

SERT ve YUMU AK KAPLAMALAR

Ferhat Bülbül*

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum

ÖZET

Geleneksel olarak, mekanik anlamda iyi tribolojik özelliklere ve yüksek sertliğe (>10GPa 1000HV) sahip yapılara sert kaplama denir. En yaygın kullanılan sert kaplamalar, oksitler, karbürler, nitritler, boritler, sermetler ve elmadır. Yumu ak kaplamalar ise, katı ya lama amacıyla kullanılmak üzere, bir ba layıcı malzeme içerisinde tozun karı tırılması suretiyle elde edilen ya da elektrokimyasal kaplama ve çe itli fiziksel buhar kaplama i lemleri ile üretilen dü ük sertliğe (<10GPa 1000HV) sahip kaplamalardır. Sert ve yumu ak kaplamalar, uygulama artlarına ba lı olarak, katı yüzeylerde dayanımı artırmanın yanı sıra, tribolojik, korozyon, elektriksel, ısıl vd. ve estetik özellikler bakımından da faydalar sa lamaktadır.

Anahtar kelimeler: Sert kaplama, yumu ak kaplama, sertlik, dayanım

HARD and SOFT COATINGS

ABSTRACT

Traditionally, hard coating is called to the structures having mechanically good tribological properties and high hardness (>10GPa 1000HV). The most common hard coatings are oxides, carbides, nitrides, cermets, borides and diamond. Soft coatings are low-hardness coatings (<10GPa 1000HV) which are obtained by powder mixing in a binder material produced or produced by using electrochemical and various physical vapor deposition processes, with the aim of using as solid lubricant. Hard and soft coatings also provide many benefits in terms of tribological, corrosion, electrical, thermal etc. and aesthetic properties, as well as they increase strength on solid surfaces depending on application conditions.

Keywords: Hard coating, soft coating, hardness, strength

2.G R

Çok eski antik ça lardan bu yana, insano lu çe itli aletler üzerine sert kaplama üretimi ve kullanımı tır. Bunlara ait ilk örnekler unlardır:

- M.Ö. (milattan önce) 900'lü yıllarda bir baltanın a zı karbürlenerek sertliğine 444 Brinell sertliğine çıkarılmış, M.Ö. 700'lü yıllarda ise bir keski (yontma aleti)'nin a zı karbürlenerek 300 Brinell sertliğine ula ılmıştır. Yapılan bu i lemler, bugün kullanılan karbürleme, nitritleme ve CVD (kimyasal buhar kaplama) i lemlerinin temellerini olu turmu tur.
- Mikro ve nanotabakalı yapıdaki kompozitlere ait ilk örnek ise, "Damascus (am)" kılıçları ve M.S. (milattan sonra) ilk bin yılın sonlarına do ru yapılan Roma ve Viking kılıçlarıdır. Bu kılıçlar, çok sıkı ekilde ayrı ayrı tabakalardan ibaret olan ve

* E-posta: ferhat.bulbul@atauni.edu.tr

dövülerek farklı yönlerde tabakala an yüksek karbonlu ve dü ük karbonlu çeliklerden olu uyordu. Sonuçta bu kılıçlardan yüksek dayanım ve tokluk elde edilmi tir.

Geleneksel olarak, sert kaplamalar terimi, mekanik anlamda iyi tribolojik özelliklere ve yüksek sertli e sahip yapılara kar ılık gelmektedir. Modern teknolojinin optik, optoelektronik ve di er alanlarda geli mesi ile birlikte, sert kaplama tanımı daha da geni bir kapsamda de erlendirilebilmektedir. Bu nedenle, belli bir ortamda tatmin edici bir ekilde etkinlik gösteren bir sistem, bu ortama göre “sert” olarak tanımlanabilir. Buna göre, sert malzemeler a a ıdaki gibi sınıflandırabilir [1].

- Tribolojik olarak sert (a ınmaya dirençli ve dü ük sürtünmeli),
- Optik olarak sert (lazer ve ı ı a kar ı duyarız),
- I ınıma kar ı sert (gama ı ınları, nötronlara ve beta parçacıkları gibi yüksek enerjili parçacıklara kar ı yüksek e ik enerjileri),
- Elektriksel olarak sert (yüksek bant geni li i ve yüksek elektron hızları).

