

# Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Teknolojisi ve Uygulamaları



\* <sup>1</sup>Abdullah Cahit Karaoğlanlı, <sup>2</sup>Ahmet Türk, <sup>2</sup>Fatih Ustel

\*<sup>1</sup>Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 74100, Bartın, Türkiye  
<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya, Türkiye

\*Corresponding author: Address: Bartın University Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 74100 / Bartın, Turkey E-mail address: cahitkaraoglanli@gmail.com Phone: 0378 2235365  
Mobile Phone: 0535 4989356

## Özet

Termal sprej kaplamalar, hedef bir altlık malzeme üzerine yüksek ısı ve/veya kinetik enerjiye sahip, erimiş ya da yarı erimiş formdaki toz parçacıkların gönderilmesi yoluyla elde edilmektedir. Günümüzde termal sprej kaplamalar güncel olarak; havacılık ve savunma sektörleri başta olmak üzere otomotiv, enerji, elektronik ve biyomedikal uygulamalar gibi birçok alanda kullanım alanı bulmaktadır. Uygulandıkları yüzeyler üzerinde aşınma, oksidasyon, korozyon ve yüksek mekaniksel dayanım gibi üstün özelliklerin eldesine imkan veren bu kaplamalar istenilen yüzey özelliklerine göre farklı sprej kaplama yöntemleri kullanılarak uygulanabilmektedir. Yaygın olarak kullanılan hızlı, ekonomik ve verimli bir kaplama üretimine olanak veren plazma sprej kaplamaların yanında yüksek kaliteye sahip kaplama üretimine olanak veren Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme (HVOF) kaplamalarda endüstride geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmakta ancak kullanılan ekipman ve proses özellikleri yönüyle daha maliyetli bir teknolojiye sahiptir. Son yıllarda, plazma sprej ve HVOF kaplamalara alternatif olarak üstün özelliklerde, oksitsiz ve yoğun kaplama yapısının elde edildiği Soğuk Gaz Dinamik Sprej (CGDS) kaplamalar ön plana çıkmaktadır. Bu sistemin ‘Soğuk Gaz Dinamik Sprej’ olarak isimlendirilmesinin sebebi, göreceli olarak nozuldaki mevcut olan gaz çıkış sıcaklığının diğer yöntemlere göre düşük olmasıdır. Bu çalışmada, araştırmacı ve endüstriyel kullanıcılar için ilgi odağı oluşturan CGDS kaplama teknolojisi ele alınarak açıklanmaya çalışılmıştır.

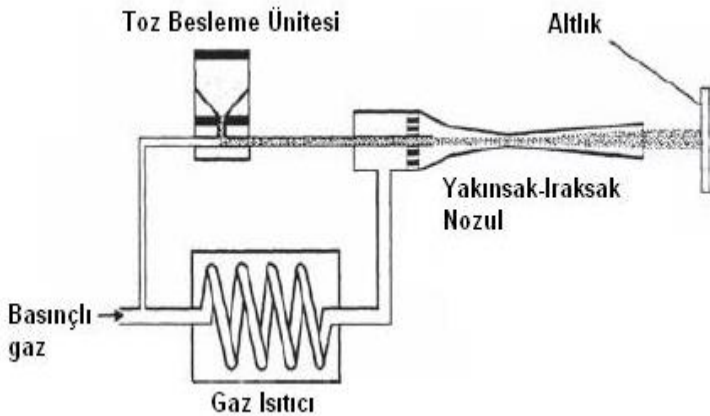
**Anahtar Kelimeler:** Soğuk Gaz Dinamik Sprej (CGDS), Plastik deformasyon, Termal sprej kaplama, Kinetik enerji

## 1. Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplamalar

CGDS tekniği ile kaplama üretiminde biriktirme işlemleri, parçacıkların yüksek sıcaklıktan ziyade yüksek hıza sahip olması temeline dayanmaktadır. Bu sayede işlem sıcaklıkları diğer termal spreyci yöntemlerine göre çok daha aşığlara çekilebilmektedir. Katı parçacıklar nispeten düşük sıcaklıklarda, ses üstü hıza sahip "inert" gaz akımı ile 300-1200 m/s aralığında yüksek hızlara ivmelendirilirler. Böylelikle biriktirme işlemi için gereken enerji, altlığa çarpan parçacıkların kinetik enerjisinden elde edilmiş olur [1-2].

