

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALAŞIM (Mo-Cu), KATOT KULLANARAK (Mo-N-Cu) NANOKOMPOZİT
KAPLAMALARIN ARK FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mortaza MOHAMMADIMOGHANJOUGHİ

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

OCAK 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALAŞIM (Mo-Cu), KATOT KULLANARAK (Mo-N-Cu) NANOKOMPOZİT
KAPLAMALARIN ARK FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mortaza MOHAMMADIMOGHANJOUGHİ
521091026**

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

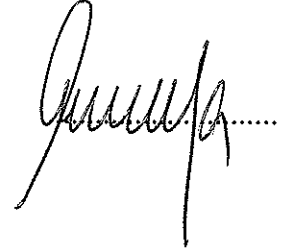
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN

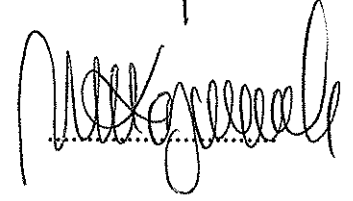
OCAK 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 521091026 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mortaza MOHAMMADIMOGHANJOUGHİ** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ALAŞIM (Mo-Cu), KATOT KULLANARAK (Mo-N-Cu) NANOKOMPOZİT KAPLAMALARIN ARK FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN
İstanbul Teknik Üniversitesi



Jüri Üyeleri : DOÇ. Dr. Kürşat KAZMANLI
İstanbul Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Gökhan ORHAN
İstanbul Üniversitesi



Teslim Tarihi : 14 Aralık 2012
Savunma Tarihi : 10 Ocak 2013

Anneme ve Babama,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım ve tüm laboratuvar imkânlarını bana sunan sayın danışman hocam Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN'e ve fikir ve deneyimlerini benden esirgemeyen sayın Doç. Dr. Kürşat KAZMANLI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Doç. Dr. Nuri SOLAK'a İTÜ'ye ilk geldiğimde çok yardımcı olduğundan özel teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tez çalışmalarımın başlangıcından itibaren deneylerimde bana her zaman yardımcı olan, bana destek olan tüm sevgili arkadaşlarım, Elif YÜREKLİ'ye, Semih ÖNCEL'e, Emre Alp'a, Münevver UZUN'a, Serkan OKTAY'a, Shahram ALİREZAYİ'ye, Farideh TABATABAYİ'ye, Sinem ERASLAN'a, Erkan KAÇAR'a, Dursun EKREN'e, Özcan BİRSÖZ'e, Ebru ÖZEL'e, Nagihan SEZGİN'e, Sinan AKKAYA'ya, Dilek DEMİROĞLU'na, Beril KOZÇAZ'a, Cihan KUZU'ya ve Semanur BAYLAN'a sonsuz teşekkür ederim. Tüm hayatım boyunca bu güne kadar bana verdikleri desteklerden dolayı sevgili AİLEM'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2012

Mortaza MOHAMMADI
MOGHANJOUGHİ
(Fizik Müh.)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. SERT VE ÇOK SERT KAPLAMALAR.....	5
2.1 Nanokompozit Kaplamalar	6
2.2 MoN...X Kaplama Sistemi	8
3. KAPLAMA YÖNTEMLERİ	13
3.1 Katodik Ark FBB Kaplama Yöntemi.....	13
3.2 Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemi.....	14
3.3 Hibrit Kaplama Yöntemi	17
4. TRİBOLOJİK SİSTEM	19
4.1 Giriş.....	19
4.2 Sürtünme, Aşınma ve Yağlama.....	19
4.2.1 Sürtünme	19
4.2.2 Aşınma	21
4.2.2.1 Adhesif aşınma.....	21
4.2.2.2 Abrazif aşınma	21
4.2.2.3 Korozif aşınma.....	22
4.2.2.4 Yüzey yorulması	22
4.2.3 Yağlama (yağlar ve özellikleri).....	23
4.2.3.1 Sıvı yağlar	23
4.2.4 Katı yağlayıcılar	24
4.2.4.1 Katı yağlayıcıların sınıflandırılması.....	25
4.3 Kaplamaların Tribolojisi	26
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	27
5.1 Numunelerin Hazırlanması	27
5.2 Alaşım (Mo-Cu) Katotla Kaplamaların Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi ile Üretilmesi	28
5.3 Kaplamaların Karakterizasyonu	29
5.3.1 Kaplamaların XRD analizi ve oluşan fazların tayini	29
5.3.2 Kaplama kalınlıklarının ölçümleri	29
5.3.3 Kaplamaların mikro sertlik ölçümleri	30
5.3.4 Kaplamaların EDS analizleri ve SEM kesit ve yüzey görüntüleri.....	30
5.3.5 Rockwell C testi	30
5.3.6 Kaplamaların yapışma özelliklerinin incelenmesi (Scratch test).....	31
5.4 Kaplamaların Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi.....	31

5.4.1 Kaplama ve karşıt yüzeylerin aşınma izlerinin belirlenmesi	32
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
6.1 Kaplamaların Karakterizasyon İşlemleri	33
6.1.1 Kaplamaların kimyasal bileşimleri ve oluşan fazların tayini	33
6.1.2 Kaplamaların yüzey ve kesit görüntülerinin incelenmesi	35
6.1.2.1 Kaplamaların yüzey görüntülerinin incelenmesi.....	35
6.1.2.2 Kaplamaların kesit görüntülerinin incelenmesi.....	36
6.1.3 Kaplamaların mikro sertlik ve kalınlık ölçümleri	37
6.1.4 Kaplamaların ESD analizi	38
6.1.5 Kaplamaların Rockwell C testi	39
6.1.6 Kaplamaların yapışma özelliklerinin incelenmesi (Scratch test)	41
6.1.7 Kaplamaların aşınma deneylerinin sonuçları	45
7. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	51
KAYNAKLAR.....	53
EKLER.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	61

KISALTMALAR

FBB	: Fiziksel Buhar Biriktirme
XRD	: X-Işınları Difraktometresi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
PVD	: Physical Vapor Deposition
VSI	: Vertical Scanning Interferometry
At.%	: Atomik yüzde
µm	: Mikrometre
PVD	: Physical Vapor Deposition
MS	: Magnetron Sputtering
CAPVD	: Cathodic Arc Physical Vapor Deposition
CoF	: Coefficient of Friction
Pa	: Pascal
°C	: Celcius sıcaklığı
Nm	: Nanometre
JCPDS	: Joint Committee on Powder Diffraction Standarts
YHÇ	:Yüksek Hız Çeliği
DC	: Doğru akım
SCCM	: Dakika başına standart santimetre küp
Nc	: Nanokompozit
A	: Amper
V	: Volt

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : MoN, TiN ve CrN kaplamalara katkılandırılan Cu içerikleri, kaplama kalınlıkları ile sertlik değerleri ..	10
Çizelge 4.1 : Çeşitli katı yağlayıcılar için sürtünme katsayıları ..	25
Çizelge 5.1 : Yüksek hız çeliğinin bileşimi ..	27
Çizelge 5.2 : Ark FBB kaplama parametreleri ..	28
Çizelge 5.3 : Manyetik alanda sıçratma kaplama parametreleri.....	28
Çizelge 5.4 : Disk üzeri pin deneylerinde kullanılan parametreler ..	32
Çizelge 6.1 : Ark fiziksel buhar biriktirme ve manyetik alanda sıçratma yöntemi ile kaplanan numunelerin kalınlık, Normalize elastisite modülü (E^*), ve sertlik değerleri.....	38
Çizelge 6.2 : 100A ark FBB ile kaplanan numunenin EDS analizi.....	39
Çizelge 6.3 : 120A ark FBB ile kaplanan numunenin EDS analizi.....	39
Çizelge 6.4 : Çizik (Scratch) testi deneylerinde uygulanan parametreler.....	42
Çizelge 6.5 : Kaplamaların ortalama sürtünme katsayısı değerleri ..	49

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : nc-TiN/a-Si ₃ N ₄ /a- ve nc- TiSi ₂ nanokompozit kaplamaların şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.2 : Mo-N ve Mo-N-Cu kaplamaların üç farklı nem oranına sahip ortamlarda kazımalı aşınma deneyleri sonucu mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değerleri.....	10
Şekil 2.3 : SEM kesit görüntüleri a) MoN kaplama b) MoN-Cu kaplama.....	11
Şekil 2.4 : Disk üzeri top deneyi ile elde edilen sürtünme katsayıları a)MoN, CrN ve TiN kaplamalar b) TiN-Cu, CrN-Cu ve MoN-Cu içerikli kaplamalar.....	11
Şekil 3.1 : Katodik ark FBB kaplamalarda kullanılan cihazın görünümü.....	14
Şekil 3.2 : Manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi.....	14
Şekil 3.3 : Manyetik alanda sıçratma yönteminde hedef malzeme atomunun inert gaz iyonu tarafından sıçratılması.....	15
Şekil 3.4 : Farklı manyetik alanda sıçratma yöntemleri kullanılarak oluşturulan plazma bölgeleri a)konvansiyonel (dengeli) b) dengesiz c) kapalı alan dengesiz sistem.....	16
Şekil 3.5 : Katodik ark ve manyetik alanda sıçratma kaynaklarının beraber kullanıldığı (hibrit kaplama) sisteminin şematik gösterimi.....	17
Şekil 4.1 : Statik ve kinetik sürtünme katsayıları.....	20
Şekil 4.2 : Adhesif aşınma.....	21
Şekil 4.3 : Abratif aşınma.....	22
Şekil 5.1 : Struers RotoPol-25 parlatma cihazı.....	27
Şekil 5.2 : Fiziksel Buhar Biriktirme kaplama cihazı.....	28
Şekil 5.3 : Kalotest sistemi a) test düzeneği b) oluşan izin üstten görünüşü c) kesit görüntüsü.....	29
Şekil 5.4 : JEOL JSM-7300 model SEM.....	30
Şekil 6.1 : 100A Ark FBB'ile kaplanan numunenin XRD difraksiyon paterni.....	33
Şekil 6.2 : 120A Ark FBB'ile kaplanan numunenin XRD difraksiyon paterni.....	34
Şekil 6.3 : XRD difraksiyon paternleri.....	34
Şekil 6.4 : 100V bias Magnetron FBB kaplamanın XRD difraksiyon paterni.....	35
Şekil 6.5 : 120V bias Magnetron FBB kaplamanın XRD difraksiyon paterni.....	35
Şekil 6.6 : 100 A de kaplanan numunenin SEM yüzey görüntüsü. a) Kaplamadan sonraki görüntüler, b) Parlattıktan sonraki yüzey görüntüleri.....	36
Şekil 6.7 : 120 A de kaplanan numunenin SEM yüzey görüntüsü. a) Kaplamadan sonraki görüntüler, b) Parlattıktan sonraki yüzey görüntüleri.....	36
Şekil 6.8 : 100 ve 120A de SEM kesit görüntüleri.....	37
Şekil 6.9 : 100V Bias manyetik alanda sıçratma kaplamanın SEM kesit görüntüsü.....	37
Şekil 6.10 : 100A ArkFBB.....	40
Şekil 6.11 : 120A ArkFBB.....	40
Şekil 6.12 : 100V bias Manyetik alanda sıçratma FBB.....	40
Şekil 6.13 : 120V bias Manyetik alanda sıçratma FBB.....	41
Şekil 6.14 : Çizik testi prensibi.....	41

Şekil 6.15 : Çizik deneyi sırasında akustik emisyon sinyallerinin uygulanan yüke bağlı değişimi	42
Şekil 6.16 : 100 A katodik Ark FBB'nin çizik testi (AE)-(Fz)-(X) grafiği	43
Şekil 6.17 : 120 A katodik Ark FBB'nin çizik testi (AE)-(Fz)-(X) grafiği	43
Şekil 6.18 : 100 V Bias Magnetron FBB'nin çizik testi (AE)-(Fz)-(X) grafiği.....	44
Şekil 6.19 : 120 V Bias Magnetron FBB'nin çizik testi (AE)-(Fz)-(X) grafiği.....	44
Şekil 6.20 : a)100A b)120A ArkFBB ve c)100V d)120V bias magnetron FBB	45
Şekil 6.21 : 100 A Ark FBB kaplamanın 3D (sol) ve pinin 2D (sağ) görüntüsü.....	46
Şekil 6.22 : 100A, Sürtünme katsayısı grafiği	46
Şekil 6.23 : 120 A Ark FBB kaplamanın 3D (sol) ve pinin 2D (sağ) görüntüsü.....	46
Şekil 6.24 : 120A, Sürtünme katsayısı grafiği	47
Şekil 6.25 : 100V bias manyetik FBB kaplamanın 3D (sol) ve pinin 2D (sağ) görüntüsü	47
Şekil 6.26 : 100V, Bias Sürtünme katsayısı grafiği	48
Şekil 6.27 : 120V bias manyetik FBB kaplamanın 3D (sol) ve pinin 2D (sağ) görüntüsü.....	48
Şekil 6.28 : 120V, Bias Sürtünme katsayısı grafiği	48

ALAŞIM (*Mo-Cu*), KATOT KULLANARAK (*Mo-N-Cu*) NANOKOMPOZİT KAPLAMALARIN ARK FİZİKSEL BUHAR BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Nanokompozit kaplamalar geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip olmaları ve kimyasal olarak inert bir yapı sergilemeleri dolayısıyla sürtünme ve aşınma direncini azaltmaktadırlar. *Mo-N-Cu* kaplamalar özellikle yağlı ortamda üstün aşınma ve sürtünme özellikleri sergilemektedir. Bu kaplamaları farklı fiziksel buhar biriktirme yöntemleri kullanarak üretmek mümkündür. Farklı kaplama yöntemlerinin üretim amacı ile kullanılması halinde kaplamaların yapısal ve fiziksel özelliklerinde değişiklikler olması beklenen bir durumdur.

Bu çalışmada, alaşım katot kullanarak katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile *Mo-N-Cu* kaplamalar üretilmiş ve tanımlanmıştır. Bu kaplamalar manyetik alanda sıçratma yöntemi ile üretilen *Mo-N-Cu* kaplı numuneler ile yapısal ve mekanik özellikleri gözönüne alınarak karşılaştırılmıştır.

Ark FBB yöntemi ile yapılan kaplamalarda toz metalürjisi yöntemi ile üretilen ve at %10 bakır içeren katotlar kullanılmıştır. Kaplamalar iki farklı katot akımı kullanarak (100 ve 120A) 100 V bias voltajı altında, 450-500 C sıcaklıkta, 5 mtorr azot basıncında yapılmıştır. Kaplamalar yüksek hız çeliği taban malzemeler üzerinde biriktirilmiştir. Toplam kaplama süresi 60 dakikadır. Manyetik alanda sıçratma yöntemi ile üretilen kaplamalar ise ticari olarak üretilmiş kaplama örnekleridir.

İki farklı yöntemle üretilen kaplamalar, XRD yöntemi kullanılarak yapısal olarak tanımlanmıştır. Numunelerin üzerinde kaplama kalınlık, sertlik ölçümleri yapılmış, yapışma özellikleri belirlenmiş ve kırık yüzey ve kesit incelemeleri yapılmıştır. Kaplamaların aşınma özellikleri disk üzerine pim yöntemi kullanılarak yağlı ortamda incelenmiştir.

XRD sonuçlarına göre manyetik alanda sıçratma ve 100 A katot akımı kullanılarak yapılan kaplamaların kübik Mo_2N yapısında olduğu, 120 A katot akımı kullanılarak üretilen kaplamaların ise kübik Mo_2N ve hekzagonal MoN karışımı halinde olduğu belirlenmiştir. Tüm kaplamalara ait piklerde değişik oranlarda düşük açılara doğru kaymaların varlığı kaplamaların basma yönünde iç gerilme içerdiğini göstermiştir.

Ark FBB yöntemi ile üretilen kaplamaların sertlikleri beklenildiği üzere daha yüksektir ve 26-28 GPa aralığında değişmektedir. Manyetik alanda sıçratma yöntemi ile üretilen kaplamaların sertlikleri ise 19-20 GPa aralığındadır.

Kaplamaların kırık yüzeyleri incelendiğinde ark yöntemi ile üretilen kaplamaların tamamen eş eksenli yapıya dönüştüğü ve kolonsal yapının ortadan kalktığı, manyetik

alanda sıçratma ile üretilen kaplamalarda ise kolonsal yapının hala varlığını sürdürdüğü gözlenmiştir.

Kaplamaları yapışma özellikleri hem Rockwell C hem de çizik yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar her iki tür kaplamanın da yüzeye yapışma özelliklerinin iyi olduğu belirlenmiştir.

Kaplamaların, yüksek hız çeliği pimler kullanılarak, 20 N yük altında ve 2cm/s hızla formüle edilmiş yağda yapılan aşınma deneyleri sonucunda tüm kaplamaların oldukça düşük sürtünme katsayıları (0.03-0.06) verdiği belirlenmiştir. Deney öncesi kaplamaların yüzeyleri 2500-4000 grid SiC zımpara kullanılarak parlatılmıştır. Aşınma deneyleri sonucu sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Tüm kaplamalarda ve karşıt yüzeylerde aşınma izlerine rastlanmamıştır.

Sonuç olarak her iki kaplama yöntemi kullanılarak yapılan kaplamaların benzer aşınma davranışı gösterdikleri belirlenmiştir. Buna göre daha hızlı kaplama olanağı sağlayan katodik ark yöntemi kullanılarak bu kaplamaların istenilen özelliklerde üretilebileceği ortaya konulmuştur.

**PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF Mo-N-Cu,
NANOCOMPOSITE COATINGS DEPOSITED BY ARC PVD USING (Mo-Cu)
ALLOY CATHODE**

SUMMARY

Hardness of materials can be defined as resistance to deformation of materials. Upper hardness limit of materials are related to their crystal structure rigidity. Developments in technology require materials with high strength, hardness and toughness, and that can preserve their stability at high temperature.

PVD coating techniques are widely used for the production of hard coatings. The flexibility of the techniques for tuning composition and their ability of producing compounds difficult to prepare by bulk production techniques made them very suitable for the development of compounds with different properties. One of the recent developments in this area is nanocomposite structures. Two main approaches are used for the production of nitride based hard coatings. One of them is codeposition of two hard immiscible phases like nc-TiN/a-Si₃N₄/a and nc-TiSi₂, which leads to hardness increase and refinement of the coating structure. Coatings produced in this manner are now used by the industry for machining and high temperature applications.

The other approach used for the production of nanocomposite coatings is codeposition of one hard nitride based compound together with a soft metal which does not produce nitrides. Examples of these coatings are Zr-Cu-N, Ti-Cu-N, Cr-N-Cu, Mo-Cu-N and Al-Cu-N. The coatings produced by this approach also results in an increased hardness and refinement of grain size. The industrial application of these coatings are not as widespread as hard-hard nanocomposite coatings due to their low oxidation resistance and their reactivity with the work piece during machining processes. However, with a combined research activity conducted collaboratively between our research group and Argonne National Laboratories the outstanding property of Mo-N-Cu based coatings has been discovered. These coatings showed a very promising property under lubricated contacts. They not only gave low CoF but also did not wear away the counter bodies under boundary lubrication conditions which made them a very good candidate for using on parts that work under boundary or mixed lubrication conditions (piston rings, tappets, piston pins etc) in the automotive industry. These coatings are produced in industrial scale by magnetron sputtering technique using Mo-Cu alloy cathodes. This study aims to produce the same coatings with CAPVD using Mo-Cu alloy cathodes for benefiting from the higher deposition speed and better adhesion properties of CAPVD coated films.

In this investigation high speed steel discs (HSS) are used as substrates. Substrates are subjected to a polishing procedure for producing surfaces with a Ra of 0.14-0.15 μm. Before placing the samples into the vacuum chamber, they are cleaned in an hot

alkaline bath ultrasonically and then dried in propanol. After evacuation of chamber down to 5×10^{-5} torr, the samples are heated and sputter cleaned by arc plasma of the cathode with successive application of -600, -800 and -1000 V. each for 1 min. This process not only cleaned the sample surfaces further but also heated them to a temperature of 450-500 C. After heating the samples the coating process is initiated by introducing nitrogen gas (5 mtorr nitrogen pressure) and lowering the bias voltage to -100 V. Total deposition duration was 1 hour for all coatings. Only cathode current was used as a parameter during the deposition. Two sets of samples are prepared by using 100 A and 120 A cathode current. As cathodes Mo-10at% Cu alloys cathodes produced by powder metallurgy technique was used. The magnetron sputtered samples was obtained from a batch that was commercially produced using -100 and -120 V bias voltage using Mo-Cu alloy targets.

Coated samples produced both by CAPVD and MS are then subjected to characterization studies. Their structures are determined by XRD. The XRD investigation are made in thin film mode of the diffractometer with angle of incidence 2° by using $\text{CuK}\alpha$ radiation. Hardness measurements were conducted by using an ultramicrohardness tester with depth sensing properties. Thickness of the samples are measured with calotest technique. Their chemical composition are analyzed with SEM equipped with EDS. Fracture cross sections of the samples are prepared by breaking them after cooling in liquid nitrogen and investigated with SEM. Adhesion properties of the coatings are measured by using both Rc and scratch tests.

