

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**VAKUM ARK PLAZMA DEPOZİSYON ÜNİTESİNİN
MEVCUT MEVVA İYON İMPLANTASYON SİSTEMİNE
ADAPTASYONU VE ÜZERİNDE SİNİR HÜCRELERİNİN
ÇOĞALTILMASINA TEMEL OLABİLECEK ÇALIŞMALAR
İÇİN ÇEŞİTLİ MALZEMELERİN DLC İNCE FİLM İLE
KAPLANARAK BAZI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Umut YEŞİLYURT

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet ÖZTARHAN

Biyomühendislik Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 612.01.00

Sunuş Tarihi : 25.06.2012

**Bornova-İZMİR
2012**

Umut YEŞİLYURT tarafından Doktora Tezi olarak sunulan “Vakum Ark Plazma Depozisyon Ünitesinin Mevcut MEVVA İyon İmplantasyon Sistemine Adaptasyonu ve Üzerinde Sinir Hücrelerinin Çoğaltılmasına Temel Olabilecek Çalışmalar İçin Çeşitli Malzemelerin DLC İnce Film İle Kaplanarak Bazı Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve **25.06.2012** tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

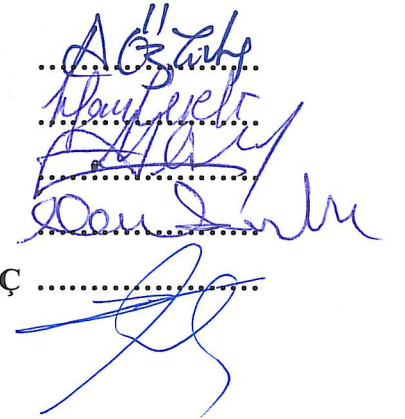
Jüri Başkanı : Prof. Dr. Ahmet ÖZTARHAN

Raportör Üye : Yard. Doç. Dr. İrfan CİRELİ

Üye : Prof. Dr. Murat ELİBOL

Üye : Prof. Dr. Saim SELVİ

Üye : Prof. Dr. Bahattin TANYOLAÇ



ÖZET**VAKUM ARK PLAZMA DEPOZİSYON ÜNİTESİNİN MEVCUT MEVVA İYON İMPLANTASYON SİSTEMİNE ADAPTASYONU VE ÜZERİNDE SINIR HÜCRELERİNİN ÇOĞALTILMASINA TEMEL OLABİLECEK ÇALIŞMALAR İÇİN ÇEŞİTLİ MALZEMELERİN DLC İNCE FİLM İLE KAPLANARAK BAZI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Umut YEŞİLYURT

Doktora Tezi, Biyomühendislik Anabilim Dalı

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Ahmet ÖZTARHAN

Haziran 2012, 69 sayfa

Bu tezde, Ege Üniversitesi Yüzey Modifikasyon Laboratuvarı'nda bulunan metal buharlı vakum ark (MEVVA) iyon implantasyon sistemi üzerine elmas benzeri karbon (DLC) kaplamalar yapmak üzere filtrelenmiş katodik vakum arkı cihazı (Filtered Cathodic Vacuum Arc = FCVA) monte ve adapte edilmiş ve cihazın çalışma özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, farklı malzemeler üzerine yapılan DLC kaplamaların kaplama hızının, sertliğinin, tutunma özelliklerinin tayinine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, farklı malzemeler üzerine yapılan DLC kaplamalarının Raman analizi ile kalitesinin belirlenmesine yönelik olarak karbon tabakanın sp^3/sp^2 oranı ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile yüzey yapısına bakılmıştır.

Tezin ana amacı, Ege Üniversitesi Biyomühendislik Bölümü'nde yürütülmekte olan TÜBİTAK 108M391 No'lu proje kapsamında, sinir hücrelerinin DLC kaplanmış yüzeylerde çoğaltılmasına ilişkin yapılacak çalışmalarda kullanılmak üzere, oluşturulan sistemle kaplanan DLC filmlerin bazı özelliklerinin incelenmesidir.

Çalışmanın iki ana bölümü bulunmaktadır. Öncelikle MEVVA iyon implantasyon cihazına FCVA cihazının montaj ve adaptasyonu ile oluşturulan sistemin kalibrasyonu yapılmıştır. Bunun için öncelikle teorik hesaplama yöntemiyle elde edilen sonuçlar, deneysel kalınlık ölçümleriyle karşılaştırılarak bir çıkarıma varılmıştır. Ardından, FCVA sistemi ile farklı malzemeler üzerine

kaplanan DLC filmlerinin özelliklerinin çeşitli analizlerle incelenmesi çalışması yürütülmüştür.

Yapılan çalışmaların sonucunda, kaplanan malzemelerin karşılaştırmalı değerlendirilmesi sonucu, yumuşak malzemeler olmasına karşın DLC kaplanan PLA numuneler üzerinde, en az çelik ya da kristal silikon gibi rijit numuneler kadar kaliteli DLC kaplamaların elde edilebildiği gözlemlenmiştir.

Bunun yanında normal DLC kaplamanın yanında yumuşak çelik ve kristal silikon üzerine yapılan IBAD yöntemiyle DLC kaplama çalışmaları sonucunda elde edilen kaplamaların kalitesinin, normal DLC kaplamalara göre daha yüksek olduğu, ancak düzenli (uniform) kaplama elde edilemediği gözlenmiş, bunun iyileştirilmesine yönelik gelecekte yeni çalışmalar yapılması gerektiği sonucu çıkarılmıştır.

Yapılan çalışmaların, DLC kaplanmış polimer filmlerin üzerinde sinir hücrelerinin çoğaltılmasına yönelik araştırmalara destek olması amaçlanmıştır.

Anahtar sözcükler: Elmas Benzeri Karbon (Diamond Like Carbon; DLC), C, Filtered Cathodic Vacuum Arc (FCVA), İyon İmplantasyonu, MEVVA (Metal Vapour Vacuum Arc) İyon İmplantasyon Cihazı, İyon Işını Destekli Kaplama (Ion Beam Assisted Deposition; IBAD), Polimerler, Polilaktik Asit (PLA), Biyo-Uyumlu Malzemeler

ABSTRACT**ADAPTATION OF VACUUM ARC PLASMA DEPOSITION UNIT ON EXISTING MEVVA ION IMPLANTATION SYSTEM AND INVESTIGATION OF SOME FEATURES OF DLC THIN FILMS DEPOSITED ON SOME MATERIALS WHICH MAY BE BASE TO BE USED FOR STUDIES OF NERVE CELL GENERATION ON THESE FILMS**

Umut YEŞİLYURT

PhD in Bioengineering

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet ÖZTARHAN

June 2012, 69 pages

In this thesis, filtered cathodic vacuum arc device (FCVA) adapted and mounted on a metal vapor vacuum arc (MEVVA) ion implantation system to deposit diamond like carbon (DLC) films and in order to determine device's operating characteristics, studies made to determine deposition rate, hardness, binding features of DLC films deposited on various materials. Also, to determine the quality of DLC films deposited on different materials, Raman analysis made on carbon layer to find sp^3/sp^2 ratio and surface structure was monitored by scanning electron microscopy.

The major aim of this thesis is to investigate some features of DLC films which have been deposited by the system made and to be used in studies which will be made on generating nerve cells on DLC deposited surfaces in future studies, in scope of TÜBİTAK Project No:108M391 currently being managed in Ege University Bioengineering Department.

The work consists of two main parts. First the calibration of the system made by mounting and adapting FCVA device on MEVVA ion implantation device has been done. For this, formerly obtained theoretical results have been compared with experimental thickness measurements and an approach is made. After this, the study of investigating features of DLC films deposited on different materials by FCVA system with various analysis have been made.

As a result of the studies, after relatively evaluation of deposited materials, on PLA substrates, although they are rather soft materials, the quality of DLC

depositions have been found as good as rigid substrates like steel or crystal silicone.

In addition to this, along with normal DLC depositions, the DLC films made by IBAD method on soft steel and crystal silicone have been found having higher film quality than of DLC films deposited with normal method, however the deposition did not have a uniform characteristics and it is proposed to make further new studies in future in order to improve this uniformity.

With the studies made in scope of this thesis, it is aimed to provide researches on nerve cell generation on DLC deposited polymer films with support.

Keywords: Diamond Like Carbon (DLC), C, Filtered Cathodic Vacuum Arc (FCVA), Ion Implantation, MEVVA (Metal Vapor Vacuum Arc) Ion Implanter, Ion Beam Assisted Deposition (IBAD), Polymers, Polylactic Acid (PLA), Bio-Compatible Materials

TEŞEKKÜR

Yapılan çalışma boyunca deneyimlerini, derin bilgisini ve desteğini benimle paylaşan danışmanım ve hocam Prof. Dr. Ahmet Öztarhan'a,

DLC cihazının MEVVA iyon implantasyon cihazına adaptasyonu sırasında ve kaplamaların gerçekleştirilmesi konusunda yardımcı olan Doç. Dr. Alexey Nikolayev'e, kaplanacak polimer filmleri hazırlayan Dr. Emel Sokullu Urkaç'a,

Tecrübesi ve bilgisine ihtiyaç duyduğumda mütevazı doğasıyla her zaman destek veren Prof. Ian Brown'a,

ODTÜ Merkez Laboratuvarı ekibine, İYTE MAM ekibine, Ege Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'ne,

Özellikle de bütün sevgisi, ilgisi ve desteği ile beni her zaman ayakta tutan annem Meliha Yeşilyurt'a,

teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez, TÜBİTAK 108M391 projesi kapsamında desteklenen araştırmaların bir ürünüdür.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. ELMAS BENZERİ KARBON (DLC)	2
3. KAPLAMA YÖNTEMLERİ.....	5
3.1 İyon Işını.....	5
3.2 Kitlesele Seçilmiş İyon Işını.....	6
3.3 Püskürtme (Sputtering).....	7
3.4 Katodik Ark	8
3.5 Kesikli Lazer Kaplama	12
3.6 Plazma Destekli Kimyasal Buhar Kaplama.....	13
4. KAPLAMA MEKANİZMASI.....	14
5. ELMAS BENZERİ KARBON KAPLAMALARDA STRES	18
6. ELMAS BENZERİ KARBON UYGULAMA ALANLARI.....	20
6.1 Endüstriyel Makina Parçaları ve Aletler.....	20
6.2 Sıvı Depolama ve Nakliyesi	22
6.3 Optik Cihazlar.....	23
6.4 Manyetik Depolama.....	24

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (devam)

	Sayfa
6.5 Biyolojik ve Tıbbi Kullanım Alanları.....	25
7. DLC KAPLAMA CİHAZI	26
7.1 DLC Cihazının Fonksiyonları ve Yapısı.....	26
7.2 DLC Sisteminin MEVVA Sistemine Adaptasyonu	28
7.2.1 MEVVA İyon implantasyon sistemi.....	28
7.3 İyon Demeti Destekli Kaplama (IBAD)	30
8. DLC KAPLAMA CİHAZIYLA YAPILAN KAPLAMALAR VE ÇEŞİTLİ ANALİZLER.....	33
8.1 Materyal ve Yöntem.....	33
8.2 DLC Cihazında Yapılan Kaplamaların Kalınlığının Hesaplanması	34
8.2.1 Yüzey modifikasyon laboratuvarındaki cihazda kaplama kalınlığının hesaplanması.....	36
8.2.2 DLC Kaplama kalınlığının ölçüm yöntemiyle doğrulanması	37
8.3 Temas Açısı Ölçümleri	39
8.4 Raman Ölçümleri	43
8.5 Mikro-Çizik Analizi.....	47
8.6 İndentasyon	51
8.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri	52
9. GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	55
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	59
ÖZGEÇMİŞ	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 sp^3 , sp^2 , sp^1 hibritleşmiş bağlar (Robertson, 2002).....	3
2.2 Amorf karbon-hidrojen alaşımlarındaki bağların üç bölgesi diyagramı (Robertson, 2002).....	4
3.1 DLC için çeşitli kaplama sistemlerinin şemaları (Robertson, 2002).....	7
3.2 Dengeli (a) ve dengelenmemiş (b) magnetron konfigürasyonu (Corbella Roca, 2005).....	8
3.3 a) Tek-bükümlü ve b) S-bükümlü filtrelenmiş katodik vakum arkın şeması (Coll and Chhowalla, 1994).....	9
3.4 FCVA'da iyon enerjisi dağılımı (Chhowalla et al., 1997)	10
3.5 Manyetik filtre sayesinde makro parçacıkların filtrelenmesi (Brown et. al, 1998) .	11
3.6 Ortalama iyon enerjisinin lazer darbe etkisiyle ilişkisi (Voevodin and Donley, 1996).....	12
3.7 PECVD reaktörünün şeması (Corbella, 2005)	13
3.8 (a) Subplantasyon prosesi diyagramı ve (b) subplantasyon modelindeki temel prosesler (Robertson, 2002).....	15
3.9 ta-C filmlerde sp^3 içeriğinin yönlendirme gerilimine bağlı grafiği (Polo et al., 2000).....	16
3.10 Kütle yoğunluğu ve kompresif stresin ta-C filmlerin yönlendirme gerilimine bağlı grafikleri (Polo et al., 2000)	17
5.1 Film tabakası üzerinde sıkma (kompresif) ve gerilme streslerinin şematik gösterimleri. Oklar numuneye kaplanan film tarafından uygulanan kuvveti göstermektedir (Corbella, 2005).....	19

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.1 WC/C kaplanmış dişliler (Corbella, 2005).....	20
6.2 Gillette Mach3 traş bıçaklarında DLC kullanımına ilişkin patentin belirtildiği reklam kolajı (Korea Institute of Science and Technology, 2012).....	22
6.3 Kaplanmamış (en soldaki) ve DLC kaplanmış borular (Corbella, 2005).....	23
6.4 Bir manyetik disk ve okuma/yazma kafasının şematik gösterimi (Goglia et al., 2001)	24
7.1 Vakum Ark Kaplama Cihazı: 1) Katot tutucu, 2) Yalıtkan malzeme, 3) Başlatıcı deşarjın girişi, 4) Anot, 5) Grafit katot, 6) Seramik bölüm, 7) 90°'lik solenoid filtre, 8) özel siperlikler (Nikolaev and Gushenets, 2009)	27
7.2 Ege Üniversitesi Yüzey Modifikasyon Laboratuvarı'nın genel görüntüsü (1. Elektrik - elektronik donanım kontrol paneli, 2. Yüksek gerilim odası, 3. Mevva iyon üretici, 4.Ark ve tetikleyici güç kaynağı, 5.a.Ark akımı kontrolü 5.b. İyon hızlandırıcı kontrolü, 6.İzolasyon trafosu, 7.Yüksek gerilim güç kaynağı (110 kVdc), 8.Yüksek gerilim, 9.Vakum sistemi) (Sokullu Urkaç, 2010).....	28
7.3 MEVVA iyon ışını üreticinin çalışma şeması (Öztarhan et al., 2005)	29
7.4 Filtrelenmiş vakum arkını üreten bölüm, manyetik filtrenin yandan (üst solda) ve önden görünüşü, ark üreten kaynak (altta)	30
7.5 IBAD prensip şeması (Jenion, 2012).....	31
7.6 Vakum haznesi içinde yapılan çeşitli işlemler için numune tutucunun konumlandırılması.....	32
8.1 Kaplanan yüzey üzerindeki kaplamanın teorik gösterimi	34
8.2 DLC cihazında meydana gelen iyon akımının (I_{ion}) değerini bulmak için oluşturulan düzeneğin şeması.....	36

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.3 Plazma tabancasından çıkan iyonların oluşturduğu dairesel kaplama alanının numune üzerindeki alanının teorik gösterimi	37
8.4 Yüzey üzerindeki su damlasının üzerinde temas açısının gösterimi (Wikipedia, 2012).....	40
8.5 CAM101 goniometre cihazı (KSV Instruments, 2012).....	41
8.6 Kaplanmamış ve DLC kaplanmış numunelere ait temas açısı ölçüm fotoğrafları ..	42
8.7 Tipik karbon yapılarının Raman spektrumlarının karşılaştırılması (Robertson, 2002).....	45
8.8 DLC kaplanmış çeşitli numunelerin Raman analizi grafikleri	46
8.9 ODTÜ Merkez Laboratuvarı'ndaki mikro-çizik analiz cihazı	48
8.10 Mikro-çizik analizi sırasında uygulanan kuvvet, numune üzerindeki sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısının birbiriyle ilişkileri	49
8.11 DLC kaplanmış numunelere ait mikro-çizik analizi sonrası fotoğrafları.....	50
8.12 ODTÜ Merkez Laboratuvarındaki İndentasyon cihazı (Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı, 2012).....	52
8.13 DLC kaplanmamış (solda) ve kaplanmış yumuşak PLA numunelerin 1000 defa büyütülmüş SEM görüntüleri	53
8.14 DLC kaplanmış sert ve yumuşak çelik ile sert PLA'ya ait SEM görüntüleri.....	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Amorf karbonun temel özelliklerinin referans malzemeler elmas, grafit, C ₆₀ ve polietilen ile karşılaştırılması (Robertson, 2002)	3
7.1 Vakum ark kaplama cihazının ana teknik özellikleri	26
8.1 40 ve 80 dakikalık kaplama işlemi sonucunda elde edilen kaplamaların kalınlık değerleri.....	38
8.2 Temas açısı analizi yapılan malzemelerin sonuçları	41
8.3 DLC kaplanmış çeşitli numunelerin Raman analizi sonuçları	45
8.4: İndentasyon analizi sonrası malzemelerin sertlik derecelerinin karşılaştırılması.....	52
9.1 Çeşitli numuneler üzerinde yapılan analizler	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
DLC	Elmas Benzeri Karbon (Diamond Like Carbon)
eV	Elektronvolt
sp	Sigma-Pi Bağlarının Hibritleşmesi
PECVD	Plazma Destekli Kimyasal Evaporasyon Kaplama (Plazma Enhanced Chemical Vapor Deposition)
CVD	kimyasal evaporasyon kaplaması
MSIB	Kitlesel Seçilmiş İyon Işını Kaplaması
DC	Doğru Akım (Direct Current)
RF	Radio frekansı (Radio Frequency)
FCVA	Filtrelenmiş Katodik Vakum Arkı (Filtered Cathodic Vacuum Arc)
PLD	Kesikli Lazer Kaplama (Pulsed Laser Deposition)
µm	Mikrometre
EELS	Elektron Enerji Kaybı Spektroskopisi (Electron Energy Loss Spectroscopy)
ESCA	Kimyasal Analiz İçin Elektron Spektroskopisi (Electron Spectroscopy For Chemical Analysis)
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskopisi (Transmission Electron Microscopy)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
PVD	Fiziksel evaporasyon kaplaması (physical vapor deposition)
PBII	Plasma-Based Ion Implantation (Plazma Tabanlı İyon İmplantasyonu)
IR	Kızılötesi (infrared)
kV	kilovolt
MEVVA	Metal Buharlı Vakum Ark (Metal Vapor Vacuum Arc)
IBAD	İyon Demeti Destekli Kaplama (Ion Beam Assisted Deposition)
ρ	yoğunluk (g/cm^3)
cm^3	santimetreküp
η	yoğunluk (atom/cm^3)
π	pi sayısı
τ	periyot (milisaniye)
I_{ion}	İyon akımı (Amper)
PLA	Polilaktik Asit
FEG	Alan Emisyonlu Gun (Field Emissioned Gun)
İYTE-MAM	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezi

1. GİRİŞ

Bu tezin amacı, üzerinde sinir hücrelerinin çoğaltılmasını sağlamak amacıyla, çeşitli malzemeleri DLC ince film ile kaplamak üzere, mevcut MEVVA iyon implantasyon cihazına bir vakum ark plazma depozisyon ünitesi adapte etmek ve elde edilen sistemle kaplanan malzemelerin çeşitli özelliklerini incelemektir.

2003 yılında Brown et al. yayınladıkları bir çalışmada DLC ince filmlerin üstünde sinir hücrelerinin çoğaldığını göstermiştir. Bugün DLC malzeme üzerinde genel olarak biyolojik hücrelerin (bunların içinden sinir hücrelerinin) çok güçlü bir şekilde tutunduğu ve yüksek yoğunlukta çoğalabildiği, oldukça elverişli bir biyoaktif malzeme olduğu bilinmektedir.

Farklı malzemelerin üzerine filtrelenmiş katodik vakum ark plazma depozisyon ünitesiyle DLC kaplayabilmek için oluşturulan sistem sayesinde elde edilen kaplanmış malzemelerin özelliklerini incelemek, hem elde edilen sistemin karakterize edilmesini, hem de bir ölçüde kalibre edilmesini sağlamak açısından yararlı olacaktır.

Bu kapsamda, filtrelenmiş katodik vakum ark yöntemiyle elde edilen sistemde yapılan DLC kaplamaların optimizasyonuna ilişkin de çıkarımlar yapılmaya çalışılmıştır.

Bu sayede, elde edilen sistemin sonraki çalışmalarda kullanılmasına ilişkin rehber olması amaçlanmıştır.

2. ELMAS BENZERİ KARBON (DLC)

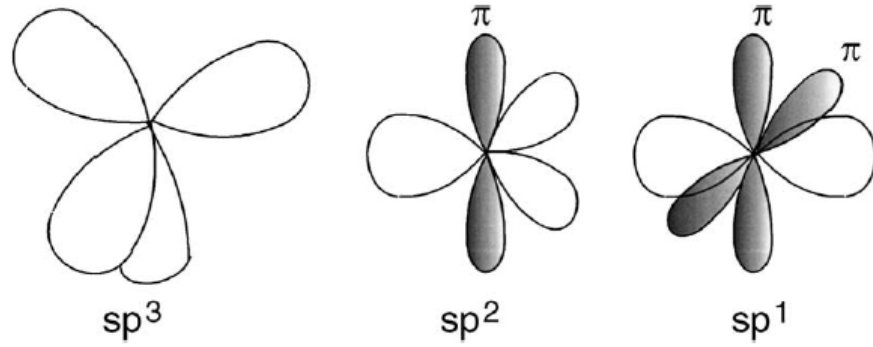
Elmas benzeri karbon (İngilizce Diamond Like Carbon, DLC), yüksek sayıda sp^3 bağı oranına sahip amorf karbonun oldukça kararlı bir formudur. Yüksek mekanik sertlik, kimyasal inertlik, optik geçirgenliğe sahip olabilmesinin yanı sıra, geniş bant boşluğuna sahip bir yarı iletkenidir (Robertson, 2002). DLC filmlerin, koruyucu kaplamalar, manyetik kayıt diskleri, otomobil parçaları, biyomedikal kaplamalar ve mikro-elektromekanik cihazlar gibi geniş kullanım alanları vardır.

Son yıllarda karbon biliminde, elmasın kimyasal buhar kaplamasının geliştirilmesi (Angus and Hayman, 1988) ile C_{60} 'ın (fulleren) ve karbon nanotüplerin keşfi gibi çok önemli ilerlemeler olmuştur. Düzensiz karbonlarla ilgili olarak da paralel gelişmeler yer almıştır. Bölgesel fulleren-benzeri düzeninde nanometre uzunluğunda ölçeğe sahip düzensiz karbon çeşitleri keşfedilirken, DLC sentezlemek için yeni yöntemler geliştirilmiştir. Şu anda, elmas benzeri malzemelerin bir çoğunun oluşturulma yolları anlaşılmıştır. Oluşturma mekanizmaları genel olarak ilgili iyonların alt ekimleri şeklinde açıklanmaktadır (Dresselhaus et al., 1996).

