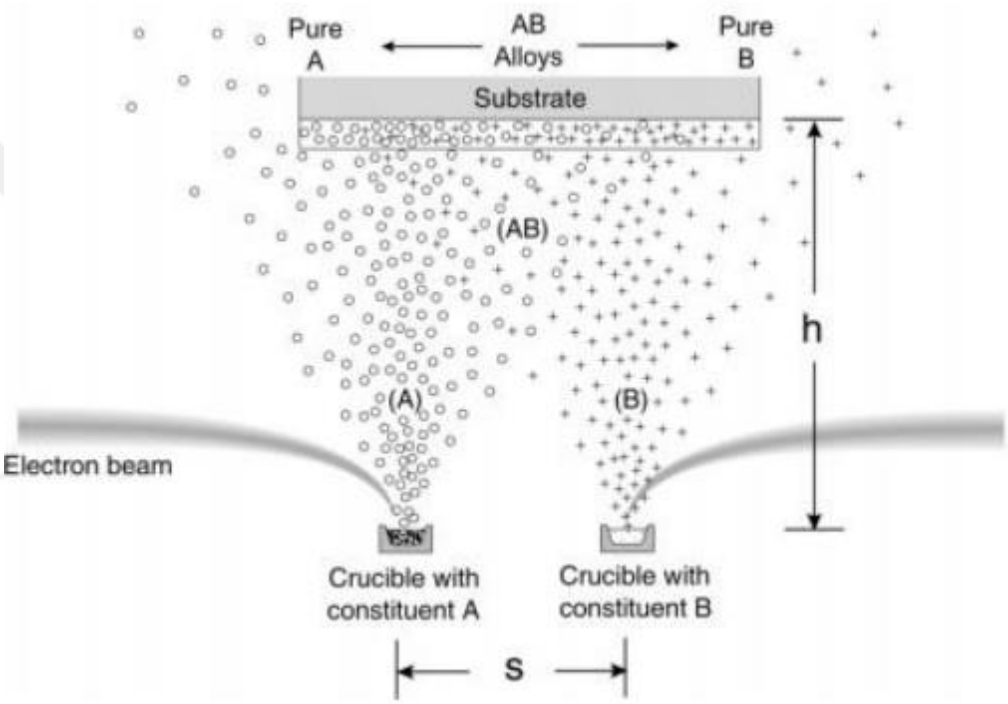
2.2.2.1.2. Elektron demeti kullanılarak buharlaştırma yöntemi

Bu yöntem elektron kaynağından çıkan elektronların, kaplama malzemesi üzerine odaklanarak bombardıman edilmesi neticesinde buharlaşma elde edilmesine dayanır. Bu yöntem ile çok yüksek ergime derecesine sahip kaplama malzemelerinin buharı kolay şekilde elde edilir. Gerekli elektron demetleri iki şekilde üretilir.

Elektron tabancası ile: Akımın Flaman telden geçirilmesi ile tel ısınır. Isınan tel elektron yayar. Elektronlar manyetik alan sayesinde uygulama yapılacak malzemeye pozitif yük uygulanması ile yönlendirilir.

Şekil 2.7'de elektron ışını buharlaşması kullanılarak yapılan PVD sistemi şematik olarak görülmektedir.

Oyuk katot ile: İnert gazların silindir içinde kullanımı ile oluşturulan plazma sayesinde buharlaşma meydana gelir. (Wasa, 1992)



Şekil 2.7. Elektron ışını buharlaşması kullanılarak yapılan PVD sistemi. (Wasa, 1992)

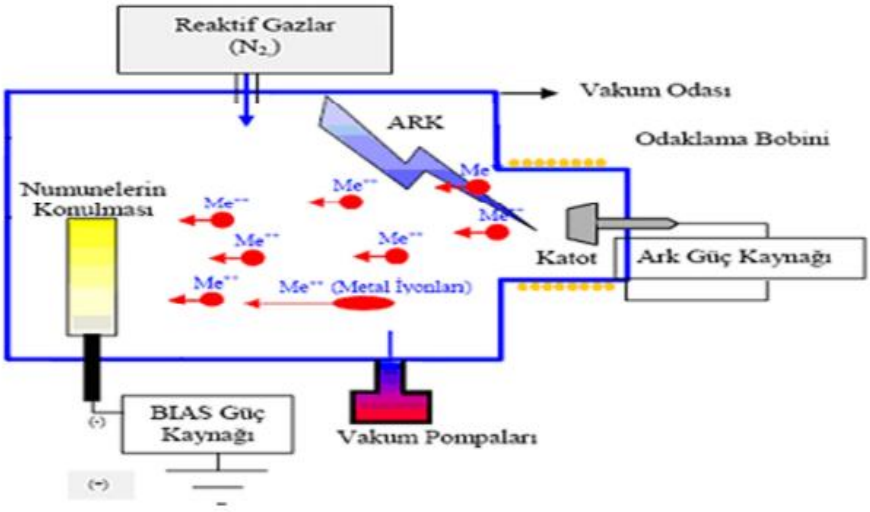
2.2.2.1.3. Katodik ark yöntemi kullanarak buharlaştırma

Katodik ark yöntemi kullanarak buharlaştırma işleminde kaplama malzemesinin vakum altında ve ark etkisinde buharlaştırılması ile yapılır. Bu yöntem PVD tekniklerinde yeni kullanılan bir yöntem olmasına rağmen hızla yaygınlaşmaktadır.

Şekil 2.8'de katodik ark sisteminin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir.

Bu sistemin yaygınlaşmasındaki en önemli etken, ark etkisi altında buharlaşan kaplama malzemesinin, oluşan elektriksel alan içerisinde hızlı şekilde yüksek enerji ve oranda iyonlaşmasıdır.

Ne yazık ki bu yöntemin dezavantajı ark ile buhar oluşturma anında elde edilen metal damlacıklarının uygulama yapılan yüzeye yapışarak pürüzlülüğü arttırmasıdır.



Şekil 2.8. katodik ark sisteminin çalışma prensibi şeması. (Wasa, 1992)

Katodik ark yönteminde kaplama malzemesi vakum odasına katot olarak asılırken, uygulama yapılacak malzeme anot olarak asılır. Yüksek akım ve düşük voltajın etkisiyle kaplama yüzeyinde ark oluşur. Sıcaklığın yükselmesi ile ergime ve buharlaşma meydana gelir. Elde edilen buhar fazı, katot önündeki yüksek elektron yoğunluğu sayesinde iyonize olur. Elde edilen iyonlar anot üzerine taşınırlar.

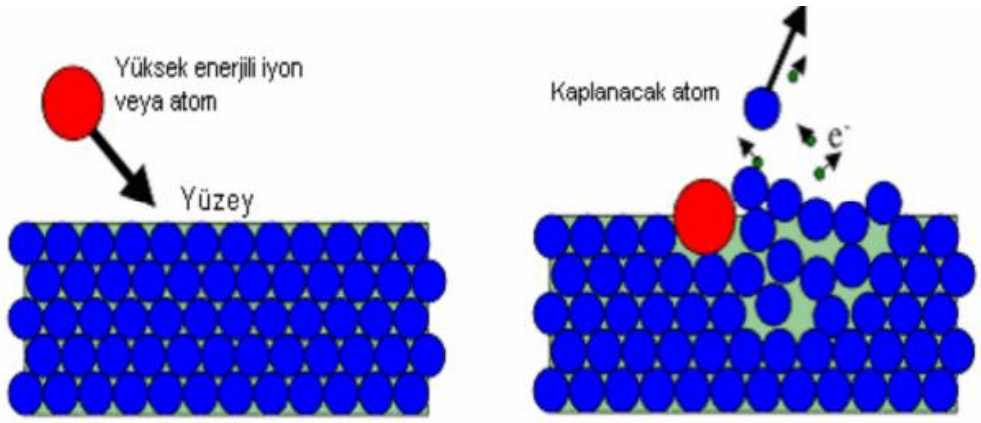
Katodik ark yöntemi adımları kısaca şu şekildedir:

- Vakum işlemi.
- Alt malzemenin; radyasyon, taban malzeme tutucularından ısı iletimi ve sistemde bulunan hızlandırılmış partiküller aracılığı ile ısıtılması.
- Taban malzeme yüzeyine çarpan elektronların sonucunda, taban malzeme yüzeyinden kopan atomlar ve neticesinde yüzeyin temizlenmesi.
- Film biriktirme işlemi.
- Soğutma.

2.2.2.2. Sıçratma (Sputtering)

Sıçratma, kaplama malzemesinin yüzeyine nötr atomların ya da yüksek enerjili iyonların bombardımanı ile oluşan momentum transferi neticesinde atomların yüzeyden sıçratılması işlemidir.

Şekil 2.9' da görüldüğü üzere kaplama malzemesi yüzeyi, pozitif gaz iyonları ile bombardımana tutularak kaplama malzemesi yüzeyinden atom gruplarının ayrılması sağlanır. Koparılan atom gurupları, oluşan plazma içerisinde faz değiştirerek buhar fazına geçerler. Elde edilen bu buharın altlık malzeme yüzeyinde biriktirilmesi ile PVD kaplama işlemi gerçekleştirilir. (Holmberg, K., Matthews, A.,1994)



Şekil 2.9. Sıçratma mekanizması. (Wasa, 1992)

Bu teknikte iyonların hedefe çarpma açısı 70° den düşük tutulmalıdır. Çünkü sıçratma amacıyla kullanılan enerjinin ancak %1'i sıçratma işlemini gerçekleştirir. Bu durum Sıçratma tekniğinin en önemli dezavantajıdır.

Sıçratma (Sputtering) yönteminde hızı ve özellikleri etkileyen faktörler şu şekildedir:

- Sistem şekli(geometrisi).
- Hedef -Kaynak arası mesafe.
- Kullanılan inert gazın saflığı.
- Hedef malzemenin sıcaklığı.
- Ortam sterilizasyonu.

Sıçrayan atomlar uygulama yapılacak parça yüzeyine ulaştıklarında ortalama kinetik enerjileri ~ 10 - 40 eV'tur. Öte yandan buharlaştırma yönteminde ise bu ~ 0.3 - 1 eV civarındadır. Basınç diğer yöntemlere göre yüksek olsa da çekirdek gelişimi aynıdır.

Sıçratma ile yapılan bazı PVD uygulamaları şu şekildedir:

- magnetik ve optik kayıt üniteleri,
- kompakt diskler,
- çok katlı elektronik kaplamalar,
- ayna ve filtreler için çok katlı optik kaplamalar,

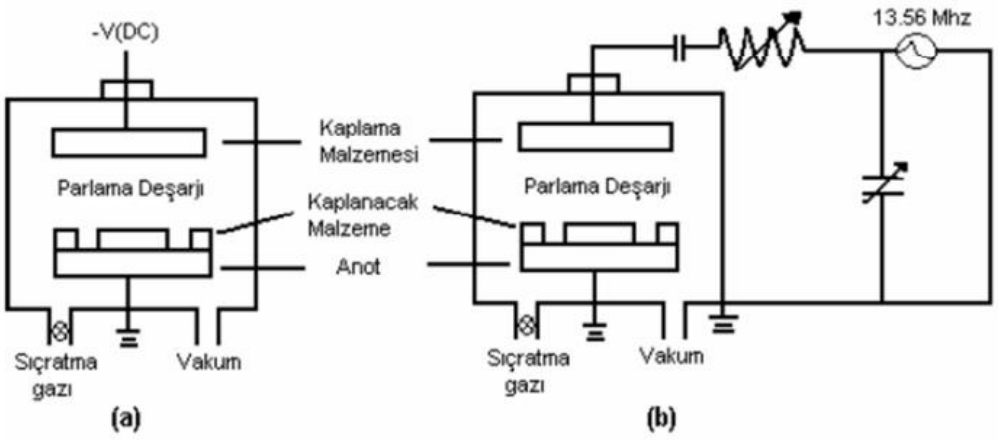
- reflekte kaplamalar,
- güneş ve radyasyon filtreleri,
- güneş pilleri,
- ışığa duyarlı yarı iletkenler,
- elmas benzeri kaplamalar,
- saydam iletken kaplamalar,
- amorf optik filmler,
- performans arttırıcı kaplamalar,
- dekoratif kaplamalardır.

Sıçratma tekniklerini üç ana başlık altında inceleyebiliriz bunlar:

1. Diyot sıçratma
2. Triyot sıçratma
3. Manyetik alanda sıçratma

2.2.2.2.1. Diyot sıçratma

Şekil 2.10'daki gibi iki plakanın biri anot diğeri katot olmaktadır. Diyot sıçratma sistemi bir çift düzlemsel elektrottan oluşmaktadır. Kaplama malzemesinin (katodun) altında su soğutmalı sistem bulunmaktadır. Uygulama yapılacak malzeme anoda yerleştirilir. Önce sıçratma haznesi vakumlanır ve 13.3 Pa (10-1 torr) olacak şekilde argon gazı gibi inert bir gaz hazneye verir. Elektrotların arasında gerilim ve yaklaşık 1-10 kΩ'luk direnç uygulandığında, parlama deşarjı (glow discharge) oluşur. Bu esnada deşarjındaki pozitif iyonlar katoda ilerler ve kaplama malzemesine çarparlar. Kaplama malzemesinden sıçrayan atomlar uygulama yapılacak yüzey üzerinde ince bir film oluşturur.

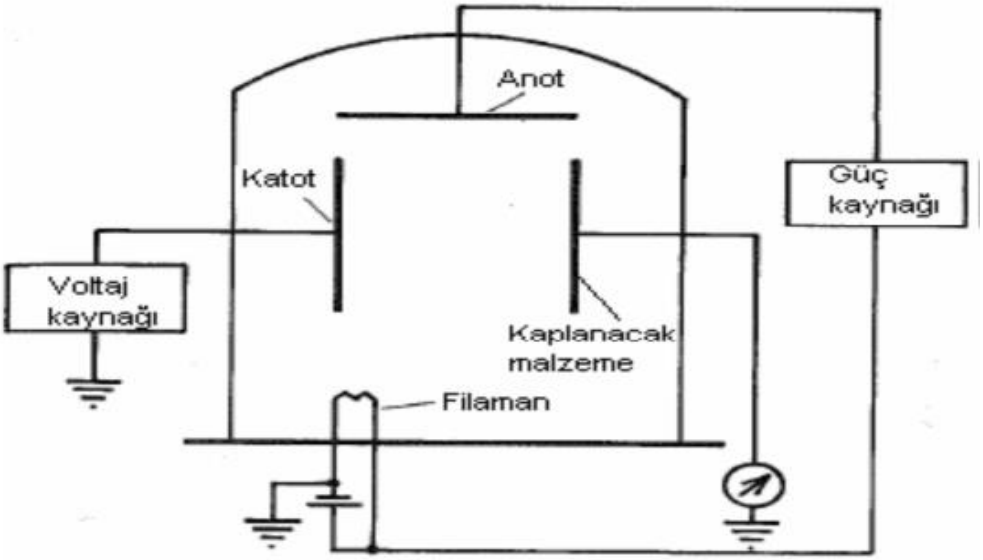


Şekil 2.10. Diyot sıçratma sistemi şematik gösterimi.

Bu yöntemin en büyük avantajı kaplama malzemesinin verimli şekilde kullanılmasına olanak sağlamasıdır.

2.2.2.2.2. Triyot sıçratma

Şekil 2.11'deki şemada gösterilen triyot sıçratma genel mantık olarak diyot sıçratma tekniğine benzemektedir. Fark ise anot ve katot arasına elektron yayan bir flaman ve elektron toplayıcı eklenmesidir. Eklenen bu flaman ve elektron toplayıcı ile plazmanın iyon akım yoğunluğu arttırılmıştır. Bu sayede uygulamalarda radyasyon kaynaklı hasarlar engellenmiştir. (Eryılmaz,1996)



Şekil 2.11. Triyot sıçratma tekniği şematik gösterimi.

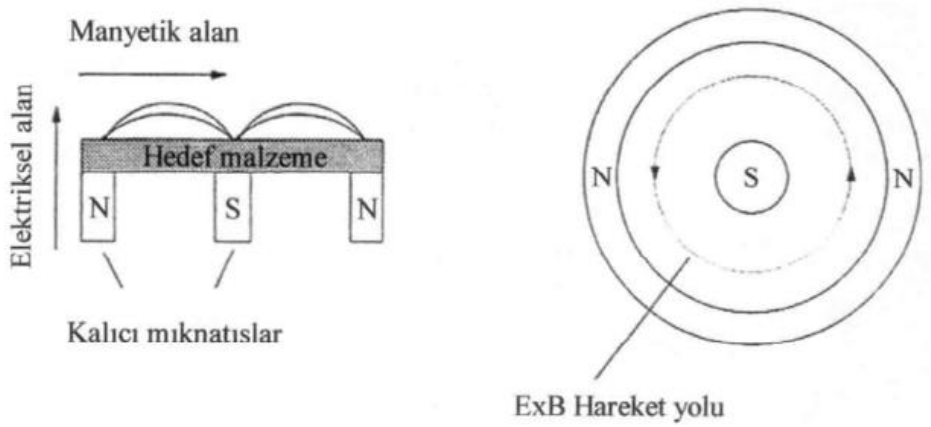
2.2.2.2.3. Manyetik alanda sıçratma

Manyetik alanda sıçratma yöntemi en gelişmiş sıçratma tekniği olup farklı bileşenlerde sert kaplama biriktirme imkânı sağlar.

