

# Soğuk Püskürtme Teknolojisi ve Uygulamaları

Elif Tekin<sup>1</sup>, Serden Uyum<sup>2</sup>, Buğra Karahan<sup>3</sup>, Kadir Cihan Tekin<sup>4</sup>, Uğur Malayoğlu<sup>5\*</sup>

## ÖZ

Soğuk püskürtme, katı tozların yakınsak/ıraksak türde bir nozul vasıtasıyla altlığa doğru hızlandırıldığı bir katı hal biriktirme işlemidir. Kaplama birikimi püskürtülen parçacıkları ertmeden gerçekleşir. Püskürtülen parçacıklar yüksek kinetik enerjiye sahip olduğu için çarpma esnasında altlığa yapışır. Başarılı bir yapışma sağlamak için toz parçacıkların, kendi malzeme özelliklerine bağlı olan kritik hız değerini çarpma esnasında aşması gereklidir. Metaller, seramikler, kompozitler ve polimerler gibi farklı malzemeler soğuk püskürtme kullanılarak biriktirilebilir. Soğuk püskürtme, yüzey kaplaması elde etmek için yeni ve gelecek vaat eden bir teknolojidir ve biriktirme için termal enerji yerine kinetik enerji kullandığından termal püskürtmeye göre çeşitli teknolojik avantajlar sunar. Sonuç olarak, kalıntı gerilmeler, oksidasyon ve istenmeyen kimyasal reaksiyonlar önlenebilir. Soğuk püskürtme teknolojisi endüstride birçok uygulama alanına sahiptir. Birçok endüstride kullanılan bileşenlerin korunması ve onarımı amacıyla geliştirilmiştir. Son yıllarda soğuk püskürtme işlemi elektronik sistemlerin tamiri, eklemeli imalat, kaynak, sert lehimleme, yüzey koruma, tıbbi cihazlar ve tıbbi malzemeler gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bu çalışma, soğuk püskürtme işleminin tarihsel gelişimini, temel ilkelerini ve özelliklerini, yapışma mekanizmasını ve endüstriyel uygulama alanlarını kısaca gözden geçirerek soğuk püskürtme işlemini özetlemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Soğuk püskürtme, kaplama, kritik hız, aşınma, korozyon

## Cold Spray Technology and its Applications

### ABSTRACT

Cold spray (CS) is a solid-state deposition process in which solid powders are accelerated towards the substrate via a converging/diverging nozzle. Coating deposition occurs without melting the sprayed particles. Spray particles adhere to the substrate on impact because of their high kinetic energy. For successful bonding, powder particles have to exceed a critical velocity on impact, which is dependent on the properties of the particular spray material. Different materials such as metals, ceramics, composites and polymers can be deposited using CS. CS is a novel and promising technology to obtain surface coating, offering several technological advantages over thermal spray since it utilizes kinetic energy rather than thermal energy for deposition. As a result, residual stresses, oxidation and undesired chemical reactions can be avoided. Cold spray technology has many applications in the industry. It has been developed for the protection and repair of components used in many industries. In recent years, cold spray process has been used in application fields such as repair of electronic systems, additive manufacturing, welding, brazing, surface protection, medical devices, and medical materials. This study summarizes the cold spray process by briefly reviewing the historical development, basic principles and features, adhesion mechanism and application areas of the cold spray process.

**Keywords:** Cold spray, coating, critical velocity, wear, corrosion

\* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 28.09.2020

Kabul/Accepted : 04.01.2021

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir elif\_elden@hotmail.com.tr, ORCID: 0000-0001-9162-7172

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir serden.uyum@ogr.deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1120-4709

<sup>3</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir karahanbugra@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8053-056X

<sup>4</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İzmir kadir.tekin@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7507-6550

<sup>5</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İzmir ugur.malayoglu@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-3196-1475

## EXTENDED ABSTRACT

Cold spray is a unique manufacturing technology that allows many metals to be deposited quickly on substrates at temperatures below their melting points. In the cold spray process, the particles are accelerated by the supersonic gas jet at a temperature always lower than the melting point of the powder material and the coating is formed from the particles at solid state. As a result, the harmful effects of high temperature oxidation, evaporation, melting, crystallization, residual stresses, debonding, harmful gas release, and other common problems observed in conventional thermal spray methods are minimized or eliminated. Eliminating the detrimental effects of high temperature on coatings and surfaces offers significant advantages and new possibilities and makes cold spray promising for many industrial applications.

In the cold spray method, solid powder particles with a diameter of 5-100  $\mu\text{m}$  are raised to velocities between 300-1200 m/s in a preheated supersonic gas jet and deposited on a hard substrate such as metal, ceramic or glass. In order to achieve good adhesion to the substrate, the particle velocity must exceed the minimum critical velocity value that will create hydrodynamic shear instability at the adhesion interface. If the impact velocity is too low, the particles will bounce off the substrate surface and erode the surface as in the sandblasting process, or some particles will only physically embed into the surface. The minimum impact velocity required to achieve hydrodynamic shear instability in cold spray is called the critical velocity. If the powder particles exceed the critical velocity and the powder material composition is suitable for the process, the powder particles are exposed to adiabatic heating when the impact occurs and deform plastically under very high shear deformation rate. As a result, they become flat and adhere to the substrate surface. The critical velocity value varies considerably when using different powder materials. In addition, the properties and process parameters of the material being sprayed can affect the critical velocity. As a result of the studies carried out, it was stated that as the substrate temperature, particle temperature or particle size increased, the formation of adiabatic shear instability became easier, and as a result, it was found that the critical velocity value decreased.

Cold spray is divided into two categories, low- and high-pressure methods, according to the way the powder material is injected into the nozzle throat. In low-pressure cold spray, generally air or nitrogen gas with a relatively low pressure (0.5-1 MPa) is preheated in the gas heater and forced into a convergent/divergent type nozzle. Gas passing through the nozzle throat reaches a velocity in the range of 300-600 m/s in the supersonic divergent cross section. Meanwhile, solid powder particles are radially inserted from the powder feed unit to the divergent section close to the nozzle throat and are accelerated through the nozzle towards the substrate. In high pressure cold spray, high pressure air, nitrogen, helium gas or a mixture of these are first compressed to a pressure in the range of 1-4 MPa and then flows through the system in two different ways. In the first path, high pressure gas passes through the powder feeder to transport the particles to the spray gun. In the second path, the high-pressure gas passes through the electric gas heater and is preheated up to a temperature of about 1100 °C. This provides an additional increase in gas velocity and consequently the particle velocity is increased. Two separate paths converge near the nozzle inlet. In the final stage, powder particles reach supersonic velocities, exit the gun nozzle, and impact on the substrate to form a coating.