Malzeme Mühendisli i'nde sert kaplama derken, mekanik anlamda sert kaplamalar anla ılır. Sert kaplamaların ço u, oksitler, karbürler, nitürler, seramik ala ımlar ve sermetler gibi seramik bile ikler ile elmas ve kübik bor nitürler gibi yarı kararlı (metastable) malzemelerdir. Sert kaplamaların özellikleri ve çevresel dirençleri, sahip oldukları kimyasal bile ime, oransal kimyasal bile im (stoichiometry)'e, safsızlıklara (empüritelere), mikroyapıya, kusurlara ve kristalografik olarak tercihli yönlenmeye ba lıdır [1]. öyle ki, sert kaplamalar sertliklerini, ya bizzat do al yapısından (kısa ba uzunlu u, kovalent ba yapısı ve yüksek kohezif enerji), ya ilave element ilavesinden (katılan elementlerin ara yer ya da yer alan ekinde katı çözültü olu turması), yüksek bası gerilmesi içeri inden (iyon bombardımanı gibi kaynaklarla kusur olu turma), ya süper kafes yapılardan (çok tabakalı kaplama yapıları) ya da küçük tane yapısından (Hall-Petch'e göre tane boyutunun küçülmesinin sertli e etkisi) alırlar. Elmas, elmas benzeri karbon (DLC), kübik bor nitür ve nanotabakalı yapıdaki kompozitler günümüzde “süper sert” malzeme olarak tanımlanmaktadır [1].

Mekanik anlamda sert kaplamalar, yüksek yükleme ve/veya yüksek sıcaklıklarda (1000°C) a ınmaya dayanım istenen uygulamalarda kullanılırlar. Örne in, kesici takımlarda, so uk ekillendirme takım aletlerinde, plastik enjeksiyon kalıplarında, toz sıkı tırma takım aletlerinde dayanıklı yüzeyler sa lamaktadırlar. Bu kaplamalar, genellikle termal püskürtme (termal spraying), fiziksel buhar kaplama (PVD) ve kimyasal buhar kaplama (CVD) yöntemleri ile üretilirler. Bu i lemler, bile im ve sertli i optimize ederek istenen performansı ve özellikleri elde etmede geni bir esneklik sa lar.

Sertlik, süneklik, elastisite modülü, gözeneklilik, kaplama-taban malzeme arasındaki adezyon gibi kaplamaların mekanik özellikleri, sürtünme ve a ınma performansı açısından çok önemlidir. Artık (iç) gerilmeler, kaplamanın bozunmasına, adezyonun kötüle mesine, taban malzemede çatlamaya ve kaplamanın fiziksel ve kimyasal özelliklerinde de i melere neden olabilir. Di er taraftan, bası artık gerilmeleri, kaplama sertli ini önemli derecede artırır ve çekmeye kar ı direnç sa lar. Bu nedenle, bası gerilmeleri belli dereceye kadar faydalı olabilmektedir. En iyi kaplama performansı için kaplama parametrelerinin optimize edilmesi gerekir [1]. Dolayısıyla kaplamanın sert ya da yumu ak olmasında uygulanan kaplama i lemi ve parametrelerinin önemi çok büyüktür. Örne in elektriksiz kaplama ile büyütülen bir kaplama ile iyon a ılama ile ya da geli tirilen melez (hibrit) kaplama sistemleri ile büyütülen aynı kaplama türü arasında sertlik açısından çok önemli sertlik farklılıkları olabilir. Ayrıca kaplamaların

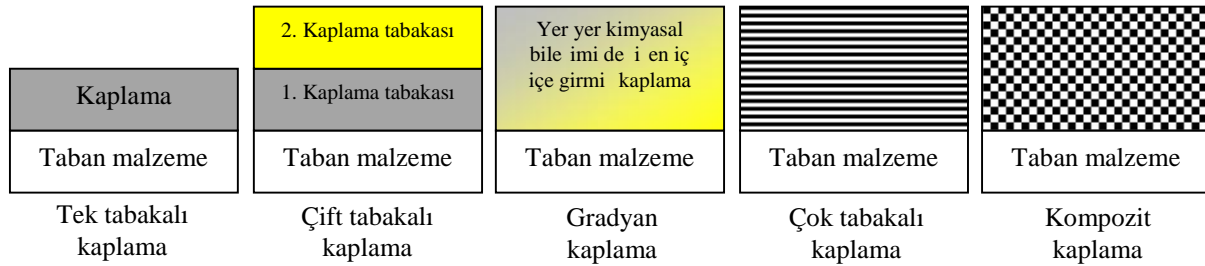
sertli inde üzeri kaplanan taban malzemenin kimyası ve sertli inin de önemi büyüktür. Donnet ve Erdemir [2] sert ve yumu ak kaplamaları Çizelge 1'deki gibi sınıflandırmı tır.

Çizelge 1. Sert ve yumu ak kaplamaların sınıflandırılması (Kaynak [2]'den adapte edilmi tir)

<i>Sert kaplamalar</i>	<i>Yumu ak kaplamalar</i>
✓ Karbürler (TiC, WC, CrC, B ₄ C ve SiC gibi)	✓ Yumu ak metalller (Ag, Pb, Au, In, Sn, Ni, Cu)
✓ Nitrürler (TiN, CrN, ZrN, c-BN gibi)	✓ Lamelli katılar (MoS ₂ , WS ₂ , Grafit, H ₃ BO ₃ , h-BN, GaS, GaSe)
✓ Oksitler (Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZnO, CdO, Cs ₂ O, PbO, Re ₂ O ₇ gibi)	✓ Polimerler (PTFE, PE, Polimit, Polimerik DLC)
✓ Boritler (TiB ₂ , ZrB ₂ gibi)	✓ Halojen sülfatlar, sülfürler (CaF ₂ , BaF ₂ , PbS, CaSO ₄ , BaSO ₄)
✓ Elmas ve DLC (elmas benzeri karbon) (a-C, ta-C, a-C:H, ta-C:H, CN _x , a-C:X (:H), (nc-elmas)	