HVOF işleminden farklı olarak bu teknikte, gaz sıcaklığı parçacıkların erimesine müsade etmeyecek kadar düşük olmaktadır. Genellikle azot veya helyumdan oluşan taşıyıcı gazlar 700 C° gibi sıcaklıklara kadar bir ön ısıtmadan geçirilirler [3]. Bu ön ısıtmanın amacı, parçacıkların termal enerjisini artırmaktan ziyade gazların yüksek hızlara çıkarılmasını sağlamak ve dolaylı olarak parçacıkların kinetik enerjisini artırmaktır [4].

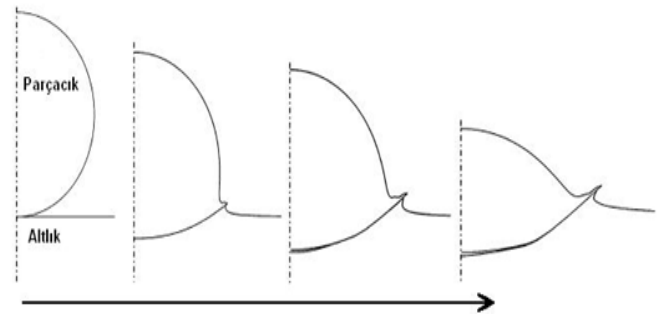
Bu amaçla, ısıtılan gaz yakınsak ve ıraksak nozula gönderilir. Özel tasarımı bu nozullar sayesinde gazla karışık parçacıklar



ses üstü hızlara çıktığından HVOF prosesinde olduğu gibi şok dalgaları oluşturmazlar [5]. Taşıyıcı gaz ve parçacıklar, nozula dikey veya yatay olarak enjekte edilebilirler. Nozul içinde karışan gazlar aniden genişler ve ivmelenirler. Bu sırada gaz sıcaklıkları parçacıklara ısı aktarımına fırsat kalmadan, spreyci tabancası içinde ani genişlemeler nedeniyle hızla düşer. Böylelikle gazın termal enerjisinin kinetik enerjiye çevrilmesi ile ses üstü hızlara ulaşılmış olur [4,6]. CGDS sisteminin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.

Şekil 1. CGDS sisteminin şematik gösterimi [7].

CGDS yönteminde, belirli bir kritik hızın altında kalan parçacıklar ya geri sekme yaparlar ya da altlık malzemesini erozyona uğratarlar. Kritik hız aşıldıktan sonra, hız artırdıkça parçacıkların altlık üzerinde birikme oranları da artar [2]. CGDS kaplamalarda, parçacık ve altlık arasında atomik difüzyon gerçekleşmesi için yeterince zaman bulunmadığından, atomik difüzyon geçerli bir bağlanma mekanizması olarak gösterilmemektedir. Bir Al - Cu sisteminde, parçacık ve altlık arasında sıcaklığın en yüksek



olduğu zaman olan 20 ns (nano saniyelik) aralıkta, atomların altlığın içinde 0.004 nm (nano metre) ile 0.1 nm mesafe kat ettiği belirtilmiştir [8].

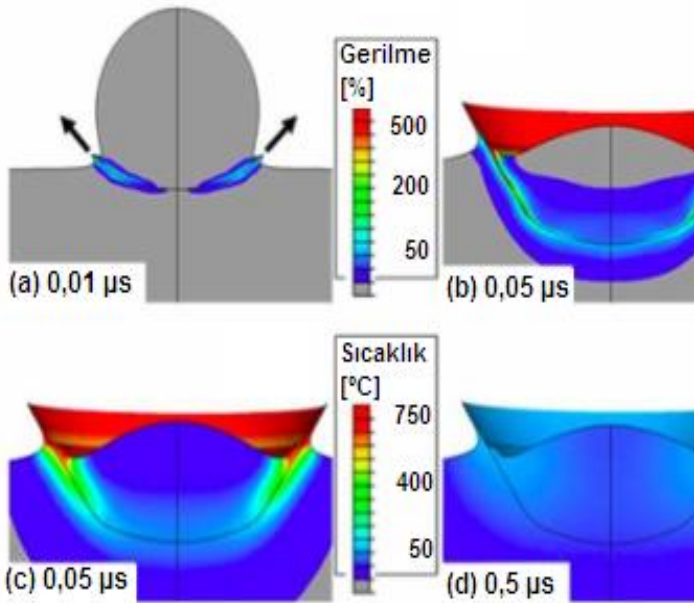
## 2. CGDS Kaplamalarda Bağlanma Mekanizması

