

SOĞUK SPREY (COLD SPRAY) TEKNOLOJİSİ VE UYGULAMA ALANLARI

Ekrem ALTUNCU
Fatih ÜSTEL

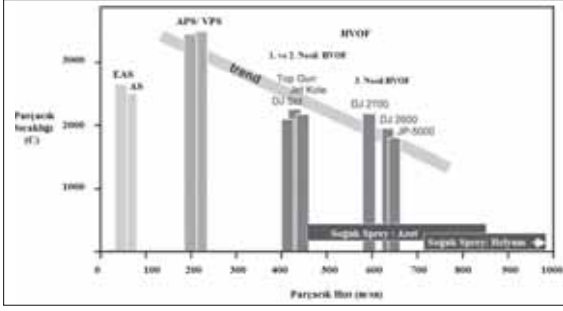
Kocaeli Üniversitesi
Sakarya Üniversitesi

1. Giriş

Endüstriyel uygulamalarda özellikle aşınmaya, korozyona, oksidasyona ve yüksek sıcaklığa dirençli kaplamaların üretiminde hızla pazar gücünü geliştiren termal sprej prosesi (ark sprej, alev sprej, plazma sprej, yüksek hızda oksijen yakıt sprej) yeni fonksiyonel kaplama ünitelerinin gelişimi, artan otomasyon kabiliyeti, daha güçlü ve efektif tabanca tasarımlarının geliştirilmesi ile sektörel beklentileri önemli ölçüde karşılamaktadır. Termal sprej prosesi ile üretilen kaplama mikro yapılarında ergitme ve hızlı katılma nedeniyle kaplama kesiti boyunca farklı boyut ve dağılımda süreksizlikler (porozite, çatlak, oksit vb.) ile artık gerilmeler ve inklüzyonlarla karşılaşılması olasıdır. Proses parametreleri, hızlı püskürtme koşulları ve kontrollü atmosfer ortamında süreksizlikler belirli ölçüde engellenebilmesine karşın proses maliyetleri ve uygulama pratikliği açısından sürekli yeni proses arayışları sürmektedir [1-3]. Bu bağlamda 1980'lerin sonlarında Anadolu Papyrin ve takım arkadaşları (Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russia) tarafından kapsamlı deneysel çalışmalar esnasında soğuk gaz sprej adı verilen bir yeni kaplama prosesi geliştirilmiş (1994 Amerika, 1995 Avrupa da patent) ve bu prosenin keşfedilmesinden itibaren yakın zamanda çok hızlı bir gelişmeler gözlenmiştir [4-6]. Soğuk sprej prosesi diğer termal sprej proselerine göre ergime olmaksızın katı halde parçacıkların çok yüksek hızda ve düşük sıcaklıkta püskürtülerek daha yoğun kaplama üretimine olanak sağlamaktadır. Günümüzde soğuk sprej prosesi güvenilir ve çevre dostu bir teknoloji olup, özellikle metalik esaslı kaplamaların endüstriyel uygulamalarında birçok açıdan önemli fırsatlar sunmaktadır [7]. İlerleyen bölümlerde soğuk sprej proselinin temel prensipleri, termal sprej prosesi ile karşılaştırmalı olarak avantaj ve dezavantajları, kaplama üretiminde etkili proses parametreleri ve uygulama alanları ile ilgili bilgiler sunulmaktadır.

2. Soğuk Sprej Prosesinin Termal Sprej Proseslerine Göre Farklılıkları ve Avantajları

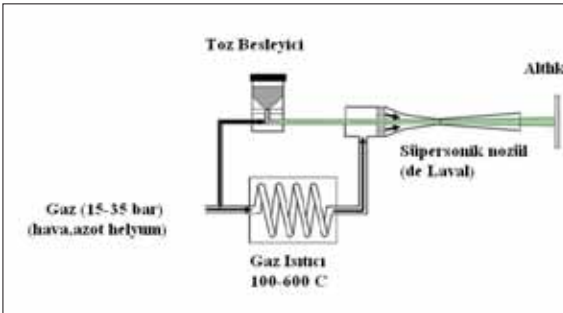
Soğuk sprej prosesi termal sprej kaplama teknolojileri ailesinin bir parçası olarak tanımlanmasına karşın, klasik termal sprej teknolojilerinden (alev sprej (AS), elektrik ark sprej (EAS), atmosferik ve vakum plazma sprej (APS, VPS), yüksek hızda oksijen yakıt sprej (HVOF) gibi) farklı olarak katı halde ergime olmaksızın çok yüksek hızlarda yüzeye püskürtülmektedir. Soğuk sprej prosesi esnasında püskürtülen parçacık sıcaklığı çok düşük buna karşın püskürtme hızı oldukça yüksektir (**Şekil 1**). Proses türüne ve proseste kullanılan tabanca tipi ve kullanılan gaz kompozisyonlarına bağlı olarak farklılıklar gözlenmektedir [3,8,9]. Uygulamalarda geleneksel termal sprej prosesi ile püskürtülen metalik kaplama malzemeleri yüksek sıcaklık etkisi ile oksitlenerek kaplama yapısında belirli oranda oksit oluşumuna neden olmaktadır. Bu durum kaplamanın performansını ve ömrünü azaltmaktadır [2]. Oksit, porozite ve süreksizlik oranını azaltmak amacıyla parçacıkların daha hızlı püskürtüldüğü HVOF prosesi ve ortamda oksitlenmeyi azaltmak amacıyla kontrollü atmosferde veya inert gaz ortamlarında gerçekleştirilen plazma sprej prosesi ile olumlu sonuçlar alınmasına karşın proses ve ekipman maliyetleri oldukça yükselmektedir. Bu nedenle termal sprej proselerinde karşılaşılan ergitme, buharlaşma, faz dönüşümü, oksidasyon, rekristalizasyon, artık gerilme, yapışmama gibi birçok etken soğuk sprej prosesi ile elimine edilmektedir. Bu sayede kalın ve yoğun kaplamaların üretimine olanak sağlanmaktadır. Klasik termal sprej proselerine göre düşük proses sıcaklıklarına sahip olması nedeniyle düşük ısı girdisi nedeniyle soğutma gereksinimi azdır. Bunun yanında kaplama öncesinde yüzey pürüzlendirme (kumlama vb.) gereksinimi bulunmamaktadır [8, 10]. Soğuk sprej prosesi ile üretilen metalik esaslı kaplamalarda yüksek birikme hızlarına ve yüksek yapışma mukavemetlerine ulaşabilmektedir. Elde edilen kaplamalarda oksit, porozite ve artık gerilmeler oldukça düşük seviyededir [3, 8, 11-14]. Soğuk sprej prosesi de diğer termal sprej prosesi gibi proses kontrolüne olanak sağlayan daha ekonomik ve pratik bir uygulama avantajı sergilemektedir.



Şekil 1. Parçacık sıcaklığı ve hızına bağlı olarak termal sprey proseslerinin karşılaştırılması [3, 8, 9]

3. Soğuk Sprey Prosesi

Soğuk sprey prosesi özellikle metalik toz parçacıkların çok yüksek hızla (süpersonik) ivmendirilerek yüzeye çarpmaları sonucunda parçacıkların deformasyon kabiliyetine bağlı olarak yüzeyde birikmesine olanak sağlayan yeni bir kaplama prosesidir [10, 15-17]. Bu yüksek ivmelenme proses gazlarının (hava, azot, helyum ve karışım kombinasyonu) önce ısıtılması ve basınç altında sıkıştırılmasını takiben nozülde (Laval Nozül) genişlerken çıkışı ile sağlanmaktadır (Şekil 2). Proses bu nedenle; kinetik metalizasyon, soğuk gaz dinamik sprey, kinetik sprey, yüksek hızda yüzeyde toz biriktirme prosesi gibi değişik isimlerle birlikte tanımlanmaktadır [8].