The main advantages of high-pressure cold spray over low-pressure cold spray are being able to select a larger number of materials and achieve higher deposition quality. In the low-pressure cold spray process, the powder deposition efficiency is less since the number of particles exceeding the critical velocity is low. While the deposition efficiency of up to 90% is provided in the high-pressure system, the deposition efficiency of only less than 50% can be achieved in the low-pressure system. The low-pressure cold spray system is more flexible, portable and cost effective compared to the high-pressure system. Thanks to its portability, coating can be applied to repair parts at the workplace without the need to disassemble components. On the other hand, investment costs for high pressure cold spray equipment are high and it



may not be possible to apply coating on the parts on-site since industrially produced systems do not have dimensions suitable for transportation.

Cold spray coating technology has been developed to protect and repair components used in many industries. These industries include aviation, automotive, transportation, casting, petrochemical facilities, mining, metal processing, electronics, marine, ceramic and glass production. The thickness of the cold spray coating has virtually no limitations for most metal and metal matrix composites. Considering this fact, it has been successfully applied in recent years as additive manufacturing technology to manufacture solid components and repair damaged parts. This development significantly expands the areas of cold spray technology. Cold spray technology, a new member of the additive manufacturing family, has great potential to produce components with circular structures such as cylinder walls and flanges. It also allows the production of structures with complex geometries by using well-designed masks or molds.

Cold spray technology continues to be developed to meet the needs of applications with high performance requirements. This review summarizes the information about cold spray by briefly reviewing the historical development, basic principles and properties, adhesion mechanism and applications of the cold spray process. It also provides an overview of recent and emerging developments in the process and the potential of this technology.



## 1. GİRİŞ

Soğuk püskürtme, birçok metalin ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda altlık parçaların üzerine hızlıca biriktirilmesine imkân tanıyan yegâne imalat teknolojisidir. Daha önceden, metal malzemelerin altlık üzerine biriktirilmesi için metalin kimyasal bir banyoda çözünmesi (katodik biriktirme), yüksek sıcaklıkta ergitilmesi (termal püskürtme kaplama) veya buharlaştırılması (buhar biriktirme) gerekirken, artık günümüzde, uygun koşullar sağlandığında, soğuk püskürtmeyle metaller katı haldeyken altlık üzerine hızlıca biriktirilebilmekte ve diğer yöntemlere kıyasla yüksek sıcaklık ihtiyacı olmadığından metal malzemenin kimyasal ve faz bileşiminde istenmeyen değişimler yaşanmamaktadır. Soğuk püskürtme işleminde toz parçacıkları, malzemenin ergime noktasından daima daha düşük bir sıcaklıkta süpersonik gaz jeti ile hızlandırılır ve katı haldeki parçacıklardan kaplama oluşumu sağlar. Sonuç olarak, geleneksel termal püskürtme yöntemlerinde gözlenen yüksek sıcaklıkta oksidasyon, buharlaşma, erime, kristalleşme, artık gerilmeler, sıyrılma, zararlı gaz salınımı ve diğer yaygın sorunların zararlı etkileri en aza indirilir veya ortadan kaldırılır.

Soğuk püskürtme kaplama teknolojisi birçok endüstride kullanılan bileşenlerin korunmasını ve onarımını sağlamak üzere geliştirilmiştir. Bu endüstriler içerisinde havacılık, otomotiv, ulaşım, döküm, petrokimya tesisleri, maden ve metal işleme, elektronik, denizcilik, seramik ve cam üretimi bulunmaktadır. Soğuk püskürtme kaplamanın kalınlığı, çoğu metal ve metal matrisli kompozit için neredeyse hiçbir sınırlamaya sahip değildir. Bu gerçeği göz önünde bulundurarak, son yıllarda yekpare bileşenleri üretmek ve hasarlı olanları onarmak için eklemeli imalat teknolojisi olarak başarıyla uygulanmıştır. Bu gelişme, geleneksel eklemeli imalat teknolojilerine yeni bir ışık tutmakta ve soğuk püskürtme uygulama alanlarını önemli ölçüde genişletmektedir.

Yüksek performans gereksinimi olan uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için soğuk püskürtme teknolojisi geliştirilmeye devam etmektedir. Bu çalışma, soğuk püskürtme kaplama sürecinin tarihsel gelişimini, temel ilkelerini ve özelliklerini, yapışma mekanizmasını ve uygulamalarını kısaca gözden geçirerek soğuk püskürtme hakkındaki bilgileri özetlemektedir. Aynı zamanda süreçteki son ve yeni ortaya çıkan gelişmelere ve bu teknolojinin potansiyeline genel bir bakış sağlamaktadır.

## 2. TARİHSEL GELİŞİMİ

Günümüzde soğuk püskürtme işleminin 1980'lerde Rusya'da yapılan araştırmalarla başladığı yaygın olarak kabul edilmesine rağmen, yaklaşık yirminci yüzyılın başlarından itibaren bu işlem hakkında bahsedilen birkaç patentin alındığı bilinmektedir. 1902 yılında Thurston [1] tarafından bir metali diğerinin üzerine uygulayan bir yöntem hakkında patent alınmıştır. Bu yöntemde, metal parçacıklar, parçacıkların metal yüzeyine gömülmesine ve kalıcı bir kaplama oluşturmasına neden olacak kuvvetteki basınçlı



gaz patlamasıyla, metal sac üzerine atılır. Kullanılan aygıtta, bir hazne içerisine, hava borusuyla basınçlı hava girişi ve huni vasıtasıyla da metal parçacıkların beslemesi yapılır. Gaz basıncının etkisiyle parçacıklar haznenin ucunda bulunan nozul içerisinden itilir ve altlık yüzeyine kaplanır. Yapılan çalışmada kaplama metali olarak bakır ve alüminyum, altlık metal olarak ise demir ve çelik kullanıldığı belirtilmiştir. Yakınsak/ıraksak nozul kullanılmadığından itici gazın düşük hızlara ulaşması sebebiyle bu yöntemin ancak yüksek süneklığe sahip ve nispeten yumuşak metallerin kaplanmasına izin verdiği sonucu çıkarılabilir. Buna eşlik eden diğer bir patentte Thurston [2], kaplanacak metalin ısıtılmasıyla bu yöntemin iyileştirildiğini açıklamıştır. Her ne kadar altlığın ısıtılması metal parçacıkların birikmesini kolaylaştırırsa da mevcut buluşun sınırlı kaplama yeteneğine sahip olduğu öngörülmektedir.