Bazı araştırmalarda patlamalı kaynak mekanizmasıyla CGDS prosesinin bağlanma mekanizmasının benzer olduğu ileri sürülmüştür [9]. Patlamalı kaynakta iki metal tabakanın birbirine yüksek hızlarda çarpması ile bölgesel yumuşamalar oluşmakta ve sonuç olarak da katı halde metal jetler gözlemlenmektedir. Oluşan bu metal jetlerin, yüzeydeki oksitlerin temizlenmesine ve sonuç olarak da metaller arasında daha yakın ve temiz bir temas olmasına yol açtığı ve böylelikle metaller arası bağların daha kuvvetli olduğu kabul edilmektedir [4]. Bu argümanı desteklemek için Kee Hyun Kim ve arkadaşlarının çalışması örnek gösterilebilir [10]. CGDS prosesindeki metal jetlerin oluşumu şematik olarak Şekil 2'de gösterildiği gibidir.

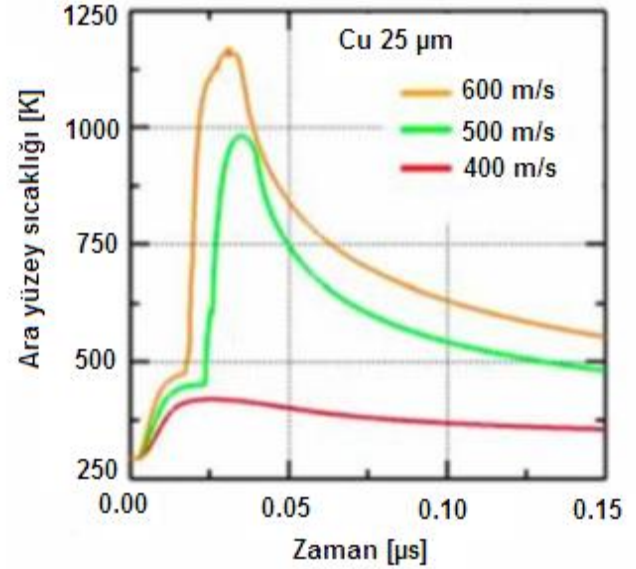
**Şekil 2.** Metal parçacıklarda jet oluşumunun şematik gösterimi [10].

Şekil 2'den de anlaşılacağı gibi metallerin jet oluşumu sadece çarpan parçacıklarda değil, aynı zamanda parçacığın altlıkla temas ettiği noktada, altlık yüzeyinde de gözlemlenebilmektedir. Jet oluşumuyla yüzeyler oksitten arınmış olurlar. Yüksek hızlı parçacıktan gelen enerji sayesinde basınç artışı olur ve böylelikle metalurjik bağlar meydana gelir [11].

Schmidt ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada, parçacık ve altlık teması modellenerek bağlanma mekanizmalarına açıklık getirilmeye çalışılmıştır [12]. Bu modellemede, Cu üzerine bakır partiküller gönderilmiş ve partikül altlık ara yüzeyinde yüksek kinetik enerjiden kaynaklı lokal ısı artışları olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3 ve 4'de 25  $\mu\text{m}$  çapındaki bakır partikülleri ve partiküllerin farklı hızlar için elde edilen soğuma eğrileri gösterilmektedir.



**Şekil 3.** Bakır partiküllere ait sıcaklık ve gerilme değişimi (başlangıç sıcaklığı 20 $^{\circ}\text{C}$ ) [12].



**Şekil 4.** Bakır partiküllerin farklı hızlar için elde edilen soğuma eğrileri [12].

Bakırın erime sıcaklığının çok üzerine çıkılmasa dahi, ısı dağılımı şekilden de görüleceği üzere 50 ns gibi bir süreden daha fazla zaman almaktadır. Bu süre zarfında deformasyon gerçekleşmekte ancak ısı dağılımı tamamlanmamış olmaktadır.

Bu durumda bağlanma mekanizmasının adiyabatik kayma kararsızlığına (adiabatic shear instability) bağlı olarak gerçekleştiği düşüncesi hakim olmaktadır [12]. CGDS prosesindeki plastik deformasyonun etkilediği bir diğer durumda, bazı kaplamalarda yukarı tabakalara çıkıldıkça gözlemlenen lameller arası boşluklarda ki artıştır. Bunun temel nedeninin alt tabakalardaki parçacıkların kendi enerjilerinin dışında arkalarından gelen parçacıklar tarafından da ezildikleri ve daha çok deformasyona uğramaları sonucu olduğu öne sürülmüştür [13]. Böylelikle alt tabakalarda lameller arası boşluk deformasyona bağlı olarak daha az, üst tabakalarda ise daha fazladır. Bu mekanizmanın şematik olarak gösterimi Şekil 5'de verilmiştir.