Tribological properties of the coating are determined in lubricated environments by using pin on disc technique. Coated circular samples and high-speed steel pins are used as disc and pin in the experiments. Before conducting the tests the surface of samples are slightly polished by using 2500 and 4000 grid SiC paper. During this process droplets that existed on the surface of the CAPVD coated samples are removed. High loads (20N) and low speed (2cm/s) was used during the experiments for ensuring the boundary lubrication conditions. As lubricant commercial fully formulated 10W-40 synthetic oil was used. After the tests surfaces of both pin and disc are investigated by optical 3D surface profilometer.

The XRD results showed that the coatings produced by arc PVD by using 100 A cathode current and magnetron sputtering had cubic Mo_2N structure. However, the coating produced with a 120 A cathode current possessed a structure composed of a mixture of hexagonal MoN and cubic Mo_2N phases.

The hardness of the coatings showed a dependence on the coating method. Coatings produced with CAPVD are comparably harder (26-28 GPa) than the magnetron sputtered ones (19-20 GPa).

Although the copper contents of all the coatings were close to each other (8-12 at%) the cross sections of the coatings showed appreciable differences; namely CAPVD coatings possessed a very dense featureless structure, on the other hand the columnar structure was still prevailing in magnetron sputtered coatings.

The results of Rockwell and scratch tests revealed that there was no adherence problem for of all the coatings investigated in this study. The lubricated wear test results showed that there was no appreciable difference on the tribological behavior

of CAPVD and MS coatings rubbing against HSS pins. For all coating the CoF was very low (0.03-0.06) and no wear was detected both on the disc and the pin. These results are in accordance with the studies previously conducted in our group.

The results of this study has shown that it is possible to use alloyed Mo-Cu cathodes for the production of Mo-N-Cu nanocomposites. These coatings are harder and denser than the magnetron sputtered ones. The deposition duration is for achieving the required coating thicknesses are low. However, there are substantial amount of droplets on CAPVD coatings which require polishing for their removal. The heat input arousing from the cathodes that are running at high currents leads to an increase of the substrate temperatures above 400 C. This makes CAPVD process unsuitable for substrates that may loose their mechanical properties by heating to these temperatures. The tribological properties of the coating under boundary lubrication conditions used in this study did not show any appreciable difference when compared to the ones prepared by magnetron sputtering. As a result this study clearly revealed that MoCu alloy cathodes can be used for the prodcution of Mo-N-Cu coatings as an alternative to MS.

1. GİRİŞ

Nanoteknoloji interdisipliner ve çok geniş alan olması nedeni ile büyük ve hızlı bir şekilde ilerlemektedir. Günümüzde nanoteknoloji araştırmaları sebebi ile çok yeni ve değişik özelliklere sahip malzemeler üretilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu yeni bilim dalı kimya, fizik, bioloji, ve mühendislik dallarının neredeyse hepsini kapsayıp ve bir araya getirmektedir.

Malzemelerin boyutları nano seviyesine geldiğinde tane boyutlarında olan manyetik, elektrik, optik, mekanik ve kimyasal özelliklerinde ciddi değişimlerin söz konusu olduğu saptanmıştır.

Nanokompozit kaplamalar geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip olmaları ve kimyasal olarak inert bir yapı sergilemeleri dolayısıyla sürtünme ve aşınma direncini azaltmaktadırlar.

Çeşitli kaplama yöntemlerinden yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) tekniğidir. FBB tekniği ile üretilen ince sert seramik kaplamalar, üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinden dolayı bir çok alanda kullanılmaktadırlar. FBB' ile kaplanan malzemeler içerisinde nitrürler ve karbürler, kaplandıkları altlık malzemelerine iyi yapışma özelliği göstermeleri, aşınma özelliğinin son derece iyi olmasından dolayı teknolojik olarak en çok kullanılan kaplama çeşitleri olarak tanımlanmaktadırlar.

Bu çalışmada, %10 Cu içeren alaşım (Mo,Cu)katot ile katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle üretilmiş olan Mo-N-Cu kaplı numunelerin ve manyetik alanda sıçratma yöntemiyle kaplanan numunelerin yağlı ortam içerisindeki aşınma özellikleri karşılaştırılmıştır.

Taban malzeme olarak yüksek hız çeliği (YHÇ) kullanılmıştır. Mo-N-Cu kaplı numunelerin XRD, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)–EDS (Enerji Dağılım Spektrumu), yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve kalınlık ve Rockwell C testi ve Scratch çizik testi analizleri alınmıştır.

Mo-N kaplamalara yumuşak metallerin katkılandırılmasıyla örneğin bakır(Cu), gümüş(Ag), kalay(Sn) gibi elde edilen nanokompozit kaplamalar ile oda

sıcaklığındaki sürtünme özellikleri ve yağlı ortamlarda sürtünme ve aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi mümkündür [1-2-3-4]

Bu çalışmada alaşım Molibden,Bakır (Mo,Cu) katot kullanarak ark fiziksel buhar biriktirme (FBB) yöntemi ile ilk gurup kaplamalar üretilmiştir. Bu kaplamaların yanısıra manyetik alanda sıçratma yöntemi ile kaplanan numunelerin ilk gurup numunelerle karakterizasyon işlemleri kıyaslanması gerçekleştirilmiştir. Daha önce laboratuvar gurubumuz tarafından yapılan ark FBB ve manyetik alanda sıçratma yöntemi ve bu iki yöntemi bir arada kullanarak hibrit kaplama yöntemleri ile yapılan çalışmaların karakterizasyon işlemleri sonuçları ile örtüşmektedir.

Bu çalışmada iki gurup kaplanmış numunelerin değişken parametreleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Alaşım (Mo,Cu) katot ile yapılan ark FBB yöntemindeki kaplamaların sadece katot akımı değişikliği baz alınarak iki numunede kaplama yapılmıştır. İlk numunede 100A ve ikinci numunede ise 120A katot akımı uygulanarak kaplamalar üretilmiştir.
2. Manyetik alanda sıçratma yöntemi ile yapılan kaplamalarda ise DC bias voltaj değiştirilerek iki farklı numune kaplanmıştır. İlk numunede 100V bias DC ve ikinci numunede ise 120V bias uygulanmıştır.

Kaplamaların XRD ve EDS analizleri yapılarak kimyasal bileşimleri ve faz yapıları belirlenmiştir. Kaplamaların yüzey ve kesitlerinden alınan SEM görüntüleri elde edilerek film morfolojileri yorumlanmıştır. Kaplamaların kalınlıkları ve sertlikleri, sırasıyla kalotest ve mikrosertlik analizleri ile incelenmiştir. Mobil 1 0W-40 marka formüle yağ kullanılarak, sınır yağlama koşullarında disk üzeri pin (pin on disk) aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir ve kaplamaların sürtünme ve aşınma özellikleri hesaplanmıştır. Daha sonra Rockwell C testi ve Scratch çizik testi sonuçlarına bakılarak kaplamaların taban malzemeye yapışması incelenmiştir.

Dünyada üretilen enerjinin neredeyse 1/2 veya 1/3'ünün sürtünme ve aşınmaya bağlı olumsuzlukları giderebilmek için harcandığı düşünülmektedir[5]. Otomobil motorları gibi sistemlerde ise sürtünme den kaynaklanan enerji kayıpları ciddi miktarlarda olup ve bu kayıp olan enerjiler motor parçalarının niteliğine göre toplam enerjinin %5'i ile %15'i arasında değişerek harcanmaktadırlar [6]. Bu sebeplerden dolayı ince film kaplama teknikleri bu kayıpları önlemek veya azaltmak için aşınma ve sürtünmeden kaynaklanan sorunların gidermesinde önemli bir rol ve etkiye sahiptirler. Çok katmanlı filmler, süperlatis kaplamalar ve nanokompozit kaplamalar üretmek,

sürtünme katsayısını ve aşınmayı azaltmaya dayalı çeşitli yöntemler olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada, alaşım katot ile katodik ark fiziksel buhar brikirme yöntemiyle üretilmiş olan kaplamalar ve manyetik alanda sıçratma yöntemiyle Mo-N-Cu kaplı numunelerin karakterizasyonu karşılaştırılmıştır.

2. SERT VE ÇOK SERT KAPLAMALAR

Seramik kaplamaların sertliklerini göz önüne alarak kaplamalar iki guruba ayırmak mümkündür:[7]

1. Sert Kaplamalar: Sertliği 40GPa'dan düşük kaplamalar.
2. Çok Sert Kaplamalar: Sertliği 40GPa'dan yüksek kaplamalar.

Seramik kaplamaları incelediğimizde çok sert kaplama sınıfına giren az sayıda kaplama olduğu bilinmektedir. Kübik bor nitür (c-BN), elmas benzeri karbon kaplamalar (Diamond Like Carbon), elmas kaplamalar ve amorf karbon nitür ($a\text{-CN}_x$), bu tip çok sert kaplamaların örnekleridir. Bu kaplamaların termodinamik olarak kararlı olmamaları, uygulama alanlarını büyük ölçüde sınırlandırmaktadır. Örneğin, karbonun demire olan yüksek kimyasal ilgisi elmas kaplamaların sadece alüminyum ve alaşımlarını kullanılmasına neden olmaktadır.

Sertlik özelliği, bir malzemede malzemenin deformasyona karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür. Her malzemenin üst sertlik limiti, kristal yapısının rijitliği ile tanımlanabilir.

1. Atomların yüksek koordinasyon sayıları,
2. bağların kovalent karakterde olması,
3. atomlar arası mesafenin kısalığı,

kristal yapıların kararlılığını etkileyen üç ana faktörüdür. Yüksek koordinasyon sayısı atomların etrafında çok sayıda komşu atom bulunmasını ve atomların daha fazla bağ yapmasını sağlar. Elmas ve grafit arasındaki sertlik farkının nedenidir. Elmas (tetrahedral) sp^3 koordinasyonuna, grafit ise sp^2 koordinasyonuna sahiptir. Bağların kovalent karakterinde olması ise, atomlar arasındaki bağların çok kuvvetli olmasını ve atomların latis pozisyonlarında sağlam bir şekilde kalmalarını sağlar. Kovalent bağlar atomların birbirleri üzerinde kaymalarını engeller. Böylece kovalent bağlı malzemeler deformasyona uğramak yerine kırılırlar. Yani bu malzemeler sert ama kırılgandırlar. Küçük atom boyutları ise, bağların daha kısa olmasını ve bağların dayanıklılığının artmasını sağlamaktadır. C, Si, ve Ge' un alfa fazları kovalent bağlıdır ve elmas ile benzer yapıya sahiptir. Bu malzemelerin sertliklerindeki

farklılıklar tamamen atom boyutuları ile değişmektedir. Atom boyutu arttıkça sertlik düşmektedir. Elmas ise, bu elementler içinde karbon atomunun küçük boyutlu olması nedeniyle en yüksek sertliğe sahip malzemedir.

2.1 Nanokompozit Kaplamalar

Nanokristalin alaşım kaplamalarda sisteme azot ilave edilerek nanokompozit kaplamalar üretilebilir. Nanokristalin filmlerin yapısı uygulanan bias voltajı, kaplama sıcaklığı ve kısmi azot basıncı ile kontrol edilebilir.

Çok yüksek sertliğe sahip nanokompozit kaplamaları kompoziti oluşturan iki fazın sertliğine göre ikiye ayırmak mümkündür:

1. nc-MeN/nitrür. (Örn. α - Si_3N_4 , α - TiB_2)(α : amorf)
2. nc-MeN/metal. (Örn. Cu, Ni, Y, Ag, Co)

İki grupta da sertlik, 10GPa gibi düşük değerlerden, 50-70 GPa gibi çok yüksek değerlere kadar geniş bir aralıkta değişim göstermektedir. Nanokompozit kaplamaların sertlikleri tamamen mikroyapısal özelliklerine bağlıdır. Sert ve çok sert nanokompozit kaplamalar arasında yapısal olarak incelendiğinde ciddi farklar olduğu gözlenmektedir.

Sert nanokompozit kaplamalarda

1. Kompoziti oluşturan iki faz da kristalindir.
2. İki fazda da kristalografik olarak tercihli bir yönelme yoktur.

Çok Sert nanokompozit kaplamalarda ise;

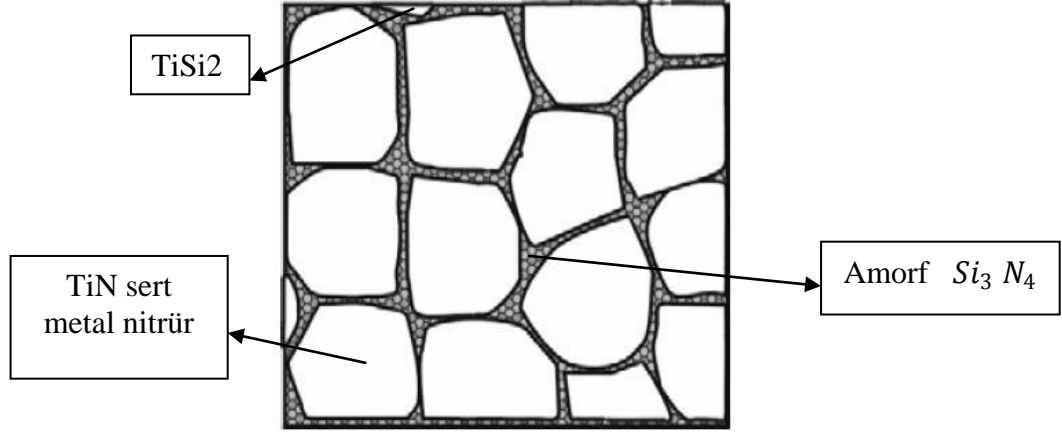
1. kompoziti oluşturan iki fazdan biri kristalin diğeri ise amorf yapıdadır.
2. Kristalin fazda kristalografik olarak güçlü bir yönelme söz konusudur.[1]

Nanokompozit kaplamalar bir veya iki sert kristalin faza sahiplerdir. İkinci faz ise ya amorf ya da kristalindir.

Nanokompozit kaplamaların üretimi konusunda literatürde iki yaklaşımdan temel olarak söz etmek mümkündür. Birincisi Veprek'in [8,9] yaklaşımı olan iki fazın da sert olduğu nanokompozit kaplamalar, ikincisi ise Musil'in [10,11] yaklaşımı olan sert ve yumuşak fazlardan oluşan nanokompozit kaplamalardır.

Veprek'in [8,9] yaklaşımında kompozit kaplamalarda çok yüksek sertliklere ulaşmak için tane sınırlarında güçlü bağın yanı sıra iki fazın da sert olması ve mutlaka bir fazın amorf karakterde olması gerektiğini savunulmaktadır. İki fazın da nanokristalin olduğu durumda ise yine yüksek sertlikler elde edilmekte ama amorf durumdaki

sertlik değerine ulaşılmamaktadır. Tane boyutlarının küçülmesi sertlik değerini arttıran ayrı bir faktör sayılabilir. Sertlikte artış sağlanmak için, tane boyutu kritik tane boyutuna kadar küçülmesi gerekmektedir. Veprek nc-TiN/a- Si_3N_4 /a ve nc-TiSi₂ nanokompozit kaplamalarla (şekil 2.1) yaptığı çalışmada [9] sertlik artışı ile ilgili başka bir noktayı vurgulamaktadır.



Şekil 2.1 : nc-TiN/a- Si_3N_4 /a- ve nc- TiSi₂ nanokompozit kaplamaların şematik gösterimi[9].

Nanokristalin fazı çevreleyen faz ki bu çalışmada nc-TiN fazını çevreleyen Si_3N_4 fazı, amorf olmasının yanısıra nanokristalin fazın etrafında mümkün olan en ince kalınlıkta tek katman ile çevrildiğinde yüksek sertlikler elde edilebilmektedir. Katman kalınlığı arttıkça sertlik değeri düşmektedir.

Bu çalışmada [8,9] ortaya çıkan diğer bir nokta ise üçlü sistemlerde sertliğin daha da fazla olmasıdır. İkili nc-TiN/a- Si_3N_4 nanokompozitlerde sertlik değeri 40-60 GPa arasında iken üçlü sistem olan nc-TiN/a- Si_3N_4 /a-TiSi₂ 'de sertlik değeri 80 GPa'dan yüksektir.

Veprek nanokompozit kaplamalardaki sertlik artışını Griffith teorisi ile açıklamıştır. Bu teori gevrek malzemelere uygulanan bir teoridir ve bu malzemelerde oluşan çatlakların davranışları ile tane boyutları arasında bir ilişki kurar. İlk oluşan düz çatlaklar tane boyutunu geçemez dolayısı ile tane boyutu küçüldükçe ilk çatlak boyları da küçük olacaktır. Oluşan çatlakların uç kısımları sivridir ve bu yüzden çatlak uçlarında gerilim konsantrasyonu yüksektir.

Musil'in yaklaşımı ise sert ve yumuşak fazları bir araya getirerek sert/çok sert nanokompozit kaplamalar üretmektir. Bu yaklaşımda sert/yumuşak malzeme

kombinasyonunun çok fazla olması daha da ilgi çekicidir. Musil ve arkadaşları [10,11], yaptıkları Zr-Cu-N kaplamalarda yapının bakır oranının değişimine göre mikro yapıdaki ve sertlikteki değişimi incelemişlerdir. Bakır oranının yüksek olduğu (%23 at.) kaplamalarda tane boyutları (10-15) nm civarında ve tercihli bir yönelme yokken, bakır oranının azalması ile birlikte (%1-2 at.) ZrN (111) düzleminde tercihli bir yönelme ve tane boyutlarında (19-38) nm da bir artış gözlemişlerdir. Bu kaplamada elde edilen sertlik değerleri ise yüksek bakır içeren kaplamalarda 34 GPa ve düşük bakır içeren kaplamalarda 55 GPa olarak belirlemişlerdir. Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan kesit incelemelerinde yüksek bakır içeren (sert kaplama, 23 GPa) kaplamalarda kolonsal yapının olmadığı, yoğun bir yapı gözlemişlerdir. Araştırmacılar, bu kaplamalardaki yüksek miktardaki bakırın, tüm tanelerin büyümelerini daha tanenlerin birleşme aşamasında engellediğini, tanelerin bakır ile çevrelendiğini ve yoğun bir yapı meydana getirdiğini düşünmektedirler. Düşük bakır içeren (çok sert kaplama, 55 GPa) kaplamalarda ise yüzeyi düzgün, kolonsal yapının görüldüğü yoğun bir yapı gözlemişlerdir. Bu aşamada ise araştırmacılar, düşük miktardaki bakırın sadece bazı tane düzlemlerinde tanelerin büyümesini engellediği ve bu yüzden tercihli yönelmenin gözlemlendiğini düşünmektedirler. Sonuç olarak üretilen nanokompozitteki bakır oranı kritik bir değeri aşınca nanokompozit kaplamanın sertliğinde düşme meydana gelmektedir.

Musil ve arkadaşları başka bir çalışmada[12] nanokompozit kaplamalarda çok yüksek sertlik değeri elde edilmesinin, ikinci faz içerisinde sert nitrür tanelerinin gömülü olduğu durumda değil, sert nitrür fazlarına ait tanelerin segregasyona uğramış ikinci faz tarafından ayrıldığı veya çevrelendiği durumda mümkün olabileceği yorumunu yapmışlardır. Tane boyutu 19-38 nm olan Zr-Cu-N kaplamasında veya diğer büyük taneli nanokompozit kaplamalarda %1-2 (at) bakır oranında en yüksek sertlik değeri elde edilirken, tane boyutu 9.5 nm olan Al-Cu-N kaplamasında en yüksek sertlik değerinin % 8.1 (at) bakır oranında elde edilmesi bu yoruma aykırı bir davranış sergilememektedirler.

2.2 MoN...X Kaplama Sistemi

Sert fazı oluşturan geçiş metallerinin nitrürleri nanokompozit kaplamalarda kaplamanın özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Molibden nitrürler bu manada yüksek sertlikleri ve üstün tribolojik özellikleriyle nanokompozit kaplama

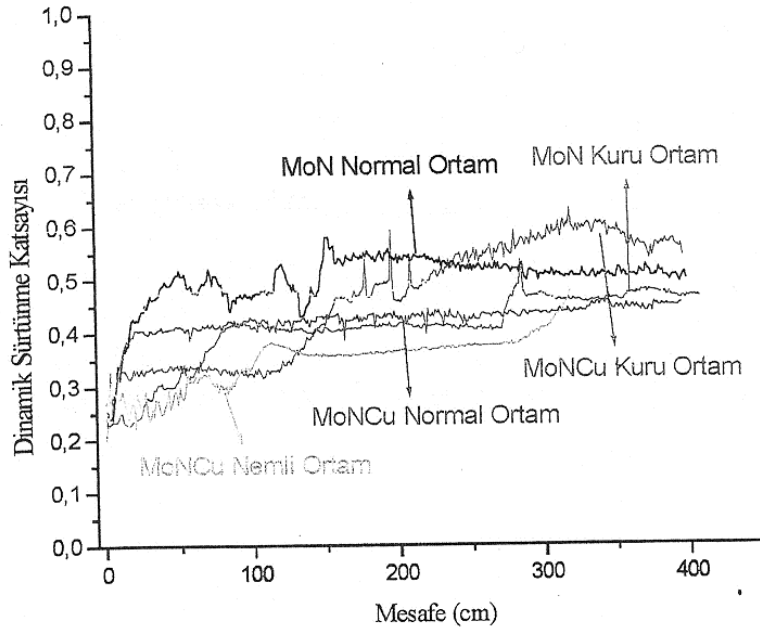
tasarımlarında çeşitli araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Literatürde molibden nütrüre Si [13], Al [14], Cu [1-2-3-4]ve Ag [15] katkılandırılarak yapılan çalışmalar bulunmuştur.

