
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ELMAS NANOPARÇACIK TAKVİYELİ KROM KAPLANMIŞ GÖZENEKLİ TOZ METAL PARÇALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI

Ayşe Kübra ERDOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MART 2015

AYŞE KÜBRA ERDOĞAN tarafından hazırlanan "ELMAS NANOPARÇACIK TAKVİYELİ KROM KAPLANMIŞ GÖZENEKLİ TOZ METAL PARÇALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

DanışmanDoç.Dr.Yusuf USTA

Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ..……

Başkan : Doç.Dr. Arcan DERİCİOĞLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ……...

Üye : Doç.Dr. Ahmet GÜRAL

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum ……...

Tez Savunma Tarihi: 25/03/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ayşe Kübra Erdoğan

25.03.2015

ELMAS NANOPARÇACIK TAKVİYELİ KROM KAPLANMIŞ GÖZENEKLİ TOZ METAL PARÇALARIN AŞINMA DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Ayşe Kübra ERDOĞAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2015

ÖZET

Bu çalışmada, farklı gözenek miktarına ve farklı bileşimlere sahip toz metal parçalar üzerine uygulanan nano elmas takviyeli krom kaplamanın aşınma dayanımına etkisi araştırılmıştır. 3 farklı alaşıma sahip metal tozları 32×12×10 mm boyutlarında 420, 550 ve 700 MPa olmak üzere 3 farklı basınçta preslenerek farklı gözenek miktarlarına sahip numuneler elde edilmiş ve sinterlenmiştir. Üniversiteler arası ikili işbirliği çerçevesinde numuneler, elektrokimyasal kaplama tekniğinde tecrübe sahibi olan Bulgaristan Bilim Akademisinde (BAS) nano elmas takviyeli krom kaplama yapılmıştır. Kaplama öncesi ve sonrası numunelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Pin-on-plate aşınma cihazında, kaplanan numunelerden daha sert aşındırıcı malzeme kullanılarak 40 N (1,4 MPa) yük altında, 9 mm/sn hız ve 300, 500 ve 600 periyotta kaplanan numunelerin aşınma kayıpları incelenmiştir. Tam yoğunluklu parçalara uygulanan kaplamalara göre 2 kat daha az aşınma kaybı olduğu görülmüştür. Üstelik bu değerlere, tam yoğunluklu parçalardaki kaplamalara uygulan basıncın 100 katı bir basınçla elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 914.1.092
Anahtar Kelimeler : Toz metalürjisi, kaplama, nano elmas takviyesi, aşınma

Sayfa Adedi : 81
Danışman : Doç. Dr. Yusuf USTA

INVESTIGATION ON WEAR BEHAVIOR OF POROUS POWDER METALLURGY PARTS COATED WITH DIAMOND NANOPARTICLES MODIFIED CHROMIUM

(M. Sc. Thesis)

Ayşe Kübra ERDOĞAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2015

ABSTRACT

In this study, the effects of wear resistance behavior with different compositions and different porosity of powder metallurgy parts coated with diamond nanoparticles added chromium have been investigated. 3 different alloyed powders pressed at 420, 550 and 700 MPa, sintered and samples with different porosities have been obtained in 32×12×10 mm sizes. Under the framework of bilateral agreement between the universities, samples have been coated with diamond nanoparticles added chromium in Bulgarian Academy of Sciences (BAS) at where the team has enough skill in electrochemical coating. Mechanical properties of the samples before and after coating have been investigated. Pin-on-plate wear test has been selected using an abrasive metal harder than coated samples, wear resistances of the coated samples at 40 N (1,4 MPa), 9 mm/sec, 300, 500 and 600 cycle have been examined. According to the coating applied to full density parts, less wear loss was observed 2 times. Moreover, these values were obtained with a 100 times the pressure of the pressure applied to the covering of full density parts.

Science Code : 914.1.092
Key Words : Powder metallurgy, coating, nano particle diamond addition, wear

Page Number : 81
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Yusuf USTA

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve yardımıyla beni destekleyen sayın hocam Doç.Dr Yusuf USTA'ya, Yrd.Doç.Dr. Hayriye ŞENGÜN'e ve yüksek lisans çalışmalarım boyunca yardımlarını gördüğüm tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Üniversiteler Arası ikili işbirliği Projesi kapsamında olup, Bulgaristan Bilimler Akademisi ile ikili işbirliği yapılmıştır. Ayrıca, bu proje Toz Metal A.Ş. tarağından desteklenmektedir.

Bu tez, 214M098 proje numaralı ve "Elmas Nanoparçacık Takviyeli Krom ve Nikel Kaplanmış Gözenekli Toz metal Parçaların Aşınma ve Korozyon Davranışlarının Araştırılması" başlıklı, Tubitak projesidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. TOZ METALURJİSİ 5

2.1. Toz Üretimi 6

2.1.1. Mekanik üretim yöntemleri 7

2.1.2. Elektroliz üretim yöntemi 8

2.1.3. Kimyasal üretim yöntemi 9

2.1.4. Atomizasyon 9

2.2. Presleme 10

2.2.1. Presleme çevrimleri 12

2.3. Sinterleme 13

3. YÜZEY İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ 17

3.1. Numune Yüzeyinin Kimyasını Değiştirmeden Yapılan Yüzey İyileştirmeleri .. 17

3.2. Numune Yüzeyinin Kimyasını Değiştirerek Yapılan Yüzey İyileştirmeleri 17

3.3. Yeni Bir Malzeme Tabakası Ekleyerek Yapılan Yüzey İyileştirmeleri 18

3.4. Nano Elmas Takviyesi 21

Sayfa

4. AŞINMA ANALİZİ 25

4.1. Aşınma Mekanizmaları 25

5. DENEYSEL ÇALIŞMA 31

5.1. Malzeme 31

5.2. Presleme 31

5.3. Sinterleme 32

5.4. Yoğunluk Ölçümü 34

5.5. Makro Sertlik 34

5.6. Elmas Nano Parçacık Takviyeli Elektrolitik Krom Kaplama 35

5.7. Kaplanan Numunelerin Mikro Sertlik Değerlerinin Ölçülmesi 36

5.8. Aşınma Deneyi 37

5.9. Yüzey Pürüzlülüğünün Belirlenmesi 39

5.10. Numunelerin Kesimi, Bakalite Alınması, Parlatılması ve Asit ile Dağlama 39

6. DENEYSEL SONUÇLAR 43

6.1. Porozite ve Makro Sertlik Sonuçları 43

6.2. Kaplama Sonrası Numune Görüntüleri 45

6.3. Numunelerin SEM ve EDS Sonuçları 47

6.4. Kaplama Kalınlıklarının Ölçümü 57

6.5. Mikro Sertlik Sonuçları 65

6.6. Aşınma Deneyi Sonuçları 67

6.7. Aşınma Öncesi ve Sonrası Yüzey Pürüzlülüğünün Değişim Sonuçları 71

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 75

KAYNAKLAR 79

ÖZGEÇMİŞ 81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Tipik bir nanoelmas parçacığın kimyasal bileşimi 23

Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan metal tozlarının bileşenleri..... 31

Çizelge 5.2. Numunelerin sinterleme koşulları..... 33

Çizelge 6.1. Deney numunelerinin kodları ve özellikleri..... 43

Çizelge 6.2. Deney numunelerinin yoğunluk ve porozite değerleri 43

Çizelge 6.3. Deney numunelerinin makro sertlik değerleri 44

Çizelge 6.4 Numunelerin kaplama sonrası kütle artış miktarı (%) 45

Çizelge 6.5. Deney numunelerinin mikro sertlik değerleri..... 65

Çizelge 6.6 Aşınma mesafelerinde numunelerdeki aşınma kaybı değerleri..... 67

Çizelge 6.7. Aşındırıcı pimin numuneler karşısındaki aşınma kaybı değerleri..... 68

Çizelge 6.8. (a) Tam yoğunluklu parça üzerindeki kaplamanın ve (b) gözenekli toz metal parça üzerindeki kaplamanın aşınma sonuçları..... 71

Çizelge6.9.Aşınma önce-sonrası numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 72

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Toz metalurjisi prosesinin şematik gösterimi 6

Şekil 2.2. Bilyalı değirmende toz öğütümü 7

Şekil 2.3. Mekanik alaşımlamanın şematik gösterimi 8

Şekil 2.4. Düşey gaz atomizasyon ünitesi 9

Şekil 2.5. (a) Çift yönlü soğuk preslemenin şeması ve (b) presleme basıncına bağlı toz ve kalıp etkileşimi 11

Şekil 2.6. Bakır tozundan sıkıştırılmış silindirlerde sabit yoğunluk çizgileri..... 11

Şekil 2.7. Örslü presleme tek hareketli sıkıştırmanın en basit şekli 12

Şekil 2.8. Çift hareketli sıkıştırma ile sıkıştıran zımba..... 13

Şekil 2.9. Yüzer dişi kalıplı presleme ile çift hareketli zımba etkisi oluşturma 13

Şekil 2.10. Çift-küre sinterleme modeli 15

Şekil 3.1. Lazerle giydirmenin şematik gösterimi(a)Tozu yerine koyma(b)toz üfleme. 19

Şekil 3.2. Katodik Metal Biriktirme İşleminin Şematik Gösterimi 21

Şekil 4.1. Abrasiv aşınma şeması 27

Şekil 4.2. İki elemanlı abrasiv aşınma 27

Şekil 4.3. Üç elemanlı abrasiv aşınma 28

Şekil 6.1. Deney numunelerinin yoğunluk değerleri..... 44

Şekil 6.2. Deney numunelerinin makro sertlik değerleri 45

Şekil 6.3. Numunelerin mikro sertlik değerleri..... 66

Şekil 6.4. Numunelerin aşınma kaybı değerleri..... 68

Şekil 6.5. Tam yoğunluklu çeliğe nano elmas takviyeli krom kaplamanın aşınma kaybı-zaman grafiği 70

Şekil 6.6. Numunelerde aşınmanın yüzey pürüzlülüğüne etkisi 72

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. Yüzer dişli kalıbın (a) şematik (b)deneydeki görüntüsü 31

Resim 5.2.(a)Deneylerde kullanılan pres makinası(b)preslenmiş numunenin görüntüsü 32

Resim 5.3. Sinterleme fırını ve sinterlenecek numunelerin görüntüleri 33

Resim 5.4. Sinterlenmiş numunelerin makro sertlikleri ölçümü görüntüleri 35

Resim 5.5. Kaplanmış numunelerin mikro sertlikleri ölçümü görüntüleri 37

Resim 5.6. (a, b) Aşınma test cihazı,(c)ekran görüntüsü ve (d, e)yardımcı cihazların görüntüleri 38

Resim 5.7. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı görüntüleri 39

Resim 5.8. Numune kesme cihazı..... 40

Resim 5.9. Kesilmiş ve bakalite alınmış örnek numune..... 40

Resim 5.10. (a) Bakalite alma, (b) parlatma cihazı 41

Resim 6.1. Kaplanmış numunelerin makro görüntüleri 46

Resim 6.2. Numune kenar ve köşelerinin makro görüntüsü 47

Resim 6.3. SEM-EDS cihazı..... 47

Resim 6.4. A420 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi..... 48

Resim 6.5. A550 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi … 49

Resim 6.6. A700 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi 50

Resim 6.7. D2420 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi 51

Resim 6.8. D2550 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi..... 52

Resim 6.9. D2700 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi..... 53

Resim 6.10. D5420 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi 54

Resim 6.11. D5550 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi .. 55

Resim 6.12. D5700 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi .. 56

Resim **Sayfa**

Resim 6.13. Optik mikroskop cihazı..... 57

Resim 6.14. A420 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü 58

Resim 6.15. A550 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüleri 58

Resim 6.16. A700 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü 59

Resim 6.17. D2420 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü 60

Resim 6.18. D2550 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü 61

Resim 6.19. D2700 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü 61

Resim 6.20. D5420 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü 62

Resim 6.21. D5550 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü 63

Resim 6.22. D5700 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü 64

Resim 6.23. D2550 nolu numunenin SEM de kaplama kalınlığının görüntüsü 65

Resim 6.24. Aşınan numunelerin makro görüntüleri..... 69

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
gr	Gram
l	Litre
cm	Santim
°C	Derece Celsius
HV	Vickers
MPa	Megapaskal
ρg	Görünür yoğunluk
ρt	Teorik yoğunluk

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
BAS	Bulgaristan Bilim Akademisi
MA	Mekanik Alaşımlama
CVD	Kimyasal buhar çökeltmesi
PVD	Fiziksel buhar çökeltmesi

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi ile, istekleri karşılayabilmek için üstün özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu üstün özellikleri elde edebilmek için tek bir malzeme yerine, birden fazla malzemenin belirli özellikleri bir araya getirilmelidir. Fakat en iyi özellikler elde edilirken, malzemenin ekonomik olması da önemli bir unsur olmaktadır. Bu sebeple, malzemenin bütünü iyileştirmeye çalışmak yerine sadece yüzey özelliklerini değiştirerek malzemeye üstün fiziksel, tribolojik ve kimyasal özellikler kazandırılabilmektedir. Bu amaçla, malzemeye üstün özellikler kazandırabilmesi için birçok yüzey iyileştirme yöntemleri kullanılmaktadır.

Birçok makine parçasının ömrü aşınma nedeniyle sınırlıdır. Bu nedenle çelikten imal edilen makina parçalarında aşınma dayanımının yüksek olması için sert yüzey tabakası ve parçanın darbeli şartlarda daha sağlam olması için iç kısmının tokluğunun yüksek olması istenmektedir. Bu nedenle aşınma dayanımının arttırılması amacıyla çelik parçaların yüzeyleri çeşitli tekniklerle sertleştirilmektedir. Bu amaçla çok çeşitli kaplama teknikleri uygulanabilmekte olup bunlardan birisi de elektrokimyasal kaplama yöntemidir.

Son yıllarda nano teknoloji en çok ilgi gören bilimlerdendir. Malzeme bileşenlerinin nano boyutta olması malzemenin mekanik, kimyasal, optik, manyetik, elektrik özelliklerinde ciddi değişimlerin meydana gelmesini sağlamaktadır. Nano kompozit kaplamalar yüksek sertlikleri ve aşınmaya karşı daha dirençli yapısıyla günümüz teknolojisinin gelişen ihtiyacını karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Yeni geliştirilen bu kaplamalı metaller her türlü aşınmaz yüzey elde etmek isteyen endüstri ve sanayi çevrelerince rahatlıkla kullanabilir. Ayrıca, yüzey kaplaması savunma sanayisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Elmas kristallerinin yuvarlak şekli, sertlik ve aşınma direnciyle birlikte süper yağlayıcılık özelliği sunar. Geniş yüzey alanı kompozit malzemelerle gelişmiş bütünleşme veya birleşme sağlar [1,2]. Nano elmas ucuz ve ekonomiktir. Sert metal kompozit kaplamalarda nano elmas uygulaması sertlik, hafiflik ve aşınma direnci rekabetinin ana hatlarını çizer. Nano elmas takviyeli kaplamalar ürünlerin servis ömrünü 2 ile 10 kat arasında artırır, kaplama kalınlığını 2–3 kat azaltır, mikro sertliklerini artırır (750–900 HV), aşınma

direncini 5–9 kat artırır [1,2].

Toz metal parça üretiminde parçanın yoğunluğu presleme basıncına ve sinterleme sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Toz metal çelik parçaların sürtünme aşınması davranışı ile ilgili literatür incelendiğinde parça yoğunluğu arttıkça aşınma dayanımının arttığı görülmektedir. En iyi aşınma direnci elmas içeren kaplamalarda görülmüş [3], elektrolitik sert krom kaplamanın, elmas takviyeli kompozit kaplamaya göre yaklaşık 4 kat daha hızlı aşındığı sonucuna varılmıştır [4]. Çelik numunelere uygulanan nano boyutta elmas takviyesinin aşınma sırasında oluşan oksitlenmeleri de azalttığı görülmüştür [2].

Aşınma direnci istenen uygulamalarda nikel esaslı kaplamaların da tercih edildiği bilinmektedir. Ancak saf nikelin sunduğu aşınma direnci sınırlı olup bor ya da fosfor katkılı nikel kaplamaların uygulamada yer aldığı ve Ni-B kaplamaların Ni-P kaplamalara göre daha sert oldukları görülmektedir. Ancak Ni-B kaplamalara yapılan parçacık takviyesiyle (nano elmas) sertliklerde % 8-10 oranında artış elde edilmiştir [2]. Nano elmas takviyeli Ni-B kaplamaların, Ni-P kaplamalara göre 2 kat, hiç kaplamasız St37 malzemesine göre 30 kat daha fazla aşınmaya karşı dirençli olduğu ortaya konulmuştur [2]. Akımsız kaplamada Ni-P malzemesine 30–80 nm boyutunda WC parçacık takviyesiyle, ısıl işlem sonrası 1150 HV sertlik değeri [5], 50 nm SiC parçacık takviyesiyle akımsız Ni-P kompozit kaplamada 1075 HV sertlik değeri [6] ve nano elmas takviyeli Ni-B (5 gr/l elmas) kompozit kaplama ile 1250 HV sertlik değerine ulaşılmıştır [2]. Nanoelmas, kaplamanın yapışma özelliğini de arttırmaktadır. Nonoelmas parçacık takviyeli krom kaplama kalınlığının krom kaplama kalınlığından 3 katı kadar ulaşılabildiği görülmüştür [7].

Kaplama işlemleri tam yoğunluklu çelik parçalara farklı konsantrasyonlarda nano elmas takviye edilerek, farklı akım yoğunluklarında ve proses sürelerinde krom kaplama yapılmış, kaplanan parçaların kaplama kalınlıkları, sertlikleri ve aşınma dirençleri incelenmiştir. Kaplama parametreleriyle (takviye oranı, akım yoğunluğu, proses süresi) farklı kombinasyonlar yapılmış ve kaplama karakteristiğine etkisi araştırılmıştır [7]. Çalışmalarında pürüzsüz ve parlak bir kaplama elde edilmiş, nano elmas parçacıkların krom kaplama karakteristiğine pozitif etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada ise söz konusu kaplama tekniğinin gözenekli parçalardaki performansının araştırılması hedeflenmiş, iki ülkeli bir anlaşma kapsamında proje yürütülmüştür.

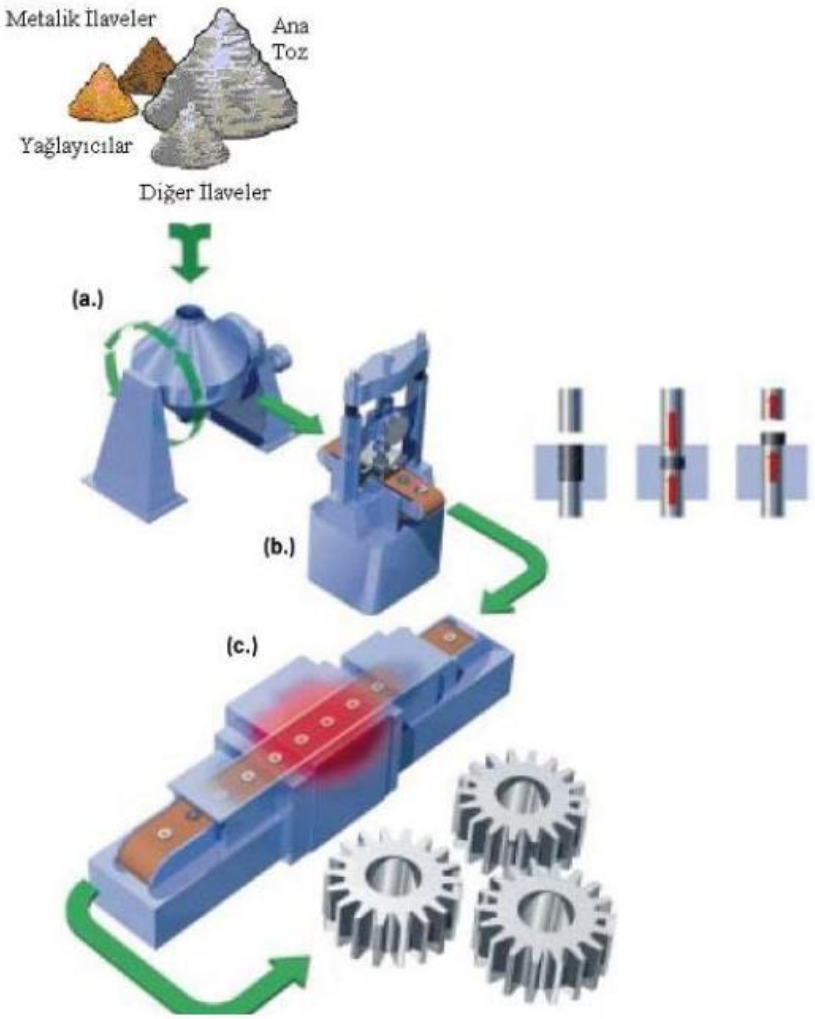
Bu kapsamda, Gazi Üniversitesi ve Bulgaristan Bilim Akademisi(BAS) arasında üniversiteler arası ikili işbirliği çerçevesinde çalışmalar başlatılmıştır. Toz metalürjisi yöntemi ile farklı yoğunluklu parça üretimi Gazi üniversitesi tarafından, parçaların elektrokimyasal kaplama tekniği ile nano elmas takviyeli krom kaplama işlemi ise Bulgaristan Bilim Akademisi (BAS) tarafından yapılmıştır. Kaplanan parçaların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle farklı yoğunluklara sahip parçalar üzerinde nano elmas takviyeli kaplama yapılarak kaplamanın aşınma davranışına etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

2. TOZ METALURJİSİ

Toz Metalurjisi yöntemi ile parça üretimi yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Sinterlenmiş toz metal çelik parçaların mekanik özellikleri ve iyileştirilmeleri hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Toz metal parçaların performansının iyileştirilmesi için uygulanan yöntemler genellikle alaşım bileşeni tozların özelliklerinin geliştirilmesi, üretim parametrelerinin daha iyi kontrolü, sert parçacık takviyeli kompozit yapı oluşturulması veya uygun yüzey işlemlerine tabi tutulmasıyla gerçekleşmektedir. Aşınma davranışı sistem parametrelerine ve malzemenin özelliklerine göre değişiklik gösterdiği için literatürde sınırlı bilgi bulunmaktadır. Sinterlenmiş parçaların yüzey işlemeleri uygulamalarında yüksek özellikler kazanıldığı için, yüzey işleme yöntemlerinin önemi daha yüksek performanslı parçalara ihtiyaç duyulması nedeniyle sürekli olarak artmaktadır. Günümüzde toz metal çelik parçalar yaygın olarak birçok sektörde kullanılmaktadır. Çeşitli toz metal çelik parçalar başlıca otomotiv endüstrisinde motor parçaları ve aktarma organlarında kullanılmaktadır.

Toz metalürjisi yöntemiyle ürünler son aşamaya kadar devam ettiği gibi, sürecin ara aşamalarında da bitirilebilir. Ara ürünlere yüzey işlemleri gibi işlemler yapılarak parçalar hazır hale getirilebilir. Toz metalürjisinin genel olarak dört aşamadan oluşur. Bunlar;

a) Toz hazırlama,
b) Presleme,
c) Sinterleme,
d) Son işlemlerdir [9].



Şekil 2.1. Toz metalurjisi prosesinin şematik gösterimi [8].
(a) Karıştırma, (b) Presleme, (c) Sinterleme

2.1. Toz Üretimi

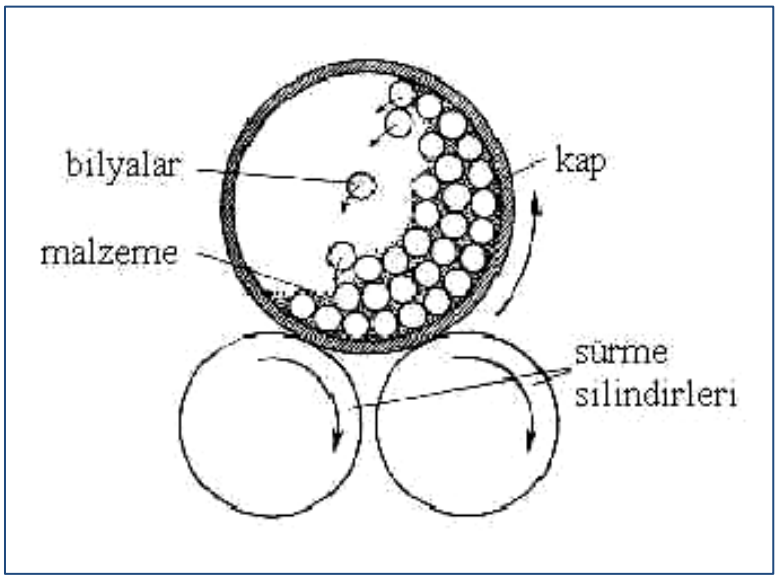
İstenilen özelliklere sahip parça üretimi için, öncelikle söz konusu istenilen özellikleri sağlayabilecek tozların üretimi sağlanmalıdır. Ayrıca, toz malzemenin özellikleri ile bu malzemenin şekillendirilmesi için kullanan teknik detaylar arasında bir ilişki olmaktadır. Bu sebeple, istenen mekanik özelliklere sahip parça elde etmek için, söz konusu özellikleri sağlayan toz üretim tekniği ve tozun şekillendirmesinde kullanılan tekniğin bir arada düşünülmesi gerekmektedir [9].

Toz üretim metotları genel olarak; mekanik, kimyasal, elektroliz ve atomizasyon toz üretim yöntemleridir. Bu üretim metotlarına ilave olarak, mekanik özelliklerinin ihtiycına göre özel toz üretim teknikleri de kullanılmaktadır [10].

2.1.1. Mekanik üretim yöntemleri

Talaşlı imalat: Basit bir yöntem olup, metal işleme sırasında ortaya çıkan metal talaş hurdaları kullanılmaktadır. Bu hurdalar kimyasal tekniklerle temizlenerek, istenen toz boyutuna küçültmek için öğütülmektedirler [10].

Öğütme: Öğütme, sert bilyeler, çubuklar veya çekiçler aracılığıyla uygulanan mekanik darbe işlemini kapsayarak, gevrek malzemelerden toz üretmede kullanılan yöntemdir. En basit olarak cihaz, içerisine bilyalar ve öğütülmesi istenen malzeme konulan bir kaptan oluşmaktadır(Şekil 2.2). Fakat öğütme işlemi birçok sünek metal için uygun olmamaktadır. Sünek tanecikler kırılma yerine birbirleri ile soğuk olarak kaynaklanmakta ve daha büyük tanecik oluşturmaktadırlar. Fakat, günümüzde öğütme işlemi alüminyum gibi sünek metallerden pul toz üretiminde de kullanılabilmektedir. Bu durumda, soğuk kaynaklanmayı ve yapışmayı engellemek için yağlayıcılar kullanılmaktadır [11].

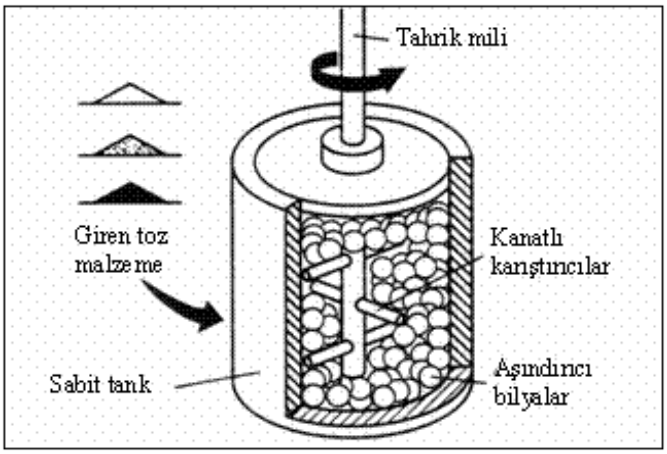


Şekil 2.2. Bilyalı değirmende toz öğütümü [11]

Aşındırarak öğütme ve mekanik alaşımlama(MA): Oksit dağılımlı güçlendirilmesi gibi elde edilen parçacık takviyeli kompozitler yüksek sıcaklık sürünme dayanımına sahip olduğu için uzun süreli kullanılmaktadır. Ancak, bu kompozitlerin üretimi sırasında, sert parçacıkların malzemenin her yerine eşit dağılımının sağlanması gerekmektedir. Bu sebeple, bu kompozitleri üretmek için öğütme teknikleri geliştirilmiştir. Hareketli bilyalar arasında aşındırma ile alaşımlı kompozit parçacıkları üretmek için MA, bu amaçla uygun

bir tekniktir. Mikroskobik ölçekte tekrarlanan çarpışma, soğuk kaynak ve kırılma olayları istenilen kompozit tozları üretir. Başlangıçta karışım halinde olan parçacıklar, fazların dağılımı ile kaplanmış parçacık haline gelirler. Diğer öğütme tekniklerinden farklı olarak, soğuk kaynak ve kırılma arasındaki denge, parçacık boyutunu oldukça sabit tutar [11]. Ayrıca, içiçe kalıp tekniği ile soğutma sağlanabilmekte ve kap içerisine kontrollü gaz giriş-çıkış ile tozların oksitlenmesi de engellenebilmektedir.