CGDS'lerin bağlanma mekanizmaları üzerine birçok araştırma yapılmış olmasına rağmen net bir görüş birliğine varılamamıştır. Araştırmaların devam etmesine karşın

çarpışma ve bağlanma süreci ve bazı malzeme özellikleri hakkında bilgi eksikliği, araştırmaları kısıtlamaktadır [4].



**Şekil 5.** CGDS prosesinde arkadan gelen parçacıkların neden olduğu deformasyon süreci [13].

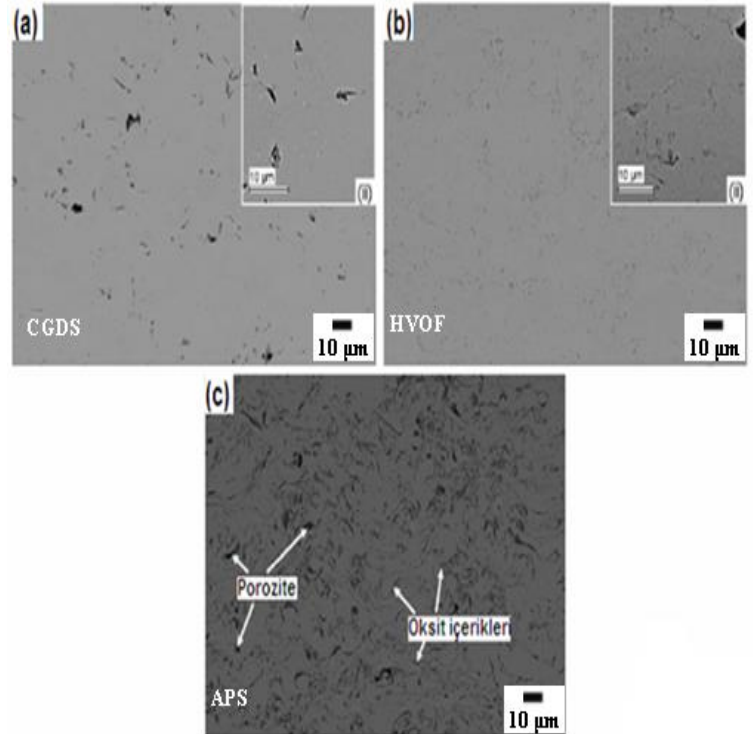
CGDS prosesinin birikme mekanizmasının temelde parçacıkların plastik deformasyonuna dayanmasından ötürü, kaplama malzemesinin seçimi metaller ve alaşımlar gibi sünek malzemeler ile sınırlı kalmaktadır. Her ne kadar seramikler gibi gevrek malzemeler sünek bir metal matris içinde olduklarında CGDS kaplamada kullanılabilirler de, bu durum gevrek malzemelerin tek başlarına biriktirilebilecekleri şeklinde yorumlanmamalıdır [14]. Gevrek malzemelerin yalnız başlarına biriktirilemeyeşleri, bağlanma mekanizmasının plastik deformasyona bağlı olduğu düşüncesini destekler yöndedir. Plastik deformasyona uğrayan parçacıkların, bu deformasyon sırasında sertleşmeye uğramalarından dolayı, CGDS prosesi ile orjinal tozun mekanik özelliklerinden daha üstün özellikte kaplamalar üretmek mümkündür. CGDS yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada, konvansiyonel tozla yapılmış kaplamanın sertliğinin kaplama tozunun sertliğinden daha yüksek olduğu görülmüş, bu durum deformasyon sertleşmesine bağlanmıştır [15]. Aslında bu durum, parçacıkların eritilmemesinin getirdiği avantajlardan biridir. Fakat CGDS prosesinin en önemli özelliklerinden birisi, sistemin düşük sıcaklıklarda çalıştığı ve parçacıklar inert gazlarla korunduğu takdirde, parçacıkların orjinal kompozisyon ve mikroyapı özelliklerinin korunması ve kaplamada çok düşük oksit oranlarına ulaşılabilmesidir.