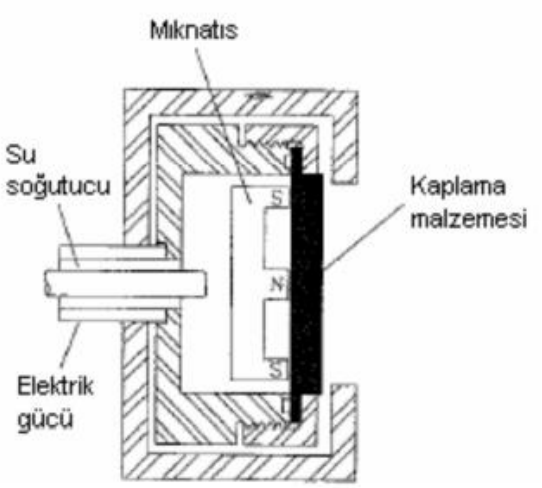
Proses uygulama yapılacak malzemenin elektromıknatıslardan oluşan tutucu üzerine montajı ile başlar. Uygulama yapılacak malzeme mıknatısın bir kutbuna bağlıdır. Manyetik alan çeşitli şekillerde düzenlenebilir.

Manyetik alanın şekli ve hareket yolu Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Hareket yolunu ifade eden 'ExB' değerinde, 'E' elektrik alanı, 'B' ise manyetik alanı ifade etmektedir. 'ExB' hareket yolu hedef yüzeyine paraleldir ve kapalı halka oluşturur. Böylece iyon bombardımanı ile katot yüzeyinden yayılan ikincil elektronlar, bu bölgede özellikle tutularak iyonizasyonun artmasına ve plazmanın daha yoğun olmasına neden olurlar.

Şekil 2.13'de ise düzlemsel manyetik alanda sıçratma kaynağının kesit görünümü verilmiştir. (Cansever, 2001)



Şekil 2.12. Dairesel düzlemli manyetik alan.



Şekil 2.13. Düzlemsel manyetik alanda sıçratma kesiti.

Manyetik alan elde etmek için genelde doğru akım kullanılır. Fakat iletken olmayan malzemelerde potansiyel bulunmadığı için yalıtkan malzemelerde yukarıdaki sıçratma işe yaramaz. Fakat çok yüksek frekanslarda gerilim uygulanmasıyla malzeme yüzeyinde bir kapasite oluşturulur. Oluşan kapasite sayesinde iyonize-inert gazların hedef malzeme üzerine çarpması sağlanabilir. Bu yöntem ile yalıtkan malzemelerde de PVD tekniği ile uygulama yapılabilir.

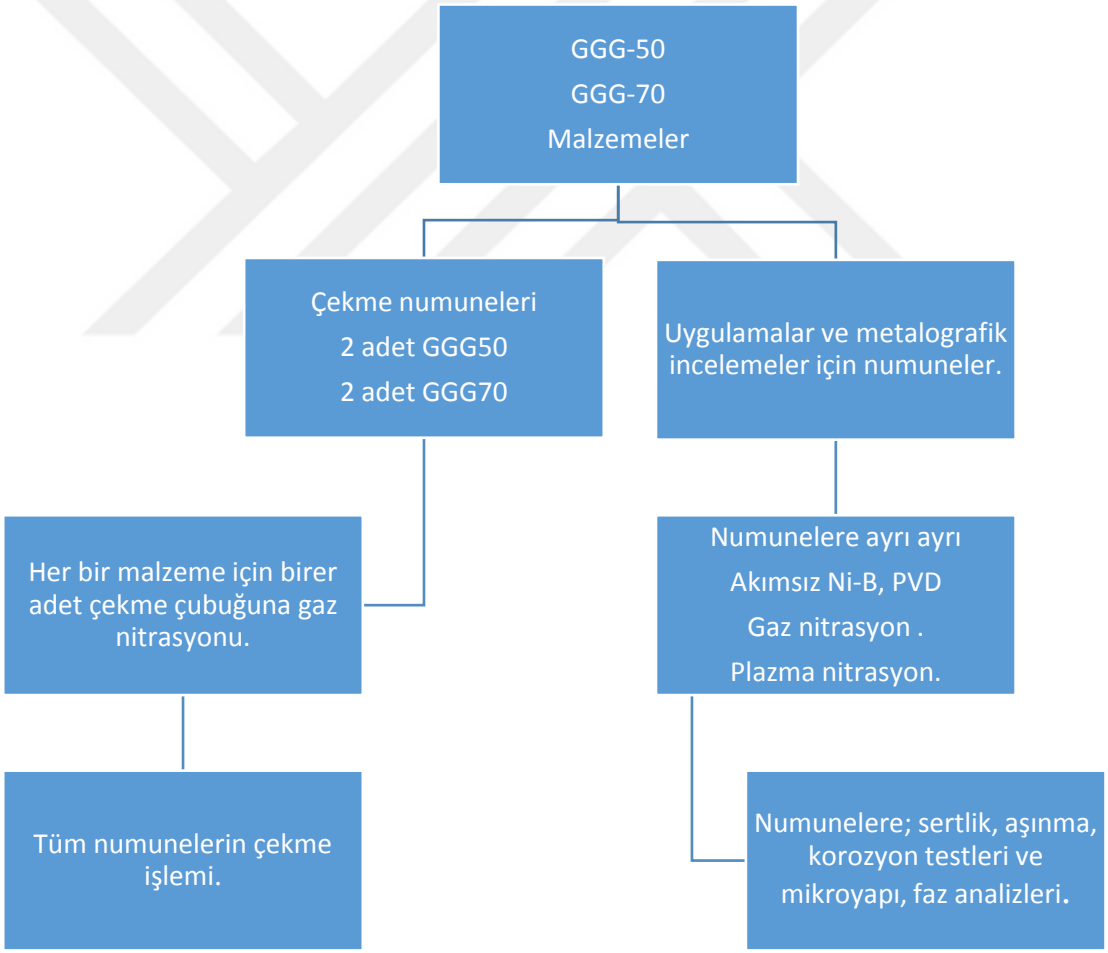
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda; altlık malzeme olarak kullanılmak üzere GGG50 ve GGG70 kalite küresel grafitli dökme demir malzemeler temin edilmiştir.

Numunelere ayrı ayrı; akımsız Ni-B kaplama, PVD kaplama, gaz ve plazma nitrasyonu uygulanmıştır.

Ardından numuneler; sertlik, aşınma, korozyon testlerine ve mikroyapı, faz analizlerine tabi tutulmuştur.

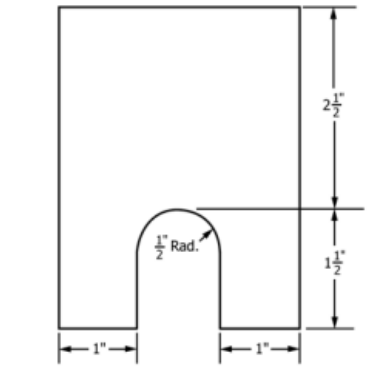
Deneysel çalışmalarda takip edilen yol Şekil 3.1'de şema üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmalarda izlenilen yol.

3.1. Altlık Malzemeler

Tez çalışmaları kapsamında GGG50 (EN-GJS-500-14) ve GGG70 (EN-GJS-700-2) standardına sahip küresel grafitli dökme demirlerin standart keel blok (Sekil 3.2) şeklinde geleneksel kum kalıba döküm yöntemi ile üretilmesi gerçekleştirilmiştir. GGG50 (EN-GJS-500-14) ve GGG70 (EN-GJS-700-2) numunelerin üretimi sırasıyla Konya Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren Canbilenler Döküm ve Motus Otomotiv firmalarında gerçekleştirilmiştir.



Metric Equivalents

in.	mm	in.	mm
½	12.7	1½	38.1
1	25.4	2½	63.5

Şekil 3.2. ASTM A536 – 84 Standard specification for ductile ıron castings standardına göre keel blok ölçüleri.

3.2. Yüzey İşlemleri ve Kaplamalar

Hazırlanan numuneler ayrı ayrı; akımsız Ni-B kaplama, PVD kaplama, gaz ve plazma nitrasyonu işlemlerine tabi tutulur. Çekme çubuklarına yalnızca gaz nitrasyonu uygulandı.

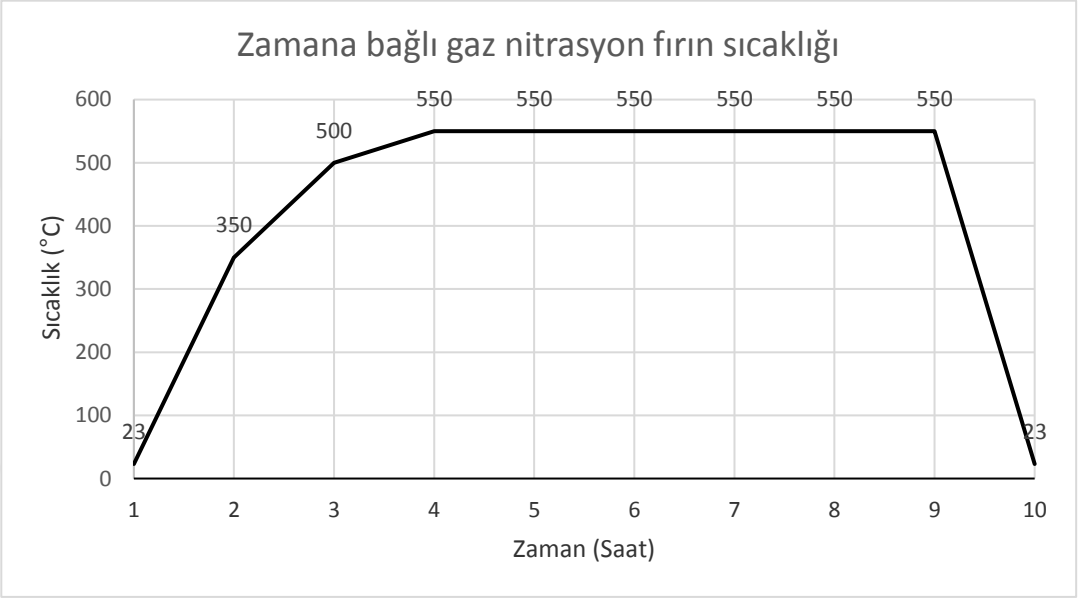
3.2.1. Gaz Nitrasyonu

Numunelerin gaz nitrasyon işlemi Ankara Sincan Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren Döksan Isıl İşlem ve Ar-Ge Merkezi'nde 'IPSEN' marka atmosfer kontrollü fırınlarda, bilgisayar destekli kontrol sistemleri ile yapılmıştır. Gaz nitrasyon işleminde ilk olarak fırına numuneler yerleştirilip fırın normal atmosfer basıncında

ısıtılmış, aktifleşmiş ve sıcaklığı 500 ˚C olduğunda ortamdaki hava emilmiş ve içeriye NH_3 ve CO_2 verilmeye başlanmıştır.

Gaz nitrasyon işlem basamakları sırasıyla şu şekildedir.

- 350 °C 1 saat ön oksidasyon,
- 500 °C 1 saat nitrasyon,
- 550 °C 6 saat nitrokarbürizasyon,
- Fırından çıkarılma ve oda koşullarında soğutulma şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.3. Nitrasyon numunesinin gaz nitrasyonu işlemindeki sıcaklık zaman değişimi.

3.2.2. Plazma Nitrasyonu

Numunelerin plazma nitrasyon işlemi de Ankara Sincan Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren Döksan Isıl İşlem ve Ar-Ge Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir. Plazma nitrasyon öncesi numunelerin yüzeyi alkol ile temizlenmiştir. Temizlenen numuneler ''KİO-AİD'' marka fırın içerisine yerleştirilmiştir. Fırın kapatılarak fırın atmosferi vakumlanmıştır. Fırın içerisine % 80 oranında N_2 ve % 20 oranında H_2 gazı basılmıştır. Fırın 480 °C'ye kadar ısıtılmış ve 4 mbar'a kadar basınç oluşturulmuştur. Numuneler 300 dk boyunca plazma nitrürlemeye tabi tutulmuştur.

3.2.3. Akımsız Ni-B Kaplama

Akımsız Ni-B kaplama yapılacak numunelere kaplama öncesinde bazı ön işlemler uygulanmıştır. Standart metalografi teknikleri ile hazırlanan (320-1200 grit zımparalama + 1 µm Al_2O_3 çözeltisi ile parlatma) numunelere sırasıyla alkali ve asidik temizleme işlemleri uygulanmıştır. Alkali temizleme işlemindeki amaç yüzeydeki kirliliğin ve yağların giderilmesi iken, asidik temizleme işlemindeki amaç ise oksitlerin giderilip yüzeyin aktif hale getirilmesidir. Alkali temizleme işlemi 70°C'de % 5 alkali temizleyici de 10 dakikada uygulanmış olup, ardından saf su ile durulama yapılmıştır. Asidik temizleme işleminde numuneler % 10 HCl çözeltisi içerisinde 1 dakika bekletilmiş ve sonrasında uygulanmıştır. Yüzey aktifleştirme işleminde ise 1 dakika boyunca % 2 H_2SO_4 çözeltisi kullanılmış olup ardından saf su ile durulamadan sonra numuneler kaplamaya hazır hale getirilmiştir.

Akımsız Ni-B kaplama yapılacak metalik altlıklarda kaplamanın yüzeye iyi tutunması ve mükemmelliği için kaplama öncesi yapılacak ön işlemlerin doğru ve hatasız bir biçimde uygulanması büyük önem arz etmektedir. Metal yüzeyinin temiz ve düzgün olmaması, kaplamanın ana metale yapışmasına, yüzeyde çentik ve pürüzlü yapı oluşmasına, kaplama içeriğinde gözenekli yapıya ve kullanım koşullarında malzemenin düşük performans göstermesine (çabuk aşınma ve korozyon vb.) sebep olabilmektedir. Ayrıca, kaplama öncesinde uygulanan numune ve yüzey hazırlama işlemlerinin, kaplamanın adezyon (bağ) kuvvetini önemli şekilde geliştirdiği bilinmektedir. Yüzeyde bulunan kir, yağ, oksit, pas vb. ayrıca kaplama banyosunun kirlenmesine sebep olmaktadır. (Kocabaş ve ark., 2019).

Akımsız Ni-B kaplama esnasında kaplamanın yapısına element halindeki B, banyo bileşimindeki bor hidrürün (BH_4^-) yükseltgenmesi sonucunda girmektedir. Bu nedenle bileşimdeki B konsantrasyonunu BH_4 yükseltgenme reaksiyon kinetiği belirlemektedir. Yükseltgenme reaksiyonun kinetiğini kaplama banyosunda bulunan hem BH_4 derişimi hem de diğer bileşenlerin (kompleks yapıcı ajan ve stabilize edici gibi) derişimleri ile kaplama sıcaklık ve pH derecesinin etkileyeceği öngörülmektedir (Anık ve ark., 2009).

Kaplama işlemi Şekil 3.4'te gösterilen düzenekte Çizelge 3.1'de listelenen kimyasallar kullanılarak yapılmıştır. Kaplama sırasında kaplama banyosuna herhangi bir kimyasal ilavesi yapılmamıştır. Kaplama işlemi 500 ml hacme sahip banyoya 2 adet

numune daldırılarak 90 ± 2 °C sıcaklıkta, 400 devir/dakika karıştırma hızında 1 saat boyunca gerçekleştirilmiştir (Şahin, 2021).

Çizelge 3.1. Ni-B kaplama çözeltisinin bileşimindeki kimyasallar ve miktarları (Şahin, 2021)

Kullanılan kimyasal ve formülü	Kullanım amacı	Miktarı
$NiCl_2.6H_2O$	Nikel kaynağı	20 g/l
$NaBH_4$	İndirgeyici	1 g/l
NaOH	Alkali kaynağı	40 g/l
$C_2H_8N_2$	Kompleks yapıcı	60 g/l
$Pb(NO_3)_2$	Stabilizör	15 mg/l

Şekil 3.4. Akımsız Ni-B kaplama deney düzeneği (Şahin, 2021)

Akımsız Ni-B kaplama işlemi uygulanmış küresel grafitli dökme demir numunelerin yüzeylerinde nikel-bor esaslı sert borür (Ni_3B ve Ni_2B) parçacıklarının oluşması için akımsız Ni-B kaplama işleminden sonra 250 °C sıcaklıkta 5 saat süre ile ısıl işlem uygulanmıştır.