Dönen kollar bilye dolu tankı karıştırmaktadır(Şekil 2.3). Girdi malzemeler; sırasıyla soğuk kaynak ve kırılma adımlarını izler. Öğütme sonucunda mikroyapı daha homojen bir hale gelir. Böylelikle daha küçük boyutlu ve homojen toz elde edilmektedir [10].



Şekil 2.3. Mekanik alaşımlamanın şematik gösterimi [10]

2.1.2. Elektroliz üretim yöntemi

Bu yöntemde; sıcaklık, akım yoğunluğu gibi şartlar altında elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti belirlenerek, birçok metal sünger veya toz durumundaki katot üzerinde biriktirilmektedir. Sonraki aşamada yıkama, kurutma, indirgeme, tavlama ve öğütme yapılabilmektedir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında bakır olmak üzere, krom ve magnezyum da bu yöntemle üretilebilmektedir. Elektrolitik yöntemle üretilen tozların saflık değerleri yüksek olmaktadır [11].

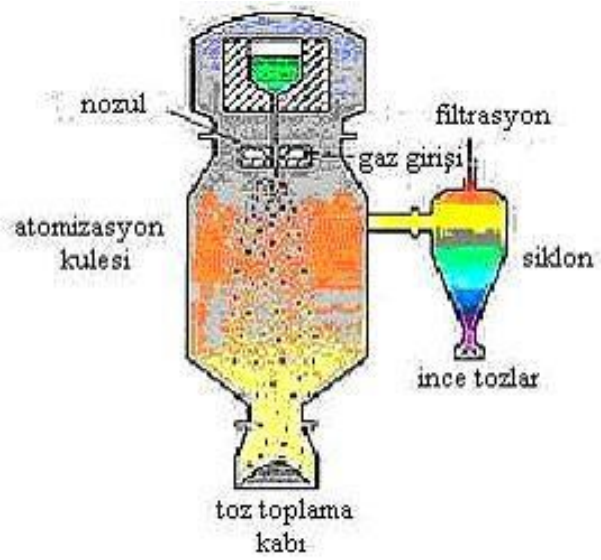
Elektrolitik metal tozlarının en önemli avantajları saflıklarının çok yüksek olması ve metal dışı kalıntıların bulunmayışıdır. Fakat, metal dışı kalıntılar tozun sıkıştırılabilirliğini düşürmektedirler [9].

2.1.3. Kimyasal üretim yöntemi

Bu yöntem, en çok demir tozlarının üretiminde kullanılmaktadır. Prosesinde, öncelikle seçilen cevher, öğütülür, kokla karıştırılır, karışım indirgemenin oluştuğu sürekli fırından geçirilir ve kek şeklinde sünger demir elde edilir. Sünger demir daha sonra öğütülür, metalik olmayan malzemelerden ayrılır ve elenir. Tozların saflığı ham malzemelere bağlıdır. Düzensiz süngerimsi tanecikler yumuşaktır ve kolayca preslenebilmektedir. Böylelikle, ham mukavemeti iyi olan ürünler oluşur. Ayrıca, benzer basamaklarla, hidrojenle indirgenmesiyle refrakter metaller de oksitleri üretilmektedir [11].

2.1.4. Atomizasyon

Atomizasyon toz üretim yöntemi, ergimiş sıvıya ve sıvının damlacıklara ayrılmasına ve bu damlacıkların donarak parçacıklar haline gelmesine dayanır [10]. Bu ise sıvı metalin, bir gaz veya sıvı akışkan jeti ile parçalanmasıyla gerçekleştirilir. Kullanılan gaz çeşitleri genellikle argon, azot veya hava, sıvı olarak ise su kullanılmaktadır. Püskürtme açısı ve konisi, akışkan hızı, debisi, akan metalin kalınlığı gibi birçok parametreye bağlı olarak istenen boyutlarda toz elde etmek mümkün olmaktadır. Katılaşma hızına bağlı olarak parçacığın şekli küresel halden, su veya düşük ısı kapasiteli gaz kullanılması halinde ise daha düzensiz parçacığa kadar farklılık gösterebilmektedir [11].



Şekil 2.4. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [11]

Bu yöntem ergitilebilen bütün metallere uygulanabilmektedir. Ticari olarak üretilebilen tozlar arasında, demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz ve alüminyum, kurşun, kalay çinko ve kadmiyum gibi düşük ergime dereceli metal tozları sayılabilir. Atomizasyon yönteminin avantajlarından biri de alaşım tozlarının ergitilmesinde rahatlıkla kullanılabilmesidir, bu yöntemle üretilen tozların bileşimleri her bir toz tanesinde aynı kalmaktadır. Endüstride kullanılan tozların % 60'dan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir [11].

2.2. Presleme

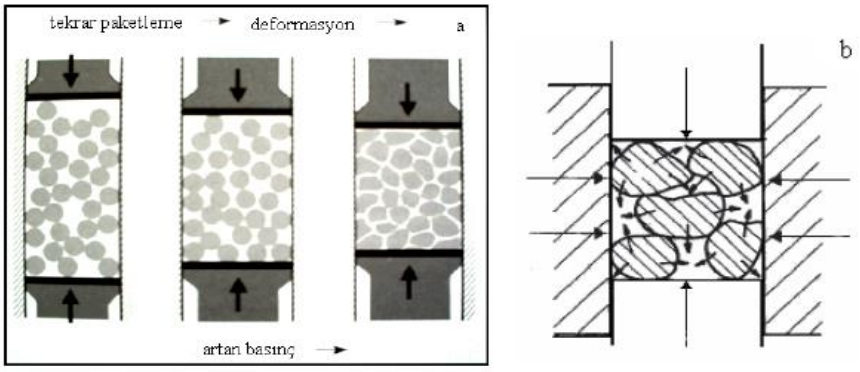
Toz metalurjisi ile üretilen parçaların karakteristiği belirleyen önemli basamaklardan biri presleme aşamasıdır. Presleme aşamasında toz metal parçaların doluluk değerleri belirlenmektedir.

Tozlar basınç uygulandığında; önce parçacıklar birbiri üzerinden kayarak, daha sonra da yüksek basınçlarda parçacıkların istenen şekli oluşturmasıyla yoğunlaştırılmaktadır. Kalıpta sıkıştırma takımı, bir tek eksende basınç uygulayacak şekilde tasarlanmaktadır. Kalıp, tozun doldurulup sıkıştırılacağı boşluğu sağlar. Toz dolumu sırasında üst zımba yukarı çekilmiş durumdadır. Dolum sırasında alt zımbanın bulunduğu durum doldurma konumu olarak tanımlanır ve kalıbın içine ne kadar toz dolumu yapılacağını belirler. Toz, kalıp boşluğuna besleme pabucu aracılığıyla doldurulur. Tozun akışında oluşabilecek herhangi bir değişiklik basılacak parçayı etkilemektedir. Doldurma sırasında, boşluğa homojen toz dolumu sağlamak için alt zımba konumuna hareket verilebilir. Bu esnada, toz birden fazla tozun karışımı ise tozun homojenliğine dikkat edilmelidir. Doldurma sonunda, sıkıştırma sırasında tozun kalıp merkezinde olması için alt zımba daha alt noktaya çekilir. Yoğunlaştırma, zımbaların kuvvet altında kalıp merkezine doğru hareketiyle oluşur. Sonunda üst zımba geri çekilir ve alt zımba parçayı iterek çıkartılır [10].

Sıkıştırılmış toza ham parça, presleme sonrası yoğunluğa ham yoğunluk ve presleme sonrası mukavemete ise ham mukavemet olarak adlandırılır. Preslemeden sonra, ham parça kalıbın içinde mekanik olarak kilitlenmiş durumdadır. Parçayı kalıptan çıkartacak kuvvete de çıkartma kuvveti adı verilmektedir. Burada yağlayıcı çok etkili bir parametre olup, yağlayıcı etkisi arttıkça hem çıkartma kuvveti, hem de kalıp aşınmaları azalmaktadır [10].

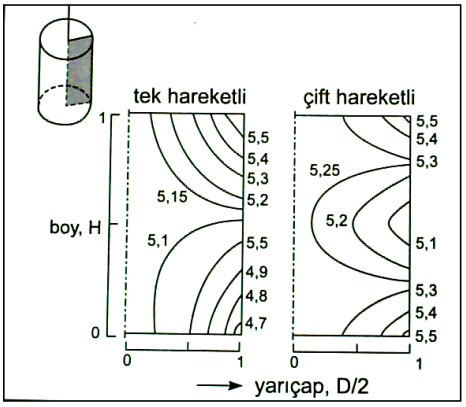
Preslemede önemli parametrelerden biri olan sıkıştırma oranı, sıkıştırılmış yoğunluğun görünür yoğunluğa oranıdır. Bu oran istenilen son parça boyu ve yoğunluğuna erişebilmek için doldurma yüksekliğinin bulunmasında çarpan olarak kullanılmaktadır [10].

Şekil 2.5'te çift yönlü preslemede basıncın artması ile tozlara uygulanan basıncın etkisi gözlemlenmektedir.



Şekil 2.5. (a) Çift yönlü soğuk preslemenin şeması [10] ve (b) presleme basıncına bağlı toz ve kalıp etkileşimi [8]

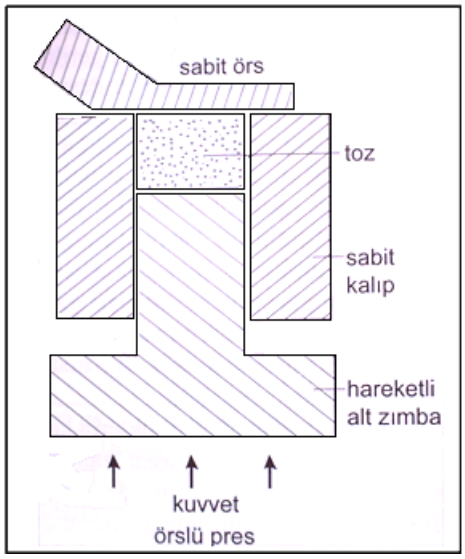
Soğuk presleme teorisine göre, kullanılan presleme çeşidine göre mamul malzeme ya da ham yoğunluklarında farklılıklar göstermektedir. Şekil 2.6'da tek yönlü kalıbın eş basınç eğrileri ile, tek ve çift hareketli yönlü kalıp karşılaştırılmıştır. Çift hareketli preslemede, presleme yüzeylerinin iki tarafında da presleme sonrası yoğunluklar aynı ancak tek hareketli preslemede presin bastığı nokta ile sabit kısımdaki yüzey arasında yoğunluk farkı oluşmaktadır [8].



Şekil 2.6. Bakır tozundan sıkıştırılmış silindirlerde sabit yoğunluk çizgileri. Çizgiler g/cm^3 olup, tek ve çift hareketli sıkıştırmalarda boy ve yarıçapa göre çizilmiştir [10]

2.2.1. Presleme çevrimleri

Presleme çevrimi; tozun kalıp boşluğuna beslenmesi, toza basınç uygulanması ve ham parçanın kalıptan çıkartılması işlemlerinden oluşur. En basit olanı; kalıp ve alt zımbanın sabit kalarak, üst zımbanın ilerlemesi ile yapılandır. En basit halde, tek zımba hareket eder, bu esnada alt zımba ve kalıp sabittir. Düz parçalarda üst zımbanın yerine sabit bir plaka konarak da presleme yapılabilir ve buna örs tipi presleme denir. Bu presleme tekniği şematik olarak Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Burada alt zımba, tozu bir plakayla üst kısmı kapatılmış dişi kalıp içinde sıkıştırmaktadır. Örs tipi presleme, basit parçaların çok sayıda seri üretimi için kullanılmaktadır [10].

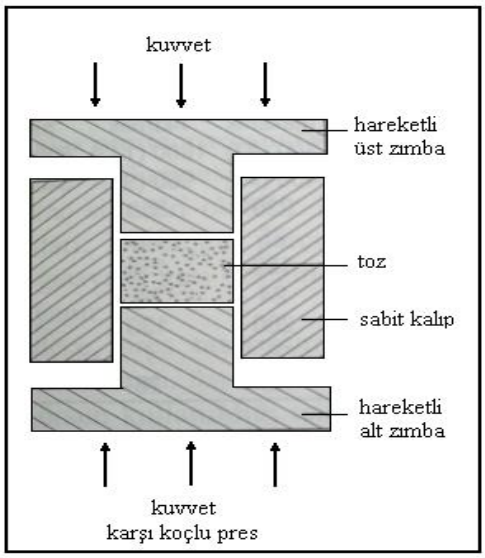


Şekil 2.7. Örslü presleme tek hareketli sıkıştırmanın en basit şekli [10]

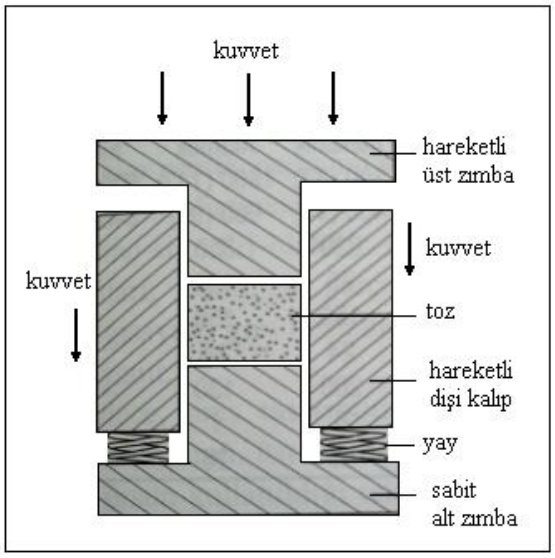
Diğer presleme çevriminde, kalıpta sıkıştırmanın çoğu en az iki presleme hareketi ile yapılmaktadır. Genellikle alt ve üst zımbalar kalıp merkezine doğru hareket eder. Bu hareketler Şekil 2.8 de çift hareketli pres için gösterilmiştir. Presleme sırasında her iki zımba da kalıbın merkezine doğru hareket eder. Parçanın çıkarma işlemi de alt zımbanın parçayı kalıbın üstüne itmesi ile yapılmaktadır [8].

Çok kullanılan alternatif presleme çevrimi ise, sabit bir alt zımba ve yüzer (hareketli) kalıp ile yapılan preslemedir. Üst zımbaya basınç uygulandıkça, kalıp duvarlarındaki sürtünme kuvveti, kalıbın bir yaya karşı hareketlenmesine sebep olur. Böylece, sabit olan alt zımba kalıbın merkezine doğru relatif hareket yapmış olur. Kavram Şekil 2.9' da gösterilmiştir.

Çıkartma için kalıbın sabit zımbaya doğru hareketlenmesi gerekir [10]. Yüzer kalıpla yapılan preslemede, çift hareketli sıkıştırma etkisi gösterdiği için, preslenmiş numunede oluşan basınç etki diyagramı çift hareketli presle benzer çıkmaktadır. Ayrıca, kalıbın presleme sırasındaki hareketi ile, kalıp yüzeyine sürtünmesi azalmaktadır.



Şekil 2.8. Çift hareketli sıkıştırma ile sıkıştıran zımba [10].



Şekil 2.9. Yüzer dişi kalıplı presleme ile çift hareketli zımba etkisi oluşturma [10].

2.3. Sinterleme

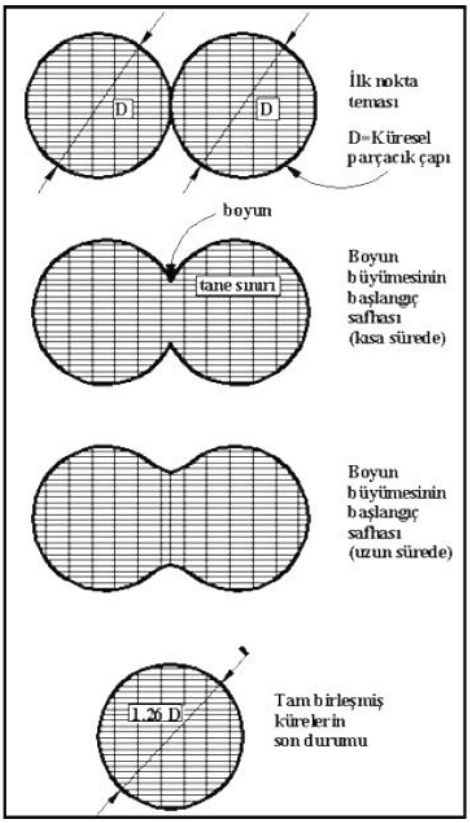
Sıkıştırılan tozlar, ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılarak difüzyon yolu ile kimyasal bağlanmasını sağlamak ve böylece tozların birbiri ile kaynaşması, bütün

oluşturması işlemine tozların sinterlenmesi adı verilmektedir. Tek bileşenli tozlarda sinterleme sıcaklığı genellikle metalin ergime sıcaklığının 2/3 veya 4/5 alınarak seçilmektedir. Birden fazla bileşenli toz karışımlarında ise sinterleme sıcaklığı, ergime sıcaklığı düşük olan tozun ergime sıcaklığının üzerinde, ergime sıcaklığı yüksek olan tozun ise ergime sıcaklığının altında bir değer alınmaktadır. Sinterleme süresi kullanılan malzemenin özelliklerine göre değişmekte olup, sinterleme süresi ile sinterleme sıcaklığı arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Sinterleme sıcaklığı arttıkça, sinterleme süresi azalmaktadır [12].

Sinterlemeyi etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar; toz boyutu, sıcaklık, alaşım elementleri, ham yoğunluk, sinterleme atmosferi, vb.dir. Sinterleme mekanizmasının etkin olabilmesi için en önemli etken, preslenecek ve sinterlenecek tozların yüzeyinde oksit veya sinterlemeyi olumsuz etkileyecek tabakaların oluşmamasıdır. Eğer oksit tabakaları oluşmuşsa ve presleme sırasında kırılmamışsa sinterleme olmaz ya da işlem çok verimsiz gerçekleşir [12].

Sinterleme işlemi, yüksek sıcaklıkta atomların yayınımı ve küçük parçacıkların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir. Toz üretiminde malzeme yüzeyine belli bir enerji verilerek yüzey alanı veya yüzey enerjisi oluşturulmaktadır. Sinterleme ile bu yüzey enerjisi giderilmektedir. Birim hacimdeki yüzey enerjisi, parçacık boyutu ile ters orantılıdır. Bu nedenle, daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olan küçük boyuttaki parçacıklar daha yüksek enerjiye sahiptir ve daha hızlı sinterlenir. Fakat yüzey enerjisinin tamamı sinterlemeye harcanmamaktadır [10].

Sinterleme işleminde, yüksek sıcaklıklarda parçacıklar birbirine kaynaşır. Katı hal atomik geçiş olaylarının görüldüğü sinterleme işlemi, ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda uygulanmasına rağmen birçok durumda sıvı-faz oluşumu gerçekleşir. Mikro boyuttaki kaynaklaşma ise, parçacıkların birbirine temas ettiği noktalarında yapışma boyunlarının büyümesi şeklinde oluşur. Bu şekildeki boyun büyümesi toz özelliklerinin değişmesine de neden olmaktadır. Sinterleme işlemi esnasında, nokta teması ile başlayan, ara parçacık bağının gelişmesi ile devam eden mekanizmaya çift-küre sinterleme modeli denilmektedir (Şekil 2.10). Bu modelde, parçacık teması sonucunda oluşan boyun büyümesiyle yeni tane sınırı oluşur ve iki parçacık ilk çapın 1.26 katı olan bir son çapla tek bir parçacık oluşturacak şekilde birleşmektedir [8].



Şekil 2.10. Çift-küre sinterleme modeli [8].

3. YÜZEY İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

3.1. Numune Yüzeyinin Kimyasını Değiştirmeden Yapılan Yüzey İyileştirmeleri

Isıl işlemler: Parçanın tamamını ısıtmak yerine sadece parçanın yüzeyine uygulanmaktadır. Böylelikle, parçaların kütlesel özellikleri değişmemekte ve parça çarpılmaları azaltılabilmektedir. Parçalara yüzey ısıl işlemleri; indüksiyon, alev, lazer ve elektron ışınıyla sertleştirme teknikleri kullanılarak uygulanabilmektedir [2].

Mekanik işlemler: Mekanik işlemler bilye püskürtme, patlatma ile sertleştirme veya özel işleme yöntemleri ile numunede deforme olmuş tabaka oluşmasını sağlayan soğuk işlemleri içermektedir. İşlem, yüzeyde plastik şekil değişimi meydana getirerek, buna bağlı pekleşme ve basma iç gerilmeleri oluşturmasına dayanır. Böylelikle, parçalarda biriktirilen basma enerjisi artar ve aynı zamanda sertlik, yorulma ve gerilmeli korozyon direnci de artırılmış olur [2].

3.2. Numune Yüzeyinin Kimyasını Değiştirerek Yapılan Yüzey İyileştirmeler

Anotlama (oksitleme): Elektrolizle uygulanan metal kaplama yöntemidir. Bu teknikte, üstü kaplanacak malzeme elektroliz kabının anoduna yerleştirilir. Elektrolit olarak ise bir metalin, genellikle alüminyumun sulu çözeltisi kullanılmaktadır. Elektrik verildiğinde çözeltideki alüminyum ayrışarak anottaki malzemenin üstünde ince, sert ve gözeneksiz bir katman oluşturacak şekilde çökelir. Anotlama işlemi, paslanmaya karşı koruma, elektrik yalıtımı, ısı kontrolü, birleştirme ve sızdırmaz hale getirme, aşınma ve yıpranmaya karşı dayanıklılık amacıyla yapılmaktadır [13].

Karbürleme (sementasyon, karbürizasyon): Karbürleme veya sementasyon işlemi; düşük karbonlu çeliklerin yüzeyine atomsal karbon difüze edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu işlem sırasında yüzeyde aşınmaya dayanıklı sert bir yapı elde edilirken, çekirdek ise darbelere dayanıklı tok (orijinal yapı) bir şekilde kalır. Karbürleme, gerekli karbonu verici ortamdan sağlayarak, yüksek sıcaklıklarda yeterli miktarda karbonun çelik yüzeyine difüzyonunu veya adsorpsiyonunu amaçlar. Sementasyon, işlemiyle %0,1-0,2 C içeren

düşük karbonlu çeliklerin yüzeyinde karbon miktarı, %0,7-0,8 C seviyelerine kadar çıkarılabilmektedir [14].

Karbonitrürleme: Bu işlem ile çeliğe karbürlemedekinden daha az karbon (% 0,6–0,7), fakat önemli miktarda azot (% 0,2–0,3) verilmektedir. Oluşan nitrürlerin katkısıyla, su vermeden sonra sert kabuk genellikle karbürlemeden daha düşük sıcaklık ve daha az bir sürede elde edilir. Karbon oranı % 0,25'den az olan çelikler dışında, orta karbonlu çelikler de (% 0,35–0,50) karbonitrürlenebilmektedir. Böyle bir ortamda östenitleyip su verme, yeteri kadar tok bir çekirdek ve aşınmaya dayanıklı kabuğu bir arada sağlamış olmaktadır [2].

Nitrürleme (nitrürasyon): Aşınma direncinin arttırılması için uygulanan en yaygın yüzey işlemlerinden biri de nitrürlemedir. Nitrürleme, 500-550°C gibi düşük sıcaklıkta, yani demir esaslı malzemelerin ferrit faz bölgesinde uygulanan, iş parçası yüzeyinin azot ile zenginleştirildiği bir termokimyasal prosestir. Nitrürleme öncesi parçaların ısıl işlem görmesi (su verme + temperleme) ve daha sonra nitrürlenmesi gerekmektedir. Nitrürleme; toz, gaz, sıvı ve plazma nitrürleme şeklinde uygulanabilir. Nitrürleme yöntemine bağlı olarak yüzeyde, demir nitrürler ve altlığın içerdiği alaşım elementlerinin nitrürleri oluşur [14].

Borürleme: İş parçaları toz halindeki bor karbür (B_4C), aktivatör (KBF4) ve sinterlemeyi önleyici madde karışımı içinde 800–1050°C arasında yaklaşık 5 saat bekletilerek yapılmaktadır. Demir alaşımlarında meydana gelen demir borürler, nitrürlemeden daha yüksek sertliklere (1700–2000 HV) erişilmesini sağlar. Çok üstün aşınma dayanımına sahip olan tabaka genellikle 0,1 mm'den incedir. İşlem demir olmayan, örneğin titanyum ve niyobyum gibi metallere de uygulanabilmektedir [2].

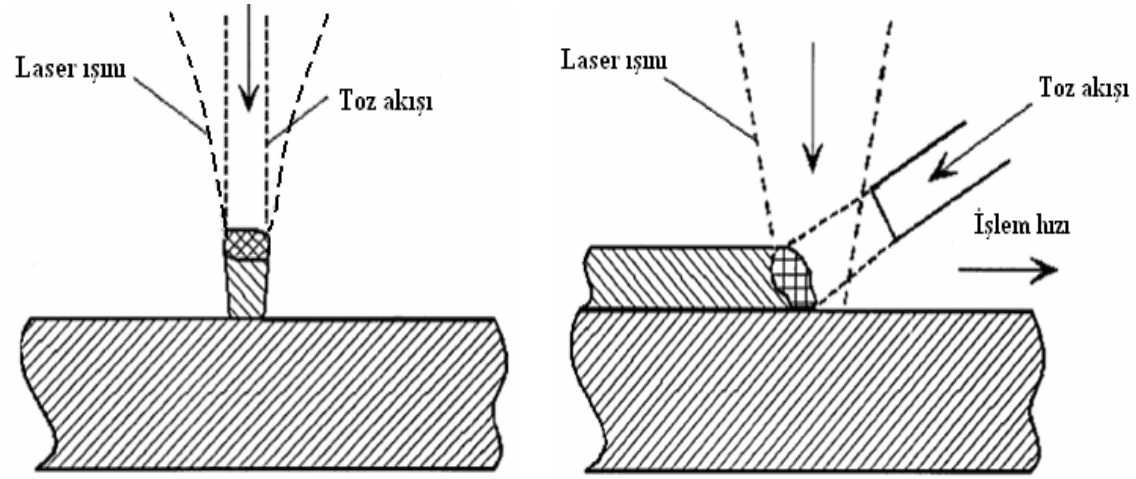
3.3. Yeni Bir Malzeme Tabakası Ekleyerek Yapılan Yüzey İyileştirmeler

Bu süreçte, ana hacimden farklı bir malzeme yüzeye yayılmıştır. Kaplama/numune ara yüzeyinde net bir sınır vardır ve kaplamanın yapışması en önemli unsurdur.

Lazerle alaşımlandırma: Bu işlemde yüksek enerjide odaklanmış lazer ışını, metal kaplamayı ve altında bulunan bir kısım numuneyi eritmekte, erime çok kısa zamanda

sadece yüzeyde oluştuğundan malzeme hacmi soğuk kalmaktadır. Erimiş yüzey bölgesiyle altındaki katı numune sınırı boyunca yüksek sıcaklık farkı oluşmaktadır. Böylelikle, hızlı su verme ve tekrar katılaşma oluşmaktadır. Alaşımlanmış elementler, atomik yüzeyde yüksek yoğunlaşma farkı veren nanometrik ölçekli kalınlıkta bu kimyasal profillerde yoğunlaşmıştır. Tüm erimiş bölge boyunca bileşim uniformdur [2].

Lazerle giydirme: Bu işlem iki şekilde yapılabilir: tozu yerine koyma, toz üfleme (Şekil 3.1). Birinci durumda, toz halindeki malzeme işlem yapılacak numune yüzeyi boyunca dağıtılır. Sonra lazer ışını toz ve numune üzerinde hareket ettirilir. Yeterli yoğunluktaki ışın ve uygun işlem hızı kullanılarak, ışının konumundaki yüzeye yakın ince bölge eritilir. Aşınmaya ve korozyona karşı direnç gibi belirli numune özelliklerini geliştirmek için kullanılır [2].