Metal parçacıkların altlık üzerine çarpma hızı arttıkça daha iyi özelliklere sahip kaplamalar üretildiği bilinmektedir. Thurston'ın çalışmasından 50 yılı aşkın süre geçtikten sonra, Rocheville [3] ilk defa yakınsak/ıraksak bir nozul kullanarak yüksek basınçlı hava ve metal parçacıklarının süpersonik hıza ulaşmalarını sağlamıştır. Püskürtme işlemi neticesinde tüm yüzey üzerinde ince tekdüze olan bir tabakanın oluştuğu, kaplamanın sadece parçanın yüzeyi üzerinde biriktiği ancak kendi üzerinde birikmediği belirtilmiştir. Kaplamanın yapışmasının, püskürtülen mikron boyutlu parçacıkların yüzeydeki gözeneklerin içerisine girmesi sonucu bir dereceye kadar sağlandığı, ayrıca kurşun gibi düşük ergime noktasına sahip metal parçacıklar kullanıldığında parçacıkların ergiyerek kaynaşabileceği belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak nozul içerisinden geçen parçacıkların sürtünmesi nedeniyle sıcaklığın önemli ölçüde artması gösterilmiştir. Artan sıcaklık ile metal parçacıklar kısmi veya tam ergiyerek yüzeyde ergimiş bir tabaka oluştururlar. Ancak süpersonik nozul kullanıldığında dahi, Rocheville tarafından önerilen cihazın toz metal parçacıklarını parça üzerinde kalın kaplamalar üretecek kadar yüksek hızlara ulaştıramadığı anlaşılmaktadır.

1980'li yıllarda Papyrin ve arkadaşları tarafından Rusya Bilimler Akademisi Teorik ve Uygulamalı Mekanik Enstitüsü'nde süpersonik iki fazın (gaz ve katı parçacıklar) rüzgâr tüneline model parçaların etrafından akışı ile ilgili bazı teorik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirildi [4]. Belirli koşullar altında gaz akışına maruz bırakılan ince alüminyum katı parçacıkların, rüzgâr tüneline içerisine yerleştirilen silindirik parçaların ön cephe yüzeylerinde birikerek sürekli bir kaplama oluşturduğu gözlemlendi. Mikroyapı incelemesi sonucunda alüminyum kaplamanın, yüzeye düzgünce yayılan yüksek miktarda deforme olmuş ve sıkıca paketlenmiş parçacıklardan meydana geldiği görülmüştür. Ancak bronz ve pleksiglas parçacıklarla yapılan testlerde, kütlece akış hızı alüminyumdan yüksek olmasına karşın birikmenin olmadığı, bunun aksine çelik hedef parçanın erozyona uğradığı görülmüştür. Bunun üzerine, süpersonik nozul vasıtasıyla alüminyum ve bakır parçacıkları altlık üzerine püskürtülerek daha detaylı çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu çalışmaların sonucunda parçacık hızı düşükse parçacığın altlıktan geri sektiği ortaya çıkmıştır. Parçacık hızı kritik değere yükseldikçe

parçacığın yüzeye yapışmaya başladığı ve artan parçacık hızıyla parçacık bağlanma olasılığının arttığı belirtilmiştir. “Soğuk” parçacıklar ile kaplama oluşumu açısından, altlık erozyonu sürecinden (parçacık geri sekmesine bağlı olarak) parçacık hızının artması ile kaplama oluşumu sürecine (parçacık yapışması nedeniyle) bir geçişin olması gerektiğini göstermişlerdir. Yapışmanın meydana geldiği bu “kritik parçacık hızı” değerinin, parçacık ve altlık malzemeleri, parçacık sıcaklığı ve boyutu, altlık yüzeyinin durumu gibi birçok faktöre bağlı olduğu gösterilmiştir. Araştırmacıların bu keşfi yeni bir alternatif kaplama yöntemi olarak kabul edildi ve sonrasında soğuk püskürtme kaplama cihazı geliştirildi [5]. Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi olarak adlandırıldıkları bu kaplama yöntemi, metaller, alaşımlar, polimerler veya bunların karışımlarının biriktirilmesine olanak tanıdı [6].

Rusya’da çalışmalar yürüten Papyrin, 1994 yılında Amerika Birleşik Devletleri’nde (ABD) Ulusal Üretim Bilimleri Merkezi (NCMS) himayesinde faaliyet gösteren bir konsorsiyuma soğuk püskürtme yöntemi hakkında bilgi vermiştir. [7]. Papyrin aynı yıl içerisinde bu konsorsiyum tarafından araştırma desteği almıştır ve kaplama uygulaması üzerine bir gaz dinamik püskürtme yöntemi için patent almıştır [8]. Benzer dönemde Rusya’da düşük basınçlı soğuk püskürtme üzerine çalışan bir araştırma gurubu tarafından 1992 yılında Obninsk Toz Püskürtme Merkezi (OCPS) kuruldu. Daha sonra bu merkez tarafından Dymet ticari ismiyle düşük basınçta çalışan soğuk püskürtme sistemi üretilmiştir. Bu düşük basınçlı kaplama teknolojisi 1990’lı yılların ortasında araştırmacılar tarafından Kanada’ya aktarılmış ve Centerline Windsor şirketi bünyesinde yapılan çalışmalarla kaplama cihazı geliştirilmiştir.