Şekil 2. Şematik olarak soğuk sprey prosesi [3, 7]

Prosesin fiziksel temeli püskürtülen parçacıkların çarpma sonucunda kinetik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşmesi ile ilişkili olarak yüzey ve parçacıkların birbirleri ile etkileşimi sonucu meydana gelen termal deformasyon etkisiyle yüzeyde kaplama birikmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede yoğun ve yüksek yapışma gösteren bir kaplama tabakası elde edilebilmesi olanak sağlayan bir prostestir [10]. Arzulanan kaplama mikroyapısı ve fiziksel özelliklerinin elde edilebilmesi doğrudan kaplama malzemesi türüne ve toz boyutlarına bağlı olarak püskürtme esnasında yüzeye

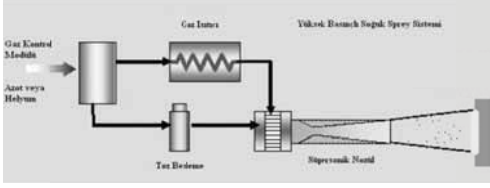
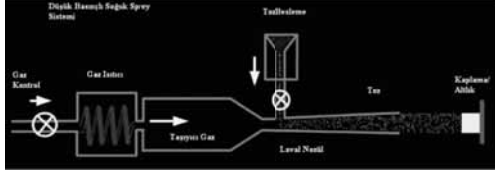


çarpan parçacıkların hız dağılımıyla ilişkilidir. Bunun yanında diğer önemli proses parametreleri gaz türü ve kompozisyonu, gaz ön ısıtma sıcaklığı, basınç, nozül geometrisi ve püskürtme mesafesidir [7, 8]. Proseste kullanılan gazlar hava, azot, helyum ve karışım gazlardır. Püskürtme hızı (300-1200 m/sn) taşıyıcı gaza ve toz boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Laval nozül ile taşıyıcı gaz hava olması durumunda parçacık hızı ortalama 600 m/sn seviyelere çıkartılabilmekte, taşıyıcı gaz havadan daha hafif olması (He gibi) halinde sprey hızı artmaktadır. Bu proses gazları arasında en çok tercih edileni azot (N_2) gazıdır. Bunun nedeni helyuma göre daha ucuz bir gaz olmasıdır. Kaplama prosesinde ön ısıtılmış gaz sıcaklığı 0-700 °C arasında ve basınç ise 0.6-3.5 MPa arasında değişmektedir. Proses sıcaklığı püskürtülecek kaplama malzemesinin ergime sıcaklığının altındadır. Nozül çıkışında sıcaklık düşmekte ve toz besleme ile birlikte daha da azalmaktadır [8,17]. Proseste kullanılan toz boyutları yaklaşık 1-50 μm aralığında değişmektedir. Püskürtülecek tozların seçiminde en önemli unsur yüksek hızla çarpma esnasında deformasyon kabiliyetine sahip olmasıdır. Al, Cu, Ag, Au, Pt, Ni ve γ -Fe gibi yüzey merkezli kübik kristal kafas yapısına sahip metaller hacim merkezli kübik kristal (W, Ta, Mo, Nb, V, Cr, α -Fe, β -Ti) ve sıkı paket hegzagonal (Cd, Zn, Co, Mg, Ti) kafes yapısına sahip metallere göre daha fazla deformasyon kabiliyetine sahip olmalarından dolayı soğuk sprey proseslerinde öncelikli olarak Al, Fe, Cu, Ni esaslı kaplamalar üzerinde çalışmalar sürdürülmüştür [1]. Soğuk sprey prosesleri ile demir esaslı, demir dışı metal ve alaşımlar (NiCr, Zn-Al, Ti-6-8Al-4V, 316, 316L, NiCrAlY) dışında metal/seramik (WC-Co, NiCr-Cr₃C₂) ve kompozit (Al-Al₂O₃, Al-SiC, Al-TiN) esaslı kaplamalar üretilebilmektedir [1, 11, 18-23]. Ayrıca polimerik (polyelefin gibi) esaslı kaplamalar da soğuk sprey ile uygulanabilmektedir [24].

3.1. Soğuk Sprey Kaplama Sistemleri

Soğuk sprey sistemi gaz kontrol modülü, gaz ısıtma sistemi, toz besleme sistemi ve bağlantı aparatları ile birlikte laval tipi nozüle sahip tabancadan oluşmaktadır. Kullanım yerlerine göre iki tür soğuk sprey prosesi geliştirilmiştir. Bunlar yüksek basınçlı ve düşük basınçlı olmak üzere tanımlanmaktadır. **Tablo 1'**de her iki sistemin farklılıkları belirtilmektedir. Yüksek basınçlı soğuk sprey prosesinde He ve N_2 gazları kullanılmaktadır. 1000 °C'ye kadar ön ısıtma yapılabilmektedir. Laval nozülden çıkan parçacık hızları 1000 m/sn hızlara ulaşabilmektedir. Düşük basınçlı soğuk sprey prosesinde ise genellikle hava ve N_2 gazları kullanılmaktadır. Toz besleme her iki sistemin birbirinden farklıdır. Düşük basınçlı sistemde

nozülde divergent kesitine yapılmaktadır, yüksek basınçlı sistemde ise aksel olarak doğrudan besleme yapılmaktadır. Soğuk sprej teknolojisinin gelişiminde sprej tabancalarının gelişimi ve parçacık püskürtme hızları oldukça önemli rol oynamaktadır [25-27].

Tablo 1. Endüstriyel Soğuk Sprej Üniteleri

Yüksek basınçlı		Düşük basınçlı	
			
Kullanılan gazlar	N ₂ , He, Hava	N ₂ , Hava	
Gaz basınçları, MPa	2.5-4.5	0.5-1	
Gaz sıcaklıkları, °C	20-800	20-550	
Gaz akış hızları, m ³ /saat	50-150	15-30	
En yüksek gaz hızı, Mach	1-3	1-3	
Toz besleme hızı, gr/ sn	0.1-1	0.1-1	
Parçacık boyutu, µm	5-100	10-80	
Güç, Kw	5-25		
Sabit Kabinli Sistemlere örnekler (Robotik)			
	<p><i>Alabama Laser Systems (ALS), Supersonic Spray Tech. (SST),</i></p>		
Hareketli Sistemlere örnekler			
	<p><i>Rus Sonic Tech Inc.(RST)</i></p>		

3.2. Soğuk Sprej Prosesinde Kaplama Oluşumu

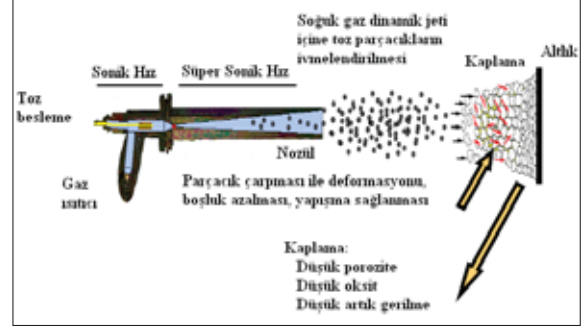
Soğuk sprej prosesi ile kaplama oluşumunda (**Şekil 3**) ilk aşama nozülün ucunda püskürtülen yüksek hızda ivmelenmiş parçacıklar öncelikle yüzeyi temizlemekte ve aktive etmektedir. Ardından yüzeye çarpma esnasında kesme kuvvetlerinin etkisi ile toz parçacık plastik deformasyona uğramakta ve şekil değiştirmektedir. Dolayısıyla kinetik enerji 50 ns gibi çok kısa bir süre içerisinde mekanik deformasyon ile termal enerjiye dönüşmektedir. Çarpma sonucu oluşan ısıyla parçacığın yumuşaması ve viskoz akışı sonucu yüzeyde gerilme oluşumunu engellenmektedir. Yapışmanın sağlanabilmesi için kritik bir çarpma hızına (V^*) ulaşılması ve püskürtülen parçacıkların %50' sinin yüzeye çarpması gerekmektedir (**Şekil 4**). Artan çarpma hızı kaplama birikme verimini %100' e yaklaştırmaktadır. Temas noktalarının artması yapışmayı iyileştirmektedir. Birbiri üzerine temas eden her bir parçacık bu şekilde metalurjik bir yapışma