(a) (b)

Şekil 3.1. Lazerle giydirmenin şematik gösterimi. (a)Tozu yerine koyma, (b) toz üfleme [2]

İkinci durumda, toz halindeki malzeme, ince bir tüpten numune yüzeyine (lazerle giydirmenin yapıldığı) hareket eden odaklanmış lazer ışınına doğru üflenir. Her iki işlem seçeneğinde (tozu yerine koyma, toz üfleme) lazer ışını numune yüzeyinde düz bir çizgi boyunca hareket eder. Böylece eklenmiş malzemeyle dar, ince iz oluşturur. İzleri düzenleyerek istenilen alanı oluşturmak mümkündür. Sonuç olarak, eklenen malzeme numune yüzeyindeki tabakaya dâhil edilebilir ve böylece sadece aşınma direnci istenen kısmı işlenir bu suretle malzeme, zaman ve maliyet kazancı sağlanmaktadır [2].

Isıl sprey: Bu işlem; metal, seramik veya metal ve seramik tozlarının karışımını yarı-erimiş duruma ısıtmayı ve numune üstüne yüksek hızda çökeltmeye dayanmaktadır. Isıl spreyde ark, alev veya plazma spreyi kullanmaktadır [2].

Kimyasal buhar çökeltmesi (CVD): Kaplama malzemesinin yardımcı maddelerle oluşturduğu gaz halindeki bileşik, uygun sıcaklıktaki parça yüzeyinde kimyasal ayrışmaya uğrar ve gaz halindeki yardımcı maddeler dışarı atılır. Kaplama maddesi böylelikle parça üzerinde yoğuşur. Bu işlemde yüksek sıcaklığa (1000°C) ihtiyaç duyulduğundan, bu yöntem genellikle seramik esaslı numuneleri kaplamak için kullanılır. Kaplama sonrası 2300 HV gibi yüksek sertlik değerlerine ulaşılabilmektedir [2].

Fiziksel buhar çökeltmesi (PVD): PVD, vakum odası içinde yoğunlaştığında yüzeyi kaplayacak buhar oluşturularak yapılan bir işlemdir. PVD, yüksek hız çeliklerinde 500°C'den daha düşük sıcaklıklarda, diğer çeliklerde 250°C'den daha düşük sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Kaplama malzemesine bağlı olarak, PVD uygulanan kaplamalar 2800 HV'den daha sert olabilmektedir [2].

Sulu çözeltilerden metal birikmesi: Çoğu metal tuzlarının yüksek oranda suda çözünürlüğü ve sulu çözeltilerin elektriği iyi ilettiğinden dolayı metalleri akımla ana yüzeye biriktirme işleminde, sulu çözelti daima kullanılmaktadır. Akım, iyon olarak bilinen elektrikle yüklü parçacıklarla taşınır. Metal tuzu çözeltisinden metal biriktirme işlemlerinin hepsi kimyasal indirgeme reaksiyonları olarak kategorize edilmiştir. Bu reaksiyonun zıt işlemi olan, metalin çözülmesiyle çözülmüş tuz banyosunu oluşturulması, ise oksitlenmedir [2].

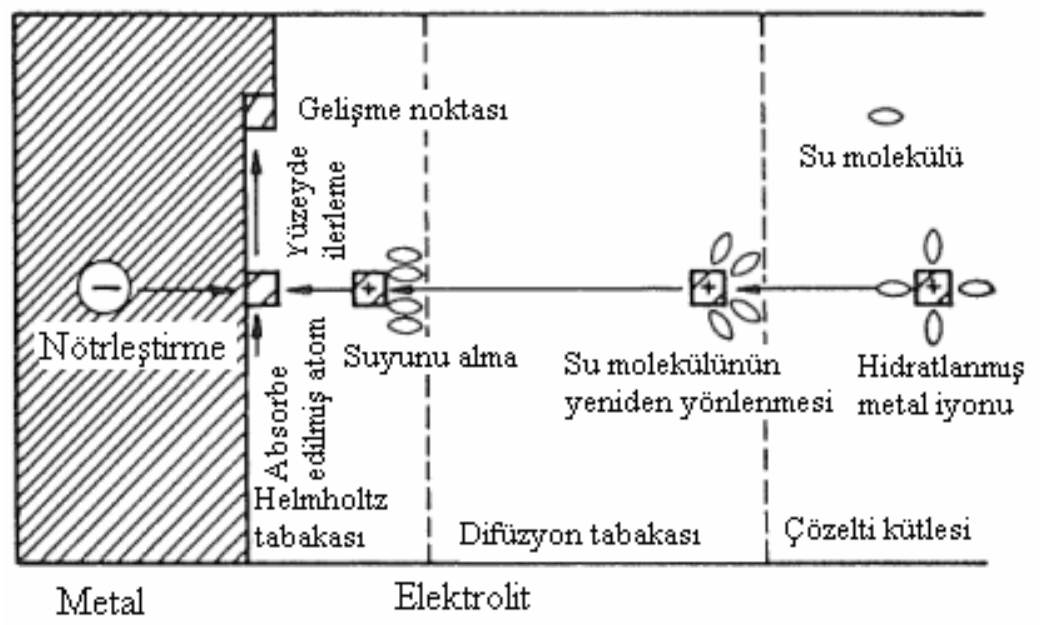
İndirgeme işlemi için gerekli elektronlar birçok kaynağın herhangi birinden sağlanabilir. Bunun için 2 temel yöntem vardır: akımsız ve akımlı.

Akımsız metal kaplama: Akımsız kaplama, elektrik akım kaynağı kullanmadan metal biriktirme işlemidir. Metal iyonlarını indirgemek için kullanılan elektronlar, çözeltideki kimyasal reaksiyon sonucunda elde edilir [2].

Akımlı metal kaplama: Akımlı metal biriktirme işlemi, metal iyonlarını katodik olarak serbest bırakmaya dayanmaktadır. Metal tuzu çözeltisinin elektrolizi boyunca, katottaki ana metale metal iyonları indirgenir. Ana metal elektron kaynağı olarak, anotta elektronlar

için bir alıcı gibi davranır. Gerekli elektronlar dış akım kaynağından sağlanır. Katottaki tüm kimyasal reaksiyon $Me^{z+} + ze \rightarrow Me$ şeklindedir.

Sulu çözeltiden katodik metal biriktirme durumunda, metal çoğunlukla basit hidrat (sulu bir eriyik, bir veya daha çok su molekülüyle kristal oluşturan bileşim) iyonu olarak bulunmaz, anyonik kompleks olmayı tercih eder. Hidrat metal iyonu nötr olurken birçok adım izlemektedir (Şekil 3.2). Metal iyonu difüzyon tabakasına geçerken, iyonu çevreleyen su molekülleri yeniden yönlenir. Sonra, metal iyonları Helmholtz tabakasının içine geçtiğinde, metal iyonundan su moleküllerini ayırmak içi gerekli potansiyel değişim oldukça yüksektir. Bunun için katot yüzeyinde gerçek nötrleştirme işlemi oluştuğunda, sadece basit bir suyu alınmış (dehydration) iyon içerir.



Şekil 3.2. Katodik metal biriktirme işleminin şematik gösterimi [2]

Metal iyonu öncelikle katot yüzeyine çekilir (absorbe edilir). Sonra yüzey boyunca gelişeceği noktaya doğru hareket eder ve metal kafesinin içine dâhil olur [2].

3.4. Nano Elmas Takviyesi

Nano elmas, sentetik yöntemlerle doğal elmasın nano boyutlu parçacık olarak elde edilmiş halidir. Nano elmas parçacıkları ortalama 4-6 nanometre boyutunda ve genelde küresel

yapıdadır. Nano elmas yüksek sertlik ve ısı iletkenliği, kimyasal kararlılığı, biyo-uyumluluğu, optik özellikleri ve elektriksel yalıtkanlığı ile eşsiz bir nano teknolojik malzemedir. Kullanıldığı alanlarda, dahil edildiği yapı veya uygulamalarına mükemmel özellikler sağlamaktadır. Nano elmas, uzay-havacılık uygulamaları, makine sanayi, otomotiv endüstrisi, metal sanayi, plastik sanayi, parlatma ve yağlama endüstrileri gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Örnek olarak nano elmas;

- Kompozit Malzeme üretiminde, yüksek sertliği ve kimyasal kararlılığı özelliğiyle metaller ile medikal protezlere sertlik, aşınma direnci ve biyo-uyumluluk kazandırılmasında,

- Yağlama Endüstrisinde, küresel yapılı, yüksek sertlik ve yüksek ısıl iletkenliği özelliğiyle mineral ve sentetik yağların yağlayıcılık özelliklerinin geliştirilmesinde,

- Parlatma Teknolojileri alanında, küresel formu ve yüksek sertlik özelliğiyle hard disk kafalarının, optik okuyucuların, metalografik numunelerin ve mermer-granit yüzeylerinin parlatılmasında,

- Plastik Teknolojileri alanında, mikron seviyesinde parçacık yapısında ve yüksek sertlikte olması ile polimer esaslı plastik malzemelerin yapısına karılarak, sertliğinin ve aşınma direncinin arttırılmasında kullanılmaktadır.

Nano elmasın tüm bu alanlarda tercih edilmesinde nano elmasın yaklaşık 316 m^2/gr olan aktif yüzey alanına sahip olması etkili olmaktadır. Böylelikle, diğer bir çok malzemeye göre dahil edildiği bünye ile daha kararlı etkileşime girmekte, özelliklerini yapıya aktarabilmektedir [1].

Nano elmas parçacıkların benzersiz bileşimi benzersiz kimyasal özellikler sağlar. Tipik bir parçacığın kimyasal bileşimi, % ağırlık olarak Çizelge 3.1’ da verilmiştir [2].

Çizelge 3.1. Tipik bir nanoelmas parçacığın kimyasal bileşimi [2]

Element	% Ağırlık
H_2O	6,00
C	76,00
H	0.33
N	9,30
O	5,90
Ca	0,56
Fe	0,14
Si	<0,01
K	<0,01
Sr	<0,01
Pb	<0,01
Mg	0,01-0,5
Al	0,01-0,5
Cu	0,01-0,5
B	0,60

Nano elmas üretim işlemi iki kademeden oluşmaktadır.

1. Patlama: Karışık patlayıcı maddelerin patlamasıyla ultra saçınımlı elmas-grafit tozları, yani ağırlıkça % 40–60 saf elmas içeren siyah toz oluşur. 3227°C'de ve 20 GPa basınçta 0,1–0,5 mikrosaniyede oluşur.

2. Elmas karışımını kimyasal temizleme: işlem sıcaklığı 230–305°C'de, ağırlıkça % 99,5 saf elmas içeren gri toz meydana getirilmektedir.

Nano elmas ekonomiktir. Sert metal kompozit kaplamalarda nano elmas uygulaması sertlik, hafiflik ve aşınma direnci ana hatlarını çizmektedir [2,15]. Nano elmasın kazandırdığı özellikler şöyle sıralanabilir:

• ürünlerin servis ömrü 2 ile 10 kat arasında artar.
• kaplama kalınlığı 2–3 kat azalır.
• sertlik artar (750–900 HV).
• aşınma direnci 5–9 kat artar.
• kaplamadaki gözeneklilik azalır ve korozyon direnci artar.
• görünüşü daha çekicidir.
• yapışmada gelişme sağlar [2,15,16].

4. AŞINMA ANALİZİ

Aşınmanın belirlenmesinde, tribolojik sistemi meydana getiren temel unsurların bilinmesi gerekmektedir. Bir tribolojik sistemde genel olarak bulunabilecek 6 temel unsurdan hepsi veya bazıları aşınma olayına etkisi olmaktadır. Bu unsurlar şunlardır:

Temel sürtünme elemanı: Fiziksel/kimyasal özellikleri ve durumu, yüzey yapısı, şekli tamamen belirli ve aşınması özel ilgi ile incelenen cisimdir.

Karşı sürtünme elemanı (aşındırıcı parça): Katı cisim, sıvı veya gaz olabilir. Karşı sürtünme elemanı ile temel sürtünme elemanı bir "aşınma çifti" oluştururlar.

Ara madde: Temel sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında katı, sıvı, gaz, buhar veya bunların karışımı şeklinde bir cisim bulunabilmektedir. Yüzey arasına girmiş kum taneleri veya aşınma esnasında yüzeylerden kopan parçacıklar da ara madde olarak düşünülebilir.

Çevre: Aşınma esnasında, kullanılan malzemenin özelliğine bağlı olarak, aşınma miktarının optimum değerde olabilmesi için oluşturulan ortamdır.

Yükleme: Etki eden yükün (kuvvetin) büyüklüğü, şekli (statik, dinamik, darbeli, titreşimli vs.), doğrultusu ve zamana göre değişimi yüklemeyi meydana getirmektedir.

Hareket: Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre izafi hareketinin cinsi (kayma, yuvarlanma, çarpma vs.), büyüklüğü, doğrultusu ile verilen bir etkendir. Aşınma miktarının belirlenmesinde hareket süresi belirli bir unsurdur [8].

4.1. Aşınma Mekanizmaları

Bir tribolojik sistem içerisinde oluşan aşınma olayına mikro düzeyde bakıldığında beş çeşit aşınma mekanizmasından söz edilmektedir.

1. Adheziv aşınma
2. Abrasiv aşınma
3. Tribooksidasyon (reaksiyon tabakası aşınması)
4. Yüzey bölgesi yorulması
5. Ablativ aşınma

Bir tribolojik sistemde bu mekanizmaların hepsi veya birkaçı bir arada bulunabilmekte, bu sebeple aşınma olayının bir sistem bütünlüğü olmaktadır [8].

Adheziv aşınma: Aşınma bileşenlerinin en önemlilerinden biri olan adhezyon, sürtünme elemanlarının temas yüzeylerinde yüksek mekanik gerilmeler sonucu mikro kaynak bölgelerinin oluşmasına dayanmaktadır.

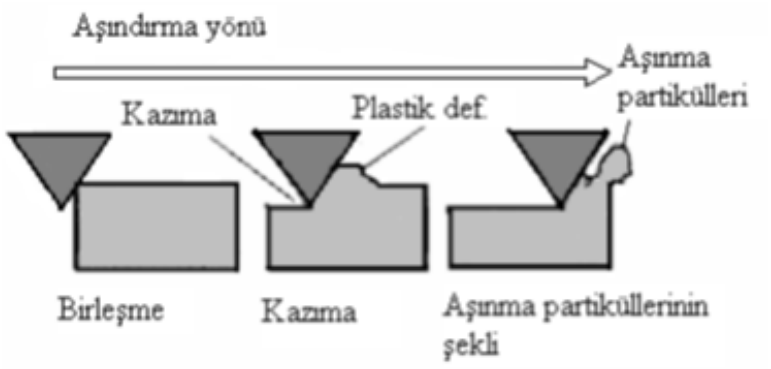
Parçanın sahip olduğu yüzey pürüzlülükten dolayı, gerçek temas yüzeyi geometrik yüzeyin çok küçük bir parçası olmakta, bunun sonucunda mikro-temas bölgelerindeki mekanik gerilmeler büyük boyutlara ulaşmaktadır. Çoğu zaman malzemenin akma sınırını aşan bu gerilmeler, plastik deformasyona yol açmaktadır. Ayrıca bu gerilmeler, parça yüzeyindeki oksit tabakasının parçalanması sonucu ana eleman ile karşı eleman arasında oluşan van-der-waals kuvvetleri, mikro soğuk kaynaklaşmalara neden olmaktadır. Karşılıklı köprüler şeklinde olan bu kaynaklaşmalar, sistem içinde var olan kayma hareketleri ile kırılır ve böylelikle, hızlı bir malzeme kaybına yol açmaktadır. Aşırı yükleme veya yağlama yetersizliği sonucu meydana gelen "yatak sarma" adı verilen olay adheziv aşınmaya iyi bir örnek olmaktadır.

Adheziv bağın oluşumu malzemenin yüzey sertliğinden etkilenmektedir. Yüzey sertliği azaldıkça yük altındaki deformasyon artmakta, yüzey film tabakası daha kolay hasar görmektedir. Bu sonuç yüzeyler arasındaki adheziv bağın güçlenmesine yol açmaktadır [8].

Abrasiv aşınma: Sürtünme çiftlerinden daha sert olanının karşı sürtünme elemanı içerisine yüzey pürüzlülüğü mertebesinde girerek, izafi hareket sırasında yüzeyi çizmesi ve yüzeyden mikro talaşlar kaldırması olayıdır. Aynı etkiler karşı sürtünme elemanı yerine, daha önce elemanlardan kopan aşınma parçacıkları tarafından da yapılabilmektedir. Bu nedenle, genellikle uzaklaştırılmayan soğuk deformasyon sonucu sertleşmiş olan aşınma

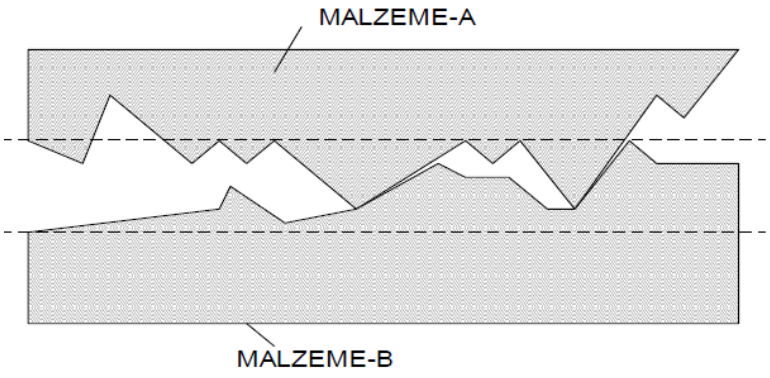
parçacıkları veya metalik /seramik çevre tozlarından korunmayan teknik sistemlerde çok yüksek bir aşınma beklenmektedir. Abrasiv aşınma mekanizmasının diğer aşınma mekanizmalarından farkı, kısa sürtünme süreçlerinde bile etkisini göstermesidir. Temas eden sürtünme yüzeylerinin sertlik ve elastikiyet modüllerinin farklılığı gibi, aynı sertlikte olsalar bile temas yüzeylerinin şekilleri arasındaki fark da (eğrilik yarıçapı, açı vs.) yüzey üzerindeki mekanik yırtılmalara yol açmaktadır [8].

Abrasiv aşınma, kesilme, kazınma ve tekrarlanan deformasyon gibi yüzeyi tahrip edilmesi sonucu meydana gelmektedir. Abrasiv aşınma için en önemli şart, sürtünme sırasında, abrasivin sertliğinin aşınma malzemesi sertliğinden daha yüksek olması gerekmektedir. Abrasiv aşınma şematik olarak gösterimi Şekil 4.1'de verilmektedir [11].

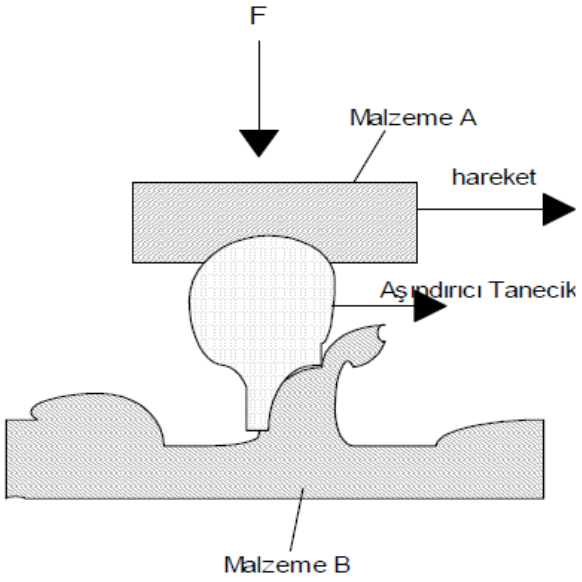


Şekil 4.1. Abrasiv aşınma şeması [11].

Bu aşınma türünde sert ve keskin parçacık, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Ayrıca bu aşınma, iki elemanlı ve üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Şekil 4.2 ve 4.3).



Şekil 4.2. İki elemanlı abrasiv aşınma [11].



Şekil 4.3. Üç elemanlı abrasiv aşınma [11].

İki elemanlı abrasiv aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbiriyle etkileşimleri sonucu olmaktadır. Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise, aşınan ve aşındıran malzeme arasında serbest ara malzeme olmakla birlikte, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilmektedir. Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrasiv veya adheziv olarak başlayıp, üç elemanlı abrasiv olarak devam etmektedir. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro taşlar ve parçalanmış oksit parçaları üçüncü eleman (ara malzemeyi) olarak görev yapabilmektedir. Serbest haldeki mikro talaş parçaları, genellikle ana malzemeden daha sert oldukları için aşınmayı hızlandırmaktadır [11].

Tribooksidasyon (reaksiyon tabakası aşınması): Tribooksidasyon, sürtünme çiftlerinin temas yüzeylerinde tribolojik zorlanmalar sonucu oluşan reaksiyonlardır. Bu reaksiyonlar oksijenle sınırlı olmamakla birlikte, kükürt, klor ve fosfor gibi elementlerin sürtünme oksidasyonu ile hızlandırılan reaksiyonları da tribooksidayon içinde incelenmektedir. Tribooksidasyon, abrasiv aşınmanın ön plana çıkmadığı sürtünme şartlarında, aşınma miktarını artıran en önemli bileşendir. Özellikle kimyasal maddelerin bulunduğu ortamlarda çalışan makine elemanlarının yüzeyleri, bu maddelerle reaksiyona girerek ince ama sert bir oksit veya buna benzer bir tabakanın oluşmasına neden olurlar. Ayrıca, yağların içinde bulunan bazı maddeler nedeni ile de aynı sonuç ortaya çıkmaktadır.

Değişken yüke maruz yüzeylerde bu sert tabaka kırılır ve sert parçacıklar düşerek aşınmayı meydana getirmektedirler. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyonun sonunda tekrar sert bir tabaka oluşur ve olay bu şekilde devam etmektedir [8].

Yüzey bölgesi yorulması: Bu aşınma tipi, yüzey bölgesine tekrarlı olarak tribolojik yüklemeye maruz bırakıldığında ortaya çıkmaktadır. Tribolojik zorlanmalar sonucu mekanik gerilmeler meydana gelir, bu da zamana veya yüzey bölgesine göre tekrarlı bir sürtünme olayı, mikro çatlakların oluşmasına veya büyümesine neden olmaktadır. Sonuçta yüzeyde aşınma parçacığı olarak malzeme kopmasına yol açar. Bu özelliğinden dolayı yorulma aşınması, birçok aşınma prosesine katılan bir bileşendir. Uygulamada bu olay, özellikle dişli çarkların çalışan yüzeyleri, bilyeli rulman yatakları ve kam mekanizması ile yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde, çok küçük çukurların (Pitting) meydana gelmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır [8].

Ablativ aşınma (Difüzyon): Sürtünme sırasında açığa çıkan ısı sonucu yüzey sıcaklığının yükselmesi durumunda, sürtünme yüzey bölgesinden atom veya moleküllerin çevreye yayılması ve karşı sürtünme elemanı içine girmesi (difüzyon) şeklinde oluşan bir aşınma mekanizmasıdır [8].

Malzemelerin aşınmaya direncini ölçmek için malzemenin özelliklerine göre tasarlanmış birçok aşınma ölçme sistemleri bulunmaktadır [17].

Malzemenin türü aşınma direncini belirlerken, malzemenin üretim şekli de aşınma direncini etkilemektedir. Parça üretim aşamasındaki parametreler malzemenin aşınma direncini arttırabilmektedir. Sinterleme parametreleri malzeme aşınma direncini etkilemektedir [18]. Yine örnek olarak, toz metalürjisi yöntemiyle üretilen parçanın presleme basıncı arttırılarak parçanın yoğunluğu artmakta, buna paralel olarak aşınma direnci de artmaktadır [19].

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Malzeme

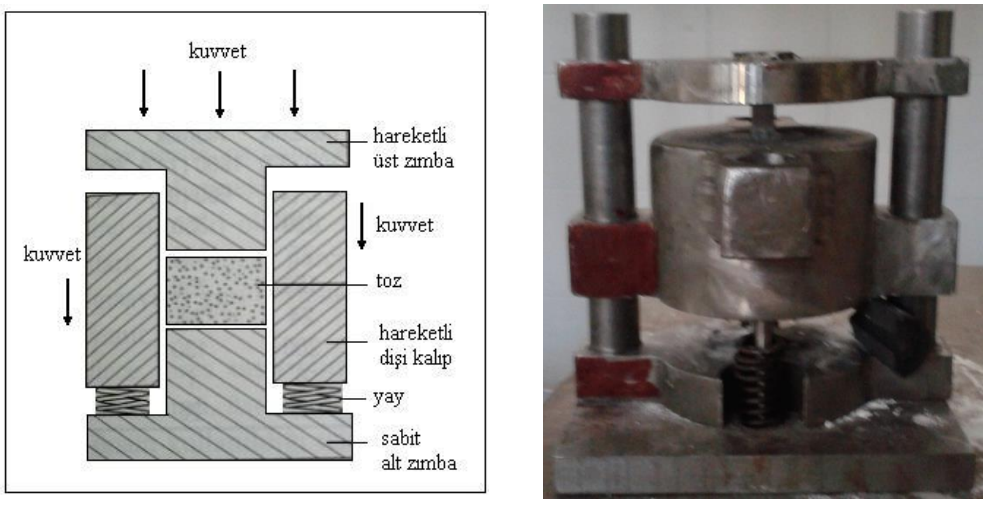
Çalışmada, Toz Metal Tic. ve San. A.Ş tarafından temin edilen, 69.02.53, 69.02.507 ve 69.02.510 adlı 3 farklı metal toz karışımı kullanılmıştır. Bu toz karışımların, toz ve yağlayıcı bileşenleri Çizelge 5.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan metal tozlarının bileşenleri

Toz kodu	Baz toz	% C	% Cu	% Ni	% Mo	% Mn	% Zn St	%H,Wachs
69.02.53	Astaloy Mo	0,63-0,77	1,80-2,20	***	1,35-1,65	****	0,72-0,88	***
69.02.507	DİST AB	0,15-0,25	1,35-1,65	1,58-1,93	0,45-0,55	0,45-0,55	**	0,81-0,99
69.02.510	DİST AB	0,45-0,55	1,32-1,62	1,55-1,89	0,44-0,54	0,45-0,55	***	0,81-0,99

5.2. Presleme

Tozlar Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Laboratuvarı'nda, 150 tonluk pres makinasında preslenmiştir. Kalıp olarak yüzer dişli kalıp kullanılmıştır. Yüzer dişli kalıpta, sıkıştırmada alt zımba sabittir. Üst zımbanın hareketinden oluşan sürtünme kuvvetinden dolayı dişi kalıp alt zımbaya doğru hareket eder. Böylece çift hareketli sıkıştırma etkisi sağlar (Resim 5.1).

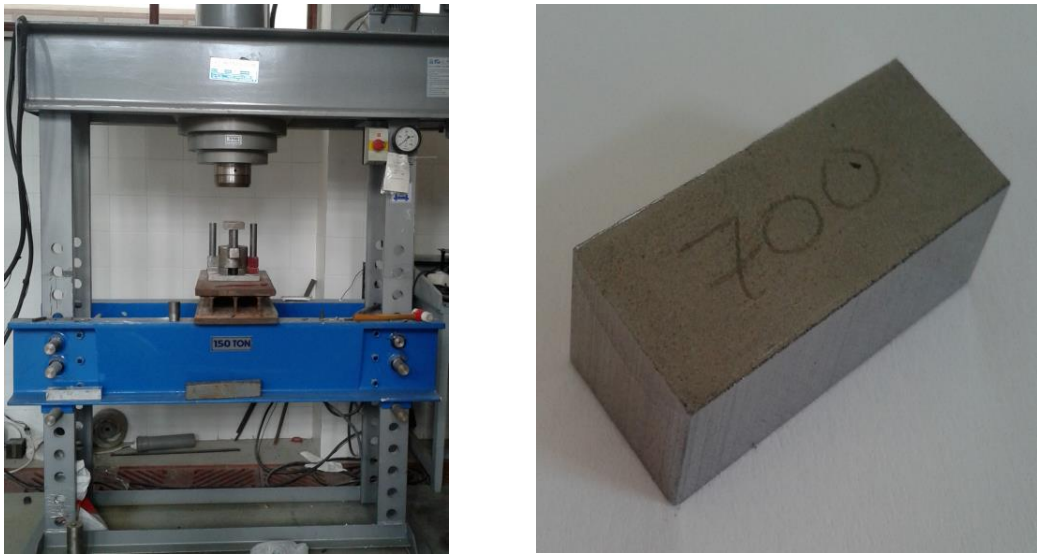


(a) (b)

Resim 5.1. Yüzer dişli kalıbın (a) şematik [11], (b) deneydeki görüntüsü.