*X: bir metal

Sanayide, uygulama artlarına ba lı olarak istenen amaca göre ekil 1'de görüldü ü gibi be farklı yapıda kaplamalar üretilmekte [3] farklı mekanik özellikler elde edilmektedir.



ekil 1. Sanayide istenen amaca göre üretilmekte olan kaplama yapıları [3]

2. SERT KAPLAMALAR

Sert kaplamalar, yapı itibariyle malzeme grubu olarak seramik malzeme olarak de erlendirilebilir. Zira bu kaplamalar, kimyasal bir formülle ifade edilebilen, kimyasal olarak soy ve mekanik olarak dirençli malzemelerdir. Bu malzemeler, genel olarak a a ıda özetlendi i üzere üç ekilde kar ımıza çıkmaktadırlar:

- Genel olarak demir elementinin sol tarafında bulunan *geçi metalleri ile atom yarıçapı 1 angstromdan daha dü ük olan karbon, azot, bor, oksijen gibi ametaller arasındaki* kovalent ba lanma neticesinde ortaya çıkan ve kimyasal formülü (Geçi Metali)_x(Ametal)_y olarak ifade edilebilen ileri teknoloji seramikleri,
- Atom yarıçapı 1 angstromdan daha dü ük olan karbon, azot, bor, oksijen gibi *ametallerin kendi aralarında* kovalent ba lanma neticesinde ortaya çıkan ve kimyasal

formülü (Ametal)_x(Ametal)_y olarak ifade edilebilen ileri teknoloji seramikleri (örne in bor ve karbonun kovalent ba lanma neticesinde ortaya çıkan (B₄C) borkarbürler veya karbon atomlarının kendi aralarında yaptıkları ba lanma neticesinde, farklı allotropik yapılarda görülen elmas, grafit veya bunların karı ımları ve hidrojen ve metal ilaveli olan seramikler),

- Genel olarak demir elementinin sol tarafında bulunan *geçi metalleri ile Si yarımetal* arasındaki kovalent ba lanma neticesinde ortaya çıkan ve kimyasal formülü (Geçi Metali)_x(Si)_y olarak ifade edilebilen silisitler.

2.1. Karbürler

Genellikle periyodik cetvelde demirin sol tarafında bulunan bazı geçi metalleri ile karbonun iyonik ve kovalent karakterde ba lanması ile olu an TiC, ZrC, HfC, Cr₃C₂, Mo₂C, WC, W₂C, VC, NbC ve TaC gibi çok yüksek sertlik de erlerine (10-25GPa) sahip seramik bile iklerdir. Çelik, demir dı ı metal ve semente edilmi karbürlerin a ınma ömrünü daha da yükseltmek için uygulanır. Daha çok iyon kaplama, sıratma ve CVD yöntemleriyle üretilmektedirler. TiC, en yaygın kullanılan seramik karbür kaplamadır. Ömürlerini artırmak için çelikler üzerine, rulmanlı yataklardaki rulmanlar üzerine, tokamak tipi nükleer füzyon reaktörlerinde cidar malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca ametalik karakterde olan bor ve karbonun yaptı ı kübik B₄C ve yarı metal silisyum ile karbonun arasında kovalent ba neticesinde ortaya çıkan SiC gibi malzemeler de bu gruba girmektedir. Borkorbür (B₄C), yüksek sertlik (3000HV), dü ük yo unluk (2,52g/cm³), yüksek ergime noktası (2500°C), yüksek elastik modülü (460GPa) ve yüksek a ınma direnci gösteren özel bir seramiktir. Genellikle hem personel zırhı, hem de araç zırhı olarak askeri ve savunma sanayinde kullanılan maliyeti yüksek olan hafif zırh malzemesidir. Ayrıca a ınmaya dirençli nozul malzemesi olarak tercih edilirken, bor atomlarının geni nötron absorplama kesit alanına sahip olması sebebiyle, nükleer teknolojisinde de kontrol ve koruyucu kalkan malzemesi olarak kullanılır. Borik asitle beraber sitrik asit veya PVA gibi ba langıç maddelerinin kullanıldı ı sol jel [4] ve CVD [5] gibi metotlarla kaplama yapılabilir. Çizelge 2’de karbürlerin bazı özellikleri verilmi tir.