Eryılmaz Doktora tez çalışmasında [1] katodik ark fiziksel buhar biriktirme (FBB) yöntemiyle farklı N_2 basınçlarında (0.2 Pa ve 1.0 Pa) Mo ve Cu katodlar kullanarak Mo-N-Cu içerikli kaplamalar üretmiştir. Bu iki basınçta her bir kaplamada Cu katodun akımları değiştirilerek (100A,70A,50A) ve katodun önüne delikli filtre levha yerleştirilerek kaplamalardaki Cu oranlarının çeşitliliği sağlanmıştır. 1 Pa basınçta gerçekleştirilen kaplamalarda bakır içeriği %0.6 – 20.78 at. aralığında değişirken, 0.2 Pa basınçta gerçekleştirilen kaplamalarda bakır içeriği %0.7 – 12.9 at. aralığında değişmektedir. XRD analizleri sonucu araştırmacı 1 Pa N_2 basıncında gerçekleştirdiği kaplamalarda hegzagonal δ -MoN fazını tespit etmiştir. Ayrıca bu basınçta yapıya bakırın girmesiyle XRD piklerinde genişleme yani tane boyutlarında küçülme ile birlikte kübik γ - Mo_2N fazının oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. 0.2 Pa N_2 basıncında gerçekleştirilen kaplamalarda ise kübik γ - Mo_2N fazının yapıda bulunduğu görülmektedir. Yapıya bakırın girmesiyle XRD pikleri genişlemiştir fakat bu genişleme δ -MoN fazındaki kadar belirgin olmadığı söylenmektedir.

En yüksek sertlik değeri % 3.04 at. bakır içeren δ -MoN-Cu kaplamasında $5657,7 \pm 148$ kg/mm² olarak elde edilmiştir. Kaplamaların sertliği % 3.04 at. bakır değerine kadar yükselmekte daha sonra ise düşmeye başlamaktadır. γ - Mo_2N kaplamalarda da bu durum benzerlik göstermektedir. Bu sınıfta da en yüksek sertlik % 3.26 at. bakır içeren γ - Mo_2N -Cu kaplamasında elde edilmiştir (4470 kg/mm²). Bu değerden fazla bakır içeren kaplamalarda sertliğin düştüğü araştırmacı tarafından gözlemlenmiştir[1].

Öztürk yüksek lisans tez çalışmasında [2] γ - Mo_2N ve %21.15 at. Cu içeren Mo-N-Cu kaplamalar üretmiştir ve bu kaplamaların farklı bağıl nem oranlarında (%32, %50, %85) kazımalı aşınma davranışlarını incelemiştir. Araştırmacı alümina top kullanarak gerçekleştirdiği aşınma deneyleri sonucu her üç ortam için, Mo-N-Cu kaplamasının sürtünme katsayısının Mo-N kaplamasının sürtünme katsayısından daha düşük olduğunu ve ayrıca yine Mo-N-Cu kaplamasının aşınma derinliğinin Mo-N kaplamaya göre daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Mo-N-Cu kaplamaların sürtünme katsayısı kuru ortam deneylerinde 0.6 seviyelerine kadar çıkarken nemli ortam deneylerinde bu değer 0.45 seviyelerinde kaldığı görülmektedir. Bu düşüşün

sebebinin artan nem ile birlikte yapıda yağlayıcı özelliklere sahip molibden ve bakır oksitlerin daha kolay oluşmasının olabileceği belirtilmiştir. Mo-N ve Mo-N-Cu içerikli kaplamaların farklı nem oranlarına sahip ortamlardaki sürtünme katsayısı değişimi Şekil 2.2’te gösterilmiştir.



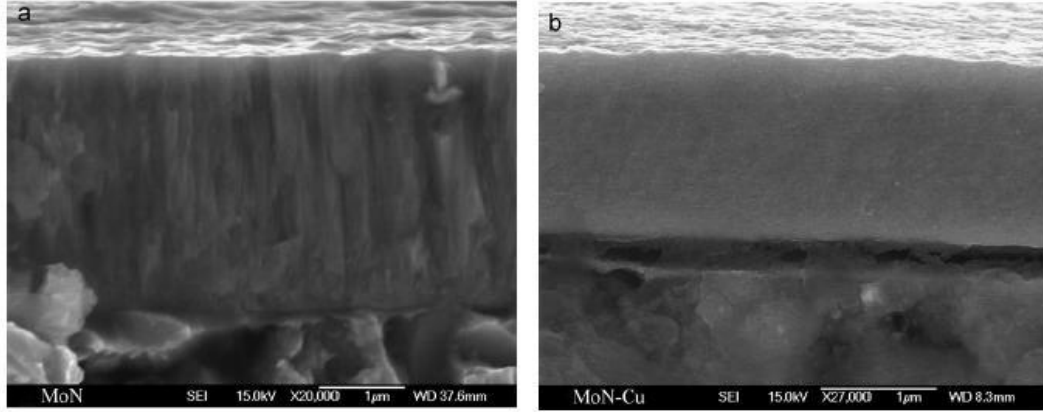
Şekil 2.2 : Mo-N ve Mo-N-Cu kaplamaların üç farklı nem oranına sahip ortamlarda kazımalı aşınma deneyleri sonucu mesafeye bağlı sürtünme katsayısı değerleri[2].

Ürgen ve grubu [3] TiN, CrN ve MoN kaplamalara bakır ilavesinin tribolojik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Nanokompozit kaplamaların üretiminde araştırmacılar katodik ark FBB ve manyetik alanda sıçratma yöntemlerinin bir arada kullanıldığı hibrit kaplama yöntemi kullanmışlardır. Kaplamalardaki Cu içerikleri, kaplama kalınlıkları ve sertlik değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : MoN, TiN ve CrN kaplamalara katılandırılan Cu içerikleri, kaplama kalınlıkları ile sertlik değerleri [3].

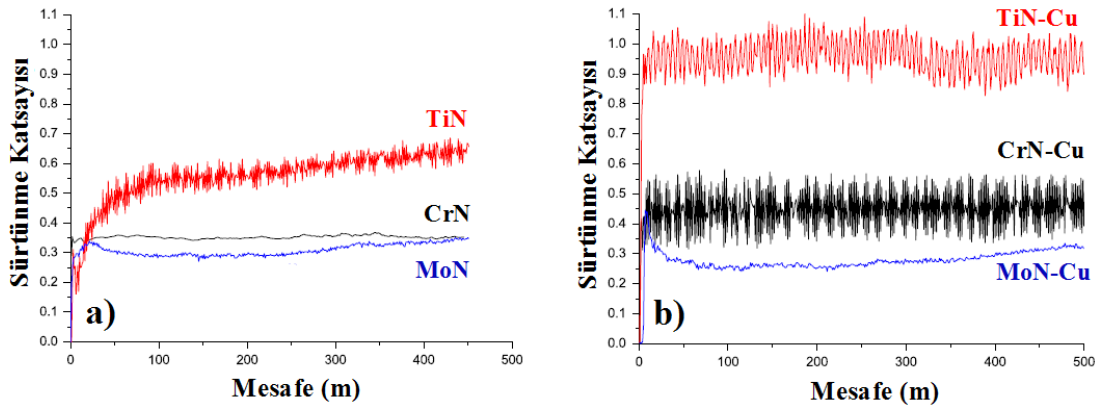
Kaplama	Cu (% at.)	Cu (% ağı.)	Kalınlık (µm)	Sertlik (GPa)
MoN	-	-	2.5	37±0.6
MoN-Cu	5.5	3.7	2.4	42±0.7
TiN	-	-	2.5	32±0.6
TiN-Cu	12.8	16.3	1.8	30±0.6
CrN	-	-	3	28±0.5
CrN-Cu	11.2	13.3	3.8	27±0.5

Mo-N kaplamasının kesit görüntüsü incelendiğinde kolonsal yapı görülürken yapıya bakır girmesiyle oluşan Mo-N-Cu kaplamada ise bu kolonsal yapının ortadan kalktığı görülmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : SEM kesit görüntüleri a) MoN kaplama b) MoN-Cu kaplama [3].

Kaplamaların disk üzeri top deneyleri, 5 N normal yük altında, Al_2O_3 top ($\varnothing 10$ mm) kullanılarak 0.2 m/s döndürme hızında, 500 m mesafede yapılmıştır. Disk üzeri top deneylerinde elde edilen sürtünme katsayıları değerleri Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 : Disk üzeri top deneyi ile elde edilen sürtünme katsayıları a)MoN, CrN ve TiN kaplamalar b) TiN-Cu, CrN-Cu ve MoN-Cu içerikli kaplamalar [3].

Kaplamalara Cu ilavesinin tribolojik davranış üzerinde, TiN kaplamalarda olumsuz, CrN kaplamalarda fazla bir değişime neden olmadığı ve MoN kaplamalarda ise olumlu yönde (aşınma ve sürtünme azalması) etki yaptığı açıklanmıştır. Kaplamaların aşınma izlerinden alınan Raman analizleri kristal kimyası yaklaşımı açısından incelenmiştir. Aşınma sonrası kaplamalarda açığa çıkan oksitler arasında MoO_3 'ün diğer oksitlere (TiO_2 , CuO , Cr_2O_3 ve CrO_2) nazaran daha yüksek iyonik potansiyel değerine (8.2) sahip olduğundan daha düşük sürtünme katsayısı sağladığı

belirtilmiştir. Yapıya giren Cu ilavesi sonucu aşınma izlerinden Raman spektrumları incelendiğinde MoO_3 ve CuO karışımları tespit edilmiştir. Bu karışımların (örneğin CuMoO_4) katı yağlayıcılık özellikleri ve kristal kimyası açısından iyonik potansiyelleri arasındaki yüksek farktan dolayı tribolojik davranış üzerinde olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir[3].

3. KAPLAMA YÖNTEMLERİ

3.1 Katodik Ark FBB Kaplama Yöntemi

Katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile genel olarak sert ve aşınmaya dirençli kaplamaların üretimi başarı ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde, buhar fazının elde edileceği malzeme katot, kaplanacak taban malzeme ise anot olarak vakum odasına yerleştirilir. Sisteme uygulanan düşük voltaj (10-30 V) ve yüksek akım (100-200 A) etkisiyle katot yüzeyinde ark meydana gelir. Katot yüzeyinde arkın meydana geldiği noktalarda sıcaklığın çok yüksek değerlere ulaşması, bu noktalarda ergime ve buharlaşmalara neden olur. Katot üzerinde arkın olduğu noktalar sabit değildir ve hızla yer değiştirirler. Bu durumda katodun homojen olarak buharlaşmasını sağlar. Oluşan buhar fazı, katot önündeki yüksek elektron yoğunluğuna sahip bölgede çarpışmalara maruz kalarak hızla iyonize olurlar. Homojen olmayan potansiyel dağılımı ve plazma nedeniyle iyonlar bu bölgeden hızla uzaklaştırılırlar. Bias voltajı uygulanmış taban malzemeye doğru yönlendirilen iyonlar reaktif gazla reaksiyona girerek taban malzeme üzerinde biriktirilirler [16].

Katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi metalik partiküllerin yaklaşık %100 seviyelerinde iyonizasyonu, yayılan iyonların yüksek kinetik enerjiye sahip olması ve yüksek buharlaştırma verimi gibi önemli avantajlara sahiptir. Katodik ark yöntemi ile üretilen filmler uygun mikro yapılara ve çok iyi yapışma özelliklerine sahiptirler. Ayrıca diğer kaplama yöntemleri ile kıyaslandığında kaplama hızı oldukça yüksektir. Bu yöntemin en önemli dezavantajı film yapısında makro partiküllerin oluşmasıdır. Makropartiküllerin oluşum sebebi ise buharlaştırma sırasında katot malzemesinin iyi soğutulamaması veya katot üzerinde arkın olduğu noktaların aşırı ısınması sonucu 'droplet' adı verilen büyük sıvı kütlelerinin de (metal damlacıkları) iyonlarla beraber taban malzeme yüzeyine taşınmasıdır. Bu oluşumun önüne geçebilmek amacı ile de değişik yöntemler ile manyetik alanlar oluşturularak yüklü iyonların tercihli olarak katoda yönlendirilmesi sağlanmaktadır. Böylece yüksüz makropartiküller bu manyetik

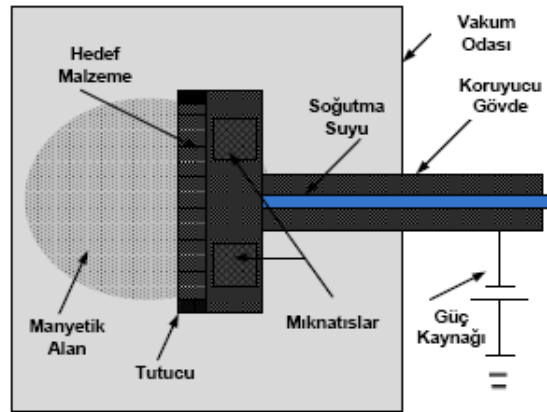
alanlardan etkilenmemekte ve daha az makropartiküllü daha hızlı film biriktirilmektedir[17]. Katodik ark FBB cihazının görünümü şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Katodik ark FBB kaplamalarda kullanılan cihazın görünümü

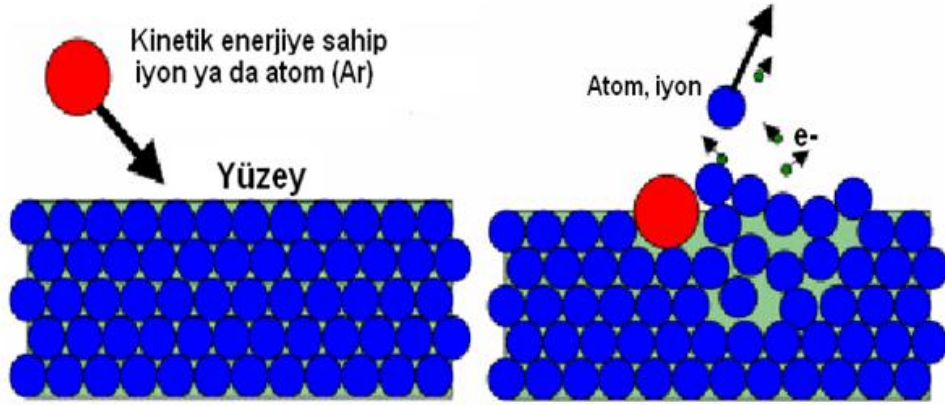
3.2 Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemi

İnce filmlerin kaplanmasında sıklıkla kullanılan diğre bir FBB yöntemi Manyetik alanda sıçratma yöntemidir. Sistem negatif doğru akım veya RF potansiyelin uygulandığı bir hedef malzemeden ibarettir. Hedef malzemesi soğutma suyu ile soğutulmalıdır. Alt metal tutucusu topraklanabilir veya kaplama sisteminden izole edilebilir veya negatif potansiyel uygulanabilir. Manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir[18].



Şekil 3.2 : Manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi[18].

Manyetik alanda sıçratma yönteminde hedef malzeme üzerine uygulanan 500 V'luk negatif gerilim ile plazmayı oluşturan Ar gazının pozitif iyonları hedef malzemenin üzerine yönlendirilir. Bu pozitif iyonlar yeterli enerjiyle hedef malzemenin yüzeyine çarparsa yüzeyden momentum transferi gerçekleşir ve hedef malzeme atomları sıçratılır. Hedef malzemesinden kopan bu atomlar kaplanacak numune üzerine birikerek kaplamayı oluşturur. Manyetik alanda sıçratma yönteminde hedef malzeme atomunun sıçratılması Şekil 3.3'te şematik olarak gösterilmektedir. Sıçratma işleminde inert gaz kullanımıyla kaplama malzemesi direk birikeceği gibi, reaktif bir gazın (Ar, O₂ vs.) sisteme beslenmesiyle altlık üzerinde hedef malzemenin nitrürleri ve oksitleri gibi çeşitli bileşikler biriktirebilir [19].



Şekil 3.3 : Manyetik alanda sıçratma yönteminde hedef malzeme atomunun inert gaz iyonu tarafından sıçratılması [18].

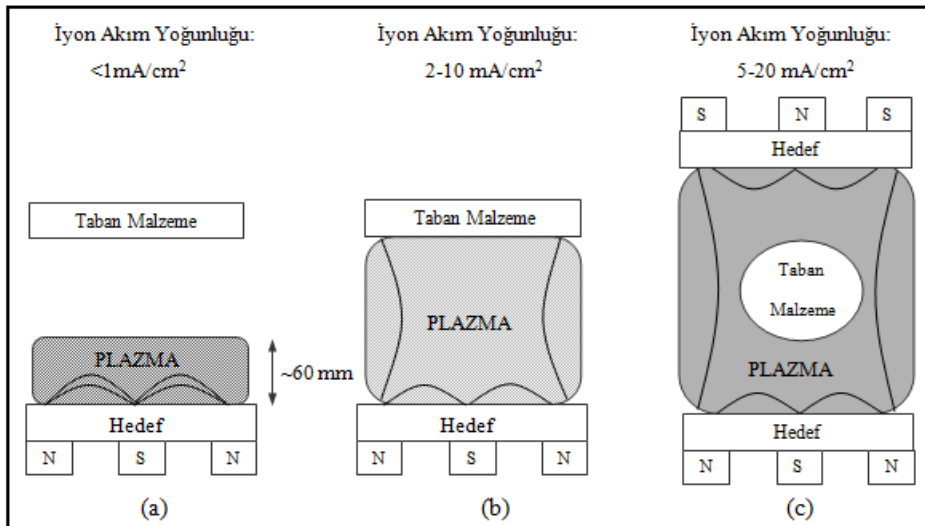
Diğer sıçratma yöntemlerinden farklı olarak Manyetik alanda sıçratma yöntemi vakum odasında yaratılan manyetik alanların yardımıyla sıçrayan atomların yönlendirilebilmesidir. Böylece büyük yüzey alanına sahip parçaların kaplanırken uniform bir kaplama kalınlığı elde edilebilir [2]. Bu sistemde mıknatıslar, bir kutubu merkezde diğeri ise çevrede olacak şekilde yerleştirilmektedir. Böylece sistem içindeki iyonize elektron ile atom arasındaki çarpışma olasılığı artırılır. İyonizasyon verimliliği artışı ile yoğun bir plazma alanı oluşur ve sıçratma miktarında artış görülür, bu da kaplama hızını arttırıcı bir etkidir. İyonizasyon verimliliğinin yükselmesi ile daha düşük basınç ve gerilim değerlerinde çalışılması mümkün hale gelir [21].

Hedef malzemeye çarpan iyonlar Manyetik alanda sıçratma yönteminde ikincil elektronların da saçılmasına sebep olur. Saçılan ikincil elektronlar mıknatıslar

tarafından oluşturulan manyetik alan sayesinde plazmanın dışına çıkamaz ve böylece plazmayı zenginleştirirerek kararlı kalma süresini artırır.

Dengeli ve dengesiz manyetik alanda sıçratma sistemleri arasındaki fark çok küçük olmasına rağmen hedef malzeme önünde oluşturulan plazmanın kapanma şeklindeki farklılık nedeni ile birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Dengeli sistemde plazma hedef bölgesine çok yakındır ve sistemdeki yoğun plazma yaklaşık 60 mm ile sınırlı bir bölgede yer almaktadır. Bu mesafenin uzağında yer alan taban malzeme oluşacak kaplamaların yapı uniform olmayacaktır ve iyon akım yoğunluğu değerinin 1 mA/cm^2 'nin altına inmesi durumunda film yeterli bir şekilde gelişmeyecektir. Sıçrayan iyonların enerjilerini artırmak, taban malzemeye uygulanan negatif potansiyel ile sağlanır. Fakat yapıdaki hataları ve iç gerilmeleri artırarak kaplama özellikleri de etkilenmektedir. Bu yöntem ile büyük ve karmaşık yapıları malzemelerin kaplanması zor olmaktadır. İç gerilimlere sahip olmayan yoğun filmlerin elde edilebilmesi için nispeten düşük enerjili ($<100 \text{ eV}$) ve yüksek akım yoğunluklu ($>2 \text{ mA/cm}^2$) iyonlar tercih edilmelidir. Bu da dengesiz manyetik alanda sıçratma yöntemi ile mümkün olabilmektedir [19].

İç taraftakilere göre dış kenarda bulunan mıknatıslar Dengesiz manyetik alanda sıçratma yönteminde daha güçlüdür. Böylece tüm manyetik alan çizgileri hedef malzemenin merkezinde kapanmaz. Farklı manyetik alanda sıçratma yöntemlerindeki plazma bölgelerinin şematik gösterimi Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



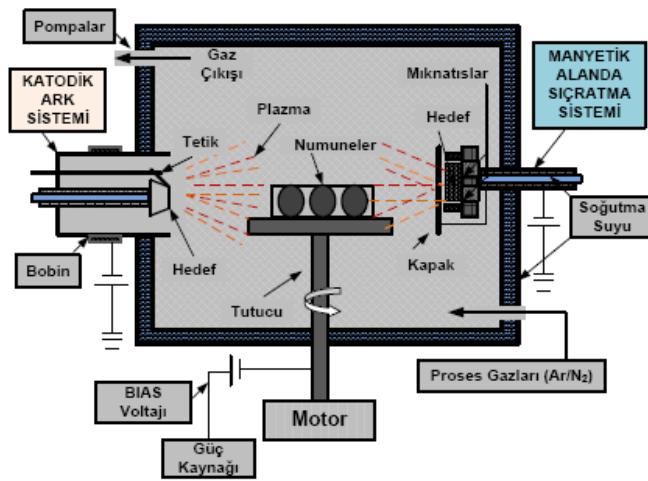
Şekil 3.4 : Farklı manyetik alanda sıçratma yöntemleri kullanılarak oluşturulan plazma bölgeleri a) dengeli b) dengesiz c) kapalı alan dengesiz sistem [19].