Kalıptan çıkan numunelerin taban alanı 32x12 mm olup, yüksekliği ayarlanabilmektedir. Yüksekliği 10 mm olması belirlenen numunelerin, Astaloy Mo ve Distaloy AB tozlarının yoğunluk basınç eğrilerinden, sıkıştırma oranları ve kalıba konulması gereken toz miktarları hesaplanmıştır.

Hassas terazide sıkıştırma oranına göre miktarı ayarlanan tozlar, 32x12x10 mm boyutlarında olacak şekilde 420 MPa, 550 MPa ve 700 MPa olmak üzere 3 farklı basınçta preslenmiştir. Böylece 3 farklı gözenek miktarlarına sahip numuneler elde edilmiştir. Sonuçta, 3 farklı toz ve 3 farklı basınçta ayrıca diğer çalışmalarda da kullanılması için 4 takım olmak üzere toplam 36 (3x3x4) adet numune hazırlanmıştır (Resim 5.2).



(a) (b)

Resim 5.2. (a) Deneylerde kullanılan pres makinası, (b) preslenmiş numunenin görüntüsü

5.3. Sinterlenme

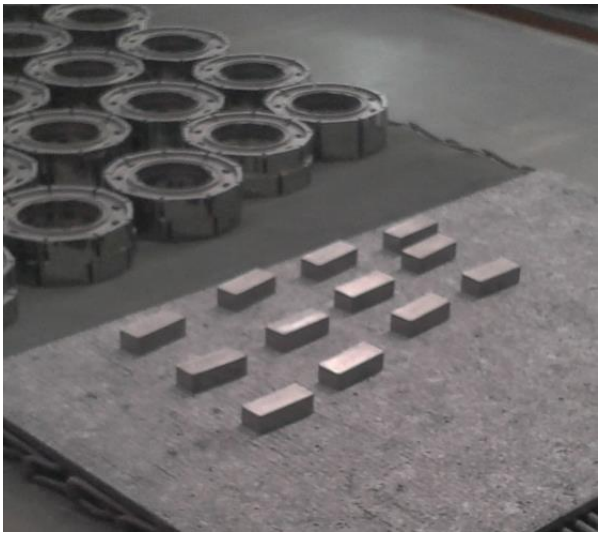
Preslenmiş numuneler Toz Metal Tic. ve San. A.Ş de sinterlenmiştir. Öncelikle, 3 tozun bileşenindeki C miktarına göre sinterleme koşulları belirlenmiştir. 69.02.53 ve 69.02.510 tozlarının sahip oldukları C oranlarına göre sinterleme koşulları aynı kategoride olup, 69.02.507 kodlu tozun sinterleme koşulları farklı kategoridedir. Çizelge 5.2'de sinterleme koşulları gösterilmiştir. Sinterlemenin uygulandığı fırınının resimleri de Resim 5.3'te görülmektedir.

Çizelge 5.2. Numunelerin sinterleme koşulları

	69.02.53	69.02.507	69.02.510
Maks. Sinterleme Sıcaklığı (°C)	1120	1120	1120
Gaz Karışımı	Metan %0,6 C	Metan %0,4 C	Metan %0,6 C
Toplam Süre (saat)	2	2,5	2
Sinterleme Süresi (dk)	20	25	20







Resim 5.3. Sinterleme fırını ve sinterlenecek numunelerin görüntüleri

Koruyucu atmosfer olarak Metan yani doğal gaz kullanılmıştır. Doğalgaz fırının içerisindeki gaz jeneratöründe CO ve H_2 olarak ayrıştırılmıştır. Malzemenin içerisindeki karbon oranına göre bu gaz karışımı hava ile karıştırılarak fırına verilmiştir.

$$CH_4 + \text{Hava} \rightarrow CO + H_2 \text{ (Atmosfer gazı)} \quad (5.1)$$

Sinterleme sırasındaki reaksiyon ise:

$$CO + H_2 + FeO \rightarrow CO_2 + H_2O + Fe \quad (5.2)$$

Her parça aynı atmosfer reaksiyonu maruz kalmış olup, sadece malzeme içerisindeki karbon miktarına göre karışımdaki hava miktarı arttırılıp azaltılmıştır. Burada temel amaç, atmosfer gazı içerisindeki karbon gazını malzeme içerisindeki karbon ile aynı seviyede dengeleyip parçada karbürizasyon ya da dekarbürizasyona sebep olmamaktır.

5.4. Yoğunluk Ölçümü

Sinterleme sonrası numunelerin porozite değerlerini bulmak için Arşimet Prensibi yöntemi kullanılmıştır. Porozite deneyi Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Öncelikle hassas terazide numunelerin kuru ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra bir kaba saf su konularak hassas terazide ağırlık sıfırlanmış, numune suyun üst yüzeyine yakın olacak şekilde askıda tutularak tamamen batırılmıştır. Numunenin suya batırılmasıyla kaptaki su yükselmiş ve böylelikle teraziye numune hacmi kadar su ağırlığı eklenmiş olmuştur. Saf suyun yoğunluğu 1 g/cm^3 olduğundan artan suyun ağırlığı numunenin hacmine eşit olmuştur. Buradan, numunelerin yoğunlukları hesaplanmıştır. Porozite= $\frac{\rho_g}{\rho_t} x100$ formülü ile hesaplanmıştır. ρ_t teorik yoğunluk olup, yaklaşık değer olarak 7,8 g/cm^3 alınmıştır.

5.5. Makro Sertlik

Kaplanmamış numunelerin sertlik deneyleri Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Öncelikle Vickers mikro sertlik deneyi yapılmaya çalışılmıştır. Fakat numunelerin gözenekli olmasından dolayı mikro sertlik değerinde

sağlıklı sonuçlar alınamamıştır. Bu nedenle makro sertlik deneyi Bulut Marka Test cihazında Rockwell A test metodu (HRA) kullanılarak yapılmıştır. Deney, 10 kg ön yük toplam 60 kg yüklü elmas koni uç kullanılarak yapılmıştır (Resim 5.4). 36 numunenin her birinde, aynı yüzeyinin 3 farklı yerinden makro sertlikleri ölçülmüş, değerlerin ortalaması alınmıştır.



Resim 5.4. Sinterlenmiş numunelerin makro sertlikleri ölçümü görüntüleri

5.6. Elmas Nano Parçacık Takviyeli Elektrolitik Krom Kaplama

Bulgaristan Bilim Akademisinde (BAS) numunelere elmas nano parçacık takviyeli krom kaplama yapılmıştır. Buradaki "Institute of Metal Science, Equipment and Technologies" bünyesinde çelik parçalar üzerine elektrokimyasal kaplama tekniği ile elmas nano parçacık takviyeli krom ve nikel kaplama çalışmaları yapılmakta ve bu konuda önemli tecrübeye sahiptirler.

Numuneler galvanizasyon yöntemi de denilen elektrolitik süreç yöntemiyle kaplanır. Bu yöntemle sinterlenmiş numunelerin yüzeyi üzerine krom kaplanmıştır. Elektrolitik kaplama sürecin parametreleri,

Akım yoğunluğu: 45 A/dm^2
Sürecin süresi: 45 dakika

Elektrolit sıcaklığı: 50°C
Anot: Kurşun

olarak belirlenmiştir. Elektrolit, CrO_3 - 220 g/l ve H_2SO_4 - 2.2 g/l katkılı geleneksel asit elektrolittir. Elektrolite, sulu süspansiyon şeklinde 25 g/l konsantrasyonlu elmas nano parçacık ilave edilmiştir.

Kaplamaya hazırlık süresi boyunca numuneler okside olmuş olup, kaplamadan önce oksit tabakası kaldırma işlemleri yapılmıştır. Oksit tabakası kaldırma işleminde, numunelere 45 dakika boyunca 950°C'de hidrojen ile indirgeme gerçekleştirilmiştir. Kaldırma işleminden sonra kaplama yapılmaya çalışılmış, fakat numunede kısmen kaplama olduğu görülmüştür. Bunun üzerine numunelere güçlü mineral asit uygulanmış, kaplamada iyi sonuç elde edilmiştir.

Nano elmas parçacıkları patlatma sentez ile elde edilmiş ve sonrada saflaştırılmıştır. Rusya'da Bilimsel ve Üretim Merkezi "Altai" firmasında üretilen bu parçacıkların, en büyük tane boyutu 60-65 nm olup, ortalama tane boyutu ise 6 nm'dir. Bu parçacıklar, bir su süspansiyonu olarak, elektrolite eklenmiştir. Aktif edilmiş nano elmas çözeltisi eklendikten sonra, elektrolitin sürekli enerjik karıştırma ile elektrokimyasal işlem gerçekleştirilmiştir.

5.7. Kaplanan Numunelerin Mikro Sertlik Değerlerinin Ölçülmesi

Kaplanan numunelerin mikro sertlik değerlerinin ölçümü Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi laboratuvarında MATSUZAWA marka mikro sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Mikrosertlik ölçümünde baskı yükü 1000 gr uygulanmış, fakat batmadan sonraki mikroskop görüntüsüne (x40) bakıldığında, bu yükün kaplamayı çatlattığı görülmüştür. Yük azaltılarak yapılan birkaç denemeden sonra, 50 gr belirlenmiştir. 9 adet numunenin 50 gr yük altında mikro sertlik sonuçları alınmıştır. Deneylerde kullanılan cihazın resmi Resim 5.5' te verilmiştir.



Resim 5.5. Kaplanmış numunelerin mikro sertlikleri ölçümü görüntüleri

5.8. Aşınma Deneyi

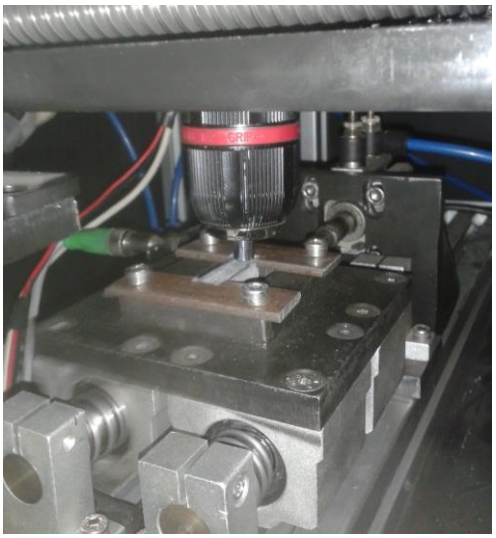
Numunelerin aşınma deneyi Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda Intecro firmasında özel olarak imal ettirilmiş olan Pin on plate aşınma ölçüm cihazında yapılmıştır.

Aşınma deneyi 1,4 MPa basınç altında 9 mm/sn hızla 300, 500 ve 600 periyotta (strok) yapılmıştır. Aşındırıcı malzeme olarak, ~1300 HV sertliğinde 6 mm çapında 50 mm boyundaki sert metal silindirik çubuk kullanılmıştır.

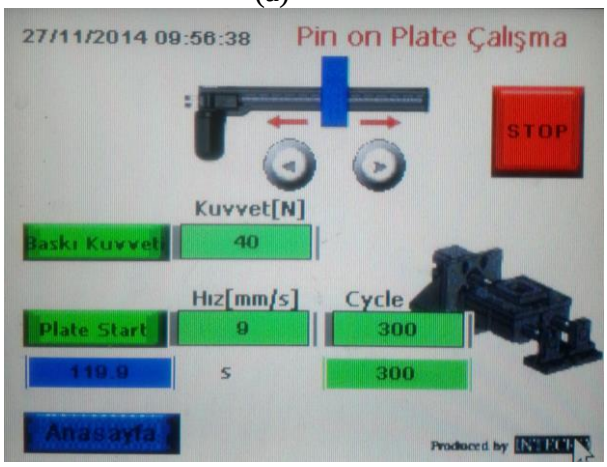
Aşınma deneyinden önce kompresör çalıştırılmıştır. Hassas terazide numunelerin ve aşındırıcı malzemenin ağırlık değerleri ölçülmüş, aşındırıcı malzeme olan sert metal silindir çubuk cihaza takılmış ve numune hazneye yerleştirilerek sabitlenmiştir. Komparatör ile numunenin aşınmaya maruz kalacak olan yüzeyinin hareket çizgisi eksenine paralelliği kontrol edilmiştir. Aşınma cihazının ekranından deney parametreleri girilerek cihaz çalıştırılmıştır. Belirtilen parametrelere göre yapılan aşınma sonunda, numune ve aşındırıcı malzeme hazneden çıkartılarak, aşınma sonucu kalan partiküllerden temizlenmiştir. Numune ve aşındırıcı malzeme hassas terazide ölçülerek, ağırlık değerleri gr cinsinden alınmıştır. Bu işlem her numune ve periyot için tekrarlanmıştır. Resim 5.6'da cihazın ve kullanılan yardımcı ekipmanların resimleri görülmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Resim 5.6. (a, b) Aşınma test cihazı,(c)ekran görüntüsü ve (d, e)yardımcı cihazların görüntüleri

5.9. Yüzey Pürüzlülüğünün Belirlenmesi

Kaplanan Numunelerin Aşınma Öncesi ve Sonrası Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda bulunan Taylor-Hobson marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazında yapılmıştır. Ölçümler, numunenin yan yüzeyinin 3 farklı yerinden 0,80 mm mesafe üzerinden alınıp, bu 3 değerin ortalaması alınmıştır (Resim 5.7).



Resim 5.7. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı görüntüleri

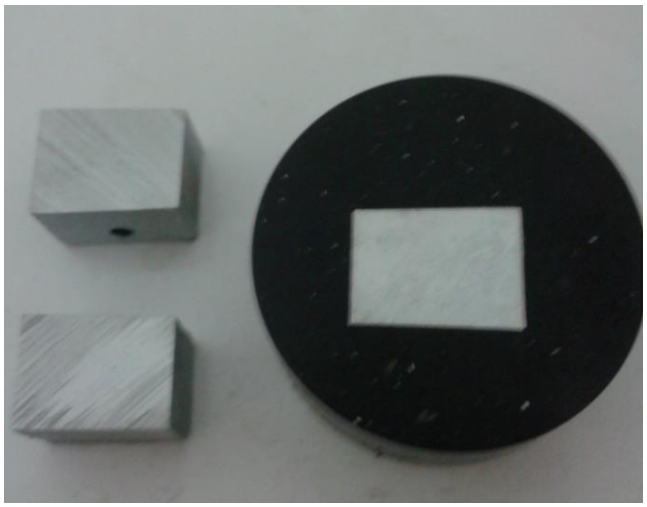
5.10. Numunelerin Kesimi, Bakalite Alınması, Parlatılması, Asit ile Dağlama

Kaplanan numunelerin kaplama kalınlık değerlerini ölçmek ve kaplamanın ana malzemeye yapışmasını incelemek amacıyla numuneler, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme ve Metalürji Mühendisliği Laboratuvarı'nda, üç parçaya kesilmiştir. Kesme işlemi solüsyonlu su soğutma ünitesi kullanılarak, ATM Brillant 250 numune kesme cihazında yapılmıştır (Resim 5.8).



Resim 5.8. Numune kesme cihazı

Kesilen numunelerden birisi alınarak Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda, Struers marka bakalit presinde bakalite alınmıştır. Cihaza numune konulduktan sonra reçine eklenmiş, daha sonra cihaz 6 dakika, 180^{o}C ve 150 bar basınca ayarlanmıştır (Resim 5.9).



Resim 5.9. Kesilmiş ve bakalite alınmış örnek numune

Mikroskoptaki incelemeler için bakalite alınan numunelere zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Bu işlemler için aynı laboratuvardaki Struers marka zımparalama ve parlatma cihazı kullanılmıştır (Resim 5.10).



(a) (b)

Resim 5.10. (a) Bakalite alma, (b) parlatma cihazı

Kaplama kalınlığının SEM de görülememesi sebebiyle, bir adet numuneye dağlama işlemi yapılmıştır. %3 Nitrik asit (HNO_3) ve %97 Alkol (CH_3OH) konularak nital karışımı hazırlanmış, bakalite alınmış numune karışıma konulmuştur. Numunenin parlak yüzeyinde matlaşma görülene kadar numune karışımın içinde bekletilmiştir. Dağlama işleminden sonra, numune derhal bol su ile yıkanmış ve kurutulmuştur. Mikroskopta numunenin dağlama durumuna bakılmış ve numuneden görüntüyü net bir şekilde alana kadar dağlama işlemi tekrarlanmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

Hazırlanan numunelere ait kodlama ve özellikler Çizelge 6.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Deney numunelerinin kodları ve özellikleri

Toz kodu	69.02.53			69.02.507			69.02.510		
Presleme basıncı (MPa)	420	550	700	420	550	700	420	550	700
Numune kodu	A420	A550	A700	D2420	D2550	D2700	D5420	D5550	D5700

Numune kodlama yöntemi aşağıda detaylandırılmıştır.

69.02.53 için,

A XXX
- Presleme basıncı
- Astaloy Mo

69.02.507 ve 69.02.510 için ise,

D X XXX
- Presleme basıncı
- Malzemedeki %C içeriği
- DİST AB

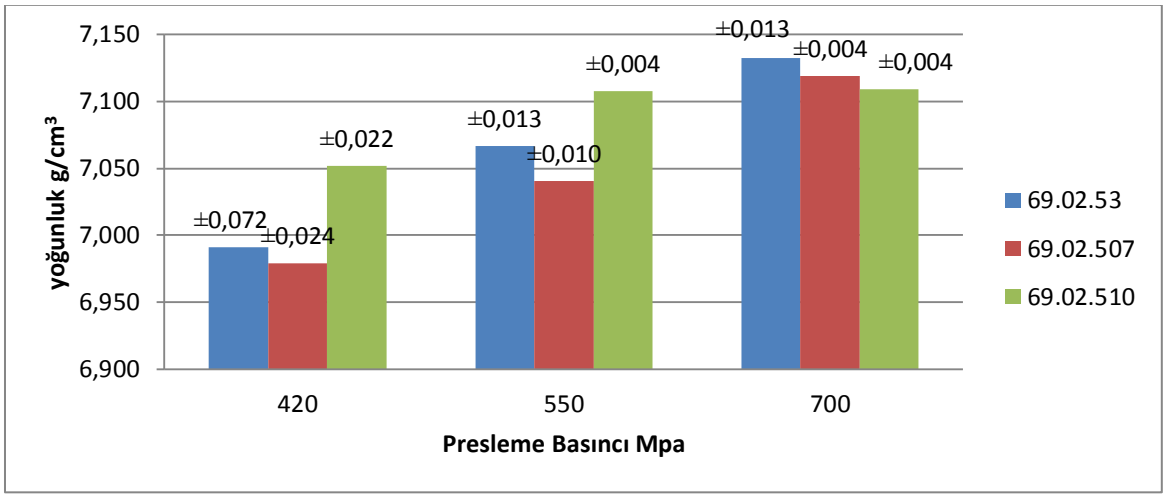
6.1. Porozite ve Makro Sertlik Sonuçları

Numunelere kaplama öncesinde porozite ve makro sertlik testleri uygulanmıştır. Daha sonra aynı numune kodlu 4 numunenin ayrı ayrı yoğunluk ve makro sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Bu işlem, 9 numune kodu için de tekrarlanmıştır.

Numunelerin yoğunluk(ρ_g), standart sapma ve porozite değerleri Çizelge 6.2' de verilmiş, sonuçların grafik olarak gösterimi de Şekil 6.1'de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Deney numunelerinin yoğunluk ve porozite değerleri

Numune Kodu	Yoğunluk (ortalama) g/cm^3	Standart Sapma(±)	Porozite %
A420	6,991	0,0720	0,896
A550	7,067	0,0130	0,906
A700	7,132	0,0127	0,914
D2420	6,979	0,0237	0,895
D2550	7,041	0,0106	0,903
D2700	7,119	0,0043	0,913
D5420	7,052	0,0219	0,904
D5550	7,108	0,0037	0,911
D5700	7,109	0,0037	0,911



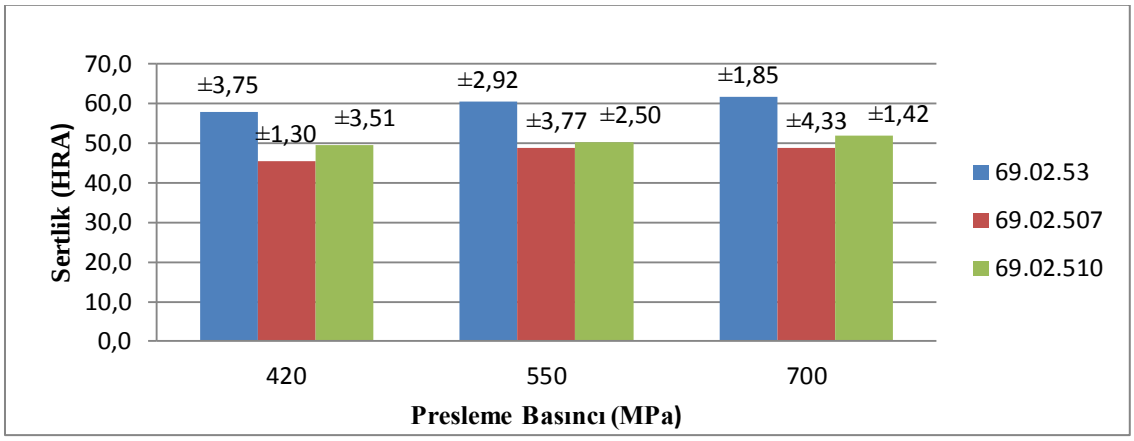
Şekil 6.1. Deney numunelerinin yoğunluk değerleri

Numunelerin yoğunluk değerleri 6,9 ile 7,2 g/cm^3 arasında olup, 3 farklı toz karışımında da presleme basıncı arttıkça, yoğunluk değerlerinin de arttığı görülmüştür. 3 presleme basıncında da, en yüksek yoğunluk değerlerine 69.02.53 kodlu toz karışımından elde edilmiş parçalarda ulaşılmıştır (Şekil 6.1). Böylelikle, presleme basıncının yoğunluk değerlerine etkisi olduğu görülmüştür.

Numunelerin ortalama HRA makro sertlik sonuçları ve standart sapmaları Çizelge 6.3'te, grafik hali ise Şekil 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Deney numunelerinin makro sertlik değerleri (HRA)

Numune Kodu	Sertlik (ortalama) HRA	Standart Sapma(±)
A420	57,8	3,75
A550	60,6	2,92
A700	61,8	1,85
D2420	45,5	1,30
D2550	48,8	3,77
D2700	48,8	4,33
D5420	49,5	3,51
D5550	50,2	2,50
D5700	51,8	1,42



Şekil 6.2. Deney numunelerinin makro sertlik değerleri

Şekil 6.2'e bakıldığında 3 farklı toz karışıma uygulanan 3 farklı presleme basıncının, numunelerdeki makro sertlik değerini etkilediği görülmüştür. Presleme basıncı arttıkça, her üç toz karışımında da az değerde artış olmuştur. En yüksek makro sertlik değerlerine, 3 farklı toz karışımından 69.02.53 (Astaloy Mo) adlı toz karışımın sahip olduğu görülmüştür. 69.02.53 adlı toz karışımına bakıldığında, % C, Cu ve Mo değerlerinin diğer iki toz karışımından daha yüksek olduğu, Ni ve Mn değerlerinin ise bulunmadığı görülmektedir. Bu değerlerin numunelerin sertlik değerlerinin belirlenmesinde etkisi olduğu görülmüştür. Ancak, Cu ve Mo'in toz metalürjisi malzemelerde shrinkage (büzülme) sağladığı, Cu 'ın aynı zamanda sıvı faz sinterleme yaptığı bilinmektedir.Ayrıca, 69.02.507'nin 69.02.510 sertlik değerlerinden biraz yüksekte olmasının sebebinin de,69.02.507'deki %Cu miktarının daha fazla olmasına bağlanmıştır.

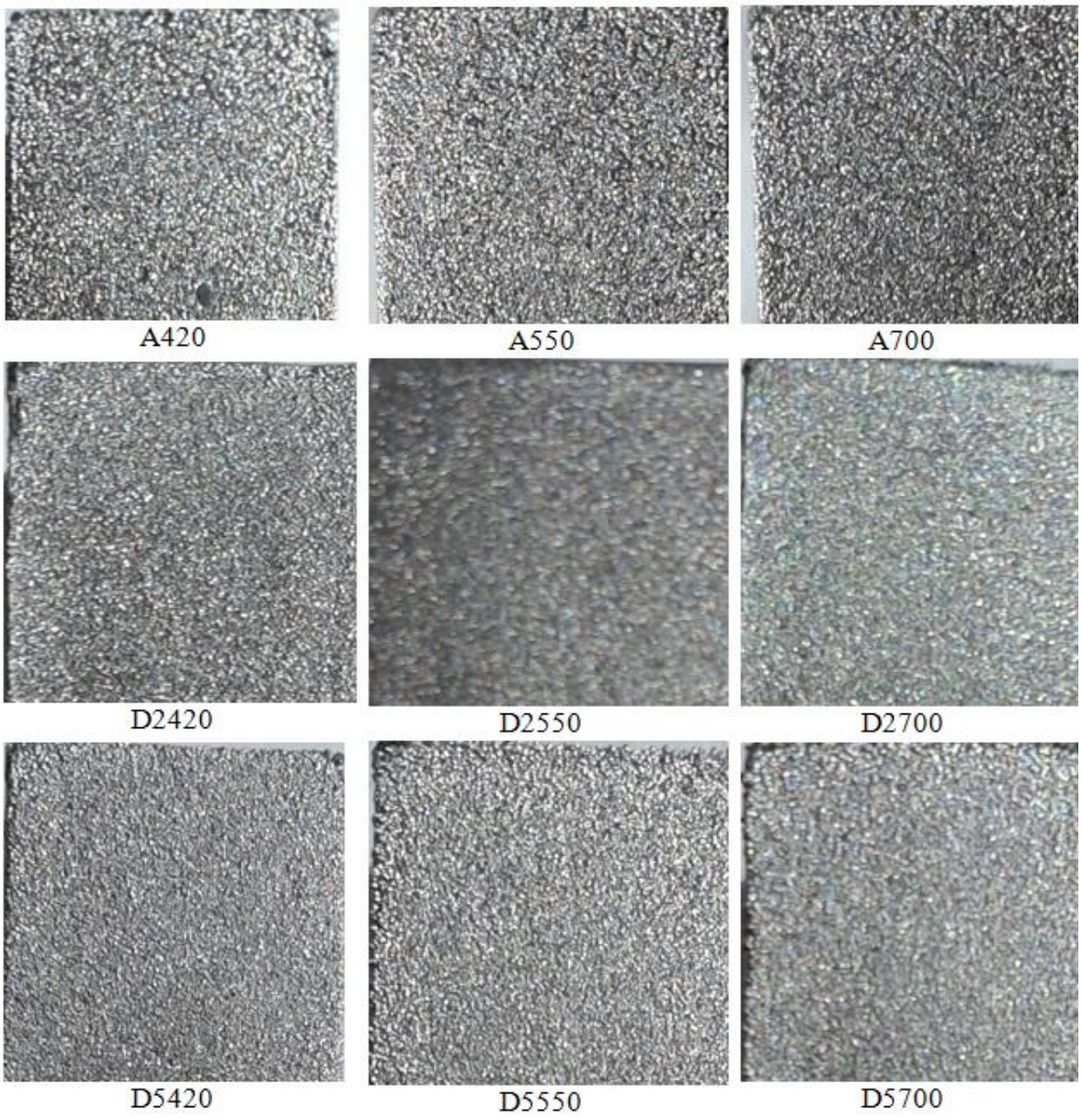
6.2. Kaplama Sonrası Numune Görüntüleri

Kaplama sonrası numunelerdeki kütle artış miktarı ölçülerek tarafımıza bildirilmiştir(Çizelge 6.4). Numunelerde oluşmuş korozyon tabakası temizlendikten sonra kaplama yapılmıştır. Bu sebeple, artan kütle miktarı hesaplanırken temizlenmiş numunelerin kütleleri esas alınmıştır. Çizelgeye baktığımızda en yüksek kaplama artışının % 1,58 ile D5550 nolu numunede, seride ise 69.02.510 toz cinsinde olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.4. Numunelerin kaplama sonrası kütle artış miktarı (%)

Numune Kodu	A420	A550	A700	D2420	D2550	D2700	D5420	D5550	D5700
Kaplama sonrası artan kütle miktarı, %	1,20	1,28	1,17	1,55	0,79	1,37	1,37	1,58	1,55

Kaplama sonrası numunelerin makro görüntüleri Resim 6.1 ve 6.2'de verilmiştir.