sağlayarak kaplama yapısını oluşturmaktadır. Aşırı kinetik enerji kaplama esnasında çekme gerilmelerinin artışına neden olarak yüzeyin ve yapılmış tabakanın erozyonuna yol açabilmektedir. Toz malzemesinin türüne, boyutuna, boyut dağılımına ve püskürtme esnasında çarpma hızlarına bağlı olarak mekanik özellikler ve kaplama mikroyapısı kontrol edilebilmektedir. Genel olarak homojen ve dar toz boyut dağılımı tercih edilmektedir [2, 3, 28-34]. Yapışma için kritik parçacık hızının belirlenmesi üzerinde yapılan çalışmalarda malzemenin ergime sıcaklığının yanında malzeme yoğunluğu, ısı kapasitesi ve deformasyon kabiliyeti gibi malzeme özellikleri de etkili olmaktadır. Bu doğrultuda geliştirilen bir eşitlik ile kritik parçacık hızı hesaplanabilmektedir [33,35,36].

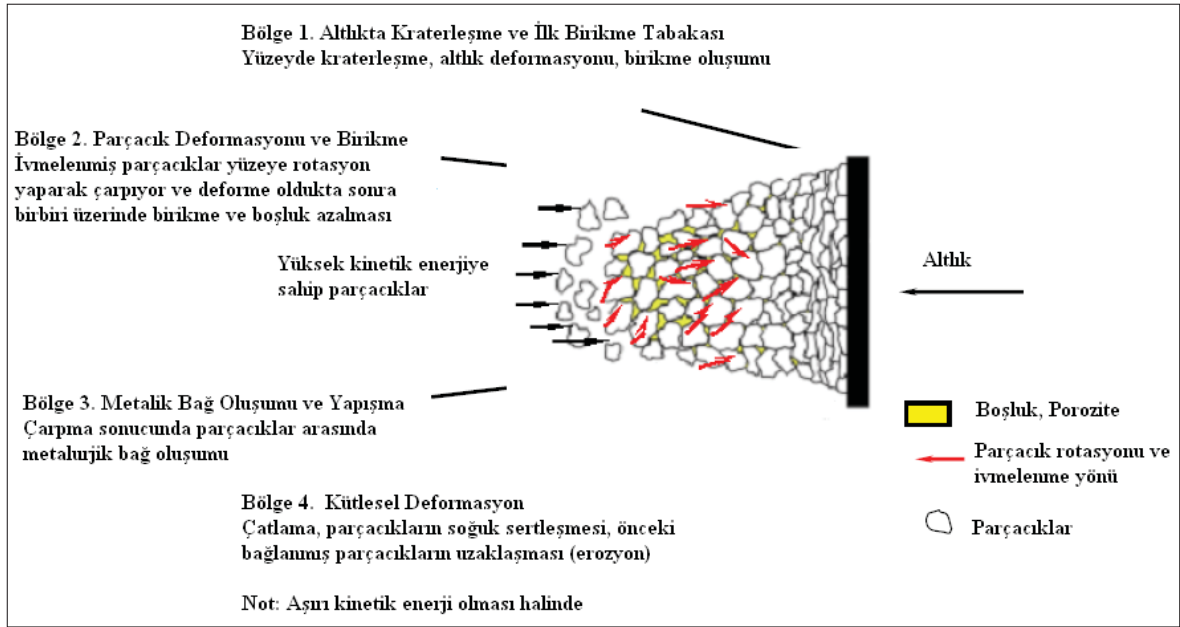
$$V^* = \sqrt{(A\sigma / \rho + Bc_p (T_m - T))}$$

Eşitlik 1.

σ : sıcaklığa bağlı akış gerilmeleri, ρ : yoğunluk, c_p : ısı kapasitesi, T_m : ergime noktası, T : parçacık sıcaklık, A : 4 ve B : 0.25 deneysel olarak en iyi yaklaşımı veren sabit katsayılar. **Tablo 2'** de yapışma için farklı malzemelere ait kritik hızlar belirtilmektedir [33, 35, 36].



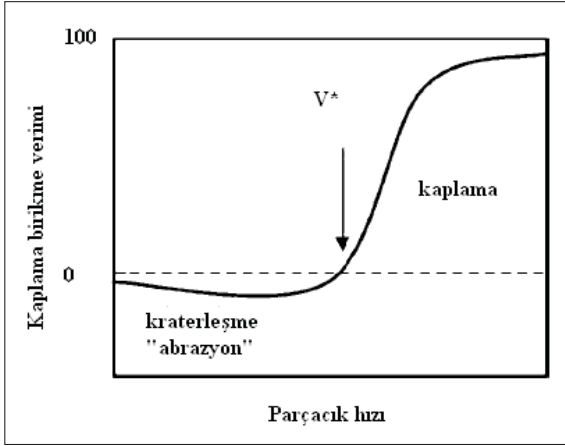
Şekil 3. Soğuk spray prosesinde kaplama oluşumu



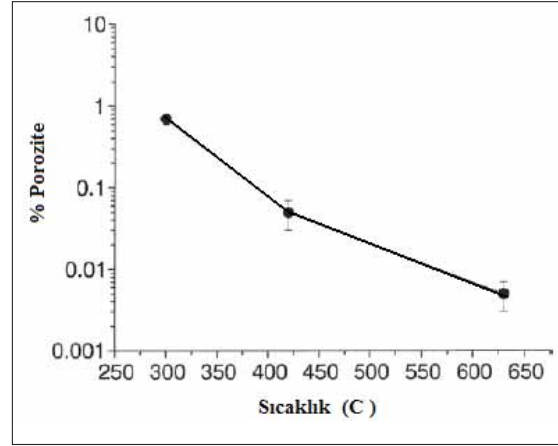
Şekil 3. Soğuk spray prosesinde kaplama oluşumu (devam)

Tablo 2. Metalik tozların yüzey yapışabilmesi için kritik çarpma hızları (V^*) [33, 35, 36].

Malzeme	Ergime Noktası, °C	Kritik Hız (V^*), m/sn
Alüminyum, Al	660	620-660
Titanyum, Ti	1670	700-890
Kalay, Sn	232	160-180
Çinko, Zn	420	360-380
Paslanmaz Çelik (316L)	1400	700-750
Bakır, Cu	1084	460-500
Nikel, Ni	1455	610-680
Tantalyum, Ta	2996	490-550



Şekil 4. Kaplama oluşum sürecinde parçacık hızı ile birikme verimi ilişkisi [3, 32, 33].