CGDS yöntemi ile üretilen atmosferik plazma sprej (APS) ve yüksek hız oksit-yakıt püskürtme (HVOF) yöntemleriyle

üretilen kaplamalara göre çok daha düşük oksit içeriği ve porozite yüzdesine sahiptir. Richer ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada CoNiCrAlY içerikli, APS, HVOF ve CGDS prosesleri ile üretilen kaplamaların oksidasyon davranışları incelenmiştir [16]. Şekil 6'da her üç yöntemle üretilen kaplamalara ait mikroyapı resimleri gösterilmektedir.

Şekil 6. CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamaların mikroyapı görüntüsü; a. CGDS yöntemiyle üretilen kaplamanın mikroyapı görünümü, b. HVOF yöntemiyle üretilen kaplamanın mikroyapı görünümü, c. APS yöntemiyle üretilen bir kaplamanın mikroyapı görünümü [16].

Şekil 6'dan da anlaşıldığı üzere APS tekniği ile üretilen kaplamalarda ki oksit miktarı, gözle görülür oranda HVOF ve CGDS yöntemi ile üretilen kaplamalardan daha yüksektir. HVOF ve CGDS prosesleri gibi parçacıkların yüksek hızlara çıkarıldığı işlemlerde porozite miktarı düşük ve yoğunluk yüksek iken, APS prosesi gibi sıcaklığın yüksek fakat parçacık hızının düşük olduğu durumlar için tersi durum söz konusudur. Ayrıca sıcaklığın düşük olduğu



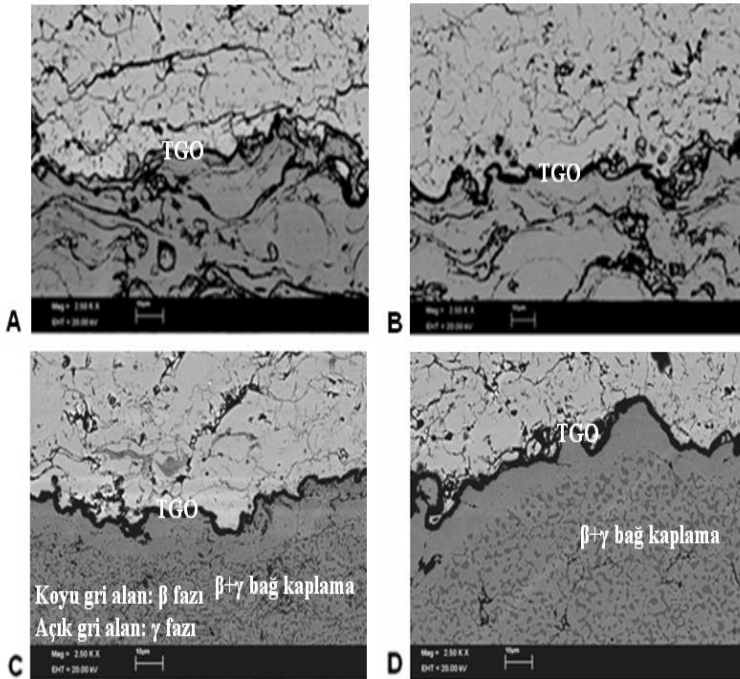
CGDS yöntemi ile üretilen atmosferik plazma sprej (APS) ve yüksek hız oksit-yakıt püskürtme (HVOF) yöntemleriyle

ve yapışmanın temel olarak plastik deformasyona bağlı olduğu CGDS

yönteminde, kaplama ile parçacık arasındaki mikroyapı farklılıkları deformasyona bağlı olarak değişmektedir [17]. Bu sebepten dolayı CGDS prosesi ile parçacığın orjinal özellikleri kaplamada nispeten daha fazla korunmuş olmaktadır [2].

Şekil 7'de APS ve CGDS teknikleriyle üretilen CoNiCrAlY içerikli bağ ve APS tekniğiyle üretilen yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) içerikli üst kaplamaya sahip termal bariyer kaplama (TBC) sistemlerinin, 1000 °C sıcaklık ile 8 ve 24 saat olarak gerçekleştirilen oksidasyon sonrası mikroyapısal değişimleri gösterilmektedir [18].

Şekil 7. APS-CoNiCrAlY bağ ve APS-YSZ üst kaplamaya sahip TBC numunelerine ait 1000 °C sıcaklıktaki



oksidasyon sonrası SEM mikroyapıları: a. 8 saat ve b. 24 saat, CGDS-CoNiCrAlY bağ ve APS-YSZ üst kaplamaya sahip TBC numunelerine ait 1000 °C sıcaklıktaki oksidasyon sonrası SEM mikroyapıları: c. 8 saat ve d. 24 saat [18].