3.3 Hibrit Kaplama Yöntemi

Hibrit kaplama yönteminde çeşitli kaplama tekniklerinin avantajlı özelliklerinin tek bir proseste bir araya getirilmesi amacıyla aynı anda kullanımı söz konusudur. Laboratuvar grubumuzca yapılan pek çok çalışmada katodik ark FBB yöntemi ile manyetik alanda sıçratma yönteminin bir arada kullanıldığı hibrit kaplama sistemi kullanılmıştır [1,22,3]

Katodik ark FBB yönteminde de buharlaştırılarak kaplanacak olan malzeme vakum haznesinde katot olarak ve kaplanacak olan taban malzeme de anot olarak yerleştirilir. Kaplama işleminin temel prensibi yüksek akım ve düşük voltaj ile katot üzerine tetikleme yapılarak ark oluşturulmasına dayanır. Katot üzerinde tetikleme ile oluşturulan arkin oluştuğu noktalar katot yüzeyinde hızla yer değiştirerek katodun homojen olarak buharlaşması sağlanır. Oluşan buhar fazı, yüksek elektron yoğunluğuna sahip katot önündeki bölgede çarpışmalar sonucu iyonize olurlar ve oluşan iyonlar hızla taşınırlar [23].

Katodik ark FBB yönteminde birikme hızı iyonizasyon derecesinin daha yüksek olması nedeniyle manyetik alanda sıçratma yöntemine göre daha fazladır. Bu nedenle nanokompozit üretimine yönelik çalışmalarda hibrit kaplama sistemi kullanılacaksa yapıyı oluşturacak ana fazın içeriği dik ark FBB yöntemi ile sağlanırken katkılandırılacak element ise manyetik alanda sıçratma hedef malzemesinden sağlanır. Katodik ark FBB ve manyetik alanda sıçratma yöntemlerinin aynı anda kullanıldığı hibrit kaplama yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 : Katodik ark ve manyetik alanda sıçratma kaynaklarının beraber kullanıldığı (hibrit kaplama) sisteminin şematik gösterimi[18].

4. TRİBOLOJİK SİSTEM

4.1 Giriş

Tamamen pürüzsüz ve düzgün yüzeyler hazırlamak ve üretmek oldukça zor bir prostedir. Çok dikkatle hazırlanıp parlatılmış yüzeylerde bile moleküler boyutlarda düşünüldüğünde derin vadi ve tepelerin varlığı gözlenebilir. İki katı yüzey bir araya getirildiğinde üstte kalan yüzey alt malzemedeki çıkıntılar tarafından taşınır. Parlatma tekniklerindeki son parlatma imkanları ile 100Å ila 1000Å civarı bir pürüzlülük değeri elde edilebilir. Birçok mühendislik uygulamalarında yüzey düzensizlikleri bu değerlerin çok üstündedir. Bu nedenle moleküler anlamda temas çok küçük bir bölgede meydana gelir.

Triboloji, sürtünme, aşınma, yapışma ve yağlama işlemlerinin tümünü içeren bir bilim dalı olarak tanımlanır. Aşınma, bir katı madde yüzeyinden, göreceli şekilde karşı madde (hareketli ve temas halindeki katı, sıvı veya gaz) tarafından mekanik etki ile yüzeyden madde taşınımı ile oluşan ve aynı zamanda istenmeyen yüzey bozulmasıdır. Aşınma genel olarak; triboloji, sürtünme ve yağlama terimleriyle birlikte kullanılmaktadır.[17].

4.2 Sürtünme, Aşınma ve Yağlama

4.2.1 Sürtünme

İki malzeme birbirleriyle temas haline getirildiğinde, malzemelerden birinin diğeri üzerinde hareketine karşı sürtünme kuvvetleri direnç gösterir. Kaymayı başlatan Kuvvet (F_S) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (F_N) arasında şu bağıntı mevcuttur[24,25]:

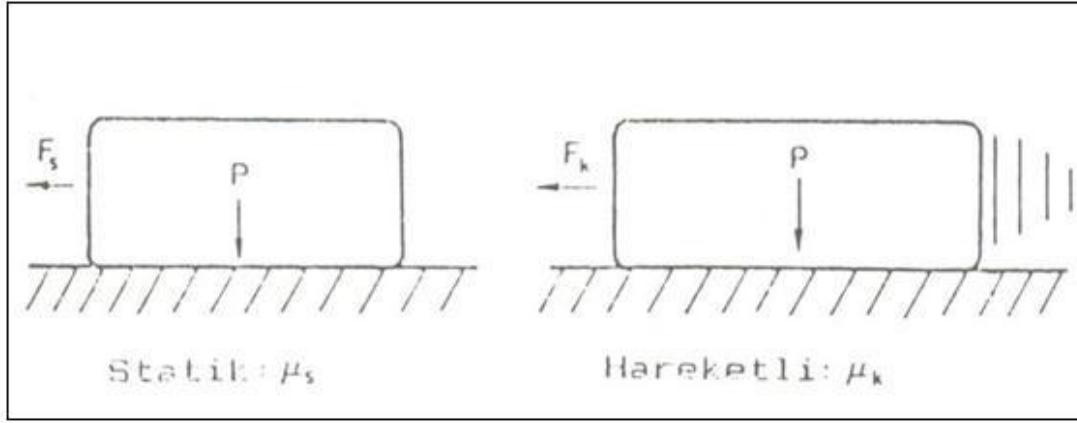
$$F_S = \mu_S F_N \quad (4.1)$$

Burada μ_S statik sürtünme katsayısıdır. Kayma başladıktan sonra sürtünme kuvvetinde bir azalma olur ve bu durumda şu bağıntı yazılabilir:

$$F_K = \mu_K F_N \quad (4.2)$$

Burada μ_K kinetik sürtünme katsayısı olup değeri μ_S 'den daha düşüktür [24,25]

Bu durum şekil 4.1'de gösterilmiştir:



Şekil 4.1 : Statik ve kinetik sürtünme katsayıları[24,25].

μ_K 'nin (Kinetik sürtünme katsayısının) daha düşük değere sahip olması böyle yorumlanabilir; yüzeylerin birbiri üzerinde kaymaya başladığı zaman, çıkıntılar statik temasta olduğu gibi atom atoma bağ kuracak zamanı bulamıyorlar. Tersine statik temas halinde temas bölgelerinde oluşan plastik deformasyonlar pürüz uçlarını birbirlerine iyi derecede bastırarak, temas alanı boyunca atom atoma bağlar oluştururlar, yani soğuk basınç kaynağı oluşur. Statik sürtünme durumunda meydana gelen atom bağları sebebiyle birbiriyle sürtünen bu iki malzemenin kayması için, malzemenin kayma akma gerilmesi (τ_a) seviyesinde bir gerilmeye ihtiyaç vardır. Bu nedenle kaymaya sebep olan sürtünme kuvveti (F_S) :

$$F_S = a \cdot \tau_a \quad (4.3)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir [25]. Yani temas alanı (a) azaldığı zaman, kaymanın gerçekleşmesi için gerekli kuvvetin de azalması gerekiyor. Kinetik temas durumunda, temas alanı önemli ölçüde, temas alanında atomlar arası bağlar oluşmadığı için azalır; bunun sonucunda sürtünme kuvveti ve dolayısıyla da sürtünme katsayısı azalır. Kayma durunca, atomlar arası bağlar oluşur ve sonuçta sürtünme katsayısı μ_S değerine yükselir[25,26].

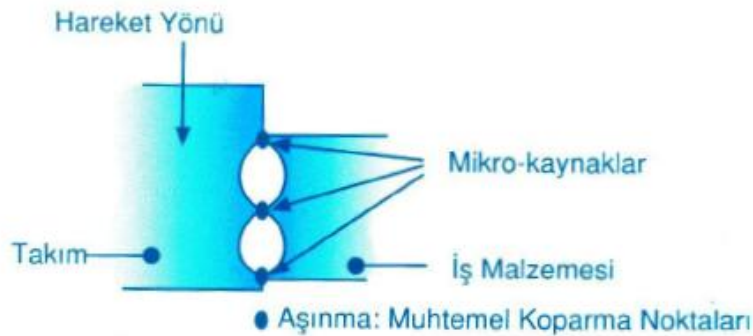
4.2.2 Aşınma

Malzeme kaybına neden olan dört tür aşınma vardır. Bunlar; adhesif aşınma, abrazif aşınma, korozyon aşınması ve yüzey yorulmasıdır[26]. Aşınma, bir yüzeyden diğer yüzeye malzeme transferi veya aşınma parçalarının oluşumu neticesinde ortaya çıkan malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Birbiriyle temas halinde olan malzeme yüzeyleri, oksit filmleri veya yağlayıcılar ile korunsa bile, mekanik yüklemeler altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması, iki yüzeyin birbiriyle doğrudan temasına sebebiyet verebilir. Bu temas, malzemenin çalışma koşullarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya neden olur[27]. Malzeme sertliği, malzeme geometrisi ve aşınmanın gerçekleştiği ortam koşulları, aşınma oranı üzerinde önemli etkiler olarak sıralanabilir.[28].

4.2.2.1 Adhesif aşınma

Adhesif aşınma ya da Yapışma aşınması, bir metal yüzeyinin bir başka metal yüzeyinde bağlı hareketi sırasında, birbirlerine kaynaklanmış (veya yapışmış) yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar (şekil-4.2).

Uygulamada adhesif aşınma, özellikle metaller arasındaki kayma sürtünmesi nedeniyle meydana gelir ve aşınma parçaları yumuşak olan metalden kopar. Eğer iki metal aynı sertlikte ise, aşınma her iki yüzeyde de oluşur. Metaller arasındaki yağlanmanın mükemmel olması, yüzeye etki eden yükün azaltılması ve malzemenin sertliğinin artırılması ile adhesif aşınma azaltılabilir[27]

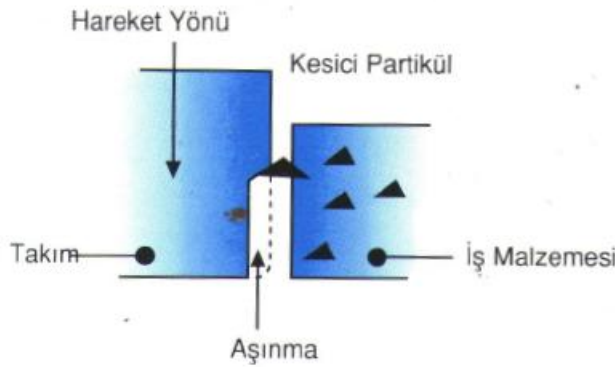


Şekil 4.2 : Adhesif aşınma[29].

4.2.2.2 Abrazif aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da bilinen abrazif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrazif aşınma, metal yüzeylerinin biri

diğerinden daha sert ve pürüzlü olan birbiriyle temas halindeyken kayması sırasında oluşur. Şekil 4.3'te sert bir malzemenin, yumuşak bir malzemedan çapak şeklinde abrazif aşınma parçaları alışı gösterilmiştir. Abrazif aşınma sert parçaların yumuşak metale batması sonucu oluşabilir. Abrazif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden yük azaltılarak düşürülebilir; bu durumda sert parçacıklar metal içine daha az dalarlar ve böylece daha az malzeme kaybına neden olurlar. Malzeme açısından da daha sert alaşım kullanarak, sertlik arttırmak amacıyla ısıl işlem uygulayarak ve malzeme yüzeyini sert bir tabaka ile kaplayarak, abrazif aşınma hızını azaltmak mümkündür[27].



Şekil 4.3 : Abrazif aşınma[29].

4.2.2.3 Korozyif aşınma

Mekanik etkenlerin yanında çevrenin kimyasal etkisi de düşünüldüğünde korozyif aşınmadan söz etmek gerekir. Sürtünen yüzeylerde oluşan korozyon ürünü sert parçacıklar halinde koparsa, şiddetli aşınma görülür[26].

4.2.2.4 Yüzey yorulması

Yüzey yorulması birbiri üzerinde yuvarlanan parçalarda gözlenir. Plastik şekil değiştirme sonucu temas halindeki yüzeylerde pekleşme meydana gelir ve malzeme gevrekleşir. Üzerinden geçen tekrarlı kuvvet etkisiyle gevrekleşen malzeme çatlar. Metallerde bu çatlama yüzeyden 0.2-0.3 mm. derinlikte başlar. Bu çatlaklar gitgide yayılır ve yüzeyden pul şeklinde malzeme kopar. Yüzeylerin sertleştirilmesi bu tür yüzey yorulmasını önlemek için gerekir[26].

4.2.3 Yağlama (yağlar ve özellikleri)

Yağlar sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı kısmen önlemek ve sıcaklığın yükselişini engellemek için kullanılmaktadırlar. Yağlayıcı maddeler fiziksel hallerine göre katı, sıvı, yarı katı ve gaz yağlayıcılar olarak dört grupta incelenebilirler. Gaz yağlayıcılar genelde geniş kullanım alanına sahip olmamaktadırlar.[15]

4.2.3.1 Sıvı yağlar

Sıvı yağları temel olarak organik (hayvansal ve bitkisel), madensel (mineral) ve sentetik yağlar olarak üç grup altında incelemek mümkündür.

Organik yağlar: Hayvansal veya bitkisel kaynaklı yağlardır. İyi yağlama özelliklerine sahip olmalarına rağmen fakat en büyük problemleri olarak kısa ömürlü olmalarıdır. Modern teknolojik uygulamalarda daha çok mineral yağlar kullanılmaktadır.[15]

Sıvı mineral yağlar: Yağ tipleri olarak en çok kullanılan yağ tipi sayılabilir. Mineral yağlar fosil kökenli yakıtların distilasyonu ile elde edilirler. Mineral yağların maliyetleri düşüktür. Bu nedenle birçok endüstriyel uygulamada geniş kullanım alanına sahiptirler.

Sentetik yağlar: Sentetik yağlar yaklaşık olarak son yüz yıl içerisinde geliştirilmiştir. Sentetik yağlar pahalı olduğundan dolayı ilk zamanlarda fazla kabul görmemiştir. Fakat mineral yağların kullanımının yetersiz olduğu uygulamalarda kolaylıkla kullanılabilir olmaları, kullanım alanlarını genişletmiştir. Mineral yağlar düşük maliyetlerine rağmen dezavantajları olarak yüksek sıcaklıklarda kötü oksidasyon özellikleri, viskozite düşüşleri, güçlü oksitleyici bulunan ortamlarda yanmaları ve patlamaları, düşük sıcaklıklarda katılaşmalarını sıralayabiliriz. Bu nedenle sentetik yağlar giderek yaygın hale gelmektedir. Sentetik yağlar, petrolün parçalanması (cracking) sonucu elde edilen düşük moleküler ağırlığa sahip hidrokarbonlardan elde edilir. Parçalama işlemi yağda bulunan moleküllerin azaltılması amacıyla yapılır. Yüksek basınç ve katalistlerin uygulanması ile yağ içerisinde bulunan karmaşık moleküller ayrıştırılarak daha basit küçük ve daha uniform hale getirilir. Düşük moleküler ağırlıklı hidrokarbonlar, hassas olarak seçilen şartlar altında istenilen düşük uçuculuk ve yüksek viskoziteyi sağlayacak şekilde polimerize edilirler.[15]

4.2.4 Katı yağlayıcılar

Sıvı yağlayıcıların kullanımının sınırlı olduğu yerlerde Katı yağlayıcılar kolayca kullanılabilirler. Birbirlerine karşı izafi hareket yapan iki yüzey arasındaki katı yağlayıcının fonksiyonu, sıvı yağlayıcılarla benzerliği barizdir. Temas yüzeyleri üzerinde düşük sürtünme sağlamak ve aşınma hasarlarını en düşük seviyeye indirmek için kolay kaymayı sağlayan materyaller, katı yağlayıcı olarak kullanılırlar.

Kuvvetli adezyon Temas eden yüzeyler arasındaki çoğu zaman yüksek sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma oluşumuna neden olmaktadır. Düşük kayma mukavemetine sahip malzemelere uygulanan düşük yüklerle bile malzeme deforme olur ve böylece düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilir. Bu yüzden mekanik olarak anizotrop ve düşük kayma mukavemetine sahip malzeme katı yağlayıcı olarak kullanılmaktadırlar.

Katı yağlayıcıları içlerinde lameller katı yağlayıcılar, yumuşak metaller, polimerler, kompozitler ve oksit katı yağlayıcılar olarak sınıflandırılabilirler. Lameller yapılı katıların kristal yapılarında, aynı tabakada bulunan atomların birbirleri ile daha yakın olduğu ve daha kuvvetli bağlarla bağlandığı, tabakaların ise birbirlerinden uzak olduğu ve zayıf (van der Waals) bağlarla bağlandığı görülür. Sonuç olarak tabakaların rölatif hareket yapması kolaylaşır ve böylece düşük sürtünme sağlar. Yumuşak metallerde ise düşük sürtünmenin elde edilmesinin temeli; bu malzemelerdeki çoklu kayma sistemleri, hızlı rekristalizasyon ve toparlanmanın deformasyon sertleşmesini engellemesi oluşturur. Bu da yumuşak metalik malzemelerin uzun ömürlü yağlayıcı olarak kullanımını sağlar. Polimerler yapılarındaki florürlerin rahat hareket etmesi, kolay şekil değiştirebilmelerinden dolayı düşük sürtünme sağlarlar. En yaygın polimer malzeme teflon olarak bilinen poli tetra flor etilen (PTFE)'dir. Kompozit yapılarda ise sert ve yumuşak fazların bir arada bulunması sonucunda farklı kullanım özellikleri sağlanabilir.

tribolojik uygulamaların hemen hemen hepsinde sürtünme ve aşınmayı azaltmak için sıvı veya gres tipi yağlayıcılar günümüzde kullanılır. Fakat çok yüksek veya düşük sıcaklıklar, vakum, radyasyon, çok yüksek temas basıncı gibi ağır çalışma koşullarında sürtünme ve aşınma problemlerinin çözümü için katı yağlayıcıların kullanımı mecburiyeti ortaya çıkmaktadır. Katı yağlayıcılar, sıvı yağlar içerisine karıştırılarak veya yalnız başlarına kullanılabilirler[30].

En çok bilinen katı yağlayıcı olarak grafit, hegzagonal bor nitür ve MX_2 (burada M; Mo, W, Nb, Ta gibi geçiş elementlerini X ise sülfür, selenyum veya tellürü sembolize etmektedir) tipi kendine has tabakalı yapıya sahip yapılardır. Katı yağlayıcıların hepsinde aynı paralel düzlemlerdeki atomlar arasında kuvvetli bağlar, ama tabakalar arasında ise zayıf (van der Waals) bağları mevcuttur. Tabakaların bir birleri üzerinde kolayca hareket etmelerini yüzeyde oluşan bir kuvvetin etkisinden kaynaklanmasını söylemek mümkündür. Bu sebepten dolayı kaymayı kolaylaştırarak düşük sürtünme oluşumuna neden olur[30].

4.2.4.1 Katı yağlayıcıların sınıflandırılması

Katı yağlayıcılar birçok alt bölüm altında sınıflandırılabilirler. çizelge 4.1’de geleneksel olarak kullanılan ve son yıllarda geliştirilen katı yağlayıcılar sıralanmıştır.

Çizelge 4.1 : Çeşitli katı yağlayıcılar için sürtünme katsayıları [30].

Sınıflandırma	Örnekler	Sürtünme Katsayısı
Tabakalı katılar	MoS_2 , WS_2 , HBN, Grafit, H_3BO_3	0.002-0.7
Yumuşak metaller	Ag, Pb, Au, In, Sn	0.2-0.35
Karışık oksitler	$CuO-Re_2O_7$, $CuO-MoO_3$, $PbO-B_2O_3$	0.1-0.3
Tek oksitler	B_2O_3 , Re_2O_7 , ZnO, MoO_3 , substokiyomerik TiO_2 ,	0.1-0.6
Toprak alkali metallerin sülfat ve halojenleri	CaF_2 , BaF_2 , SrF_2 , $CaSO_4$, $BaSO_4$	0.15-0.4
Karbon esaslı katılar	Elmas, elmas benzeri karbon, fullerenler	0.02-1
Organik malzemeler/polimerler	Zn stearite, sabun, mum, PTFE	0.04-0.4
Kütlesel veya kalın kompozit filmler	WS_2 , MoS_2 , Ag vb. katkılı metal, polimer veya seramik matris kompozitler	0.05-0.4
İnce kompozit filmler	PTFE, grafit, elmas vb. ilaveli elektrolitik kaplamalar	0.05-0.5

4.3 Kaplamaların Tribolojisi

İki yüzey arasındaki tribolojik temaslarda yüzeylerden biri veya her ikisi de kaplanmış olabilir, bu yüzeyler arasındaki tribolojik temas davranışı dört ana parametre tarafından kontrol edilmekte ve aynı zamanda belirleyici rol oynamaktadır [31, 32,33,34]. Bu parametreler;

i- kaplama ile altlık arasındaki sertlik ilişkisi

ii- kaplama kalınlığı

iii- yüzey pürüzlülüğü

iv- aşınma esnasında oluşan, aşınma ürünlerinin boyutu ve sertliğidir. Aşınma ürünleri dış kaynaklar tarafından oluşturulabildiği gibi yüzeylerin aşınması sonucu ortaya çıkabilir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada taban malzemesi olarak yüksek hız çeliği kullanılmıştır. Numuneler (YHÇ) kaplama öncesi metalografik olarak parlatılmıştır. Parlatma sırasında Struers RotoPol-25 cihazı kullanılmıştır. Cihazın şematik görünümü şekil 5.1’de verilmiştir. Numuneler üzerinde sırasıyla 320 numaralı SiC zımpara ile başlayarak, daha sonra 600-800-1000-1200 numaralı zımparalar kullanarak ön parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından 3 µm ve 9 µm elmas süspansiyonlar kullanılarak yüzeyler parlatılmıştır. Bu kademelerden sonra, yüzeyler aseton ve izopropil alkolle ultrasonografik banyoda temizlenerek yağlardan kaplama öncesi arındırılmıştır.