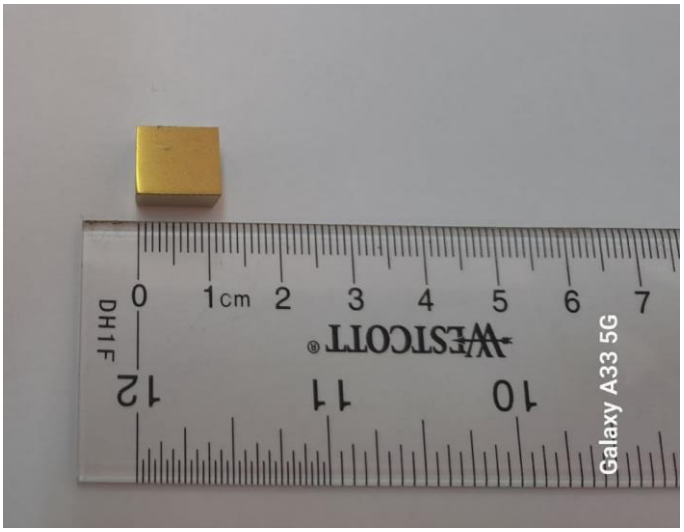
3.2.4. PVD Kaplama

Tez çalışması kapsamında GGG-70 kalite küresel grafitli dökme demir numuneye TiN PVD kaplama yapılmıştır. PVD kaplama Konya Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren 'AKKO Makine San. ve Tic. A.Ş.' firmasında bulunan 'Platit Π 311' model endüstriyel PVD kaplama ünitesinde (Şekil 3.5) gerçekleştirilmiştir. Kaplama cihazı, dikey olarak hizalanmış 3 adet dairesel katot ihtiva eden sütunla donatılmıştır. PVD kaplama işleminin basamakları şu şekilde özetlenebilir (Özdemir, 2022):

1. **Yükleme:** Kaplama odasına numuneler yüklenir.
2. **Tahliye:** PVD kaplamaların gerçekleştirilmesi için yüksek vakum gerekmektedir. Platit kaplama cihazlarında tahliye iki basamakta gerçekleşmektedir:
   - Döner kanatlı pompa, haznede 10^{-2} -100 mbar giriş basıncı üretmektedir.
   - Turbomoleküler vakum pompası, 10^{-5} mbar civarı yüksek vakum üretmektedir.
3. **Isıtma:** Kaplama odası optimum çalışma sıcaklığı olan 500 °C sıcaklığa ortalama 2 saat gibi bir sürede ısıtılmaktadır. Proses sıcaklıkları PVD kaplamanın yapılacağı katot malzemeye göre değişiklik göstermektedir. TiN kaplamalar ~450-460°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir.
4. **Plazma Aşındırma:** Platit kaplama sistemleri üç farklı dağlama işlemi ile çalışmaktadır:
   - LGD® (Yanal Işıma Deşarjı).
   - Argon kullanarak plazma aşındırma, kızdırma deşarjı.
   - Metal iyon aşındırma (Ti, Cr).
5. **Kaplama Ayırıcı:** PVD (3 adet lateral (yanal) ve 1 adet merkezde bulunan dönen ark katotları) ile kaplama biriktirme.
6. **Soğutma:** Kaplama odasının soğutulması.
7. **Boşaltma:** Son olarak kaplama odası boşaltılmaktadır.

Şekil 3.5. TiN PVD kaplamanın yapıldığı Platit Π 311 model ünite.

PVD kaplama sonrası numunenin görüntüsü Şekil 3.6'da gösterilmiştir. PVD kaplama öncesi metalik mat görünüme sahip olan numune TiN kaplama sonrası parlak altın sarısı renge sahiptir.



Şekil 3.6. PVD kaplama sonrası numunenin fotoğrafı.

3.3. Karakterizasyon Çalışmaları

3.3.1 Kimyasal Analiz

Çalışma kapsamında temin edilen GGG-50 ve GGG-70 küresel grafitli dökme demir numunelerin kimyasal bileşimi OBLF RS1000-162 model optik emisyon spektrometre (OES) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Her numuneden 2 farklı ölçüm alınmış ve ortalamaları hesap edilmiştir.

3.3.2. Faz Analizi

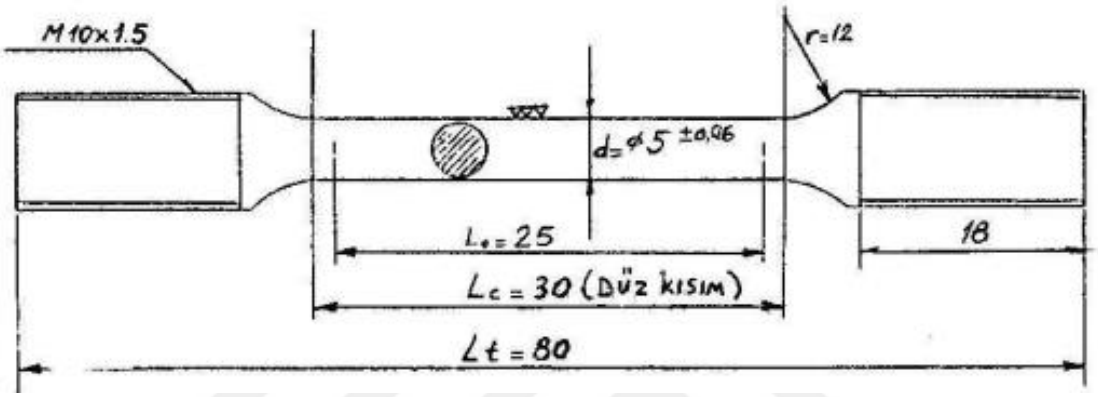
Kaplamasız altlık dökme demirlerin, nitrasyon (gaz ve plazma) yüzey işlemi görmüş ve kaplamalı (akımsız Ni-B ve PVD) tüm numunelerin faz analizleri ve kristal özellikleri X-ışınları kırınım (XRD) analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında tüm XRD analizleri Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan 'Bruker D8 Advance' model difraktometre ile yapılmıştır. Ölçümler 2°/dakika tarama hızında, 2θ=30-80° aralığında ve Cu-Kα ışıması (λ = 1.5406 Å) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.3.2. Mikroyapı Analizi

Numuneler mikroyapı analizleri için standart metalografik numune hazırlama teknikleri kullanılarak hazırlanmıştır. Nitrasyon ve kaplama kalınlığı ile sertlik derinliğinin belirlenmesi için numuneler bakalite alınmıştır. Sonrasında numuneler SiC esaslı zımpara kâğıtları (180-1200 grit) ile zımparalanmış ve sonrasında 5-7µm alümina (Al_2O_3) süspansiyonu kullanılarak parlatılmıştır. Tüm numuneler %3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Mikroyapı analizleri Nikon Eclipse MA100 model ters metal mikroskobu ve enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) detektörüne sahip SM Zeiss LS-10 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.3.3. Çekme Testi

GGG-50 ve GGG-70 kalite küresel grafitli dökme demirlerin nitrasyon öncesi ve sonrası mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi ALSA KTM 1000 model üniversal test cihazında 10^{-4} s^{-1} deformasyon hızında ASTM E8M/88 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde kullanılan standart çekme numunesi teknik resmi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Standart çekme numunesi ölçüleri.

3.3.4. Sertlik Testi

GGG-50 ve GGG-70 kalite küresel grafitli dökme demir altlık numunelerin Brinell sertlik değerleri Digirock RBOV model sertlik ölçüm cihazında 2,5 mm çapında çelik bilye kullanılarak 182,5 kgf yük altında ölçülmüştür. Rastgele beş farklı noktadan ölçüm alınarak ortalama sertlik değeri hesap edilmiştir.

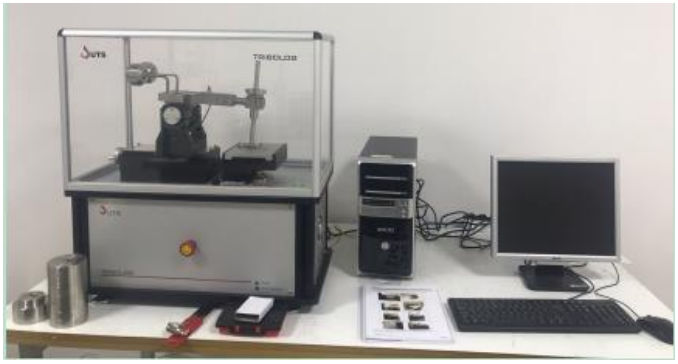
Nitrasyon işlemi görmüş ve kaplama yapılmış numunelerin kaplama sertliği ve sertlik derinlikleri Mikro Vickers yöntemine göre belirlenmiştir. Akımsız Ni-B kaplama yapılmış, gaz ve plazma nitrasyon işlemi görmüş numunelerin sertlik değerleri Microbul 1000-DN Micro Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılarak parlatılmış yüzeylerde 50 gr yük altında 10 saniye bekleme süresi ile ölçülmüştür. Numuneler üzerinde sertlik ölçümlerin sağlıklı olması açısından rastgele beş farklı ve birbirinden bağımsız noktalardan ölçümler alınarak ortalama sertlik değerleri belirlenmiştir. Akımsız Ni-B kaplama yapılmış numunelerin sertlik derinliği belirlenirken yüzeyden başlanarak her 500 µm mesafede bir ölçüm alınmıştır. Sertlik değerlerinin birbirine yaklaştığı noktada ölçümler tamamlanmıştır.

PVD kaplama yapılmış numunenin sertlik derinliği kaplama kalınlığının çok ince olması sebebi ile farklı bir cihazda daha düşük yükte yapılmıştır. Mikro Vickers sertlik ölçümü Mitutoyo HM 112 model mikrosertlik ölçüm cihazında 1 gr yük altında 10 saniye bekleme süresi ile yapılmıştır.

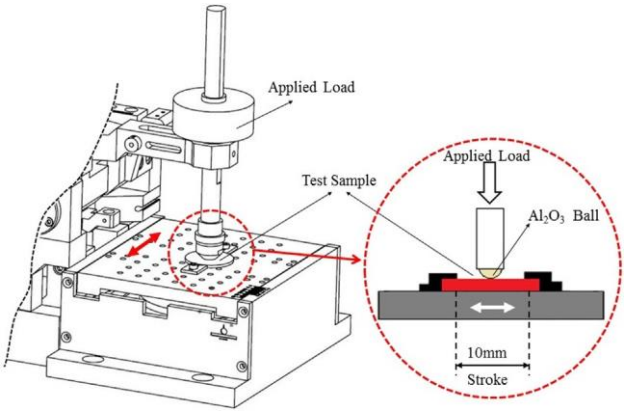
3.3.5. Aşınma Testi

Nitrasyon (gaz ve plazma) yüzey işlemi ile akımsız Ni-B ve PVD kaplamanın GGG-50 ve GGG-70 kalite küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışı üzerine etkisini incelemek amacıyla aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri Konya Teknik Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan UTS Tribolog model tribometre cihazında gidip-gelme (reciprocating) modülünde gerçekleştirilmiştir. Testler ASTM G133-22 (Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear) standardına uygun olarak yapılmıştır.

Aşınma deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Gidip-gelme (reciprocating) test modülünde bilye tipi aşındırıcılar veya aşınan numuneler, gidip gelen bir diske karşı (Şekil 3.9) bastırılmaktadır. Aşınma deneyi sonrasında sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti, aşınma kaybı ve aşınma hacmi gibi pek çok tribolojik parametre ölçülebilmektedir. Aşınma testleri oda sıcaklığında, yağsız kuru ortamda 2 N yük altında 10 mm gidip gelme mesafesinde toplam 100 m aşınma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Batıcı uç olarak 6 mm çaplı WC bilye tercih edilmiştir.



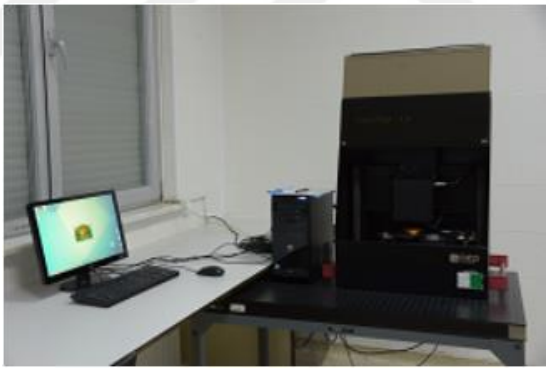
Şekil 3.8. UTS Tribolog aşınma test sistemi.



Şekil 3.9. Aşınma test cihazının şematik görüntüsü ve çalışma prensibi.

3.3.6. 2D Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Aşınma testi sonrası tüm numunelerin aşınma kaybının belirlenmesi için aşınma izi genişliği ve derinliği Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Nanomap LS model stylus profilometre (Şekil 3.10) kullanılarak belirlenmiştir.

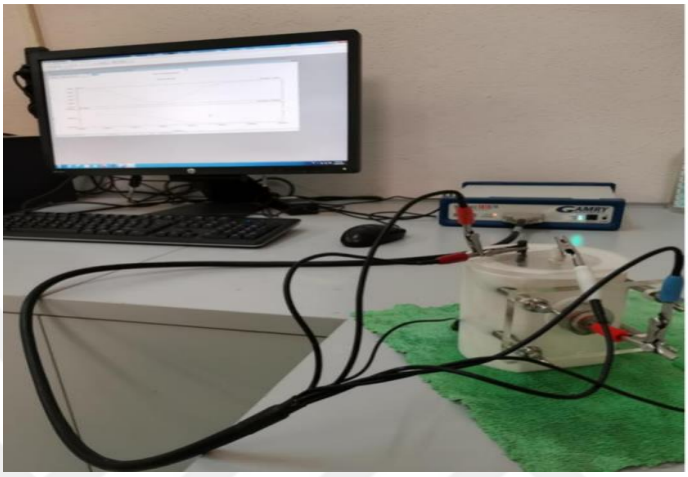


Şekil 3.10. Aşınmış yüzeylerin incelenmesinde kullanılan profilometre.

3.3.7. Korozyon Testi

Potansiyostat-Galvanostat cihazı (Şekil 3.11) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Korozyon test Tüm numunelerin korozyon davranışlarının incelenmesinde geleneksel 3 elektrot sisteminde OCP (Open circuit potential), EIS (Electrochemical impedance spektroscopy, elektrokimyasal empedans spektroskopisi) ve PDP (Potentiodynamic polarization, potansiyodinamik polarizasyon) analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Deneyler Gamry Interface 1010B verilerinin analizi ile cihazın kendi yazılımı Echem Analyst kullanılarak yapılmıştır.

Korozyon deneylerinin hepsi oda sıcaklığında ve herhangi bir karıştırma yapılmadan 0.1 M NaCl tuz çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. OCP en az 300 s uygulanmış olup, EIS ölçümleri ise 0.1 M NaCl çözeltisinde 10 mV sinüs dalgası kullanılarak 10^{-2}-10^{4} Hz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik deneyler, OCP değerinden ± 250 mV bandında ve 1 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11. Korozyon testinde kullanılan deney düzeneği (Şahin, 2021)

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Altlık Küresel Grafitli Dökme Demirler

Tez çalışmaları kapsamında üretimi tamamlanan GGG50 (EN-GJS-500-14) ve GGG70 (EN-GJS-700-2) standardına sahip küresel grafitli dökme demirlerin optik emisyon spektrometre ile ölçülen kimyasal bileşimleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Dökme demirlerin karbon eşdeğerleri ise Eşitlik (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır. GGG50 ve GGG70 kaliteler için karbon eşdeğerleri sırasıyla 4,323 ve 4,376 olarak hesap edilmiştir.

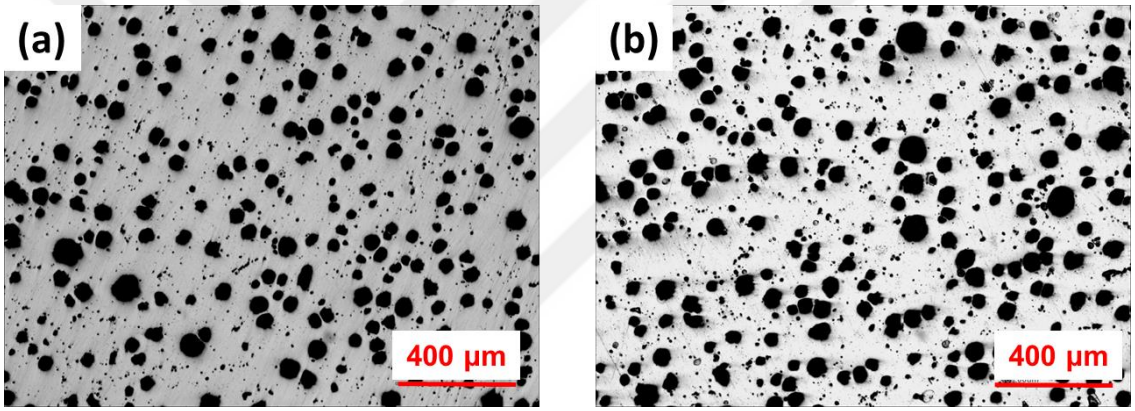
Çizelge 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan küresel grafitli dökme demir numunelerin ölçülen kimyasal bileşimleri.