Şekil 7a ve b'den de görüldüğü üzere APS tekniğiyle üretilen CoNiCrAlY bağ kaplama yapısı plazma spreylere kaplamaların tipik karakteristik özelliği olan lamelli, içerisinde birçok çatlak yapısı bulunduran, yüksek oksit ve porozite içeriğine sahip yapıdadır. TGO oksit tabakası üst seramik kaplamadan oksijenin penetrasyonu sonucu bağ ve üst kaplama ara yüzeyinde oluşmaktadır. Şekil 7c ve d'de gösterilen CGDS tekniğiyle üretilen TBC'lerin bağ kaplama yapısı ise APS tekniğiyle üretilen TBC'lere göre, bağ kaplama özellikleri yönüyle daha yoğun, porozitesiz ve daha düşük oksit içeriğine sahiptir. APS tekniğiyle üretilen her iki TBC sisteminin üst seramik kaplama yapılarının çatlak ve süreksiz açıklıkları içerisinde bulundurduğu görülmektedir [18].

CGDS yöntemi dışında, VPS ve LPPS gibi kaplamalarda oksit oranı CGDS yöntemindeki gibi düşük olsa da, bu tekniklerde parçacıklar eriyerek orjinal tozun mikroyapı özelliklerinden farklılık gösterdiği için CGDS yöntemi ile tam olarak aynı sonuçları göstermeyecekleri unutulmamalıdır [4]. Yukarıda belirtilen açıklamalara karşın, son dönemlerde TiO<sub>2</sub> gibi metal matrisler kullanılmadan, yalın olarak seramik parçacıklar ile kaplamalar üzerine başarılı çalışmalar yapılması ilgi çekici özelliktedir [19]. Seramik parçacıkların sünek altlıklar üzerine biriktirildiği çalışmalarda kayma kararsızlığı bağlanma mekanizması olarak öne çıksa da, seramik üzerine seramik ile yapılan çalışmalar henüz bu tarz kaplamalarda bağlanma mekanizmasına açıklık getirememişlerdir [19-20]. Bu çalışmalar ile elde edilen seramik kaplamaların, sünek malzemelerle yapılan kaplamalar kadar başarılı ve kararlı olmadığı da göz önüne alınması gereken önemli bir unsurdur.v

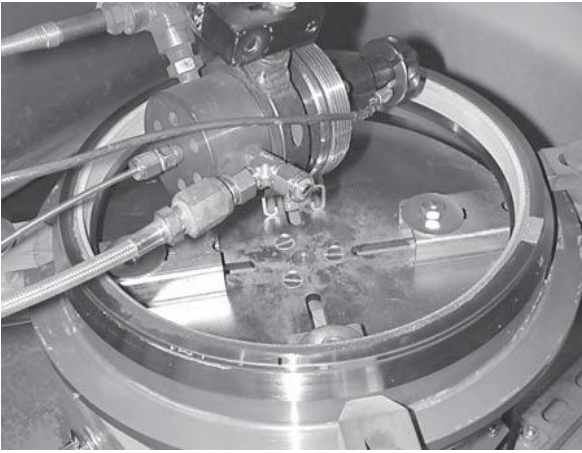
### 3. CGDS Kaplama Teknolojisi Uygulamaları

CGDS tekniği, proses olarak düşük sıcaklıkta ve ergime olmaksızın partiküllerinin başlangıçtaki fáz ve bileşimlerinin korunması, yüksek biriktirme oranı, yüksek kaplama dayanımı, iş parçasına düşük ısı taşınımı ve soğutma ihtiyacının azaltılması, katılma geriliminin olmaması gibi özellikleri elde edilmesine imkan sağlamaktadır [21-22]. Belirtilen bu özelliklerinden dolayı CGDS tekniği ile üretilen kaplamalar günümüzde mekanik, ısı, elektriksel, korozyon ve aşınma dayanımı gibi özelliklerin ön plana çıktığı havacılık ve uzay, savunma, otomotiv, enerji, elektronik ve yarı iletken, kimya ve



biyomedikal endüstrisi gibi birçok alanda kullanım olanağı bulunmaktadır [6,23].