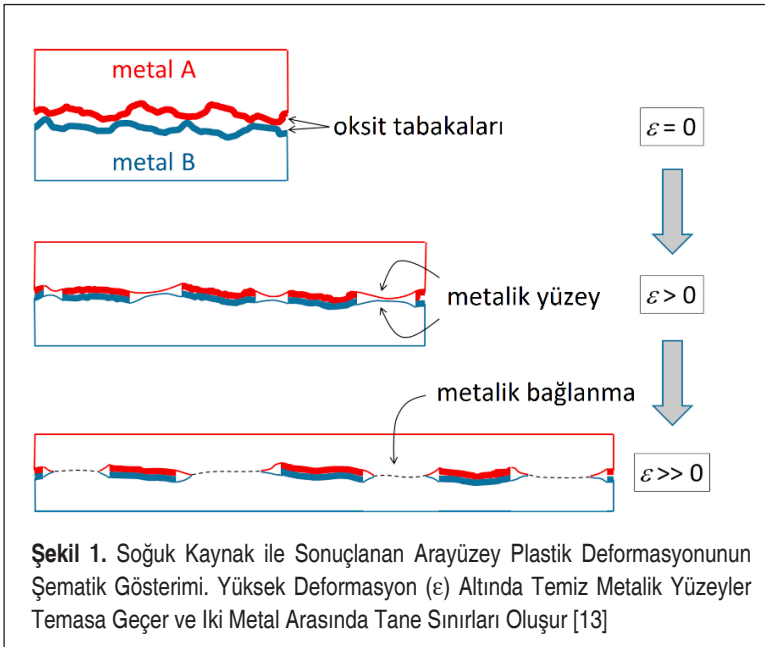
Sandia’nın Termal Püskürtme Araştırma Laboratuvarı’nda (TSRL) üst düzey deneysel çalışmalar yapılarak soğuk püskürtme işleminin gaz dinamiği prensipleri ortaya konmuştur [9]. Ayrıca bağlanma mekanizmaları, donanımın iyileştirilmesi, süreç ekonomisi, ticari uygulamaların geliştirilmesi vb. alanlarda araştırmalar yapılmıştır [10]. Almanya’da Cold Gas Technology GmbH (CGT) şirketi kurulmuş ve yüksek basınçlı soğuk püskürtme cihazı üretilmiştir. Federal Silahlı Kuvvetler Üniversitesi’nde (UFAF) yapılan çalışmalarda soğuk püskürtme işleminde hidrodinamik kararsızlığın kritik hızla ve diğer süreç parametreleriyle olan ilişkisi araştırılmıştır [11, 12]. CGT şirketinin ticari amaçlı cihazı üretebilmesi sayesinde ve araştırmacılar tarafından kaplama işleminin daha iyi anlaşılması adına yürütülen detaylı çalışmalar sonucunda, yüksek basınçlı soğuk püskürtme teknolojisinin daha da büyümesi ve ticarileşmesi için temel oluşturuldu. Şu anda, soğuk püskürtme sistemi ile ilgili dünyanın birçok araştırma merkezinde ve şirketinde geniş bir alanda araştırma ve geliştirme çalışmaları yürütülmektedir.

### 3. TOZ MALZEME BİRİKİMİ

Soğuk püskürtme yönteminde, 5-100 µm çapında katı toz parçacıkları süpersonik hız-

lara ulaşan ısıtılmış gaz içerisinde 300-1200 m/s arasındaki hızlara çıkartılıp metal, seramik veya cam gibi sert bir hedef altlık yüzeyine biriktirilir [4]. Eğer toz parçacıkları yeterince yüksek hıza ulaşır ise ve toz malzeme birleşimi işlem için uygun ise, çarpma gerçekleştiğinde toz parçacıkları adyabatik ısınmaya maruz kalır ve çok yüksek kayma deformasyonu hızı altında plastik deformasyona uğrar. Bunun sonucunda da düzleşip yaprak haline gelerek hedef altlık malzemeye yapışırlar. Soğuk püskürtmede iki farklı bağlanma türü vardır; i) altlık yüzeyinde ilk katmanın oluşması için gerekli olan ve kaplamanın altlığa yapışmasını belirleyen parçacık/altlık malzemeler arasındaki bağlanma, ii) püskürtülen parçacıkların üst üste birikerek büyümesini sağlayan ve kaplamanın fiziksel özellikleri ile kohezyon dayanımını ilgilendiren parçacıklar arası bağlanma. Bağlanma genellikle atomik düzeyde temiz düz iki parça yüzeyinin birbiriyle temas etmesinin hemen ardından gerçekleşir. Ancak uygulamada parça yüzeyleri genellikle pürüzlüdür ve sıklıkla oksit tabakasıyla kaplıdır. Katı hal bağlanma için oksit tabakanın kaldırılması veya kırılması gereklidir. Bunu sağlamanın bir yolu Şekil 1’de gösterildiği gibi plastik deformasyon ile arayüzey bölgesini basıp germektir. Soğuk püskürtmedeki bağlanmanın bu türde arayüzey deformasyonu ile ilişkili olduğu düşünülmektedir [13].

Şekil 2’de belirli bir gaz sıcaklığı için parçacık hızının malzeme birikme oranına olan etkisi gösterilmektedir. Soğuk püskürtmede altlığa iyi yapışma sağlanması için püskürtülen parçacıkların hızı, yapışma arayüzeyinde hidrodinamik kayma kararsızlığı









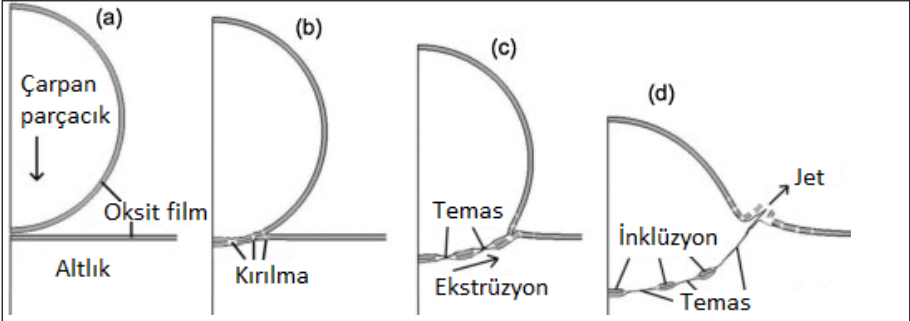
**Tablo 1.** Soğuk Püskürtme Yönteminde Kullanılan Malzemelerin Deneysel Olarak Elde Edilen Kritik Hız Değerleri [14].