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Ni	Mo	Cu
GGG50	3,40	2,75	0,265	0,020	0,008	0,038	0,025	0,018	0,003	0,17
GGG70	3,60	2,30	0,110	0,030	0,010	0,036	0,026	0,023	0,001	0,84

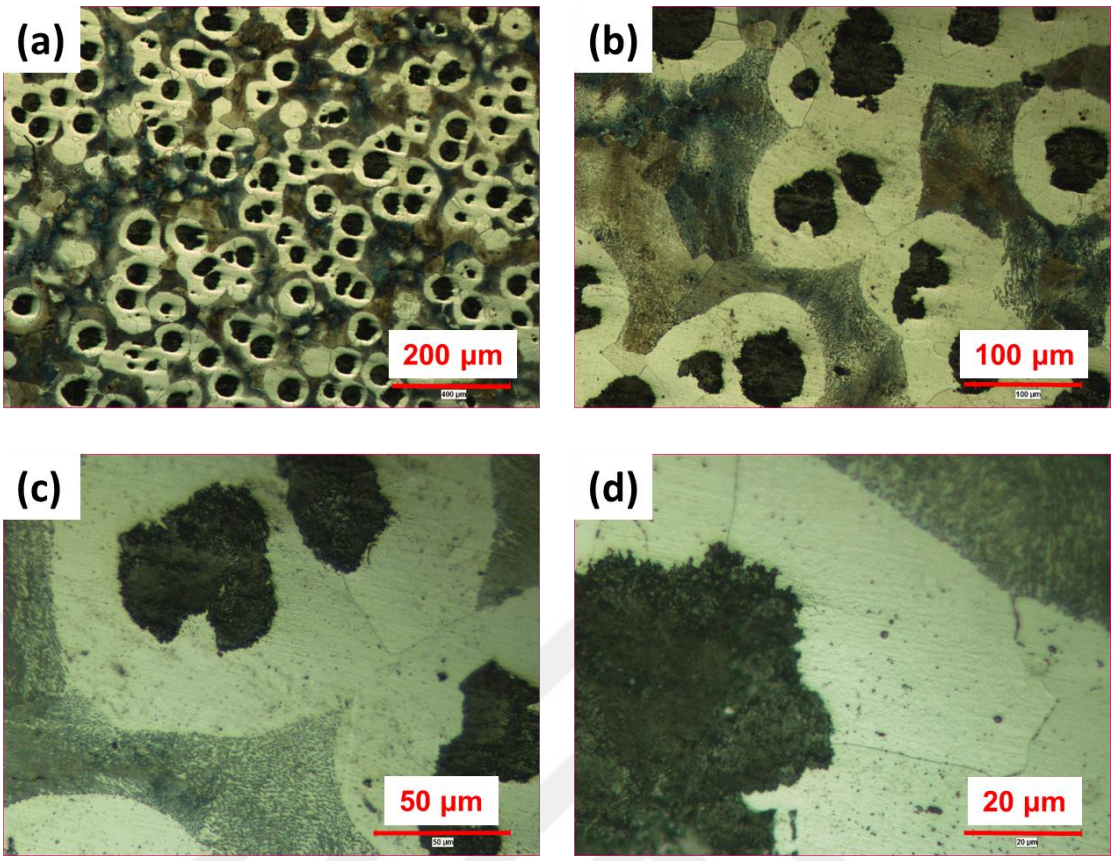
$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

Eşitlik 4.1 Karbon eşdeğerliği hesaplanması.

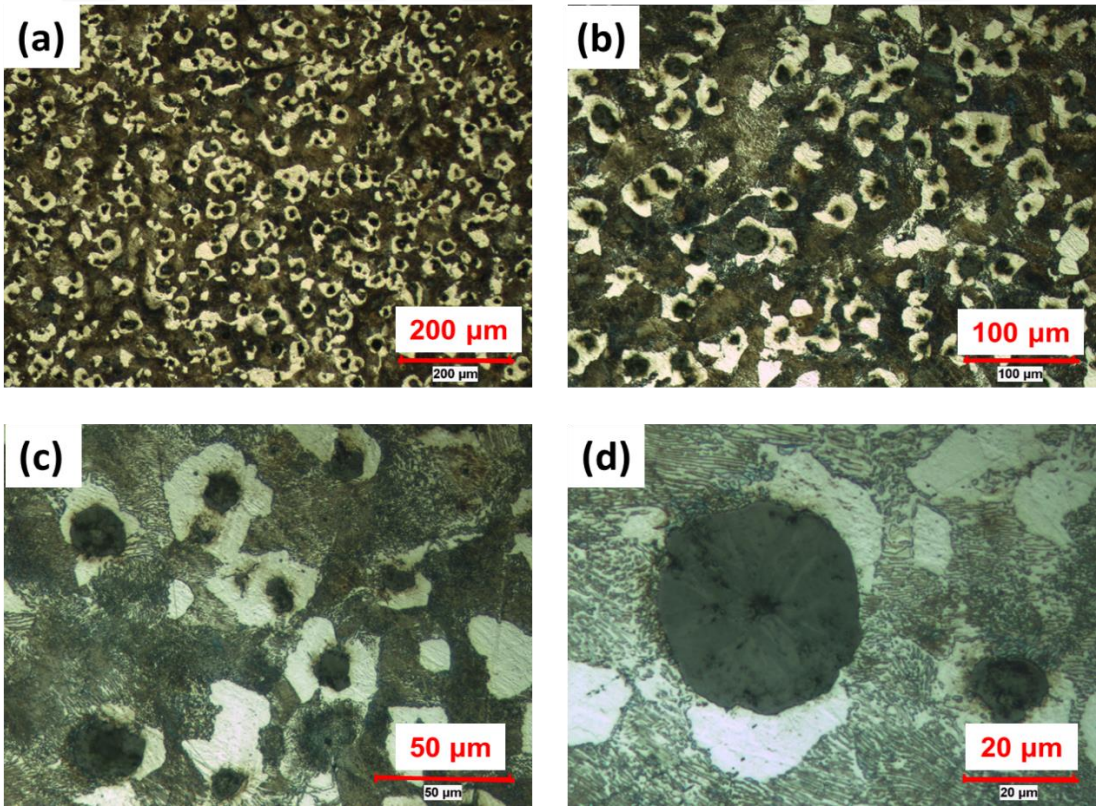
GGG50 ve GGG70 dökme demir numunelerin dökülmüş hallerinin parlatılmış ve dağlanmış optik mikroyapı fotoğrafları Şekiller 4.1 - 4.2 ve 4.3'de gösterilmiştir. Beklenildiği gibi her iki numunenin de mikroyapısı küresel grafit, ferrit (beyaz renkli bölgeler) ve perlit (koyu renkli bölgeler) fazlarından meydana gelmektedir. Döküm numunelerin mikroyapı incelenmesinde herhangi bir karbür oluşumuna veya döküm hatasının varlığına rastlanılmamıştır. Ayrıca küresel grafitli dökme demir döküm numunelerin C (grafit) miktarı, ferrit/perlit oranı, küre sayısı ve küresellik derecesi mikroyapı yazılımı kullanılarak belirlenmiştir ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de listelenmiştir. İki numunenin mikroyapıları arasındaki temel fark tahmin edileceği üzere ferrit/perlit oranıdır. GGG70 kalite sfero malzeme daha yüksek çekme mukavemeti sergileyebilmesi için daha fazla oranda perlitik matrise sahiptir.



Şekil 4.1. Küresel grafitli dökme demir numunelerin parlatılmış optik mikroyapı fotoğrafları (50X); (a) GGG50, (b)GGG70.



Şekil 4.2. GGG50 küresel grafitli dökme demir numunelerin dağlanmış optik mikroyapı fotoğrafları; (a) 100X, (b) 200X, (c) 200x ve (d) 1000x.

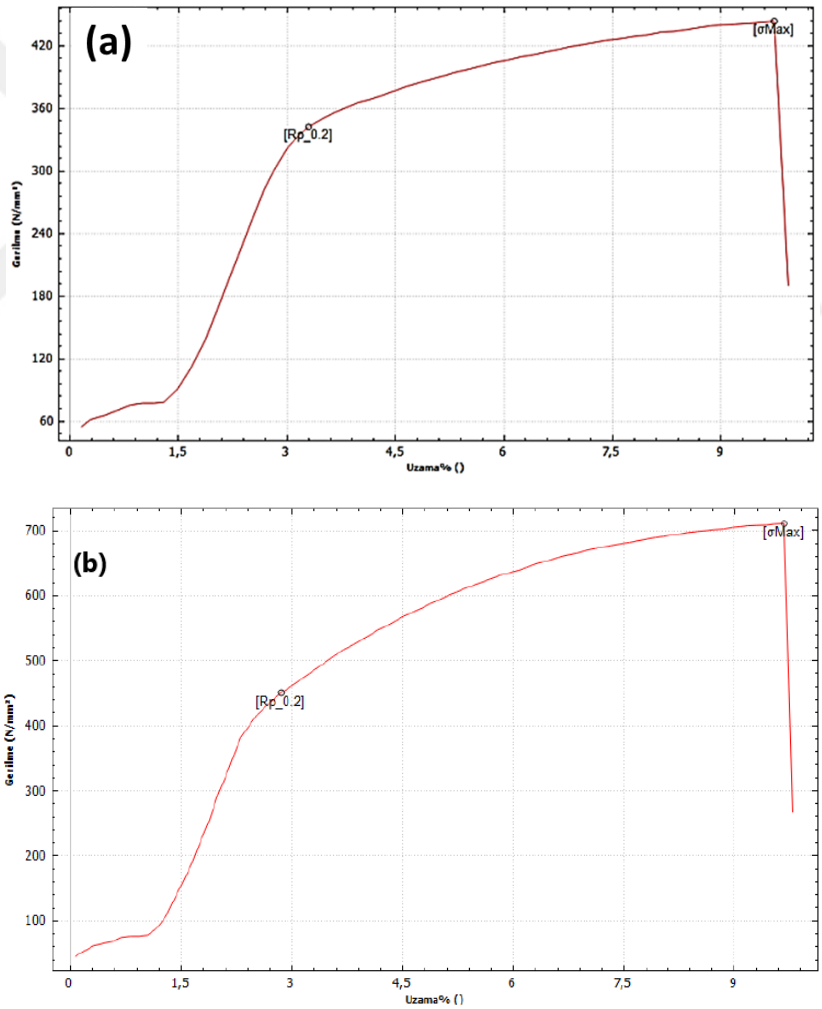


Şekil 4.3. GGG70 küresel grafitli dökme demir numunelerin dağlanmış optik mikroyapı fotoğrafları; (a) 100X, (b) 200X, (c) 200x ve (d) 1000x.

Çizelge 4.2. Deneysel çalışmada kullanılan küresel grafitli dökme demir numunelerin mikroyapısal özellikleri.

Malzeme	C (grafit) Oranı %	Ferrit Oranı %	Perlit Oranı %	Küre sayısı 1 mm^2	Küresellik %
GGG50	8,6	40,2	51,2	193,1	75
GGG70	8,0	17,1	74,9	196,5	73

Dökülmüş haldeki GGG50 ve GGG70 küresel grafitli dökme demir numunelerin mekanik özellikleri Brinell sertlik ve çekme testleri (Şekil 4.4) ile belirlenmiştir. Elde edilen mekanik veriler Çizelge 4.3'te listelenmiştir. Dökülmüş haldeki döküm numunelerin mekanik özellikleri EN-GJS-500-7 ve EN-GJS-700-2 standardındaki değerlere yakın ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan dökme demirlerin uzama değerleri standarttaki değerlere kıyasla nispeten fazladır.



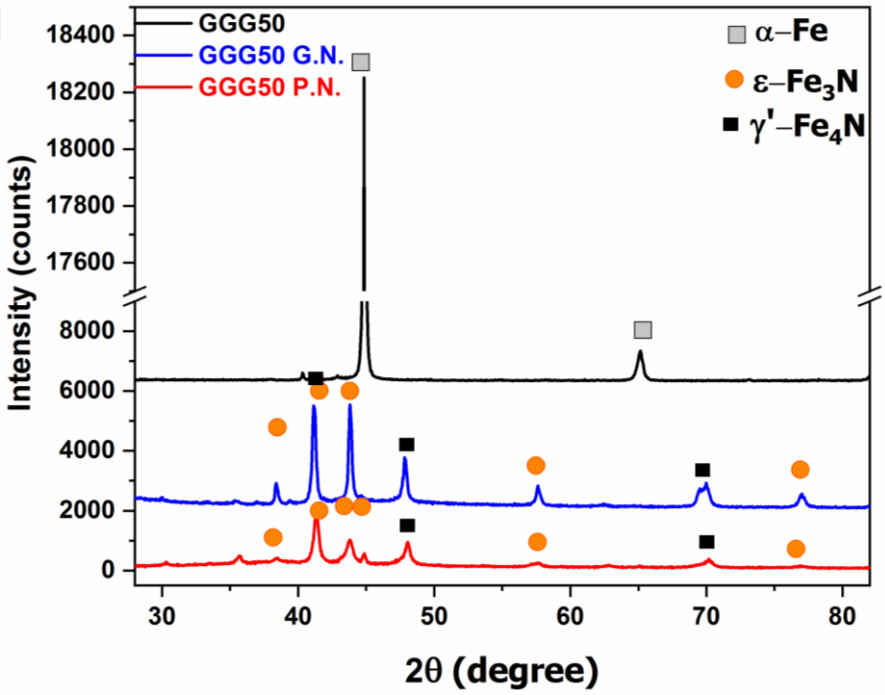
Şekil 4.4. Dökülmüş haldeki numunelerin çekme eğrileri; (a) GGG50 ve (b) GGG70.

Çizelge 4.3. Deneysel çalışmada kullanılan küresel grafitli dökme demir numunelerin mekanik özellikleri.

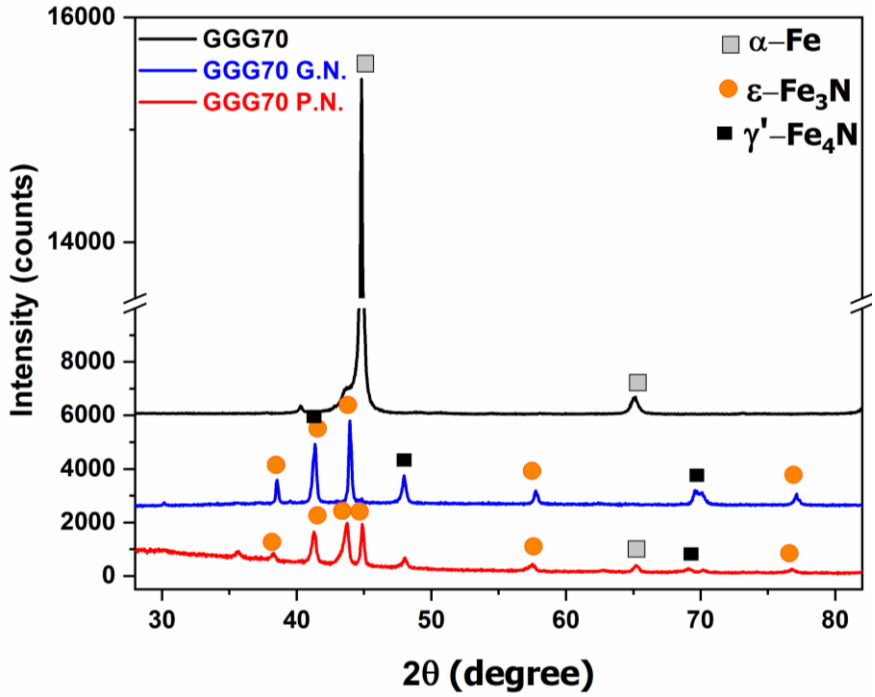
Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)	Elastik Modülüs (GPa)
GGG50	345,3	444,2	9,93	178	155,5
GGG70	448,3	711,2	5.6	222	240,5

4.5. Gaz ve Plazma Nitrasyon Yüzey İşlemleri

Gaz ve plazma nitrasyon yüzey işlemleri öncesi ve sonrası numunelerin faz analizleri x-ışınları kırınımı yöntemi ile incelenmiştir. GGG50 ve GGG70 uygulanan gaz ve plazma nitrasyon yüzey işlemleri öncesinde ve sonrasında numunelere ait kırınım eğrileri sırasıyla Şekil 4.5 ve 4.6'da gösterilmiştir. Nitrasyon uygulanmamış döküm numunelerin kırınım eğrilerinde beklenildiği gibi sadece α-Fe fazına (JCPDS Kart No: 06-0696) ait kırınım pikleri gözlemlenmiştir. Elde edilen kırınım eğrilerine göre uygulanan gaz ve plazma nitrasyon yüzey işlemleri sonrasında her iki numunenin yüzeylerinde Fe_3N (JCPDS Kart No: 03-0955) ve Fe_4N (JCPDS Kart No: 73-2101) fazlarının oluştuğu görülmüştür.