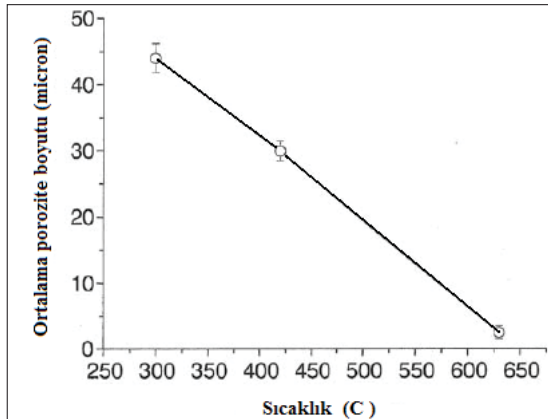
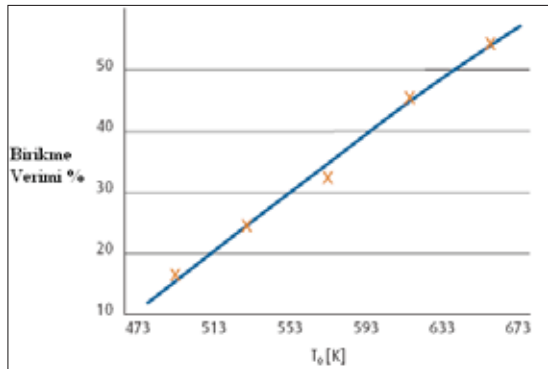


Şekil 5. Soğuk sprej prosesinde gaz sıcaklığının Cu esaslı kaplama yapısında porozite ve birikme verimine etkisi [37]

3.3. Soğuk Sprej Proses Parametreleri ve Mikroyapıya Etkileri

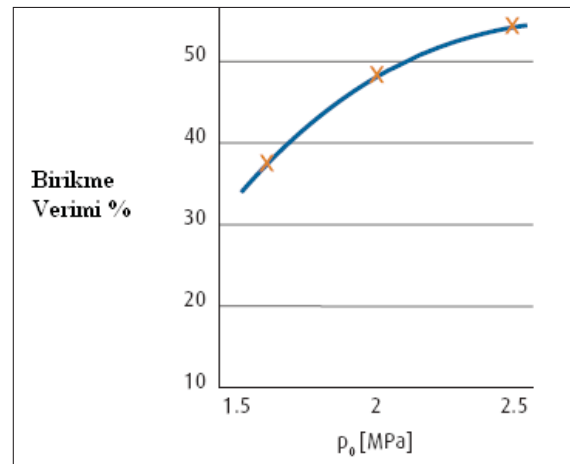
3.3.1. Gaz sıcaklığının etkisi:

Gaz sıcaklığının artması kaplama yapısında porozitenin ve porozite boyutunun azalmasına bunun yanında birikme veriminin artmasına (Şekil 5) etki etmektedir. Artan gaz sıcaklığı ile birlikte parçacıkların daha fazla deformasyonu boşlukların azalmasına yol açmaktadır [37,38].



3.3.2. Basıncın etkisi

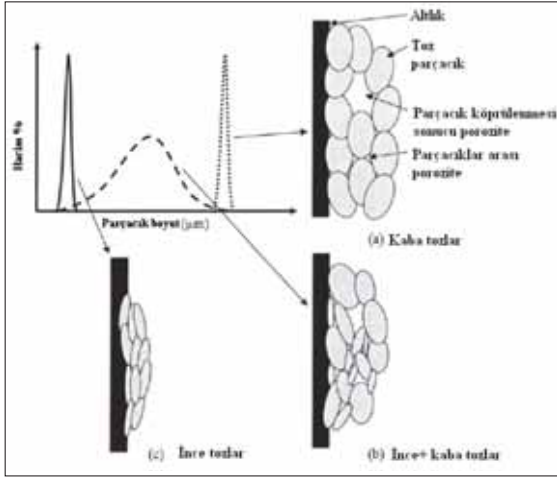
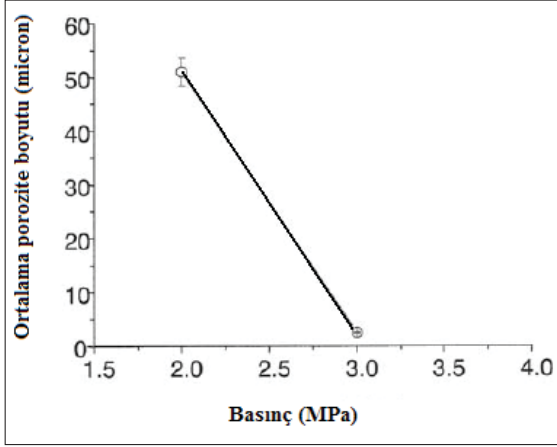
Basıncın azalması porozite boyutunun ve oranının artmasına neden olmaktadır (Şekil 6). Basıncın artışı parçacıkların ivmelenme hızını düşürmektedir. Kinetik enerjinin azalması ile deformasyon azalmakta ve bunun sonucunda da porozite boyut ve oranında artış gözlenmektedir. Toz boyut artışı tozun yeterli deformasyonunu sağlayacak hıza ulaşmasını sınırlamaktadır. Toz boyut dağılımı porozite açısından oldukça önem taşımaktadır. Toz boyut dağılımına bağlı olarak iki tür porozite oluşumu söz konusudur. Bunlar parçacık köprülenmesi sonucu porozite oluşumu ve parçacıklar arası porozitedir. Bunun yanında basınç artışı ile birikme verimi artmaktadır [37,38].



Şekil 6. Soğuk sprej prosesinde gaz basıncının birikme verimine etkisi [38]

3.3.3. Toz boyutunun etkisi

Farklı boyutlarda (18-28 μ m) Cu esaslı tozlar Al altlık üzerine 300 °C'de 3 MPa basınç ile kaplama işlemi sonrasında porozite miktarı incelendiğinde (Şekil 7). Toz boyutu azaldıkça kaplama yapısında porozite oranı ve por boyutu azalmaktadır [37,38].

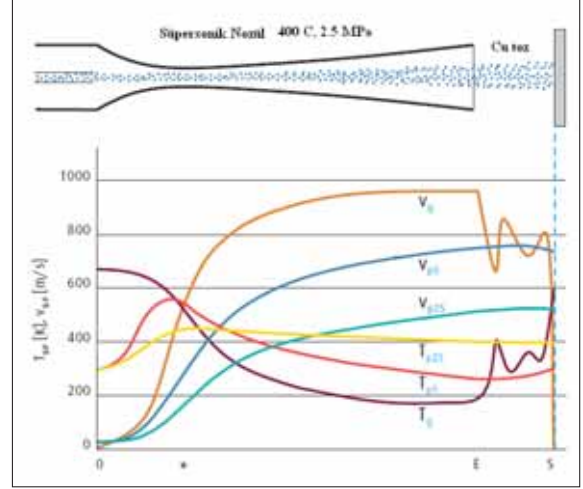


Şekil 7. Toz boyutunun poroziteye etkisi [37]

3.3.4. Nozül geometrisinin etkisi

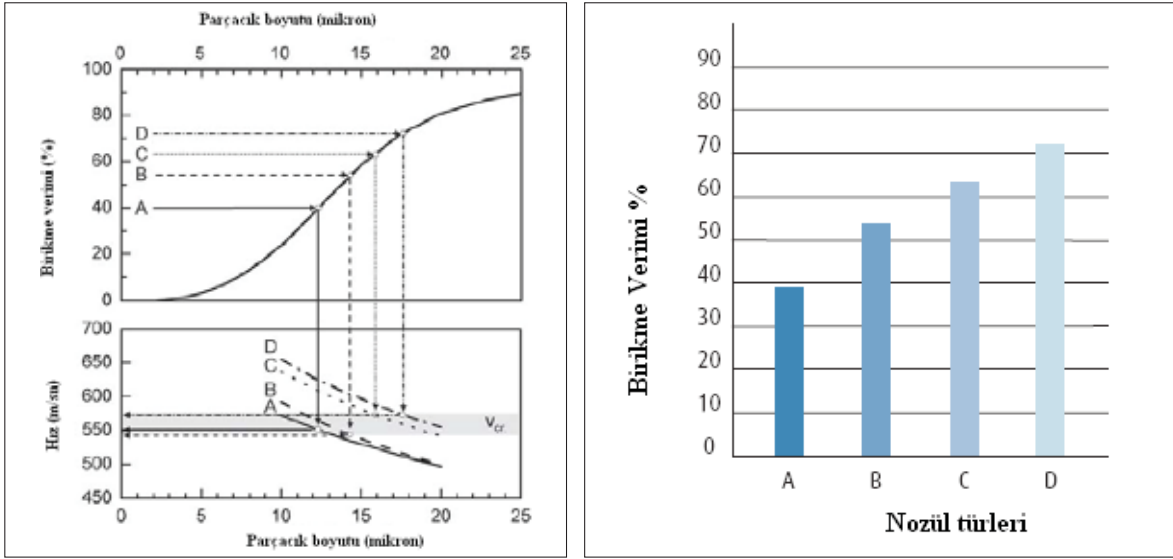
Standart trompet şeklinde bir nozül içerisinde proses gaz, parçacık hızları ve sıcaklıklarının değişimi CFD (Computational Fluid Dynamics) programı kullanılarak değişim Şekil 8'de sergilenmektedir. V_{p5}, T_{p5} : 5 μ m boyutlu bakır toz hız ve sıcaklığı, V_{p25}, T_{p25} : 25 μ m boyutlu bakır toz hızı ve sıcaklığı, T_g ve V_g sırasıyla gaz sıcaklık ve hızları olarak belirtilmektedir. Yapılan hesaplamalara göre farklı boyutlardaki bakır parçacıklar arasında küçük boyutlu olanları daha yüksek hıza sahiptir. Parçacık sıcaklıkları küçük boyutlularda divergent bölgesinden çıktığı hızla artmakta ve ardından hızla düşmektedir. Gaz sıcaklıkları