Çizelge 2. Karbürlerin bazı özellikleri[†]

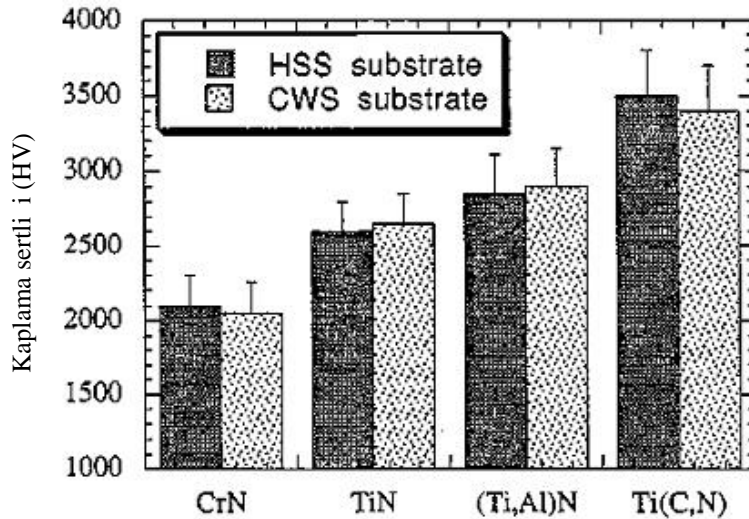
Özellik	C	HfC	TaC	NbC	ZrC	SiC	B ₄ C	TiC
Ergime sıcaklı ı, °C	3287*	3890	3880	3500	3540	3987	2347	3065
Kristal yapı	Hegzagonal	YMK	YMK	YMK	YMK	YMK	Rombohedral	YMK
Yo unluk, g/cm ³	2.25	12.70	14.50	7.79	6.59	3.21	2.52	4.94
Isıl genleme, ppm/°C	1.0	6.8	6.6	6.9	7.3	5.3	5.6	7.9
Isıl iletkenlik, W/m.K	150	22	22	30	20	120	30	50
Elektriksel iletkenlik, μ .cm	-	37-45	25	35	45-55	500x10 ⁶	1x10 ⁶	105
Sertlik, kg/mm ²	20	2300	2500	2400	2700	2600	2900	2900
Young modülü, GPa	-	350-510	285-560	338-580	350-440	440	460	450
Poisson oranı	-	0.18	0.24	0.21	0.191	0.21	0.17	0.19

*Süblimle ir

[†] “http://www.ultramet.com/images/refrac_carbides1.png”den uyarlanmı tir.

2.2. Nitrürler

Nitrürler çok geni bir bileşik ailesine sahiptir. Alkali veya toprak alkali metallerin azotla yaptığı Li_3N , Mg_3N_2 , Be_3N_2 , Ca_3N_2 , Sr_3N_2 ve Ba_3N_2 gibi bileşikler, ayrıca ametalik karakterde olan bor ve azotun yaptığı kübik bornitrür (c-BN) (sertliği yaklaşık 48GPa) ve yarı metal silisyum ile azotun arasında kovalent bağ neticesinde ortaya çıkan Si_3N_4 gibi çok yüksek aşınma direncine sahip malzemeler de özel nitrür yapıları içine girmektedir. Aynı zamanda, 900°C gibi yüksek sıcaklıklara kadar dayanabilen, yatak elemanlarında vd. birçok uygulamada katı yağlayıcı olarak kullanılan hegzagonal bor nitrür (h-BN) karımıza çıkmaktadır. Fakat öte yandan, sert kaplama olarak nitrürler denirken, geçiş metallerinin azotla yaptığı, genellikle aşınmaya dirençli ve yüksek sıcaklığa dayanıklı (refrakter) azot bileşiklerini akla gelmelidir. Bu malzemeler, periyodik cetvelde demirin sol tarafında bulunan bazı geçiş metalleri ile azotun iyonik ve kovalent karakterde bağlanması ile oluşan TiN, TiCN, TiAlN, CrN, ZrN, TiZrN, TiCrN ve HfN gibi seramik bileşiklerdir. TiN, parlak altın rengindedir. En çok PVD yöntemiyle üretilir. Kimyasal olarak son derece kararlı, korozyona direnci çok yüksek, düşük sürtünme ve aşınma sergileyen kaplamalardır. Kesme takımlarında, kayma ve yatak elemanlarında ve dekoratif amaçlı kullanılmaktadır. TiCN, düşük sürtünme sergiler, yüksek hız uygulamalarında TiN'den yüksek gerilmeli abrazyona daha dayanıklıdır. TiAlN, TiCN'e benzer özellikler gösterir, yalnız yüksek sıcaklığa (800°C) daha dayanıklıdır. CrN, çok tok ve korozyona dirençli kaplamadır. ZrN, biyouygunluktan ve iyi korozyon direncinden dolayı tıbbi/cerrahi aletlerde kullanılır. TiCrN, TiAlN'e benzer özellikler gösterir, yalnız aynı çalınma şartlarında daha iyi etkinlik gösterir. Şekil 2'de yüksek hız takım çeliği ve düşük hız takım çeliği üzerine PVD yöntemi ile üretilen ticari nitrür kaplamaların sertlikleri karşılaştırılmıştır [6,7].