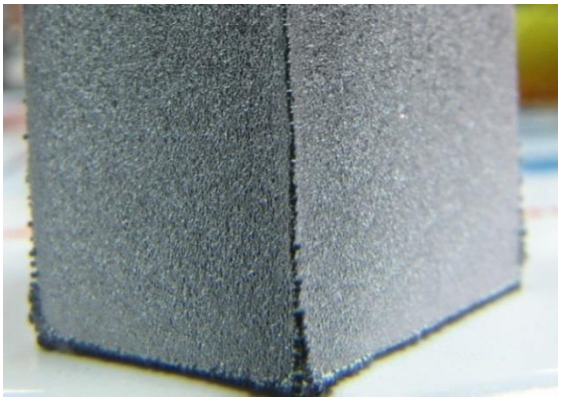


Resim 6.1. Kaplanmış numunelerin makro görüntüleri

Kaplama numunelerin tüm yüzeylerine uygulanmıştır. Kaplama öncesi yapılan makro sertlik deneyinde numunelerin bir yüzeyinde batıcı ucun izleri oluşmuştur. Kaplama sonrasında numunelere bakıldığında ise bu batıcı uç izlerinin hala durduğu gözlemlenmiştir. Böylelikle kaplamanın çukurları doldurmadığı, yüzeye eşit kalınlıkta kaplandığı, kaplamanın ana malzemenin şeklini koruduğu görülmüştür.

Kaplanan numunelerin kenar ve köşelerinde siyah renkte birikmeler olduğu görülmüştür (Resim 6.2). Ana malzemenin köşeli olduğu durumlarda kaplama sırasında bu gibi

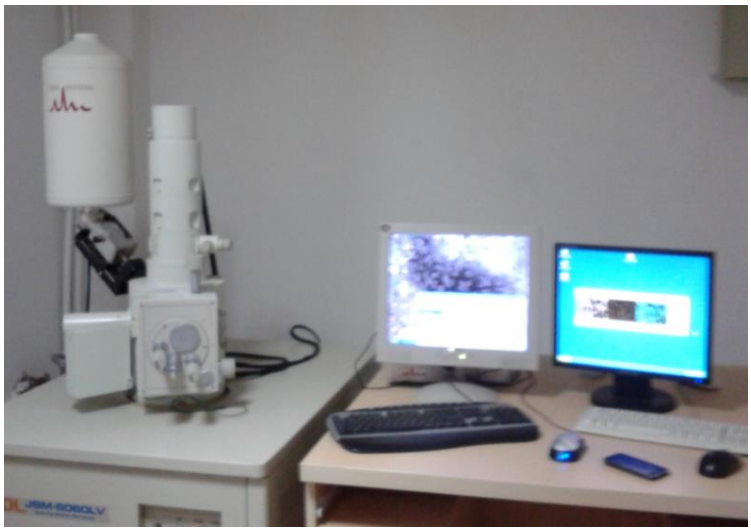
durumların ortaya çıkabildiği, hatta bu gibi kenar ve köşelerde kaplamanın daha ince olabileceği kaplama işlemini uygulayan BAS ekibi tarafından belirtilmiştir.



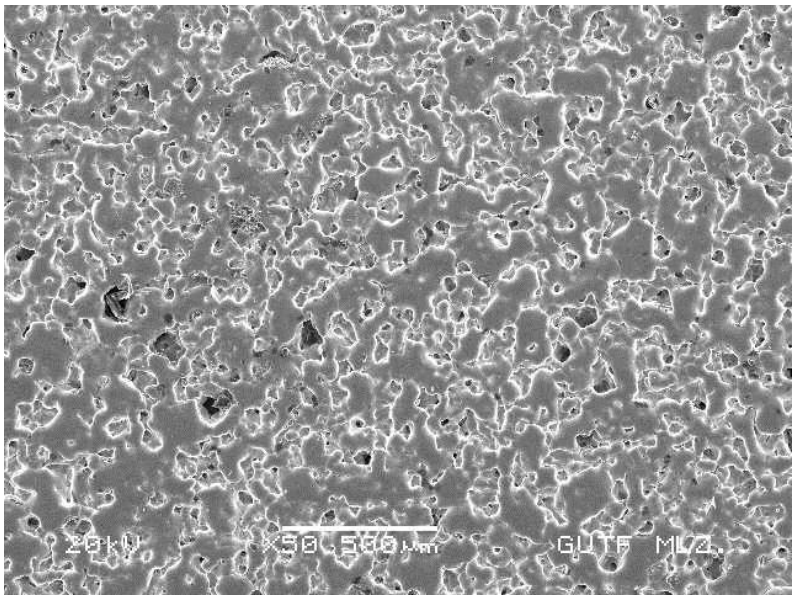
Resim 6.2. Numune kenar ve köşelerinin makro görüntüsü

6.3. SEM Mikroyapıları ve EDS Analizleri

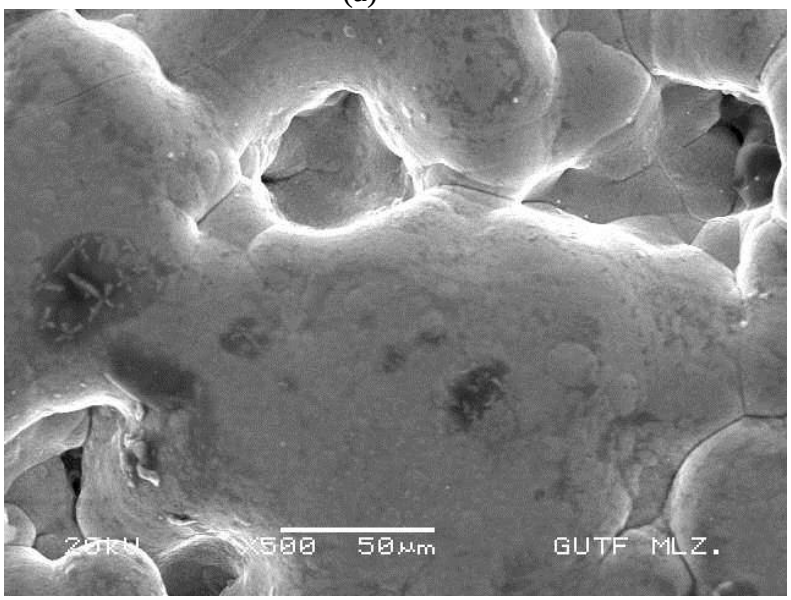
Numunelere ait SEM mikroyapıları ve bazı element analizleri, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Laboratuvarı'nda, JSM-6060LV marka cihazda (Resim 6.3) numunelerin 50 ve 500 büyütmede alınmıştır. Kaplama koşulları aynı olduğu için beklendiği gibi SEM fotoğrafları benzer çıkmıştır. Numunelere elmas nano parçacık takviyeli krom kaplama yapıldığından, beklendiği üzere EDS sonuçlarında sadece krom (Cr) ve karbon (C) elementlerine rastlanılmıştır. Numunelerin her birinden alınan SEM ve EDS sonuçları Resim 6.4-6.12'de verilmiştir.



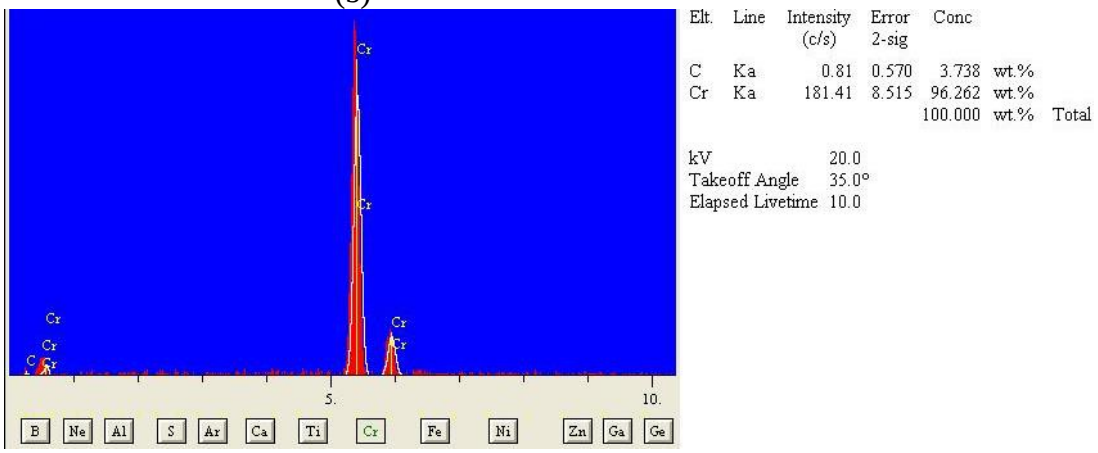
Resim 6.3. SEM-EDS cihazı



(a)

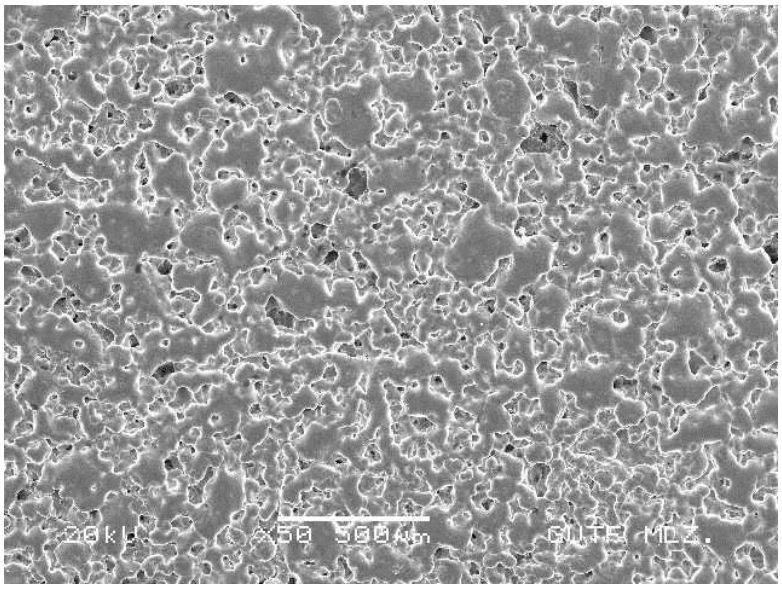


(b)

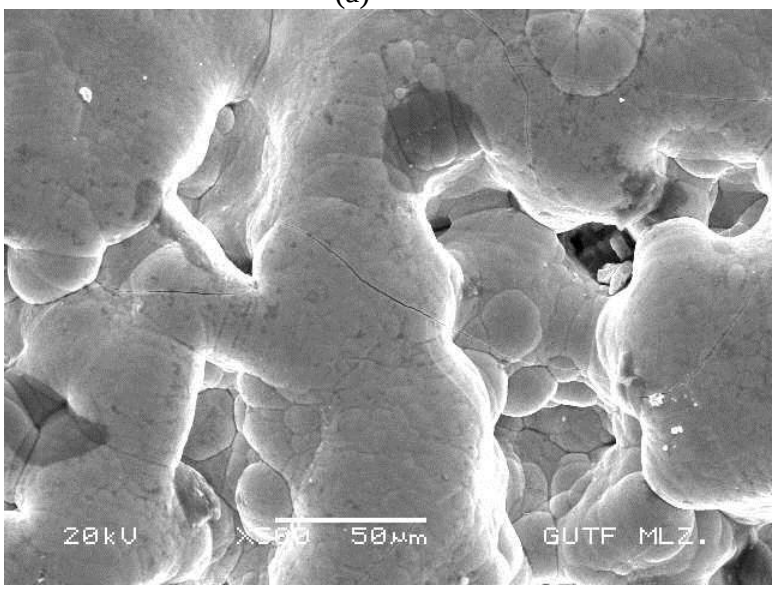


(c)

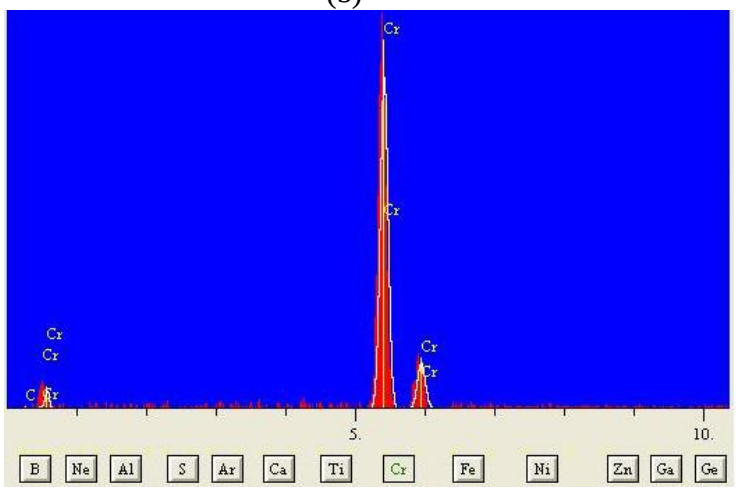
Resim 6.4. A420 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi



(a)



(b)

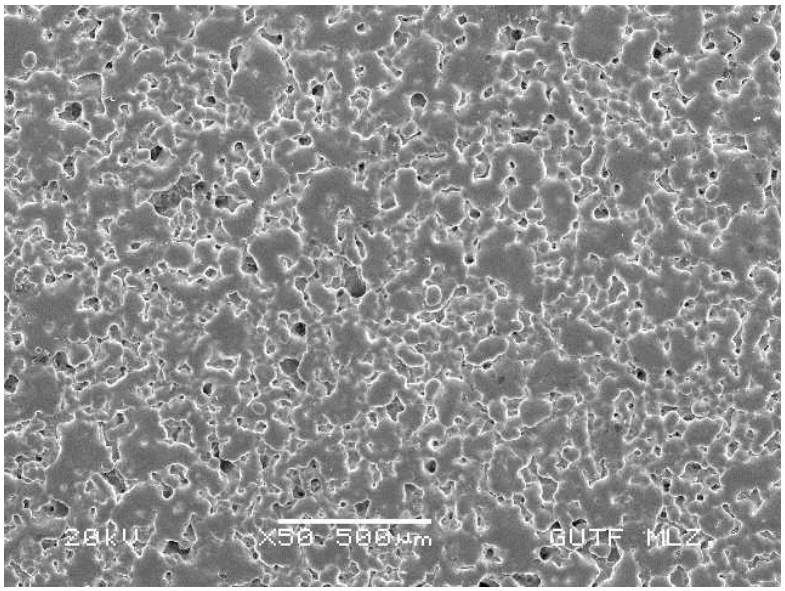


Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc		
C	Ka	0.08	0.183	0.383	wt.%	
Cr	Ka	194.04	8.810	99.617	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

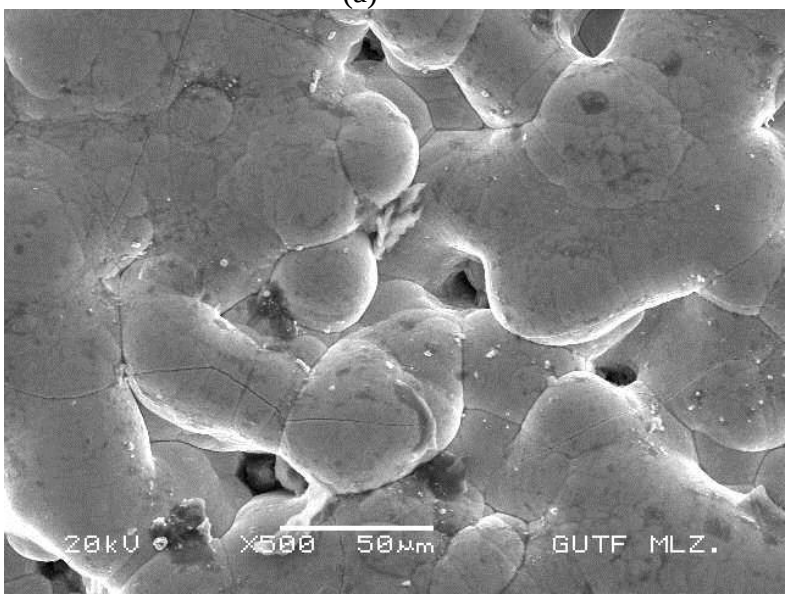
kV	20.0
Takeoff Angle	35.0°
Elapsed Livetime	10.0

(c)

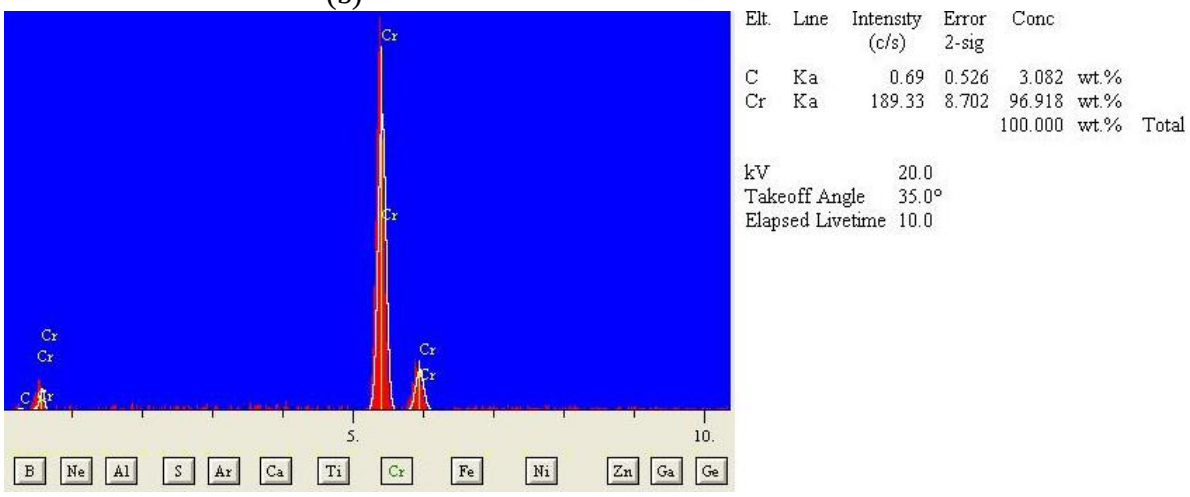
Resim 6.5. A550 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi



(a)



(b)

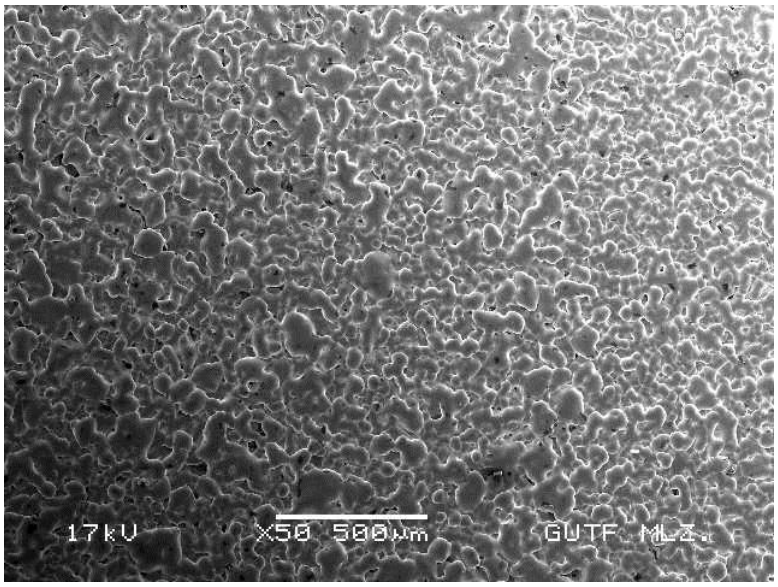


Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc		
C	Ka	0.69	0.526	3.082	wt.%	
Cr	Ka	189.33	8.702	96.918	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

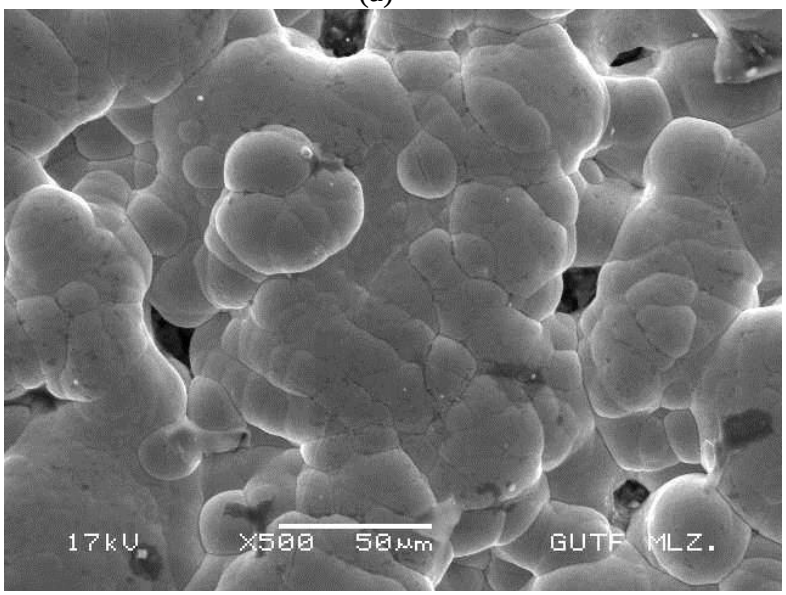
kV	20.0
Takeoff Angle	35.0°
Elapsed Livetime	10.0

(c)

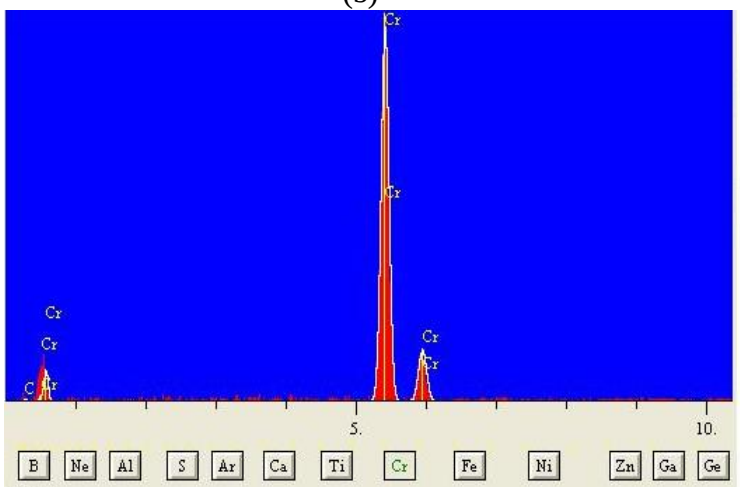
Resim 6.6. A700 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi



(a)



(b)

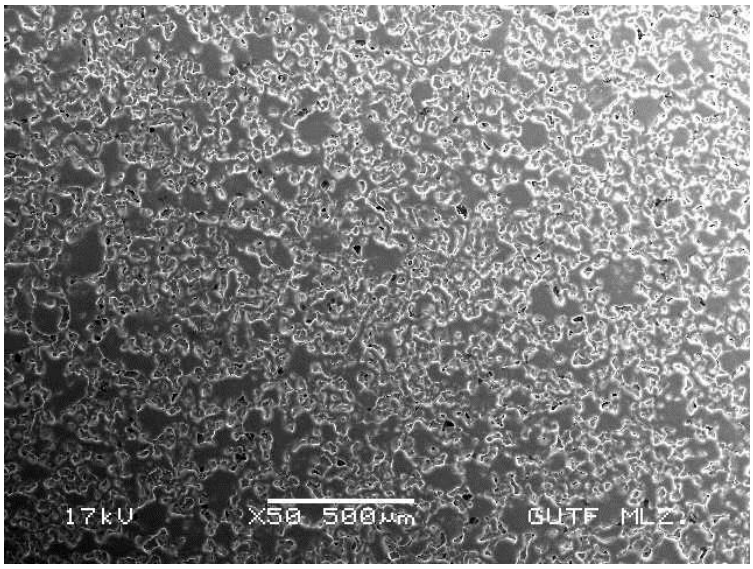


Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc		
C	Ka	0.53	0.459	0.860	wt.%	
Cr	Ka	323.11	11.366	99.140	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

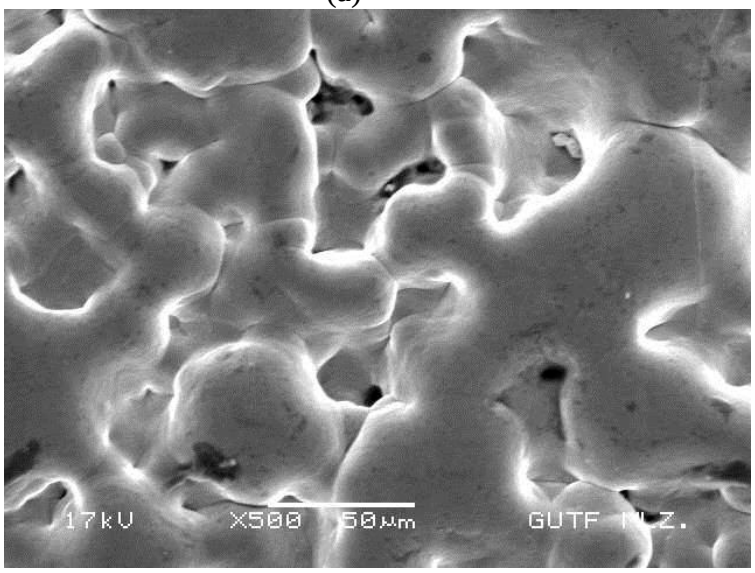
kV	17.0
Takeoff Angle	35.0°
Elapsed Livetime	10.0

(c)

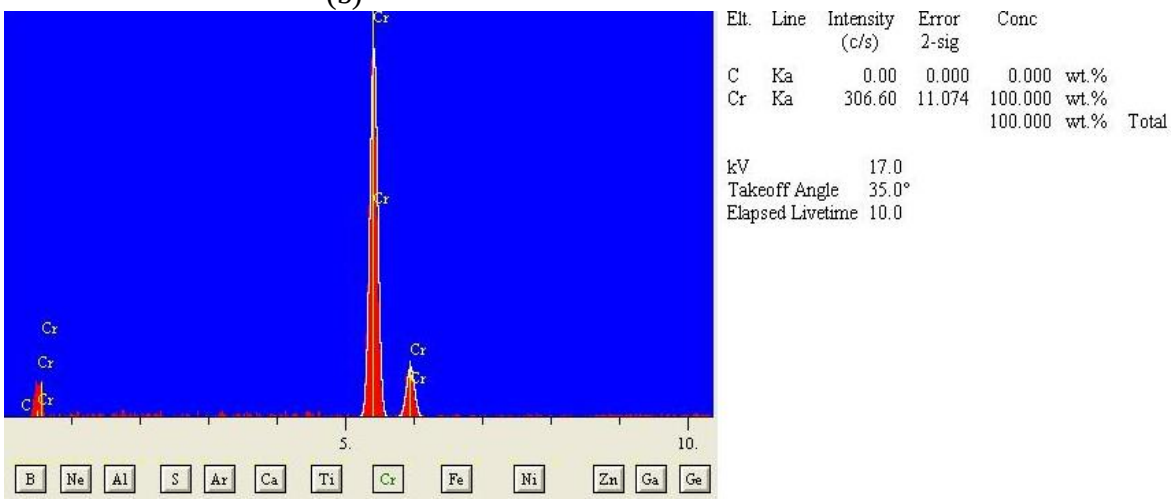
Resim 6.7. D2420 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi



(a)

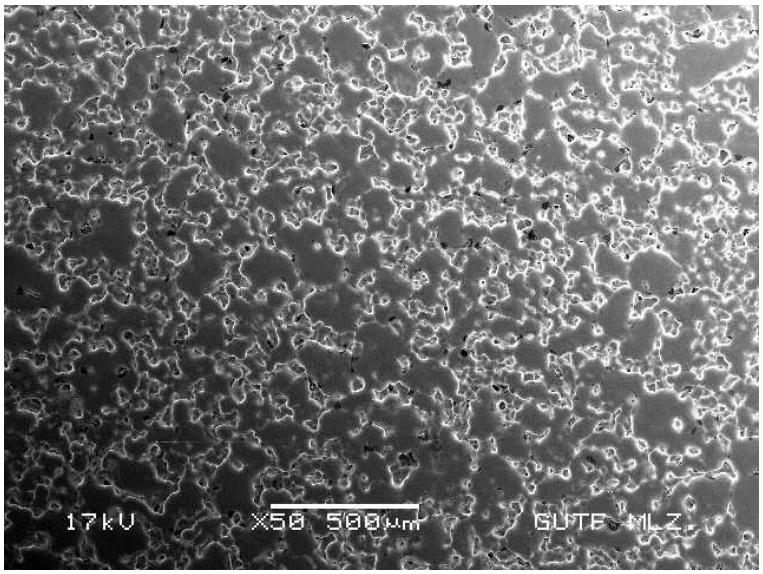


(b)