Şekil 8’de roket motorlarındaki paslanmaz çelik manifoldun üzerine, CGDS yöntemiyle üretilen 2.5 mm kalınlığındaki bakır kaplama gösterilmektedir. Bu şekilde eskiden kullanılan günler alan uzun sürece sahip elektrolitik prosesler yerine CGDS tekniğiyle saatlik bir işleme işleme, lehimleme ve diğer gibi birçok test operasyonu için gerekli şartları sağlayan kaplama yapısı üretilebilmektedir.



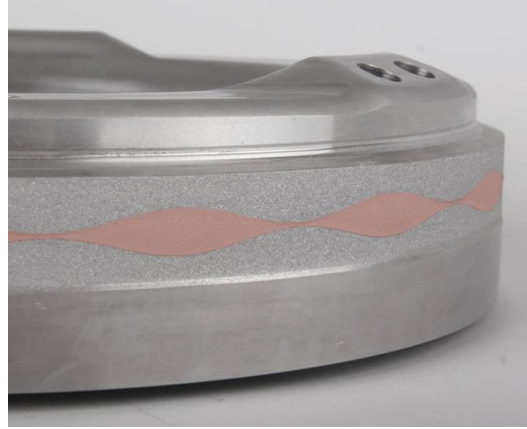
**Şekil 8.** CGDS tekniğiyle kaplanmış bir roket motoru manifoldu [22].

Soğuk spray gerektiğinde taşınabilir ekipman sistemi sayesinde Şekil 9’da gösterildiği üzere havacılıkta, Al ve Mg komponentlerin yerinde tamir edilmesinde de kullanılabilir.



**Şekil 9.** IVD-Al, Mg ve Al komponentler ve yapıların tamiri için Handheld KM tabancası [24].

Havacılık dışında diğer birçok alanda olduğu gibi CGDS prosesi elektronik endüstrisinde de kullanılmaktadır. Şekil 10’da hibrid motorlarda, otomotiv endüstrisinde sensör teknolojilerinde kullanılan soğuk spray kaplamalar gösterilmektedir.



**Şekil 10.** Parçanın dönüşü hakkında bilgi toplamak için CGDS tekniği uygulanarak üretilen sensör kaplamaları [25].

#### 4. Sonuçlar

Son yıllarda geleneksel olarak uygulanmakta olan termal sprey kaplama yöntemlerine alternatif olarak geliştirilen CGDS tekniği, farklı tip ve yapıdaki birçok kaplamanın üretimine olanak sağlamasının yanında orjinal toz kompozisyon ve mikroyapı özelliğinin korunması, oksitsiz, yoğun kaplama yapısının elde edilmesi gibi üstün özellikleriyle de ön plana çıkmaktadır. CGDS prosesi, artan Ar-Ge yatırım ve geliştirme faaliyetleriyle birlikte özellikle havacılık ve savunma sanayine yönelik olarak birçok parçanın kaplama ve tamir teknolojilerinde kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalarda aşınma, korozyon ve oksidasyon gibi parça hasarına sebebiyet veren ana faktörlerin çözümünde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu sebeplerden dolayı CGDS tekniği ile üretilen kaplamalar, araştırmacı ve endüstriyel kullanıcılar için günden güne ilgi odağı oluşturmaktadır.