Şekil 2. Yüksek hız takım çeliği (HSS) ve düşük hız takım çeliği (CWS) üzerine PVD yöntemi ile üretilen ticari nitrür kaplamaların sertlikleri [6,7].

2.3. Oksitler

Periyodik cetvelde demirin sol tarafında bulunan bazı geçi metallerin, alüminyumun ve silisyumun oksijen ile iyonik ve kovalent karakterde bağlanması sonucu oluşan Al_2O_3 , TiO_2 , HfO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , Cr_2O_3 , ZrO_2 ve SiO_2 gibi yüksek sertlik (750-2100 HV), yüksek ergime sıcaklığı, korozyon ve abrazyon direncine sahip seramik malzemelerdir. Oksit kaplamalar, kimyasal ve elektrokimyasal, termal püskürtme, PVD ve CVD gibi birçok teknikle üretilmektedir. Metal, seramik ve sermetler üzerine uygulanmaktadır. Alümina (Al_2O_3) kaplamalar, anotlama, plazma püskürtme, buharla tırma, sıçratma ve CVD teknikleri ile üretilirler. TiO_2 (titanya) kaplamalar, geniş bant aralığına sahip bir yarıiletken malzeme olup, fotokatalitik, suyu sevmeyen (hidrofobik), antibakteriyel, kendi kendini temizleme özellikleri ile de son zamanlarda ilgi odağı olmuştur. Plazma ile püskürtme yöntemi kullanılarak üretilen alümina ve alümina-titanya kaplamalar, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilen birçok alanın uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıçratma yöntemi ile büyütülen kaplamalar, aşınmaya direnç ve (elektriksel olarak) yalıtkan malzeme olarak kullanılmakta; CVD kaplamaları ise sement edilmiş karbür takımlar üzerine TiN ve TiC kaplamak suretiyle çok tabakalı kaplamalar olarak kullanılırlar. Kromya kaplamalar, plazma püskürtme ve RF sıçratma ile oksidasyon ve aşınmaya direnç için kaplanırlar. Plazma püskürtme yöntemi ile üretilen Cr_2O_3 (kromya) kaplamalar, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda aşınma uygulamaları için; sıçratma ile büyütülenleri ise oda sıcaklığı ile $650^{\circ}C$ arasında yalıtım malzemesi olarak yatak elemanlarında kullanılırlar. ZrO_2 (zirkonya) kaplamalar, genellikle plazma püskürtme ve sıçratma teknikleri ile üretilirler. Bu kaplamalar, sert, yüksek sıcaklıklara, çizilmeye ve korozyona dirençli kaplamalar olarak kullanılmaktadır. Plazma püskürtme yöntemi ile üretilenler, uçakların içten yanmalı motorlarının yanma odalarında ısı engelleyici (termal bariyer) olarak; yakıt akülerinde sensör olarak kullanılırlar. SiO_2 (silika) kaplamalar, effaf, antirefle ve suyu sevmeyen (hidrofobik) yüzeyler elde etmek için uygulanmaktadır. Sıçratma yöntemi ile büyütülenleri, yarı iletken uygulamalarında manyetik depolama cihazlarında kullanılırlar [8,9]. Yukarıda bahsedilen oksitlerin yanı sıra, yine farklı maksatlarla, Sb_2O_3 , BaO, CaO, In_2O_3 , ITO (indium tin oxide), ZnO, CuO, CdO, SrO, MgO vd. gibi oksit kaplamalar da üretilmektedir.

2.4. Boritler

Genellikle periyodik cetvelde demirin sol tarafında bulunan bazı geçi metalleri ile borun iyonik ve kovalent karakterde bağlanması ile oluşan TiB_2 , ZrB_2 , W_2B , NbB_2 , VB_2 , HfB_2 , CrB_2 , Mo_2B_5 ve TaB_2 gibi yüksek sertlik, yüksek ergime sıcaklığı, korozyon ve abrazyon direncine sahip malzemelerdir. TiB_2 di er karbür ve silisit kaplamalara göre daha düşük sürtünme katsayıları sergiler ($\mu=0,2$). TiB_2 kaplamaların sertlik değerleri 2200 ile 5240 HV arasında değişmektedir. Ayrıca geçi elementlerinin bor ile yaptığı boritlerin yanı sıra, farklı amaçlar için CeB_6 , ErB_4 , LaB_6 , GdB_6 , AlB_2 , SiB_2 , MgB_2 ve Pd_3B vd. olarak, özel borit kaplamalar olarak üretilmektedir.