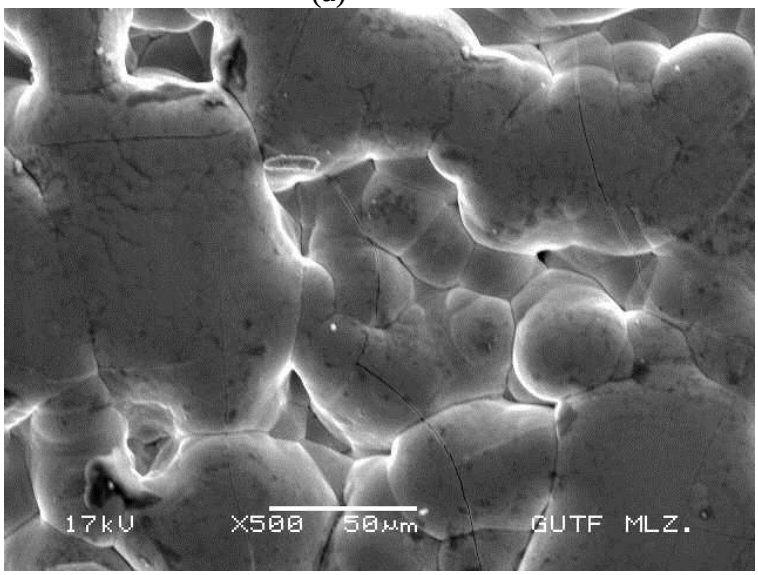


(c)

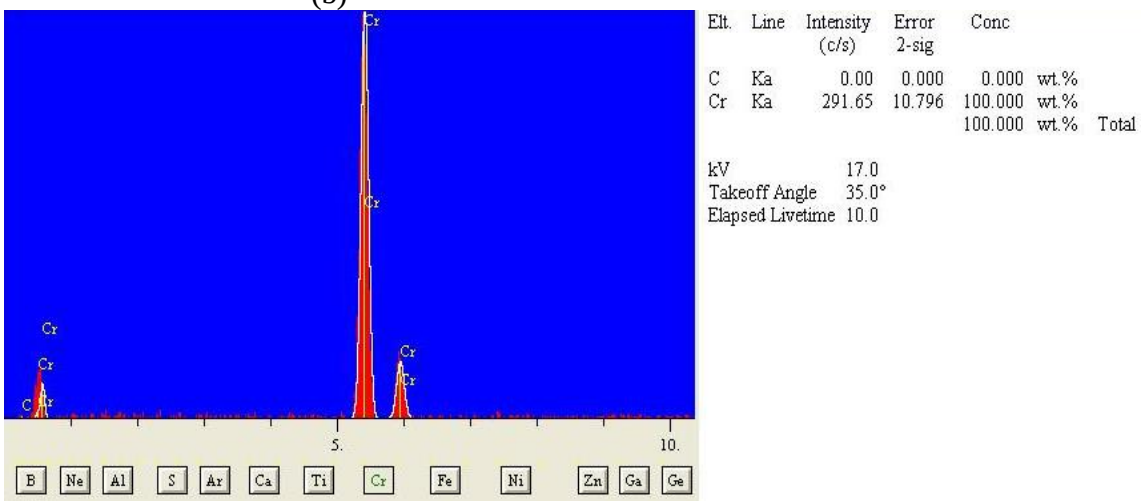
Resim 6.8. D2550 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi



(a)



(b)

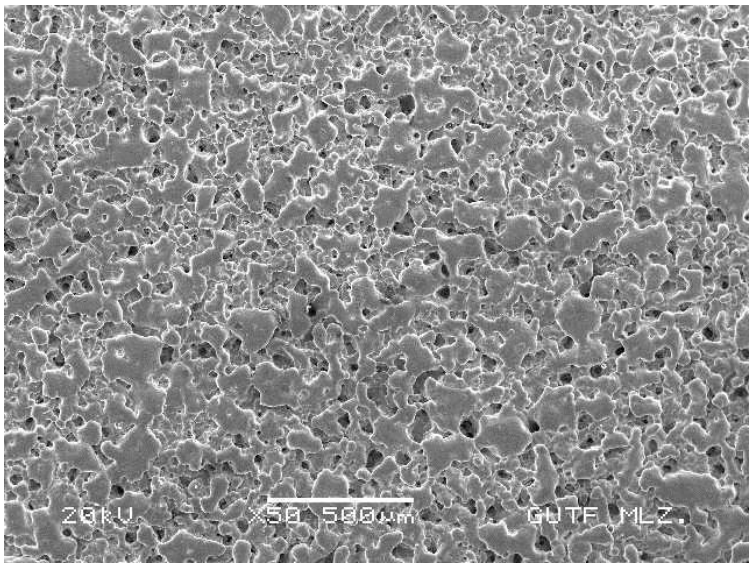


Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc		
C	Ka	0.00	0.000	0.000	wt.%	
Cr	Ka	291.65	10.796	100.000	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

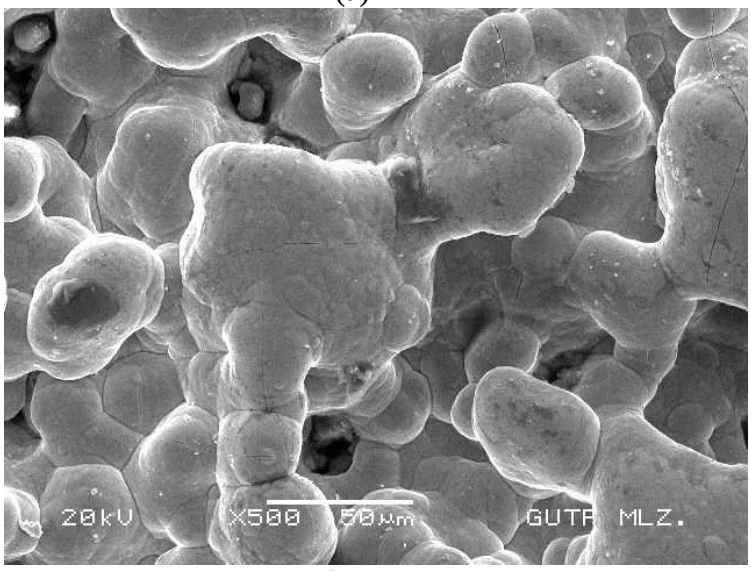
kV	17.0
Takeoff Angle	35.0°
Elapsed Livetime	10.0

(c)

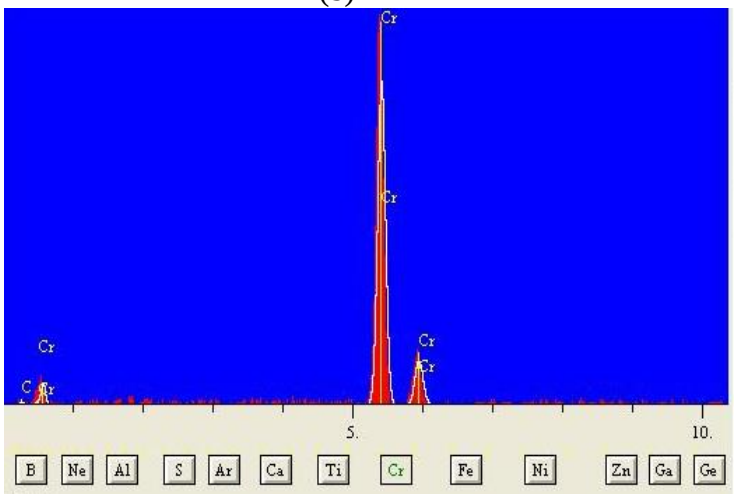
Resim 6.9. D2700 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi



(a)



(b)

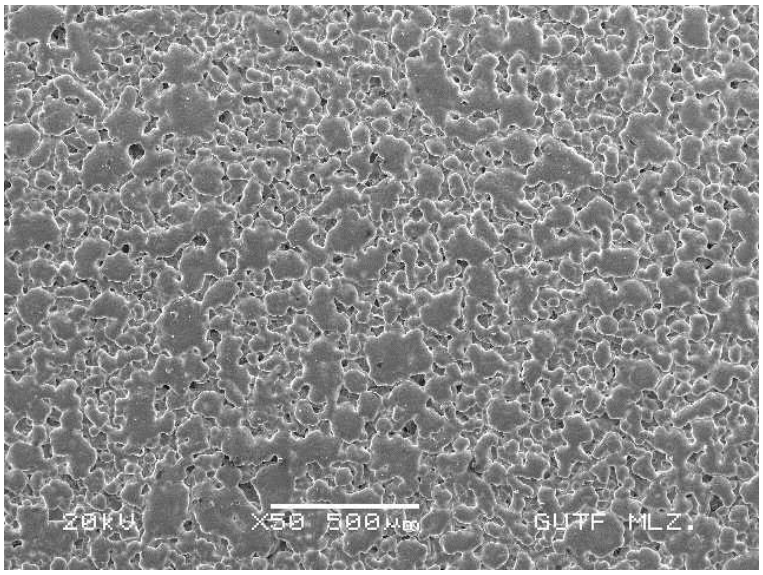


Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc		
C	Ka	0.79	0.560	3.371	wt.%	
Cr	Ka	195.50	8.840	96.629	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

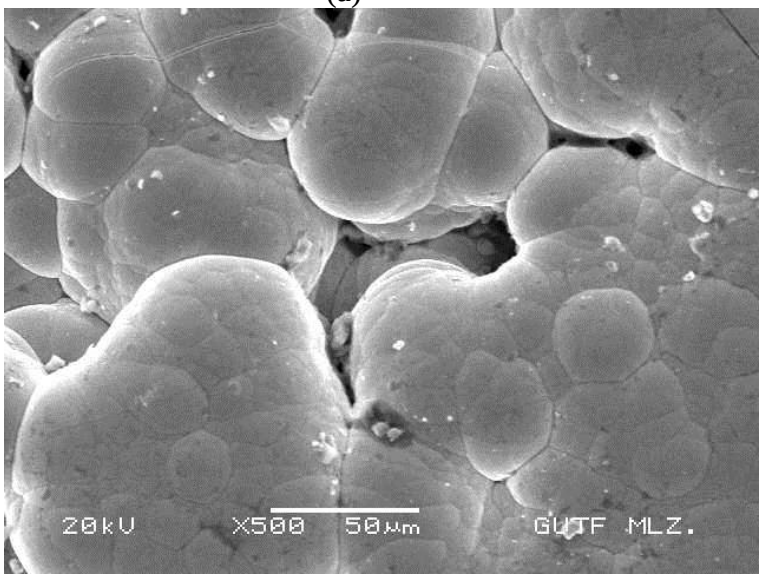
kV	20.0
Takeoff Angle	35.0°
Elapsed Livetime	10.0

(c)

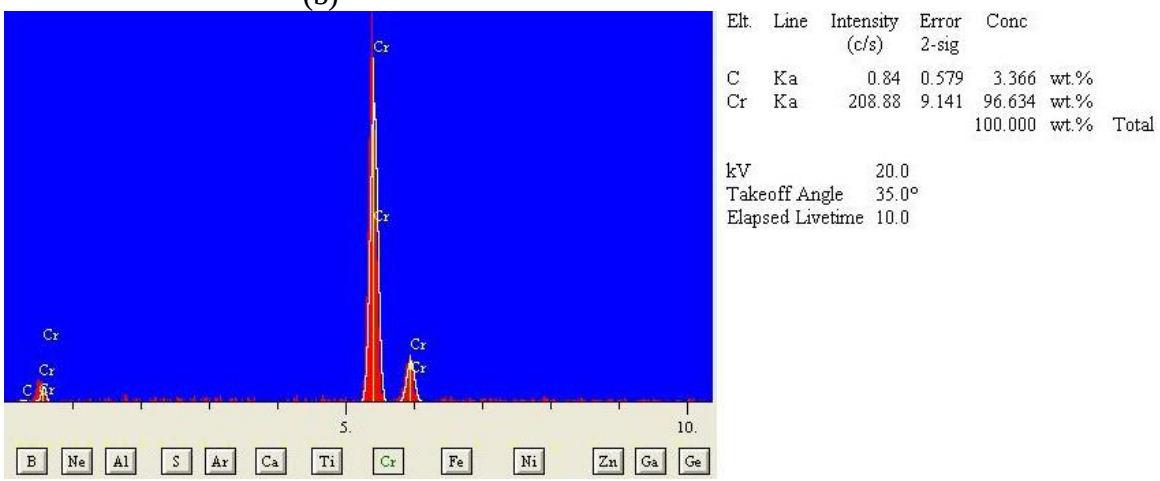
Resim 6.10. D5420 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi



(a)

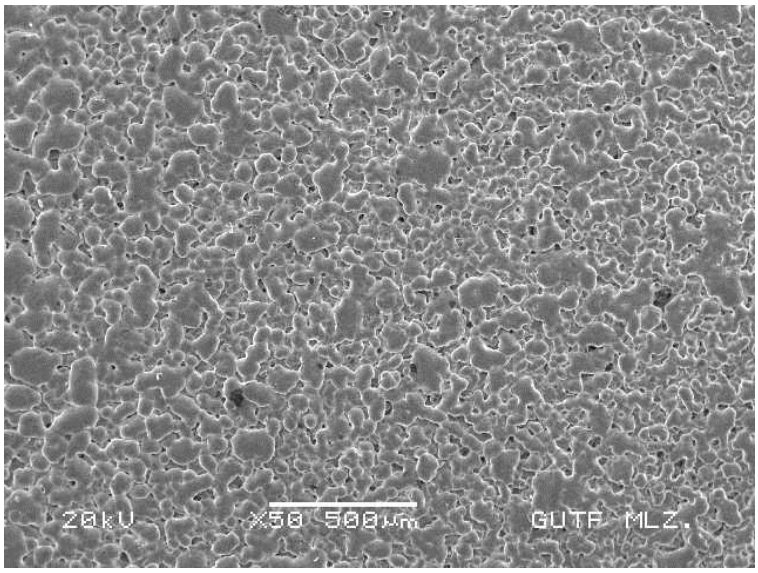


(b)

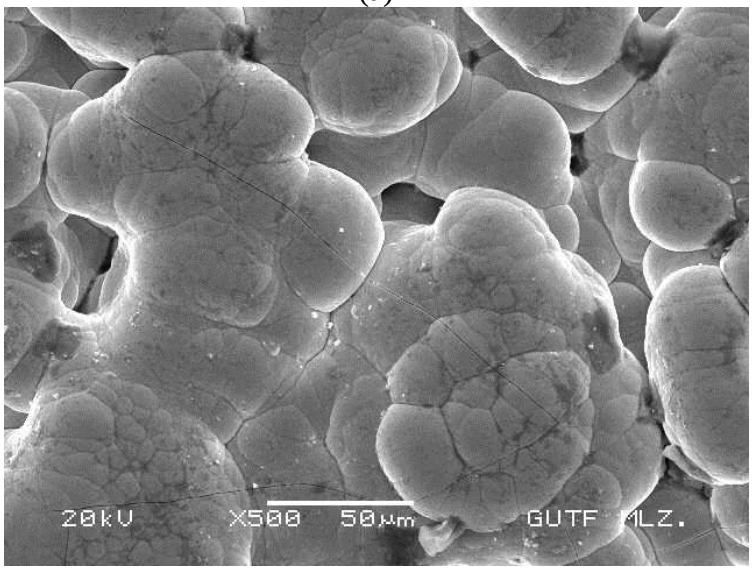


(c)

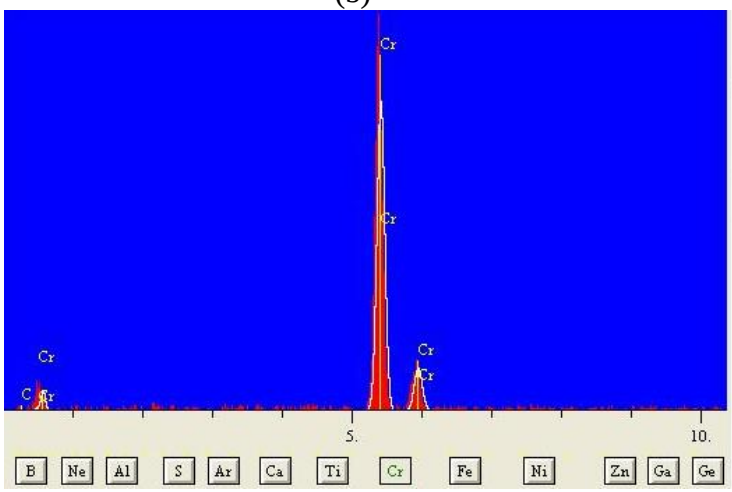
Resim 6.11. D5550 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi



(a)



(b)



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Conc		
C	Ka	0.14	0.239	0.633	wt.%	
Cr	Ka	199.84	8.938	99.367	wt.%	
				100.000	wt.%	Total

kV	20.0
Takeoff Angle	35.0°
Elapsed Livetime	10.0

(c)

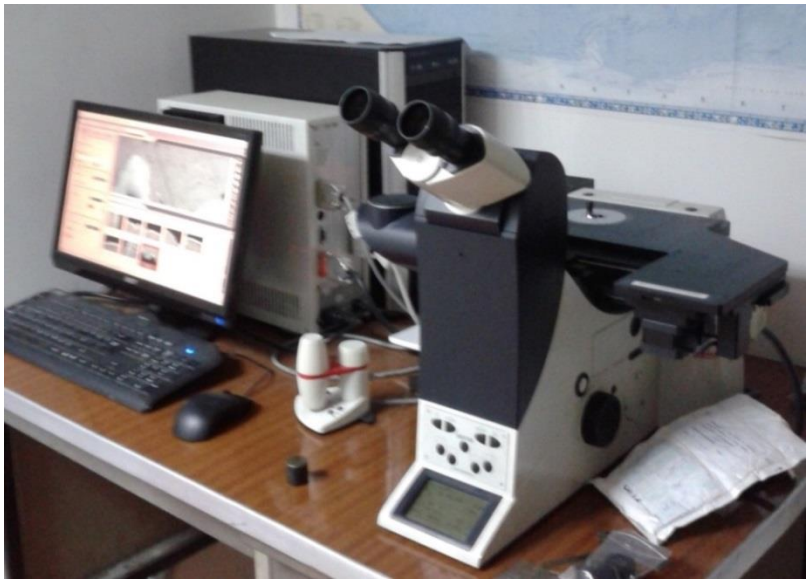
Resim 6.12. D5700 nolu numunenin (a) x50, (b) x500 görüntüsü ve (c) EDS analizi

Numunelerin x50 ve özellikle x500'deki görüntülerine bakıldığında, kaplamanın boşluklu bir yapıya sahip olduğu, bu nedenle yüzey alanının görünenden daha büyük olduğu görülmüştür. Bulgaristan Bilimler Akademisi'nin nano elmas parçacık takviyeli krom kaplamanın tam dolu çeliğe uygulanmasında, pürüzsüz ve parlak bir kaplama elde edilmiştir [7]. Bu çalışmadaki kaplamanın boşluklu olması; ana malzemenin toz metalürjisi yöntemi ile üretilmesi, bu sebeple ana malzemenin tam dolu olmaması ile açıklanabilir. Ayrıca, BAS ekibi tarafından, kaplama sırasında yüzey alanının hesaplanandan büyük olması, akımın eşit olarak dağıtılamaması ve ana malzemenin boşluklu olması sebebiyle kromun boşluklar arasına girememesi gibi sebeplerle olabileceği açıklanmaktadır.

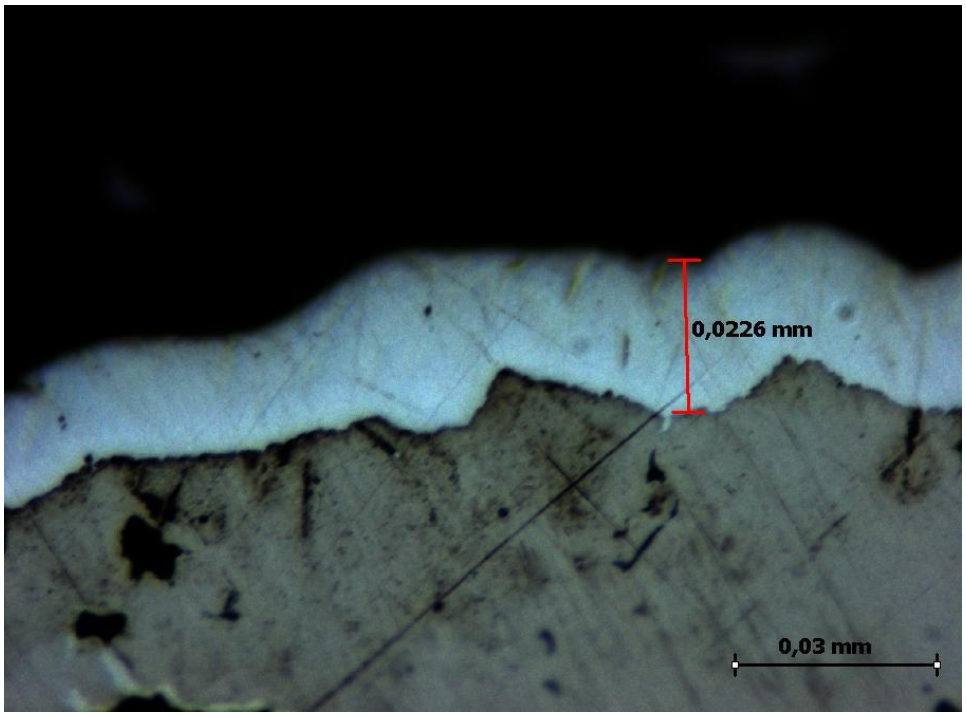
EDS analiz sonuçlarına bakıldığında ise %0-3 C (elmas) geri kalanının ise Cr olduğu görülmüştür. Buradaki C elementinin krom kaplamadaki nano elmas parçacıkların olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, bu değerlerin kaplama sırasında çözeltiye eklenmiş 25 g/l konsantrasyonlu elmas nano parçacık değerine uygun olduğu görülmüştür.

6.4. Kaplama Kalınlıklarının Ölçümü

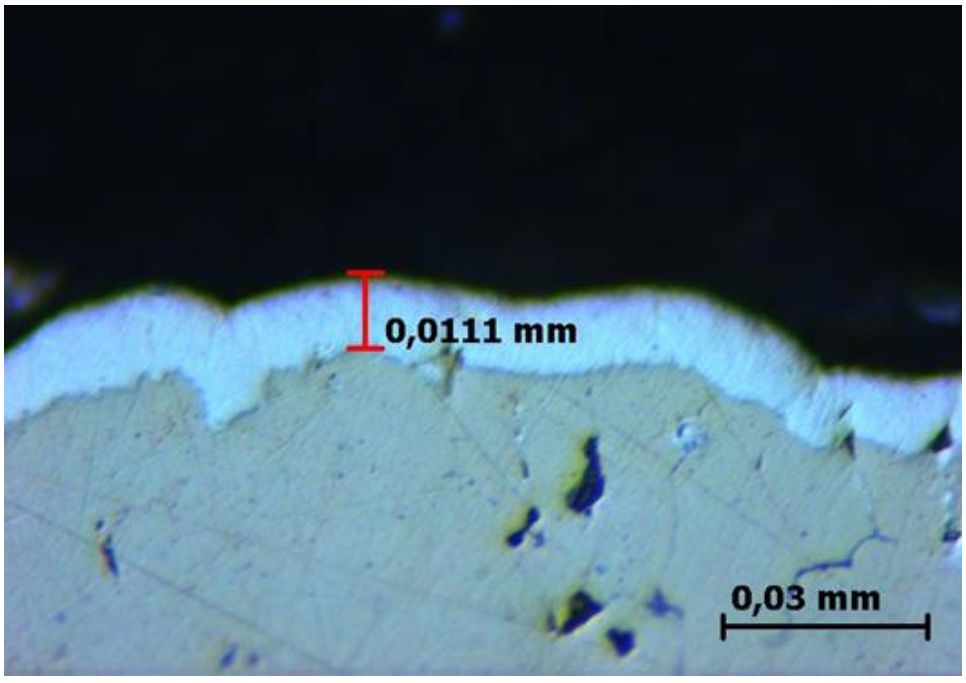
Kaplama kalınlıklarının mikroskobik incelenmesi amacıyla hazırlanan numuneler Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi laboratuvarında, Leica marka optik mikroskobunda görüntülenmiştir (Resim 6.13). Kaplamaların kalınlığını gösteren mikroskop görüntüleri ise Resim 6.14-6.22'de görülmektedir.