Karbon, sp^3 , sp^2 ve sp^1 olarak üç hibritleşme çeşidinde (Şekil 2.1) bulunabildiği için çok sayıda kristal ve düzensiz yapılar oluşturabilmektedir. Sp^3 konfigürasyonunda, elmasta olduğu gibi, bir karbon atomunun dört değerlik elektronunun her biri, yanındaki atomla kuvvetli bir σ bağı oluşturan tetrahedral düzendeki bir sp^3 orbitaline bağlanmıştır. Grafitte olduğu gibi üç katlı koordine sp^2 konfigürasyonunda, dört değerlik elektronundan üçü, trigonal şekilde dizilmiş sp^2 orbitallerine girerek, bir düzlem içinde σ bağları oluşturur. Sp^2 atomunun dördüncü elektronu σ bağına normal şekilde duran bir $p\pi$ orbitaline yerleşmiştir. Bu π orbitali, bir veya daha fazla komşu atom üzerindeki bir π orbitaliyle daha zayıf bir π bağı oluşturur. Sp^1 konfigürasyonunda, dört değerlik elektronunun iki tanesi σ orbitallerine girer, her biri $\pm x$ -ekseninde dizilmiş bir σ bağı oluşturur ve diğer iki elektron y ve z eksenlerindeki $p\pi$ orbitallerine yerleşir.

Elmasın üstün fiziksel özellikleri, yapısındaki kuvvetli ve yönlü σ bağlarından kaynaklanır. Elmasın geniş bir (5,5 eV) bant boşluğu bulunmaktadır ki bu, tüm katılar içindeki en büyük oylumsal zorlanım modülüne (bulk modulus), en yüksek atom özkütlesine, oda sıcaklığındaki en yüksek ısı iletkenliğine, en küçük ısıl genleşme katsayısına ve yarı-iletkenler içindeki en büyük elektron ve

elektron boşluğu hızlarına sahip olmasını sağlar (Angus and Hayman, 1988). Grafitte tabakalar içinde kuvvetli σ bağı bulunmaktadır ve tabakalarının arasında zayıf Van der Waals bağları vardır. Tek bir grafit düzlemi, sıfır bant boşluğuna sahip bir yarı-iletkenidir ve üç boyutlu olarak anizotropik bir metaldir (Kelly, 1981).



Şekil 2.1: sp^3 , sp^2 , sp^1 hibritleşmiş bağlar (Robertson, 2002).

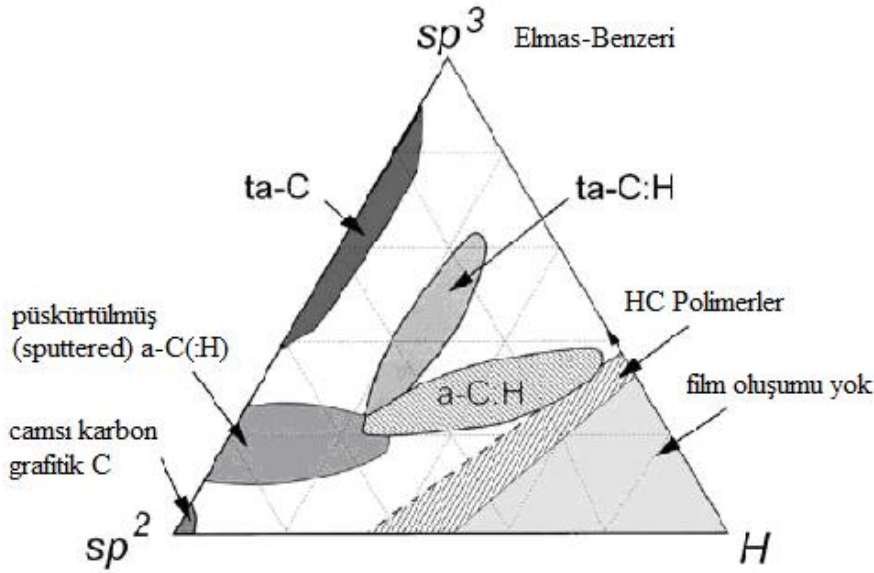
DLC'nin elmasta olduğu şekilde sertlik, esneklik ve kimyasal inertlik gibi bazı üstün özellikleri vardır; ancak bunlar izotropik düzensiz ve tanecikli doku çizgileri olmayan bir ince filmde bulunabilmektedir. Ayrıca DLC'nin üretimi, elmasın kendisinden çok daha ucuzdur. Bunun da pek çok uygulama için büyük avantajı bulunmaktadır. DLC'nin çeşitli formlarının tipik özelliklerinin elmas ve grafitte göre karşılaştırılması Çizelge 2.1'de gösterilmiştir (Robertson, 2002).

Çizelge 2.1: Amorf karbonun temel özelliklerinin referans malzemeler elmas, grafit, C_{60} ve polietilen ile karşılaştırılması (Robertson, 2002)

	sp3 (%)	H (%)	Yoğunluk ($g\ cm^{-3}$)	Gap (eV)	Sertlik (GPa)
Elmas	100	0	33515	55	100
Grafit	0	0	2,267	0	
C_{60}	0	0		1,6	
Camsı C	0	0	1,3-1,55	0,01	3
Buharlaştırılmış C	0	0	1,9	0,4-0,7	3
Püskürtülmüş C	5	0	2,2	0,5	
ta-C	80-88	0	3,1	2,5	80
a-C:H sert	40	30-40	1,6-2,2	1,1-1,7	10-20
a-C:H yumuşak	60	40-50	1,2-1,6	1,7-4	<10
ta-C:H	70	30	2,4	2,0-2,5	50
Polietilen	100	67	0,92	6	0,01

DLC'nin sp^3 bağları, mekanik sertlik, kimyasal ve elektrokimyasal inertlik ve geniş bant boşluğu gibi elmasın kendisinin pek çok yararlı özelliğini karşılamaktadır. DLC yalnızca amorf karbonları (a-C) içermez; bunların yanında

hidrojenlenmiş alaşımlardan da (a-C:H) oluşur. Amorf C-H alaşımlarının çeşitli formlarının kompozisyonları, ilk olarak Jacob and Moller'in (1993) yaptığı biçimde, Şekil 2.2'deki gibi üç fazlı bir diyagramda gösterilebilir. Kurum, mangal kömürü, camı karbon ve evapore edilmiş a-C gibi bir çok düzensiz grafitik dizilime sahip a-C bulunmaktadır. Bunlar sol alt köşede yer almaktadır. İki hidrokarbon polimer olan polietilen (CH₂)_n ve poliasetilen (CH)_n, üçgenin sağ alt köşesinin limitini tanımlar ki bunun ötesinde birbirine bağlı C-C ağları oluşamaz, yalnızca moleküller oluşur. Artan derecelerde sp³ bağları içeren a-C'ları üretmek için kaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Püskürtme metodunun sp² bağlarından sp³ bağlarına geniş bir kapsamı vardır. McKenzie (1996), sp³ bağları oranının yüksek bir dereceye



Şekil 2.2: Amorf karbon-hidrojen alaşımlarındaki bağların üç bölge diyagramı (Robertson, 2002)

çıktığı durumda a-C'u, sp² a-C'dan ayırt edilmesi amacıyla tetrahedral amorf karbon (ta-C) olarak adlandırmıştır. Plazma destekli kimyasal evaporasyon kaplama (PECVD) gibi bir bölüm kaplama yöntemi, üçgenin iç bölgesine ulaşabilir. Bu durumda a-C:H üretilmiş olur. Bu da elmasa benzer olmakla birlikte, Şekil 2.2'de görüleceği gibi sp³ bağ içeriği çok yüksek değildir ve hidrojen içeriği daha fazladır. Bu sebeple, hidrojenlenmiş tetrahedral amorf karbon (ta-C:H) adı verilen daha fazla sp³ bağı ve daha az hidrojen içeren malzeme üretmek üzere Weiler et al. (1993) tarafından yüksek plazma yoğunluğuna sahip PECVD reaktörler kullanılmıştır.

3. KAPLAMA YÖNTEMLERİ

3.1 İyon Işını

İlk DLCler, Aisenberg and Chabot (1971) tarafından iyon ışını kullanılarak ince filmler şeklinde hazırlanmıştır. DLCleri çok çeşitli kaplama yöntemleriyle üretmek mümkündür. Bu yöntemleri, laboratuvar çalışmalarına veya endüstriyel üretime uygunluklarına göre kategorize etmek olasıdır. Yöntemlerin özetle ortak özelliği, DLC filmin enerjili (~100 eV) karbon veya hidrokarbon iyonlarını içeren bir ışıdan kondense edilmesidir. Filmin oluşumu sırasında, bu iyonların etkisiyle fiziksel bir işlem sonucu sp^3 bağları üretilir. Buna karşılık, elmasın kimyasal evaporasyon kaplamasında (CVD) sp^3 bağlarını sabitleyen kimyasal işlem bulunmaktadır (Celi and Butler, 1991). DLC için en iyi kaplama işlemi sonucunda, her karbon atomunun yaklaşık 100 eV enerjiye sahip olduğu bir karbon iyon akısı, dar bir enerji dağılımı, tek bir enerjetik tür ve minimum sayıda enerjetik olmayan (genelde nötr) tür elde edilmesi sağlanır (Weiler et al., 1994).

DLC kaplama yöntemlerinin ortak özelliği, oluşan tabakaların kontaminasyonunun en düşük düzeyde olmasını sağlamak için, tüm yöntemlerin düşük basınç altında yapılmasıdır. Tüm farklı DLC kaplama yöntemleri aşağıdaki üç karakteristik özelliği gösterirler (Silva, 2003):

- (i) Reaktif parçacıkların kaynağı olan bir plazma.
- (ii) Genelde oda sıcaklığında olan numune. En azından klasik kimyasal buhar kaplama işlemlerindeki gibi yüksek numune sıcaklığını sağlamaya ihtiyaç yoktur.
- (iii) Enerjili parçacıklar (iyon ve/veya nötr) kaplama prosesine katılır.

Şekil 3.1’de çeşitli kaplama sistemleri şematik olarak gösterilmiştir. Tipik bir iyon ışını kaplama sisteminde, karbon iyonları iyon kaynağı içindeki bir grafit katodun plazma saçılması ile üretilir. Buna alternatif olarak Kaufman kaynağında, metan gibi bir hidrokarbon gaz plazma içinde iyonlaştırılır. Bundan sonra iyon ışını plazma kaynağından, bir ızgara içinden bias gerilimi sayesinde hızlandırılarak dışarı verilir. Karbon ya da hidrokarbon iyonları ivmelendirilerek, iyon ışını yüksek vakum haznesinde oluştururlar. Her iki durumda da, iyon kaynağı bir miktar basınç altında çalışır ve bu sebeple ışın aynı zamanda yüksek

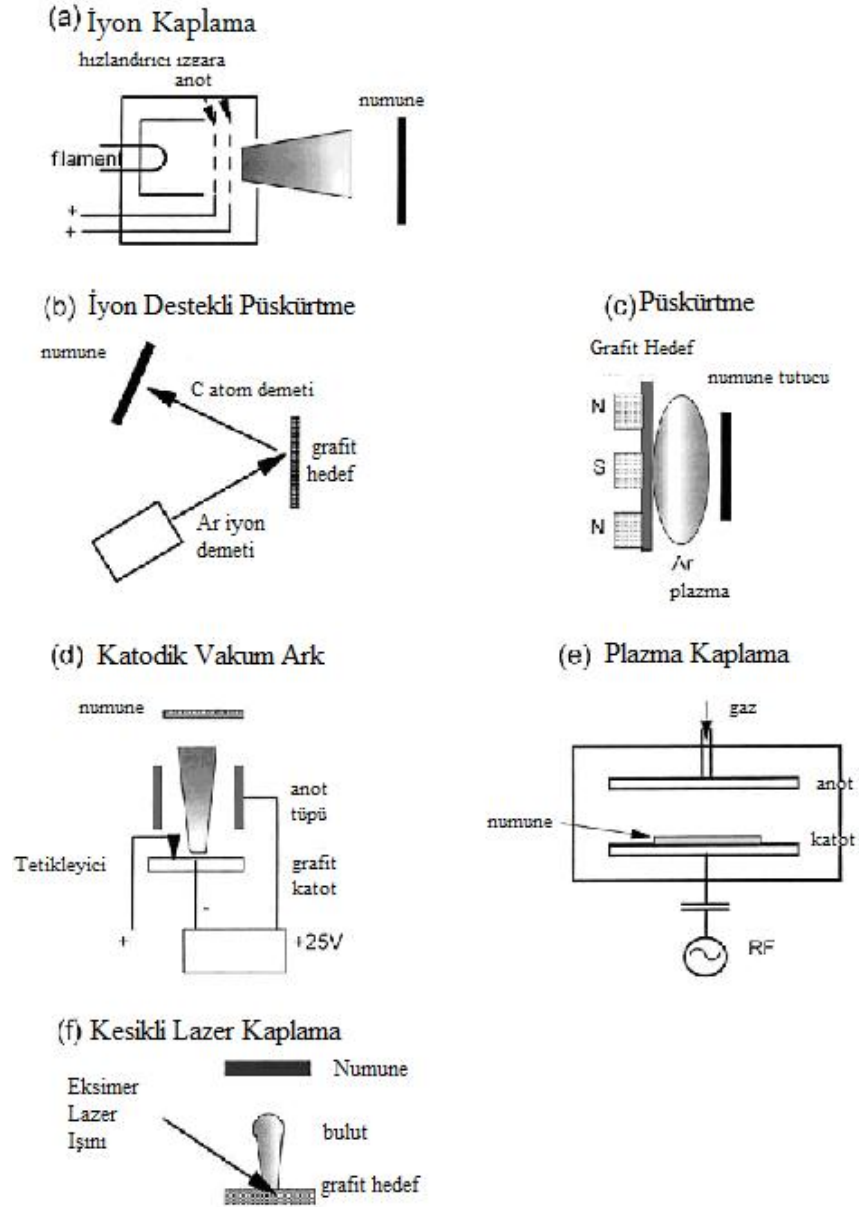
miktarda iyonize olmamış nötr türlerden oluşan akı içerir. Bu da iyonların nötr olanlara akı yoğunluğu oranını %2-10 gibi düşük düzeylere indirir. İyon ışını kaynakları en iyi şekilde 100-1000 eV arasındaki yüksek enerji seviyelerinde çalışır (Robertson, 2002).

İyon ışını kaplamanın bir çeşidi de kaskat ark kaynağıdır (Gielen, 1996). Burada, bir yüksek-basınç kaynağı yoğun bir plazma üretir ve bu plazma süpersonik olarak yüksek vakum içerisinde genişleyerek, yüksek iyon ve radikal akılarının artmasını sağlar.

3.2 Kitlesel Seçilmiş İyon Işını

Laboratuar çalışması için iyi belirlenmiş iyon enerjisine sahip tek bir iyon türünden kaynaklanan kontrollü kaplama olanağının sağlanmasına çalışılır. Bu olarak kitlesel seçilmiş iyon ışını kaplaması (MSIB) yöntemiyle sağlanır (Lifshitz, 1999; Robertson, 2002). Karbon iyonları, grafit bir hedefteki iyon kaynağında, iyon enerji dağılımı 1-10V arasında düşük bir değerde olacak şekilde üretilir.

İyonlar bundan sonra 5-40kV'a ivmelendirilerek manyetik bir filtreden geçirilirler. Bu sayede nötr parçacıklar süzülür ve e/m oranı C^+ iyonununkine eşdeğer olan iyonlar seçilir. İyon ışını, Coulombik itme etkisi nedeniyle sapar. İyonlar bundan sonra istenen enerji seviyesine elektrostatik lens sayesinde düşürülerek, ışın yaklaşık 10^{-8} Torr vakum değerine sahip ortamda bulunan numune üzerine ta-C film oluşturmak üzere odaklanır. MSIB'nin avantajları, kontrol edilebilir kaplama cinsi ve enerjisi sağlaması, enerjetik olmayan parçacıkların süzülmesine ve iyon türlerinin değiştirilerek aşılama yapılmasına olanak sağlamasıdır. Dezavantajları ise, 0,001 Angstrom/saniye'lik düşük kaplama hızı ile cihazın yüksek maliyeti ve boyutlarıdır. MSIB yöntemi ve uygulamaları Lifshitz (1999), Hofsass et al. (1994) ile Hirvonen et al. (1990) tarafından incelenmiştir.

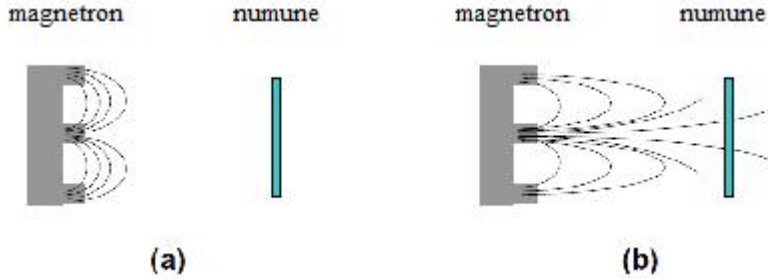


Şekil 3.1: DLC için çeşitli kaplama sistemlerinin şemaları (Robertson, 2002)

3.3 Püskürtme (Sputtering)

DLC kaplamanın en yaygın endüstriyel uygulaması saçılma ya da püskürtme işlemidir. En çok uygulanan şekilde grafit elektrodun Ar plazma tarafından DC veya RF saçılımı kullanılır. Grafitin düşük saçılım veriminden dolayı, kaplama hızını artırmak için sıklıkla magnetron püskürtme kullanılır. Miknatıslar hedefin gerisine yerleştirilip elektronların dairesel hareket etmesi sağlanır ve yol uzunlukları artırılır. Bu sayede plazmanın iyonizasyon derecesi artırılır. İyon bombardımanı sp^3 bağlarının oluşumunu sağlarken, manyetik alan

da numuneden geçecek şekilde ayarlanabilir, böylece Ar iyonlarının numuneyi bombardımana tutmasıyla “dengelenmemiş magnetron” elde edilir. İyon enerjisini değiştirmek için numuneye bir DC gerilim uygulanabilir. Bu sayede, Ar plazması ve hidrojen veya metan kullanılarak a-C:H reaktif saçılımla üretilebilir.



Şekil 3.2 Dengeli (a) ve dengelenmemiş (b) magnetron konfigürasyonu (Corbella Roca, 2005)

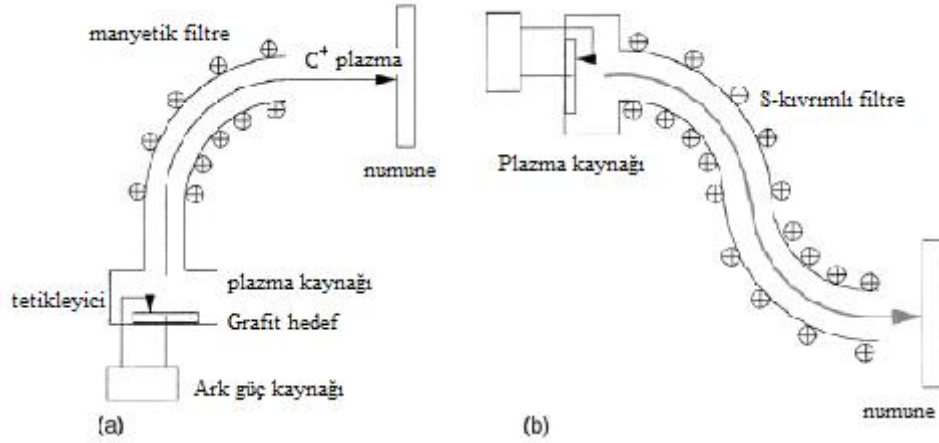
Buna alternatif olarak, iyon ışını saçılımında Ar iyonlarından oluşan bir ışın, grafit hedeften saçılım yaparak karbon akıyı yaratmak üzere kullanılır (Cuomo et al., 1991). İkinci bir Ar iyon ışını, oluşmaya başlayan filmi bombardımana tutarak yoğunluğunu yükseltir ya da sp^3 bağlarını artırır. Bu işleme iyon ışını yardımıyla kaplama (IBAD) veya iyon kaplama adı verilir.

Püskürtme yönteminin endüstriyel uygulamalarda tercih edilmesinin sebepleri, çok yönlü kullanılabilmesi, pek çok malzemenin saçılımla uygulanabilmesi ve ölçeklemesinin kolay olmasıdır. Bunun yanında kaplama koşulları, numune geometrisinden veya koşullarından bağımsız olarak, plazma gücü ve gaz basıncı ile kontrol edilebilir. Saçılmanın bir dezavantajı, iyon ışını kaplamasındaki gibi, enerjetik parçacıkların nötr olanlara oranının görece düşük olmasıdır ve bu yüzden çok sert DLC filmler bu yöntemle oluşturulamaz. Ancak, Schwan et al. (1996) ile Cuomo et al. (1991), görece yüksek sp^3 oranına sahip a-C üretmek üzere çok yüksek iyon oranına sahip saçılma yöntemleri geliştirmişlerdir- fakat bunların kaplama hızı düşüktür.

3.4 Katodik Ark

Katodik ark, laboratuvarında veya endüstriyel kullanım için sık kullanılmayan bir yöntemdir. Yüksek vakum ortamında grafit katodu küçük bir karbon tetikleme elektroduna dokundurularak ve geri çekerek bir ark oluşturulur. Bu sayede $10^{13}/\text{cm}^3$ 'e kadar yüksek iyon yoğunluğuna sahip enerjetik plazma elde edilir.

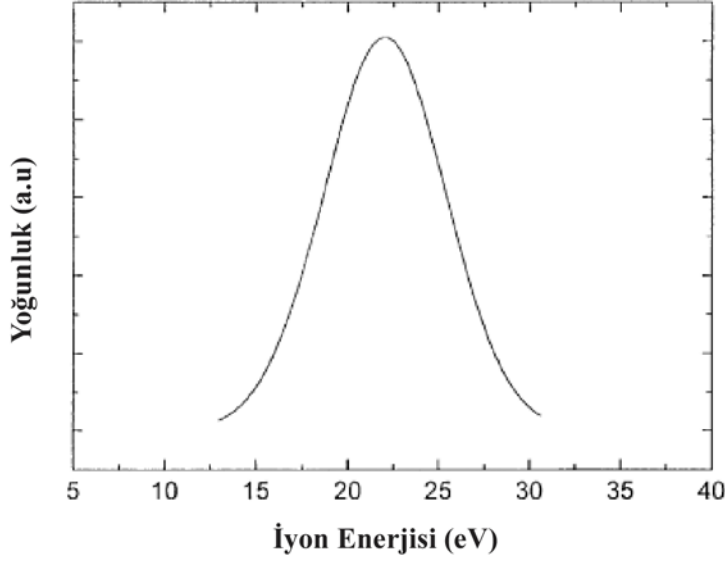
Şekil 3.3'te Coll and Chhowalla'ya (1994) ait tipik bir katodik ark sistemi gösterilmiştir. Güç beslemesi bir düşük gerilim, yüksek akım kaynağıdır. Katodik ark aynı zamanda, Brown'ın incelemesindeki (1998) gibi azotlu ortamda Ti'un reaktif kaplamasıyla elde edilen kalay gibi sert kaplama malzemelerinin kaplanmasında sıklıkla kullanılır.