Malzeme	Ergime sıcaklığı, °C	Kritik hız, m/s
Alüminyum	660	620-660
Titanyum	1670	700-890
Kalay	232	160-180
Çinko	420	360-380
Paslanmaz çelik (316L)	1400	700-750
Bakır	1084	460-500
Nikel	1455	610-680
Tantal	2996	490-650

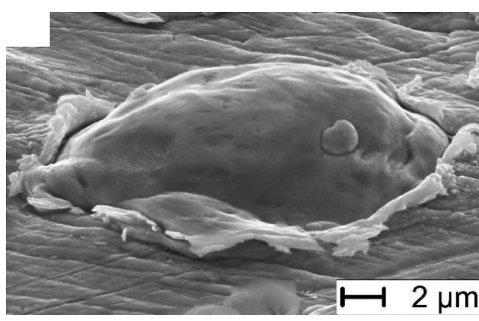
tülen malzemenin özellikleri ve işlem parametreleri de kritik hızı etkileyebilmektedir [11,12]. Yapılan çalışmalar sonucunda altlık sıcaklığı, parçacık sıcaklığı veya parçacığın boyutu arttıkça adyabatik kayma kararsızlığı oluşumunun daha kolay hale geldiği belirtilmiş ve bunun sonucunda kritik hız değerinin düştüğü ortaya çıkmıştır.

Her ne kadar soğuk püskürtmedeki bağlanma mekanizmasını anlamak için birçok sayısal simülasyon ve deneysel araştırma yapılmış olsa da yeterince anlaşılammıştır. Halen, soğuk püskürtmedeki en olası bağlanma mekanizması, Assadi tarafından önerilen adyabatik kayma kararsızlığı ile ilişkilidir [11]. Oksit filmin kırılması ve ekstrüzyonunu içeren adyabatik kayma kararsızlığıyla ilgili bağlanma mekanizması şematik olarak Şekil 3'te gösterilmiştir [15]. Bu mekanizmada, parçacık-parçacık veya parçacık-altlık arayüzey bölgeleri, darbe esnasında şiddetli bölgesel kayma deformasyonuna uğrar. Bu deformasyonun etkisiyle parçacıkların yüzeyindeki ince oksit filmi parçalanır ve kuvvetli parçacık-altlık teması sağlanır [11,12]. Buna ilave olarak arayüzeydeki yüksek bölgesel deformasyon sebebiyle adyabatik kayma kararsızlığı tetiklenir ve arayüzeyin kenara yakın bölgesinde malzeme jeti meydana gelir. Şekil 4'te bakır bir altlık üzerine gömülmüş bakır parçacığın mikroyapı görüntüsü incelendiğinde, çarpan parçacığın kenar bölgesinde oluşan malzeme jeti görülmektedir. Metalik malzemeler söz konusu olduğunda, çarpma sırasında oluşan deformasyon homojen değildir. Homojen olmayan deformasyon, başlangıçta temas bölgesinin dış kenarında oluşan ve artan çarpma hızı ile merkeze doğru uzanan adyabatik kayma kararsızlığı ile ilişkilendirilebilir. Adyabatik kayma kararsızlığı bölgesi hiçbir zaman temas bölgesini tam olarak kapsamaz. Yapılan çalışmalar neticesinde merkeze yakın bölgelerde adyabatik kayma kararsızlığının oluşmadığı ve bu nedenle merkezde metalürjik bağlanmanın tam olarak gerçekleşmediği gösterilmiştir [16].

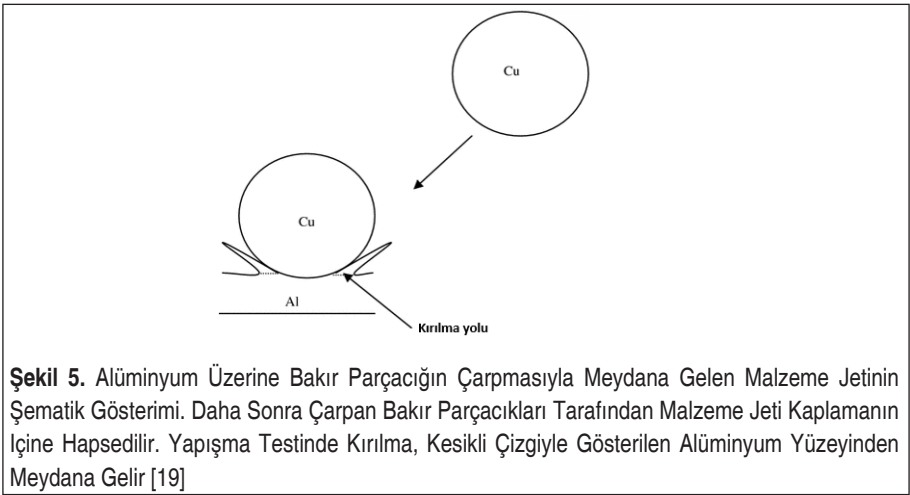
Parçacıkların altlıkla çarpışması sırasında gelişen yüksek basma gerilmeleri bağlan-



**Şekil 3.** Soğuk Püskürtülmüş Parçacıkların Bağlanma Sürecinin Şematik Diyagramı; (a) Yüzeğe Çarpan Parçacık, (b) Deformasyonun Etkisiyle Yüzey Oksit Filmlerin Kırılması, (c) Oksit Filmin Ekstrüzyonu, ve (d) Malzeme Akışıyla Birlikte Jet Oluşumu [15]