nozül boyunca düşme gösterirken, gaz hızları nozül çıkışına kadar artmakta sonrasında serbest jet akışında basınç şokları nedeniyle düzensiz bir forma girmektedir [37,38].

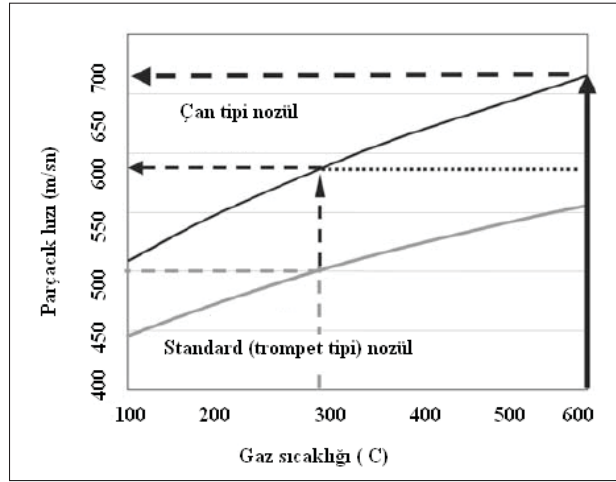


Şekil 8. Nozül içerisinde proses gaz, parçacık hızları ve sıcaklıklarının değişimi CFD programı kullanılarak değişimi [38]

Bakır tozlar (5-25 μ m) ile soğuk sprej prosesi üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda nozül geometrisine (A,B,C,D) bağlı olarak 30 bar basınçta N₂ gazı 300 °C'de ısıtılmak suretiyle parçacık hızı ve birikme verimi Şekil 9'da gösterilmektedir. A tipi nozül: trompet şeklinde, en küçük çapı 2.7 mm, dışa açılan boyun uzunluğu 70 mm, genişleme oranı:5.8, B tipi nozül:trompet şeklinde en küçük çapı 2.7 mm, dışa açılan (divergent) uzunluğu 70 mm, genişleme oranı:8.8 (standar nozül), C tipi nozül: çan şeklinde en küçük çapı 2.7 mm, dışa açılan (divergent) uzunluğu 100 mm, genişleme oranı:5.8, D tipi nozül: en küçük çapı 2.7 mm, dışa açılan (divergent) uzunluğu 100 mm, genişleme oranı:8.8 tasarlanan nozül geometrileri arasında temel farklılık genişleme oranı ve divergent uzunluğudur. Proses koşullarına bağlı olarak bakır tozların yapışması için yaklaşık 550 m/sn hızlarda püskürtülmesi gerektiği kabul edilmiştir. Buna bağlı olarak Şekil 9'dan görüleceği üzere çan tipi nozül ile parçacıklar daha yüksek hızlara çıkarılabilmektedir. Dolayısıyla birikme verimi de artmaktadır. Gaz sıcaklığının artması da parçacık hızını artırmaktadır (Şekil 10) [3, 38].

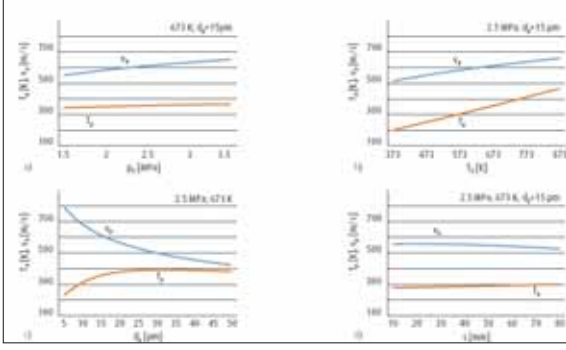


Şekil 9. Soğuk sprey prosesinde nozül geometrisinin parçacık hızına ve birikme verimine etkisi [3, 38]



Şekil 10. Soğuk sprey prosesinde nozül tipinin parçacık hızına etkisi [3]

Şekil 11' de Cu tozların nozül içerisinde hızları ve sıcaklıklarının değişimine, basıncın, gaz sıcaklığının, toz boyutunun ve sprey mesafesinin etkisi sergilenmektedir. Görüleceği üzere gaz basıncının ve sıcaklığının artışıyla birlikte parçacık hızı artmaktadır. Gaz basıncının artışı aynı zamanda parçacık sıcaklığında artış parçacıkların deformasyonuna yardımcı olmaktadır. Toz boyutu 3 μm altında olması haliden çok yüksek hızlara ulaşmaktadır. Toz boyutu arttıkça görüleceği üzere parçacık hızları düşmektedir. 80 mm 'ye kadar sprey mesafesi program dahilinde optimum bir yaklaşım göstermektedir. Daha fazlasında saçılmalar artmaktadır [37, 38].