Şekil 5.1 : Struers RotoPol-25 parlatma cihazı

Taban malzemesi olarak kullanılan yüksek hız çeliğinin bileşimi çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Yüksek hız çeliğinin bileşimi

Element	C	Cr	Fe	Mn	Mo	Si	W	V
Bileşim(at%)	0.820	4.25	81.33	0.300	5.00	0.250	6.25	1.80

5.2 Alaşım (Mo-Cu) Katotla Kaplamaların Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi ile Üretilmesi

Parlatma işlemlerinin ardından kaplama aşamasında çok amaçlı Fiziksel Buhar Biriktirme (FBB) ‘Novatec-SIE, Model: NVT-12’ kaplama cihazı kullanılmıştır. Kaplamalarda kullanılan sistemin şematik gösterimi Şekil 5.2’ de verilmiştir.



Şekil 5.2 : Fiziksel Buhar Biriktirme kaplama cihazı

Ark fiziksel buhar biriktirme kaplamalarda katot olarak %10 Cu içeren alaşım molibden bakır (Mo,Cu) katot kullanılmıştır. Kaplama parametreleri çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Ark FBB kaplama parametreleri

Numune	Süre	Katot akımı	Bias DC	P N ₂	P kaplama
180-1	60 dk	100 A	100 V	5*10 ⁻³ torr	1*10 ⁻³ torr
182-1	60 dk	120 A	100 V	5*10 ⁻³ torr	1*10 ⁻³ torr

Bu çalışmada diğer numuneler olarak farklı bias voltajında manyetik alanda sıçratma fiziksel buhar biriktirme (FBB) yöntemi ile kaplanan yüksek hız çeliği kullanılmıştır. Kaplama parametreleri çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Manyetik alanda sıçratma kaplama parametreleri

Numune adı	Bias DC (V)
4000-1	120
7000-2	100

Kaplamaların üretilmesinden sonra iki gurup kaplama yani, ark fiziksel buhar biriktirme ve manyetik alanda sıçratma yöntemi ile üretilen kaplamaların karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

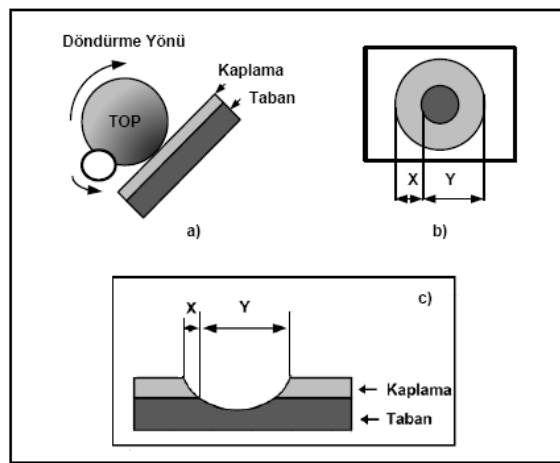
5.3 Kaplamaların Karakterizasyonu

5.3.1 Kaplamaların XRD analizi ve oluşan fazların tayini

Kaplamaların faz yapısını belirlemek için düşük açılı x-ışınları difraktometre cihazı (philips PW- 3710 model) kullanılmıştır. X-ışınlarının giriş açısı 2° 'de sabit tutulmuş. Voltaj ve akım ise sırasıyla 40 kV, 40 mA değerlerinde ve X-ışını radyasyonu olarak Cu-K α kullanılmıştır. Elde edilen X-ışını paterni JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards-Toz Kırınım Standartları Komitesi Birliği) veri dosyasındaki standart paternlerle karşılaştırılarak kaplamaların içerisindeki faz yapıları tespit edilmiştir.

5.3.2 Kaplama kalınlıklarının ölçümleri

Kaplamaların kalınlık değerleri ölçümünde kalotest (top-krater testi) cihazından faydalanarak hesaplanmıştır. Kalotest deneyinde numunelerin kaplama yüzeyleri 18 mm çapında bir çelik bilyenin 30 devir/dk hızla 40 saniye süre ile döndürülmesi ile aşındırılmıştır. Kaplama ile çelik bilye arasına 1 μ m elmas süspansiyon aşındırıcı ilave ederek, meydana gelen aşınma izinin iç ve dış çapı kaplama yüzeyinden optik mikroskopla ölçülerek kaplama kalınlığı hesaplanmıştır. Kaplama kalınlığı ölçmek için kalotest sisteminin şematik gösterimi Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3 : kalotest sistemi a) test düzeneği, b) oluşan izin üstten görünüşü, c) kesit görüntüsü [18].

5.3.3 Kaplamaların mikro sertlik ölçümleri

Kaplamaların sertlikleri, Fischer H100 XYPROG mikrosertlik cihazında ölçtürülmüştür. Kaplama kalınlığının ince olduğundan dolayı sertlik ölçümlerinde taban etkisinden kurtulmak için sertlik ucunun toplam kaplama kalınlığının maksimum 1/10' kadar kaplama derinliğine girmesine izin verilir. Bu yüzden kaplama sertlikleri 20 mN yükten başlayarak 60 mN'a kadar arttırılmıştır. Her bir deneyde 1 sn. süre 40 adım uygulanarak, 30 farklı nokta tekrar edilmiştir.

5.3.4 Kaplamaların EDS analizleri ve SEM kesit ve yüzey görüntüleri

Kaplamaların EDS analizini yapmak için JEOL JSM-5410 model taramalı elektron mikroskopunda mevcut Freedom EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi) dedektörü kullanılmıştır. Filamanın voltajı 15kV olarak belirlenmiştir. Ayrıca kaplamaların yüzey görüntüleri 15kV filaman voltajında ölçülmüştür. Kaplamaların kesit görüntüleri ve kesitlerin EDS analizleri JEOL JSM-7300 model taramalı elektron mikroskopunda ve filaman voltajı, 10kV 'ta yapılmıştır.(şekil 5.4.)



Şekil 5.4 : JEOL JSM-7300 model SEM

5.3.5 Rockwell C testi

Kaplamaların alt malzemeye yapışma özelliklerini incelemek için kaplı numunelere 100 N normal yük kullanarak Standart **Rockwell C** sertlik izi testi kullanılan yöntemlerden birisidir. Çok fazla plastik deformasyona sebep olmamak için YHÇ (yüksek hız çeliği) gibi sert taban malzemesine sahip numunelere bu testi uygulamak değerlendirmenin sağlıklı olması açısından önemlidir. İz bölgesinde yapılan optik mikroskop incelemesinde taban malzemedan çok büyük ayrılmalar kaplamanın taban

malzemeye iyi yapışmadığının bir göstergesi olarak değerlendirilir. Rockwell C testi sonucunda elde edilen izler etrafında, optik mikroskop incelemesi ile çatlakların miktar ve kaplamanın taban malzemedan ayrılıp ayrılmadığı incelenerek kaplamaların taban malzemeye yapışmalarının kabul edilebilir mertebelerde olup olmadığı değerlendirilmiştir.

5.3.6 Kaplamaların yapışma özelliklerinin incelenmesi (Scratch test)

Kaplamaların altlık malzeme yüzeyine yapışma özelliklerinin incelenmesi amacıyla kullanılabilir pek çok yöntem vardır. Bu çalışmada bu yöntemlerden biri olan çizik testi (scratch test) incelenmesi yapılmıştır. Bu amaçla UMT Scratch Tester cihazında standart Rockwell C elmas uç kullanılarak 10 mm/dk çizme hızında, başlangıç 10 N yükten itibaren maksimum 50 N yük uygulanarak 8 (mm) uzunluğunda çizme testi yapılmış, elde edilen çizme izleri ve çizme işlemi sırasında test cihazına bağlı akustik emisyon cihazından elde edilen veriler karşılaştırılarak numuneler için çatlak başlama yükü ve kaplamanın yüzeyden tamamen ayrılığı kritik yük değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca çizik testi sonucunda kaplamalarda meydana gelen izler optik mikroskop yardımıyla incelenerek kaplamada meydana gelen deformasyonun mekanizması da incelenmiştir.

5.4 Kaplamaların Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi

Deneylerde CSM-Tribometer marka aşınma cihazı kullanılmıştır. Kaplamaların yağlı ortamda tribolojik davranışlarının incelenmesi için “Disk üzeri Pin -- pin on disc” deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların yüzeylerini kaplama aşamasından sonra 2500 numaralı SiC zımpara ile hafif parlatılıp, ardından 9 µm elmas süspansiyon kullanarak dropletlerin giderilmesi sağlanmıştır. Bu işlemler sonucu yüzey pürüzlülüğünü deneylerin etkilemesi engellenmiştir. Disk üzeri pin deneyleri YHÇ pinlere karşı sınır yağ koşullarında yaklaşık 19°C sıcaklık ve %51 bağıl nemde 20 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde aşınma hızı 2 cm/s ve toplam aşınma mesafesi ise 500 m olarak ayarlanmıştır. Numunelerin üzerine ince bir film şeklinde kaplayacak gibi Mobil 10W-40 marka formüle yağ sürülmüştür. disk üzeri Pin disk aşınma deneylerinde uygulanan parametreler çizelge 5.4’te verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Disk üzeri pin deneylerinde kullanılan parametreler.

Kaplama öncesi uygulamalar	2500 SiC zımpara + 9 µm elmas süspansiyon
Karşıt malzemeler	YHÇ pin
Yük	20 N
Hız	2cm/s
Toplama mesafe	500m
Yağlama	Mobil 1 0W-40 marka formüle yağ

5.4.1 Kaplama ve karşıt yüzeylerin aşınma izlerinin belirlenmesi

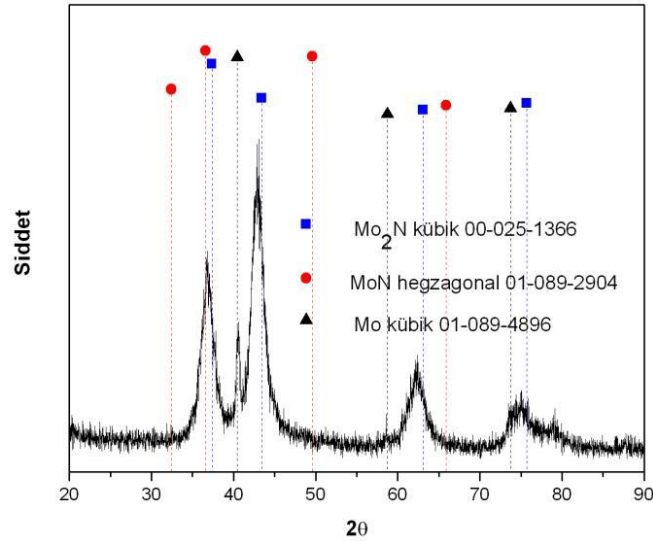
Tribolojik aşınma deneyleri sonucu disklerin kaplanan yüzeyleri ve pinlerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerini incelemek için Veeco Wyko NT100 marka üç boyutlu optik profilometre kullanarak ölçülmüştür. Ölçümler dikey taramalı interferometri (vertical scanning Interferometry-VSI) modunda yapılmıştır. Hem kaplama ve hem pinlerin yüzeylerindeki oluşan aşınma izlerinin iki ve üç boyutlu görüntüleri optik profilometre ile incelenmiştir. Bunun yanı sıra kaplamalarda oluşan aşınma izlerinin derinlikleri ve genişlikleri de optik profilometre ile ölçülerek hesaplanmıştır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Kaplamaların Karakterizasyon İşlemleri

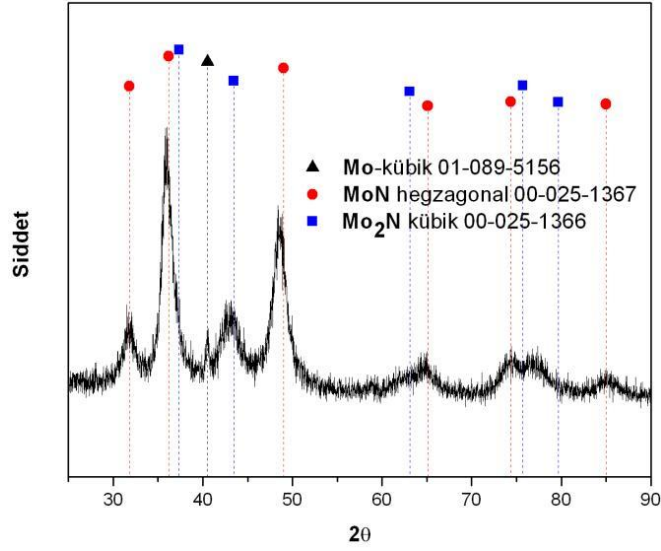
6.1.1 Kaplamaların kimyasal bileşimleri ve oluşan fazların tayini

100 Å'de yapılan ark FBB kaplamaların XRD difraksiyon paternleri şekil 6.1 verilmiştir. Piklere bakıldığında 100 Å' de yapılan kaplamanın difraksiyon paterni Kübik Mo₂N fazına ait, 00-025-1366 nolu JCPDS referans kartındaki pikleri ile örtüşmektedir. İç gerilimlerden dolayı kaplamalara ait bazı piklerde, orijinal Mo₂N pikine göre hafif kaymalar gözlemlenmiştir.



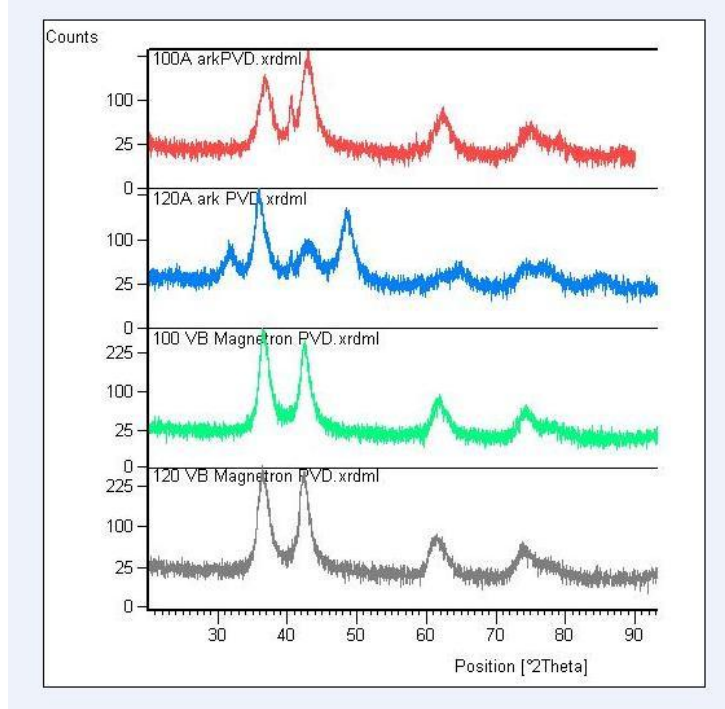
Şekil 6.1 : 100Å Ark FBB'ile kaplanan numunenin XRD difraksiyon paterni

Şekil 6.2'de 120 Å' de yapılan kaplamada ise Hegzagonal MoN fazına ait, 00-025-1367 nolu JCPDS ve Kübik Mo₂N 00-025-1366 referans kartındaki pikleri ile örtüşüyor. Aynen birinci numunede olduğu 120 Å' de yapılan kaplamada iç gerilimlerden dolayı kaplamalara ait bazı piklerde, orijinal Mo₂N ve MoN piklerine göre hafif kaymalar gözlemlenmiştir.



Şekil 6.2 : 120A Ark FBB'ile kaplanan numunenin XRD difraksiyon paterni

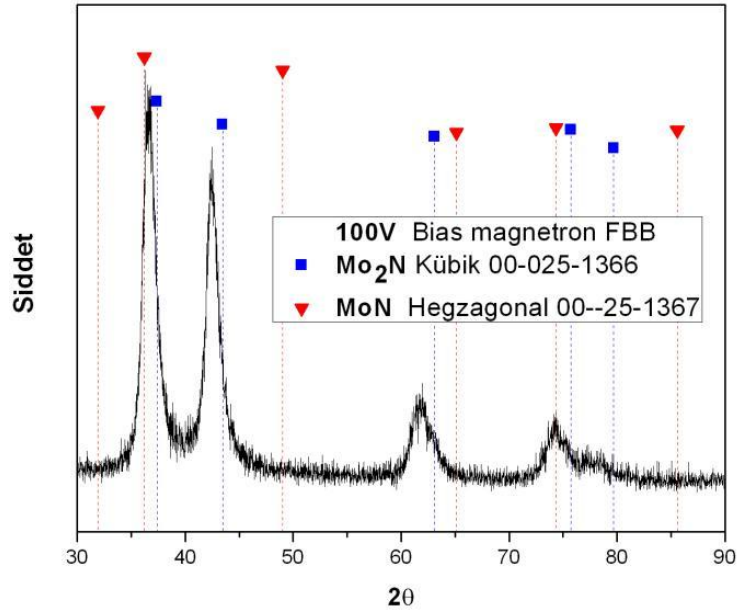
Şekil 6.3'te tüm numunelerin XRD paternleri bir arada verilmiştir. Piklere bakıldığında sadece 120 A ark FBB yöntemi ile kaplanan numunenin diğerleri ile farklı olduğu gözlenmektedir.



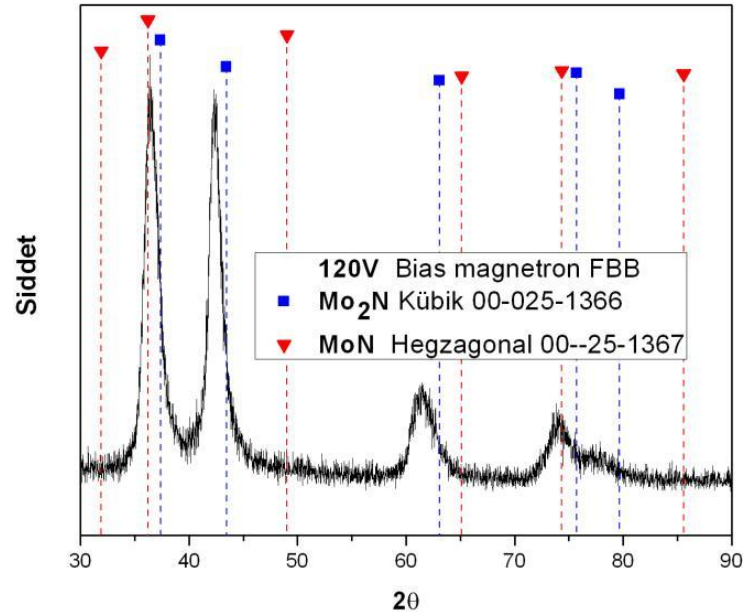
Şekil 6.3 : XRD difraksiyon paternleri

Magnetron FBB yöntemi ile yapılan kaplamaların XRD difraksiyon paternleri şekil 6.4 ve şekil 6.5'te verilmiştir. Piklere bakıldığında 100 V bias'ta yapılan kaplamanın difraksiyon paterni Mo₂N Kübik 00-025-1366, nolu JCPDS referans kartındaki pik

ile örtüşmektedirler. 120 V bias'ta yapılan kaplamada'da aynen Mo₂N Kübik 00-025-1366, nolu JCPDS referans kartındaki pik ile örtüşüyor.