2.5. Elmas ve DLC (elmas benzeri karbon)

Karbonun bir allotropu olan elmasta, her karbon atomu kendisini çevreleyen dört karbon atomuyla düzgün dörtyüzlü (tetrahedral) meydana getirecek şekilde kovalent

ba lanır. Dört yüzlü karbon-karbon ba ları, çok yüksek sertlik (70-100GPa), kimyasal duyarsızlık (inertlik), yüksek elektriksel direnç (geni bant geni li i olan yarı iletken), yüksek yalıtkanlık (dielektrik) sabiti, yüksek ısı iletkenlik, yüksek yo unluk ve optik saydamlık sa lar. Do anın en sert malzemesi olarak bilinir. DLC (elmas benzeri kaplamalar) ise, çok kısa aralıklarla sıralanmı elmas (sp^3 tipi dörtyüzlü-tetrahedral ba lar ile tanımlanmı) ile grafitik fazlarının (sp^2 tipi üç kö eli-trigonal ba lar ile tanımlanmı) birlikte oldu u amorf bir yapıyı temsil eder. çerisinde elmas miktarı arttıkça sertli i, grafit miktarı arttıkça da katı ya lama özellikleri iyile ir. DLC kaplamaların yapısı ve özellikleri, uygulanan kaplama i leminin türüne ve kaplama parametrelerine ba lıdır. Zira kaplama sürecine ba lı olarak sp^2/sp^3 oranı, kimyasal bile im ve kristalografik yönelme ortaya çıkacaktır. Son yıllarda, DLC kaplamaların özelliklerini daha da iyile tirmek için, bu kaplamaların içerisine hidrojen, silisyum, azot ve Ti, Nb vb. ba ka element atomları ilave edilmektedir.

2.6. Silisitler

Periyodik cetvelde demirin sol tarafında bulunan bazı geçi metalleri ile silisyumun kovalent ba lanması sonucunda ortaya çıkan, $MoSi_2$, $TiSi_2$, Cr_3Si_2 , WSi_2 ve $TaSi_2$ gibi yüksek korozyon direnci ve iyi sürtünme ve a nma özellikleri sergileyen malzemelerdir. Daha çok sıçratma tekni i ve kristal büyütme (epitaksi) ile üretilmektedirler. Özellikle yarı iletken teknolojisinde (100) Si düzlemi üzerine kristal büyütme yapılmaktadır.

Sert kaplamaların bünyelerinde bulunan iç gerilmeler nedeniyle kırılma riski ve uygulandıkları taban malzemeye iyi bir ekilde yapı amama gibi bir takım problemler ortaya koymaktadır. Bu yüzden bu etkenler, sert kaplamaların kullanımlarını sınırlayıcı bir rol oynamaktadır. Bu problemleri ortadan kaldırmak ya da asgari düzeye indirmek amacıyla son yıllarda bilim insanları a a ıda listelendi i gibi yeni arayılara yönelmi ve daha tok ve daha iyi adezyona sahip kaplama yapıları elde etmeyi ba armı lardır.

- Yeni kaplama yöntemleri geli tirme [10-13]
- Mevcut yöntemleri modifiye etme [14,15]
- Kaplama parametrelerini optimize etme [15-17]
- Ba ka element veya bile ik yapıları kaplama yapısına sokarak kompozit malzeme üretme [18]
- Çok tabakalı kaplama üretme (Me-DLC [15]; WC/DLC [19]; (Ti, Cr)CN/DLC [20]; TiN-DLC, Ti/C-DLC ve Ti-C:H/TiCN/TiN [21]; MoS_2 :C:TiB₂ [22]; TiB₂-MoS₂ [23]; Ti-B-N [24,25]; Ti-B-C [26]
- Geçili (Gradyan) kaplamalar üretme (N/Ti(N,C)/DLC [27]; Ti/a-CH(Ti)) [28]

3. YUMU AK KAPLAMALAR

Yumu ak kaplamalar, katı ya lama amacıyla kullanılmak üzere, bir ba layıcı malzeme içerisnde tozun karı tırılması suretiyle elde edilen ya da elektrokimyasal kaplama ve çe itli fiziksel buhar kaplama i lemleri ile üretilen kaplamalardır. Reçine ile ba lanmı olanları, birçok sanayi uygulamasında katı ya layıcı olarak yaygın kullanıma sahiptir.

3.1. Yumu ak metaller

Yumu ak metaller, Ag, Au, Pb, Al ve Cu gibi YMK yapıda ve tetragonal kristal yapıdaki Sn ve In gibi geçi ve iç geçi metallere aittir. Bu metaller yumu ak kaplama olarak, elektrokaplama ve çe itli fiziksel buhar kaplama i lemleri ile üretilebilmektedir. Bu kaplamalar, çok özel artlar altında (örne in uzay artlarında) kullanılabilir. Pb-Sn-Cu, çelik üzerinde bir kaplama olarak yıllardır bir ya layıcı olarak kullanılmaktadır. Au ve Ag kaplamalar ise, katı ya layıcı olarak uzay kapsüllerinde, yüksek performanslı jet motorlarında ve hafif yüklerde çalı an yüksek hızlı makinelerde kullanılmaktadır.