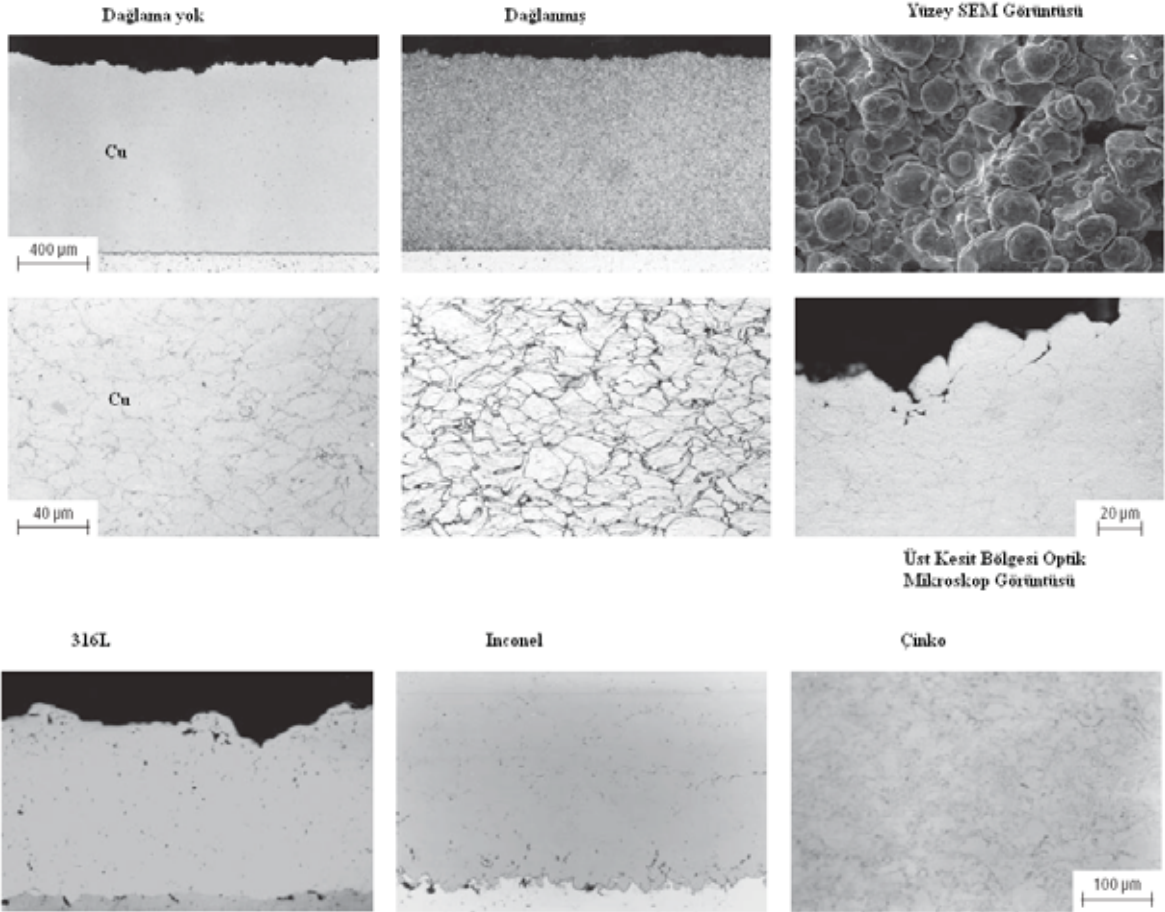


Şekil 11. Cu tozların nozul içerisinde hızları ve sıcaklıklarının değişimi a. basıncın etkisi, b. gaz sıcaklığı etkisi, c. toz boyutu etkisi d. spreyn mesafesi etkisi [38]

4. Kaplama Tozları ve Uygulama Alanları




Soğuk spreyn prosesinde kullanılan kaplama malzemeleri (**Tablo 3.**) metal ve alaşımları, sermetler, kompozitler ve

polimer esaslı malzemelerdir. Sistem üreticileri tarafından endüstriyel açıdan yaygın olarak kullanılan malzemeler: WC-Co, CrC-NiCr, Al, Cu, Al_2O_3 , SiO_2 , SiC, Ni, Cr, Fe, B, C, Ti, Cr_2O_3 , Zn, B_2O_3 , TiO_2 , WC, ZnB2, $(TiB_2+Ni+MoS_2)$, $(Ti+Ni)$, $(TiC+Ni+MoS_2)$, (TiB_2+Ni) , (C, Co, Fe, W), (C, Cr, Ni), (Al, Ni), (Al, Hf, Fe, Mg, Si, Ti, Y, Zr), epoksi reçineler, poliüretan ve bir çok termoplastik malzemeler olup altlık malzeme olarak metal ve alaşımlar, seramikler, cam, kağıt ve polimerler kullanılabilir. (Rus Sonic Tech. Inc., SST Inc., CGT Inc.). İkili alaşım türleri 5-50 μm aralığında gaz atomizasyonu tekniği ile birlikte üretilmektedir Bunlar: Fe-Ni, Fe-Co, Fe-Cr, Fe-Si, Ni-Cr, Ni-Cu, Cu-Sn, Cu-Al, 304L, 316L, 430L, 440C, IN625, In718 alaşım tozlarıdır (Sandvik Osprey Inc.). Gaz atomizasyon tekniği ile üretilen tozlar sulu atomizasyona göre daha düşük oksijen içerir. Yapılan çalışmalarda oksijen içeriği az olan tozlarda çarpma hızını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür [42]. **Şekil 12'**de farklı metal ve alaşımlara ait mikro yapı örnekleri sergilenmektedir [38].



Şekil 12. Soğuk spreyn ile kaplanmış farklı metal ve alaşım kaplamalarının mikroyapı görüntüleri [38]

Tablo 3. Kaplama Malzemeleri ve Uygulamaları [35-54]

Kaplama Malzemesi	Uygulama Amaçları	Altlık Malzeme	Proses Parametre
*Alüminyum (Al)[32] Magnezyum (Mg) [45]	Korozyon koruma Parça tamir Kalıp tamir Boyutsal restorasyon Bağ kaplama Lehim kaplama EMI	Çelik, Alüminyum ve Magnezyum Alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 300-500C Tabanca Basıncı:5.8-8. bar Toz Besleme: 30-60% Sprey Mesafesi: 10-25 mm
			
*Bakır (Cu) [46]	Parça tamir Elektriksel ve termal iletkenlik gereksinimi	Bakır ve Alaşım Çeşitli tür altlık	Gaz Sıcaklığı: 450-500C Tabanca Basıncı: 6.9-8.2 bar Toz Besleme: 30-60% Sprey Mesafesi: 10-25 mm
*Paslanmaz Çelik[53]	Parça tamir Kalıp tamir	Çelik ve Alüminyum Alaşımları	
*Çinko (Zn) [54]	Kalıp tamir Korozyon koruma Elektriksel iletkenlik gereksinimi Baskı merdaneleri	Alüminyum Çinko Alaşımları Cam Çelik	Gaz Sıcaklığı: 375-475C Tabanca Basıncı: 5.8-7.6 bar Toz Besleme: 30-60% Sprey Mesafesi: 10-25 mm
*Kalay (Sn) [53]	Korozyon koruma İletkenlik gereksinimi	Bakır ve Alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 175-250C Tabanca Basıncı:5.8-7.6 bar Toz Besleme: 30-60% Sprey Mesafesi: 10-25 mm
Titanyum (Ti) ve Alaşımları [19, 43-44]	Biyouyum, korozyon direnci	Titanyum ve alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 520 C Tabanca Basıncı 2.8 bar Sprey Mesafesi: 30 mm
			
Al-Al₂O₃ Al-SiC [47-49]	Yüzey Direnci Aşınma direnci Sertlik	Alüminyum ve Magnezyum Alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 100-200 C Tabanca Basıncı 6.2 bar Sprey Mesafesi: 10-15 mm
W-Cu [40]	İletkenlik	Alüminyum ve Bakır Alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 270 C Basıncı: 37 MPa Sprey Mesafesi: 10 mm
HAP [42] Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂	Biyouyumluluk	Ti alaşımları	Gaz Sıcaklığı: 400-700 C Sprey Mesafesi: 10-25 mm
 <p style="text-align: right;">*Supersonic Spray Tech. (SST) uygulamaları</p>			
NiCr [51] MCrAlY [52]	Sıcak korozyon direnci Oksidasyon direnci		Gaz türbin motor parçaları, türbin kanatları

5. Soğuk Sprey Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları

Termal sprej uygulamalarında kullanılan enerji kaynağının soğuk sprej prosesinde bulunmaması nedeniyle proses bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu konular aşağıda açıklanmıştır.

a) Soğuk Sprej Prosesinin Avantajları:

