

SAVUNMA SANAYİSİNDE KULLANILAN KAPLAMA SİSTEMLERİ

Savunma sanayisinde kaplama sistemleri; askeri standartlar ve NATO kriterleri doğrultusunda sistem güvenilirliği, operasyonel süreklilik ve servis ömrü üzerinde doğrudan belirleyici rol oynamaktadır. Geleneksel metalik ve dönüşüm kaplamalardan PVD, CVD ve kendi kendini iyileştiren nanoteknolojik sistemlere uzanan bu teknolojiler; yüksek sıcaklık, korozyon ve aşınma direncini çevresel mevzuat uyumuyla birleştiren stratejik mühendislik unsurlarıdır.

KARAKAYA86 ARGE EKİBİ:

*Fatih Karakaya,
Meltem Çalikoğlu,
Esmanur Döngül,
Rabia Aydemir,
Enes Aysan*

Savunma sanayisinde kaplama sistemlerinin seçimi, yalnızca yüzey koruma amacıyla sınırlı olmayıp; askeri standartlar (MIL-STD, MIL-DTL) ve NATO tarafından belirlenen STANAG kriterleri doğrultusunda sistem güvenilirliği, operasyonel süreklilik ve servis ömrü üzerinde doğrudan belirleyici rol oynayacak şekilde gerçekleştirilmektedir. Kara, deniz ve hava platformlarında görev yapan bileşenler, yüksek mekanik yükler, sıcaklık ve basınç değişimleri, sürtünme, nem, tuzlu su ve kimyasal etkilere maruz kalmaktadır. Bu koşullar, aşınma, oksidasyon, çatlak oluşumu ve pitting korozyonu gibi çeşitli hasar mekanizmalarının ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Bu nedenle kaplama seçimi; sertlik, sürtünme katsayısı, korozyon direnci ve termal stabilite gibi performans kriterleri dikkate alınarak yapılmaktadır.

Savunma sanayisinde yaygın olarak kullanılan kaplama sistemleri arasında metalik kaplamalar, dönüşüm kaplamaları, seramik ve yüksek performanslı kaplamalar, polimer esaslı sistemler ve özel amaçlı fonksiyonel kaplamalar bulunmaktadır. Sert krom kaplamalar yüksek aşınma direnci sağlarken, PVD (Physical Vapor Deposition) ve DLC (Diamond-Like Carbon) kaplamalar düşük sürtünme ve yüksek yüzey sertliği sunarak hareketli parçalarda performans kaybını minimize etmektedir. Seramik ve termal bariyer kaplamalar, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilirken; radar soğurucu ve IR bastırıcı kaplamalar hem koruyucu hem de taktiksel avantaj sağlamaktadır.

1. Metalik Kaplamalar

- Çinko ve Çinko Alaşımları
- Nikel ((Elektrolitik / Kimyasal Nikel) Kaplama
- Krom Kaplama
- Kadmiyum Kaplama
- Alüminyum Kaplama



2. Dönüşüm Kaplamaları

- Fosfat Kaplama (Zn, Mn Fosfat)
- Kromat / Pasivasyon
- Anodizasyon (Alüminyum)

3. Seramik ve Yüksek Performans Kaplamalar

- Termal Bariyer Kaplamalar (TBC)
- PVD / CVD Kaplamalar
- DLC (Diamond Like Carbon)



4. Polimer ve Organik Kaplamalar

- Epoksi/Poliüreten Boyalar
- CARC (Chemical Agent Resistant Coating)
- IR Bastırıcı Kaplamalar

5. Özel Amaçlı Kaplamalar

- Radar Soğutucu Kaplamalar
- Silan / Sol-Gel Kaplamalar

Literatürdeki güncel eğilimler, nanoteknolojik kaplamalar, elektromanyetik dalga emici (stealth) sistemler, plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) ve kendini iyileştiren kaplama yapıları üzerinde yoğunlaşmaktadır. Özellikle nano ölçekli kaplamalar, geliştirilmiş korozyon ve aşınma direnci sunarken; karbon bazlı nanomalzemeler radar görünürliğünün azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Bununla birlikte çevresel yaşlanma koşulları ve üretim maliyetleri hâlen araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Öte yandan, altı değerlikli krom içeren geleneksel kaplamalar üstün performans sağlasa da toksik etkileri nedeniyle kullanım alanları sınırlandırılmıştır.