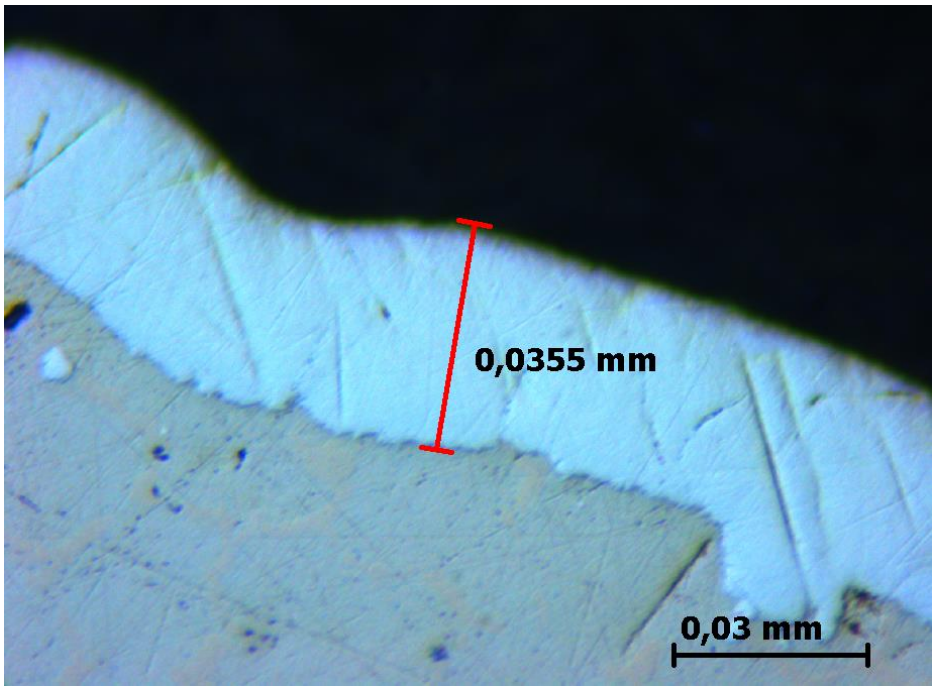
Resim 6.13. Optik mikroskop cihazı



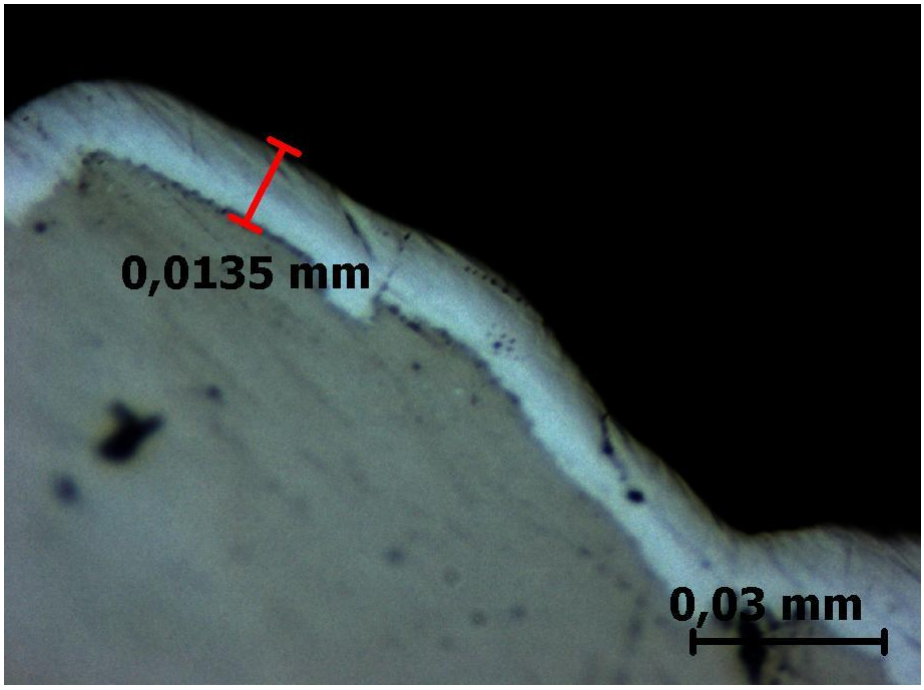
Resim 6.14. A420 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü



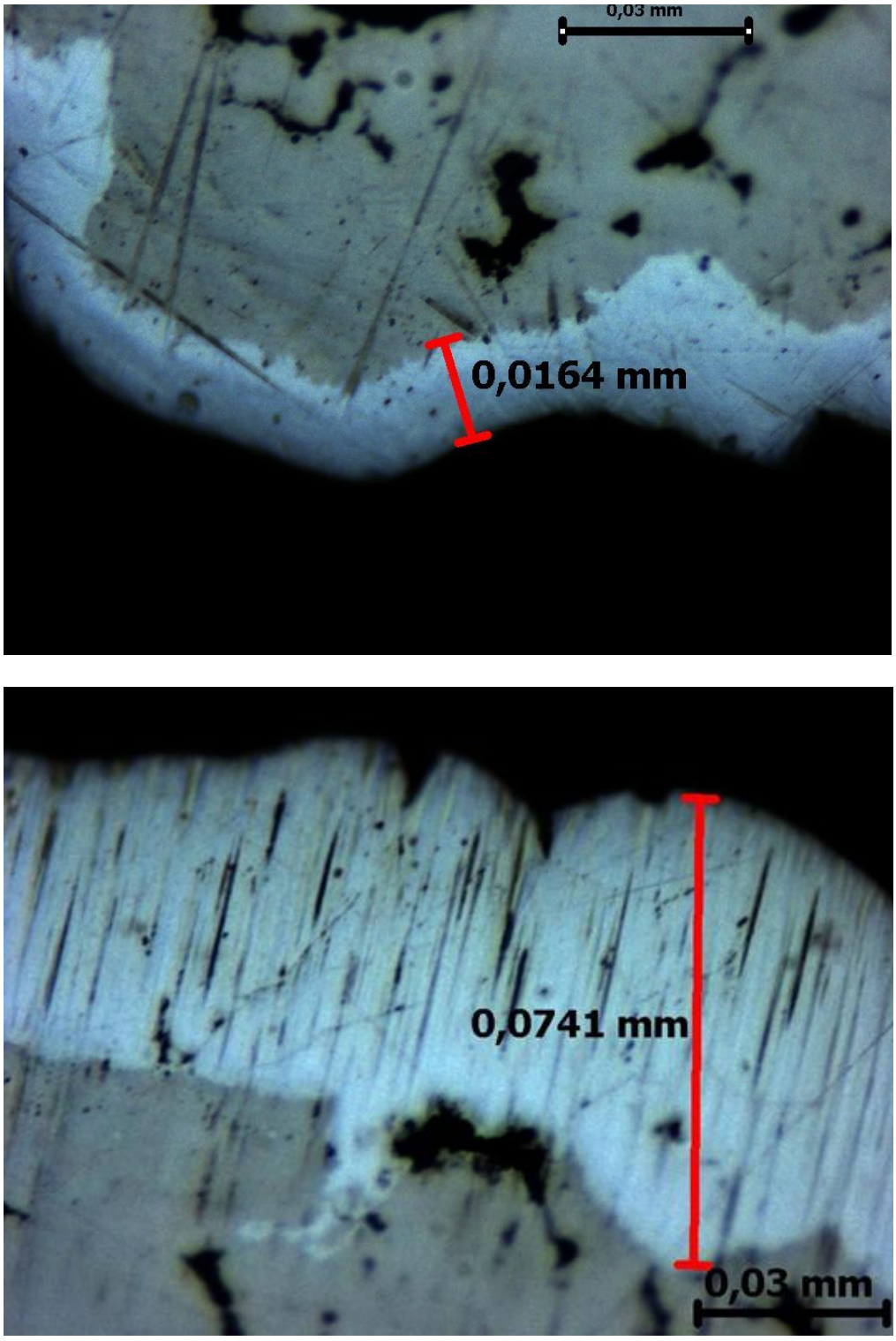
Resim 6.15. A550 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüleri



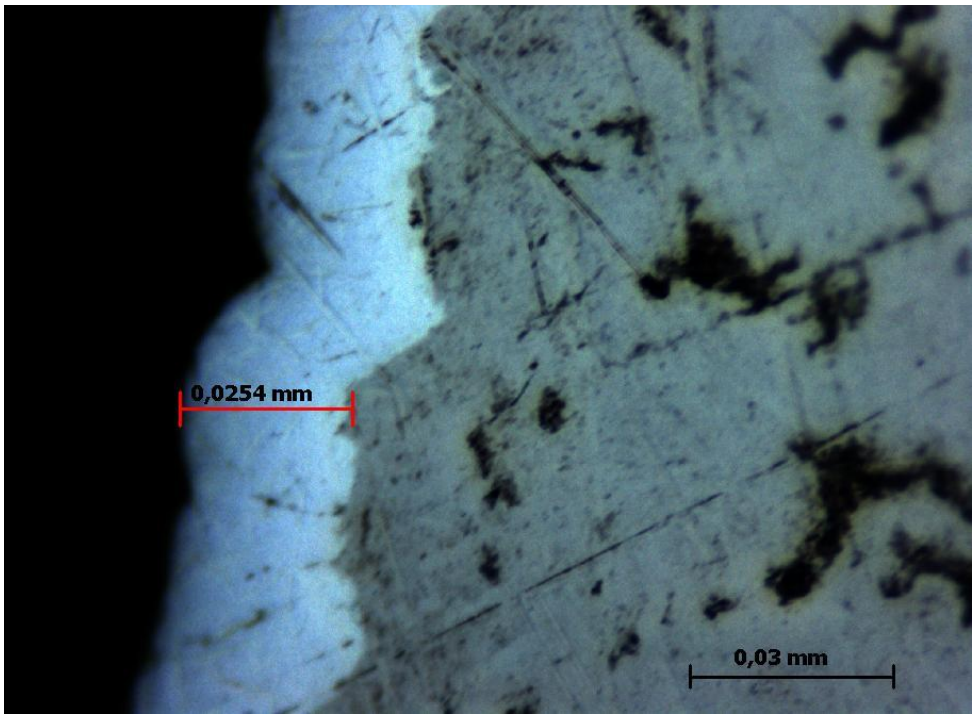
Resim 6.15. (devam) A550 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüleri



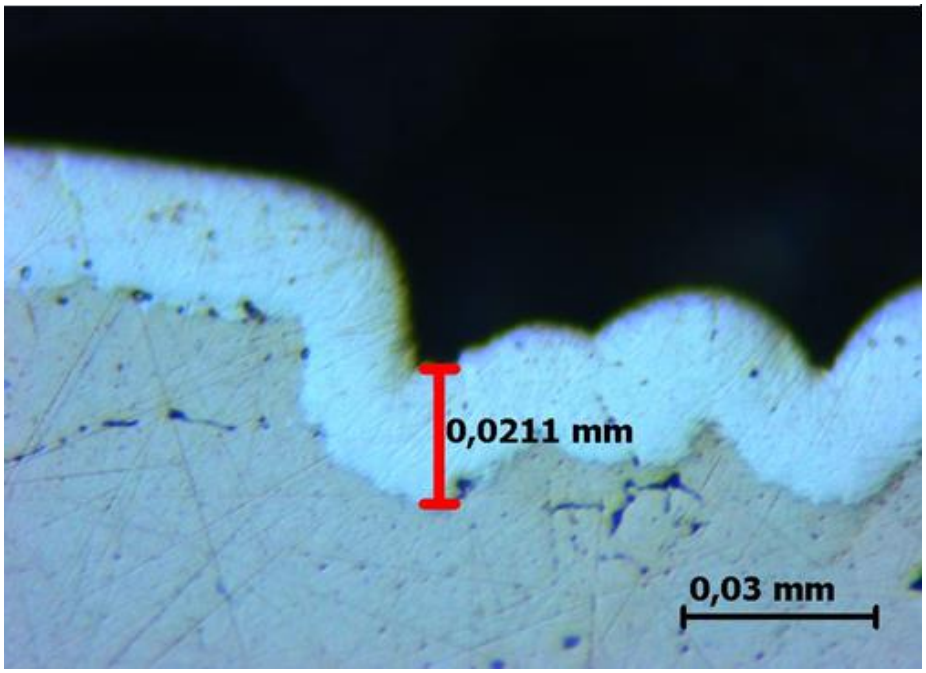
Resim 6.16. A700 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü



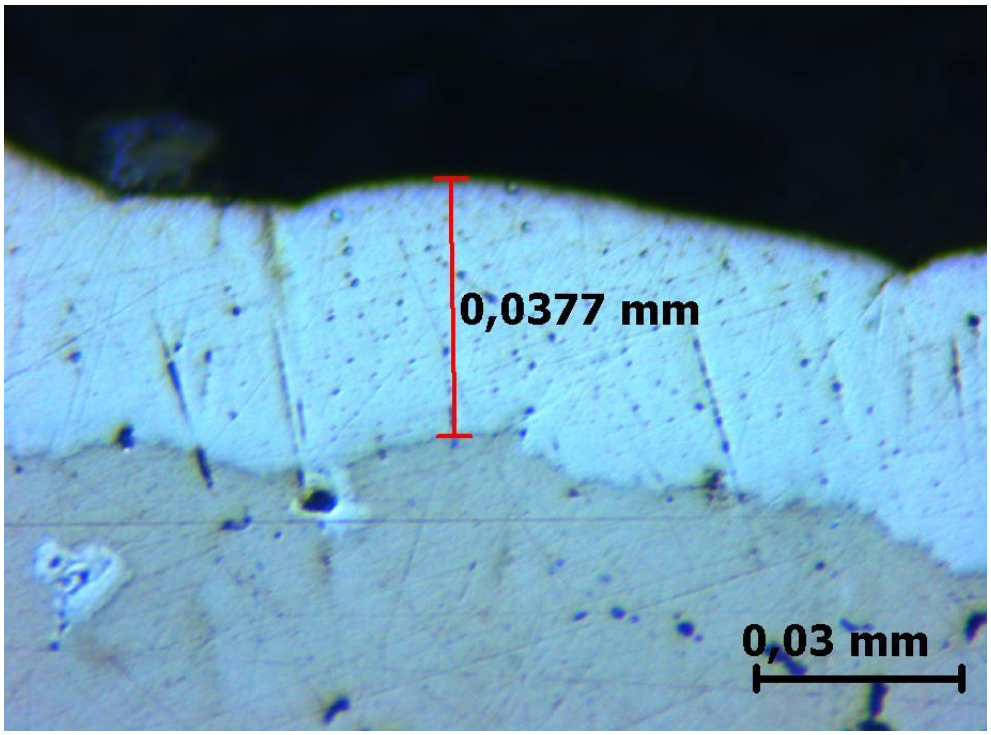
Resim 6.17. D2420 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü



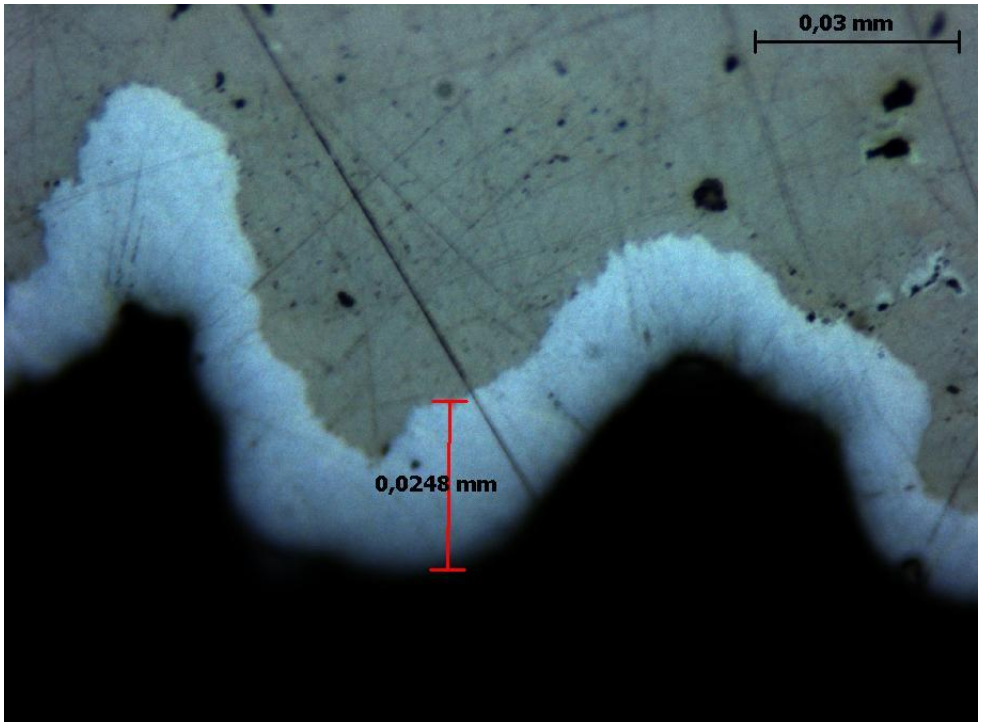
Resim 6.18. D2550 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü



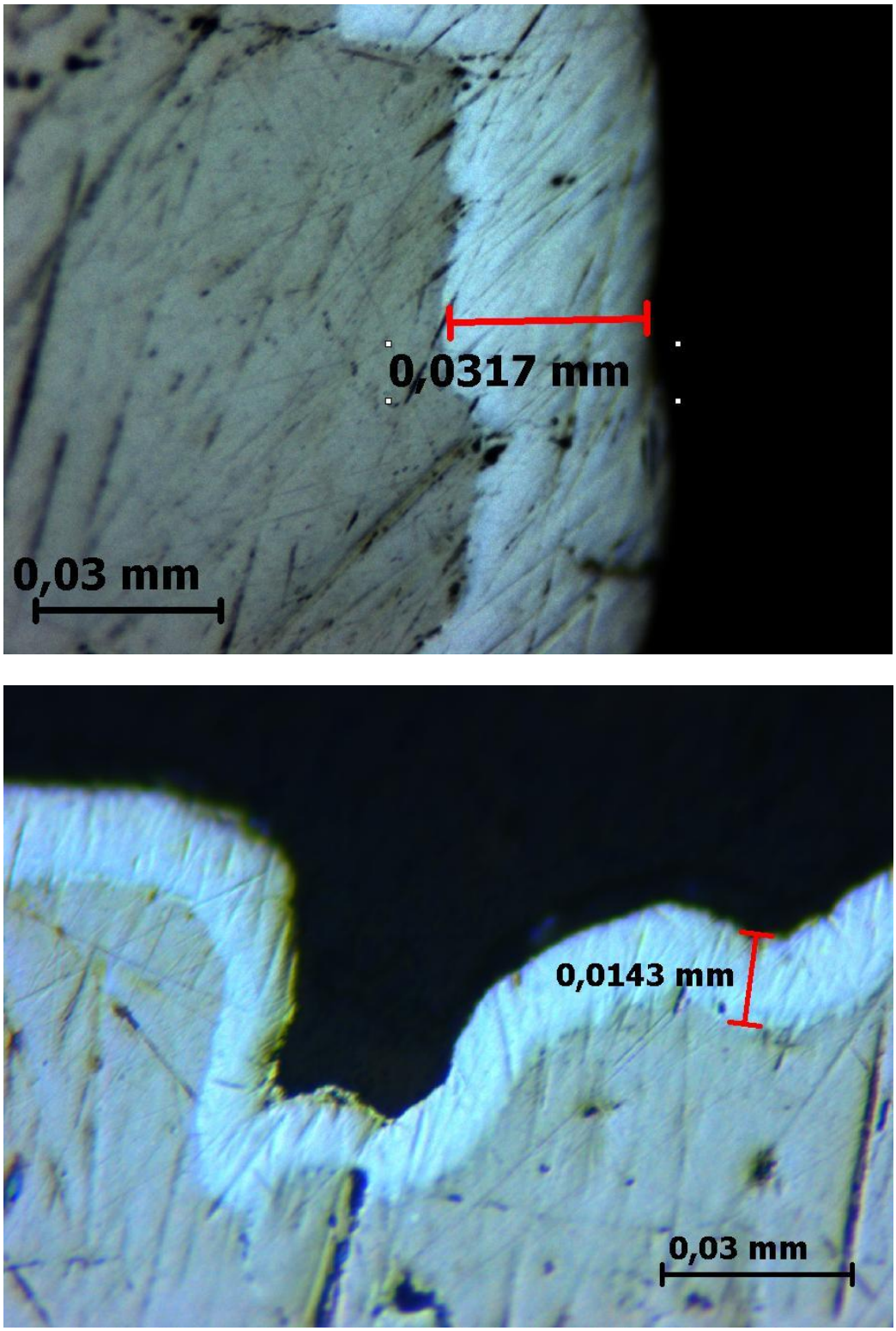
Resim 6.19. D2700 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü



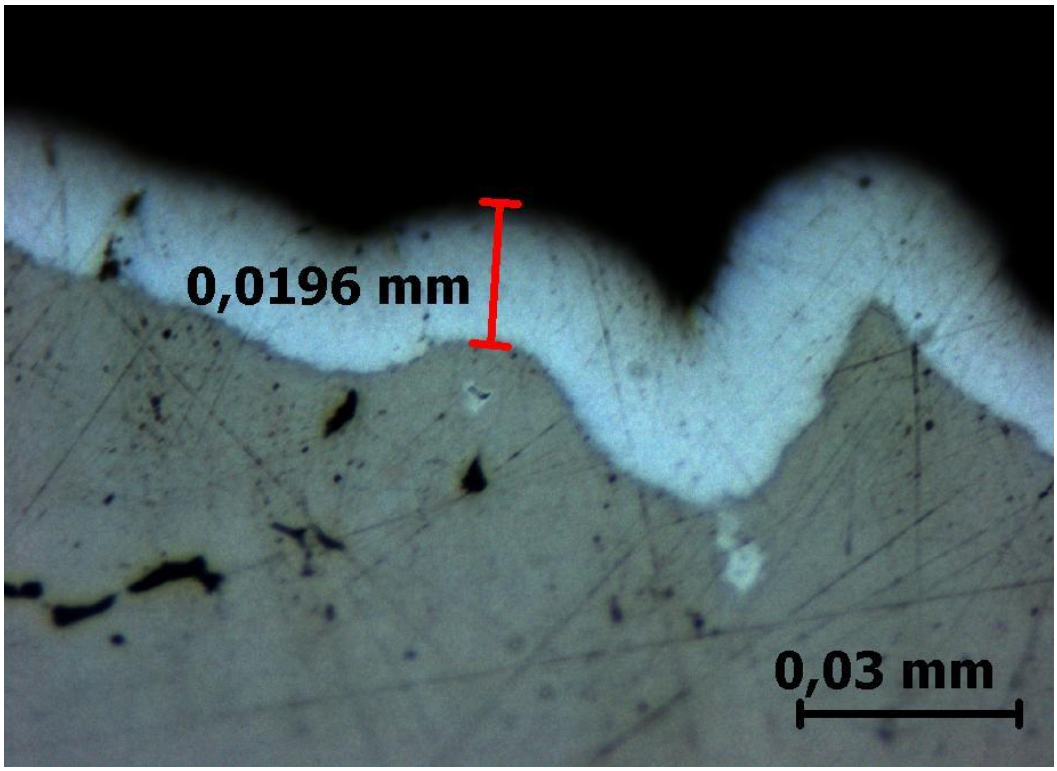
Resim 6.19. (devam) D2700 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü



Resim 6.20. D5420 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü



Resim 6.21. D5550 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü

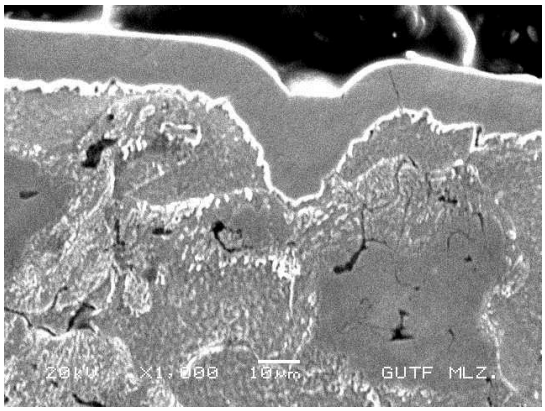


Resim 6.22. D5700 nolu numunenin optik mikroskopta kaplama kalınlığının görüntüsü

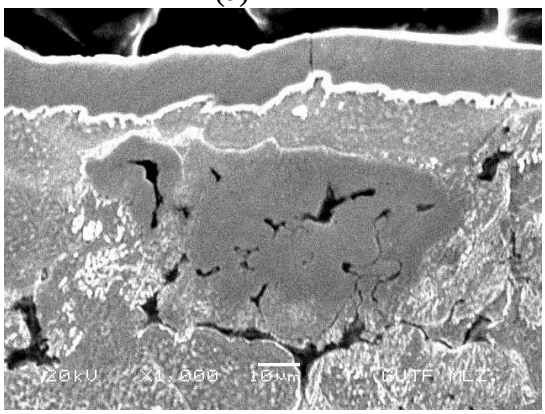
Optik mikroskop görüntülerine bakıldığında kaplamanın gözenekli olan toz metal parçaların aralarına girdiği, böylelikle kaplamanın ana malzemeye tutunmasının arttığı gözlemlenmiştir.

Numunelerin her yüzünün kaplanmış olduğu, ancak aynı numunedeki kaplama kalınlığının değişiklik gösterdiği görülmüştür (Resim 6.14-6.22). Bunun sebebi olarak da yüzeyin hesaplanandan büyük olması, yapının gözenekli olması, ayrıca, kaplamada uygulanan akımın yüzeye eşit dağıtılamadığı için, yüzeylerde ve kenarlarda kalınlığın değişkenlik gösterebileceği bildirilmiştir. Kaplama kalınlığının her yerde eşit olması için, elektrokimyasal yöntemi yerine akımsız kaplama yönteminin uygulanması önerilmiştir.

Dağlama sonrası, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Laboratuvarı, JSM-6060LV marka cihazda SEM'i çekilen numune kesitinin görüntüsü Resim 6.23'tedir. Görüleceği gibi kaplamanın yüzey profilinin tamamına yapıştığı ve böylece bunun aşınma performansına yansıdığı anlaşılmaktadır.



(a)



(b)

Resim 6.23. D2550 nolu numunenin SEM de kaplama kalınlığının görüntüsü

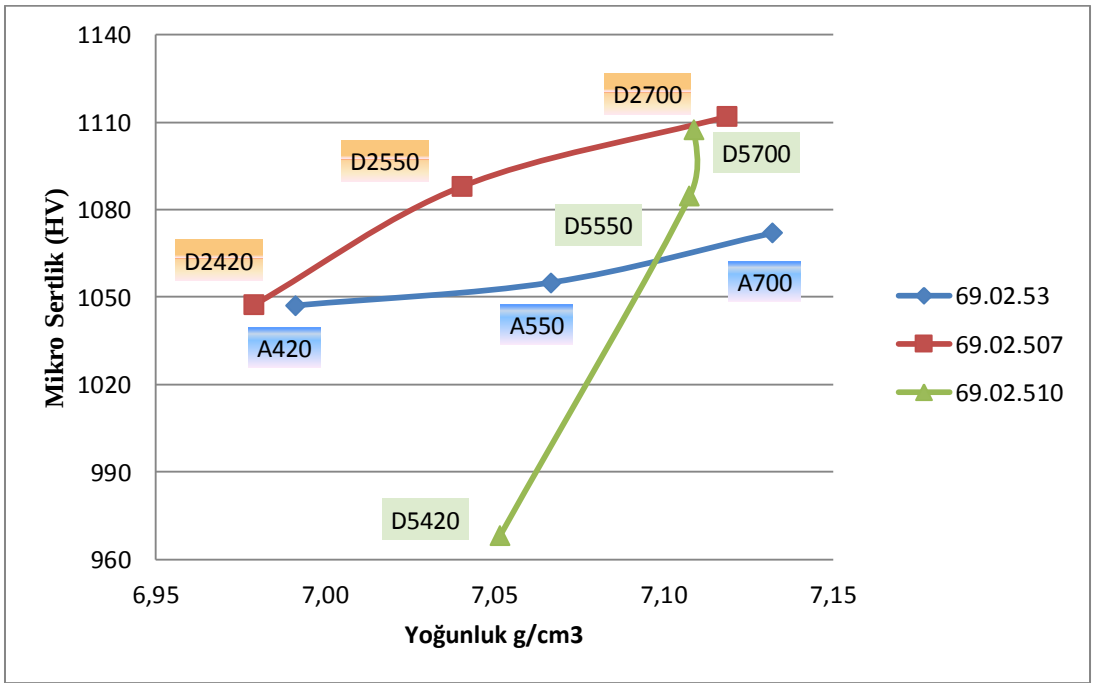
6.5. Mikro Sertlik Sonuçları

Numunelerin 50 gr yük altında (HV0,05), üç farklı yerden alınarak ortalaması alınmış Vickers mikro sertlik değerleri Çizelge 6.5' te gösterilmektedir.

Çizelge 6.5. Deney numunelerinin mikro sertlik değerleri

Numune Kodu	Mikro Sertlik (Ortalama) HV	Standart Sapma(±)
A420	1047,1	28,88
A550	1055,0	42,30
A700	1072,0	69,54
D2420	1047,3	53,02
D2550	1088,0	8,04
D2700	1112,0	100,08
D5420	968,3	28,20
D5550	1084,8	91,63
D5700	1107,4	63,56

Mikro sertlik değerleri 968,3HV ve 1107,4 HV arasında olduğu görülmüştür. 3 farklı toz karışımından üretilen numunelerin mikro sertlik değerleri yoğunluk değerleriyle etkileşimde olduğu görülmüştür. Yoğunluk değerleri arttıkça, numunelerin mikro sertlik değerleri de artmıştır (Şekil 6.3). Buradan, toz metalurjisi yoğunluğunun kaplamanın etkinliğine olumlu etkisi olduğu sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 6.3. Numunelerin mikro sertlik değerleri

En yüksek sertlik değeri D2700 nolu numunede görülmüştür. Mikro sertlikte mikroskop görüntüsüne (x40) bakıldığında 69.02.507 (D2420, D2550 ve D2700) numunelerde ölçüm alanı kolaylıkla seçilebilirken, 69.02.53 (A420, A550 ve A700) de ölçüm alanlarının görülebilirliğinin azaldığı, 69.02.510 (D5420, D5550 ve D5700) da ise ölçüm alanını görmenin çok güçleştiği görülmüştür. Ölçüm alanlarının görünürlüğünün azalmasının yüzey pürüzlülük sonuçlarıyla orantılı olduğu, numunelerde yüzey pürüzlülüğü arttıkça, ölçüm alanlarının azaldığı görülmüştür.

Kaplama öncesinde 69.02.507 nolu toz karışımı en düşük sertlik değerleri gösterirken, kaplama sonrasında ise en yüksek sertlik değerleri 69.02.507 nolu toz karışımında görülmüştür.

Kaplama sonrası sertlik değerlerinde, kaplama öncesi sertlik değerlerine göre önemli derecede artış olduğu görülmüştür. Bu artış, kaplanmış numunelerin kesimi sırasında da fark edilmiştir. Numunelerin kaplama kısmı zor kesilirken, ana malzeme kısmı kolay bir şekilde kesilebilmiştir.