Şekil 3.3 a) Tek-bükümlü ve b) S-bükümlü filtrelenmiş katodik vakum arkın şeması (Coll and Chhowalla, 1994)

Bu yöntemde, ergimiş katod yüzeyi üzerindeki aktif katot noktası küçüktür (1-10 μ m) ve çok yüksek bir akım yoğunluğu taşır (10⁶-10⁸ A cm⁻²). Katot bölgesi patlayıcı bir yayım işlemiyle oluşur. Bu sayede, partiküllerin yanında istenen plazma oluşur. Partiküller, plazma Şekil 3.5'teki gibi toroidal manyetik filtre biçiminde bir borudan geçirilerek süzülür (Brown, 1998). Bu işleme filtrelenmiş katodik vakum ark (ingilizce filtered cathodic vacuum arc, FCVA) adı verilir. Toroidal akımlar filtrenin eksenini boyunca 0,1 T civarında bir manyetik alan oluşturur. Bu hareket bir elektrostatik alan oluşturarak pozitif iyonların filtrenin etrafındaki elektronları takip etmesini sağlar. Bu sayede plazmanın filtre boyunca hareketi sağlanır. Partiküller alanı takip edemez ve filtre çeperlerine çarparak takılırlar. Buna alternatif olarak, Brown (1998) ile Anders et al. (1993) tarafından kullanılan açık filtre sisteminde partiküller sarımların arasından geçip filtreleme bölgesinden çıkar, hazneye girer. Nötr parçacıklar da filtre çeperlerine çarpar; bu sayede filtre, plazma iyonizasyonunu filtre çıkışında %30'dan neredeyse %100'e yakın bir değere çıkarır. Plazma ışını ta-C oluşturmak üzere numune üzerine yoğunlaştırılır. Katot ucunda, ark akımına ve sahip olduğu iyon enerjilerinin Şekil 3.4'te gösterilen Gauss dağılımına bağlı olarak plazmanın ortalama 10-30eV'luk bir iyon enerjisi vardır. Numuneye bir dc veya rf kendinden bias edilmiş gerilim

uygulanarak, gelen ışının iyon enerjisi artırılır (Fallon et al., 1993). FCVA'nın yaklaşık 10^{-8} Torr'luk basınç altında uygulanması gerekir; ancak bu değer plazma çalışırken 10^{-5} Torr'a yükselebilir. Yoğunluk (a.u) İyon Enerjisi (eV)



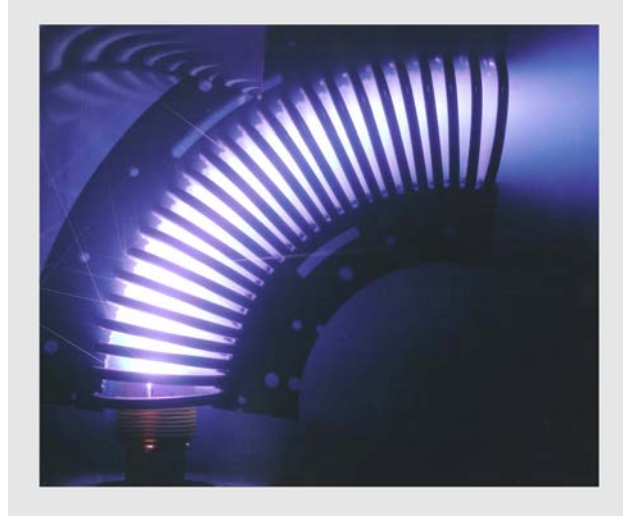
Şekil 3.4 FCVA'da iyon enerjisi dağılımı (Chhowalla et al., 1997)

FCVA'nın avantajları; bu yöntemle enerjetik türler içeren yüksek derecede iyonlaşmış plazma üretilebilmesi, oldukça dar iyon enerji dağılımı olması ve düşük maliyetle saniyede 1nm gibi yüksek kaplama hızına ulaşabilmektir. İyon ışını kaplamasından farklı olarak, FCVA'daki kaplama ışını nötr plazma ışınıdır ve bu sayede yalıtkan numuneler üzerine kaplama yapılabilir. Yöntemin dezavantajları ise, bazı uygulamalar için filtrelemenin yetersiz olması ve katot noktasının kararsız olmasıdır.

FCVA'da partiküller genelde mikrondan küçüktür. Bu parçacıklar, filtre çepelerine çarpıp sekerek filtre bölümünden geçebilirler (Anders et al., 1997; Zhitomirsky et al., 1996). Filtreleme işlemi filtreleme bölümüne saptırıcılar eklenerek ve Şekil 4b'da gösterildiği gibi ikinci bir büküm eklenerek çift bükümlü veya S-bükümlü filtreye dönüştürülerek, 100 kata kadar iyileştirilebilir.

Ark, sürekli olarak çalışabileceği gibi, kesikli (darbeli) şekilde de olabilir. Kesikli durumda, arkı tetiklemek için bir kapasitör grubu ya da lazer kullanılabilir. Ark akımı filtre sarımları boyunca geçebilir. Kesikli yöntem, iyonların plazma ışını içinde darbe sırasında çekilmeye, ışın durduğunda da plazma dışına düşmeye eğilimli olmaları sebebiyle daha iyi filtreleme sağlar (Robertson 2002).

Metallerde ark, katot yüzeyi üzerinde yüksek dirence sahip erimiş bir nokta oluşturur; ki bunun sonucunda ark, daha düşük dirence sahip başka bir noktaya doğru ilerleme eğilimindedir. Bu sebeple ark noktası, yüzeyin üstünde hareket eder ve sürekli yer değiştiren bir ark oluşmasını sağlar ve bu da katodun gittikçe tükenmesine sebep olur. Yarıiletkenlerde ya da karbon gibi maddelerde, ark noktasının çevresine göre daha düşük direnci bulunmaktadır. Böylece ark noktası aynı yerde kalmaya çalışır ve aynı yeri daha derine doğru aşındırır. Katot kararlılığı, arkı tekrarlayan şekilde oluşturarak veya katot bölgesinde manyetik bir alan kullanarak ark noktasını katot yüzeyinde gezdirerek artırılabilir (McKenzie, 1996). Bunun yanında arkı lazerle tekrarlayan şekilde oluşturmak da kullanılan bir yöntemdir (Scheibe and Schultrich, 1994).



Şekil 3.5 Manyetik filtre sayesinde makro parçacıkların filtrelenmesi (Brown et. al, 1998)

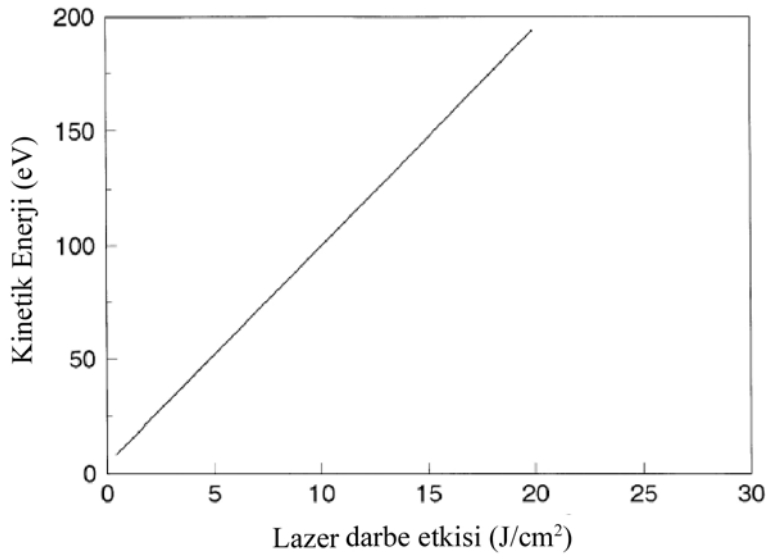
İyonların bir bölümü, filtreden geçerken filtrenin çeperlerinde kaybolurlar (Şekil 3.5). Filtre bölümüne +20V'luk pozitif bias uygulanarak bunun minimuma çekilmesi sağlanabilir (Bilek, 1999). Fazla elektron akımının filtre yolu girişinde katottan anoda akmasına izin vermek genel olarak yararlıdır. 10 cm² ve üzerindeki alanların üzerine, filtre yolunun ardından ışını saptırmak için manyetik şişe konfigürasyonu kullanarak ya da ışını akım bobinleriyle tarayarak pürüzsüz kaplama yapmak mümkündür. Kaplama hızı, katottaki elektron akımıyla orantılıdır.

Ark içinde, ana akım anoda giden elektron akımıdır ve ark akımı olarak bilinir. Katottan çıkan iyon akımı ark akımıyla orantılıdır ve 10-100 kez daha azdır. İyon enerjisi ortalaması ark akımıyla birlikte hafifçe artar. Çok yüksek

plazma akımları, Scheibe and Schultrich (1994) tarafından detaylı olarak incelendiği şekilde yüksek akım arkıyla üretilebilir.

3.5 Kesikli Lazer Kaplama

ArF gibi kesikli uyarılmış dimer lazerler (ingilizce pulsed excimer laser), malzemeleri yoğun bir plazma olarak buharlaştırmak için kullanılabilir çok kısa, yoğun enerji darbeleri verirler (Voevodin and Donley, 1996; Davanloo et al., 1990; Siegal et al., 1998). Plazma, bundan sonra numuneye doğru genişler. Bu genişlemenin kinetik enerjisinden kaynaklanan iyon enerjisi MSIB veya katodik arktaki iyon enerjisine eşdeğerdir. Ortalama iyon enerjisi hedef noktaya yoğunlaştırılmış lazer etkisiyle orantılıdır ve lazer etkisinin bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür (Şekil 3.6).

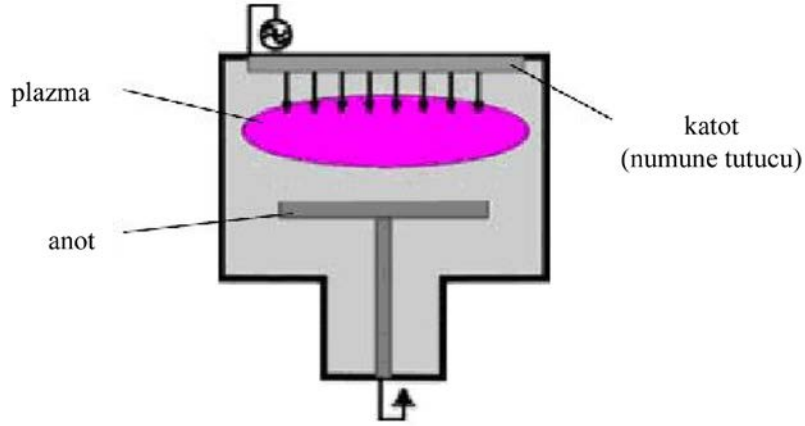


Şekil 3.6 Ortalama iyon enerjisinin lazer darbe etkisiyle ilişkisi (Voevodin and Donley, 1996).

Bu şekilde kesikli lazer kaplama (ingilizce pulsed laser deposition, PLD) ile MSIB ve FCVA yöntemlerinin benzeri ta-C filmler üretilir (Siegal et al., 1998; Merkulov et al., 1998). Yine bu yöntemlerde olduğu gibi kaplama özellikleri iyon enerjisine bağlıdır (Merkulov et al., 1998). PLD'nin avantajı, çok yönlü laboratuvar ölçekli bir yöntem olması, bu sayede yüksek sıcaklık süper iletkenlerinden sert kaplamalara kadar pek çok farklı malzemeyle kaplamanın yapılabilmesine olanak sağlamasıdır. Karbon için PLD yöntemi Voevodin and Donley (1996) tarafından incelenmiştir.

3.6 Plazma Destekli Kimyasal Buhar Kaplama

Plazma destekli kimyasal buhar kaplama (ingilizce plazma enhanced chemical vapor deposition, PECVD), DLC filmlerin kaplanmasında kullanılan oldukça popüler bir tekniktir. Bir reaktör içinde A_1 ve A_2 gibi farklı yüzey alanlarına sahip iki elektrot arasında plazma oluşturularak, elektrot alanlarının farklı olması nedeniyle bir asimetrik deşarjın ortaya çıkması sağlanır. DLC elektriksel olarak yalıtkan olduğundan, verilen güç DC değildir. Bu sebeple, PECVD işlemlerinde kapasitif olarak eşlenmiş RF güç ya da kesikli DC güç kullanılır. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi, güç küçük elektrota (katot) uygulanır ve buraya numune yerleştirilirken, reaktör çeperleri genelde topraklanır (anot).



Şekil 3.7 PECVD reaktörünün şeması (Corbella, 2005)

Katot numunenin negatif bias edilmesi ile iyonlar ivmelendirilerek bombardıman sağlanır ve bu sayede sp^3 bölgeleri elde edilir. Ancak, iyonların deşarj içinde nötre dönüşmesi hızının yüksek olmasının sağlanması için plazmanın düşük basınç ortamında oluşturulması gerekmektedir ki çok düşük basınç ortamı sabit bir deşarj rejiminin sürekliliğini engeller. Bu sorun verilen gücü artırmak veya plakalar arasında ek bir manyetik alan oluşturmak suretiyle aşılır.

4 KAPLAMA MEKANİZMASI

DLC'yi oluşturmak için gereken koşullar, denge koşullarından çok uzaktır; bu sebeple doğada kendiliğinden bulunması mümkün değildir. Oluşturma parametrelerini kontrol etmek karbon mikroyapılarının ve buna paralel olarak da malzemenin özelliklerinin çeşitlenmesini sağlar. Kristal bir yapıya sahip olmamasına karşın, DLC elmastaki benzer mekanik özellikleri gösterir. Bu özelliği yanında görece düşük üretim maliyeti ve çok çeşitli oluşturma tekniklerinin varlığı, bu malzemeyi sayısız uygulama olanağı sağlaması sebebiyle teknoloji ve endüstri için çekici kılmaktadır.

DLC'nin kilit özelliği sp^3 bağlarıdır. sp^3 bağlarının oluşmasını sağlayan, iyon bombardımanı adı verilen bir fiziksel işlemdir (McKenzie, 1996; Lifshitz, 1999). Yüksek sp^3 oranları, iyon enerjileri 100eV civarında olan C^+ atomları tarafından oluşturulur.

DLC film oluşumu sırasında sp^2 bölgelerinin püskürtmeye maruz bırakılması, sp^3 içeriğini artıran ana mekanizma olarak kabul edilmiştir (Spencer et al., 1976). Daha sonra, DLC filmin yüzey altında olduğu gözlenmiştir (Lifshitz et al., 1990). Subplantasyon modeli adı verilen bu modelde, enerjetik iyonların penetrasyonu ile metastabil sp^3 bölgelerinin oluşmasına bağlı olarak, DLC'nin yüzey altı bir tabakada sürekli yoğunlaşması temel alınır. Penetrasyon eşiği, E_p , aşağıdaki şekilde formüle edilebilir:

$$E_p \approx E_d - E_B$$

E_p , gelen bir iyonun bağlanmış bölgedeki bir atomun yerini değiştirip kalıcı bir boşluk-dolgu çifti oluşturması için gereken minimum enerji olan yer değiştirme eşiği E_d 'ye bağlıdır. Bunun yanında, C'un sublimleşme veya kohezif enerjisi olan yüzey bağ enerjisi, E_B 'den de etkilenir ($E_B \approx 7.4$ eV).

Gelen nötr parçacıklar ve düşük enerjili iyonlar yüzeyin altına geçemez, ancak film yüzeyine yapışır ve burada sp^2 'ce zengin bir dış tabaka oluştururlar. Yüzeyde bunun yanında, bir enerji bariyerini geçip subplante olmuş yüksek enerjili iyonlar termal sıçramayla enerji kaybına uğrayarak, daha kararlı olan yüzey sp^2 haline dönerler.

EP'den daha yüksek E enerjisine sahip gelen iyonları ifade eden penetrasyon oranı, f , aşağıda formüle edilmiştir (Robertson, 2002):

$$f = 1 - \exp\left(-\frac{E - E_p}{E_s}\right)$$

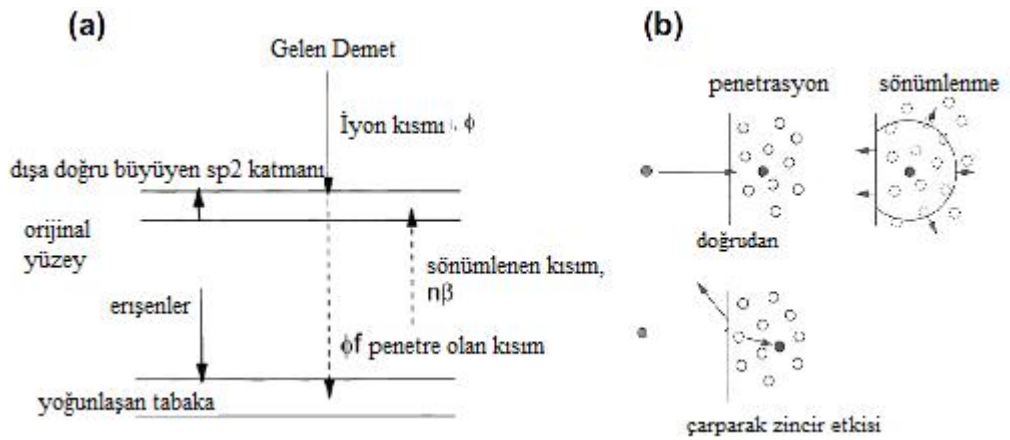
Bu formülde E_s bir sabittir. Bu penetrasyon olasılığını göz önünde bulundurarak, ta-C'daki subplante tabakanın yoğunluğu, aşağıdaki orana sahip grafitinkini aşar:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{f\phi}{1 - f\phi + \beta}$$

Formüldeki ρ sp^2 karbonun yoğunluğunu, $\Delta\rho$ yoğunluktaki artışı, ϕ enerjetik iyonların E_i enerjisine oranını ve β ise termal sıçramadaki sönümlenme hızını ifade eder. E_i iyon enerjisi ve E_0 difüzyon aktivasyon enerjisi olarak alındığında, β 'nin formülü aşağıdaki şekildedir:

$$\beta \approx 0.016 \left(\frac{E_i}{E_0}\right)^{5/3}$$

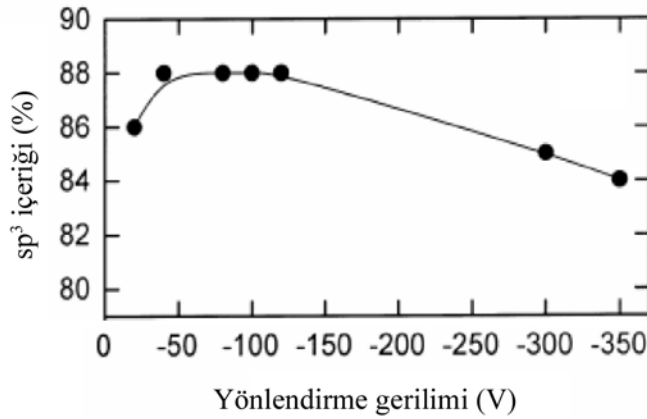
Şekil 3.8'te bu iki halli modelin ana prosesleri şematize edilmiştir. Son dönemde yüksek enerjiye sahip dolgu bölgelerinin bulunduğu üçüncü hale ilişkin yeni bir model de ortaya atılmıştır (Robertson, 2005). Bu model, $\Delta\rho/\rho$ formülünde küçük bir sapmaya neden olmaktadır.



Şekil 3.8 (a) Subplantasyon prosesi diyagramı ve (b) subplantasyon modelindeki temel prosesler (Robertson, 2002).

Subplantasyon modelinde, gelen iyonlar iki şekilde penetre olurlar: doğrudan ya da dolaylı darbe etkisi sonucu. Yoğunlaşmış bölgenin sönümlenmesi, bir termal sıçrama ile atomları sp^3 bölgesinden sp^2 'ye sürer ve bu işlemler süre olarak 10^{-12} ila 10^{-9} saniye arasındadır.

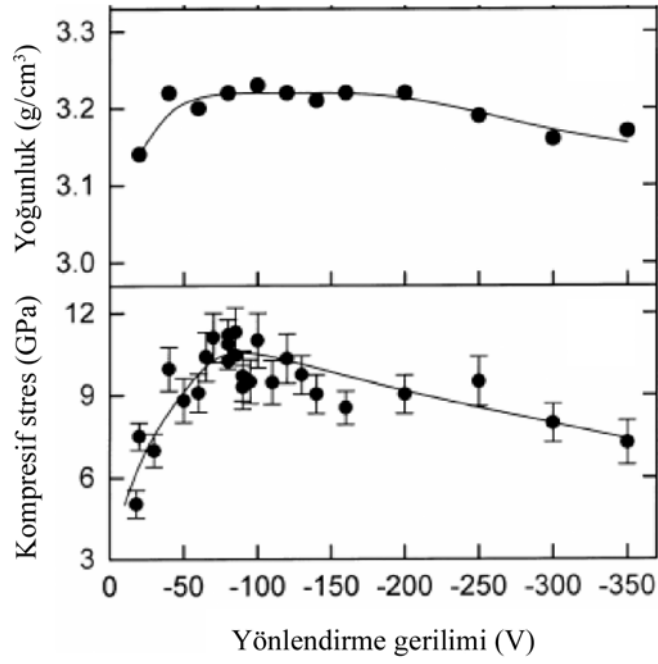
Numuneye uygulanan yönlendirme (bias) geriliminin kontrolü de DLC'nin mikroyapısının kontrolünü sağlamakta, bu sayede mekanik, optik ve elektriksel özelliklerin değiştirilebilmesini mümkün hale getirmektedir (Staryga and Bak, 2005). İyon enerjisi numune biası ile kısıtlı olduğu sürece, sp^3 içeriği katot numune tutucuya uygulanan güç ile değiştirilebilir. Fallon et al. (1993) iyon enerjisine bağlı sp^3 oranının, 100 ila 200eV arasında maksimum %80 oranında olduğunu gözlemiştir. Diğer yandan, Şekil 3.9'da FCVA yöntemiyle daha sonradan yapılan ta-C kaplama denemelerinde sp^3 oranının yönlendirme gerilimine göre bir fonksiyonunun grafiği gösterilmiştir. Burada sp^3 içeriği, yönlendirme geriliminin -20 ila -350V arasında değiştirilmesi ile %84 ila 88 arasında değiştiği görülmektedir. Ancak, Şekil 3.10'da basınç stresinin (compressive stress) yönlendirme gerilimiyle ilişkili olduğunu gösteren başka veriler de vardır ki, sp^3 ile oranı ile stres arasında görünür hiçbir ilişki bulunmamaktadır.



Şekil 3.9 ta-C filmlerde sp^3 içeriğinin yönlendirme gerilimine bağlı grafiği (Polo et al., 2000)

Amorf hali sağlamak için DLC kaplamanın oda sıcaklığında yapılması gerekir. Numuneyi ısıtmak, plazmadan gelip çarpan parçacıklara fazladan enerji sağlayan termal bir mekanizmadır. Biriken atomlar bu ısı enerjisini kullanarak dengeli bölgelere ulaşmaya kadar yüzeye difüz eder. Bu sebeple, yüksek sıcaklıktaki işlemler düzene sahip, kristal örneklerin oluşmasına neden olur.