Avrupa Birliği kapsamında yürürlüğe giren REACH Regulation düzenlemeleri, savunma sanayisinde çevre dostu ve sürdürülebilir kaplama teknolojilerine yönelimi hızlandırmıştır. Bu bağlamda, kaplama sistemleri yüksek performans gereklilikleri ile çevresel mevzuat uyumunun birlikte değerlendirildiği stratejik mühendislik unsurları hâline gelmiştir.

Yeni Teknoloji Kaplamalar

PVD (Physical Vapor Deposition) Kaplamalar

PVD kaplamalar, vakum altında hedef malzemenin fiziksel olarak buharlaştırılması ve altlık yüzeye depo edilmesi ile elde edilir. Bu yöntem, özellikle yüksek sertlik ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Titanyum nitrür (TiN) kaplamalar, yaklaşık 2000 HV sertlik değerine sahip olup, altın renkli ve dekoratif özelliklerinin yanı sıra kesici takımlar ve medikal aletlerde aşınma direncini artırmak için kullanılır. Titanyum karbür nitrür (TiCN) kaplamalar, TiN'den daha yüksek sertlik ve daha düşük sürtünme katsayısı ile kalıplılık ve yüksek aşınma gerektiren uygulamalarda öne çıkar. Titanyum alüminyum nitrür (TiAlN) kaplamalar ise yüksek sıcaklık dayanımı ile karakterizedir ve özellikle 800-900°C'ye kadar oksidasyon direnci gerektiren kesici takımlar ve savunma sanayii parçalarında kullanılır. Krom nitrür (CrN) kaplamalar, korozyon direnci yüksek ve Cr⁶⁺ içermeyen çevreci alternatifler olarak otomotiv, deniz ve savunma uygulamalarında yaygındır. Son olarak, elmas benzeri karbon (DLC - Diamond-Like Carbon) kaplamalar, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direnci ile mekanik hareketli sistemlerde, özellikle silah mekanizmalarında tercih edilir.

Çalışma Prensipleri: PVD süreci üç ana aşamadan oluşur: malzemenin buharlaştırılması, atomların vakum ortamında taşınması ve altlık yüzeyinde yoğunlaşarak ince film tabakasının oluşması. Vakum basıncı genellikle 10⁻³ - 10⁻⁶ mbar aralığındadır.





PVD Yöntemleri:

Ark Buharlaştırma (Arc PVD): Yüksek akımlı ark ile hedef malzeme buharlaştırılır; yoğun ve sert kaplamalar elde edilir, ancak mikrodamlı oluşumu dezavantajdır.

Magnetron Sputtering: Manyetik alan ile plazma oluşturulur; daha homojen kaplamalar sağlanır.

Elektron Demeti (E-beam): Elektron demeti ile hedef lokal olarak ısıtılır; yüksek saflıkta kaplamalar üretilebilir.

Kaplama Türleri ve Kullanım Alanları:

TiN (Titanium Nitrür): Yüksek sertlik; kesici takımlar.

TiCN (Titanium Karbonitrür): Artırılmış aşınma direnci; kalıp ve takım uygulamaları.

TiAlN (Titanium Alüminyum Nitrür): Yüksek sıcaklık dayanımı; savunma ve havacılık parçaları.

CrN (Krom Nitrür): Yüksek korozyon direnci; çevreci alternatif.

DLC (Diamond-Like Carbon): Düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci; silah mekanizmaları ve hareketli parçalar için ideal.