- Düşük porozite, iyi yapışma: %0,5'den düşük oksit içeren, çok yoğun (düşük poroziteli) kaplamalar yüksek hızda püskürtme etkisiyle de yüzeye iyi yapışmış olarak elde edilebilmektedir.
- Homojen mikroyapı: düşük sıcaklıkta bir proses olması nedeniyle kimyasal bir değişim söz konusu olmadan diğer proseslere göre çok düşük gerilmeler içeren, bir mikroyapı oluşumuna olanak tanımaktadır. Çözünme, tane büyümesi, kristalizasyon, faz dönüşümü, artık gerilme, element kaybı söz konusu değildir.
- Düzgün yüzey: kumlama gereksinimi olmaksızın, soğuk sprej prosesi ile çok iyi yüzey düzgünlüğüne sahip kaplamalar üretmek mümkündür. Rahatlıkla boya veya astar uygulamaları yüzeye yapılabilir.
- Oksitsiz kaplama: Oksijen ilgisi yüksek reaktif elementler için hızlı püskürtme sayesinde oksit oluşumu elimine edilebilmektedir. Özellikle korozyon uygulamalarında önemli bir avantaj teşkil etmektedir.
- Proses emniyeti: uygulama açısından düşük ısı girdisi sayesinde pratik uygulama avantajı oldukça yüksek ve güvenilir bir prosesdir.
- Çevredostu proses: proses esnasında etrafa zehirli bir gaz veya kimyasal bir reaksiyon ürünü çıkmaması nedeniyle çevre dostu bir prosesdir.
- Altlık/kaplama seçeneği yüksek: çok çeşitli kaplamalar bir çok altlık (metal, cam, beton, seramik, taş) türü üzerinde biriktirebilmektedir. Demir dışı alaşım kaplamaların demir ve çelik esaslı altlıklar üzerine kaplanması, çeşitli metalik kaplamaların demir dışı metaller, seramikler ve cam altlıklar üzerine kaplanması, iletken kaplamaların elastomerik altlıklar üzerine kaplanması, birbirinden farklı tozlardan oluşan karışım kombinasyonlarının çeşitli altlıklar üzerine kaplanması. Altlık üzerinde yüksek bir ısı girdisi olmaması önemli bir avantajdır.
- Proses kabiliyeti yüksek: yüzey hazırlığı, sistemi kaplamaya hazır hale getirmek çok kısa bir zaman almaktadır. Isı girdisi yüksek olmadığı için soğutma gereksinim bulunmamaktadır. Yüksek birikme verimi ile çalışmaktadır. Proseste inert gaz kullanarak ultra

safılıkta kaplama üretmek mümkündür. Maskeleme gereksinim azdır.

- Teknolojik gelişim: bir çok uygulama sahasına alternatif ekonomik ve başarılı bir çözüm getirme olasılığı yüksektir.

b) Soğuk Sprej Prosesinin Dezavantajları:

- Sert malzemelerin kaplanması mutlak bir bağlayıcı gereksinim bulunmaktadır.
- Çok sünek malzemelerde yapışma özelliği zayıflamaktadır
- Gaz sarfiyatı fazladır. Her kullanılması maliyeti artırmaktadır.
- Standartlaşmış bilgi birikimi üzerinde çalışmalar sürmektedir.

6. SONUÇ

Termal sprej ailesine yeni katılan soğuk sprej prosesi, diğer ısısal püskürtme tekniklerinden kaplama tozlarının ergitilmesinde ekstra bir enerji kaynağına ihtiyaç göstermemesiyle ayrılmaktadır. Kaplama uygulamasında kullanılan yüksek püskürtme hızlarıyla üretilen kinetik enerji yardımıyla püskürtülen tozlar plastik deformasyonla yüzeye biriktirilmekte olup kaplamalar üretilmektedir. Günümüzde soğuk sprej teknolojisiyle düşük ergime noktasına sahip metaller başarıyla püskürtülmektedir. Soğuk sprej kaplama teknolojisinin gelecekte daha da yaygınlaşacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] PAWLOWSKI L., The science and engineering of thermal spray coatings, Wiley NY, 1995.
- [2] KREYE H., GÄRTNER F., RİCHTER H.J., High Velocity Oxy-Fuel Flame Spraying: State of the Art, New Developments and Alternatives, Proc. 6. Kolloquium Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen, P. Heinrich, Ed., Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V., Unterschleißheim, Germany, 2003, 5-17.
- [3] GÄRTNER F., Stoltenhoff T., SCHMIDT T., KREYE H., The Cold spray process and its potential for industrial applications, Journal of Thermal Spray Technology Volume 15(2), 2006—223-232.
- [4] ALKHİMOV A.P., KOSAREV V.F., NESTEROVİCH N.I., PAPYRİN A.N., Method of Applying Coatings, Russian Patent 1618778, Sept 8, 1990, priority of the invention June 6, 1986.
- [5] ALKHİMOV A.P., PAPYRİN A.N., KOSAREV V.F., NESTEROVİCH N.I., SHUSHPANOV M.M., Gas-Dynamic Spray Method for Applying a Coating, U.S. Patent 5,302,414, April 12, 1994.