Düzensiz bir yapının oluşabilmesi, ancak parçacıkların kaplama yüzeyine çarptığı anda donmasıyla elde edilir. Bu sebeple numunenin soğutulması önemlidir. Ancak, DLC filmlerde elde edilen arttırılmış sertlik, film ahengini bozucu yönde etki eder. Bölüm 5’te belirtildiği gibi, bu filmlerde yüksek stres bulunmaktadır. Bu etki temel olarak numunenin, işleme dengesiz koşullar sağlayan düşük sıcaklığından kaynaklanır. Plazmadan gelen parçacıklar çarptıkları bölgede sabitlenir ve bu sebeple DLC matrisinin stresi, elde ettiği potansiyel enerji sebebiyle artar.



Şekil 3.10 Kitle yoğunluğu ve kompresif stresin ta-C filmlerin yönlendirme gerilimine bağlı grafikleri (Polo et al., 2000)

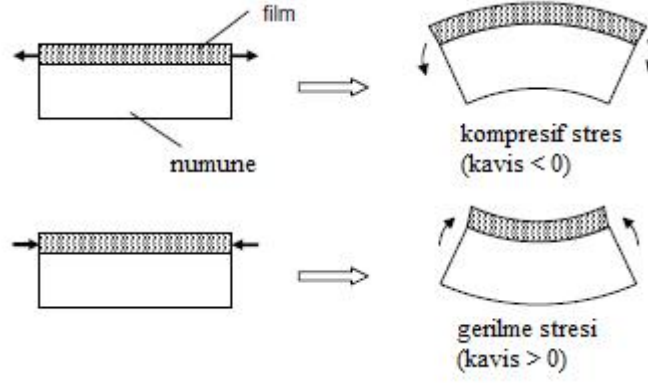
5. ELMAS BENZERİ KARBON KAPLAMALARDA STRES

DLC kaplamalarda filmin tutunmasındaki sorunların ana nedeni, kaplama işlemi sırasındaki yüksek kompresif strestir. Yüksek kalitedeki DLC kaplamalardaki iç stres seviyesi 10 Gpa düzeyine kadar çıkabilir (Anttila et al., 1995; Fallon et al., 1993). Bu iç streslerin, kaplama sırasında subplantasyon prosesindeki sp^3 fazını stabilize etmek için gerekli olduğu düşünülmektedir (Robertson, 2002). Ferrari et al. (2002) sp^3 fazının stabilizasyonu için stresin önemine kuşkuyla yaklaşırken, yine de yüksek kaliteli DLC'yi kolay elde etmek için stresin gerekli olabileceğini kabul etmişlerdir. McKenzie et al. (1991) ve Fallon et al. (1993) stresin sp^3 oranına bağlı olduğunu açıkça ortaya koymuştur.

DLC kaplamalardaki iç stresi düşürmek için bir dizi yöntem üzerinde çalışılmıştır. Bu yöntemler arasında tavlama (Friedmann et al., 1997), numuneye yönlendirme gerilimi uygulamak (Chhowalla and Amaratunga, 2001), kaplamaya işlem sırasında metal, silikon ya da bor eklemek (Damasceno et al., 2000; Tay et al., 2001; Chhowalla et al., 1996), ve iyon irradyasyonu (Lee et al., 1999) bulunmaktadır. Bu yöntemler stresi en azından bir miktar düşürmek açısından etkilidir (Tay et al., 2003), ancak DLC kaplamaların pek çok uygulama için elverişli özellikleri (sertlik, aşınma dayanımı, elektriksel direnç) değişebilir (Sheeja et al., 2003). Friedmann et al. (1997) kaplama öncesi ısıl tavlama (600°C 'de 2 dakika) sayesinde stresin tamamen giderildiğini bildirmiştir. Silikon üzerindeki stres olmayan filmin kalınlığı $1,2\ \mu\text{m}$ 'dir. Bir dizi kaplama ve tavlama adımı kullanılarak, elmasa yakın sertliği kaybetmeden DLC filmlerin kalınlığını $10\ \mu\text{m}$ 'ye kadar çıkarabildiklerini bildirmişlerdir. Yöntem etkili görünebilir ancak hantaldır (yavaş ve zahmetli). Tavlama aynı zamanda kaplama üzerindeki grafit bakımından zengin tabakaların artmasına neden olabilir (Lifshitz, 2003). Bu tabakalar, elektron enerji kaybı spektroskopisi (ingilizce electron energy loss spectroscopy, EELS) ya da kimyasal analiz için elektron spektroskopisi (ingilizce electron spectroscopy for chemical analysis, ESCA) gibi normal yüzey analizi yöntemleri kullanılarak belirlenemez, ancak yeterli derinlik çözünürlüğüne sahip kesit içinde geçirimli elektron mikroskopisi (ingilizce transmission electron microscopy, TEM) ile görüntülenebilir (Lifshitz, 2003).

Stres içermeyen yüksek kalitede DLC kaplamalar hazırlamak üzere kolay bir yöntem henüz ortaya konamamıştır; ancak bununla beraber, stresi azaltmak yerine tutunmayı artırmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Alakoski et al., 2003; Alakoski and Tiainen, 2005; Alakoski et al., 2006). Mikro-elektromekanik

cihazlar gibi bazı uygulamalarda, stres içermeyen filmlere ihtiyaç vardır (Sheeja et al., 2001; Tay et al., 2003). Ancak, örneğin kalça eklemi gibi pek çok endüstriyel ve medikal uygulamada ana problem stres değildir. Eğer yeterli tutunmaya sahip yüksek kalitede kalın DLC kaplamalar elde edilebilirse, yüksek iç strese sahip olsalar da kullanılabilirler (Anttila et al., 1999).



Şekil 5.1 Film tabakası üzerinde sıkma (kompresif) ve gerilme streslerinin şematik gösterimleri. Oklar numuneye kaplanan film tarafından uygulanan kuvveti göstermektedir (Corbella, 2005).

6. ELMAS BENZERİ KARBON UYGULAMA ALANLARI

DLC'nin çok çeşitli uygulamaları genel olarak özel tribolojik özellikler içeren sert kaplamalar olmaları sebebine dayanır. Ayrıca DLC yapısı modifiye edilerek ve başka elementler eklenerek bu özelliklerde değişiklik yapılabilir ve optik filtre performansı göstermesi veya elektronik fonksiyonlara sahip parçalar üretmek üzere başka özellikler kazandırılabilir (Hauert and Patscheider, 2000).

6.1 Endüstriyel Makina Parçaları ve Aletler

DLC uygulamalarının en hızlı büyüdüğü pazar, DLC, ta-C, W-DLC ve WC/C çoklu tabakalarının ihtiyaca göre sert ve tribolojik kaplamalar olarak geliştirildiği otomotiv endüstrisidir (Hauert, 2004). Otomotiv endüstrisi, makina yağı gibi kayganlaştırıcıların performansını artırmak üzere makina parçaları üzerinde düşük sürtünme katsayısına ve aşınma direncine sahip kaplamalara ilişkin çözümlere ihtiyaç duyar. DLC bu ihtiyacı tamamen karşılar ve şu ana kadar vitesler, piston pimleri, sübap filtreleri ve benzin enjektör parçaları gibi çok sayıda otomotiv parçası üzerinde denenmiştir. Şekil 6.1'de DLC kaplanmış objelere bir örnek görülmektedir.



Şekil 6.1 WC/C kaplanmış dişliler (Corbella, 2005)

Bütün bu parçalar çok sayıda kaplama firması tarafından DLC kaplanmaktadır. Bunun yanı sıra, fiziksel buhar kaplama (ingilizce physical vapor deposition, PVD) ile kaplanmış metal içeren DLC (Me-DLC) kaplamaların seri üretimi dizel enjeksiyon sistemlerinde kullanılmıştır (Gåhlin et al., 2001). Me-DLC filmler çok üstün tribolojik özellikler sergilemeleri nedeniyle tercih edilirler (Grischke et al., 2001; Pei et al., 2005). Modern yüksek basınç enjeksiyon sistemleri DLC sayesinde geliştirilmiştir. Yarış arabaları, motor gücünü sürtünmeyi azaltarak maksimum seviyeye çıkarmak amacıyla otomotivde DLC uygulamalarının kullanıldığı ilk alan olmuştur. Bu konu günümüzde yakıt tüketimini azaltma anlamında kullanılmaktadır. 2000 yılında Volkswagen-Lupo 3L TDI modelinde bu uygulama kullanılmıştır (Oerlikon Balzers, 2012).

DLC'nin artırılmış sertlik ve aşınma direnci kombinasyonu, bu malzemenin matkaplar ve malzeme üretiminde kullanılan diğer kesme ve aşındırma aletleri için uygun olmasını sağlamaktadır. DLC kaplamaların iyi sürtünme özellikleri, robotik ve otomasyon ekipmanlarında kullanılan ultrasonik motorların verimini ve ömrünü artırmaktadır. Stator Si-DLC ile kaplandığında yüksek bir dinamik hareket elde edilmektedir (Ko et al., 2005). Araba endüstrisinde olduğu gibi, kuru yağlayıcılar kimyasal inertlik ve düşük sürtünme katsayısı ihtiyacı nedeniyle eczacılık ve gıda işleme sistemlerinde vazgeçilmez malzemelerdir. Bu bakımdan, sonsuz vida dişlileri, vida açma milleri, rulman yatakları, kompresörler ve havalı yataklar gibi pek çok makina parçası DLC ile korunur. Tekstil endüstrisinde kalıntı maddelerin varlığı ve ipliğe bileşik eklenmesi, eğirme bileziği, meç, iğne gibi tekstil makinesi parçalarının iplikle temas eden yüzeylerinin DLC ile kaplanmasını gerekli kılmaktadır. Enjeksiyon dökümde uzmanlar daha iyi bir ürün kalitesi elde etmek için DLC'un yapışmama özelliklerini kullanmaktadır. DLC'un sıcaklık 350°C'nin üstüne çıktığında bozunması, kesme aletlerinde uygulanmasını önemli ölçüde kısıtlamaktadır. Ayrıca, DLC kaplamalar bazı özel muamelelerden geçirilip, tipik olarak gözlenen yüksek kompresif stresin azaltılması sağlanarak mikrometre kalınlığında kaplamaların numuneye yapışma sağlamlığının artırılması sağlanmaktadır.

Gillette Mach3 traş bıçaklarının kenarları, sert DLC (örneğin ta-C) uygulamalarına gösterilebilecek başarılı bir örnektir. Bu "DLC rahat kenarlar" 1998'de 150nm kalınlığında DLC ile kaplanmış ve elde edilen traş bıçakları bu malzemenin temel uygulamalarından biri haline gelmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Gillette Mach3 traş bıçaklarında DLC kullanımına ilişkin patentin belirtildiği reklam kolajı (Korea Institute of Science and Technology, 2012)

6.2 Sıvı Depolama ve Nakliyesi

DLC kaplama sayesinde, sıvılarla temas eden parça ve cihazlarda ana ihtiyaç olan hidrofobik özellikler artar. DLC kaplamalar sıvıyla etkileşimi azalttığı için boru ve tüplerin iç yüzey özelliklerinin iyileştirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca aletler için elverişli bir örtü teşkil eder. Günümüzde DLC filmler, içecek şişeleri için sıvıyla reaksiyonu engelleyen iç kaplama tabakası olarak düşünülmektedir. Paslanmaz çelik boruların iç yüzeylerinin DLC ile kaplanması, üç boyutlu numunelerin kaplanması tekniğinde büyük kolaylık sağlayan plazma tabanlı iyon daldırma (ingilizce: plasma-based immersion, PBII) ile çift yönlü palslar kullanılarak düşük maliyetle yapılabilmektedir (Miyagawa et al., 2002). Difüzyon bariyeri uygulamalarında da DLC, görece yüksek yoğunluğu sebebiyle oldukça kullanışlıdır (Silva, 2003).



Şekil 6.3 Kaplanmamış (en soldaki) ve DLC kaplanmış borular (Corbella, 2005)

6.3 Optik Cihazlar

DLC kaplamalar yeni nesil optik depolama cihaz araştırmalarında, diski ve okuyucu ucu çizilmekten korumak amacıyla uygulanmaktadır. Sağlanması gereken temel koşullar yavaş aşınma hızı ve DLC tabakanın kayıt dalgaboyunda saydam olmasıdır. Bu tür filmlerin en düşük düzeyde stres içermesi ve geniş bant boşluğunun yanında yüksek sertliğe sahip olması gerekir. Her iki parametre, kaplama işlemi sırasında sp^3/sp^2 oranı ve hidrojen içeriği ile ayarlanır. Ancak, kaplama koşulları polimerik numunelerin bütünlüğünü bozmayacak uygunlukta (düşük sıcaklıkta) olmalıdır. Son araştırmalarda pürüzsüz ve homojen DLC filmlerin 0,5 Gpa'ın altında stres değerine ve 3 eV'luk bant boşluğuna sahip olduğu gözlemlenmiştir (Piazza et al., 2004).

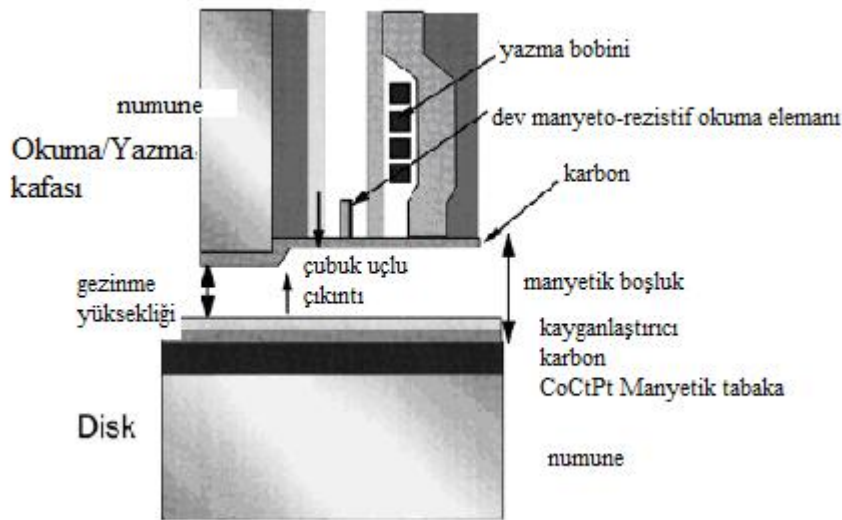
DLC filmlerinin IR bölgesindeki yüksek ışık geçirgenliği, IR optiğinde yüzey koruma uygulamalarında kullanım sahası yaratmıştır (Corbella, 2005). Germenyumdan yapılan optik parçalar üstündeki IR yansıma engelleyici kaplamalar ve IR camların üstündeki yağmur etkisi sonucu oluşan hasarlara karşı koruyucu dış tabakalar, bu uygulamalara örnektir. Görünür bölgedeki çalışma uygulamalarından güneş gözlükleri ve lazer barkot tarayıcı üzerindeki cam plakalar, DLC'nin ışık geçiren yüzeylerdeki çizilmeye dayanıklı kaplamalara örnek olarak verilebilir (Hauert, 2004).

Son araştırmalarda, temel olarak yarı-iletken doğası (Krishna et al., 2000) ve Si-bazlı güneş pillerine göre daha ucuza mal edilmesi nedeniyle DLC'nin fotovoltaik sistemler için uygulamalarından sözedilmektedir. DLC yapısına

hataların kontrol altına alınması ve yapıya aşılama yapılması, bu alandaki çalışmaların şu andaki odak noktasıdır. Ek bir nokta olarak, Si güneş pillerindeki yansımaya engelleyen kaplamalar, kırılma indisi ve düşük absorpsiyon katsayısı nedeniyle genelde DLC veya azotlanmış DLC filmlerdir.

6.4 Manyetik Depolama

Manyetik sabit diskleri korozyon ve aşınmaya karşı korunması, ultra-ince DLC kaplamaların en yaygın uygulamalarından biridir (Bhushan, 1999). Kaplanan tabaka son derece düz, pürüzsüz ve kimyasal olarak inert olmalıdır. Kaplama, disk ve kayıt kafasının arasındaki boşluğu büyük ölçüde düşürecek şekilde ultra ince olmalı, bu sayede büyük bölgesel depolama yoğunluğu elde edilmelidir. Manyetik yüzeyler günümüzde yaklaşık 5nm kalınlığında CN_x veya a-C:H'dan oluşan DLC kaplama ile korunmaktadır. DLC'nin korozyona direnci, kaplama kalınlığı 3nm'nin altına düştüğünde azalmasına karşın, FCVA kaplama yöntemiyle hazırlanan ta-C filmler, atom ölçeğinde pürüzsüzlük (0,12nm) ve 1nm kalınlığa kadar oldukça mükemmel korozyon ve aşınma direnci göstermektedir (Casiraghi et al., 2004). Video kaset kayıt cihazlarının kafa tamburları, sinyal aktarımının bozunmasını en aza indirmek için püskürtme ve PECVD yöntemleriyle DLC kaplanmaktadır. Sony, TDK, Fuji ve Panasonic firmalarının satışını gerçekleştirdiği DLC kaplanmış veri kayıt bantları ve DVD kayıt bantlarında da DLC sayesinde aşınma ve oksidasyona karşı büyük direnç sağlanmıştır (Hauert, 2004).



Şekil 6.4 Bir manyetik disk ve okuma/yazma kafasının şematik gösterimi (Goglia et al., 2001).

6.5 Biyolojik ve Tıbbi Kullanım Alanları

DLC'nin biyo-uyumlu kaplamalar olarak kullanılmasına ilişkin yapay omuz eklemleri, kalp kapakçıkları, stentler, vb. gibi parçalar üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır (Lappalainen et al., 1998; Tiainen, 2001; Jones et al., 1999; McColl, 1994). Bu çalışmaların dayanağı, DLC'nin düşük sürtünme katsayısı ve karbon içeren bir malzemenin biyo-uyumluluk olasılığının yüksek olmasıdır. Kaplama türlerindeki beklenti, DLC'nin kaplanan yüzeye iyi tutunması ve metalik döküntü bırakmamasıdır. Ayrıca kan hücrelerinin, proteinlerinde, vb. DLC üzerine tutunmasına ilişkin çeşitli çalışmalar da yapılmaktadır (Allen et al., 2001).

Literatürde bu tezin amaçlarından birisini oluşturan, üzerinde sinir hücreleri tutunabilecek DLC kaplı yüzey elde etmeye ilişkin çalışmalar da yürütülmektedir (Sokullu Urkaç, 2010).

Bu uygulama alanlarından biride doku rejerasyonudur (Ishikawa et al., 2007; Li and Gu, 2002; Gutensohn et al., 2000). MEVVA iyon implantasyon sistemine adapte edilen katodik vakum ark cihazından çıkan karbon plazması ile değişik numuneler üzerinde elde edilen DLC filmlerinin kimyasal ve mekanik özelliklerini değişik numuneler üzerinde denemenin yanında, bu çalışmadaki nihai amaç "Sinir Dokusu Rejenerasyonu ve Desenli Yaygın Sinir Ağları Oluşturulması Uygulamalarına Yönelik İyon Işınları ile Modifiye edilmiş ve Elmasa Benzer Karbon (DLC) Filmler ile kaplanmış Polimerik Yüzeylerin Oluşturulması" konulu TÜBİTAK projesinde kullanılmak üzere, üzeri DLC kaplı projenin amacına yönelik optimum özellikte polimer filmler oluşturmaktır.

7. DLC KAPLAMA CİHAZI

7.1 DLC Cihazının Fonksiyonları ve Yapısı:

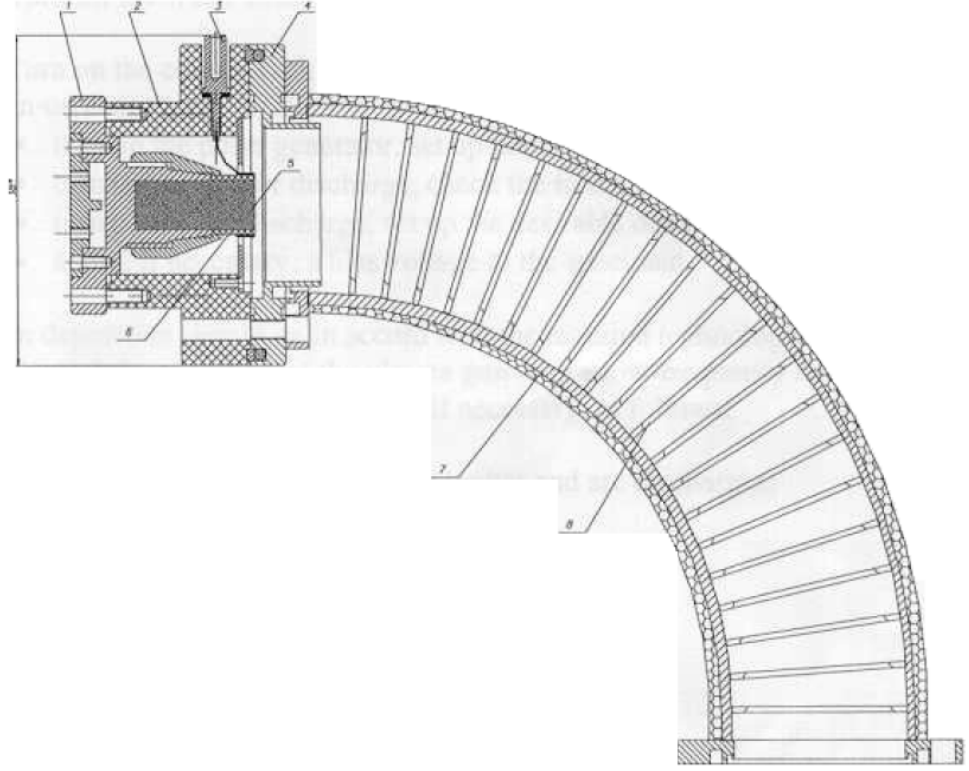
Vakum-ark kaplama cihazı, çeşitli maddelerin yüzey özelliklerini değişikliğe uğratmak için üzerlerine elmas benzeri karbon kaplamaların (DLC filmler) plazma destekli olarak kaplanması amacıyla kullanılır. Cihazın ana teknik özellikleri Çizelge 7.1’de gösterilmiştir ve üzerinde aşağıdaki kısımlar bulunmaktadır:

- 1) Makro parçacıklar için 90°’lik bir solenoid filtresi bulunan karbon katot vakum ark plazma tabancası;
- 2) Aşağıdakilerden oluşan bir kontrol düzeneği;
 - i) Elektrik arkı güç kaynağı,
 - ii) Ateşleyici deşarj güç kaynağı,
 - iii) Numuneyi hareket ettirmek için bir doğru akım yönlendirici kaynağı.

Çizelge 7.1: Vakum ark kaplama cihazının ana teknik özellikleri

Ark akımı	400A’e kadar
Pals süresi	1ms
Pals tekrarlama frekansı	5, 10 Hz
Kaplama alanı	150cm ²
Kaplama hızı	saatte 0.5 µm’ye kadar
Negatif dc yönlendirme	200V’a kadar
Film kaplama düzensizlik oranı	her 5 cm’de %10

Plazma tabancasının tasarımı Şekil 7.1’te gösterilmiştir.