Avantajları: Yüksek sertlik, düşük sürtünme, ince ve homojen kaplama, çevre dostu olması.

Dezavantajları: Yüksek ekipman maliyeti, karmaşık geometrilere zor uygulama, yüksek vakum gereksinimi, kalın kaplama üretiminde sınırlama.

Savunma sanayinde PVD kaplamalar, silah namluları, mekanik sürtünmeli parçalar, havacılık bağlantı elemanları, IR iz azaltıcı ve radar görünürlüğünü düşürücü yüzeylerde kritik rol oynamaktadır.

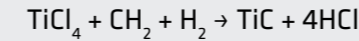
CVD (Chemical Vapor Deposition) Kaplamalar

CVD kaplamalar, gaz fazındaki reaktiflerin altlık yüzeyinde kimyasal reaksiyona girerek katı film oluşturması ile elde edilir. Genellikle PVD'ye göre daha kalın (5-20 µm) ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı kaplamalar üretir. Titanium karbür (TiC) kaplamalar, yüksek sertlik ve aşınma direnci ile kesici takımlar ve kalıp uygulamalarında öne çıkar. Silikon karbür (SiC) kaplamalar, yüksek sıcaklık ve termal direnç gerektiren türbin kanatları ve savunma uygulamaları için uygundur. Alümina

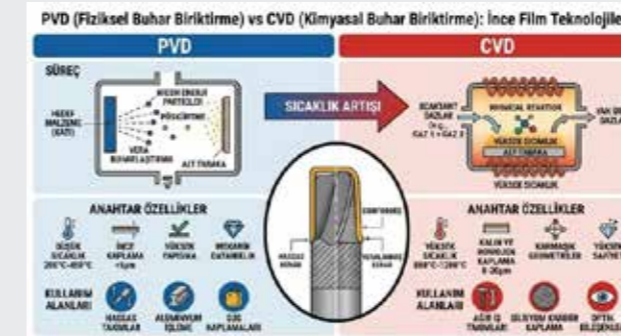
(Al₂O₃) kaplamalar, yüksek sıcaklık bariyeri ve elektriksel yalıtkan özellikleri ile türbin parçaları ve radar kubbelerinde (radome) kullanılır. CVD yöntemi ile üretilen TiN kaplamalar, PVD'ye benzer özellikler sergilese de, daha kalın film yapısı ve yüksek yapışma özellikleri ile avantaj sağlar. Ayrıca PECVD ile düşük sıcaklıkta üretilen DLC kaplamalar, hassas mekanik parçalar için sürtünmeyi azaltan çözümler sunar.

Çalışma Mekanizması: Reaktif gazlar reaktöre verilir, altlık yüzeyine taşınır, yüzeyde kimyasal reaksiyon ile katı film oluşur ve yan ürün gazlar uzaklaştırılır.

Örnek reaksiyon:



CVD Türleri: Termal CVD, LPCVD (Low Pressure CVD), PECVD (Plasma Enhanced CVD), MOCVD (Metal Organic CVD).



Üretilen Kaplamalar ve Kullanım Alanları:

TiC: Yüksek sertlik; kesici takımlar.

TiN: Aşınma direnci; kalıp sektörü.

Al₂O₃: Isı bariyeri; türbin parçaları.

SiC: Yüksek sıcaklık dayanımı; havacılık.

DLC (PECVD): Düşük sürtünme; mekanik sistemler.

Avantajları: Kalın ve yoğun kaplama, üstün yapışma, yüksek sıcaklık performansı, karmaşık geometrilere uyum.

Dezavantajları: Yüksek işlem sıcaklığı, altlık deformasyonu riski, korozif gaz kullanımı, yüksek enerji tüketimi.

Savunma Sanayinde Kullanımı: CVD kaplamalar, türbin kanatları, balistik koruma sistemleri, yüksek sıcaklık valf parçaları, füze sistemleri ve radar kubbe (radome) kaplamalarında tercih edilmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık ve aşırı aşınma koşullarına maruz kalan sistemlerde kritik öneme sahiptir.