- [6] ALKHİMOV A.P., KOSAREV V.F., POPYRİN A.N., A Method of Cold Gas-Dynamic Deposition, *Sov. Phys. Dokl.*, 35(12), 1990, 1047-1049.
- [7] KLASSEN T., KLIEMANN J.O., ONIZOWA K., DONNER K., GUTZMAN H., BINDER K., SCHIMIDT T., GARTNER F., KREYE H., Cold spraying-new developments and application potential, 8. Kolloquium HVOF Spraying, Erding, Germany, 5-6 Nov., 2009, 17-26.
- [8] DAVIS J.R.(ed.), *Cold Spray Process, Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM International: Materials Park, OH, 06994G, 2004, 77-84, 211-212
- [9] KROMMER W., HEINRICH P., KREYE H., High velocity oxy-fuel flame spraying: past-present-futurre, 8. Kolloquium HVOF Spraying, Erding, Germany, 5-6 Nov., 2009, 9-16.
- [10] ZHAO Z.B., GİLLİSPİE B.A., SMİTH, J.R., Coating deposition by the kinetic spray process, *Surface and Coatings Technology* 200, 2006, 4746 – 4754.
- [11] MCCUNE R.C., POPYRİN A.N., HALL J.N., RİGGS W.L., ZACHOWSKI P.H., in: C.C. Berndt, S. Sampath (Eds.), *An Exploration of the Cold Gas-Dynamics Spray Method for Several Materials Systems, Thermal Spray Science and Technology*, ASM International, 1995, p. 105.
- [12] MCCUNE R.C., DONLON W.T., POPOOLA O.O., CARTWRIGHT E.L., Characterization of copper layers produced by cold gas-dynamic spraying, *J. Therm. Spray* 9, 2000, 73-82.
- [13] GILMORE D.L., DYHUIZEN R.C., NEISER R.A., ROEMER T.J., SMITH M.F., Particle velocity and deposition efficiency in the cold spray processes, *J. Thermal Spray Tec.*, 8, 1999, 576-582.
- [14] STOLTENHOFF T., BORCHERS C., GARTNER F., KREYE H., Microstructures and key properties of cold sprayed and thermal sprayed copper coatings, *Surf. And Coat. Tec.* 200, 2006, 4947-4960.
- [15] ALKHİMOV AP, POPYRİN AN., KOSAREV, V.F., NESTEROVİCH, N.L, SHUSHPANOV, M.M. Gas-dynamic spraying method for applying a coating. US Patent 5,302,414, Apr. 12, 1994.
- [16] ALKHİMOV A.P., KOSAREV V.F., POPYRİN A.N., A method of cold gas dynamic spraying, *Sov. Phys. Dokl.* 35, 1990, 1047–1049.
- [17] VAN STEENKİSTE T. H., SMİTH J. R., TEETS R. E., MOLESKİ J. J., GORKIEWİCZ D. W., TİSON R. P., MARANTZ D. R., KOWALSKY K. A., RİGGS W. L., ZAJCHOWSKİ P. H., PİLSNER B., MCCUNE R. C., BARNETT K. J., Kinetic spray coatings *Surface and Coatings Technology*, Volume 111, Issue 1, 10, 1999, 62-71.
- [18] KİM H.-J., LEE C.-H., HWANG S.-Y., Superhard nano WC-12%Co coating by cold spray deposition, *Materials Science and Engineering A*, 391 (1-2), 2005, 243-248.
- [19] KARTHIKEYAN J., KAY C.M., LİNDEMAN, J., LİMA R.S., BERNDT C.C., Cold spray processing of titanium powder In: C.C. Berndt, Editors, *Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research*, ASM International, USA, 2000, 255–262
- [20] VLCEK J., GİMENO L., HUBER H., LUGSCHEİDER E., A systematic approach to material eligibility for the cold spray process In: B.R. Marple and C. Moreau, Editors, *Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology*, ASM International, USA, 2003, 37–44.
- [21] IRİSSOU E., LEGOUX J.-G., ARSENAULT B., MOREAU C., Investigation of Al-Al₂O₃ cold spray coating formation and properties, *J. Therm. Spray Technol.* 16, 2007, 661-668.
- [22] SANSOUY E., MARCOUX, P., AJDELSZTAJN L., JODOİN B., Properties of SiC-reinforced aluminum alloy coatings produced by the cold gas dynamic spraying process, *Surf. Coat. Technol.* 202, 2008, 3988-3996.
- [23] Lİ W.Y., ZHANG G., LİAO H.L., CODDET C., Characterizations of cold sprayed TiN particle reinforced Al2319 composite coating *J. Mater. Process. Technol.* 202 2008, 508-513.
- [24] XU Y., HUTCHINGS I.M., Cold spray deposition of thermoplastic powder *Surface and Coatings Technology*, Volume 201, Issue 6, 4 December 2006, 3044-3050.
- [25] VİLLAFUERTE J., Current and future applications of cold spray technology *Metal Finis.*, V. 108, Issue 1, January 2010, 37-39.
- [26] KLASSEN T., KLIEMANN J.O., ONIZOWA K., DONNER K., GUTZMAN H., BINDER K., SCHIMIDT T., GARTNER F., KREYE H., Cold Spraying-new developments and application potential, 8. Kolloquium HVOF Spraying, Erding, Germany, 5-6 Nov., 2009, 17-26.
- [27] RICHTER P, BAHR E., HOLL H., Cold spray systems and components form CGT, 8. Kolloquium HVOF Spraying, Erding, Germany, 5-6 Nov., 2009, 95-100.
- [28] GHELİCİ R., GUAGLIANO M. Coating by the cold spray process: a state of the art, R. Ghelichi et alii, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 8, 2009, 30-44.
- [29] ASSADİ H., GARTNER F. STOLTENHOFF T., KREYE H., Bonding mechanism in cold gas spraying, *Acta Materialia* 51 2003, 4379–4394.
- [30] DYKHUIZEN RC, SMİTH MF, GİLMORE DL, NEİSER RA, JİANG X, SAMPATH S., Impact of high velocity cold spray particles *J Thermal Spray Tech* 8, 1999; 559-564.
- [31] HUSSAİN T., MCCARTNEY D.G., SHİPWAY P.H., ZHANG D., Bonding mechanisms in cold spraying: the contributions of metallurgical and mechanical components, *Journal of Thermal Spray Technology* Volume 18(3) September 2009, 364-379.
- [32] ZHANG D., SHİPWAY P.H., MCCARTNEY D.G., Cold gas dynamic spraying of aluminum: the role of substrate characteristics in deposit formation, *J. Therm. Spray Technol.*, 14/1 2005, 109-116.
- [33] SCHMİDT T., ASSADİ H, GARTNER F., RİCHTER H., STOLTENHOFF T., KREYE H., KLASSEN T., From Particle acceleration to impact and bonding in cold spraying , *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 18(5-6), 2009, 794-808.
- [34] Birch W. Kinetic spray for corrosion protection and metal part restoration, *Nat. Center for Manufacturing Sciences*, 2008, 1-20.
- [35] SCHMİDT T., GARTNER F., ASSADİ H, KREYE H., Development of a generalized parameter window for cold spray deposition, *Acta Mater.*, 2006, 54, 729-742.
- [36] ASSADİ H, RİCHTER H., GARTNER F., SCHMİDT T., Particle acceleration to impact and coating formation in cold spraying, 8. Kolloquium HVOF Spraying, Erding, Germany, 5-6 Nov., 2009, 27-36.
- [37] ZAHİRİ S.H., FRASER D., GULİZİA S., JAHEDİ M., Effect of processing conditions on porosity formation in cold gas dynamic spraying of copper, *Journal of Thermal Spray Technology* , Volume 15(3), 2006, 422- 430.

- [38] STOLTENHOFF T., KREYE H., KRÖMMER W., RİCHTER H. J., Cold Spraying – from Thermal Spraying to High Kinetic Energy Spraying, Linde Gas, www.us.lindegas.com, 29.10.2010
- [39] Lİ C.-J., WANG H.-T. , ZHANG Q. , YANG G.-J., Lİ W.-Y., LİAO H. L., Influence of spray materials and their surface oxidation on the critical velocity in cold spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 19, Numbers 1-2 , 2010, 905-101.
- [40] KANG H.-K, KANG S. B., Tungsten/copper composite deposits produced by a cold spray, *Scripta Materialia*, Volume 49, Issue 12, December 2003, 1169-1174.
- [41] HELFRİTCH D.J., CHAMPAGNE V.K., TREXLER M.D., HVOF and cold spray applications in the USA, 8. Kolloquium HVOF Spraying, Erding, Germany, 5-6 Nov., 2009, 141-150.
- [42] CHOUDHURİ A., MOHANTY P. S., KARTHİKEYAN J., Bio-ceramic composite coatings by cold spray technology, *ITSC 2009*, 391-397.
- [43] ZHANG,W. Li, GUO C. X, XU J., Lİ C., LİAO H., CODDET C., KHOR K., Ti and Ti-6Al-4V Coatings by Cold Spraying and Microstructure Modification by Heat Treatment, *Adv. Eng. Mater.*, 9(5), 2007, 418-423
- [44] DOSTA S.,CCIINCA N., GARCIA J., SALİTO A., GUILLEMANY JM., Cold spray perspectives in medical engineering, 8. Kolloquium HVOF Spraying, Erding, Germany, 5-6 Nov., 2009, 151-156.
- [45] CHAMPAGNE Victor K., The Repair of Magnesium Rotorcraft Components by Cold Spray *J. of Failure Analysis and Prevention* Volume 8, Number 2 / April, 2008 164-175.
- [46] HAYNESJ., Cold Spray Copper Application for Upper Stage Rocket Engine Design, *ITSC 2003*, 79-83
- [47] SPENCER K. FABİJANIĆ, D.M., ZHANG M.-X. The use of Al-Al₂O₃ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys, *Surface and Coatings Technology*, Volume 204, Issue 3, 25 October 2009, 336-344 .
- [48] SANSOUY E., MARCOUX P., AJDELSZTAJN L., JODOİN, B., Properties of SiC-reinforced aluminum alloy coatings produced by the cold gas dynamic spraying process, *Surf. Coat. Technology*, Volume 202, Issue 16, 15 May 2008, 3988-3996.
- [49] DARGUSCH M.S., KEAY, S.M., Cold Spray of Al-MMC coatings on magnesium alloys for improved corrosion and wear resistance, *Materials Science Forum* (Volumes 618 - 619), 2009, 377-380.
- [50] BALA N., SİNGH H., PRAKASH S., Accelerated hot corrosion studies of cold spray Ni-50Cr coating on boiler steels, *Materials and Design* 31, 2010, 244-253.
- [51] RİCHER P., ZÚÑİGA A., YANDOUZİ M. JODOİN, B. CoNiCrAlY microstructural changes induced during Cold Gas Dynamic Spraying, *Surface and Coatings Technology*, Volume 203, Issues 3-4, 25 November 2008, 364-371.
- [52] ZHANG Q., Lİ C.-J., Lİ C.-X., YANG G.-J., WANG X.-R., Study of oxidation behavior of nanostructured NiCrAlY bond coatings deposited by cold spraying *Surface and Coatings Technology*, Volume 202, Issue 14, 2008, 3378-3384.
- [53] *Handbook of Thermal Spray Technology, Cold Spray Process*, 77-84. http://www.asminternational.org/pdf/spotlights/cold_spray.pdf 29.10.2010.
- [54] MCCUNE R.C., Potential Applications of Cold-Spray Technology in Automotive Manufacturing, *Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology*, C. Moreau and B. Marple, Ed., ASM International, 2003, 63-70