Şekil 7.1: Vakum Ark Kaplama Cihazı: 1) Katot tutucu, 2) Yalıtkan malzeme, 3) Başlatıcı deşarjın girişi, 4) Anot, 5) Grafit katot, 6) Seramik bölüm, 7) 90°'lik solenoid filtre, 8) özel siperlikler (Nikolaev and Gushenets, 2009).

Vakum ark cihazının çalışma prensibi, aşağıda anlatılmaktadır:

Girişten (3) birkaç kV'luk büyüklüğe ve birkaç mikrosaniyelik süreye sahip bir ateşleme pılsı uygulanarak yalıtkan yüzeyin (6) üzerinde bir yüzey deşarjı başlatılarak ateşlenir. Bunun sonucunda katot (5) ve oyuk anot (4) arasında vakum ortamında ark oluşur. Vakum ark deşarjının akım düzeyi, birkaç yüz mikrosaniye pıls süresine sahip birkaç yüz amper değerinde yapay bir çizgi oluşturacak şekilde bir güç kaynağı tarafından oluşturulur.

Katot noktalarından yayılan katot plazması oyuk anodu doldurur ve 90°'lik solenoid filtreye (7) ulaşır. Filtrenin çalışma prensibi vakum ark plazmasının, plazma kılavuzunun eğri çizgilerden oluşan manyetik alan çizgileri boyunca yayılması özelliğine dayanır. Manyetik alan çizgileri boyunca hareket eden plazma elektronlarının boşluktaki yük dağılımı (space charge), iyonların Coulomb itmesi nedeniyle dağılmasını (blow up) önleyerek iyon ışınının sabitlenmesini ve hedefe ulaşmasını sağlar.

Alanlardan etkilenmeyen görece ağır nötr durumdaki mikroparçacıklar yönlendirilmiş hızlarını kaybederek plazma kılavuzun duvarlarına çarpar ve burada duvara yakın özel siperliklerde (8) tutulur. Solenoid filtre vakum arkı güç besleme devresine seri olarak bağlıdır ve ayrı bir güç kaynağı gerektirmez.

Plazma tabancasının çalışması sırasında katot ve anottaki ısının giderilmesi için normal çeşme suyu kullanılarak soğutma yapılır. Solenoid filtre bir fan ile soğutulur. İlgili personelin güvenliği ve korunması için plazma tabancasının katot ünitesi topraklanmış bir mahfazanın içine yerleştirilmiştir. Plazma tabancasının anodu ve filtre kabı topraklanmıştır.

7.2 DLC Sisteminin MEVVA Sistemine Adaptasyonu

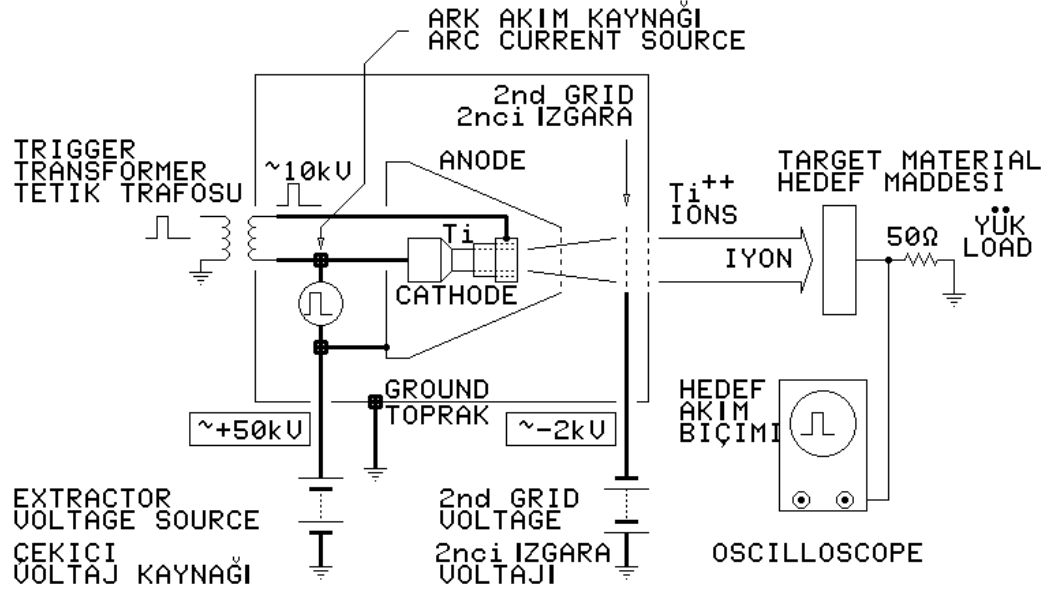
7.2.1 MEVVA İyon implantasyon sistemi

Ege Üniversitesi Yüzey Modifikasyon Laboratuvarı'nda bulunan iyon implantasyon sistemi, metal buharlı vakum ark (MEVVA) iyon implantasyon sistemi olup, yüksek akımlı metal iyon hüzmesi, vakum ark ile üretilen yoğun ve yüksek iyonizasyon derecesindeki metal plazmasından metal iyonlarının çekilip, yüksek enerjilerde hızlandırılmaları ile elde edilir. Genelde, metal buharlarından veya gazlardan çeşitli yollarla elde edilen plazmadan, pozitif iyonların yüksek gerilim altında çekilerek, söz konusu metal ve/veya gazların pozitif iyon hüzmelerinin elde edildiği cihazlara iyon üretici adı verilir (I.G.Brown, 1989).

MEVVA sisteminin genel görünüşü Şekil 7.2'de gösterilmiştir.



Şekil 7.2 Ege Üniversitesi Yüzey Modifikasyon Laboratuvarı'nın genel görüntüsü (1. Elektrik - elektronik donanım kontrol paneli, 2. Yüksek gerilim odası, 3. Mevva iyon üretici, 4. Ark ve tetikleyici güç kaynağı, 5.a. Ark akımı kontrolü 5.b. İyon hızlandırıcı kontrolü, 6. İzolasyon trafosu, 7. Yüksek gerilim güç kaynağı (110 kVdc), 8. Yüksek gerilim, 9. Vakum sistemi) (Sokullu Urkaç, 2010).



Şekil 7.3 MEVVA iyon ışını üreticinin çalışma şeması (Öztarhan et al., 2005).

Şekil 7.3'teki şemada gösterildiği biçimde, ızgaralardan hızlandırılan iyonlar, iyon üreticiden yaklaşık 60 cm uzaklıktaki numuneye çarparak, balistik enerjileri ile yüksek vakum altındaki hazne içinde bulunan numunenin yüzeyi içine girerler. Bu sayede numune yüzeyinde çeşitli değişimler (yüzeyin sertliğinde, iletkenliğinde, hidrofiliğinde, yüzey enerjisinde, vb.) gerçekleşir.

DLC kaplama öncesinde yüzeyin kaplamayı daha iyi tutmasını sağlamak amacıyla balistik olarak numunenin içine iyon girişi olmayacak şekilde düşük enerjilerde püskürtme (sputtering) işlemi olarak 20 dakikalık bir süre boyunca iyon bombardımanı yapılır.

Rusya Tomsk'da bulunan Yüksek Akım Elektroniği Enstitüsü'nden satın alınan VAD-1 vakum ark sistemi, MEVVA'nın vakum tankına adapte ve monte edilmiştir. Bu sayede DLC kaplama sisteminin oluşturulması ve kalibre edilmesi çalışmalarına başlanmıştır.



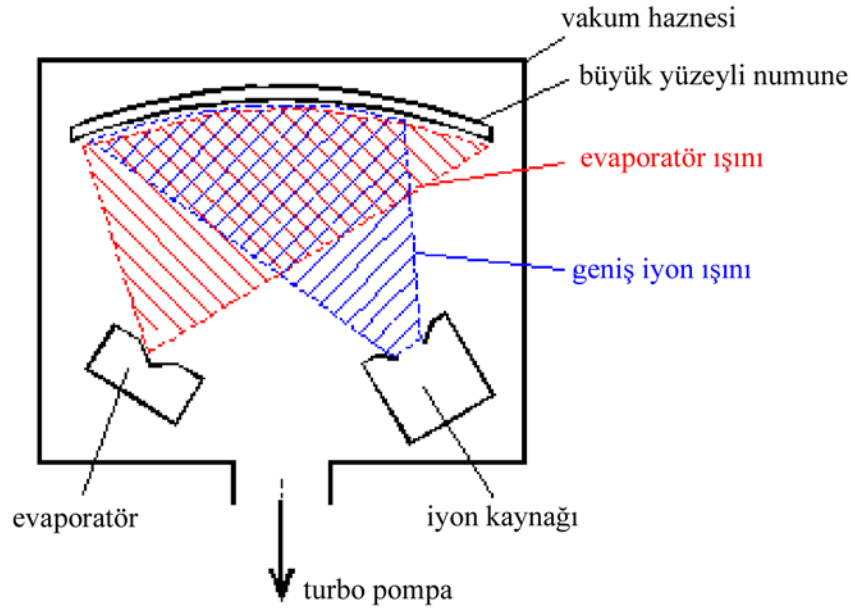
Şekil 7.4 Filtrelenmiş vakum arkını üreten bölüm, manyetik filtrenin yandan (üst solda) ve önden görünüşü, ark üreten kaynak (altta)

7.3 İyon Demeti Destekli Kaplama (IBAD)

İyon demeti destekli kaplama (IBAD), yüksek vakum altındaki herhangi bir kaplama işlemini (genellikle CVD veya PVD) sürekli iyon bombardımanı ile (genelde bir soygazla ait enerjilendirilmiş iyonlar) birleştiren bir tekniktir. Kimyasal ya da fiziksel buhar kaplama tekniklerinin yanında, yüksek güçlü elektronlarla bir hedef üzerinden sökülen atomların numune üzerine kaplanıp, daha sonra doğrudan olmayan (belli bir açıyla) numune üstüne gönderilen

hızlandırılmış iyonların bu kaplamanın üzerine enerjilerini aktarıp sekmesiyle daha düzgün ve pürüzsüz bir yüzey elde edilmesini sağlar. IBAD için bombardıman yapılacak iyon enerjisi birkaç eV ila 1000 eV arasında olabilir. Ancak belli bir enerji düzeyinin üstünde, numune içine balistik olarak girecek elektronlar iyon implantasyonu gerçekleştirmiş olurlar.

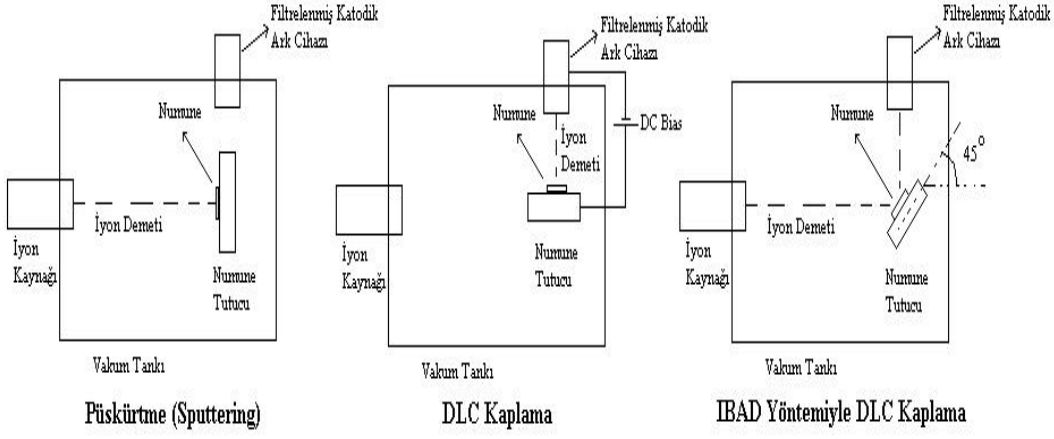
Şekil 7.5'te IBAD'in prensip şeması gösterilmektedir.



Şekil 7.5 IBAD prensip şeması (Jenion, 2012).

Bu çalışma kapsamında silikon ve yumuşak çelik üzerine IBAD uygulaması yapılmıştır. Genelde iyon bombardımanında kullanılan Ar gazı yerine, çalışmada enerjilendirilmiş C iyonları kullanılmış ve iyon kaynağı ve filtrelenmiş vakum ark kaynağının ikisine de 45 derecelik açı yapacak şekilde numune yerleştirilmiştir.

Yüzey modifikasyon laboratuvarındaki vakum haznesine yerleştirilen numune tutucunun, püskürtme, DLC kaplama ve IBAD yöntemiyle DLC kaplama işlemlerini yapmak üzere iyon implantasyonu için kullanılan iyon kaynağı ve DLC kaplama için kullanılan filtrelenmiş katodik ark cihazına göre yerleşim konumları Şekil 7.6'da gösterilmiştir.



Şekil 7.6: Vakum haznesi içinde yapılan çeşitli işlemler için numune tutucunun konumlandırılması

8. DLC KAPLAMA CİHAZIYLA YAPILAN KAPLAMALAR VE ÇEŞİTLİ ANALİZLER:

8.1 Materyal ve Yöntem

Çalışmalara, üzerinde değişik analizler yapılacak olan farklı malzemeler üzerine DLC kaplama yapılma işlemiyle başlanmıştır.

Bu kapsamda, ultrasonik banyo içindeki etil alkolde 15 dakika bekletilerek temizlenen sert ve yumuşak çelik, kristal silikon ve herhangi bir şekilde temizlenmemiş (üretildiği şekilde kullanılan) polilaktasit (PLA) ve kitosan üzerine 40 dakika süresince vakum altında DLC kaplanmıştır.

Üzerine DLC kaplama yapmak üzere 2 çeşit PLA kullanılmıştır; sert ve yumuşak PLA. Sert PLA, malzeme 200°C'de eritilip, sıkıştırarak kalıplama yöntemiyle yapılmıştır. Yumuşak PLA, %3'lük kloroform çözeltisinde çözülüp, karışımın oda sıcaklığında cam petrilere dökülerek oda sıcaklığında ve ardından vakum etüvünde bekletilmesiyle elde edilmiştir (çözücü döküm yöntemi).

Kitosan filmler yoğun membran olarak hazırlanmıştır (Sokullu Urkaç, 2010).

Kaplama koşulları olarak, bütün numunelerde bias gerilimi -100V_{DC}, basınç 6×10^{-5} Torr şeklinde ayarlanmıştır.

DLC kaplamaların öncesinde iyon implantasyon cihazı ile 1×10^{17} iyon/cm² miktara sahip 20kV hızlandırma gerilimi düzeyinde (numune yüzeyinin altına iyon girmeyecek şekilde) 20 dakika boyunca püskürtme (sputtering) yapılır. BU işlemin amacı, DLC kaplamanın daha iyi tutunabilmesi amacıyla numunenin yüzeyini pürüzlü hale getirmektir.

Ayrıca silikon ve yumuşak çelik üzerine aynı parametrelerle IBAD yöntemiyle DLC kaplama da yapılmıştır.

8.2 DLC Cihazında Yapılan Kaplamaların Kalınlığının Hesaplanması

N = kaplanan iyon sayısı

e = elektron yükü

Q = iyon "charge state"i (C^+ için $Q = 1$ (Brown and Godechot, 1991))

I_{ion} = iyon akımı (Amper)

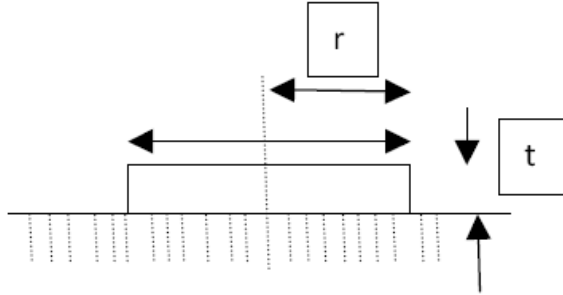
Kaplanan Yük = $NeQ = I_{ion}\tau$

NeQ = iyon başına yük (toplam yük)

$I_{ion}\tau$ = akım * zaman = yük

$$N = I_{ion}\tau/eQ \quad (1)$$

Kaplama filmini r (cm) yarıçaplı ve t (cm) kalınlığa sahip bir disk biçiminde düşünülün; yoğunluğu η (atom/cm³) olacak şekilde atomlardan oluşsun.



Şekil 8.1 Kaplanan yüzey üzerindeki kaplamanın teorik gösterimi

Bu diskteki atom sayısı;

$$N = \eta V = \eta\pi r^2 t \text{ olur.} \quad (2)$$

(1) ve (2)'den;

$(I_{ion}\tau)/eQ = \eta\pi r^2 t$ elde edilir. Buradan kalınlık;

$$t = (I_{ion}\tau)/eQ\eta\pi r^2 \text{ olur (3).}$$

$\rho(\text{g/cm}^3)$ yoğunluklu 1cm^3 'lük bir yığın düşünülün ve A atom kütesine sahip atomlardan oluşsun. Bu durumda 1cm^3 'ün ağırlığı;

$$\rho = \eta Am_V \text{ dir.}$$

$$m_V = 1 \text{ atomik kütle birimi (amu)} = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ gm}$$

$$\eta = \rho / Am_V$$

(3)'ten;

$$t = (I_{ion}\tau)/(eQ(\rho/Am_V)\pi r^2)$$

$$t = (Am_V I_{ion}\tau)/\pi e Q \rho r^2$$

$$m_V = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ gm}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ coulomb}$$

$$A = 12 \text{ g}$$

$$\rho = 2 \text{ g/cm}^3$$

$$Q = 1 \text{ (karbon plazma için; } Q = 1+)$$

$$t = (12 \cdot 1,67 \cdot 10^{-24} \cdot \tau \cdot I_{ion}) / \pi \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot r^2$$

$$t = (2 \cdot 10^{-5} \cdot \tau \cdot I_{ion}) / r^2 \text{ (cm, "pulse" başına)}$$

Buna göre kalınlık ölçümü için τ (saniye), I_{ion} (Amper) ve r (cm) parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir.

Örnek olarak, cihazın τ değeri 5ms olsun; bu da $5 \cdot 10^{-3}$ saniye yapar.

$I_{ion} = 1$ Amper,

$R = 2,5\text{cm}$ olsun.

Bu durumda;

$$t = (2 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1) / (2,5)^2 = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{cm} = 1,6 \text{ Angstrom/pulse olur.}$$

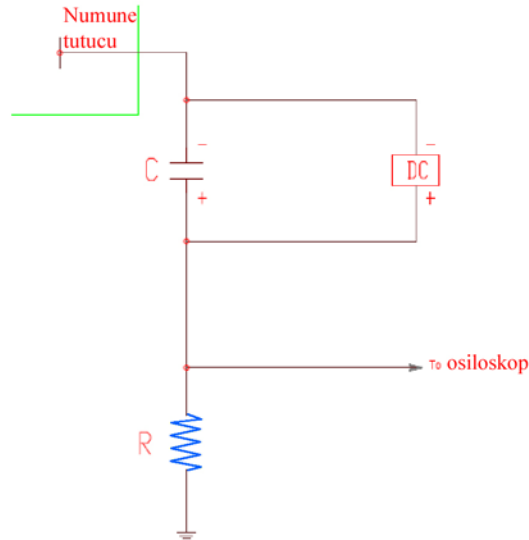
Kaplama süresince toplam N sayıda pulse olduğunu düşünölsün.

Bu durumda toplam film kalınlığı;

$$\text{Film kalınlığı} = N \cdot t = 1,6 \cdot N \text{ Angstrom olarak elde edilir.}$$

8.2.1 Yüzey modifikasyon laboratuvarındaki cihazda kaplama kalınlığının hesaplanması

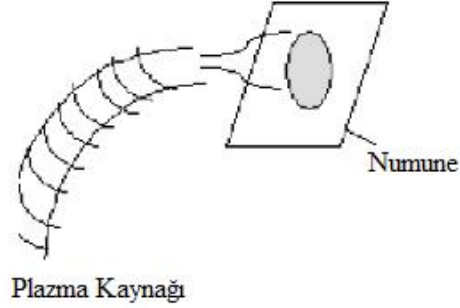
Şekilde 8.2'deki devrede laboratuvarda kullanılan cihazda $I_{ion} = 0,9\text{A}$, $r=7,5\text{cm}$ olarak ölçömlenmiştir, $\tau = 1\text{ms}$ ise üretici tarafından belirlenmiş parametredir.



Şekil 8.2 DLC cihazında meydana gelen iyon akımının (I_{ion}) değerini bulmak için oluşturulan düzeneğin şeması

Devrede $R = 10$ Ohm'luk direnç kullanılmış, osiloskopta ise 9Volt'luk gerilim değeri okunarak $I_{ion} = 9/10 = 0,9$ Amper bulunmuştur.

Kaplama yarıçapı, numune tutucu üzerindeki dairesel kaplama alanının çapı ölçülerek bulunmuştur (Şekil 8.3).



Şekil 8.3 Plazma tabancasından çıkan iyonların oluşturduğu dairesel kaplama alanının numune üzerindeki alanının teorik gösterimi

Bu durumda;

$$t = (2 \cdot 10^{-5} \cdot \tau \cdot I_{ion}) / r^2 \text{ formülünden,}$$

$$t = (2 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9) / (7,5)^2 = 3,2 \cdot 10^{-10} \text{ cm}$$

$$t = 0,032 \text{ Angstrom olarak bulunur.}$$

Buna göre saniyede 5Hz'lik DLC uygulaması yapılırsa;

Film kalınlığı = $5 \cdot 0,032 = 0,16$ Angstrom/saniye olarak bulunur (0,16 Angstrom = 0,016 nanometre).

Buradan dakikada $0,016 \cdot 60 = 0,96$ nm'lik film kalınlığı elde edilir ($f=10$ Hz olursa; $0,96 \cdot 2 = 1,92$ nanometre/dakika olur).

8.2.2 DLC Kaplama kalınlığının ölçüm yöntemiyle doğrulanması

DLC kalınlığını ölçmek için üzerine kaplama yapmak üzere jilet üreticisi bir firmadan, jilet hammaddesi olarak kullanılan %13 krom içeriğine sahip yumuşak (300HV) ve sert (750HV) çelik malzeme temin edilmiştir.

İçeriğinde karbon bulunmayan numunelerde bulunması gereken önemli özelliklerden biri, karpitleşme yeteneğidir. (Alakoski, 2006). Karpitleşme, karbon bağlama yeteneği olarak bilinir ve kaynak teknolojisinin temelini oluşturan kavramlardan biridir. Periyodik tablodaki IVB, VB, VIB grubu elementlerin karbon bağlama yetenekleri oldukça yüksektir ve genel olarak bu gruptaki elementler kaynak işleminde kullanılır. Bu sebeple, çelik malzemelerdeki VIB grubu elementi olan krom içeriği önemlidir.

Çelik numunelerden, kaplanmamış örneklere profilometri ile bakılmış, maksimum 50nm'lik bir pürüzlülük tespit edilmiştir.

Yumuşak çelik ile maskelenen yine yumuşak çelik numuneler izopropil alkol ile silindikten ve 15 dakikanın üzerinde ultrasonik banyoda etil alkol içinde bekletildikten sonra, metal maskeleme yapılarak, üzerlerine 40 ve 80 dakika süreyle DLC kaplama gerçekleştirilmiştir (numune tutucuya uygulanan bias gerilimi $-150V_{DC}$ 'dir).