CVD ve PVD Karşılaştırması: CVD daha yüksek sıcaklık ve kaplama kalınlığı sağlar, karmaşık geometrilere daha iyi nüfuz eder ve yapışma dayanımı üstündür. PVD ise daha düşük sıcaklıkta çalışır, çevresel riskler açısından daha temizdir ve ince homojen kaplama üretiminde avantajlıdır.

Su Bazlı ve Düşük VOC Boyalar: Savunma Sanayinde Yeni Teknoloji

Geleneksel olarak endüstride kullanılan solvent bazlı boyalar, yüksek miktarda uçucu organik bileşik (VOC) içeriyor ve bu durum hem insan sağlığı hem de çevre açısından risk oluşturuyor. Bu yüzden, özellikle savunma ve havacılık sektöründe, daha çevreci ve güvenli alternatiflere ihtiyaç vardı. İşte bu noktada su bazlı ve düşük VOC içerikli boyalar ön plana çıkıyor.

Su bazlı boyaların temel farkı, çözücü olarak suyun kullanılması ve organik solventlerin minimum seviyede tutulmasıdır.

VOC seviyesinin düşük olması hem işçi sağlığını koruyor hem de çevresel regülasyonlara uyumu kolaylaştırıyor. Bu sistemlerde genellikle akrilik, epoksi veya poliüretan reçineler kullanılıyor ve bu sayede hem mekanik dayanım hem de korozyon direnci sağlanabiliyor.

Teknik olarak su bazlı boyalar hızlı kuruma ve düşük sıcaklıklarda uygulanabilirlik avantajı sunuyor. Katı madde içerikleri %35-55 arasında değişiyor ve ASTM veya ISO standartlarına göre yüksek yapışma değerleri elde edilebiliyor.

Ancak, yüksek sıcaklık dayanımı ve aşınma performansı hâlâ solvent bazlı boyalar kadar yüksek değil. Bu yüzden savunma sanayinde çoğunlukla hibrit sistemler kullanılıyor. Örneğin, yüzey ön işlemi olarak fosfatlama yapılmış bir metal altlık üzerine su bazlı astar uygulanıyor, ardından PVD veya CVD kaplama ile aşınma ve sürtünme direnci artırılıyor.

Bu boyalar savunma alanında özellikle zırhlı araç gövdeleri, helikopter ve insansız hava aracı gövdeleri, deniz platformları ve radar kubbelerinde kullanılıyor. Mekanik hareketli parçalar için de düşük sürtünme ve aşınma direnci gereksinimi varsa, su bazlı üst katmanlar DLC veya PVD kaplamalarla destekleniyor.

Özetle, su bazlı ve düşük VOC içerikli boyalar çevresel ve sağlık açısından büyük avantaj sağlıyor. Yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımı açısından hâlâ bazı sınırlamaları var ama hibrit sistemlerle bu sorunlar aşılabiliyor. Bu nedenle, savunma sanayinde yeni ve yenilikçi bir teknoloji olarak değerlendiriliyor.

Kendini İyileştiren Kaplamalar: Mekanizmalar, Teknolojiler ve Uygulamalar

Kendini iyileştiren kaplamalar, yüzeyde çatlama veya hasar oluştuğunda kendi kendine onarılabilen kaplama sistemleri. Bu sayede hem korozyon hem de aşınma direnci korunuyor. Özellikle savunma, havacılık ve otomotiv gibi yüksek performans gerektiren alanlarda bu tip kaplamalar son yıllarda ciddi şekilde ilgi görüyor.