Şekil 6.4 : 100V bias Magnetron FBB kaplamasının XRD difraksiyon paterni



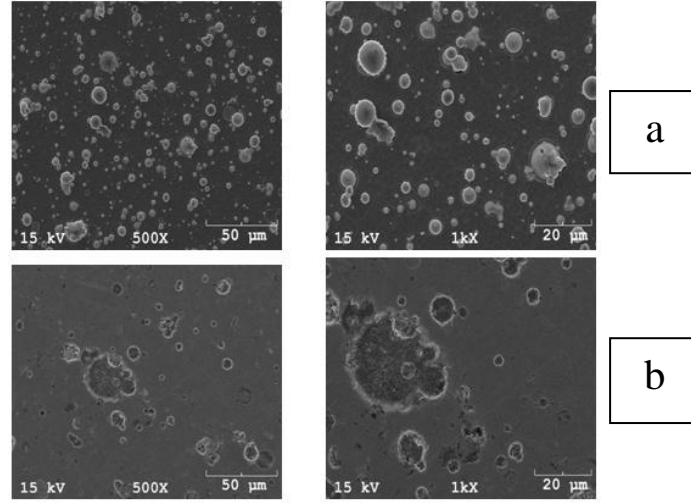
Şekil 6.5 : 120V bias Magnetron FBB kaplamasının XRD difraksiyon paterni

6.1.2 Kaplamaların yüzey ve kesit görüntülerinin incelenmesi

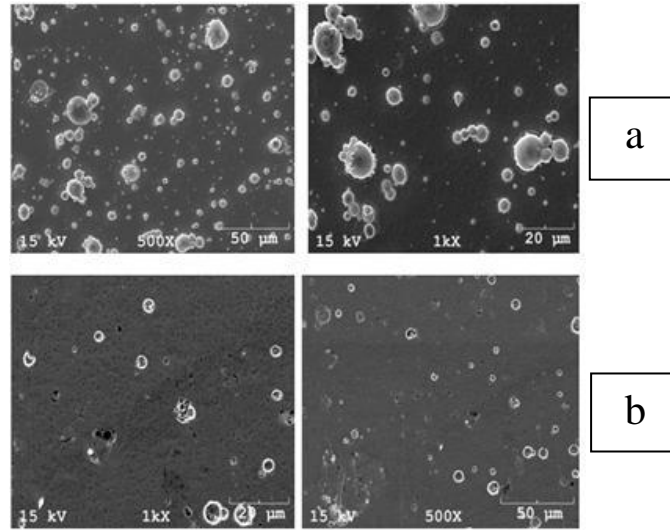
6.1.2.1 Kaplamaların yüzey görüntülerinin incelenmesi

Ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile, 100 A uygulanarak yapılan MoCuN kaplamasının yüzey görüntüleri şekil 6.6 ve 6.7'de verilmiştir. Yüzeylerde dropletlerin

oluşumu katottan kaynaklanmıştır. Kaplamadan hemen sonraki, yani parlatmadan önceki yüzeyler daha kaba bir görünüme sahiptirler. Yüzeyler kaplamadan sonra 2500 numaralı SiC zımpara ile hafif parlatılmış ve dropletler böylece azalmıştır.



Şekil 6.6 : 100 A de kaplanan numunenin SEM yüzey görüntüsü. a) Kaplamadan sonraki görüntüler, b) Parlattıktan sonraki yüzey görüntüleri

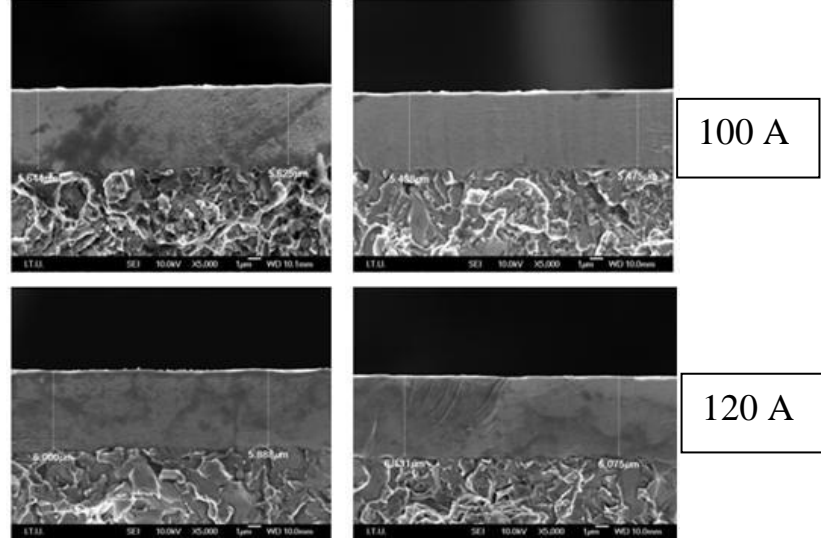


Şekil 6.7 : 120 A de kaplanan numunenin SEM yüzey görüntüsü. a) Kaplamadan sonraki görüntüler, b) Parlattıktan sonraki yüzey görüntüleri

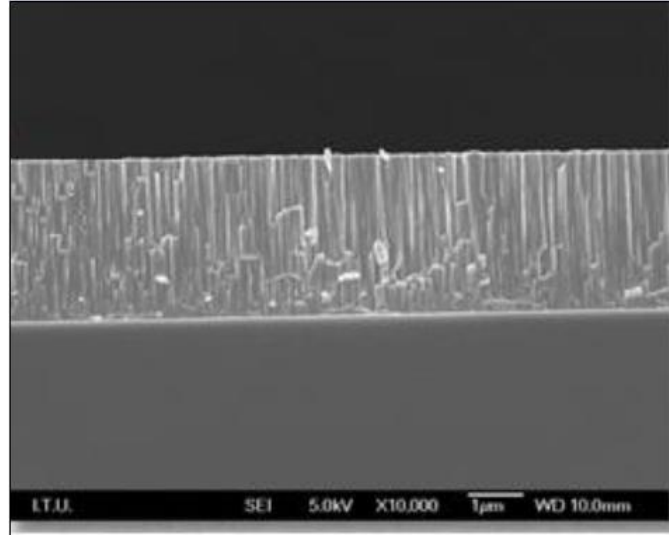
6.1.2.2 Kaplamaların kesit görüntülerinin incelenmesi

Kaplamaların büyüme morfolojisini tespit etmek için YHÇ numuneleri sıvı azot ortamında kırarak, kesitlerinden SEM görüntüsü alınmıştır. 100A ve 120A de yapılan katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunelerin ve 100 V Bias manyetik alanda sıçratma yöntemi ile kaplanan numunenin kesit görüntüleri şekil 6.8 ve 6.9 de verilmiştir. Görüntülere kesitten bakıldığında ark ile

kaplanan numunelerin kolonsal yapıda olmadığı ama manyetik alanda sıçratma ile kaplanan numunelerde kolonsal yapının varolduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.8 : 100 ve 120A de SEM kesit görüntüleri.



Şekil 6.9 : 100V Bias manyetik alanda sıçratma kaplamanının SEM kesit görüntüsü

6.1.3 Kaplamaların mikro sertlik ve kalınlık ölçümleri

Mikro sertlik cihazı kullanarak farklı yüklerde elde edilen sertlik değerleri Ek-A ve Ek-B de verilmiştir. Ark fiziksel buhar biriktirme (FBB) yöntemi ile kaplanan numunelerde her bir numune için 20mN yükten başlayarak 60mN yüke kadar arttırılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 1 sn. süre, 40 adım uygulanarak, 30 farklı nokta tekrar edilmiştir. En yüksek sertlik değeri 100A' de kaplanan numune için 20mN da yapılan deney için ortalama 34000 N/mm^2 olarak elde edilmiştir. 30mN'dan itibaren yük arttıkça sertlik değerlerinde bir düşüş

gözlemlenmiştir. Aynı zamanda 30mN yükten sonra sertlik değerleri 26000 N/mm^2 değer gibi bir değerde sabit kalmıştır. 120A' de yapılan kaplamada ise en yüksek sertlik değeri 30 mN da yapılan deneyde 28800 N/mm^2 olarak elde edilmiştir. İki numune arasında sertlik değeri olarak ciddi bir farka rastlanmamıştır.

Magnetron fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunelerde farklı bias voltajında üretilen kaplamalarda sadece 30mN yük uygulanarak sertlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. En yüksek sertlik değeri 19530 N/mm^2 olarak 120 bias voltajında kaplanan numunede elde edilmiştir. 100 bias voltajında kaplanan numunede ise sertlik değeri 16159 N/mm^2 olarak elde edilmiştir. Sertlik sonuçlarına bakıldığında farklı yüklerde yapılan deneylerde sertlik değerlerinde fazla değişiklikler gözlemlenmemiştir. Çizelge 6.1'te sertlik sonuçları sıralanmıştır.

Çizelge 6.1 : Ark FBB ve manyetik alanda sıçratma yöntemi ile kaplanan numunelerin kalınlık, Normalize elastisite modülü (E^*), ve sertlik değerleri

Numune adı	Kalınlık (μm)	$E/(1-V^2)$ GPa	Sertlik (N/mm^2)	Yük (mN)
100A Ark FBB	5.45	247.63 +/- 3.65	26548 +/- 525	30
120 A Ark FBB	6.03	255.14 +/-3.35	28828 +/- 464	30
100 V Bias Mag.FBB	2.56	199.41 +/- 1.92	16159 +/- 205	30
120 V Bias Mag.FBB	3.65	209.72 +/- 4.9	19530 +/- 460	30

Aynı yükte yapılan sertlik sonuçlarına bakıldığında katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yapılan kaplamalar manyetik alanda sıçratma yöntemi ile yapılan kaplamara kıyasla daha sert bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir.

6.1.4 Kaplamaların ESD analizi

Alaşım katodu ile yapılan kaplamaların EDS analizleri çizelge 6.2 ve 6.3'de verilmiştir. Her bir numune için önce kaplamadan sonra EDS analizi alınmıştır,

ardından kaplama yüzeyleri hafif parlatılarak dropletlerin giderilmesinden sonra tekrar EDS analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre Cu içerikleri dropletli noktalarda dropletsiz noktalara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 120A de yapılan numunenin Cu içeriği 100A de kaplanan numuneye göre daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır.

Çizelge 6.2 : 100A ark FBB ile kaplanan numunenin EDS analizi

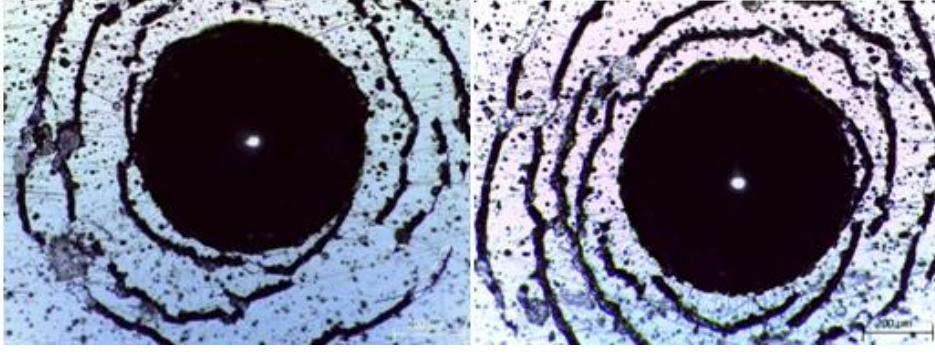
Droplet Noktalar 100 A	Dropletsiz Noktalar 100 A	Droplet Noktalar 100 A parlatılmış	Dropletsiz Noktalar 100 A parlatılmış
At. % Cu	At. % Cu	At. % Cu	At. % Cu
8.721	10.273	17.216	8.110
10.183	10.049	11.335	8.347
6.059	8.531		
8.655	8.922		
10.687	7.480		

Çizelge 6.3 : 120A ark FBB ile kaplanan numunenin EDS analizi

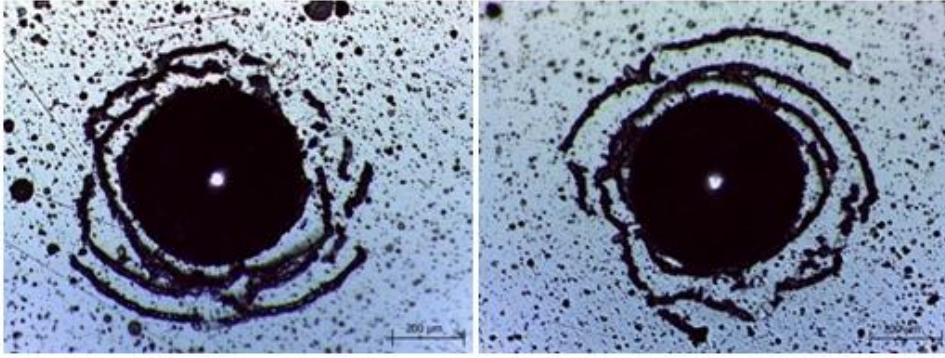
Droplet Noktalar 120 A	Dropletsiz Noktalar 120 A	Droplet Noktalar parlatılmış 120 A	Dropletsiz Noktalar parlatılmış 120 A
At. % Cu	At. % Cu	At. % Cu	At. % Cu
18.133	13.434	14.643	11.662
15.840	11.437	15.254	12.037
19.115 büyük	11.338	15.123	13.254
14.479 küçük	15.186	16.822	13.495
18.150	14.638	16.185	12.535
18.158	-----		

6.1.5 Kaplamaların Rockwell C testi

Her iki grup Kaplamalarda, kaplamaların alt malzemeye yapışma özelliklerini incelemek için numunelerin 100 N normal yük kullanarak farklı 2 noktadan Standart **Rockwell C** sertlik izi testi yapılmıştır. Deneyler sonucunda oluşturulan Rockwell C izlerinde optik mikroskop ile yapılan çalışmada Şekil 6.10 - 6.13'te de olduğu gibi hiçbir kaplamada iz etraflarında kaplamalarda dökülme gözlenmemiştir.

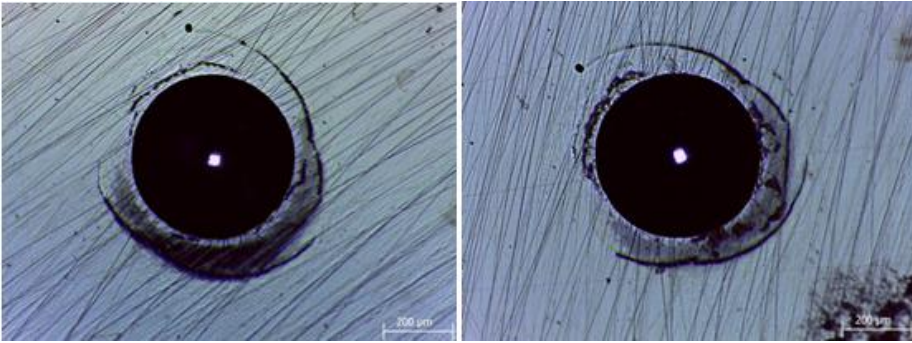


Şekil 6.10 : 100A ArkFBB

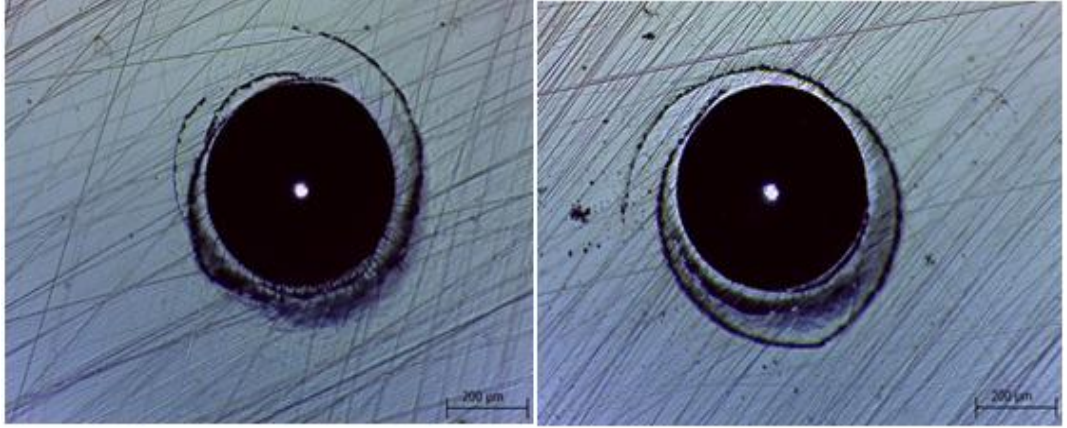


Şekil 6.11 : 120A ArkFBB

Eryılmaz doktora tez çalışmalarında Ark FBB yöntemi ile ürettiği kaplamaların Rockwell C izlerinde yaptığı incelemelerde % 3 (at) bakır (Cu) içeren en sert Mo-N-Cu kaplama hariç, hiç bir kaplamada dökülmelere raslamamıştır. En sert kaplama kalınlığının 3.2 µm olduğu, yalnız kaplamanın tamamen taban malzemedan kopmadığı ve görülen ayrılma bölgelerinde hala kaplamanın bulunduğu gözlenmiştir. Bu kaplamada dökülmelerin nedeni olarak, kaplamanın çok kalın olduğu ve gevrek karakterde olmasından kaynaklandığını düşünmüşlerdir. Bu kaplamanın en sert kaplama olduğu ve yoğun kolonsal yapı veya küresel tanelerin oluşturduğu bir yapıya sahip olduğu saptanmıştır.[1]



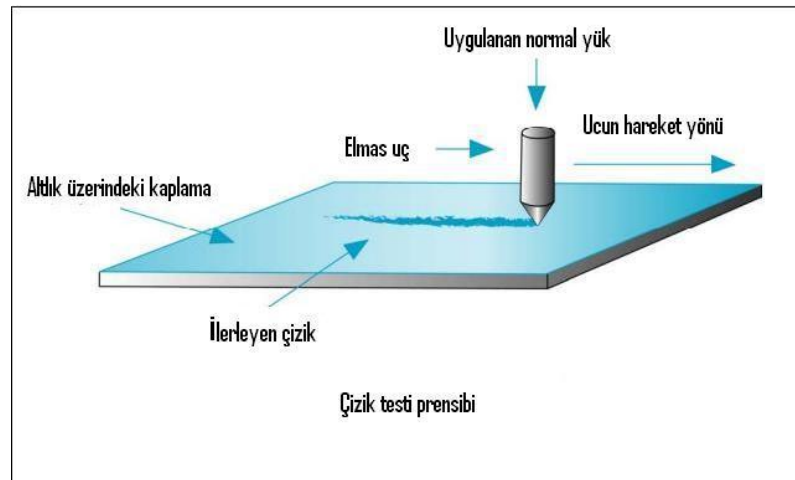
Şekil 6.12 : 100V bias Manyetik alanda sıçratma FBB



Şekil 6.13 : 120V bias Manyetik alanda sıçratma FBB

6.1.6 Kaplamaların yapışma özelliklerinin incelenmesi (Scratch test)

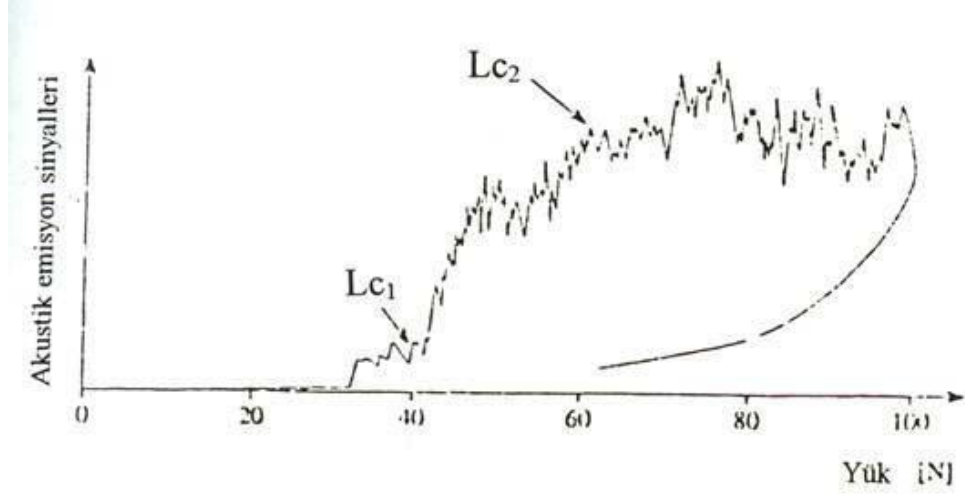
Çizik deneyi temel olarak yapışma mukavemetini ölçmektedir. Çizik testi CETR UMT Multi-Specimen cihazında mesafeye karşı akustik emisyon ve uygulanan yük grafiği çizilerek yapılmıştır. Şekil 6.14’te çizik testinin temel prensibi verilmiştir.



Şekil 6.14 : Çizik testi prensibi

Genel olarak çizik testi grafiğine bakıldığında ilk çatlamanın meydana geldiği yükte (Lc_1) akustik emisyon sinyalleri oluşmaya başlar.

(Lc_2) yüküne ulaşıldıktan sonra ise sinyaller yaklaşık aynı seviyede kalır. Şekil 6.15’de Çizik deneyi sırasında akustik emisyon sinyallerinin uygulanan yüke bağlı değişimi gözlenmektedir [27].



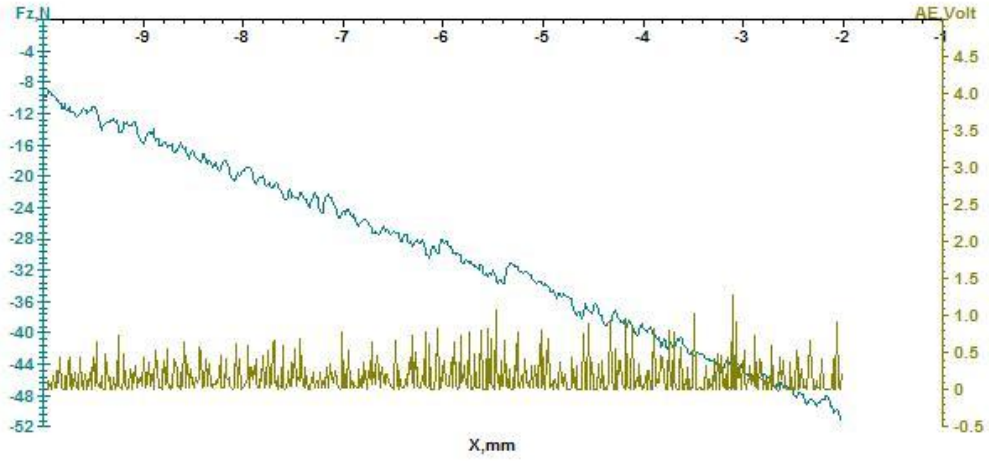
Şekil 6.15 : Çizik deneyi sırasında akustik emisyon sinyallerinin yüke bağlı değişimi [27].