6.6. Aşınma Deneyi Sonuçları

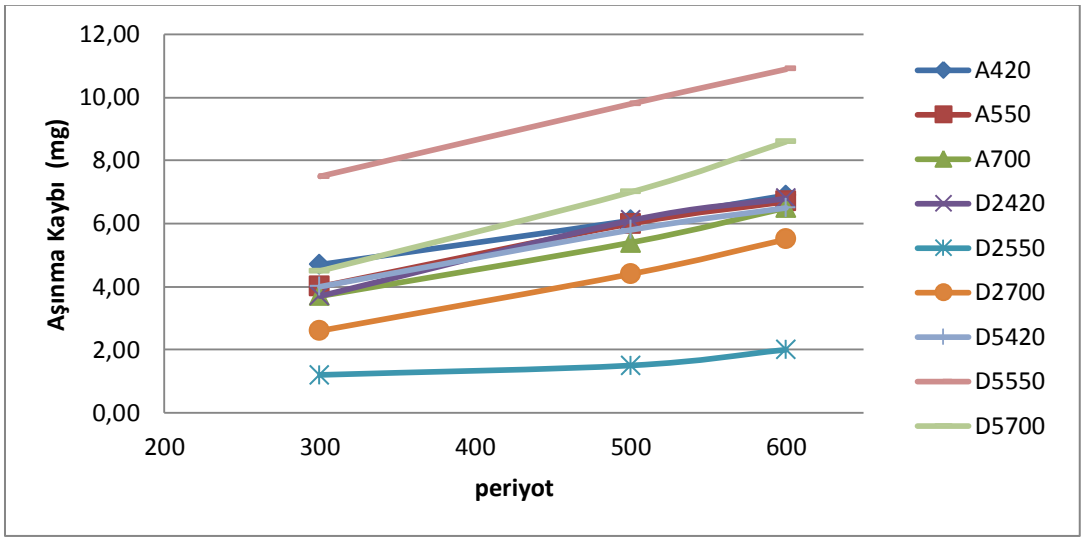
~1300 HV sertliğindeki sert metal aşındırıcı silindir çubuk kullanılarak 1,4 MPa basınç altında 9 mm/sn hız ve 300, 500 ve 600 periyotta (strok) pin on plate aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınan yüzey alanı(A1) ~1,8 cm^2'dir.

Pin-on-plate aşınma deneyi, aşındırıcı parçaya verilen yük altındaki aşındırılan yüzeyin yüzey boyunca ileri geri hareketi ile uygulanmıştır. Aşındırılan yüzeyin yüzey boyunca bir ileri-geri hareketi bir periyodu (2x3,2cm=6,4 cm) göstermektedir. Böylelikle 300, 500 ve 600 periyot sırasıyla 20 m, 32 m ve 40 m'ye denk gelmektedir.

Çizelge 6.6'de kaplanan numunelerin, Çizelge 6.7'da aşındırıcı çubuğun 300, 500 ve 600 periyot mesafelerindeki aşınma kayıpları mg cinsinden gösterilmiştir. Numunelerin aşınma miktarları Şekil 6.4' te verilmektedir.

Çizelge 6.6. Aşınma mesafelerinde numunelerdeki aşınma kaybı değerleri

Numune kodu	Aşınma Kaybı (mg)		
	periyot		
	300	500	600
A420	4,7	6,1	6,9
A550	4,0	6,0	6,7
A700	3,7	5,4	6,5
D2420	3,7	6,1	6,8
D2550	1,2	1,5	2,0
D2700	2,6	4,4	5,5
D5420	4,0	5,8	6,5
D5550	7,5	9,8	10,9
D5700	4,5	7,0	8,6



Şekil 6.4. Numunelerin aşınma kaybı değerleri

Çizelge 6.7. Aşındırıcı pimin numuneler karşısındaki aşınma kaybı değerleri

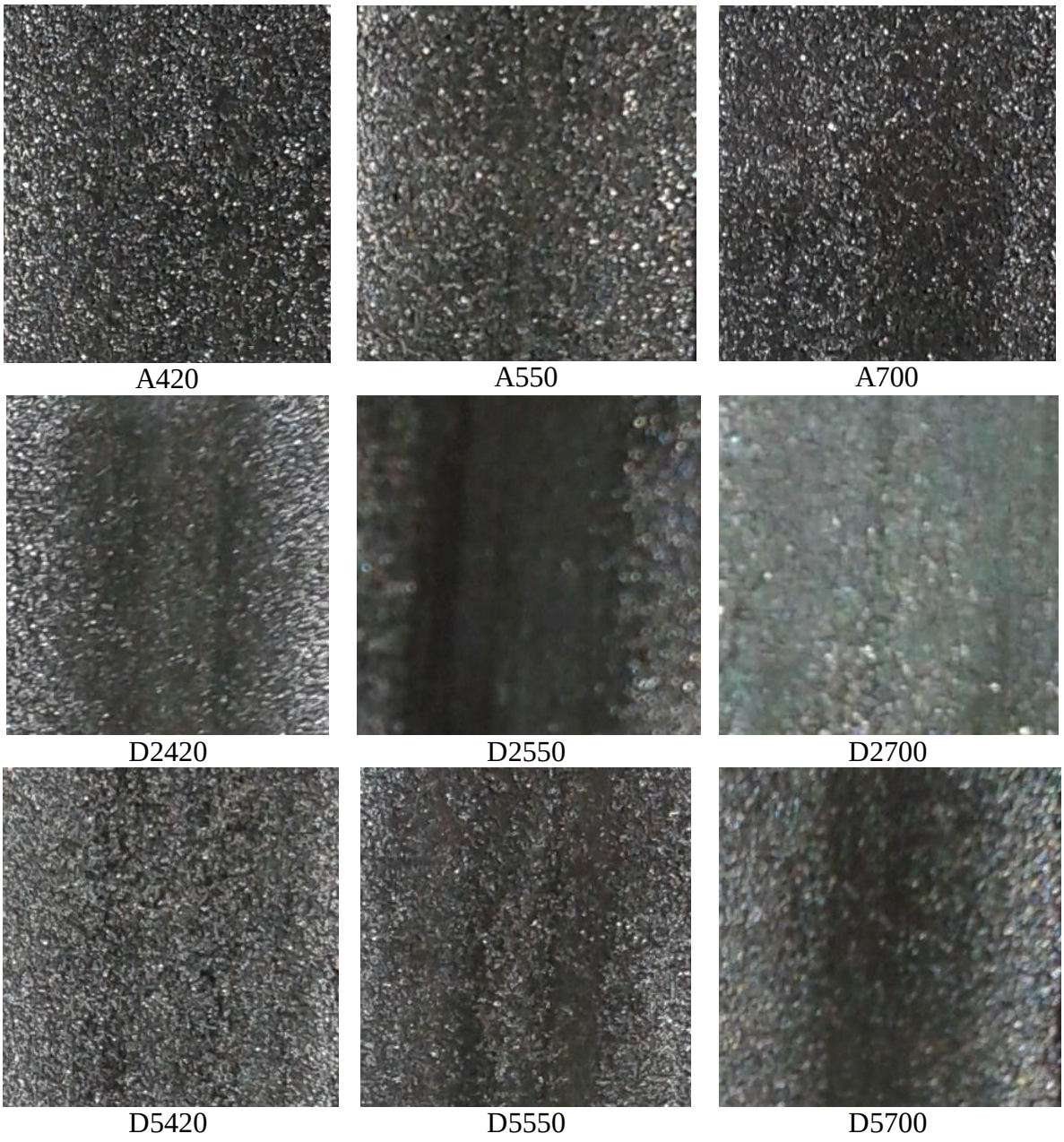
	Numune kodu	Aşınma Kaybı (mg)		
		periyot		
		300	500	600
Aşındırıcı Pim	A420	0,1	0,1	0,1
	A550	0,2	0,2	0,3
	A700	0,0	0,0	0,0
	D2420	0,2	0,2	0,2
	D2550	0,2	0,2	0,2
	D2700	0,1	0,1	0,1
	D5420	0,2	0,2	0,2
	D5550	0,1	0,1	0,1
	D5700	0,3	0,3	0,3

Numunelerde mg seviyesinde aşınma kaybı olup, aşındırıcı malzemede neredeyse aşınma kaybı olmamıştır (~0,3 mg). Kaydırma mesafesi arttıkça aşınma kaybının çok az da olsa artarak arttığı görülmüştür. En fazla aşınma kaybının D5550 nolu numunede, en az aşınma kaybının da D2550 nolu numunede olduğu görülmüştür. D5550 ve D2550 nolu numuneler hariç numunelerin, aşınma kayıp eğrilerinin birbirlerine yakın çıktığı görülmüştür.

Toz cinslerinden bakıldığında aşınma dayanımında en iyi sonucu 69.02.507 adlı toz karışımına yapılan kaplamanın verdiği görülmüştür. Çizelge 5.1' de verilen toz özelliklerine bakıldığında bu tozun düşük karbonlu ve içinde Ni, Mo ve Mn bulunduğu görülmektedir. Bu alaşım elementlerinin bulunduran diğer tozda ise (69.02.510) karbon

oranının daha fazla olduğu görülmektedir. Buradan, düşük karbonlu parçaya kaplamanın daha iyi uygulandığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Aşınan yüzeylerin makro görüntüleri Resim 6.24'te verilmiştir.



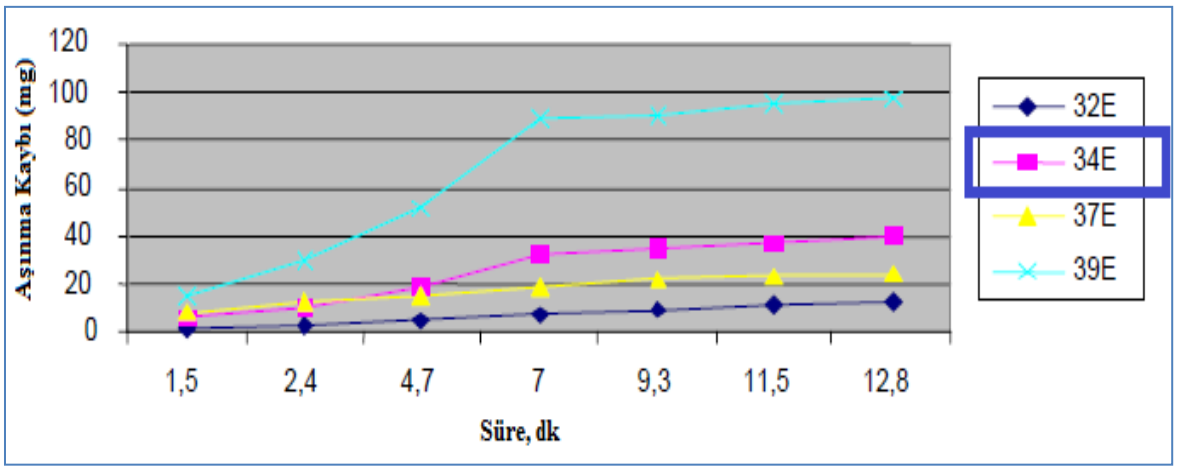
Resim 6.24. Aşınan numunelerin makro görüntüleri

Bu çalışma bilindiği gibi gözenekli parçalara yapılan nano elmas takviyeli kaplamanın, tam dolu malzemelere yapılan kaplamaya göre farklarını ortaya koymak üzere yapılmıştır.

Dolayısıyla tam dolu malzemelere yapılan kaplama ile elde edilen sonuçları burada karşılaştırmak yerinde olacaktır. Bu karşılaştırma aşağıda yapılmıştır.

Tam dolu çelikler için yapılan testlerde 34E nolu numunenin kaplama parametreleri bu çalışma ile aynıdır [7].

Aşınma deneyi parametreleri olarak da Basınç (P2): 0,0146 N/mm^2, Temas alanı (A2): 7,06 cm^2 ve Kayma hızı:13,12 cm/sn alınmıştır [7]. 34E numunenin aşınma davranışları Şekil 6.5' de görülmektedir [7].



Şekil 6.5. Tam yoğunluklu çeliğe nano elmas takviyeli krom kaplamanın aşınma kaybı-zaman grafiği [7]

Karşılaştırma yapabilmek için, bu çalışmadaki periyot değerleri dakikaya çevrilmiş, 300, 500 ve 600 periyot değerlerinin sırasıyla ~2,~3.3 ve ~4 dakikaya denk geldiği görülmüştür. Aşınma değerlerine 600 periyot (4 dakika) sonunda bakıldığında, bu çalışmadaki testlerde en yüksek aşınma kaybı 10,9 mg olurken, tam dolu çeliğe uygulanan nano elmas parçacıklı krom kaplamada ise bu değer ~20 mg'dır (Şekil 6.5).

Bu çalışmada ve tam yoğunluklu parça üzerindeki kaplamada uygulanan aşınma deneylerinde, kullanılan aşınma cihazlarının ve numune aşınmaya maruz kalan yüzey boyutlarının farklı olmasından dolayı, karşılaştırma yapılabilmesi için, aşınma kayıpları (mg), birim cm^2 deki aşınma kayıplarına (mg/cm^2) dönüştürülmüştür.

34E kodlu tam dolu numune, bu çalışmada aşınma kaybı en fazla (D5550) ve en az

(D2550) olan numunelerin test sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 6.8). Yeri gelmişken, bu çalışmadaki aşınma deneyinde, tam yoğunluklu parçalardaki kaplamalara uygulan basıncın 100 katı bir basınç uygulanmış olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

Çizelge 6.8. (a) Tam yoğunluklu parça üzerindeki kaplamanın ve (b) gözenekli toz metal parça üzerindeki kaplamanın aşınma sonuçları

(a)

Aşınma süresi (dk)	4	2
Numune kodu	34E	
Kayıp (mg)	~20	~10
Birim aşınma (mg/cm^2)	2,9	1,5

(b)

Aşınma süresi (dk)	4		2	
Numune kodu	D5550	D2550	D5550	D2550
Kayıp (mg)	10,9	2,0	7,5	1,2
Birim aşınma (mg/cm^2)	6,0	1,1	4,1	0,6

Çizelgeye bakıldığında, D2550 ve D2700 kodlu numunelerin, 34E kodlu numuneden daha az aşınma kaybı olduğu görülmüştür. Ayrıca en az aşınma kaybı görülen D2550 numunesinde, tam dolu 34E kodlu numuneden ~2 kat daha az aşınma kaybı olduğu görülmüştür. Üstelik bu değerlere, tam yoğunluklu parçalardaki kaplamalara uygulan basıncın 100 katı bir basınçla elde edilmiştir. Bu durum gözeneklerin içine kaplama maddesinin girmesi (Resim 6.14-22), böylece tutunma için daha çok yüzeyin varlığının olması, buna bağlı olarak da daha yüksek aşınma mukavemeti elde edilmesi olarak açıklanabilir. Kaplama maddesinin tutunma özellikleri için daha detaylı bir analize ihtiyaç duyulmakta olup bu çalışmada bunun üzerine yoğunlaşılmamıştır.

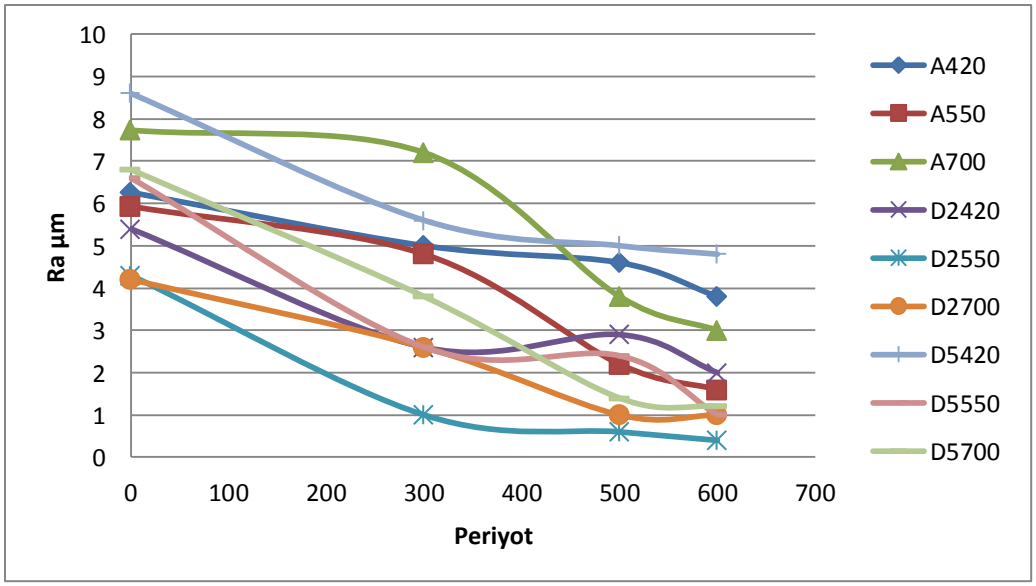
6.7. Aşınma Öncesi ve Sonrası Yüzey Pürüzlülüğünün Değişim Sonuçları

İmalatı yapılan iş parçalarının yüzey pürüzlülüğü, bu elemanların yataklama, aşınma özelliklerinin incelenmesi ve malzeme yorulması için son derece önemlidir. Bu sebeple, numunelerin aşınma öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülükleri ölçülerek, parçanın çalışma durumundaki yüzeyinde oluşan pürüzlülük değişimleri incelenmiştir. Çizelge 6.9' da

numunelerin aşınma öncesi ve sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmiştir. Sonuçlar ayrıca Şekil 6.6' da grafik olarak da sunulmuştur.

Çizelge 6.9. Aşınma önce-sonrası numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri, Raμm

	Numune kodu	Periyot			
		0	300	500	600
69.02.53	A420	6,3	5,0	4,6	3,8
	A550	5,9	4,8	2,2	1,6
	A700	7,7	7,2	3,8	3,0
69.02.507	D2420	5,4	2,6	2,9	2,0
	D2550	4,3	1,0	0,6	0,4
	D2700	4,2	2,6	1,0	1,0
69.02.510	D5420	8,6	5,6	5,0	4,8
	D5550	6,6	2,6	2,4	1,0
	D5700	6,8	3,8	1,4	1,2



Şekil 6.6. Numunelerde aşınmanın yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.6'e göre genel olarak, aşınma mesafesi arttıkça numunelerin yüzey pürüzlülüğünün orantılı olarak azaldığı görülmüştür. Kaplanan numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) 4-9 µm arasındadır. Tam dolu çeliğe uygulanan kaplamalara göre daha pürüzlü bir yüzeyle karşılaşılmıştır.

Aşınma sonrası aşınan yüzeyin yüzey pürüzlülük değerleri, tüm numunelerde düşmüş olup, aşınma mesafesi arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin de azalarak düştüğü ve yüzey pürüzlülük eğrisinin yataylaştığı görülmüştür. Böylece kaplamanın kopma eğiliminde olmadığı, sadece tepelerin kaybolduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kaplama koşullarının aynı olduğu için beklendiği gibi SEM fotoğrafları benzer çıkmıştır. Yani kaplamaların fiziki durumları benzerdir.

En yüksek sertlik değeri D2700 nolu numunede görülmüştür. Mikro sertlikte mikroskop görüntüsüne (x40) bakıldığında 69.02.507 (D2420, D2550 ve D2700) numunelerde ölçüm alanı kolaylıkla seçilebilirken, 69.02.53 (A420, A550 ve A700) de ölçüm alanlarının görülebilirliğinin azaldığı, 69.02.510 (D5420, D5550 ve D5700) da ise ölçüm alanını görmenin çok güçleştiği görülmüştür. Ölçüm alanlarının görünürlüğünün azalmasının yüzey pürüzlülük sonuçlarıyla orantılı olduğu, numunelerde yüzey pürüzlülüğü arttıkça, ölçüm alanlarının azaldığı görülmüştür. Kaplama sonrası sertlik değerlerinde, kaplama öncesi sertlik değerlerine göre önemli derecede artış olduğu görülmüştür.

Sinterleme sonrası numunelerin yoğunluk değerleri arttıkça, kaplanmış numunelerin mikro sertlik değerleri de artmıştır. Buradan, toz metalurjisi yoğunluğunun kaplamanın etkinliğine olumlu etkisi olduğu sonucu çıkarılmıştır. Kaplama öncesinde 69.02.507 nolu toz karışımı en düşük sertlik değerleri gösterirken, kaplama sonrasında ise en yüksek sertlik değerleri 69.02.507 nolu toz karışımında görülmüştür.

Toz metalurjisi yoğunluğunun kaplamanın etkinliğine olumlu etkisi olduğu görülmüş olup, kaplama altındaki ana malzemenin yoğunluk değerleri arttıkça, kaplanmış numunelerin mikro sertlik değerleri de artmıştır.

Numunelerin x50 ve x500'deki görüntülerine bakıldığında, kaplamanın boşluklu bir yapıya sahip olduğu, bu nedenle yüzey alanının görünenden daha büyük olduğu görülmüştür. Bulgaristan Bilimler Akademisinin nano elmas parçacık takviyeli krom kaplamanın tam dolu çeliğe uygulanmasında, pürüzsüz ve parlak bir kaplama elde edilmiştir. Bu çalışmadaki kaplamanın boşluklu olması; ana malzemenin toz metalürjisi yöntemi ile üretilmesi, bu sebeple ana malzemenin tam dolu olmaması ile açıklanabilir. Ayrıca, BAS ekibi tarafından, kaplama sırasında yüzey alanının hesaplanandan büyük olması, akımın eşit olarak dağıtılamaması ve ana malzemenin boşluklu olması sebebiyle kromun boşluklar arasına girememesi gibi sebeplerle olabileceği açıklanmaktadır.

Pin-on-plate aşınma cihazında, kaplanan numunelerden daha sert aşındırıcı malzeme kullanılarak 1,4 MPa basınç altında, 9 mm/sn hız ve 300, 500 ve 600 periyotta numunelerin aşınma kayıpları incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalardaki uygulanandan çok daha büyük bir yükte aşınma kayıpları başladığı görülmüştür.

Aşınma kaybı değerleri her 300, 500 ve 600 periyot sonunda mg cinsinden alınmıştır. Mesafe arttıkça aşınma kaybının azalarak arttığı görülmüştür. En fazla aşınma kaybı D5550 nolu numunede, en az aşınma kaybı da D2550 nolu numunede görülmüştür. Aşınma dayanımında en iyi sonucu 69.02.507 kodlu toza yapılan kaplamanın verdiği görülmüştür. Toz özelliklerine bakıldığında bu tozun düşük karbonlu ve içinde Ni, Mo ve Mn bulunduğu görülmektedir. Bu alaşım elementlerinin bulunduran diğer tozda ise (69.02.510) karbon oranının daha fazla olduğu görülmektedir. Buradan, düşük karbonlu parçaya kaplamanın daha iyi uygulandığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Aynı akım yoğunluğu ve proses süresindeki kaplamalar esas alınarak tam yoğunluklu çelik numunelere uygulanan kaplama karşılaştırıldığında, bu çalışmadaki kaplamalarda tam yoğunluklu parçalara uygulanan kaplamalara göre 2 kat daha az aşınma kaybı olduğu gözlenmiştir. Üstelik bu değerlere, tam yoğunluklu parçalardaki kaplamalara uygulan basınçtan 100 katı bir basınçla elde edilmiştir. Bu durum gözeneklerin içine kaplama maddesinin girmesi, böylece tutunma için daha çok yüzeyin varlığının olması, buna bağlı olarak da daha yüksek aşınma mukavemeti elde edilmesi olarak açıklanabilmektedir.

Bu çalışmada, toz metalurjisi ile üretilmiş parçalara aynı kaplama parametreli nane elmas parçacıklı krom kaplama uygulanmıştır. En iyi kaplamayı elde etmek için, farklı konsantrasyonlarda nano elmas takviye edilerek, farklı akım yoğunluklarında ve proses sürelerinde krom kaplama yapılması, kaplanan parçaların kaplama kalınlıkları, sertlikleri ve aşınma dirençlerinin ölçülmesi önerilmektedir.

Kaplanan numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) 4-9 μm arasındadır. Aşınma mesafesi arttıkça, yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı görülmüştür. Tam dolu çeliğe uygulanan kaplamalara göre daha pürüzlü bir yüzeyle karşılaşılmıştır.

Optik mikroskopta ve SEM görüntülerine bakıldığında kaplamanın gözenekli olan toz metal parçaların aralarına girdiği gözlenmiş olup, böylelikle kaplamanın ana malzemeye

tutunmasının arttığı düşünülmektedir.

Numunelerin her yüzünün kaplanmış olduğu, ancak aynı numunedeki kaplama kalınlığının değişiklik gösterdiği görülmüştür. Kaplama kalınlığının her yerde eşit olması için, elektrokimyasal yöntemi yerine akımsız kaplama yönteminin uygulanması önerilmiştir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Yüksek Teknoloji Malzemeleri Araştırma ve Geliştirme A.Ş. 2015-03-18. URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.nano-tekno.com%2Ftr%2FProducts.aspx%3FProductID%3D5&date=2015-03-18, Son erişim tarihi: 18.03.2015

2. Kaya, B. (2007). *Nano Kompozit Kaplama*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.

3. Riedel, W.(1991). Electroless Nickel Plating, *ASM International Metals Park*, Ohio, USA.

4. Mallory, G. O., Hajdu, J. B. (1990). Electroless Plating: Fundamantals and Applications, *American Electroplaters and Surface Finishers Society*, Florida.

5. Liu, Y. Y., Yu, J., Huang, H., Xu, B.H., Liu, X.L., Gao, Y., Dong, X.L. (2007). Synthesis and Tribological Behaviour of Electroless Ni-P-WC Nanocomposite Coatings, *Surface and Coatings Technology*, 201, 7246-7251.

6. Sarret, M., Müler, C., Amel, A. (2006). Electroless NiP Micro and Nanocomposite Coatings, *Surface and Coatings Technology*, 201, 389-395.

7. Kandeva, M., Gidikova, N., Valov, R., Petkov, V., Kalchevska, K. (2011). Wear Resistance of Chromium Composite Coatings Modified with Nanodiamond Particles, *the 9th Inernational Conference Coatings in Manufacturing Engineering*, 371 – 379.

8. Tomruk, S. (2010). *Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilmiş AA2014 Alüminyum Alaşımının Mikroyapısal Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi

9. Mahmutoğlu, S. H. (2006). *Toz Metalurjisi Yöntemiyle Yüzeyine Karbür Takviye Edilmiş Düşük Karbonlu Çeliklerin Üretimi ve Mikroyapısı*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi

10. German, R. M. *Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri* (Çev. S.Sarıtaş, M.Türker and N.Durlu), 05, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, (Eserin orijinali 2005'te yayımlandı),1-298.

11. Ataç, A. M. (2011). *Çinko-Alüminyum (Za) Alaşımlarının Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi, Karakterizasyonu ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi

12. Aksöz, S. (2009). *Al4C3 Fazının Karbon ve AA2014 Tozlarından Katı Faz Reaksiyon Tekniği İle Oluşturulması ve Yaşlanmaya Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi

13. Milli Eğitim Bakanlığı. (2012). *Uçak Bakım, Uçak Gövde Yapısı* (525MT0009). Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı, 36.

14. İnternet: Kaplama Teknikleri Ders Notları, 2015-03-18. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kimmuh.com%2Fevcin%2Fcoating%2Fcoating4.pdf&date=2015-03-18 , Son Erişim Tarihi: 18.03.2015.

15. Nguyen,V., Hoang,T., Nguyen,N., Kwon,S., Kım,M., Lee,J. (2009). Cr/nanodiamond composite plating with cobalt cation additive, *Transaction Nonferrous Metals Society of China* ,975−978.

16. Kandeva, M., Karastoianov, D., Ivanova, B., Pojidaeva, V. (2014). Influence of Nano Diamond Particles on the Tribological Characteristics of Nickel Chemical Coatings, *Tribology in Industry*, Vol. 36, No. 2,181-187.

17. Ünlü, B.S, Paralı, L., Pinar, A.M. (2009). Pim-Disk, Pim-Plate, Pim-Ring, Mil-Yatak Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye.

18. Topuz, A., Mollaoğlu, H. Baykal, Ş. (2008). Sinterlenmiş ve Sinterlenmemiş Toz Metalurjik Parçaların Ultrasonik Yöntemle Karakterizasyonu, *3rd International Non-Destructive Testing Symposium and Exhibition*, İstanbul,Türkiye.

19. Yalçın, B. ve Varol, R. (2009). Sinterlenmiş Titanyum Alaşımlarının Aşınma Performansı ve Bazı Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 24, No 1, 63-72.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : ERDOĞAN, Ayşe Kübra
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1989, Keçiören
Medeni hali : Bekâr
Telefon : 0 (312) 212 08 26
Cep : 0 (545) 764 54 59
e-mail : akubra.erdogan@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Makina Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi/Makina Mühendisliği	2012
Lisans	Gazi Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	2011
Lise	Abidinpaşa Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-…..	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı	Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Yayınlar

- Erdoğan, A.K. and Usta, Y. (2015), Elmas Nanoparçacık Takviyeli Krom Kaplanmış Gözenekli Toz Metal Parçaların Aşınma Davranışlarının Araştırılması, *2nd International Iron and Steel Symposium (IISS'15), April 1-3, 2015, Karabuk, Turkey.*



GAZİ GELECEKTİR..