Sonradan bu numuneler üzerindeki metal maske kaldırılmıştır.

Elde edilen numuneler üzerindeki kaplama kalınlıklarına, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fizik Bölümü Nanoteknoloji Laboratuvarı'nda bulunan Veeco Dektak 150 yüzey profilometri cihazı ile bakılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen kalınlıklar Çizelge 8.1'deki gibidir:

Çizelge 8.1 40 ve 80 dakikalık kaplama işlemi sonucunda elde edilen kaplamaların kalınlık değerleri

	Ortalama ölçüm değerleri (nm)
40 dakika	236
80 dakika	322

Elde edilen sonuçlara göre, aynı koşullar altında saatteki kaplama hızı 240 ila 350 nanometre arasındadır.

Bu değerler, üreticinin belirttiği saatte maksimum 500 nanometrelik kaplama hızı değeriyle tutarlıdır.

Daha önce $t = (2 \cdot 10^{-5} \cdot t \cdot I_{ion})/r^2$ formülüne göre dakikada 1,92 nanometrelik bir kaplama kalınlığı hızı öngörölmüştü.

Burada $t=1$ milisaniye olarak üretici tarafından verilmiş, $I_{ion}=0,9A$ olarak ölçölmüştü.

Kaplanan yüzeyin alanı (karbon plazmanın çarptığı yüzeyin alanı), numune tutucunun yüzeyindeki kaplama izine göre belirlenmişti ve $r=7,5cm$ olarak bulunmuştu.

Numune tutucu üzerindeki izin alanının görsel olarak tam olarak belirlenemeyeceğinden yola çıkılarak, bu alanın yarıçapının, ölçüme göre hesaplanması sonrasında 4,3 ila 5,2cm arasında olabileceği görölmüştür ki, bu da hesaplama ile ölçüm arasındaki sapmanın temel nedeni olarak düşünölebilir.

Hesaplama, ölçüm ve üreticinin verdiği değerlerin korelasyonu olarak, kaplama kalınlığının 1 saatte minimum 120nm, maksimum 350nm arasında bir değer olabileceği gözlemlenmiştir.

Bu durumda 40 dakikada kaplanan numuneler üzerindeki kaplama kalınlığının ortalama 160nm'dir (minimum 80nm, maksimum 235nm).

8.3 Temas Açısı Ölçümleri

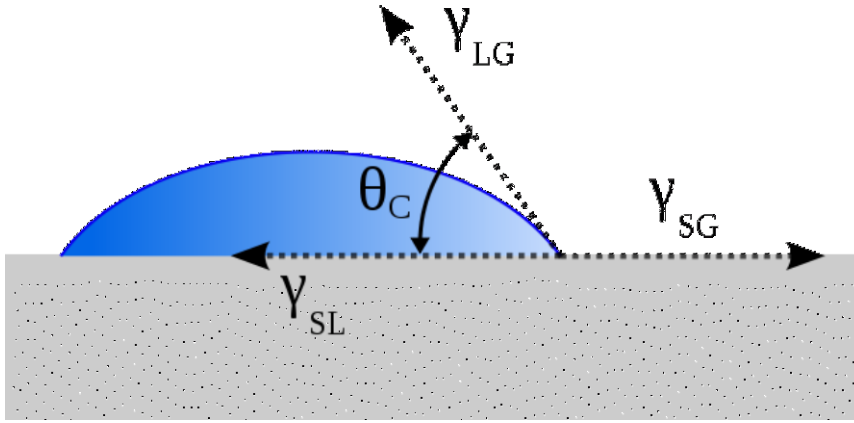
Katı bir yüzeye damlatılan sıvı damlası, üzerine su damlatılan katı malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre şekil alır ve yüzey üstünde yayılır. Su damlası hareket edene dek, gaz-sıvı, sıvı-katı ve gaz-sıvı yüzey gerilimleri toplamı sıfırdır. Yüzey gerilimleri ile temas açısı arasındaki bağıntı aşığadaki şekildedir:

$$\cos \theta_c = \frac{\gamma_{GS} - \gamma_{LS}}{\gamma_{GL}}$$

Bu denklemde θ_c temas açısını, γ_{GS} gaz-sıvı arasındaki yüzey gerilimini, γ_{LS} sıvı-katı arasındaki yüzey gerilimini, γ_{GL} gaz-sıvı arasındaki yüzey gerilimini

ifade etmektedir. Katı yüzeyler yüksek veya düşük enerjili olabilir. Yüksek enerjili yüzeylerde su, yüzeyin üstünde temas açısını sıfır yapacak şekilde düzgün olarak dağılır ve ince bir film oluşturur. Bu tip yüzeylerde tam ıslanma gerçekleşir ve hidrofilik yüzeyler olarak adlandırılırlar. Düşük enerjili yüzeylerde ise su damlaları birbirinden ayrı olarak yerleşir. Bu tip yüzeylerde temas açısı 90° 'nin üstündedir ve hidrofobik yüzeyler olarak nitelendirilirler. Damlacıklar, düşük enerjili yüzeylerden ayrılmaya eğilimlidirler (Kuntman ve Ersoy, 2008).

Temas açısını ölçmenin çeşitli yöntemleri bulunmaktadır. Bu çalışmada bir goniometre kullanılarak sesil damlacık yöntemiyle temas açısı ölçümü yapılmıştır. Katı yüzey üzerine damlatılan saf suyun profili, optik bir sistem yardımıyla kaydedilerek, bilgisayar yazılımıyla sağ ve sol temas açılarının ölçüm ortalaması elde edilmiştir.



Şekil 8.4 Yüzey üzerindeki su damlasının üzerinde temas açısının gösterimi (Wikipedia, 2012)

Silikon, yumuşak çelik, sert çelik, yumuşak PLA, sert PLA, kitosan üzerine yapılan DLC kaplamaların suyla temas açılarının ölçümü, Ege Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde bulunan KSV Instruments Limited CAM 101 cihazıyla yapılmıştır.



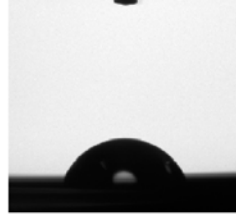
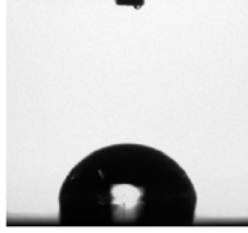
Şekil 8.5 CAM101 goniometre cihazı (KSV Instruments, 2012)

Yapılan ölçümlerde, kaplanmamış yüzeylerde ve DLC kaplanmış yüzeylerde genel olarak hidrofilik (temas açısı $< 90^\circ$) değerler bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 8.2’de özetlenmiştir. DLC kaplanan yüzeylerde, kaplanmamış yüzeylere oranla daha hidrofilik karakter belirten temas açıları elde edilmiştir. Ayrıca silikon üzerinde yapılan DLC ve IBAD kaplama karşılaştırmasında, IBAD kaplanan yüzeyin DLC’ye göre daha fazla hidrofilik karakter kazandığı gözlemlenmiştir.

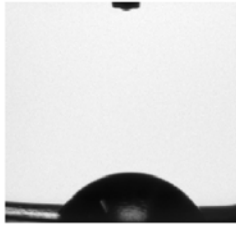
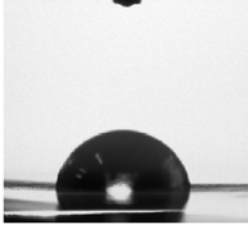
Çizelge 8.2 Temas açısı analizi yapılan malzemelerin sonuçları

	Temas Açısı Değeri (derece)		
	Kaplanmamış	DLC Kaplanmış	IBAD
Silikon	94	59	47
Yumuşak Çelik	92	-	79
Sert Çelik	75	48	-
Yumuşak PLA	77	46	-
Sert PLA	83	64	-
Chitosan	75	54	-

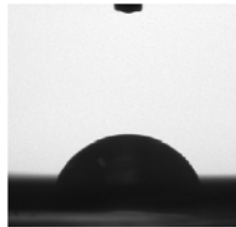
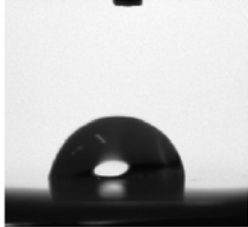
Temas açısı ölçümlerinin yapıldığı malzemelerin resimleri, Şekil 8.6’da görülmektedir.



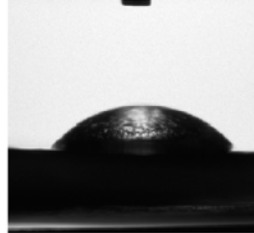
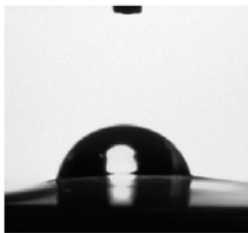
Kaplanmamış (solda) ve DLC kaplanmış sert çelik



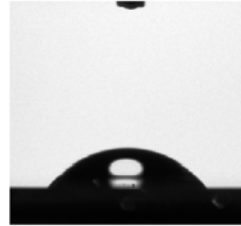
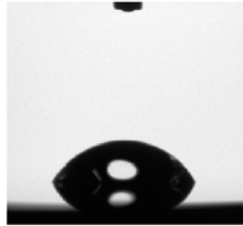
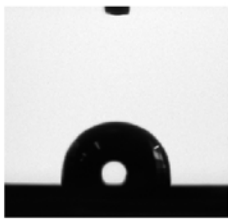
Kaplanmamış (solda) ve DLC kaplanmış yumuşak PLA



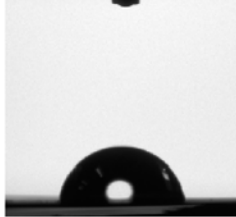
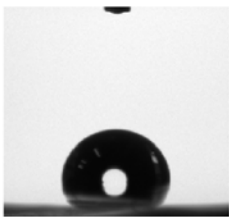
Kaplanmamış (solda) ve DLC kaplanmış Sert PLA



Kaplanmamış (solda) ve DLC kaplanmış Kitosan



Silikon (soldan sağa kaplanmamış, DLC kaplanmış ve IBAD yöntemi ile DLC kaplanmış)



Kaplanmamış (solda) ve IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış yumuşak çelik

Şekil 8.6 Kaplanmamış ve DLC kaplanmış numunelere ait temas açısı ölçüm fotoğrafları

Literatürde oksijen plazma uygulaması yapılmış DLC filmlerde hidrofilik karakterin çok yüksek oranda arttığı (Yin et al., 2008) hatta süper hidrofilik özellik kazandığı (Anil et al., 2010) bildirilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan DLC kaplamalar sonucunda yüzeylerin (süper hidrofilik olmasa da) hidrofilik karakterlerinin belli ölçülerde arttığı görülmektedir. Alınan sonuçlara göre DLC uygulaması sonrasında yüzeylerin hidrofilik karakterlerinin artmasının, numunelerin yüzeyinde kalan atmosfer kaynaklı oksijen sebebiyle olduğu düşünülmektedir.

8.4 Raman Ölçümleri

Raman spektroskopisi, molekül ve kristal örgülerdeki bağlı atomların elektron bulutlarının, gelen ışıkla etkileşerek titreşmesi sonucunda meydana gelen Raman saçılma sürecine dayanmaktadır. Raman spektrumundan organik ve inorganik maddelerin bağları hakkında kalitatif ve kantitatif bilgilerin yanı sıra madde veya malzeme yapısını meydana getiren ilgili fonksiyonel gruplar hakkında da bilgi edinilebilmektedir. Son teknoloji olan DXR Raman cihazı, katı, sıvı veya toz şeklindeki organik ve inorganik madde ve malzemelerin makroskopik ve mikroskopik karakterizasyonuna imkan vermekte, numunelerin mikrometre çözünürlükte titreşimsel spektroskopisini belirleme olanağı sağlamaktadır. Raman spektroskopisi, hiçbir numune hazırlamayı gerektirmeyen, sadece küçük bir numunenin ölçüm için yeterli olduğu ve numuneye zarar vermeyen bir yöntemdir (Fatih Üniversitesi BiyoNano Teknoloji Ar-Ge Merkezi, 2012).

Raman analizi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan dispersif Raman cihazıyla 532nm lazer kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre elde edilen grafikler Şekil 8.8'de verilmiştir.

Raman ölçümleri, DLC kaplanmış sert PLA, yumuşak PLA, sert çelik ve ayrıca IBAD yöntemiyle kaplanmış silikon ve yumuşak çelik üzerinde yapılmıştır. Hem IBAD, hem de normal şekilde kaplanan malzemelerin üzerinde belli oranlarda sp^3/sp^2 bağ oranlarını Çizelge 8.3'te görmek mümkündür. IBAD yöntemiyle yapılan kaplamalardaki sp^3/sp^2 oranları, görece normal DLC kaplamalara göre daha yüksektir. Ancak IBAD yöntemiyle kaplanan numunelerin yüzeyindeki elmas benzeri karbon dokusu büyük ölçüde zedelenmiştir. Bunun

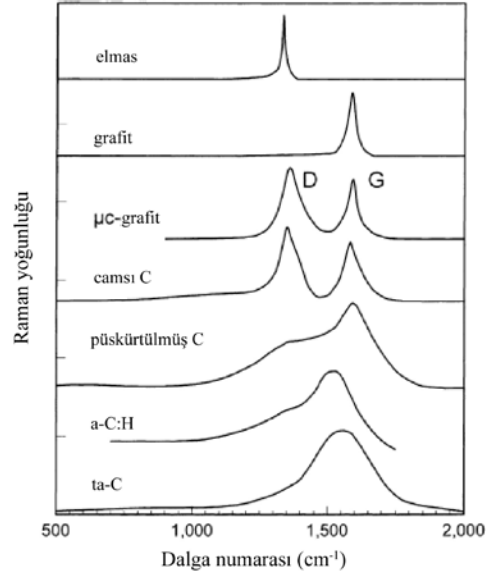
nedeni Genel Sonuçlar ve Tartışmalar bölümünde irdelenecektir. Bu deformasyonun polimer numunelerin yüzeyinde de meydana gelmesi sebebiyle, polimer numunelerin üzerine IBAD yöntemiyle kaplama yapılmamıştır.

Şekil 8.7’de çeşitli karbon yapılarının Raman spektrumlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Elde edilen karbon kaplamaların elmasa benzer yapılarının değerlendirilmesinde bu karşılaştırmadan yararlanılabilir. Buna göre D dalgasayısının yoğunluğu yüksek olan yapıların elmasa benzer özellikleri daha fazla iken, G dalgasayısının yoğunluğu yüksek olan yapıların grafit benzer özellikleri daha fazladır. Başka bir deyişle, 1350cm^{-1} dalga numarası etrafındaki frekansta en yüksek Raman yoğunluğuna sahip bölgeler tipik D-bandını (amorf ya da elmasa benzer yapı), 1550cm^{-1} dalga numarası etrafındaki frekansta en yüksek Raman yoğunluğuna sahip bölgeler tipik G-bandını (grafit benzeri yapı) oluşturmaktadır.

DLC ve grafit olarak bildiğimiz karbonun bu iki farklı bağlanma biçimiyle elde edilen iki ayrı formu arasında, DLC’nin biyo-uyumluluk yönünden daha uygun olmasının, karbon atomları arasındaki bağlanma enerjileriyle ilişkili olduğu konusunda fikir yürütülebilir. Kaplamanın sp^3/sp^2 hibritleşme oranının yüksek olduğu belirtilirken, aynı zamanda içeriğindeki karbon atomları arasındaki bağ enerjilerinin yüksek olduğu da düşünülebilir.

Şekil 8.7’de görülen karbonun çeşitli bağ tiplerine göre elde edilen Raman spektrumları, Şekil 2.2’deki karbon yapılarını gösteren ve sp^3 ve sp^2 bağlarının oluşumuna göre dağılımı ifade eden diyagramla birlikte değerlendirildiğinde, karbon yapılarının özelliklerini çeşitli bağ yapılarının miktarının belirlediği gözlemlenmiş olur.

Şekil 8.8’de Raman analizi sonrasında elde edilen grafiklerde, elmasa benzeri (D) ve grafit benzeri (G) bağların yoğunluğunun en yüksek olduğu bölgelere göre değerlendirme yapılmıştır.

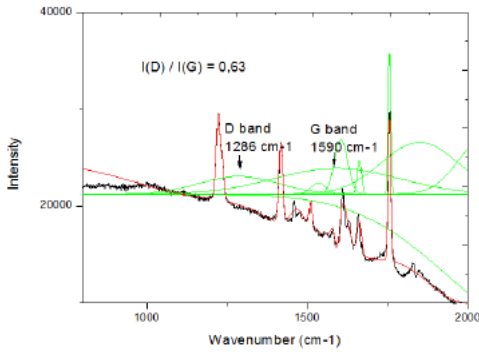


Şekil 8.7 Tipik karbon yapılarının Raman spektrumlarının karşılaştırılması (Robertson, 2002)

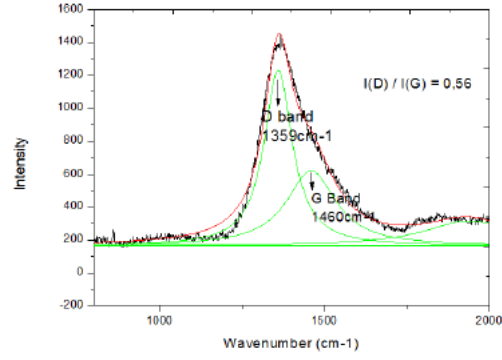
Çizelge 8.3 DLC kaplanmış çeşitli numunelerin Raman analizi sonuçları

	DLC Kaplanmış Sert PLA	DLC Kaplanmış Sert Çelik	IBAD Yöntemiyle DLC Kaplanmış Silikon	DLC Kaplanmış Yumuşak PLA	IBAD Yöntemiyle DLC Kaplanmış Yumuşak Çelik	Kaplanm amış Yumuşak PLA
D-band (cm ⁻¹)	1286	1359	1257	1390	1363	1224
G-band (cm ⁻¹)	1590	1460	1450	1513	1503	1497
I(D)/I(G)	0,63	0,56	1,23	0,58	0,9	0,04

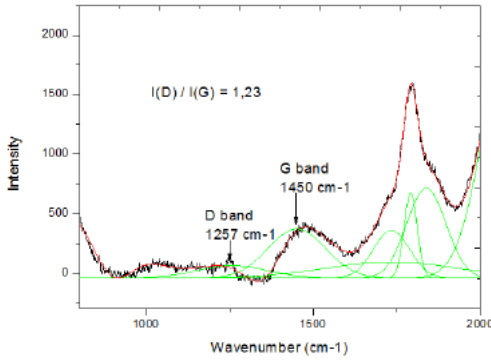
Genel olarak sp³ bağlarının oranının yüksek olması nedeniyle, kaplamalarda elmasa benzer yapının yüksek olduğu görülmektedir. Raman sonuçlarına göre yapılan kaplamalar arasında en düşük sp³/sp² yoğunluk oranı DLC kaplanmış sert çelikte, en yüksek ise IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış silikonda bulunmaktadır. Normal DLC kaplamalar arasındaki en yüksek oran ise, 0,63'lük oran ile sert PLA'ya aittir; ancak sert çelik ve yumuşak PLA'da da benzer bir oran bulunmaktadır.



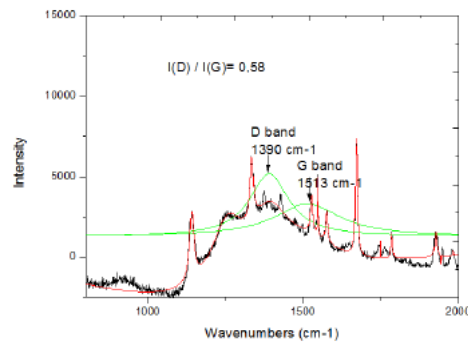
DLC Kaplanmış Sert PLA



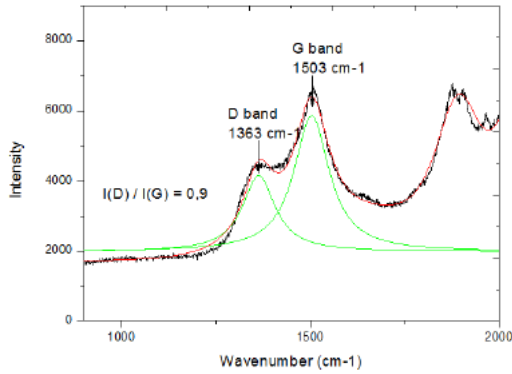
DLC Kaplanmış Sert Çelik



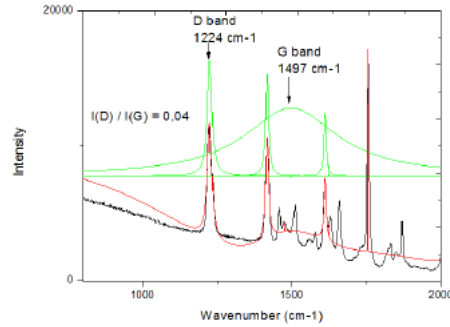
IBAD Yöntemiyle DLC Kaplanmış Silikon



DLC Kaplanmış Yumuşak PLA



IBAD Yöntemiyle DLC Kaplanmış Yumuşak Çelik



Kaplanmamış Yumuşak PLA

Şekil 8.8 DLC kaplanmış çeşitli numunelerin Raman analizi grafikleri

Kaplanmamış yumuşak PLA'nın üzerindeki sp^3/sp^2 oranının sıfıra yakın çıkmasının, elde edilen kaplamaların sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, kaplamaların sp^3 ya da sp^2 karbon içeriklerinin DLC kaplama cihazı ile yapılan kaplama işlemi sonucunda belirgin biçimde arttığını göstermesi, dolayısıyla

kaplamayı oluşturan karbon birikiminin fiziksel olarak da gözlemlenmesini sağlaması açısından önemlidir.

8.5 Mikro-Çizik Analizi

Çizik test cihazı, ince film ve kaplamaların yüzeylerinin kırılma, deformasyon ve yapışma gibi mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılır. Aynı zamanda altlık ve film sisteminin sürtünme ve yapışma kuvvetini karakterize etmede kullanılır.

Bu teknik keskin bir uç ile malzemede kontrollü bir çizik oluşturmaya dayanır. Uç malzemesi (genellikle elmas ya da sert metal) kaplama yüzeyi üzerinde sabit ya da artan bir yükü çizer. Kritik yük değerinde kaplamada kırılmalar başlar. Kritik yükleme değeri yükleme koluna eklenmiş olan ses duyurucu ile hassas bir şekilde saptanır.

Aynı zamanda optik mikroskop ile kırılmalar gözlemlenir. Kritik yükleme bilgisi farklı film – altlık kombinasyonlarının yapışma özelliklerini belirlemede kullanılır. Çizik cihazı ile test sırasında uygulanan kuvvet, sürtünme kuvveti ve ilerleme derinliği belirlenir ve bu parametreler ses bilgisiyle birlikte değerlendirilerek kaplamanın mekanik özellikleri belirlenir (Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı, 2012).

Mikro-çizik analizleri, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan mikro-çizik analiz cihazıyla yapılmıştır.