Çizik testinde tüm kaplanan numunelerde uygulanan parametreler çizelge 6.4'te sıralanmıştır.

Çizelge 6.4 : Çizik (Scratch) testi deneylerinde uygulanan parametreler

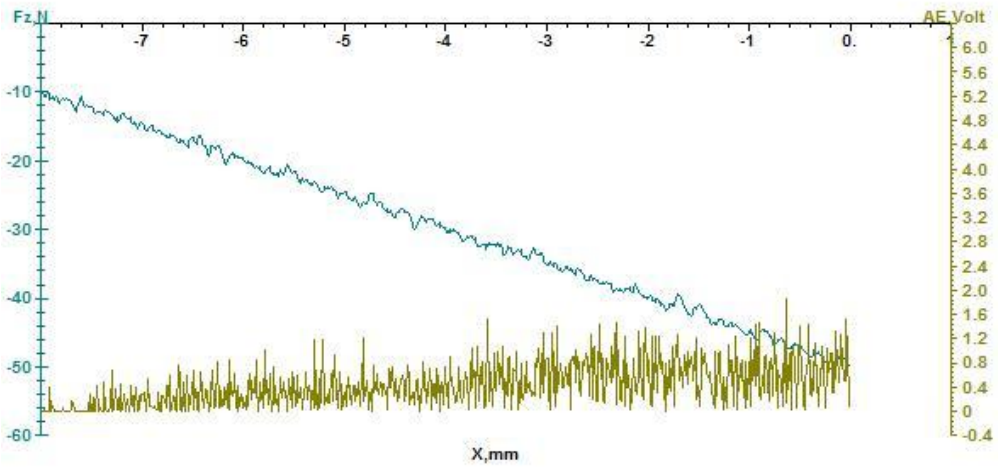
kaplama	Başlangıç Yük. (N)	Maks. Yük. (N)	Çizme Uzunluğu (mm)	Zaman (s)
100 A Ark FBB	10	50	8	60
120 A Ark FBB	10	50	8	60
100 V bias magnetron FBB	10	50	8	60
120 V bias magnetron FBB	10	50	8	60

Çizik testindeki cihaza bağlı uç üzerine algılayıcı ile numuneden gelen akustik emisyon sinyalleri ve sürtünme kuvveti grafikleri çizilmiştir. Akustik emisyon (AE) – Yük (F_z) – Mesafe (X) grafiklerine bakıldığında 100 A ve 120 A katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunelerde kaplamalarda kopmalara raslanmamıştır. Şekil 6.16 ve 6.17'de belirtildiği gibi akustik emisyon sinyallerinde belirgin bir değişikliğe raslanamamıştır. Akustik emisyon sinyalleri grafiğinde hemen hemen yatay bir ilerleme oluşmaktadır. Böylece yüzeylerde ciddi bir kopma oluşmamaktadır.



100 A Katodik Ark FBB

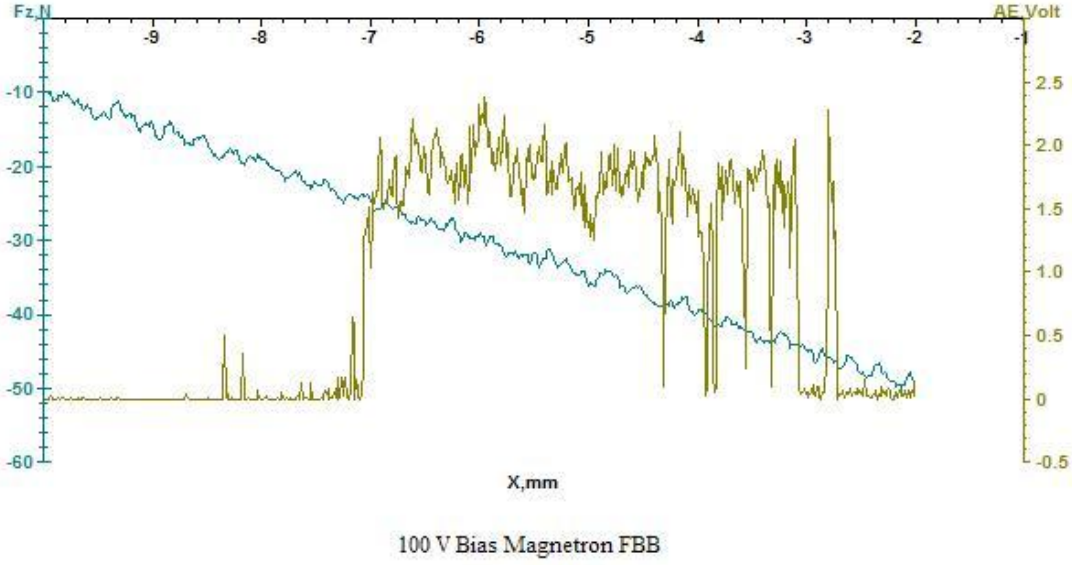
Şekil 6.16 : 100 A katodik Ark FBB'nin çizik testi (AE)-(Fz)-(X) grafiği



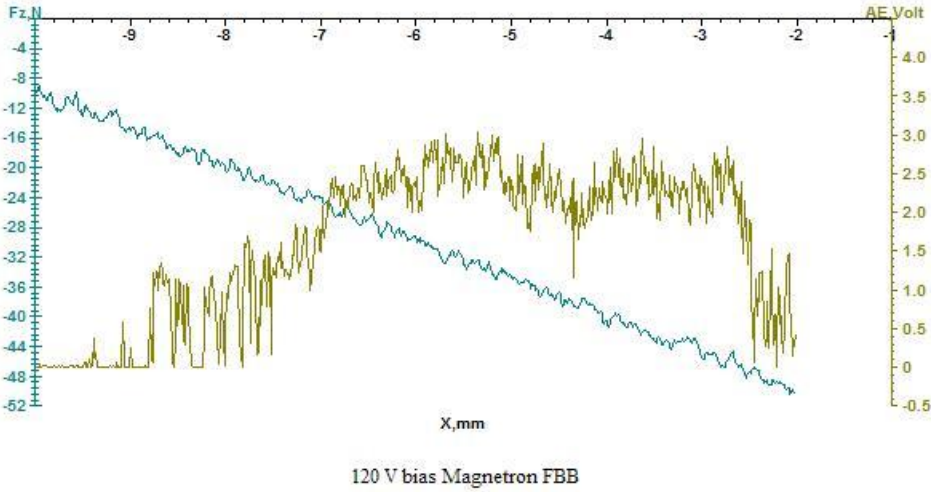
120 A Katodik Ark FBB

Şekil 6.17 : 120 A katodik Ark FBB'nin çizik testi (AE)-(Fz)-(X) grafiği

Ama 100 V bias ve 120 V bias manyetik alanda sıçratma yöntemi ile kaplanan numunelerde yaklaşık 22N kritik yükten itibaren kaplamalarda kopmalar gözlemlenmiştir. Şekil 6.18 ve 6.19'da belirtildiği gibi akustik emisyon grafiğinin sinyallerinden yola çıkarak 22N kritik yükten sonra ilk çatlamanın meydana geldiği ve akustik emisyon sinyalleri oluşmaya başladığı ortaya çıkmaktadır. Bu da ark ile yapılan kaplamaların sıçratma yöntemi ile kaplanan numunelere kıyasla daha sert olduğundan kaynaklanmıştır.

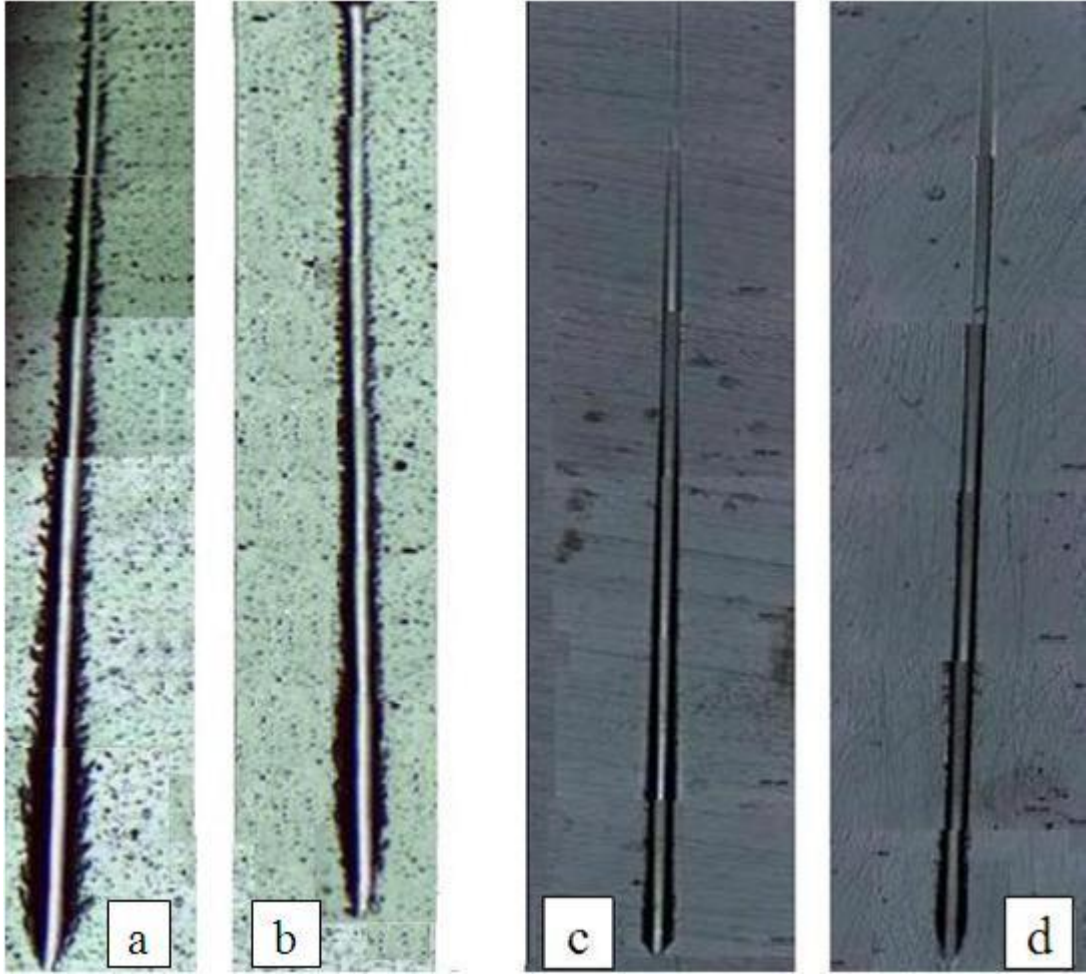


Şekil 6.18 : 100 V Bias Magnetron FBB'nin çizik testi (AE)-(Fz)-(X) grafiği



Şekil 6.19 : 120 V Bias Magnetron FBB'nin çizik testi (AE)-(Fz)-(X) grafiği

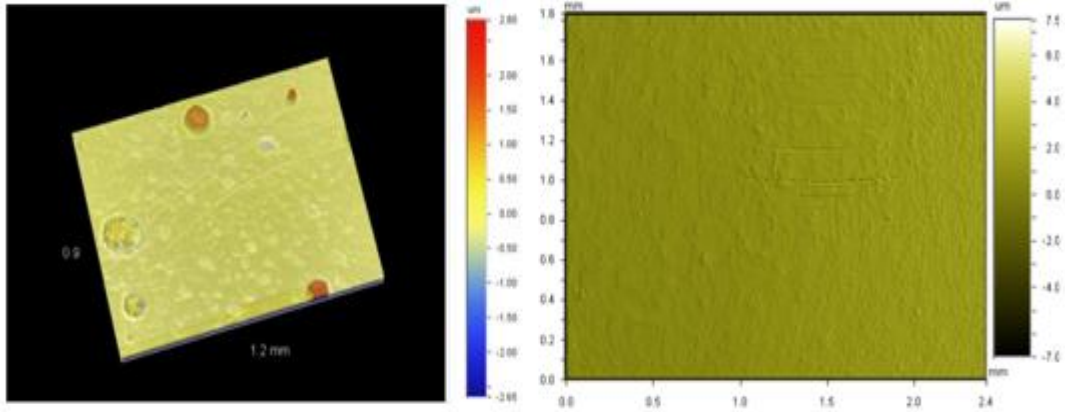
Şekil 6.20'de tüm numunelerin yani 100A ve 120A'de ark fiziksel buhar biriktirmme yöntemi ile yapılan kaplamaların ve 100V bias ve 120V bias'ta manyetik alanda sıçratma yöntemi ile kaplanan numunelerin çizik testi sonucu oluşan çiziklerin optik mikroskopla çekilen görüntüleri verilmiştir. Şekillere bakıldığında ark yöntemi ile kaplanan numunelerin yüzeylerinde kaplamada kopma gözükmemektedir. Ama diğer yöntemle kaplanan numunelerin yüzeylerinde hafif kopmalar meydana gelmektedir.



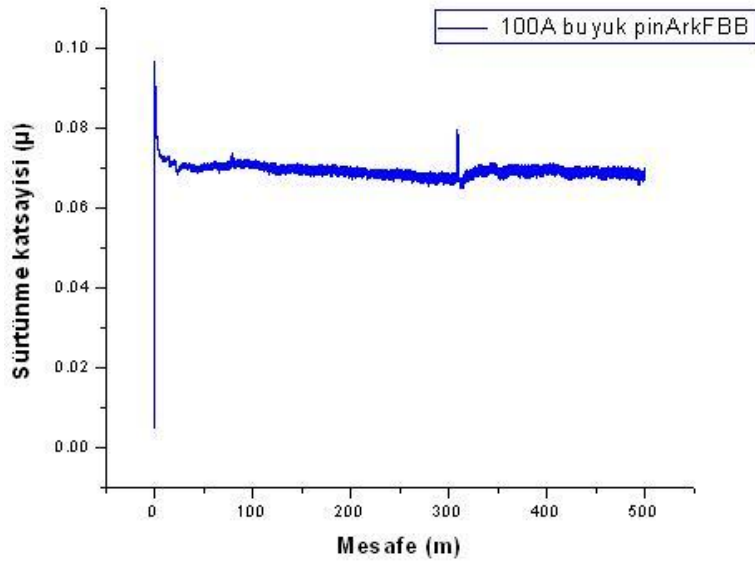
Şekil 6.20 : a)100A b)120A Ark FBB ve c)100V d)120V bias magnetron FBB

6.1.7 Kaplamaların aşınma deneylerinin sonuçları

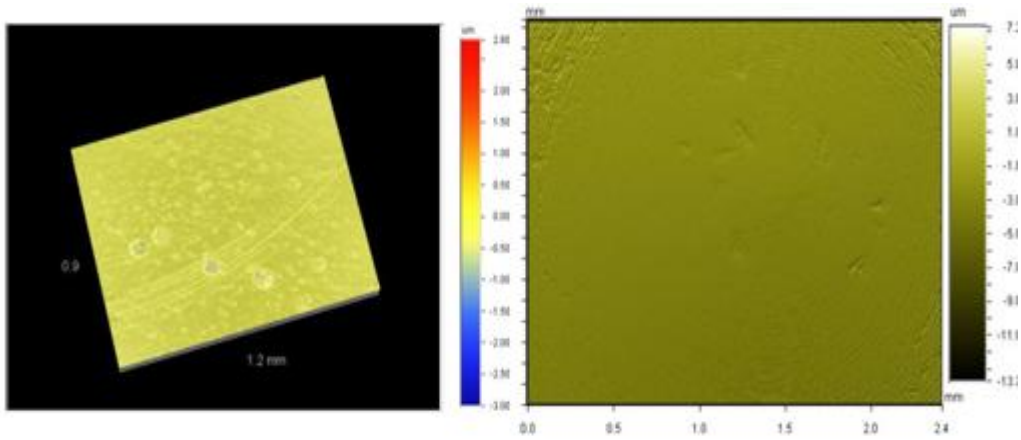
Disk üzeri pin deneyleri YHÇ pinlere karşı sınır yağ koşullarında yaklaşık 19°C sıcaklık ve %51 bağıl nemde 20 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde aşınma hızı 2 cm/s ve toplam aşınma mesafesi ise 500 m olarak ayarlanmıştır. Numunelerin üzerine ince bir film şeklinde kaplayacak gibi Mobil 10W-40 marka formüle yağ sürülmüştür. Şekil 6.21- 6.24'te 100A ve 120A ark FBB yöntemi ile kaplanan numunelerin 3D (üç boyutlu) ve pinlerin 2D (iki boyutlu) optik profilometre görüntüleri ve mesafeye bağlı sürtünme katsayı grafiği verilmiştir. Ark yöntemi ile kaplanan numunelerin yüzeylerinde arkın fazla oluşumundan dolayı yüzeyler kaba bir görünüme sahiplerdir. Aşınma deneyleri sonucu pinler yüzeyler üzerinde hareket ettiği sıralarda, yüzeylerdeki dropletlerden kaynaklanan hafif izlere raslamak mümkündür.



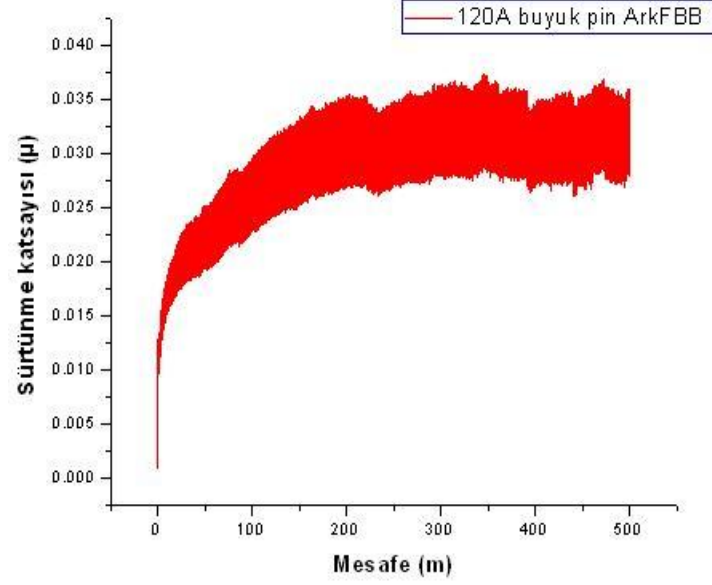
Şekil 6.21 : 100 A Ark FBB kaplamanın 3D (sol) ve pinin 2D (sağ) görüntüsü



Şekil 6.22 : 100A, Sürtünme katsayısı grafiği



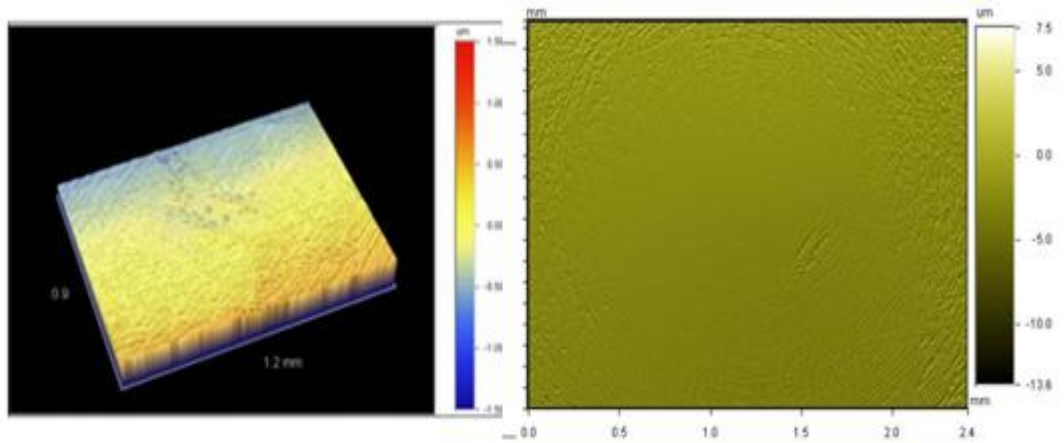
Şekil 6.23 : 120A Ark FBB kaplamanın 3D (sol) ve pinin 2D (sağ) görüntüsü



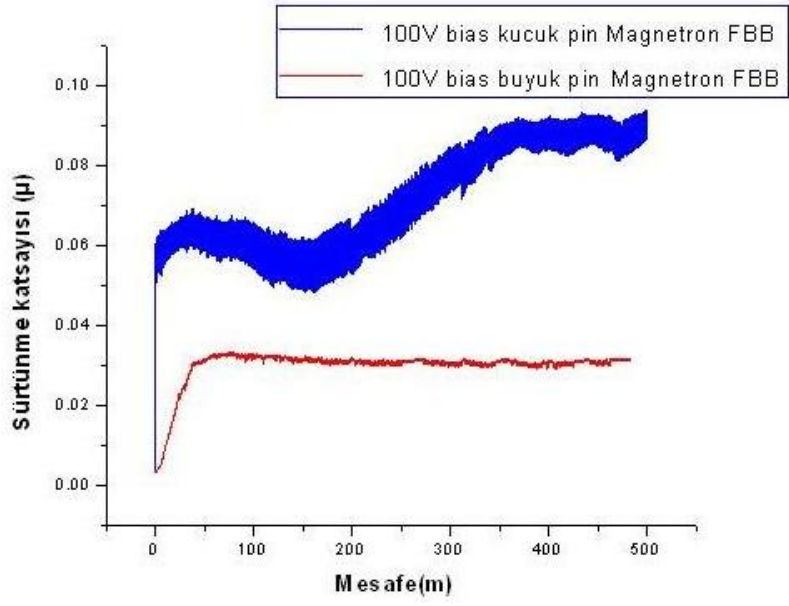
Şekil 6.24 : 120A, Sürtünme katsayısı grafiği

Ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunelerin yüzeylerinde çok hafif aşınma izleri gözlemlenmiştir. Ama bu zayıf aşınmaların dropletlerin varlığından kaynaklanmaları düşünülmektedir. Sürtünme katsayısı bu iki kaplamada ortalama sırasıyla 0.068 ve 0.030 olarak elde edilmiştir.