**Şekil 4.** Bakır Altlık Üzerine Püskürtülen Bakır Parçacıklarının Yakın Çekim SEM Görüntüsü [11]



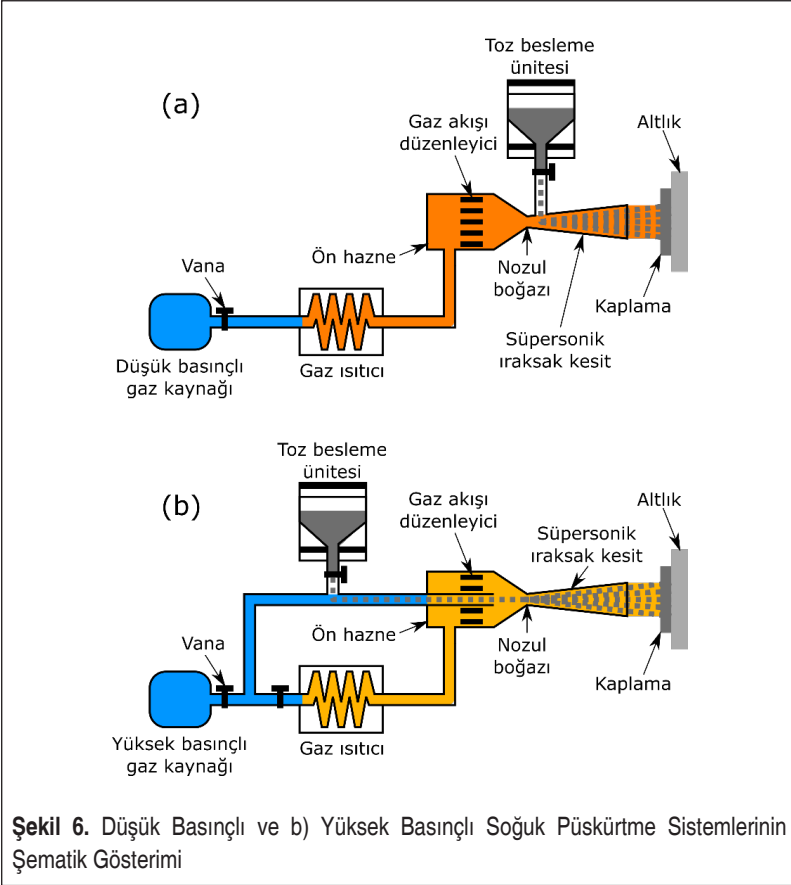


ma için gereklidir [17]. Başka bir deyişle, malzeme kayma dayanımını yitirmekte ve deformasyon mekanizmasının plastikten viskoz akışa geçeceği şekilde ciddi deformasyona uğramaktadır [18]. Bu durum parçacıkların altlıkla ve aynı zamanda kendi aralarında metalürjik bağ (yani atomik bağ) oluşturmasını kolaylaştırır. Hussain ve arkadaşları alüminyum yüzeylere bakır parçacıkları püskürterek yaptığı çalışmada, metalürjik bağlanmanın yanı sıra mekanik kilitleme olarak bilinen başka bir bağlanma mekanizması önermiştir [19]. Bu mekanizmaya göre bakır parçacıkların alüminyum altlığa çarpması nedeniyle, yüzeye yapışan parçacıkları kısmen saran malzeme jetinin oluştuğu öne sürülmektedir. Malzeme jeti altlık ile daha sonra yüzeye çarpan parçacıklar arasında Şekil 5'te gösterildiği gibi mekanik bir kilitleme yaratmaktadır.

#### 4. DÜŞÜK VE YÜKSEK BASINÇLI SOĞUK PÜSKÜRTME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Soğuk püskürtme işleminde kaplamanın kalitesi gaz sıcaklığı, gaz basıncı ve türü, püskürtme mesafesi ve parçacık hızı gibi işlem parametrelerinin yanı sıra toz ve altlık malzeme türlerine de bağlıdır [20]. Toz malzemenin nozul boğazına enjeksiyon şekline göre soğuk püskürtme işlemi düşük ve yüksek basınçlı olarak iki kategoriye ayrılır. Düşük basınçlı soğuk püskürtmede göreceli düşük basınca (0,5-1 MPa) sahip olan genellikle hava veya azot gazı, gaz ısıtıcı içerisinde sıcaklığı artırılıp püskürtme tabancasının ucundaki yakınsak/ıraksak türdeki nozula doğru itilir (Şekil 6a). Nozul boğazından geçen gaz, ses üstü ıraksak kesit içerisinde 300-600 m/s aralığında bir hıza ulaşır. Bu esnada katı toz parçacıklar, toz besleme ünitesinden ıraksak kesitin nozul boğazına yakın kısmına doğru radyal biçimde gönderilir ve nozul boyunca altlığa doğru hızlandırılır. Venturi etkisiyle nozul içerisindeki statik basınç atmosferik basıncın altında tutularak parçacıkların toz besleme ünitesinden etkili bir şekilde nozulun içine çekilmesi sağlanır.

Şekil 6b'de yüksek basınçlı soğuk püskürtme sisteminde, öncelikle yüksek basınçlı hava, azot, helyum gazı veya bunların bir karışımı 1-4 MPa aralıkta basınca kadar sıkıştırılır ve sonrasında sistemden iki farklı yoldan akar. Birinci yolda yüksek basınçlı gaz, parçacıkları püskürtme tabancasına taşımak için toz besleyiciden geçer. İkinci yolda yüksek basınçlı gaz, elektrikli gaz ısıtıcısından geçer ve yaklaşık 1100 °C sıcaklığa kadar önceden ısıtılır. Bu sayede, gaz hızına ilave bir artış sağlanır ve sonuç olarak parçacık hızı artırılır. İki ayrı yol nozul girişinin yakınında birleşir. Son aşamada, hammadde tozları süpersonik hızlara ulaşarak tabanca nozulundan çıkar ve kaplama oluşturmak üzere altlığa çarpar. Giriş gazı yüksek sıcaklıklara önceden ısıtılmasına rağmen, yüksek sıcaklıktaki gaz ve parçacıklar arasındaki temas süresi nispeten kısa olduğundan parçacıklar katı halde kalır; gaz sıcaklığı da genellikle tozun ergime noktasından çok daha düşüktür. Buna ilave olarak, tabanca nozulunun ıraksak bölümünün genişlemesi ile gazın sıcaklığı önemli ölçüde azalır.



Düşük ve yüksek basınçlı soğuk püskürtme yöntemleri birbirlerine kıyasla bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Yüksek basınçlı soğuk püskürtme yöntemi diğer yöntemle kıyasla daha yüksek gaz akışı ve toz besleme hızlarına sahiptir [21]. Gaz akışının artmasıyla birim zamanda beslenebilen toz miktarı arttığı için toz besleme hızı daha fazladır. Bu iki soğuk püskürtme işlemi kıyaslama amacıyla bazı püskürtme işlem parametreleri Tablo 2’de özetlenmiştir. Temel farklılıklar gazın türü, basınç seviyesi ve kullanılan elektrik gücü ile ilgilidir. Yüksek basınçlı soğuk püskürtmede, ana taşıyıcı gaz ve toz besleme hatlarının karışmasını sağlamak için ana gaz akımına yakın veya daha yüksek bir basınçta çalıştırılan yüksek basınçlı bir toz besleyicisi kullanılır. Yüksek basınçlı toz besleyiciler, düşük basınçlı toz besleyicilerden genellikle daha büyük boyutlu ve daha maliyetlidir. Bununla birlikte, düşük basınçlı soğuk püskürtme için nozul tasarımı daha düşük bir genişleme Mach sayısı (genellikle  $<3$ ) aralığı ile sınırlıdır ve atmosfer basıncının nozula toz sağlayabilmesi için giriş basıncı sınırlanır (normalde 1,7 MPa).