#### Referanslar

- [1]. E. Irissou, J.G. Legoux, A.N. Ryabinin, B. Jodoin, C. Moreau, Review on Cold Spray Process and Technology: Part I-Intellectual Property, *Journal of Thermal Spray Technology*, 17(4), 495-516 (2008).
- [2]. A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkhimov, V.M. Fomin, *Cold Spray Technology*, Elsevier Science, ISBN-13: 978-0-08-045155-8 (2007).
- [3]. J.R. Davis, Revised by D.E. Crawmer, *Thermal Spray Processes*, Handbook of Thermal Spray Technology, ISBN 0-87170-795-0, ASM International, 54-76 (2004).
- [4]. R. Patrick, "Development of Conventional and Nanocrystalline Bond Coats by Cold Gas Dynamic Spraying for Aerospace Thermal Barrier Coatings", Ph.D. Thesis, University of Ottawas, Ottawa Ontario Canada, (2010).
- [5]. B. Jodoin, Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol: 11, 496-507 (2001).
- [6]. F. Gartner, T. Sotltenhoff, T. Schmidt, H. Kreye, The Cold Spray Process and Its Potential for Industrial Applications, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol: 15, 223-232 (2006).
- [7]. L. Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 67-165 (2008).
- [8]. L. Ajdelsztajn, B. Jodoin, G.E. Kim, J.M. Schoenung, Cold Spray Deposition of Nanocrystalline Aluminum Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol: 36A, 657-666 (2005).
- [9]. R.C. Dykhuizen, M.F. Smith, D.L. Gilmore, R.A. Neiser, X. Jiang, S. Sampath, Impact of High Velocity Cold Spray Particles, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 8, 559-564 (1999).
- [10]. K.H. Kim, M. Watanabe, S. Kuroda, Jetting-Out Phenomenon Associated with Bonding of Warm-Sprayed Titanium particles onto Steel Substrate, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol: 18, 490-499 (2009).
- [11]. T. Hussain, D.G. McCartney, P.H. Shipway, D. Zhang, Bonding Mechanisms in Cold Spraying: The Contributions of Metallurgical and Mechanical Components, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol: 18, 364-379 (2008).
- [12]. T. Schmidt, H. Assadi, F. Gartner, H. Richer, T. Stoltenhoff, H. Kreye, T. Klassen, From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol: 18, 794-808 (2009).
- [13]. P. Fauchais, G. Montavon, Thermal and cold spray recent developments, *Key Engineering Materials*, 384,1-59 (2008).
- [14]. KITAMURA J., SATO K., AOKI I., SAKAKI K., TAKAHATA M., SHIMIZU Y., Mechanical Properties of WC/Co coatings prepared by cold spraying, *International Thermal Spray Conference, Thermal Spray Crossing Borders*, Maastricht - The Netherlands, June 2-4, 1246-1250, 2008.
- [15]. B. Jodoin, L. Ajdelsztajn, E. Sannsoucy, A. Zuniga, P. Richer, E.J. Lavernia, Effect of Particle Size, Morphology and Hardness on Cold Gas Dynamic Sprayed Aluminium Alloy Coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol: 201, 3422-3429 (2006).

- [16]. P. Richer, M. Yandouzi, L. Beauvais, B. Jodoin, Oxidation behaviour of CoNiCrAlY bond coats produced by plasma, HVOF and cold gas dynamic spraying, *Surface and Coatings Technology* 204, 3962–3974 (2010).
- [17]. L. Ajdelsztajn, A. Zuniga, B. Jodoin, E.J. Lavernia, Cold-Spray Processing of a Nanocrystalline Al-Cu-Mg-Fe-Ni Alloy with Sc, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol: 15, 184-190 (2006).
- [18]. A.C. Karaoglanlı, Termal Bariyer Kaplamalarda Bağ Tabakasının Farklı Yöntemlerle Üretilmesi ve Özelliklere Etkisi, Ph.D. Thesis, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, (2012).
- [19]. H. Gutzmann, S. Freese, F. Gartner, T. Klassen, Hamburg, Cold Gas Spraying of Ceramics Using the Example of Titanium Dioxide, *International Thermal Spray Conference, Hamburg, September 27-29*, 391-396 (2011).
- [20]. J.O. Kliemann, H. Gutzmann, F. Gartner, H. Hubner, C. Borchers, KLASSEN T. Klassen, Formation of Cold-Sprayed Ceramic Titanium Dioxide Layers on Metal Surfaces, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol: 20, 292-298 (2011).
- [21]. <http://www.gordonengland.co.uk/coldspray.htm>
- [22]. V.K. Champagne, The cold spray materials deposition process, *Fundamentals and applications*, Woodhead Publishing Limited, New York, (2007).
- [23]. K.I. Triantou, Ch.I. Sarafoglu, Th. Tsiourva, D.I. Pantelis, D.K. Christoulis, V. Guipont, M. Jeandin, M. Vardavoulias, Case Studies of Cold Sprayed Coatings, *Proceedings of the 7th International Conference Coatings in Manufacturing Engineering, Greece*, (2008).
- [24]. R. Tapphorn, J. Hennes, H. Gabel, Kinetic Metallization™ -A Repair Process for Damaged IVD-Al Coatings, Mg, and Al Alloy Components, *Thermal Spray 2009: Proceedings of the International Thermal Spray Conference, Inovati, Santa Barbara, California, USA*, (2009).
- [25]. S. Hartmann, New industrial applications for cold spraying, *Thermal Spray 2010: Proceedings of the International Thermal Spray Conference, DVS-ASM, Raffles City, Singapore*, (2010).