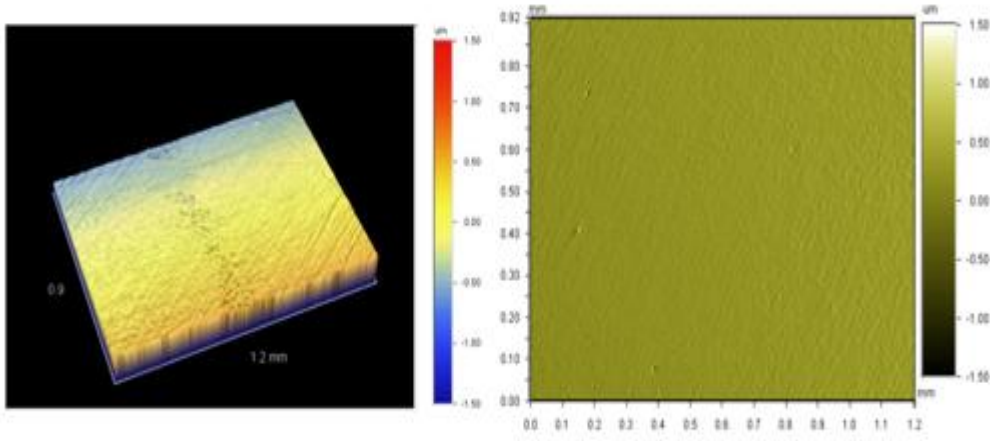
Manyetik alanda sıçratma yöntemi ile kaplanan numunelerin 3D (üç boyutlu) ve pinlerin 2D (iki boyutlu) görüntüleri ve mesafeye bağlı sürtünme katsayısı grafiği şekil 6.25- 6.28'de verilmiştir.



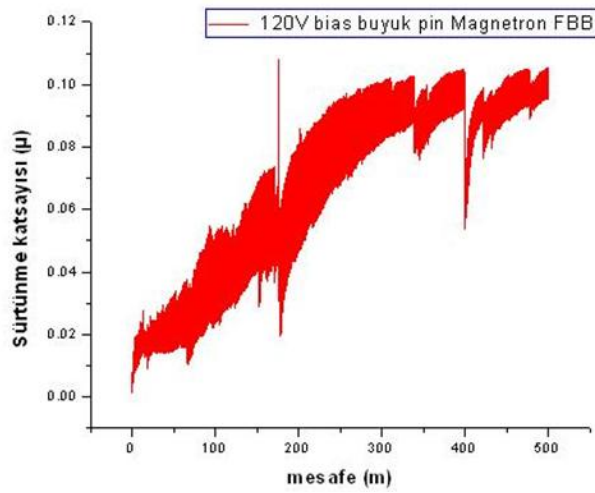
Şekil 6.25 : 100V bias manyetik FBB kaplamasının 3D (sol) ve pin 2D (sağ) görüntüsü



Şekil 6.26 : 100V bias, Sürtünme katsayısı grafiği



Şekil 6.27 : 120V bias manyetik FBB kaplamanın 3D (sol) ve pin 2D (sağ) görüntüsü



Şekil 6.28 : 120V, Bias Sürtünme katsayısı grafiği

Magnetron fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunelerde ise aşınma izine gözle görünür bi şekilde raslanmamıştır. Bu iki grup kaplamada sürtünme katsayıları sırasıyla ortalama 0.032 ve 0.045 olarak değerlendirilmiştir. Kaplamaların ortalama sürtünme katsayı sonuçları çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5 : Kaplamaların ortalama sürtünme katsayısı değerleri

Kaplama	Ortalama Sürtünme Katsayısı (μ)
100 A Katodid Ark FBB	0.068
120 A Katodid Ark FBB	0.030
100 V Bias Magnetron FBB	0.032
120 V Bias Magnetron FBB	0.045

Aşınma deneyleri sonunda sürtünme katsayısı sonuçlarına bakıldığında en düşük sürtünme katsayısı 120 A katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunede gözlemlenmiştir.

7. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

1. Bu çalışma kapsamında nanokompozit kaplamalar üretiminde kullanılmak üzere %10 Cu içeren alaşım (Mo-Cu) katot kullanarak katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile Mo-N-Cu kaplamalar üretilmiş ve tanımlanmıştır.
2. XRD sonuçlarına göre manyetik alanda sıçratma ve 100 A katot akımı kullanılarak yapılan ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunelerin kübik Mo₂N yapısında olduğu, 120 A katot akımı kullanılarak üretilen kaplamaların ise kübik Mo₂N ve hekzagonal MoN karışımı halinde olduğu belirlenmiştir. İç gerilimlerden dolayı kaplamalara ait piklerde, orijinal Mo₂N pikine göre hafif kaymalar gözlemlenmiştir.
3. Ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile, 100 A uygulanarak yapılan Mo-N-Cu kaplamanın yüzey görüntülerine bakıldığında Yüzeylerde dropletlerin oluşumu katottan kaynaklanmıştır. Parlatmadan önceki yüzeyler daha kaba bir görünüme sahiptirler. 100 A ve 120 A de katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunelerin kesit görüntülerine bakıldığında kolonsal yapının olmadığı bir yapıya sahip oldukları gözlemlenmiştir. 100V bias magnetron fiziksel buhar biriktirme ile kaplanan numunede kolonsal yapının var olduğu gözükmemektedir.
4. En yüksek sertlik değeri 100A' de kaplanan numune için 20mN da yapılan deney için ortalama 34000 N/mm²' olarak elde edilmiştir. 30mN'dan itibaren yük arttıkça sertlik değerlerinde bir düşüş gözlemlenmiştir. Aynı zamanda 30mN yükten sonra sertlik değerleri 26000 N/mm² değer gibi bir değerde sabit kalmıştır. 120A' de yapılan kaplamada ise en yüksek sertlik değeri 30 mN da yapılan deneyde 28800 N/mm² olarak elde edilmiştir. İki numune arasında sertlik değeri olarak ciddi bir farka rastlanmamıştır. Manyetik alanda sıçratma yöntemi ile kaplanan numunelerde en yüksek sertlik değeri 19530 N/mm² olarak 120 bias voltajında kaplanan numunede elde edilmiştir. 100 bias voltajında kaplanan numunede ise sertlik değeri 16159 N/mm² olarak elde edilmiştir. Sertlik sonuçlarına bakıldığında farklı yüklerde yapılan

deneylerde sertlik değerlerinde fazla değişiklikler gözlemlenmemiştir. katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yapılan kaplamalar manyetik alanda sıçratma yöntemi ile yapılan kaplamalara kıyasla daha sert bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir.

5. ESD analizleri sonucu ark FBB yöntemi ile kaplanan numunelerde 120A de yapılan numunenin Cu içeriği 100A de kaplanan numuneye göre daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır.
6. Rockwell C testi deneyler sonucunda oluşturulan izlerde hiçbir kaplamada iz etraflarında kaplamalarda dökülme gözlenmemiştir.
7. Çizik (Scratch) testi sonucu, 100 A ve 120 A katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunelerde, kaplamalarda kopmalara raslanmamıştır. Ama 100 V bias ve 120 V bias manyetik alanda sıçratma yöntemi ile kaplanan numunelerde yaklaşık 22 N kritik yükten itibaren kaplamalarda kopmalar gözlemlenmiştir. Ark ile yapılan kaplamaların sıçratma yöntemi ile kaplanan numunelere kıyasla daha sert olduğundan kaynaklanması düşünülmüştür.
8. Ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunelerin yüzeylerinde çok hafif aşınma izleri gözlemlenmiştir, ama bu çok zayıf aşınmaların dopletlerden kaynaklanması düşünülmektedir. Magnetron fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunelerde hiç bir aşınma izine raslanmamıştır. Aşınma deneyleri sonunda sürtünme katsayısı sonuçlarına bakıldığında en düşük sürtünme katsayısı 120 A katodik ark fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile kaplanan numunede gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Eryılmaz, O. L.**, 2001. Ark fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle nanokompozit Mo- N-Cu kaplamaların üretimi ve karakterizasyonu, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen-Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Öztürk, A.**, 2003. Manyetik sıçratma tekniği ile üretilmiş Mo₂N ve nanokompozit Mo-N-Cu kaplamaların kazımalı aşınma davranışlarının karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen-Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Öztürk, A., Ezirmik, K. V., Kazmanlı, K., Ürgen, M., Eryılmaz, O. L., Erdemir, A.**, 2008. Comparative tribological behaviors of TiN-, CrN- and MoN-Cu nanocomposite coatings, *Tribology International*, **41**, 49–59.
- [4] **Erdemir, A., Ürgen, M., Çakır, A. F., Eryılmaz, O. L., Kazmanlı, K., Keleş, Ö.**, 2007. Hard and Low Friction Nitride Coatings and Methods for Forming the Same. *United States Patent*, No: US. 7211323, dated 01.05.2007.
- [5] **Szeri, A. Z.**, 1980. Tribology, Friction, Lubrication and Wear; Hemisphere Publishing
- [6] **Url**<<http://www.metaldunyasi.com/tr/roportaj.asp?ID=120&Grup=arsiv>> alındığı tarih 10.03.2010
- [7] **Musil, J.**,2000. Hard and Superhard Nanocomposite Coatings Surf. And Coat. Technol., 125, 322-330
- [8] **Veprek, S.**, 2000. Ultra Hard Nanocomposite Coating With Hardnes of 80 to 105 Gpa, Int. On Trends and Appl. Of Thin Films, TAFT 2000, Nancy France, Societe Francaisedu Vide, Paris March, 2000, 185-195.
- [9] **Veprek, S., Nederhofer A., Moto, K., Bolom, T., Mannling H.D., Nasladek, P., Dollinger, G., Bergmaier, A.**, 2000, Composition, Nanostructure and Origin of the Ultra hardness in nc-TiN/a-Si₃N₄/a and nc-TiSi₂ Nanocomposites with Hv=80 to ≥ 105 GPa, Surf. and Coat. Technol., 133-134, 152-159.
- [10] **Zeman, P., Cerstvy, R., Mayrhofer, P.H., Mitterer, C., Musil, J.**, 2000, Structure and Properties Zr-Cu-N Nanocomposite Coating, Materials Sci. And Eng., **A289**, 189-197.
- [11] **Musil, J., Zeman, P., Hruby, H., Mayrhofer, P.H.**, 1999 Zr-Cu-N Nanocomposite Film – A Novel Superhard Material, Surf. and Coat. Technol., **120-121**, 179-183.
- [12] **Musil, J., Vlcek, J.**, 2001. Magnetron Sputtering of Hard Nanocomposite Coating and Their Properties, Surf. and Coat. Technol., **142-144**, 557-566.

- [13] **Yang, J. F., Yuan, Z. G., Zhang, G. G., Wang, X. P., Fang, Q. F.**, 2009. Manufacture, microstructure and mechanical properties of Mo–W–N nanostructured hard films, *Materials Research Bulletin*, **44**, 10, 1948-1953.
- [14] **Yang, J. F., Yuan, Z. G., Liu, Q., Wang, X. P., Fang, Q. F.**, 2009. Characterization of Mo–Al–N nanocrystalline films synthesized by reactive magnetron sputtering, *Materials Research Bulletin*, **44**, 1, 86-90.
- [15] **Ezirmik, K. V.**, 2008. Mo-N-Ag nanokompozit kaplamaların üretimi ve tribolojisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen-Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] **Vancoile, E.**, 1993. Ph.D. Thesis, KatholikeUniversity, Leuven.
- [17] **ATAR Erdem.**, 2004. Zirkonyum Hafniyum Nitrür kaplamaların mekanik ve aşınma özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen-Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] **SEZGİN A.**, 2010. Mo-N-Cu, Mo-N-Sn ve Mo-N-Cu-Sn Nanokompozit yapıları kaplamaların üretimi v karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19] **Kelly, P. J., Arnell, R. D.**, 2000. Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications, *Vacuum*, **56**, 3, 159-172.
- [21] **Url-3** <<http://www.pvd-coatings.co.uk/theory-of-pvd-coatings-magnetron-sputtering.htm>> alındığı tarih 15.04.2010.
- [22] **Kazmanli, K., Daryal, B., Urgan, M.**, 2007. Characterization of nano-composite TiN–Sb coating produced with hybrid physical vapor deposition system, *Thin Solid Films*, **515**, 7-8, 3675-3680.
- [23] **Url-4** <<http://www.pvd-coatings.co.uk/theory-of-pvd-coatings-arc-evaporation.htm>> alındığı tarih 15.04.2010.
- [24] **Eryürek, İ. B.**, 1993. Hasar Analizi, Birsen Yayınevi, sf. 154-162.
- [25] **Çimenoğlu, H., Kayalı, E. S.**, 1991. Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, sf. 236-246.
- [26] **Onaran, K.**, 2003. Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, sf. 287-288.
- [27] **Türküz, M.C.**, 1997. Ark PVD Yöntemiyle TiN Kaplanmış Kesici Takımların Karakterizasyonu ve Performanslarının Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, sf. 50-57
- [28] **Türküz, M.C.**, 2005. PVD yöntemi ile yapılan Zirkonyum Nitrür (ZrN) ince film kaplamaların kaplama parametrelerinin incelenmesi ve optimizasyonu
- [29] **Hatman, A.**, 2003. Takım Çelikleri El Kitabı, Assab Korkmaz Çelik Tic.ve San. A.ğ. Firma Kataloğu, sf. 30-32.
- [30] **Bhushan, B., Gupta, B.K.**, 1991. Handbook of tribology : materials, coating and surface treatments, McGraw-Hill, New York.

- [31] **Bhushan, B.**, 2001. Modern Tribology Handbook Vol. I and Vol. II, The Mechanics and Materials Science Series, CRC press, New York,USA.
- [32] **Matthews, A., Leyland, A., Holmberg, K., Ronkainen, H.**, 1998. Design aspects for advanced tribological surface coatings, Surf. Coat. Technol., 100-101, 1-6.
- [33] **Holmberg, K., Matthews, A., Ronkainen, H.**, 1998. Coating tribology-contact mechanisms and surface design. Trib. Inter., 31, 1-3, 107-120.
- [34] **Holmberg, K., Ronkainen, H., Matthews, A.**, 2000. Tribology of thin coating, Ceram. Inter., 26, 787-795.

EKLER

Ek-A: 100A de yapılan numunenin farklı yükler altında ölçülen sertlik değerleri. Kaplamaların sertlik , Normalize elastisite modülü (E^*) ve batma enerji değerleri: W_t :toplam batma enerjisi, W_e : batma enerjisinin elastik kısmı, W_r : batma enerjisinin plastik kısmı

Ek-B: 120A de yapılan numunenin farklı yükler altında ölçülen sertlik değerleri. Kaplamaların sertlik , Normalize elastisite modülü (E^*) ve batma enerji değerleri: W_t :toplam batma enerjisi, W_e : batma enerjisinin elastik kısmı, W_r : batma enerjisinin plastik kısmı

Ek-A: 100A de yapılan numunenin farklı yükler altında ölçülen sertlik değerleri. Kaplamaların sertlik , Normalize elastisite modülü (E^*) ve batma enerji değerleri: W_t :toplam batma enerjisi, W_e : batma enerjisinin elastik kısmı, W_r : batma enerjisinin plastik kısmı

100 A (F) mN	W_t (nj)	W_e (nj)		W_r (nj)		$E/(1-V^2)$ GPa	H (N/mm²)	h r^* (µm)
20mN	1.75	1.32	75.52%	0.43	24.48%	271.14 +/- 6.19	39160 +/- 1492	0.139 +/- 0.003
20mN	1.82	1.27	69.70%	0.55	30.30%	244.78 +/- 3.07	29605 +/- 520	0.16 +/- 0.001
25mN	2.56	1.80	70.26%	0.74	29.74%	255.71 +/- 4.62	32977 +/- 789	0.169 +/- 0.002
30mN	3.43	2.24	65.26%	1.19	34.74%	240.08 +/- 3.90	26548 +/- 525	0.207 +/- 0.002
30mN	3.31	2.20	66.57%	1.11	33.43%	247.63 +/- 3.65	25470 +/- 406	0.211 +/- 0.002
50mN	7.40	4.60	62.21%	2.80	37.79%	248.50 +/- 1.76	25921 +/- 243	0.270 +/- 0.001
50mN	7.24	4.55	63.18%	2.71	36.82%	247.56 +/- 3.62	25817 +/- 593	0.271 +/- 0.003
50mN	7.26	4.78	65.93%	2.47	34.07%	239.49 +/- 3.46	26853 +/- 515	0.265 +/- 0.003
50mN	7.55	4.65	61.52%	2.91	38.48%	237.02 +/- 3.17	24211 +/- 362	0.280 +/- 0.002
60mN	9.83	6.01	61.11%	3.82	38.89%	239.32 +/- 2.99	24818 +/- 398	0.302 +/- 0.002
60mN	9.38	5.99	63.87%	3.39	36.13%	263.39 +/- 3.30	28291 +/- 487	0.283 +/- 0.002
60mN	9.90	6.17	62.35%	3.73	37.65%	234.67 +/- 2.68	24849 +/- 382	0.302 +/- 0.002

Ek-B: 120A de yapılan numunenin farklı yükler altında ölçülen sertlik değerleri. Kaplamaların sertlik , Normalize elastisite modülü (E^*) ve batma enerji değerleri: W_t :toplam batma enerjisi, W_e : batma enerjisinin elastik kısmı, W_r : batma enerjisinin plastik kısmı

120 A (F) mN	W_t (nj)	W_e (nj)	W_r (nj)	$E/(1-V^2)$ GPa	H (N/mm ²)	$h r^*$ (μm)
20 mN	1.87	1.23 65.68%	0.64 34.32%	235.67 +/- 4.62	25431 +/- 612	0.172 +/- 0.002
20 mN	1.79	1.24 69.18%	0.55 30.82%	256.88 +/- 2.95	31116 +/- 493	0.156 +/- 0.001
20 mN	1.97	1.22 61.93%	0.75 38.07%	224.06 +/- 3.91	24129 +/- 489	0.177 +/- 0.002
20 mN	1.85	1.27 68.25%	0.59 31.75%	248.45 +/- 4.40	29964 +/- 855	0.159 +/- 0.002
30 mN	3.35	2.21 65.88%	1.14 34.12%	255.14 +/- 3.35	28828 +/- 464	0.199 +/- 0.002
40 mN	5.35	3.19 59.63%	2.16 40.37%	241.49 +/- 3.45	23816 +/- 611	0.252 +/- 0.003
40 mN	5.10	3.29 64.57%	1.81 35.43%	266.39 +/- 3.77	28865 +/- 578	0.229 +/- 0.002
40 mN	5.00	3.28 65.66%	1.72 34.34%	266.95 +/- 3.63	29262 +/- 575	0.224 +/- 0.002
50 mN	7.39	4.57 61.80%	2.82 38.20%	252.21 +/- 2.37	25910 +/- 298	0.270 +/- 0.002
50 mN	7.32	4.53 61.95%	2.78 38.05%	241.91 +/- 3.64	23553 +/- 374	0.283 +/- 0.002
60 mN	9.81	5.89 60.02%	3.92 %39.98	243.08 +/- 3.55	24466 +/- 387	0.305 +/- 0.002
60 mN	9.89	5.56 57.21%	4.23 %42.79	245.20 +/- 2.86	22381 +/- 274	0.318 +/- 0.002
60 mN	9.89	5.78 58.42%	4.11 %41.58	251.69 +/- 2.23	24233 +/- 268	0.308 +/- 0.002
60 mN	9.95	5.81 58.43%	4.14 %41.57	250.44 +/- 2.04	23947 +/- 251	0.308 +/- 0.002

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mortaza MOHAMMADIMOGHANJOUGHİ

Doğum Yeri ve Tarihi: Salmas, İran, 25.11.1981

Adres: Vişnezadeh Mah, No:1, Maçka, Beşiktaş, İstanbul

E-Posta: mortaza.81@gmail.com

Lisans: Fizik Mühendisliği, Urmia Üniversitesi İran.