Mikro-Çizik Test Cihazı Özellikleri:

Yükleme aralığı: 30 mN- 25 N

Maksimum sürtünme kuvveti: 25 N

Maksimum Scratch uzunluğu: 12 mm

Çizik hızı: 0.4 ila 500 mm/dakika (analizler sırasında tüm numuneler için 10mm/dakika)

Maksimum derinlik: 1mm



Şekil 8.9 ODTÜ Merkez Laboratuvarı'ndaki mikro-çizik analiz cihazı

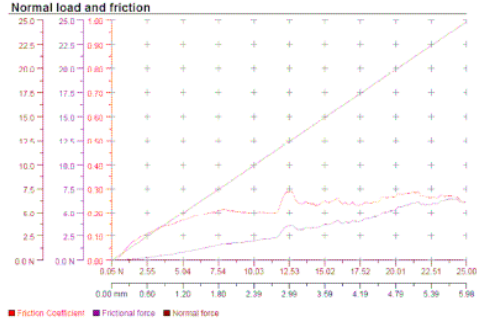
Yapılan mikroçizik analizlerinde, numune yüzeyi ve oluşan sp^2/sp^3 bağları içeren karbon tabaka (DLC) arasındaki tutunma özellikleri incelenmiştir.

Mikro-çizik analizi sonrasında, uygulanan kuvvet, numune üstündeki sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısının birbiriyle ilişkilerini gösteren grafikler, Şekil 8.10'da verilmiştir.

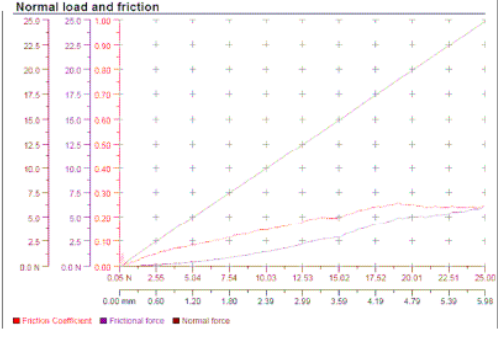
Grafiklerden çıkan sonuca göre, kaplamanın IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış yumuşak çelik ve DLC kaplanmış sert çelikte sürtünme katsayısına çok az bir miktar etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Dikey kuvvet arttıkça, kaplama yüzeyindeki sürtünme kuvvetinin fazla değişmediği de dikkat çekmektedir. Buna göre, her iki malzemenin üzerinde de DLC kaplamanın iyi tutunduğu sonucu çıkarılabilir.

DLC kaplanmış silikon ve IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış silikon numunelere ait grafiklerde ise, sürtünme katsayısının daha fazla değiştiği, özellikle IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış silikon üzerindeki sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetinin, uygulanan dikey kuvvet arttıkça daha düzensizleştiği, bir noktadan sonra çok fazla değişim gösterdiği gözlemlenmektedir. Buna göre, silikon yüzeyindeki tutunmanın, görece yumuşak ve sert çelik üzerindeki tutunmaya göre daha düşük olduğu sonucu çıkartılabilir.

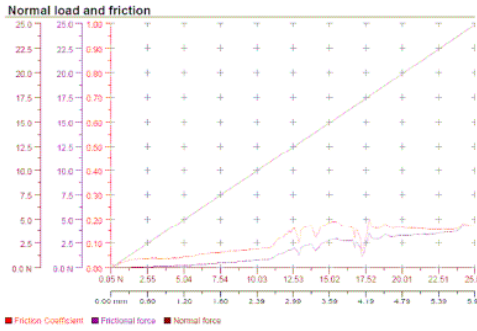
DLC kaplanmış sert PLA ve yumuşak PLA'da yüzey sürtünme kuvvetinin yüksek olduğu ve görece lineer şekilde (özellikle IBAD yöntemiyle kaplanmış silikon numunede olduğu kadar aniden yükselme ya da düşme mevcut değil) devam ettiği gözlemlenmiştir. Buradan da DLC kaplamanın yüzeye tutunmasının silikon numunelerdeki kaplamalara göre kuvvetli olduğu sonucu çıkarılabilir.



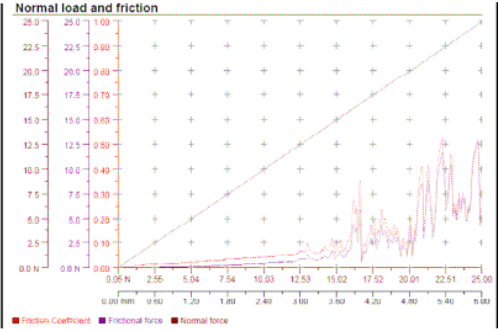
IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış
yumuşak çelik



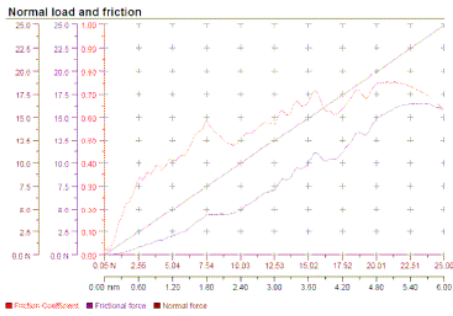
DLC kaplanmış sert çelik



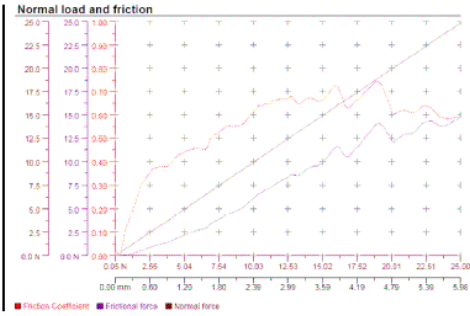
DLC kaplanmış silikon



IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış silikon



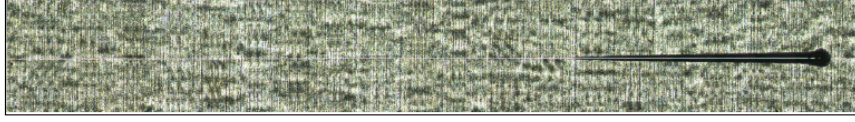
DLC kaplanmış sert PLA



DLC kaplanmış yumuşak PLA

Şekil 8.10 Mikro-çizik analizi sırasında uygulanan kuvvet, numune üzerindeki sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısının birbirleriyle ilişkileri

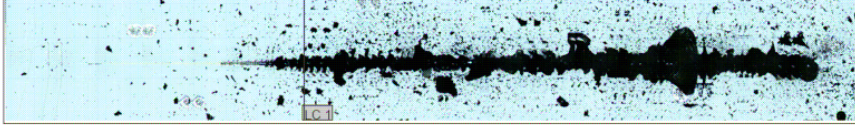
Mikro-çizik analizi ardından elde edilen görsel sonuçlar Şekil 8.11'de gösterilmiştir.



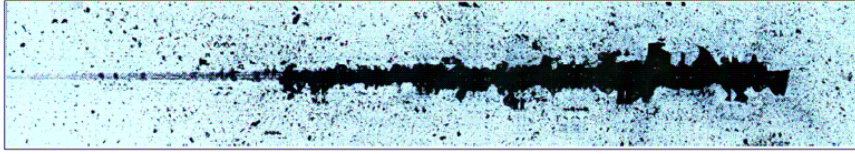
IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış yumuşak çelik



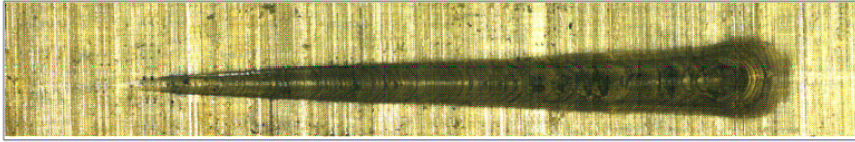
DLC kaplanmış sert çelik



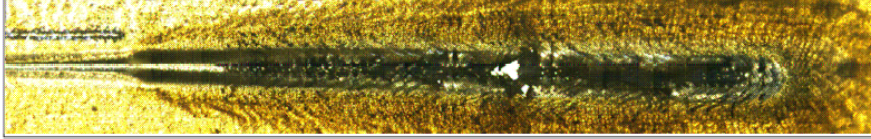
DLC kaplanmış silikon



IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış silikon



DLC kaplanmış sert PLA



DLC kaplanmış yumuşak PLA

Şekil 8.11 DLC kaplanmış numunelere ait mikro-çizik analizi sonrası fotoğrafları

Buna göre, mikro-çizik analizi sonrasında yumuşak çelik üstüne yapılan IBAD yöntemiyle kaplama ve sert çelik üzerine yapılan normal DLC kaplamada, düz bir çizgi halinde ve artan kuvvete göre derinleşen, ancak kenarlarında fazla parçalanma olmadan ilerleyen bir çizik olduğu gözlemlenmiştir.

Mikro-çizik analizi sonrasında silikon üzerine yapılan IBAD ve normal DLC kaplamalarda, oluşan çizğin kenarlarında düzensiz kopmalar olduğu gözlemlenmiştir.

Sert PLA ve yumuşak PLA üzerine yapılan normal DLC kaplamalarda, çizğin kenarlarında kopmaların olmadığı, ancak numunelerin ezilmesinden kaynaklanan şekilde çizğin kalınlaştığı gözlemlenmiştir.

Silikon numunelerdeki kaplamalar üzerindeki çizimin kenarlarındaki düzensiz kopmalara bakarak, yüzeyden düzensiz kopan parçaların birbiri arasındaki bağlanma kuvvetinin, yüzeye olan bağlanma kuvvetine göre daha yüksek olduğu sonucu çıkarılabilir.

Bu durumda en kötü yüzey-kaplama tutunmasının silikon numuneler üzerine yapılan kaplamalarda, en iyisinin yumuşak çelik numuneler üzerindeki olduğu görülebilir.

Sert ve yumuşak PLA numuneler üzerine yapılan kaplamalarda da iyi bir tutunma görülmektedir; ancak polimerin esnek yapısı nedeniyle mikro-çizik yapan ucun yüzeyi ezdiği görülmektedir.

8.6 İndentasyon

İndentasyon cihazı değişik malzemelerin (yumuşak, sert, kırılgen ve esnek) ve bu malzemelerden oluşturulan ince filmlerin mekanik özelliklerini (sertlik, elastik modülü) belirlemede kullanılır.

Uygun bir indenter kullanılarak örnek yüzeyine dik olacak şekilde belirlenen bir maksimum değere kadar yük uygulanır ve bu maksimum yük değerine ulaştıktan sonra tekrar dereceli olarak geri yükleme yapılır. Yükleme ve geri yükleme sonucunda elde edilen YÜK (N) - DERİNLİK (nm) eğrileri analiz edilerek, örneğin mekanik özellikleri belirlenir (Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı, 2012).

İndentasyon Test Cihazı Özellikleri (Mikro İndenter)

Yük aralığı: 0.03 – 20 N

Maksimum Derinlik: 180 µm

İndenter: Vickers



Şekil 8.12 ODTÜ Merkez Laboratuvarındaki İndentasyon cihazı (Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı, 2012).

Kaplanan malzemelerdeki sertlik değişimine ilişkin bir fikir edinmek üzere yapılan analizde, kaplanmamış, DLC ve IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış silikon ve kaplanmamış, DLC kaplanmış sert PLA üzerindeki değişim gözlenmiştir. Çıkan sonuçlar Çizelge 8.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 8.4: İndentasyon analizi sonrası malzemelerin sertlik derecelerinin karşılaştırılması

	Kaplanmamış Silikon	DLC Kaplanmış Silikon	IBAD Yöntemiyle DLC Kaplanmış Silikon	Kaplanmamış Sert PLA	DLC Kaplanmış Sert PLA
Ortalama Sertlik (Vickers)	930,582	1016,381	1062,586	24,009	47,889

Buna göre, silikonun yüzey sertliği, DLC kaplamada artmış, IBAD yöntemiyle yapılan kaplamada daha da artmıştır.

PLA'nın yüzey sertliği ise silikonun yüzeyine yapılan kaplamalara oranla çok daha yüksek oranda artmıştır.

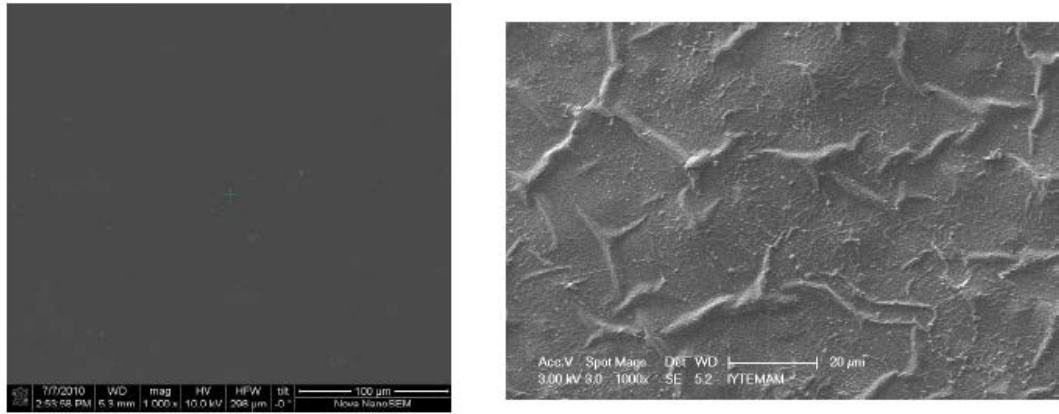
8.7 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri

Temel olarak taramalı elektron mikroskobu, Tungsten, Lantan hekza borit katottan veya alan emisyonlu (FEG) gun'dan ortaya çıkan elektronların kullanımı incelenecek malzeme yüzeyine gönderilmesi sonucu oluşan etkileşimlerden yararlanılması esasına dayanır. SEM'ler genel olarak bu elektron enerjisi 200-300

eV dan 100 keV a kadar değişebilir. Bu amaçla, yoğunlaştırıcı elektromanyetik merceklerle (condenser lense) toplanan, objektif merceklerle odaklanan elektron demeti, yine elektromanyetik saptırıcı bobinlerle örnek yüzeyinde tarama işlemini (scanning) gerçekleştirir. Bir taramalı elektron mikroskopunda görüntü oluşumu temel olarak; elektron demetinin incelenen örneğin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşimlerin (elastik, elastik olmayan çarpışmalar ve diğerleri) sonucunda ortaya çıkan sinyallerin toplanması ve incelenmesi prensibine dayanır (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 2012).

DLC kaplanmış numunelere ait SEM görüntüleri İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezi'nde (İYTE-MAM) bulunan FEI Quanta250 FEG taramalı elektron mikroskopuyla alınmıştır.

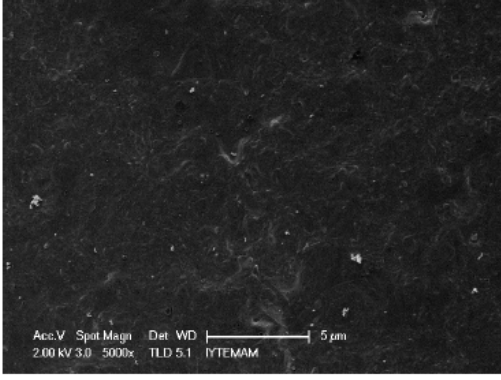
DLC kaplanmış ve kaplanmamış yumuşak PLA numunelerin 1000 defa büyütülmüş SEM görüntüleri Şekil 8.13'te gösterilmektedir.



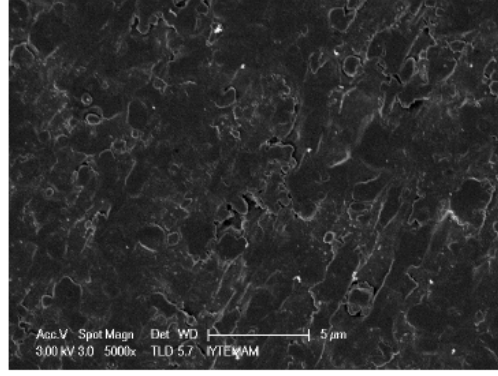
Şekil 8.13 DLC kaplanmamış (solda) ve kaplanmış yumuşak PLA numunelerin 1000 defa büyütülmüş SEM görüntüleri

Elde edilen DLC kaplanmamış ve kaplanmış yumuşak PLA numunelerin yüzeyindeki belirgin değişiklik, kaplanmamış numune üzerinde pürüzsüz ve düz bir yüzey gözlemlenirken, kaplanmış malzemenin üzerinde pürüzlü ve yer yer çatlaklara benzeyen yığınların oluşmuş olmasıdır. PLA polimerik bir malzeme olduğu için ve sıcaklık yapısını belli ölçüde bozabileceğinden, çatlaklara benzeyen bölgelerin bu bozunmalara ilişkin olabileceği ve morfolojide anomaliler oluşturması beklentiler dahilindedir.

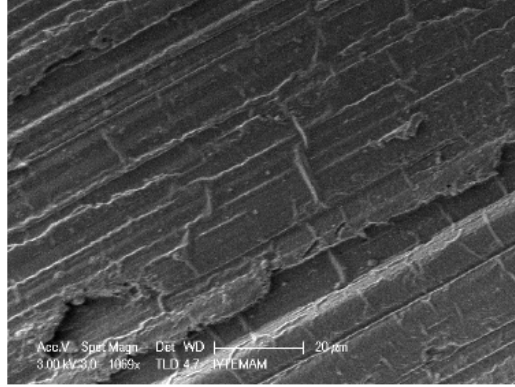
Şekil 8.14'te farklı malzemelere ait DLC numunelere ait çeşitli büyütme oranlarında SEM görüntüleri bulunmaktadır. DLC kaplanmış sert PLA üzerinde de çatlaklara benzer oluşumlar göze çarpmaktadır. Ancak DLC kaplanmış yumuşak ve sert çelik yüzeyler üzerinde, metallerin sıcaklık değişimlerinden etkilenmemeleri nedeniyle bu çatlaklara benzer oluşumlar bulunmamaktadır.



DLC kaplanmış sert çelik



DLC kaplanmış yumuşak çelik



DLC Kaplanmış sert PLA

Şekil 8.14 DLC kaplanmış sert ve yumuşak çelik ile sert PLA'ya ait SEM görüntüleri

9 GENEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Yürütülen çalışma kapsamında Ege Üniversitesi Yüzey Modifikasyon Laboratuvarı'nda bulunan MEVVA İyon İmplantasyon Ünitesi'nin vakum haznesine adapte edilen Filtrelenmiş Vakum Arkı Kaplama Cihazı ile, çeşitli özelliklere sahip malzemeler üzerine DLC kaplamalar yapılmıştır. Daha sonra bu kaplamalar üzerindeki ince filmin karakterizasyonuna ilişkin çeşitli analiz yöntemleri uygulanmış, böylece adaptasyon sonucunda oluşturulan sistemin özelliklerine ilişkin sonuçlar çıkarılmıştır.

Tez çalışması kapsamında çeşitli numuneler üzerinde yapılan analizler Çizelge 9.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 9.1 Çeşitli numuneler üzerinde yapılan analizler

DLC Kaplamalar	Kalınlık Ölçümü (Profilometre)	Temas Açısı Ölçümü	Raman Analizi	Mikro-Çizik Analizi	İndentasyon	SEM
<i>Sert Çelik</i>		√	√	√	√	√
<i>Silikon</i>		√		√	√	
<i>Sert PLA</i>		√	√	√	√	√
<i>Yumuşak PLA</i>		√	√	√		√
<i>Kitosan</i>		√				
<i>Yumuşak Çelik</i>	√					
<i>Silikon (IBAD yöntemi ile)</i>		√	√	√	√	
<i>Yumuşak Çelik (IBAD yöntemi ile)</i>		√	√	√	√	√

Çalışmanın başında, yapılan kaplamaların kalınlıklarını belirlemek üzere, öncelikle hesaplama yöntemiyle kaplama hızına bağlı olarak kalınlık değeri bulunmuştur. Hesaplama yönteminin ardından, yumuşak çelik üzerine farklı sürelerle yapılan iki farklı kaplamanın profilometre cihazıyla kalınlıkları tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlarla, filtrelenmiş katodik vakum arkı cihazının üreticisinin verdiği maksimum kaplama kalınlığı karşılaştırılarak ortalama kaplama hızına bağlı olarak kaplama kalınlığı belirlenmiştir.

Daha sonra sistem ile çeşitli malzemelerin kaplanmasına geçilmiş, bu kapsamda sert çelik, silikon, sert PLA, yumuşak PLA, kitosan gibi numunelerin üzerine DLC kaplanmıştır.

Hücre tutunmasının iyi olabilmesi için hidrofiliğin yüksek olmasının önemli bir özellik olduğu bilinmektedir (Yin et al., 2008). Bu sebeple, DLC kaplanan bu numunelerin tamamı üzerinde su temas açısı analizi yapılmış, elde edilen kaplamaların hidrofilik özelliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Saf DLC kaplamaların hidrofobik özelliklerinin daha yüksek olacağı beklenirken (Robertson, 2002), literatürde oksijen plazma işlemi yapılmış DLC kaplamaların süper hidrofilik yüzeyler elde edilmesine neden olduğu bilinmektedir. Bu sebeple, beklenenin tersine hidrofilik özellikte oluşan bu artışın, kaplamalar üzerinde bulunan atmosfer kaynaklı oksijen varlığı sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir. Yine de gelecekte yapılacak çalışmalarda, aynı sistemle elde edilen DLC kaplamaların oksijen içeriklerinin belirlenmesine ilişkin denemeler yapılması önerilmektedir.

Elde edilen numunelerden, DLC kaplanmış sert çelik, sert ve yumuşak PLA ile IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış silikon ve yumuşak çelik üzerinde Raman analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yapılan kaplamaların sp^2 (grafit benzeri) ve sp^3 (elmas benzeri) bağ miktarlarının belirlenmesi açısından önemlidir.

Buna göre farklı malzemeler üzerinde farklı sp^2 ve sp^3 bağ miktarları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre sp^3 bağlarının sp^2 bağlarına oranla oldukça yüksek olduğu IBAD yöntemiyle kaplanan silikon numunede, bu yüksek oranın bölgesel olarak elde edilmesi, diğer bölgelerde ise hemen hiç karbon bağı bulunmaması, IBAD yöntemi uygulanırken yüzeyde bağ oluşturan karbon yapılarının sürekli iyon bombardımanı tarafından sökülmesi şeklinde yorumlanmıştır. Gelecekte, bu sorunun sebebinin net olarak belirlenmesi ve giderilmesi için çalışma yapılması, IBAD yöntemiyle yapılacak yüksek oranda sp^3 bağları içeren DLC kaplamaların iyileştirilmesi açısından önemlidir.

Diğer numuneler arasında en düşük sp^3/sp^2 bağ oranına (0,56) sahip DLC kaplanmış sert çelikte bile yüksek sp^3 bağ oranı elde edilmiştir. Bu sebeple, DLC sistemiyle elde edilen kaplamaların kalitesinin yüksek olduğu söylenebilir.

Ayrıca DLC kaplanmamış yumuşak PLA üzerinde sıfıra yakın sp^3/sp^2 (0,04) oranının bulunması, diğer numuneler üzerindeki karbon varlığının kesinliğini destekler niteliktedir.

Kaplanan numunelerden, DLC kaplanmış sert çelik, silikon, sert PLA, yumuşak PLA ile IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış silikon ve yumuşak çelik üzerinde mikro-çizik testleri uygulanmıştır.