Yüksek basınçlı soğuk püskürtmenin düşük basınçlı soğuk püskürtmeye göre temel avantajları, daha geniş bir yelpazede malzeme seçimi ve daha yüksek biriktirme kalitesidir. Yüksek basınçlı sistemde %90'a kadar biriktirme verimliliği sağlanırken düşük basınçlı sistemde sadece %50'nin altında toz biriktirme verimliliğine ulaşılabilir [22]. Düşük basınçlı soğuk püskürtme işleminde daha düşük parçacık hızlarına ulaşıldığı için sadece, alüminyum, bakır, kalay ve çinko gibi düşük ergime noktasına sahip sünek metaller biriktirilebilir. Düşük gaz sıcaklığında ve basınçta bu malzemelerin püskürtülebilirliğini iyileştirmek için daha yüksek sertliğe sahip seramik parçacıklar toz karışımına ilave edilebilir. Seramik parçacıklar hem mikron boyutunda dövme etkisi yaratarak alt tabakaları sıkıştırır hem de yüzeyi sürekli temizler ve pürüzlülüğü artırarak parçacıkların daha iyi tutunmasını sağlar. Oluşturulan seramik takviyeli kompozit mikroyapı uygulamaya bağlı olarak faydalı olabilir veya bir sınırlama getirebilir; örneğin, bazı durumlarda, ikincil parçacıklarla sağlanan mukavemet ve sertlik mekanik özellikleri iyileştirir, diğer durumlarda ise fiziksel olarak bağlanan seramik-metal arayüzeyleri aşırı korozif ortamlarda korozyon direncini düşürebilir veya elektiriksel iletkenliğin düşmesine neden olabilir.

Düşük basınçlı soğuk püskürtme sistemi yüksek basınçlı sisteme kıyasla daha esnek, taşınabilir ve uygun maliyetlidir. Parça onarımı gerektiren işlerde taşınabilir olması sayesinde parçanın sökülmesine ihtiyaç duymadan çalışma yerinde kaplama uygulanabilmektedir. Buna karşın yüksek basınçlı soğuk püskürtme donanımı için yatırım maliyetleri yüksektir ve endüstriyel olarak üretilen sistemler taşınabilir boyutlara sahip olmadığı için kaplama uygulanacak parçaların kullanım yerinde kaplanması mümkün olmayabilir [21].

Her iki soğuk püskürtme işleminin bazı ortak sınırlamaları vardır. Karşılaşılan en büyük sorun, parçacık hızı ve sıcaklık arttıkça daha şiddetli hale gelen nozul tıkanmasıdır. Sorunun üstesinden gelmek için, tıkanmaya dirençli çeşitli nozul malzemeleri kullanılmasının yanı sıra ana toz malzemesi içerisine daha büyük veya daha sert parçacıkların ilave edildiği bir toz karışımı kullanılabilir [20,23]. Her iki soğuk püskürtme işlemi için bir diğer yaygın sorun, nozul boğazının erozif aşınması sonucunda çalışma koşulları ve birikme kalitesinin değişmesidir. Düşük basınçlı soğuk püskürtme nozulunun servis ömrü yüksek basınçlı sistemdekine kıyasla daha uzundur. Bunun sebebi, toz parçacıklarının sadece nozulun süpersonik hıza ulaşılan iraksak bölgesinden geçerek nozul duvarının aşınmasını azaltmasıdır [22]. Nozul için sinterlenmiş tungsten karbür gibi aşınmaya dayanıklı malzemeler kullanılarak sert parçacıklar püskürtüldüğünde ortaya çıkan aşınma hasarı engellenmektedir [20].

Ticari olarak üretimi yapılan soğuk püskürtme cihazlarının işlem parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. Yüksek basınçlı sistemde gaz sıcaklığı ve basınç değerlerinin yüksek olması sayesinde alüminyum ve bakır gibi sünek metallerin yanı sıra ergime noktası

**Tablo 2.** Soğuk Püskürtme İşlemlerinde Kullanılan Tipik Püskürtme Parametreleri [21]

Püskürtme Parametresi	Yüksek Basıncılı Soğuk Püskürtme	Düşük Basıncılı Soğuk Püskürtme
İşlem gazı	Azot, Helyum	Basıncılı hava
Basınç (bar)	10-50	6-10
Çalışma sıcaklığı (°C)	1000-1100	600-650
Gaz akış hızı (m <sup>3</sup> /dk)	0,85-2,5 (N <sub>2</sub> ), 4,2 (He)	0,3-0,4
Toz besleme hızı (kg/s)	4,5-13,5	0,3-3
Püskürtme mesafesi (mm)	10-50	5-15
Elektrik gücü (kW)	40-70	3,3; 3,8; 4,25
Parçacık büyüklüğü (mikron)	5-50	5-30
Parçacık hızı (m/s)	1200	600

**Tablo 3.** Endüstriyel Soğuk Püskürtme Sistemlerinin Özellikleri

Firma Adı	Ticari Cihaz Adı	Proses türü	Maksimum Çalışma Sıcaklığı (°C)	Maksimum Çalışma Basıncı (bar)	Isıtma Gücü (kW)
Impact Innovations GmbH (Almanya)	Impact Spray System 5/8	Yüksek basınç	800	50	34
	Impact Spray System 5/11	Yüksek basınç	1100	50	40
Plasma Giken Co. Ltd. (Japonya)	PCS-800	Yüksek basınç	800	50	35
	PCS-1000	Yüksek basınç	1000	50	70
VRC (ABD)	Gen III	Yüksek basınç	900	70	21
DYMET (Rusya)	D423	Düşük basınç	600	8	3,3
	D523	Düşük basınç	600	8	3,3
CenterLine Ltd. (Kanada)	SST PX	Düşük basınç	550	17,2	3,8-4,25
	SST EPX	Düşük basınç	550	35	3,8-4,25
Inovati (Japonya)	KM	Düşük basınç	1000	4,5-10	3,8

ve sertliği daha yüksek olan titanyum gibi metaller de biriktirilebilmektedir. Soğuk püskürtme sistemleri, toz enjeksiyonu yöntemine göre farklılık gösterirler. Şekil 7 ve 8’de gösterilen Impact Innovations ve VRC firmalarına ait yüksek basınçlı soğuk püskürtme sistemlerinde yukarı yönlü enjeksiyon kullanılmaktadır. Şekil 9 ve 10’da gösterilen Dymet ve CenterLine firmalarına ait düşük basınçlı soğuk püskürtme sistemlerinde ise aşağı yönlü enjeksiyon tercih edilmiştir.