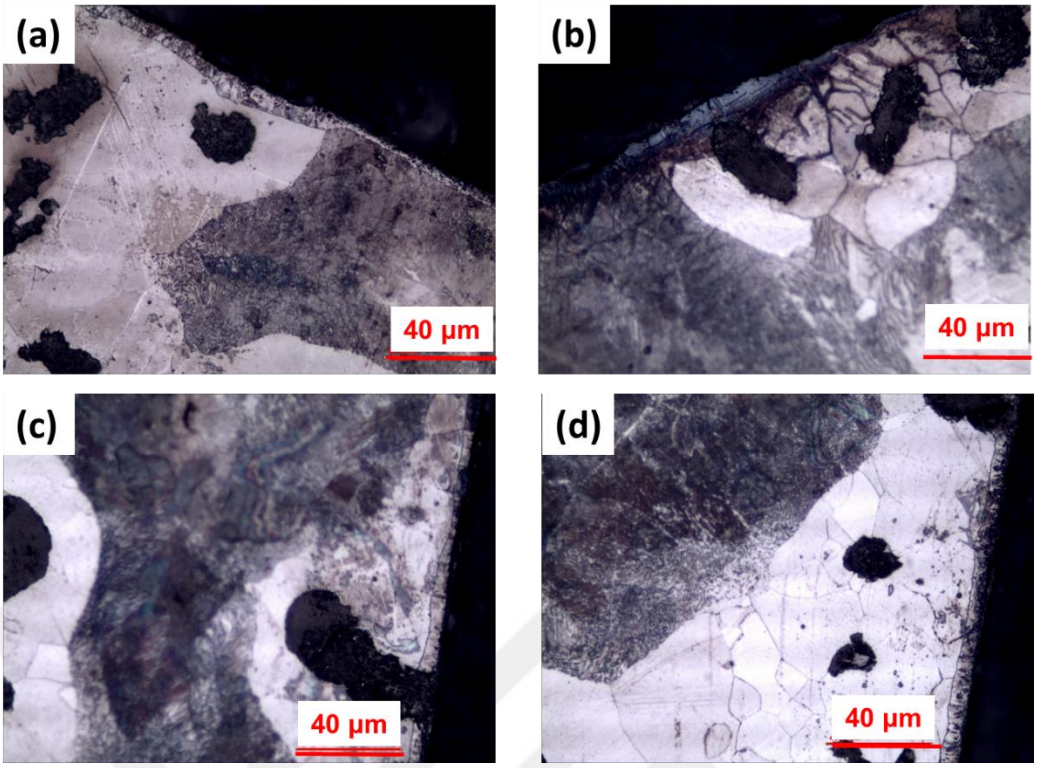


Şekil 4.5. GGG50 numuneye ait nitrasyon öncesi ve sonrası X-ışını kırınım eğrileri.

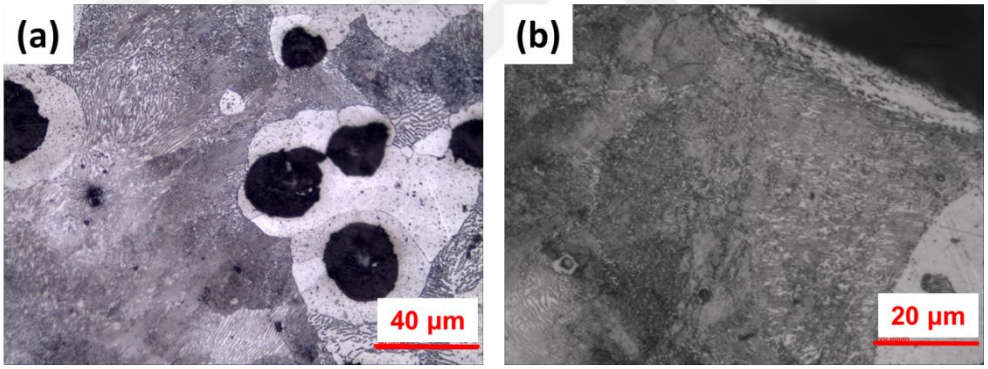


Şekil 4.6. GGG70 numuneye ait nitrasyon öncesi ve sonrası X-ışını kırınım eğrileri.

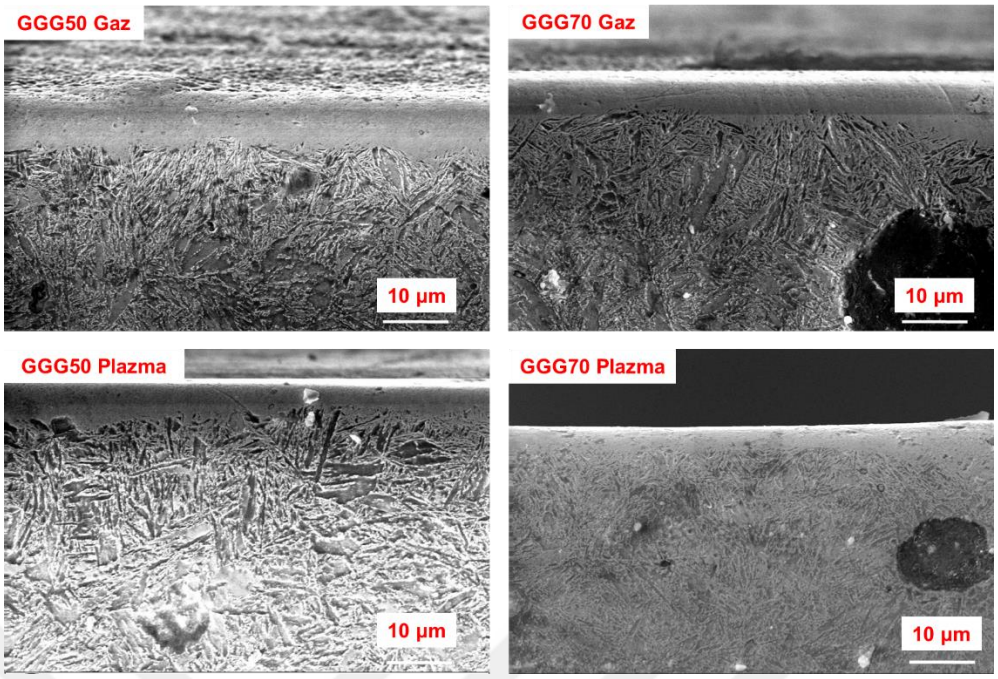
Nitrasyon işlemi sonrası GGG50 ve GGG70 numunelerin yüzeylerinde difüzyon tabaka kalınlığı 500X büyütme optik mikroskop fotoğrafları Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Nitrasyona uğramış tüm numunelerin yüzeylerinde belirgin nitrür tabakası mevcuttur. Nitrasyona uğramış numunelerin yüzeyden uzak bölgelerinde mikroyapıda bulunan perlit fazının (Şekil 4.8) bir miktar kalınlaştığı gözlemlenmiştir. Nitrür tabaka kalınlığı 'Image J' yazılımı kullanılarak hesap edilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.4'te listelenmiştir. Nitrasyon işlemleri sonrasında numunelerin SEM analizleri ise Şekil 4.9'de gösterilmiştir. Enine kesit SEM incelemelerine göre numunelerin yüzeyinde belirgin ortalama 4-8 µm kalınlığa sahip nitrasyon tabakasının varlığı açıkça görülmüştür.



Şekil 4.6. Nitrasyon işlemi sonrası numunelere ait enine kesit optik mikroyapı görüntüleri; (a) GGG50 gaz nitrasyon, (b) GGG50 plazma nitrasyon, (c) GGG70 gaz nitrasyon ve GGG70 plazma nitrasyon.



Şekil 4.8. Nitrasyon işlemi sonrası numunelerin mikroyapıları (çekirdek kısmına ait) optik mikroyapı görüntüleri; (a) GGG70 plazma nitrasyon ve (b) GGG50 gaz nitrasyon.

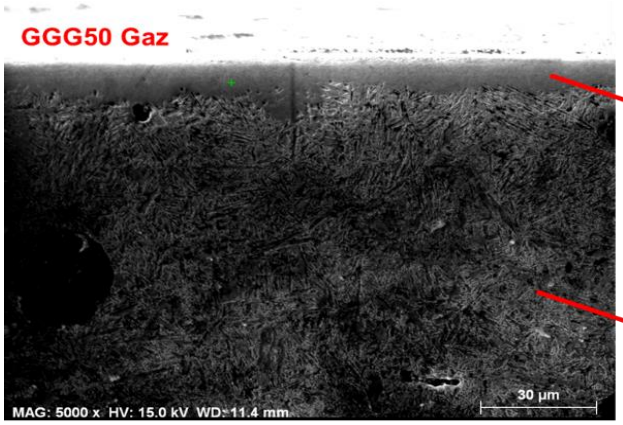


Şekil 4.9. Nitrasyon işlemi sonrası numunelere ait enine kesit SEM görüntüleri

Çizelge 4.4. GGG50 ve GGG70 numunelerin nitrasyon işlemleri sonrası nitrür tabaka kalınlığı.

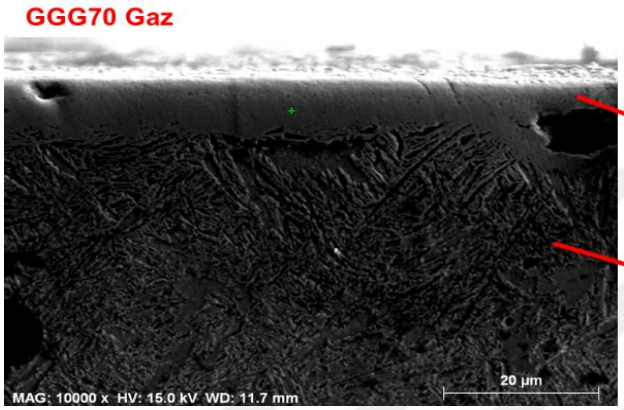
Tabaka Kalınlığı (µm)	GGG50		GGG70	
	Gaz Nitrasyon	Plazma Nitrasyon	Gaz Nitrasyon	Plazma Nitrasyon
	~8,9 ± 0,5	~6,6 ± 0,4	~7,0 ± 0,3	~3,9 ± 0,4

Nitrasyon işlemi görmüş numunelere ayrıca SEM-EDS analizleri (Şekil 4.10) uygulanmıştır. EDS analizlerinin sonuçlarına göre her iki numune için de gaz ve plazma nitrasyon işlemleri sonrasında nitrasyon tabakası ile altlık dökme demir metalin kimyasal bileşimleri benzer çıkmıştır. Ancak nitrasyon tabakasındaki N miktarı altlık metaldeki N miktarından kısmen daha fazladır. EDS analizlerinde nitrasyon tabakasında yüksek oranda N bulunmama nedeni EDS analizinin yarı-kantitatif analiz olmasından kaynaklanmaktadır. EDS analizi H ve C gibi küçük yarıçapa sahip elementleri tespit etmede ve miktarını doğru bir şekilde belirlemede yeterli olmamaktadır. (Jung 2011)



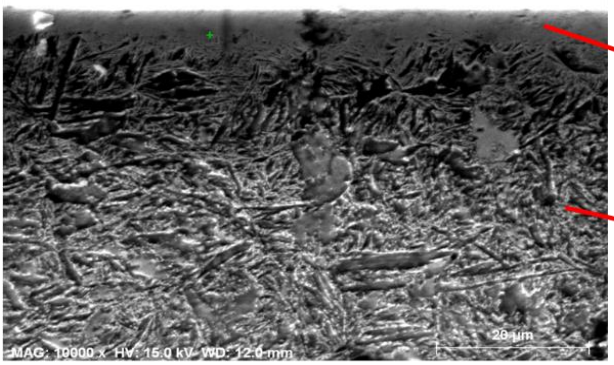
Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Iron	K-series	90.08	94.56	84.99	2.7
Silicon	K-series	2.53	2.66	4.75	0.2
Nitrogen	K-series	2.20	2.31	8.28	0.6
Carbon	K-series	0.45	0.47	1.97	0.2
Total:		95.27	100.00	100.00	

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Iron	K-series	90.87	93.74	82.14	2.7
Silicon	K-series	2.76	2.85	4.96	0.2
Carbon	K-series	1.66	1.71	6.97	0.4
Nitrogen	K-series	1.65	1.70	5.93	0.6
Total:		96.94	100.00	100.00	



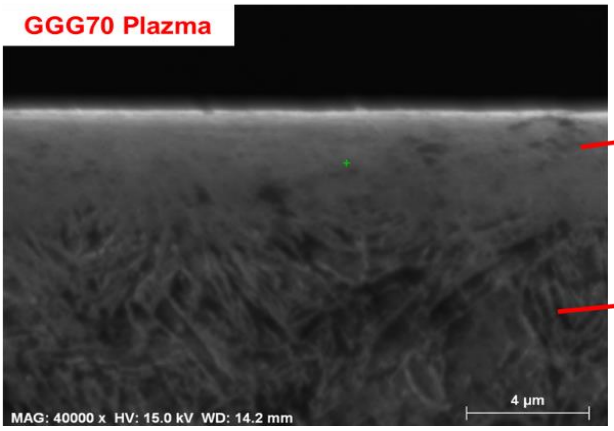
Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Nitrogen	K-series	6.98	7.07	20.94	1.2
Iron	K-series	86.57	87.71	65.14	2.6
Silicon	K-series	2.06	2.08	3.08	0.1
Carbon	K-series	3.10	3.14	10.83	0.5
Total:		98.70	100.00	100.00	

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Iron	K-series	95.67	95.18	86.24	2.9
Silicon	K-series	2.52	2.50	4.51	0.1
Carbon	K-series	1.44	1.44	6.05	0.3
Nitrogen	K-series	0.89	0.89	3.20	0.3
Total:		100.52	100.00	100.00	



Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Iron	K-series	93.71	90.51	72.73	2.8
Silicon	K-series	2.41	2.33	3.72	0.1
Carbon	K-series	1.16	1.12	4.18	0.2
Nitrogen	K-series	6.26	6.05	19.38	1.1
Total:		103.54	100.00	100.00	

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Iron	K-series	94.54	95.41	86.97	2.9
Silicon	K-series	2.39	2.42	4.38	0.2
Carbon	K-series	1.22	1.23	5.22	0.3
Nitrogen	K-series	0.93	0.94	3.43	0.5
Total:		99.09	100.00	100.00	



Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Iron	K-series	92.41	93.90	82.68	2.7
Silicon	K-series	2.72	2.76	4.84	0.1
Carbon	K-series	1.27	1.29	5.30	0.2
Nitrogen	K-series	2.01	2.05	7.18	0.5
Total:		98.41	100.00	100.00	

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Iron	K-series	92.10	97.05	92.11	2.8
Silicon	K-series	1.73	1.83	3.45	0.2
Carbon	K-series	0.31	0.32	1.43	0.2
Nitrogen	K-series	0.76	0.80	3.01	0.4
Total:		94.90	100.00	100.00	

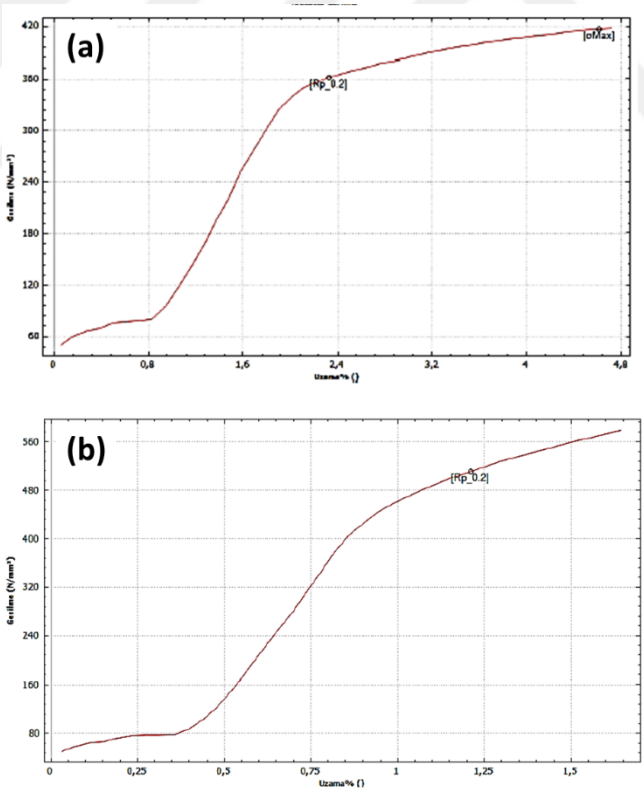
Şekil 4.10. Nitrasyon işlemi sonrası numunelere ait enine kesit SEM-EDS görüntüleri.

Nitrasyon sonrası numunelerin yüzey sertliği belirlenmiş ve Çizelge 4.5'de gösterilmiştir. Numunelerin sertlik derinliği hem Konya Teknik Üniversitesi'nde hem de başka üniversite ve araştırma merkezlerinde ölçülmeye çalışılmış fakat belirlenememiştir.