3.2. Lamelli katılar ve Polimerler

Günümüzde PVD (fiziksel buhar kaplama) yöntemleri ile üretilen MoS₂ ve grafit kaplamalar, yumu ak kaplama olarak katı ya lama açısından önemli bir kullanım alanı bulmu tur ve bu kaplamaların en iyi tribolojik özellikler sergilemesi için çalı malar devam etmektedir. Molibdensülfür, grafit ve polimerler (PTFE) gibi kendinden ya layıcı katılar, dı ardan bir ya layıcı temininin olmadığı durumlarda dü ük sürtünme ve/veya a nma sergilerler. MoS₂, grafitininkinin aksine, nemsiz ve/veya vakum olmayan ortamlarda istenen performansı göstermektedir. MoS₂ genellikle normal artlarda grafitten daha dü ük sürtünme sergilemektedir. Grafitin etkin bir ya layıcı olarak görev yapması için nemli ortamlarda bulunması gerekir. Akı kan ya layıcıların aksine, gaz çıkarımının az olması vakum ortamında kullanımını çekici hale getirmi , bu nedenle uzay çalı malarında en çok kullanılan lamelli katı ya layıcı bir bile iktir. PTFE ise yumu ak organik bir polimer malzeme olup dü ük yükleme ve dü ük sıcaklıklarda kullanıma uygundur [8]. 1940'larda katı ya layıcı olarak kullanıma ba layan MoS₂, günümüzde di er katı ya layıcılara göre daha fazla kullanım alanı bulmu tur [29]. MoS₂, en çok uzay çalı malarında kullanılan lamelli katı ya layıcı bir bile ik olup, hava sensor yatakları, çapraz mafsallı (gimbal) yataklar gibi birçok alanda da kullanılmaktadır. Akı kan ya layıcıların aksine, gaz çıkarımının az olması vakum ortamında kullanımını çekici hale getirmi tir. MoS₂ son derece yöne ba ımlı (anisotropic) bir kristal yapıya sahiptir. MoS₂ birimleri, yapı içerisinde üçgensel (trigonal) sandviç eklindedir. Sandviçler arasındaki etkile im zayıf Van der Waals ba ları ile olur. te bu zayıf etkile im kolay kayma ve dü ük sürtünme katsayısı anlamına gelir.

MoS₂, grafit ve PTFE gibi katı tozlar, polimerler ile ba lanıp, püskürtme (spraying), daldırma (dipping) ya da sıvama (burnishing) gibi i lemlerle temiz yüzeylere uygulanmaktadır. Bu kaplamaların kalınlı ı, 1-50 µm de erleri arasında de i mektedir. Hava ile kurutulmuş katı ya layıcılarda kullanılan ba layıcılar, selüloz ve akrilik gibi termoplastik polimerler ile alkid, fenolik, epoksi, silikon ve polimidler gibi termoset plastiklerdir. Genellikle ba lanmı katı ya layıcı kaplamalar, 200°C'ye kadar kararlı olmalarına ra men, polimidler 300°C'ye kadar dayanabilmektedir.

Ticari olarak birçok polimer kaplama mevcuttur. Bu kaplamalar, PTFE, polifenilin sülfid, poliamid-imid ve/veya organik bir reçine ba layıcı ve çözücü içerisindeki polimid kar ımıdır. Bu kaplamalar, sıvı halde satın alınmakta ve püskürtme, fırınlama ve sıvama i lemlerine tabi tutularak 7.5-50 µm kalınlıklarında elde edilebilmektedir. Genellikle 200°C'ye kadar çalı ma sıcaklıklarında kullanılabilirler. Organik reçine ba layıcılardan bir kaçı ise (örne in polikuinoksilin, polibenzimidazol ve polimidler), kimyasal olarak kararlı olup ve 300°C'nin üzerinde cam geçi sıcaklı ına

sahiptir. Bunlardan polimidler, u ana kadar en kolay bulunabileni ve kendili inden ya layıcı vernik ve inorganik katı ya layıcılar için de reçine olarak kullanılmaktadır. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) ise, beyaz rengi ile alüminaya, yapısal yönden grafitte benzeyen, zehirsiz ve katı ya layıcı bir malzemedir. Seramik malzemeler içinde en dü ük yo unluklu ($2,27 \text{ g/cm}^3$) malzemeler arasındadır. Havada 1000°C 'ye, soy atmosferde ise 3000°C 'ye kadar dayanabilen ve termal ok direnci yüksek bir yapıya sahiptir. Elektriksel olarak yalıtkan, ısıl olarak iletkenidir. Mor ötesi ı ı ı yansıtabilir. Namlu, mühimmat, mekanizma vb. uygulamalarda katı ya layıcı kaplama olarak kullanılmaktadır.