Elde edilen grafik sonuçlarına bakılarak, aynı kuvvete maruz kalan PLA malzemelerin, silikon ve çelik malzemelere göre daha iyi tutunmaya sahip oldukları düşünülebilir.

Fakat mikro-çizik analizinin görsel sonuçları irdelendiğinde, yüzeyden düzensiz kopan parçaların bulunduğu numunelerde birbiri arasındaki bağlanma kuvvetinin, yüzeye olan bağlanma kuvvetine göre daha yüksek olduğu sonucunun çıkarılabileceği düşünülmüştür. Bu durumda en kötü yüzey-kaplama tutunmasının silikonda, en iyisinin yumuşak çelikte olduğu görülebilir.

DLC kaplanan sert çelik, silikon, sert PLA numuneler ile, IBAD yöntemiyle DLC kaplanan silikon ve yumuşak çelik üzerinde, yüzey sertliklerini görmek amacıyla indentasyon analizi yapılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde DLC kaplanan silikonun yüzey sertliğinin arttığı, IBAD yöntemiyle yapılan DLC kaplamada daha da arttığı gözlemlenirken, DLC kaplanan sert PLA'nın yüzey sertliğindeki artışın silikon kaplamalardaki artışa oranla çok daha yüksek olduğu görülmüştür. DLC kaplanan sert çelik ve IBAD yöntemiyle DLC kaplanan yumuşak çelik üzerindeki kaplamaların indentasyon sonuçlarına bakıldığında, her iki malzemenin de analiz sonuçlarında anlamlı bir sertlik değişimi gözlemlenmemiştir.

DLC kaplanmış yumuşak PLA'nın SEM ile elde edilen 1000 defa büyütülmüş görüntüsü, kaplanmamış PLA yüzeyiyle karşılaştırılmıştır. Kaplanmamış PLA'nın yüzeyi oldukça pürüzsüz görünürken, DLC kaplanmış yumuşak PLA'nın yüzeyinde çatlağa benzeyen birikimler görülmüştür. Aynı birikimler, sert PLA'nın yüzeyinde de gözlemlenmiştir. Ancak DLC kaplanmış sert çelik ile IBAD yöntemiyle DLC kaplanmış sert çelik yüzeyinde bu çatlağa benzer yapılar gözlemlenmemiştir. Bu sebeple, oluşan yapıların polimer yapıdaki PLA'nın vakum altında oluşan yüksek sıcaklık sebebiyle yer yer bozunmuş olmasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür.

Yapılan bu çalışma sayesinde, sabit koşullar altında elde edilen DLC kaplamaların bağ içeriği, morfolojik ve bazı tribolojik özellikler açısından incelenmesi sağlanmıştır. Bağ içeriği, elde edilecek kaplamanın biyo-uyumluluğu açısından, morfolojik ve tribolojik özellikleri, numune ve içerisinde bulunacağı ortamla etkileşimi yönünden önemlidir. Gelecekteki çalışmalarda, kaplamanın hazırlanmasındaki farklı parametreler (basınç, bias gerilimi, vb.) değiştirilerek ya da bu çalışmada kullanılan malzemeler dışında numuneler kullanılarak, değişik özellikte kaplamaların oluşturulması sağlanabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- A. Kuntman ve A. Ersoy**, Polimerik Yalıtkanlarda Yüzey Özelliklerinin Temas Açısı ile İncelenmesi, 2008, 107-111, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO2008) Bildiri Kitabı-Elektrik, Bursa, Türkiye.
- Aisenberg S. and Chabot R.**, 1971, Ion-beam deposition of thin films of diamondlike carbon, J. Appl. Phys., 42:2953-2958.
- Alakoski E., Kiuru M. and Tiainen V.M.**, 2006, A Simplified Arc-Discharge Set-Up for High Adhesion of DLC Coatings, Diamond Relat. Mater., 15:34-37.
- Alakoski E., Kiuru M., Tiainen V.M. and Anttila A.**, 2003, Adhesion and Quality Test for Tetrahedral Amorphous Carbon Coating Process, Diamond Relat. Mater., 12:2115-2118.
- Alakoski E. and Tiainen V.M.**, 2005, Energy Dependence of the Carbon Plasma Beam on the Arc Voltage and Anode-Cathode Distance in the Pulsed Arc Discharge Method, Diamond Relat. Mater., 14:1451-1454.
- Allen M., Myer B. and Rushton N.**, 2001, *In Vitro* and *In Vivo* Investigations into the Biocompatibility Of Diamond-Like Carbon (DLC) Coatings for Orthopedic Applications, J. Biomed. Mater. Res., 58:319-328.
- Anders S., Anders A. and Brown I.G.**, 1993, Macroparticle-free Thin Films Produced by an Efficient Vacuum Arc Deposition Technique, 74:4239.
- Anders S., Anders A., Dickinson M.R., MacGill R.A. and Brown I.G.**, 1997, S-shaped Magnetic Macroparticle Filter for Cathodic Arc Deposition, IEEE Trans. Plasma Sci. 25:670-674.
- Angus J.C. and Hayman C.C.**, 1988, Low-pressure, metastable growth of diamond and “diamondlike” phases, Science, 241:913-921.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Anil M., Ahmed F.S., Yi J.W., Moon M.W., Lee K.R., Kim Y.C., Seok H.K. and Han S.H.**, 2010, Tribological Performance of Hydrophilic Diamond-Like Carbon Coatings on Ti-6Al-4V in Biological Environment, *Diamond Relat. Mater.*, 19:300-304.
- Anttila A, Lappalainen R, Heinonen H, Santavirta S and Konttinen YT.**, 1999, Superiority of Diamondlike Carbon Coating On Articulating Surfaces Of Artificial Hip Joints, *New Diamond Front Carbon Technol.*, 9:283–288.
- Anttila A., Salo J. and Lappalainen R.**, 1995, High Adhesion of Diamond-Like Films Achieved by the Pulsed Arc-Discharge Method, *Mater. Lett.*, 24:153-156.
- Bhushan B.**, 1999, Chemical, Mechanical and Tribological Characterization of Ultra-Thin and Hard Amorphous Carbon Coatings As Thin As 3.5 Nm: Recent Developments, *Diamond Relat. Mater.*, 8:1985-2015.
- Bilek M.M.M.**, 1999, The Effect of Magnetic Field Configuration on Plasma Beam Profiles in Curved Magnetic Filters, *J. Appl. Phys.*, 85:6385.
- Brown I.G.**, 1998, Cathodic Arc Deposition of Films, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 28:243-269.
- Brown I.G. and Godechot X.**, 1991, Vacuum Arc Ion Charge-State Distributions, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 19:713-717.
- Brown I.G., K.A. Bjornstad, E.A. Blakely, J.E. Galvin, O.R. Monteiro and S. Sangyuenyongpipat**, 2003, Growth of Large Patterned Arrays of Neurons using Plasma Methods, *Plasma Phys. Control. Fusion*, 45:547-554.
- Casiraghi C., Ferrari A.C., Ohr, R., Chu D. and Robertson J.**, 2004, Surface Properties of Ultra-Thin Tetrahedral Amorphous Carbon Films for Magnetic Storage Technology, *Diamond Relat. Mater.*, 13:1416-1421.
- Celi F.G. and Butler J.E.**, 1991, Diamond Chemical Vapor Deposition, *Annu. Rev. Phys. Chem.*, 42:643-684.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chhowalla M. and Amaratunga G.A.J.**, 2001, Strongly Adhering And Thick Highly Tetrahedral Amorphous Carbon (Ta-C) Thin Films via Surface Modification by Implantation, *J. Mater. Res.*, 16:5-8.
- Chhowalla M., Robertson J., Chen C.W., Silva S. R. P., Davis C.A. and Amaratunga G.A.J.**, 1997, Influence of Ion Energy and Substrate Temperature on the Optical and Electronic Properties of Tetrahedral Amorphous Carbon (ta-C) Films, 81:139.
- Chhowalla M., Yin Y., Amaratunga G.A.J., McKenzie D.R. and Frauenheim T.**, 1996, Highly Tetrahedral Amorphous Carbon Films with Low Stress, *Appl. Phys. Lett.* 69:2344.
- Coll B.F. and Chhowalla M.**, 1994, Modelization of Reaction Kinetics of Nitrogen and Titanium During TiN Arc Deposition, *Surface and Coatings Technology*, 68:131-140.
- Corbella Roca C.**, 2005, Thin film structures of diamond-like carbon prepared by pulsed plasma techniques, PhD Thesis, Barcelona University, 367p (unpublished).
- Cuomo J.J., Doyle J.P., Bruley J. and Liu J.C. K.A.**, 1991, Sputter deposition of dense diamond-like carbon films at low temperature, *Appl. Phys. Lett.* 58:466.
- Damasceno J.C., Camargo S.S., Freire F.L. and Carius R.**, 2000, Deposition of Si-DLC Films with High Hardness, Low Stress and High Deposition Rates, *Surf. Coat. Technol.*, 133-134:247-252.
- Davanloo F., Juengerman E.M., Jander D.R., Lee T.J. and Collins C.B.**, 1990, Amorphous Diamond Films Produced by a Laser Plasma Source, *J. Appl. Phys.*, 67:2081.
- Dresselhaus M.S., Dresselhaus G. and Eklund P.C.**, 1996, *Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes*, Academic Press, London, 965p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- E. Alakoski**, 2006, Studies on Diamond-Like Carbon and Novel Diamond-Like Carbon Polymer Coatings Deposited with Filtered Pulsed Arc Discharge Method, Academic Dissertation, University of Helsinki, 45p (published).
- Fallon P.J., Veerasamy V.S., Davis C.A., Robertson J., Amaratunga G.A.J., Milne W.I. and Koskinen J.**, 1993, Properties of Filtered-Ion-Beam-Deposited Diamondlike Carbon as a Function of Ion Energy, Phys. Rev. B, 48:4777-4782.
- Fatih Üniversitesi BiyoNano Teknoloji Ar-Ge Merkezi**, “Dispersif Raman Spektroskopisi”, http://binatam.fatih.edu.tr/?dag_ram, (Erişim tarihi: 8 Mayıs 2012).
- Ferrari A.C., Rodil S.E., Robertson J. and Milne W.I.**, 2002, Is Stress Necessary to Stabilise sp^3 Bonding in Diamond-Like Carbon?, Diamond Relat. Mater., 11:994-999.
- Friedmann T.A., Sullivan J.P., Knapp J.A., Tallant D.R., Follstaedt D.M., Medlin D.L. and Mirkarimi P.B.**, 1997, Thick Stress-free Amorphous-Tetrahedral Carbon Films with Hardness Near that of Dimond, 71:3820.
- Gählin R., Larsson M. and Hedenqvist, P.**, 2001, ME-C:H Coatings in Motor Vehicles, Wear 249:302-309.
- Gielen J.W.A.M., van de Sanden M.C.M. and Schram M.C.**, 1996, Plasma beam deposited amorphous hydrogenated carbon: Improved film quality at higher growth, Appl. Phy. Lett., 69:152.
- Goglia P.R., Berkowitz J., Hoehn J., Xidis A. and Stover L.**, 2001, Diamond-Like Carbon Applications in High Density Hard Disc Recording Heads, Diamond Relat. Mater., 10:271-277.
- Grischke M., Herb R., Massler O., Karner J. and Eberle H.**, 2001, High Vacuum Based Deposition of Carbon-Based Films for Industrial Applications, 44th Annual Technical Conference Proceedings, 407p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gutensohn K., Beythien C., Koester R., Bau J., Fenner T., Grewe P., Padmanaban K., Schaefer P. and Kuehnl P.,** 2000, In Vitro Biocompatibility Analyses of Stents Coated with Diamond-Like Carbon by Flow Cytometry, Cell Growth Assays and Electron Microscopy, Infusion Therapy and Transfusion Medicine, 27:200-206.
- Hauert R.,** 2004, An Overview on the Tribological Behaviour of Diamond-Like Carbon in Technical and Medical Applications, Tribol. Internat. 37:991-1003.
- Hauert R. and Patscheider J.,** 2000, From Alloying to Nanocomposites – Improved Performance of Hard Coatings, Adv. Eng. Mater. 2:247-259.
- Hirvonen J.P., Lappalainen R., Koskinen J. and Antilla A.,** 1990, Preparation and Properties of High Density, Hydrogen Free Hard Carbon Films with Direct Ion Beam or Arc Discharge Deposition , 52:197-216.
- Hoffsass H., Binder H., Klumpp T. and Recknagel E.,** 1994, Doping and growth of diamond-like carbon films by ion beam deposition, 3:137-142.
- Ishikawa J., Tsuji H., Sato H. and Gotoh J.,** 2007, Ion Implantation of Negative Ions for Cell Growth Manipulation and Nervous System Repair, Surface&Coatings Technology, 201:8083–8090.
- Jacob W. and Moller W.,** 1993, On the structure of thin hydrocarbon films, Appl. Phy. Lett.. 63:1771.
- Jenion,** “Material Technology by New Plasma and Broad Ion Beam Techniques”, <http://www.jenion.de/bilder/ibad1.gif> (Erişim tarihi: 3 Mayıs 2012).
- Jones M.I., McColl I.R., Grant D.M. and Parker K.G.,** 1999, Haemocompatibility of Dlc and TiC–TiN Interlayers on Titanium, Diamond Relat. Mater., 8:457-462.
- Kelly B.T.,** 1981, Physics of Graphite, Applied Science Publishers, London, 477p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ko H.P., Kim S., Kim J.S., Kim H.J. and Yoon S.J.**, 2005, Wear and Dynamic Properties of Piezoelectric Ultrasonic Motor with Frictional Materials Coated Stator, *Mat. Chem. Phys.*, 90:391-395.
- Korea Institute of Science and Technology**, “Welcome to DLC Homepage”, http://diamond.kist.re.kr/DLC/R&D_DB/intro-DLC.ppt (Erişim tarihi: 9 Mayıs 2012)
- Krishna K.M., Umeno M., Nukaya Y., Soga T. and Jimbo T.**, 2000, Photovoltaic and Spectral Photoresponse Characteristics of n-C/p-C Solar Cell on a p-Silicon Substrate”, *Appl. Phys. Lett.*, 77:1472-1474.
- KSV Instruments**, “CAM101.pdf”, <http://users.metropolia.fi/~karisv/Nanopinta/CAM101.pdf>, (Erişim tarihi: 15 Mayıs 2012).
- Lappalainen R., Heinonen H., Anttila A. and Santavirta S.**, 1998, Some Relevant Issues Related to the Use of Amorphous Diamond Coatings for Medical Applications, *Diamond Relat. Mater.*, 7:482-485.
- Lee D.H., Fayeulle S., Walter K.C. and Nastasi M.**, 1999, Internal Stress Reduction in Diamond Like Carbon Thin Films by Ion Irradiation, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 148:216-220.
- Li D.J. and Gu H.Q.**, 2002, Cell Attachment on Diamond-Like Carbon Coatings, *Bull. Mater. Sci.*, 25:7-13.
- Lifshitz Y.**, 1999, Diamondlike carbon - present status, *Diamond & Rel. Mater.*, 8:1659.
- Lifshitz Y.**, 2003, Pitfalls in Amorphous Carbon Studies, *Diamond Relat. Mater.*, 12:130-140.
- Lifshitz Y., Kasi S.R., Rabalais J.W. and Eckstein W.**, 1990, Subplantation Model for Film Growth from Hyperthermal Species”, *Phys. Rev. B*, 41:10468-10480.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- McColl I.R., Grant D.M. and Wood J.V.**, 1994, The Biocompatibility of Low Temperature Diamond-Like Carbon Films: A Transmission Electron Microscopy, Scanning Electron Microscopy and Cytotoxicity Study, *Diamond Relat. Mater.*, 3:1120-1123.
- McKenzie D.R.**, 1996, Tetrahedral bonding in amorphous carbon, *Rep. Prog. Phys.*, 59:1611.
- McKenzie D.R., Muller D. and B.A. Pailthorpe**, 1991, Compressive-Stress-Induced Formation of Thin-Film Tetrahedral Amorphous Carbon, *Phys. Rev. Lett.*, 67:773-776.
- Merkulov V.I., Lowndes D.H., Jellison G.E., Puretzky A.A. and Geohegan D.B.**, 1998, Structure and Optical Properties of Amorphous Diamond Films Prepared by ArF Laser Ablation as a Function of Carbon Ion Kinetic Energy, *Appl. Phys. Lett.*, 73:2591.
- Miyagawa S., Nakao S., Ikeyama M. and Miyagawa Y.**, 2002, Deposition of Diamond-Like Carbon Films Using Plasma Based Ion Implantation with Bipolar Pulses, *Surf. Coat. Technol.*, 156:322-327 (2002).
- Nikolaev A.G. and Gushenets V.I.**, 2009, Technical Specification and User Manual For VAD-1 Vacuum-Arc Facility, Russian Academy of Sciences Siberian Branch Institute of High-Current Electronics, Tomsk, 14p.
- Oerlikon Balzers**, “Historical Milestones-Volkswagen Lupo-VW Lupo 3L TDI”, <http://www.oerlikon.com/balzers/en/about-balzers/historical-milestones/> (Erişim tarihi: 09.05.2012)
- Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı**, “Nano-Mikro Mekanik Test Cihazı ve Scratch Test Cihazı”, <http://www.merlab.metu.edu.tr/nano-mikro-mekanik-test-cihazı>, (Erişim tarihi: 8 Mayıs 2012).
- Öztarhan A., Brown I., Bakkaloğlu C., Watt G., Evans P., Oks E., Nikolaev A. and Tek Z.**, 2005, Metal Vapour Vacuum Arc Ion Implantation Facility in Turkey, *Surface & Coatings Technology*, 196:327-332.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pei Y.T., Galvan D., De Hosson J.Th.M. and Cavaleiro A.,** 2005, Nanostructured TiC/a-C Coatings for Low Friction and Wear Resistant Applications, Surf. Coat. Technol., 198:44-50.
- Piazza F., Grambole D., Zhou L., Talke F., Casiraghi C., Ferrari A.C. and Robertson J,** 2004, Large Area Deposition of Hydrogenated Amorphous Carbon Films for Optical Storage Disks, Diamond Relat. Mater., 13:1505-1510.
- Polo M.C., Andújar J.L., Hart A., Robertson J. and Milne W.I.,** 2000, Preparation of Tetrahedral Amorphous Carbon Films by Filtered Cathodic Vacuum Arc Deposition, Diamond Relat. Mater., 9:663-667.
- Roberston J.,** 2005, Mechanism of Sp^3 Bond Formation in the Growth of Diamond-Like Carbon, Diamond Relat. Mater., 14:942-948.
- Robertson J.,** 2002, Diamond-like amorphous carbon, Materials Science and Engineering, R 37:129-281.
- Scheibe H.J. and Schultrich B.,** 1994, DLC Film Deposition by Laser-arc and Study of Properties, Thin Solid Films, 246:92-102.
- Schwan J., Ulrich S., Roth H., Ehrhardt H., Silva S.R.P., Robertson J. Samlenski R. and Brenn R.,** 1996, Tetrahedral amorphous carbon films prepared by magnetron sputtering and dc ion plating, J. Appl. Phys., 79:1416.
- Sheeja D., Tay B.K., Sze J.Y., Yu L.J. and Lau S.P.,** 2003, A Comparative Study between Pure and Al-Containing Amorphous Carbon Films Prepared by FCVA Technique together with High Substrate Pulse Biasing, Diamond Relat. Mater., 12:2032-2036.
- Siegal M.P., Barbour J.C., Provencio P.N., Tallant D.R. and Friedmann T.A.,** 1998, Amorphous-Tetrahedral Diamondlike Carbon Layered Structures Resulting from Film Growth Energetics, Appl. Phys. Lett., 73:759.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Silva S.R.P.**, 2003, Properties of Amorphous Carbon, INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, London, 375p.
- Sokullu Urkaç, Ş.E.**, 2010, Sinir Dokusu Rejenerasyonu ve Desenli Yaygın Sinir Ağları Uygulamalarına Yönelik İyon Işınları ile Modifiye Edilmiş ve Elmasa Benzer Karbon Filmler (DLC) ile Kaplanmış Polimerik Yüzeylerin Oluşturulması, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 216s (yayımlanmamış).
- Spencer E.G., Schmidt P.H., Joy D.C. and Sansalone F.J.**, 1976, Ion-beam-deposited polycrystalline diamondlike films”, Appl. Phys. Lett., 29:118-120.
- Staryga E. and Bak G.W.**, 2005, Relation Between Physical Structure and Electrical Properties of Diamond-Like Carbon Thin Films, Diamond Relat. Mater., 14:23-34.
- Tay B.K., Cheng Y.H., Ding X.Z., Lau S.P., Shi X., You G.F. and Sheeja D.**, 2001, Hard Carbon Nanocomposite Films with Low Stress, Diam. Relat. Mater., 10:1082-1087.
- Tay B.K., Sheeja D. and Yu L.J.**, 2003, On Stress Reduction of Tetrahedral Amorphous Carbon Films for Moving Mechanical Assemblies, Diamond Relat. Mater., 12:185-194.
- Tiainen V.M.**, 2001, Amorphous Carbon as a Bio-Mechanical Coating — Mechanical Properties and Biological Applications, Diamond Relat. Mater., 10:153-160.
- Türkiye Atom Enerjisi Kurumu**, “Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Nasıl Çalışır? Ne İşe Yarar?”, <http://www.merlab.metu.edu.tr/nano-mikro-mekanik-test-cihazı>, (Erişim tarihi: 04 Mayıs 2012).
- Voevodin A.A. and Donley M.S.**, 1996, Preparation of Amorphous Diamond-like Carbon by Pulsed Laser Deposition: A Critical Review, Surf. Coat. Technol., 82:199-213.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Weiler M., Sattel S., Jung K., Ehrhardt H., Veerasamy V.S. and Robertson J., 1993, Highly tetrahedral, diamond-like amorphous hydrogenated carbon prepared from a plasma beam source, Appl. Phy. Lett., 64:2797.

Wikipedia, “File:Contact angle.svg”, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Contact_angle.svg, (Erişim tarihi: 15 Mayıs 2012).

Yin Y., Hang L., Xu J., McKenzie D.R. and Bilek M.M.M., 2008, Surface Adsorption and Wetting Properties of Amorphous Diaomond-Like Carbon Thin Films for Biomedical Applications, Thin Solid Films, 516:5157-5161.

Zhitomirsky V.N., Kinrot U., Alterkop B., Boxman R.L. and Goldsmith S., 1996, Influence of Gas Pressure on the Ion Current and Its Distribution in a Filtered Vacuum Arc Deposition System, Surface and Coatings Technology, 86/87:263-270.

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Ankara’da doğan Umut Yeşilyurt, ilk, orta ve lise eğitimini İzmir’de tamamladıktan sonra, 2001 yılında KKTC’de bulunan Doğu Akdeniz Üniversitesi’nin Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu.

2001 yılında Lisans programından mezun olduktan sonra günümüze kadar elektrik sektöründe yer alan yerli ve yabancı firmalarda Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak çalıştı.

2002 yılında Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Enerji Bölümü’nde yüksek lisans programına kabul edildi ve bu bölümden 2005 yılında mezun oldu.

2006 yılında Ege Üniversitesi Biyomühendislik Bölümü Doktora programına kabul edilerek öğrenimine başladı.