Çizelge 4.5. GGG50 ve GGG70 numunelerin nitrasyon işlemleri sonrası yüzey sertlik değerleri

Yüzey Sertliği (HV)	GGG50		GGG70	
	Gaz Nitrasyon	Plazma Nitrasyon	Gaz Nitrasyon	Plazma Nitrasyon
	838 ± 23	809 ± 14	817 ± 19	832 ± 27

Literatürde çok rastlanılmasa da nitrasyon sonrası numunelerin mekanik özelliklerini tespit etmek için gaz nitrasyona uğramış numunelere çekme testi yapılmıştır ve çekme eğrileri Şekil 4.11'de, test ile ölçülen mekanik veriler Çizelge 4.6'da listelenmiştir. Gaz nitrasyon işlemi sonrası numunelerin yüzeyinde oluşan sert nitrür tabakanın akma dayanımını arttırdığı, çekme dayanımı ve uzama değerlerini ise belirgin oranda azalttığı görülmüştür. Kısacası numuneler bir miktar kırılganlaşmıştır.



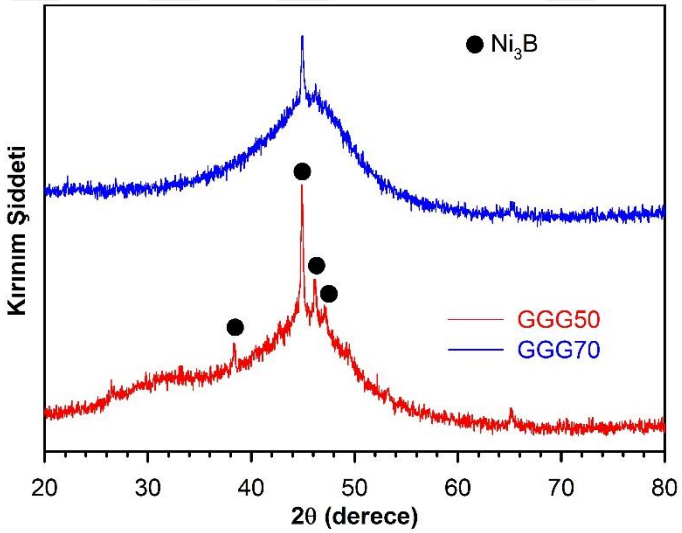
Şekil 4.11. Gaz nitrasyon işlemi sonrasında numunelerin çekme eğrileri; (a) GGG50 ve (b) GGG70.

Çizelge 4.6. Gaz nitrasyon sonrası küresel grafitli dökme demir numunelerin mekanik özellikleri.

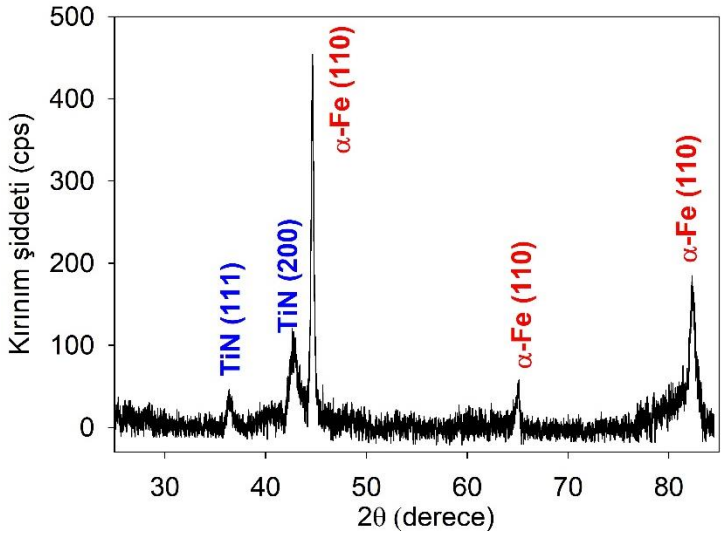
Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Elastik Modülüs (GPa)
GGG50	358	417	4,7	240,5
GGG70	518	580	1.6	734,5

4.4. Akımsız Ni-B ve PVD Kaplama

Akımsız Ni-B ve PVD kaplama yapılmış numunelere ait XRD kırınım eğrileri sırasıyla Şekiller 4.12 ve 4.13'te verilmektedir. Çalışma kapsamında PVD kaplama yüksek mukavemet ve sertliğe sahip olmasından dolayı sadece GGG70 dökme demir numunelere uygulanmıştır. Akımsız Ni-B kaplama yapılmış numunelerin XRD eğrilerinde bulunan pik genişliği akımsız Ni-B kaplamanın amorf yapıda olduğunun göstergesidir (Şahin 2021; Leon ve ark., 2018). Ni_3B fazına (JCPDS Kart Numarası: 089-3822) ait kristal piklerin varlığı ise kaplama sonrası sertlik ve aşınma direncinin artması maksadıyla yapılan ısıl işlem neticesinde Ni_3B parçacıklarının oluştuğunun göstergesidir (Özdemir 2021).

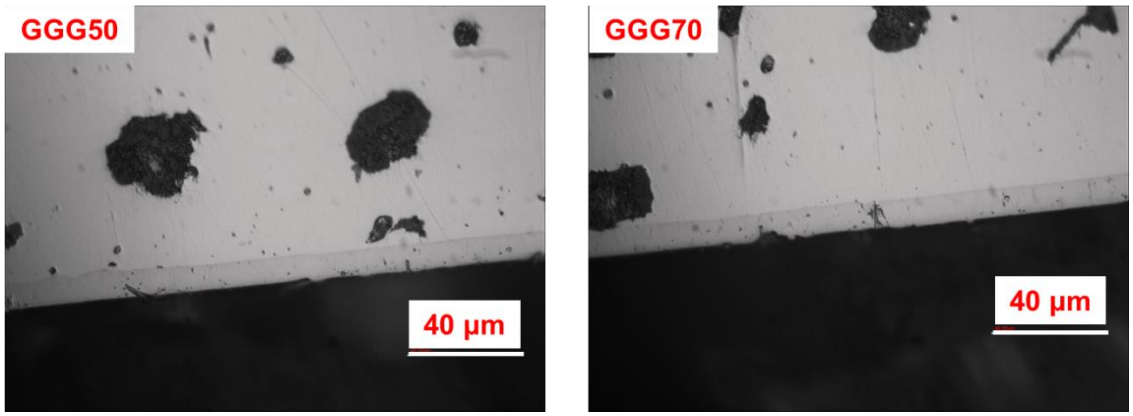


Şekil 4.12. Akımsız Ni-B kaplama yapılmış GGG50 ve GGG70 numunelere ait XRD kırınım eğrileri.

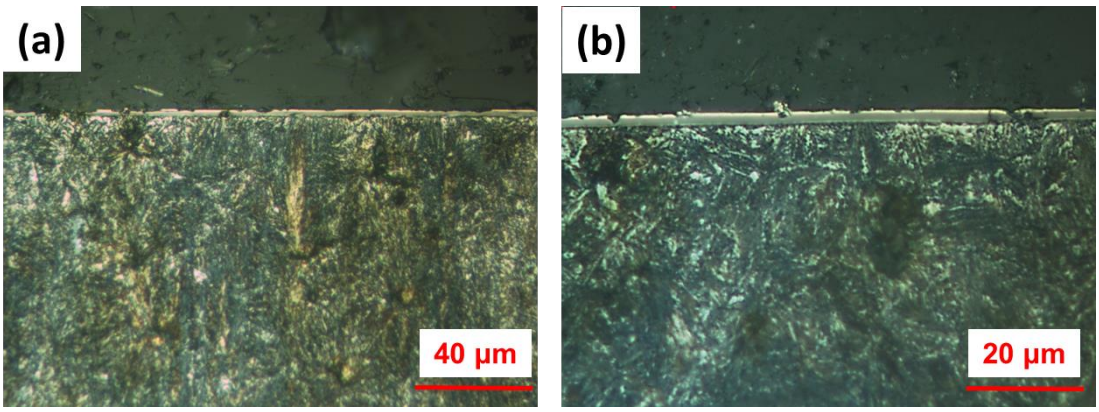


Şekil 4.134. PVD kaplama yapılmış GGG70 numunelere ait XRD kırınım eğrileri.

Akımsız Ni-B ve PVD kaplama yapılmış numunelere ait enine kesit görüntüleri sırasıyla şekiller 4.14 ve 4.15'de verilmiştir. Kaplama kalınlıkları NIH (National Institues of Health) tarafından geliştirilen serbest lisanslı 'Image J' programı kullanılarak hesap edilmiştir. GGG50 ve GGG70 kalite küresel grafitli dökme demir numunelere uygulanan akımsız Ni-B kaplama kalınlıkları sırasıyla 9,0 ± 0,1 µm ve 9,8 ± 0,1 olarak hesap edilmiştir. Uygulanan akımsız Ni-B kaplama numune boyunca tamamen homojen olup herhangi bir süreksizlik, çatlak vb, kusur içermemektedir. Akımsız Ni-B kaplama yapılmış GGG50 ve GGG70 kalite numunelerin yüzey sertlikleri sırasıyla 798 ± 29 ve 804 ± 22 HV olarak ölçülmüştür. GGG70 kalite numuneye yapılan TiN PVD kaplama kalınlığı 1,95 ± 0,04 µm olarak hesap edilmiştir. PVD kaplamanın numune boyunca çoğunlukla homojen olduğu gözlemlenmiştir. PVD kaplama sertliği ise 3198 ± 216 HV olarak ölçülmüştür.



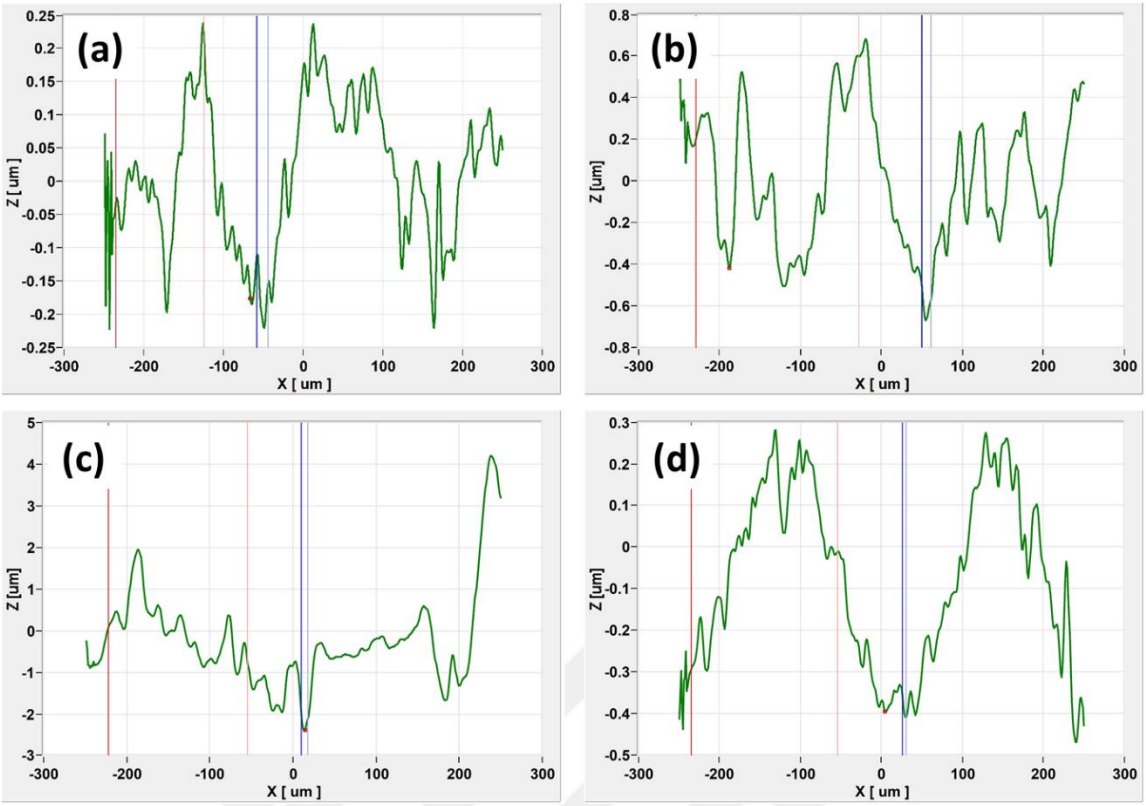
Şekil 4.14. Akımsız Ni-B kaplama yapılmış numunelere ait enine kesit optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.15. PVD kaplama yapılmış GGG70 numuneye ait enine kesit optik mikroskop görüntüleri: (a) 500X, (b) 1000X.

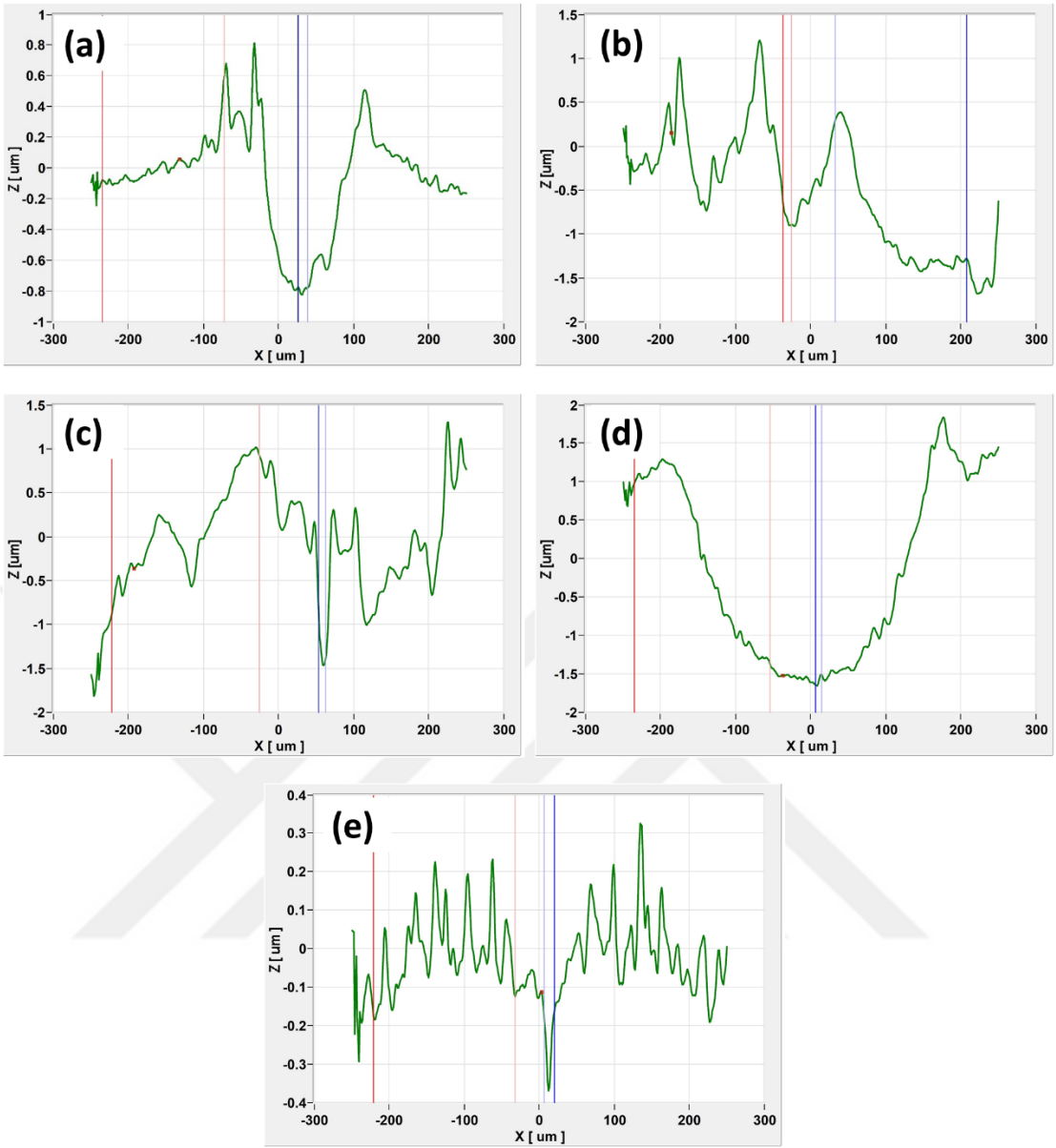
4.5. Aşınma Testi

Gaz ve plazma yüzey işlemi görmüş ve akımsız Ni-B ve PVD kaplama yapılmış GGG50 ve GGG70 kalite küresel grafitli dökme demirlere aşınma testi uygulanmış sonrasında ise aşınma hacminin belirlenmesi için aşınma yüzeyleri 2D profilometre ile ve optik mikroskop ile incelenmiştir. Hiçbir işlem görmemiş GGG50 ve GGG70 döküm numuneler de kıyaslama açısından benzer şekilde incelenmiştir. GGG50 ve GGG70 kalite numunelere ait aşınma çizik profilleri sırasıyla şekiller 4.16 ve 4.17'de verilmiştir. Aşınma çiziklerinin mikroyapıları ise şekiller 4.18 - 4.21'de gösterilmiştir. Profilometre cihazından elde edilen çizik fotoğrafları çok düzgün olmadığı için aynı numunelerin aşınma çizikleri optik mikroskop ile de incelenmiştir. GGG50 kalite numunenin verileri incelendiğinde gaz ve plazma nitrasyon işlemi sonrasında aşınma iz genişliğinin belirgin bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak akımsız Ni-B kaplama sonrası iz genişliği az da olsa artmıştır. İz genişlikleri ve profilometre sonuçları beraber irdelendiğinde plazma nitrasyon işlemine uğramış numunenin aşınma direncinin en yüksek olduğu görülmüştür.