3.3. Halojen sülfatlar, sülfürler

CaF_2 - BaF_2 , CaF_2 ve PbO-SiO_2 'nin seramik ba layıcılı ve plazma-püskürtme ile üretilen kaplamaları, yumu ama sıcaklıklarının üzerinde akı özellikleri göstermekte ve yüksek sıcaklıkta katı ya lama amaçlı kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, yumu ak, kazıma özelli i olmayan (nonabrasive) ve güçlü asitler içerisinde ve indirgeyici ortamlarda kimyasal olarak soyduurlar. Bazı CaF_2 - BaF_2 ve CaF_2 kaplamalar ise, havada sırasıyla 650 ve 900°C 'ye kadar etkili ya lama özelli i gösterirler.

Yumu ak kaplamalar da, içerisinde ala ım elementleri katılmak suretiyle kompozit yapılarak dayanıklı hale getirilmekte, mekanik ve tribolojik özellikleri iyile tirilmektedir.

4. KAYNAKLAR

- [1] Bunshah R.F., (2001), *Handbook of hard coatings, Deposition Technologies, Properties and Applications*, University of California, Los Angeles Los Angeles, California, Noyes publications.
- [2] Donnet C., Erdemir A., (2004), *Tribology Letters*, 17, p. 389-397.
- [3] Panjan P, ekada M., *Ljubljana*, (2005), p. 79-111.
- [4] Guojian J., Jiayue X., (2009), *Journal of Nuclear Materials*, 393, p. 481-479.
- [5] Zeng B., Feng Z., (2009), *Ceramics International*, 35(1), p. 1877-1882.
- [6] Hedenqvist P, (1997), *Surface and Coatings Technology*, 97, 212-217
- [7] Paskvale S., (2007), *Properties of PVD hard coatings*, p.6, University of Ljubljana.
- [8] Bhushan S., Gupta K.B., (1991), *Handbook of Tribology: materials, coatings and surface treatments*, USA, 1140.
- [9] Budinski K.G., (1988), *Surface Engineering for Wear Resistance*, New Jersey.
- [10] Baba K., Hatada R., (2002), *Surface and Coatings Technology*, 158-159, p. 373-376.
- [11] Baba K., Hatada R., (2003), *Surface and Coatings Technology*, 169-170, p. 287-290.
- [12] Michler T., Grischke M., Traus I., Bewilogua K., Dimigen H., (1998), *Diamond and Related Materials*, 7, p. 459-462.
- [13] Wang D-Y., Chang C-L., Ho, W-Y., (1999), *Thin Solid Films*, 355-356, p. 246-251.
- [14] Zambrano G., Riascos H., Prieto P., Restrepo E., Devia A., Rincon C., (2003), *Surface and Coatings Technology*, 172, p. 144-149.

- [15] Bewilogua K., Wittorf R., Thomsen H., Weber M., (2004), *Thin Solid Films*, 447-448, p. 142-147.
- [16] Logothetidis S., Gioti M., Lioutas CH., (1998), *Carbon*, 36, 5-6, p. 539-543.
- [17] Kunc F., Musil J., Mayrhofer P.H., Mitterer C., (2003), *Surface and Coatings Technology*, 174-175, p. 744-753.
- [18] Wang D-Y., Chang Y-Y., Chang C-L., Huang Y-W., (2005), *Surface and Coatings Technology*, 200, p. 2175-2180.
- [19] Rincon C., Zambrano G., Carvajal A., Prieto P., Galindo H., Martinez E., Lousa A., Esteve J., (2001), *Surface and Coatings Technology*, 148, p. 277-283.
- [20] Zhang S., Fu, Y., Du, H., Zeng, X.T., Liu, Y.C., (2002), *Surface and Coatings Technology*, 162, p. 42-48.
- [21] Chang Y., Wang D., Chang C., Wu W., (2004), *Surface and Coatings Technology*, 184, p. 349-355.
- [22] Steinmann M., Muller A., Meerkamm H., (2004), *Tribology International*, 37, p. 879-885.
- [23] Gilmore R., Baker M.A., Gibson P.N., Gissler W., (1998), *Surface and Coatings Technology*, 105, p. 45-50.
- [24] Mayrhofer P.H., Willmann H., Mitterer C., (2003), *Thin Solid Films*, 440, p. 174-179.
- [25] Garcia-Luis A., Brizuela M., Onate J.I., Sanchez-Lopez J.C., Martinez-Martinez D., Lopez-Cartez C., Fernandez A., (2005), *Surface and Coatings Technology*, 200,1-4, p. 734-738.
- [26] Prakash B., Richter E., Pattyn H., Celis J.P., (2003), *Surface and Coatings Technology*, 173, p. 150-160.
- [27] Ma F., Li G., Li H., Mab H., Cai X., (2002), *Materials Letters*, 57, p. 82-86.
- [28] Donnet C., Fontaine J., Mogne T.L., Belin M., He'au C., Terrat J.P., Vaux F., Pont G., (1999), *Surface and Coatings Technology*, 120-121, p. 548-554.
- [29] Miyoshi K., (1998), *Solid Lubricant Fundamentals and Applications: Characterization of Solid Surfaces*, NASA/TM, 80, Cleveland, Ohio.