Temelde bu kaplamalar farklı mekanizmalarla çalışıyor. Birincisi, mikrokapsül yöntemi; kaplamanın içinde küçük kapsüller oluyor ve yüzeyde çatlak oluştuğunda açılarak içindeki onarıcı madde çatlakla dolduruyor. İkincisi, polimer zincirlerinin kendi kendini yeniden bağlaması; örneğin sıcaklık veya kimyasal tetikleme ile mikro çatlaklar kapanıyor. Bir de metal veya seramik tabanlı hibrit sistemler var; nano veya mikro partiküller, hasarlı bölgede yeni bir oksit tabakası oluşturarak yüzeyi koruyor.

Kullanılan malzemeler açısından da farklı sistemler var. Polimer bazlı kaplamalar epoksi, poliüretan veya akrilik içeriyor ve esnek oldukları için kolay uygulanabiliyor. Ama yüksek sıcaklık veya ağır mekanik yük altında performansları sınırlı. Metal veya seramik bazlı kaplamalar ise titanyum, alüminyum ya da paslanmaz çelik yüzeylerde uygulanabiliyor ve savunma ile havacılık sektöründe yüksek sıcaklık ve aşınma dayanımı sağlıyor. Bunların üzerine polimer + PVD/CVD gibi hibrit sistemler kurulursa hem mekanik dayanım hem de kendini onarma kabiliyeti artıyor.



Avantajları açık: Hasar oluşsa bile korozyon ve aşınma direnci korunuyor, bakım maliyeti azalıyor ve özellikle kritik savunma parçalarında güvenlik artıyor. Uygulama alanları genellikle zırhlı araçlar, silah mekanizmaları, uçak parçaları ve radar yüzeyleri gibi yüksek maliyetli ve bakım zorluğu olan sistemlerle sınırlı.

Tabii ki hâlâ bazı sınırlamalar var. Mikrokapsüllerin sayısı ve dağılımı yeterli değilse kendini onarma etkisi azalıyor, polimer bazlı sistemler yüksek sıcaklıkta veya ağır mekanik yük altında yeterli performans göstermiyor ve maliyetleri yüksek. Ama nano ve mikro ölçekli hibrit sistemler ile PVD/CVD kaplamalar entegre edildiğinde bu sorunlar büyük ölçüde çözülebiliyor. Kısacası, kendini iyileştiren kaplamalar, özellikle kritik savunma ve havacılık parçalarında geleceğin teknolojisi olarak görülüyor ve hem dayanıklılığı hem de bakım kolaylığını artırıyor.



KAYNAKÇA

- Aytaç, A. & Malayoğlu, E. (2018). PVD ve CVD Kaplamaların Endüstrideki Uygulamaları ve Performansları. DergiPark.
- DEKAP Endüstri. Savunma Sanayi İçin PVD Kaplama.
- Kimetsan Kimya. Savunma Sanayine Yönelik Su Bazlı Boyalar ve Kaplamalar.
- Polymex. Savunma Sanayi Kaplama Sistemleri ve Su Bazlı Boyalar.
- Yıldız, T. & Arkadaşlar (2022). Korozyona Dayanıklı, Kendini İyileştiren Kaplamalar: Nano Yapılar ve Uygulama Alanları. ResearchGate.
- Kimetsan Kimya. Savunma Sanayi Kaplamaları ve Teknolojileri.
- Wikipedia (Türkçe). Chemical Agent Resistant Coating (CARC).
- A. Matthews & Leyland, A. (1998). "On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach." Surface and Coatings Technology, 108-109, 1-9.
- Aşınma direnci ve sert kaplamalarda H/E oranı kavramı. Musil, J. (2000). "Hard and superhard nanocomposite coatings." Surface and Coatings Technology, 125, 322-330.
- Yüksek sıcaklık ve aşınma direnci gerektiren sistemler. Holleck, H. (1986). "Material selection for hard coatings." Journal of Vacuum Science & Technology A, 4(6), 2661-2669.
- Sert CVD kaplamaların seçimi ve performans kriterleri. TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası. Yüzey İşlemleri ve Kaplama Teknolojileri Seminer Notları. Korozyon Derneği Yayınları. Korozyon ve Önleme Yöntemleri, İstanbul.