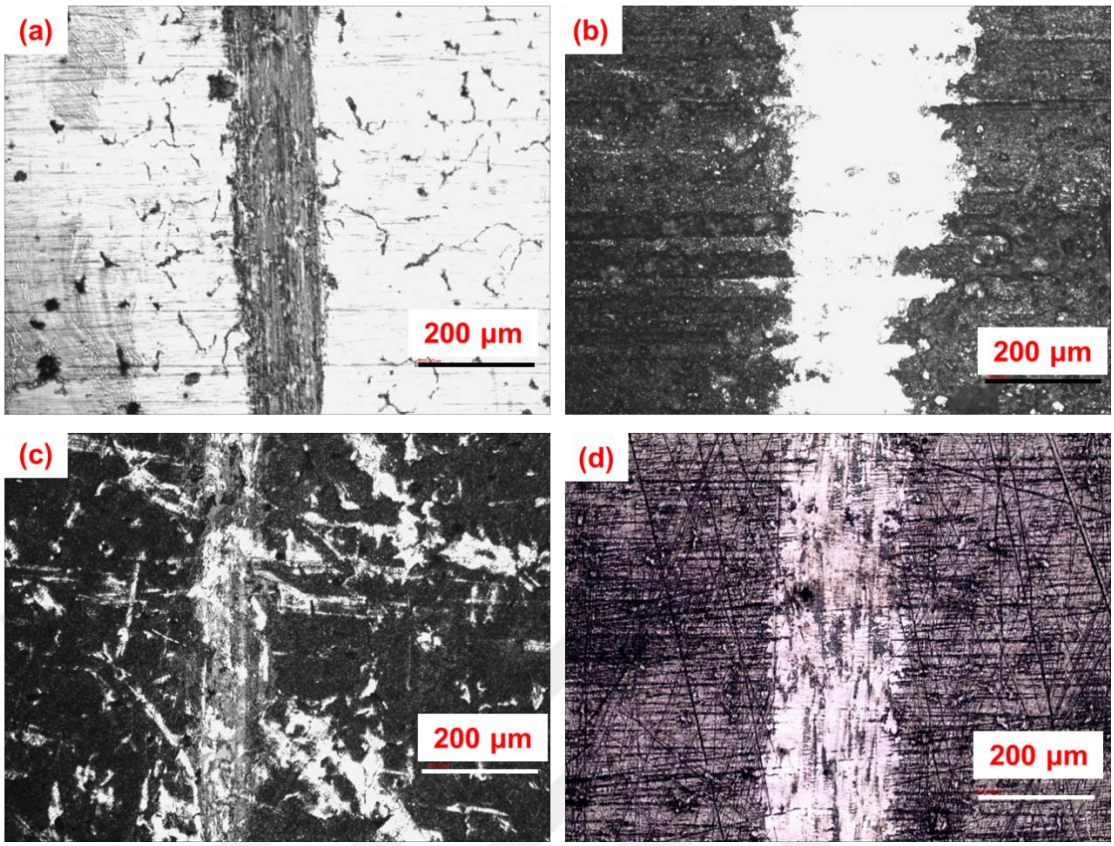


Şekil 4.16. 2D profilometre ile ölçülmüş GGG50 kalite küresel dökme demire ait aşınma izi profilleri: (a) döküm, (b) gaz nitrasyon, (c) plazma nitrasyon ve (d) akımsız Ni-B kaplama.

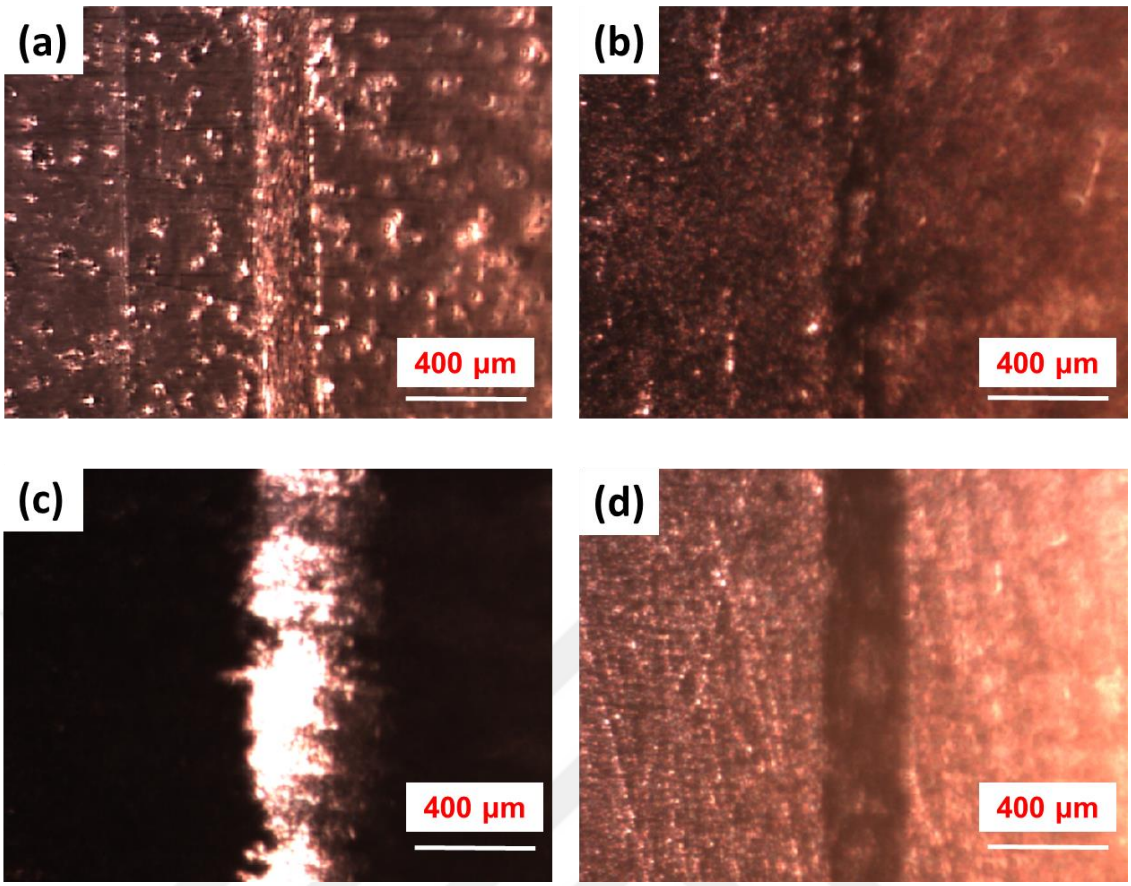
GGG70 kalite dökme demirin aşınma direnci incelediğinde tahmin edileceği üzere en az aşınma diğer bir deyişle en yüksek aşınma direnci gösteren numunenin PVD yöntemi ile TiN kaplanan numune olduğu anlaşılmıştır. PVD kaplama yapılan numunenin aşınma izi diğer numunelere göre çok belirsiz olup aşınma derinliği de çok azdır (~200 nm). Diğer GGG70 numunelerin aşınma direnci incelendiğinde ise GGG50 numunelerin aşınma davranışına benzer sonuçlar gözlemlenmiştir. Akımsız Ni-B kaplanan numunenin aşınma direnci diğer numunelere göre daha zayıftır.



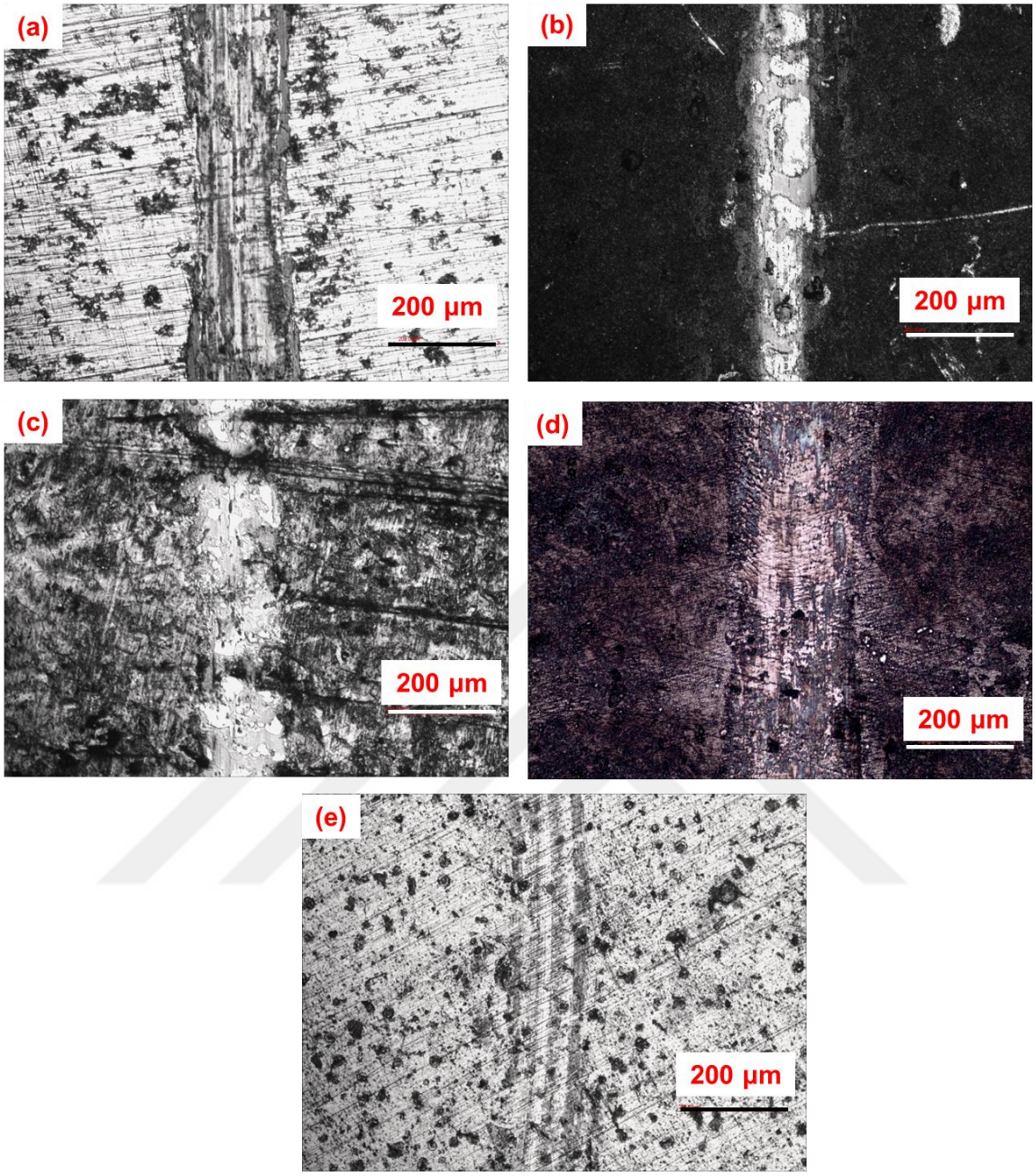
Şekil 4.17. 2D profilometre ile ölçülmüş GGG70 kalite küresel dökme demire ait aşınma izi profilleri: (a) döküm, (b) gaz nitrasyon, (c) plazma nitrasyon, (d) akımsız Ni-B kaplama ve (e) PVD kaplama.



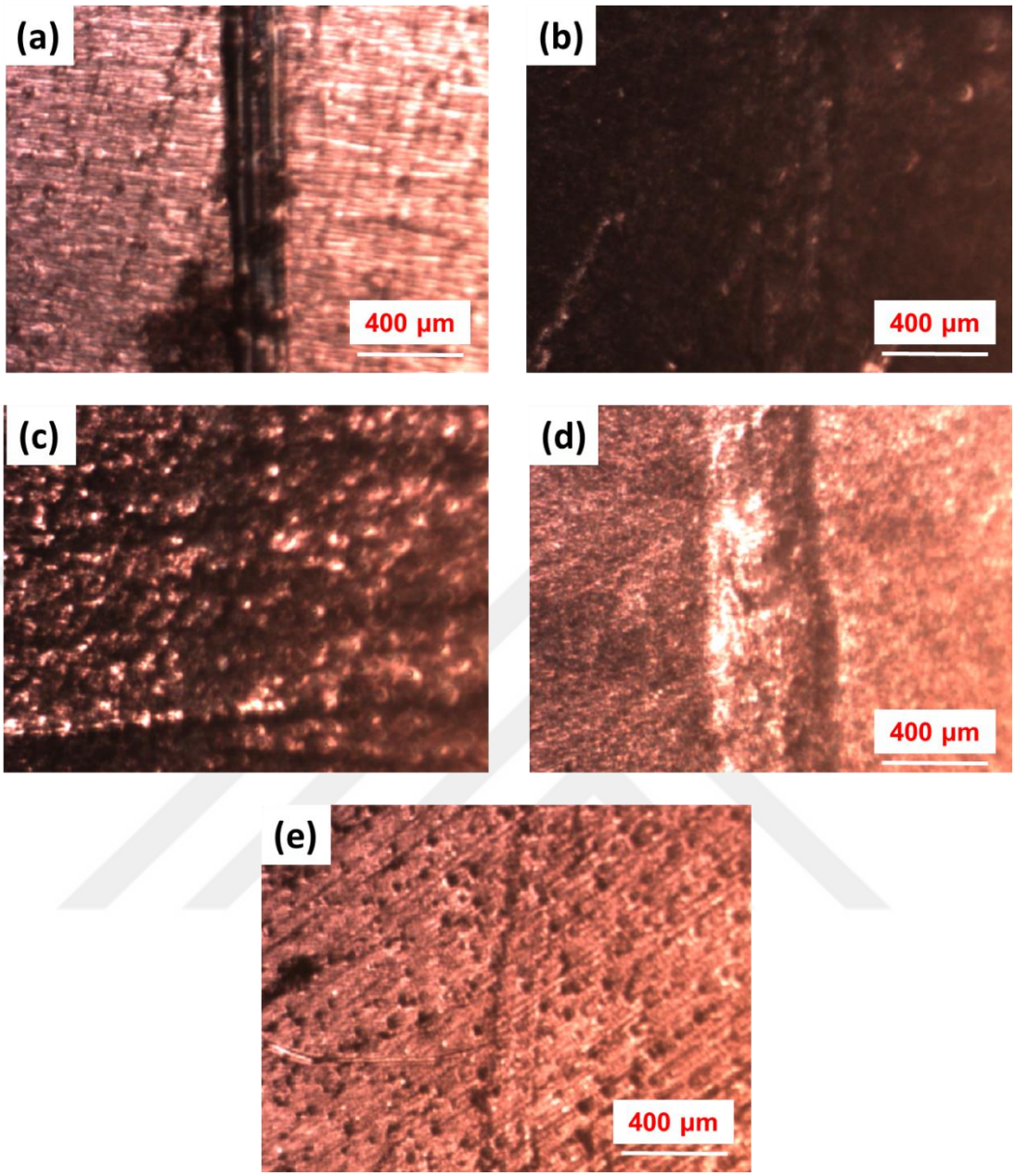
Şekil 4.18. Optik mikroskop ile çekilmiş GGG50 kalite küresel dökme demire ait aşınma izi görüntüleri: (a) döküm, (b) gaz nitrasyon, (c) plazma nitrasyon ve (d) akımsız Ni-B kaplama.



Şekil 4.19. 2D profilometre ile alınmış GGG50 kalite küresel dökme demire ait aşınma izi görüntüleri: (a) döküm, (b) gaz nitrasyon, (c) plazma nitrasyon ve (d) akımsız Ni-B kaplama.



Şekil 4.20. Optik mikroskop ile çekilmiş GGG70 kalite küresel dökme demire ait aşınma izi görüntüleri: (a) döküm, (b) gaz nitrasyon, (c) plazma nitrasyon, (d) akımsız Ni-B kaplama ve (e) PVD kaplama.

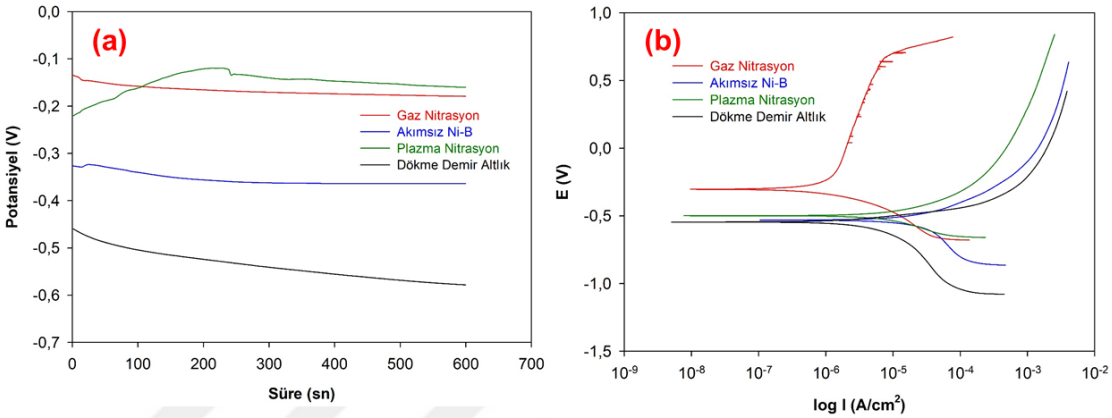


Şekil 4.21. 2D profilometre ile alınmış GGG70 kalite küresel dökme demire ait aşınma izi görüntüleri: (a) döküm, (b) gaz nitrasyon, (c) plazma nitrasyon, (d) akımsız Ni-B kaplama ve (e) PVD kaplama.

4.5. Korozyon Testi

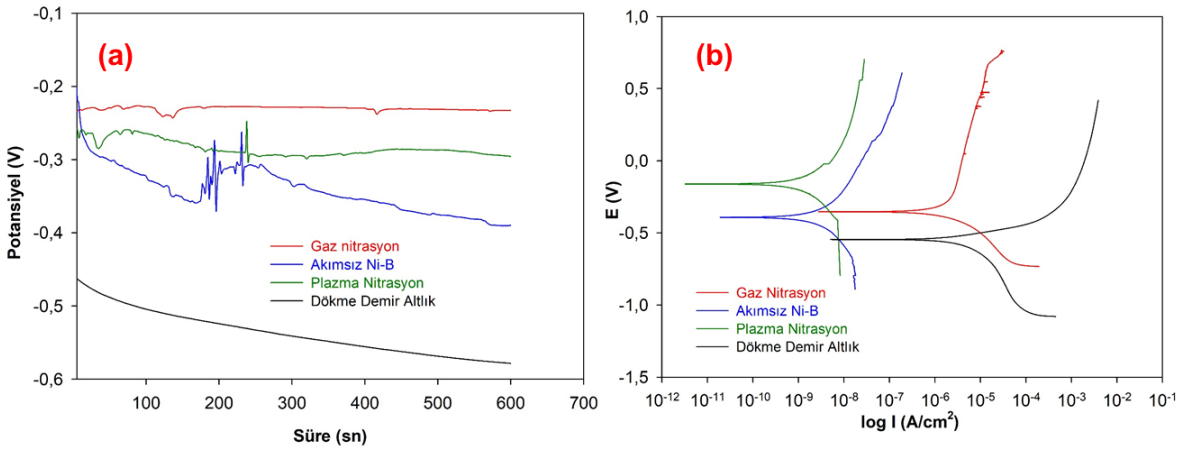
Akımsız Ni-B kaplama yapılmış, gaz ve nitrasyon işlemi uygulanmış GGG50 (Şekil 4.22) ve GGG70 (Şekil 4.3) kalite küresel grafitli dökme demirlerin korozyon davranışları OCP (açık devre potansiyeli) ve PDP (potansiyodinamik polarizasyon) yöntemleri ile incelenmiştir. PVD kaplama yapılan numunenin yüzey alanı 1 cm^2'den küçük olduğu için korozyon davranışı analiz edilememiştir. Dökme demir altlık numuneye ait korozyon eğrileri başka bir çalışmadan (Kırıcı, 2023) kıyaslama amacı ile

alınmıştır. Her iki numunelerin OCP eğrileri 0.1 M NaCl çözeltisi içerisinde kararlı potansiyel değerine ulaşabilmek maksadıyla 600 saniye boyunca kaydedilmiştir. İyonik çözeltilerde ölçülen OCP potansiyeli anodik ve katodik reaksiyonların denge potansiyeli olarak bilinmektedir. Diğer bir deyişle, çözelti ortamındaki indirgenme ve yükseltgenme aktivitelerini göstermektedir. Çözelti ortamı korozif özellikte ise kaydedilen OCP potansiyeli korozyon potansiyeli olarak kabul edilebilmektedir. Ayrıca OCP potansiyeli daha pozitif tarafta olanların daha negatif tarafta olanlara göre korozyona direncinin daha yüksek oldukları belirtilmektedir. (Ünal, Yaşar, Karahan 2018).



Şekil 4.22. GGG50 kalite numuneye ait korozyon eğrileri: (a) OCP, (b) PDP.

Yüzey işlemi görmüş ve kaplama yapılmış numunelerin hepsi altlık malzemeye kıyasla daha pozitif tarafta yer alarak uygulanan işlemlerin korozyon direncini arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.21 (a) detaylı bir biçimde incelendiğinde gaz nitrasyon işlemi yapılmış GGG50 kalite numunenin korozyon potansiyeli (-0,14 V) - (-0,18 V) arasında yataya yakın seyrettiği gözlemlenmiştir. Plazma nitrasyon işlemi görmüş numune ise ilk etapta gaz nitrasyona kıyasla daha negatif tarafta iken zamanla daha pozitif tarafa konumlanarak -0,15 V değerlerine kadar değişim göstermiştir. Akımsız Ni-B kaplama yapılan numune ise nitrasyona uğramış numunelere kıyasla daha negatif tarafta yer almıştır. GGG70 kalite numunenin OCP eğrileri incelendiğinde ise GGG50 numuneye benzer bir şekilde hiç işlem görmemiş altlık numunenin OCP eğrisi en negatif tarafta yer alarak korozyon direnci en zayıf olarak öne çıkmaktadır. Yüzey işlemi görmüş ve kaplama yapılmış GGG70 numunelerin korozyon davranışları kendi aralarında incelendiğinde ise nitrasyona uğramış numuneler benzer eğilim göstermiş olup pozitif taraftan negatif tarafa gaz nitrasyon, plazma nitrasyon ve akımsız Ni-B kaplama şeklinde sıralanmışlardır.



Şekil 4.23. GGG70 kalite numuneye ait korozyon eğrileri: (a) OCP, (b) PDP.

Çizelge 4.7. Nitrasyon işlemi görmüş ve akımsız Ni-B kaplama yapılmış GGG50 ve GGG70 numunelerin elektrokimyasal verileri

NUMUNE	E_{kor} (V)	i_{kor} (A/cm^2)
Dökme Demir Altlık	-0,55	$2x10^{-4}$
GGG50 Gaz Nitrasyon	-0,31	$1x10^{-6}$
GGG50 Plazma Nitrasyon	-0,50	$1x10^{-5}$
GGG50 Akımsız Ni-B	-0,54	$5x10^{-4}$
GGG70 Gaz Nitrasyon	-0,35	$4x10^{-5}$
GGG70 Plazma Nitrasyon	-0,16	$8x10^{-8}$
GGG70 Akımsız Ni-B	-0,40	$6x10^{-8}$

GGG50 ve GGG70 kalite numunelerin PDP eğrilerinden (Şekiller 4.22(b) ve 4.23 (b)) korozyon potansiyeli (E_{kor}) ve korozyon akımı (i_{kor}) hesap edilmiş ve Çizelge 4.7'de listelenmiştir. GGG50 kalite numuneler için PDP eğrileri incelendiğinde, OCP eğrilerine benzer şekilde yüzey işlemi görmüş ve kaplama yapılmış numunelerin korozyon potansiyelleri işlem görmemiş altlık malzemeninkine kıyasla daha pozitif tarafta yer almaktadır. Yüzey işlemi görmüş ve kaplama yapılmış numunelerin PDP eğrileri kendi aralarında kıyaslandığında gaz nitrasyon işlemi görmüş numunenin korozyon potansiyeli daha pozitif taraftadır. Plazma nitrasyon ve akımsız Ni-B kaplama yapılan numuneler ise benzer korozyon potansiyeline sahiptir. Numunelerin korozyon hızları incelendiğinde ise nispeten en sağda yer alan akımsız Ni-B kaplamanın daha yüksek korozyon hızına sahip olduğu görülmüştür. GGG50 kalite numunelerin OCP ve PDP eğrileri birlikte analiz edildiğinde gaz nitrasyon işlemi görmüş numunenin korozyona en dirençli olduğu, akımsız Ni-B kaplama yapılanın ise en zayıf olduğu görülmüştür. GGG70 kalite numunelerin PDP eğrileri incelediğinde ise uygulanan yüzey işlemlerinin ve akımsız Ni-

B kaplamanın korozyon direncini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Yüzey işlemi görmüş ve kaplama yapılmış numunenin korozyon potansiyeli altlık metalin potansiyeline kıyasla belirgin bir biçimde üstte yer almaktadır. Ayrıca akımsız Ni-B kaplama yapılmış ve plazma nitrasyona uğramış numunelerin, gaz nitrasyon işlemi görmüş numuneye karşı korozyona daha dirençli oldukları ortaya çıkmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tez çalışmasında, GGG50 ve GGG70 kalite küresel grafitli dökme demirlerin gaz-plazma nitrasyon yüzey işlemleri ile akımsız Ni-B ve TiN PVD kaplama sonrası yapısal özellikleri, sertlikleri aşınma ve korozyon dirençleri incelenmiş ve aşağıda listelenen ana sonuçlar ortaya çıkmıştır:

- Yüzey işlemleri ve kaplamalar incelenen numunelere başarılı bir şekilde uygulanmıştır.
- Nitrasyon işlemleri sonrasında numunelerin yüzeyinde ortalama 850 HV sertliğe sahip Fe_3N ve Fe_4N fazlarının oluştuğu görülmüştür.
- Nitrür tabaka kalınlığı ~4-9 µm civarındadır.
- Akımsız Ni-B kaplama işlemi sonrasında numunelerin yüzeyinde 9-10 µm kalınlıkta amorf Ni tabakası bulunmaktadır.
- Isıl işlemin etkisi ile amorf Ni içerisinde sert Ni_3B parçacıkları oluşmuştur.
- Numunelerin aşınma dirençleri kıyaslandığında TiN PVD kaplama yapılmış numunenin yüksek aşınma direncine sahip olduğu görülürken, beklenenin aksine akımsız Ni-B kaplama sonrası aşınma direncinde önemli iyileştirme görülememiştir.
- GGG50 ve GGG70 numunelerin korozyon davranışları birbirinden farklıdır. GGG50 kalite numunelerde akımsız Ni-B kaplama en düşük korozyon direncine sahip iken, GGG70 kalite numunelerde akımsız Ni-B kaplama yapılmış numune yüksek korozyon direncine sahiptir.

5.2. Öneriler

- Aşınma testleri sonrası aşınmış yüzeylerde taramalı elektron mikroskobu ile daha detaylı bir inceleme yapılabilir.
- Korozyon testlerindeki tutarsızlıkları ortadan kaldırmak ya da daha net anlaşılması için korozyon deneyleri tekrar edilebilir.
- Yüzey işlemi görmüş ve kaplama yapılan numunelere çizik (scratch) test yapılabilir.
- Dökme demirlerde kaplama yüzey işlemi sonrasında ulaşılan yüksek korozyon ve aşınma dirençlerinin daha da iyileştirilebilmesi amacıyla farklı kaplama malzemelerinin etkisinin incelenmesi planlanmaktadır. Ek olarak, kaplama kalınlığının dökme demirlerin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi bu tip malzemelerin kullanım alanlarında önem kazanmaktadır.

KAYNAKLAR

A Tutkun, A Özagar, A Koç, C Batman, C *Üneri*, MA Sehitoglu. Archives of Otolaryngology–Head ... Journal of Clinical Neuroscience 11 (5), 563-566, *2004*

Anık, M., Körpe, E., & Baksan, B. (2009, 08 11). Isıl İşlemin Akımsız Ni-B Kaplamanın Mikro-Yapısına, Korozyon Direncine ve Sertliğine Etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22*(2), 112-112.

ASM Handbook, Volume 1, pp.17-33, 2005

Berns, H. ve Theisen, W., 2008, Ferrous materials: steel and cast iron, Springer Science & Business Media, p.

Cansever, N., 2001. Manyetik Alanda Sıçratma Yönteminde Son Gelişmeler, Mühendis ve Makine Dergisi, Sayı 496

Çelik, Ö., 2001, Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.

ÇETİN, A., 2016, Küresel Grafitli Dökme Demir, *El Kitabı*, 2.

DAVIS, J., Surface hardening of steels understanding the basics, ASM International, Chapter 6, pp.141-187, USA, 2002.Davranışına Silisyum Oranının Etkisi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Demirlek, M., 2013, Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yüksek Çevrimli Yorulma

DİKEÇ F., Küresel grafitli dökme demir malzemelerin üretim ve özelliklerindeki gelişmeler. Mühendis ve makine dergisi, cilt 26, sayı 305, sayfa 13-19, 1985.

Eryılmaz, O.L.,1996. *ZrN-ZrBN Çok katlı Kaplamaların Korozyon Davranışı.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul , Turkey

Holmberg, K., Matthews, a.,1994, "Coating Tribology", Elsevier

http://www.ermir.com.tr/tr/technical.asp, son erişim tarihi: Haziran 2022

Jung, K., Nitriding of iron based ternary alloys: Fe-Cr-Ti and Fe-Cr-Al, PhD Thesis, Universitat Stuttgart, Max-Planck-Institut Für Metallforschung, Stuttgart, 2011.

Kırıcı, M. (2023). *Farklı Yapışma Tabakalarına Sahip Pvd ile Kaplanmış Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Aşınma, Yorulma ve Korozyon Davranışlarının İncelenmesi.* Konya: Konya Teknik Üniversitesi Doktora Tezi.

Kocabaş, M., Cansever, N., Curioni, M., & Örnek, C. (2019). *Nickel fluoride as a surface activation agent for electroless nickel coating of anodized AA1050 aluminum alloy.* Surface and Coatings Technology 364, 231-238.

Korwın, M., Morawskı, C., Tymowskı, G., Lılıental, W., Design of nitrided and nitrocarburized materials, Handbook of Metallurgical Process Design, CRC Press, Chapter 14, pp.545-590, 2004.

Kuş, H., 2007, Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışı, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Leon, S. J., Jappes, J. T. W., & Sahayaraj, M. E, 2018, Comparison of electroless Ni – P /Ni - B on corrosion performance, International Journal of Engineering & Technology, 7, 88–92.

Ludema, K.C., 1996. Friction, Wear, Lubrication, A Texbook in Tribology, USA.

Mikrosan Makina ve Kalıp San. A.Ş., Isıl İşlem Birimi, Literatür ve deneysel çalışmalar, 2012.

Özdemir, M. (2022). *Fiziksel Buhar Biriktirme ve Akımsız Ni-B Kaplama Yöntemleri Uygulanmış Ti-6Al-4V Alaşımlarının Aaşınma Özelliklerinin İncelenmesi.* Konya: Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Özdemir, U., Erten, M. 2003. Plazma (iyon) nitrürleme yöntemi ve malzeme özellikleri üzerindeki etkisi. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, (2): s41-48.

Polak, T.A., Wicox, G.D. 2003. Handbook of surface treatments and coatings. Professional Engineering Publishing Limited. London, 132 pp.

Savaş S.,2004. PVD Metodu ile TiN kaplanmış S 6-5-2 Yüksek Hız Çeliğinin Aşınma Davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi,Erciyes Üniversitesi.

Schumann, H. M. ve Kristallgeometrie, V., 1974, Deutscher Verlag fuer Grundstoffindustrie: Leipzig, Germany.

Sert, H., Can, A., Samancı, A., Toprak, H.,2005. Borlanmış ve PVD TiN Kaplanmış Kam Millerinin Aşınma Davranışları", III. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya, 1-9

Singh, G.P. ,Alphonsa, J. 2005. Effect of surface roughness on the properties of the layer formed on AISI 304 stainless steel after plasma nitriding. Surface & Coatings Technology, 200; 5807–5811.

Sinha, A.K., Boriding, ASM Handbook, Vol.4, J. Heat Treating, pp.437- 447,(1991).

Şahin, E. F. (2021). *Akımsız Ni-B Kaplamalara Tungsten ve Bor Karbür İlavelerinin Kaplamanın Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi.* Konya: Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

ŞEN U., Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri. İTÜ, Fen Bilimleri Ens.Doktora Tezi, 1997.

Topçu, Ş. 2010. Farklı şartlarda plazma nitrürlenmiş çeliklerin aşınma davranışının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Tozar, A., Karahan, İ.H., 2014. Structural and Corrosion Protection Properties of Electrochemically Deposited Nano-sized Zn-Ni Alloy Coatings. Applied Surface Science, 318, 15-23.

Ünal, E., Yaşar, A., Karahan, İ. K., 2021, Ni-B/TiB_2 Elektrodepolanmış Kompozit Kaplamaların Korozyon Dayanımlarının Belirlenmesi, Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 36(3), 709-718.

Wasa, K. and Hayakawa, S., 1992. Handbook of Sputter Deposition Technology, NoyesPublication, New Jersey.