Şekil 7. Kontrol Ünitesi, Toz Besleyici ve Gaz Isıtıcılı Su Soğutmalı Püskürtme Tabancasını Gösteren Yukarı Yönde Enjeksiyon Soğuk Püskürtme Sistemi (Impact Innovations GmbH)



Şekil 8. VRC Gen III Yukarı Yönde Enjeksiyon Sistemi (VRC Metal Systems)



**Şekil 9.** Dymet 423 Taşınabilir Aşağı Yönde Enjeksiyon Sistemi (DYMET Corporation).

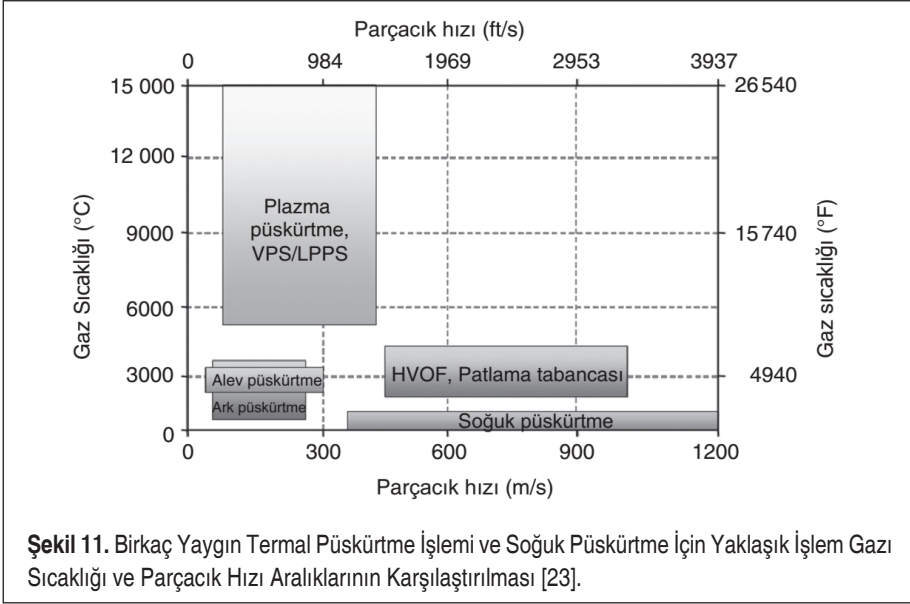


**Şekil 10.** Basıncısız Çift Toz Besleyici ile Donatılmış SST PX Aşağı Yönde Enjeksiyon Sistemleri; El Tabancası (sol taraftaki) ve Robotik Kol Vasıtasıyla Kaplama İşlemi (sağ taraftaki) (CenterLine Ltd.)

## 5. SOĞUK PÜSKÜRTME İŞLEMİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

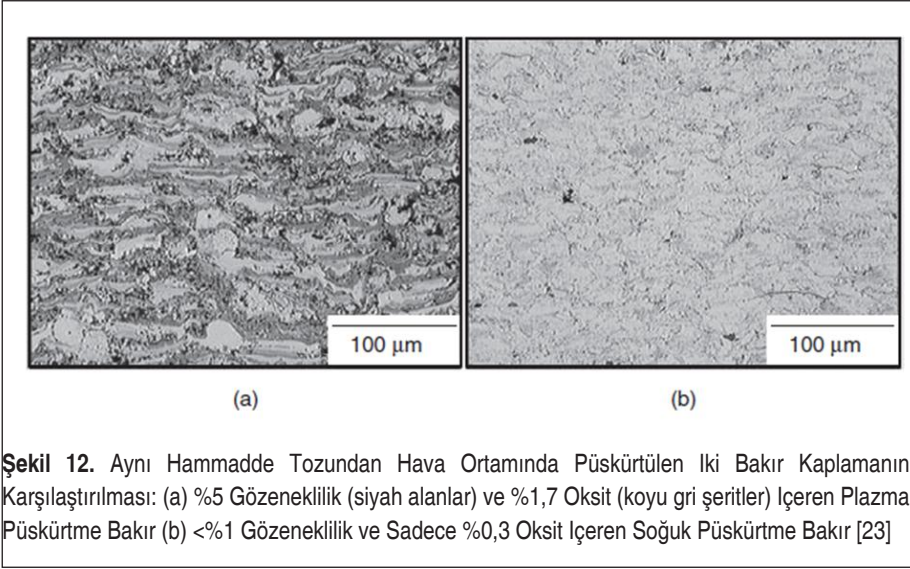
Soğuk püskürtme ve geleneksel termal püskürtme işlemlerinin yaklaşık işlem sıcaklıkları ve parçacık hızlarının karşılaştırması Şekil 11’de gösterilmektedir. Soğuk püskürtme çok yüksek parçacık hızlarıyla birlikte son derece düşük işlem sıcaklıklarında gerçekleştirildiği için birçok avantaj sağlamaktadır [23]. Bu yöntem ısıya duyarlı malzemelerin yanı sıra alüminyum, bakır ve titanyum gibi oksijene duyarlı malzemelerin de kaplanması için uygundur [6,20]. Ayrıca, hammadde tozu işlem sırasında çok yüksek sıcaklıklara çıkarılmadığı ve dolayısıyla ergimediği için gelecekteki kaplama işlemlerinde tekrar kullanılabilir [20]. Soğuk püskürtme, endüstriyel gereçlerde ha-





sarılı metal parçaların ve cihazların onarımı için çok uygundur. Hasara uğramış orijinal imalat parçalarına kaplama yapılması, yeni bir parça üretme masrafı olmadan veya çevresel atıkları artırmadan onarmanın etkili bir yoludur.

Geleneksel termal püskürtme işlemlerinin iki önemli sınırlaması vardır. Bunlar gözeneklilik ve metal oksit safsızlıklarıdır. Bazı uygulamalarda, soğuk püskürtme bu iki alanda önemli avantajlar sunabilir. Örneğin Şekil 12’de, aynı hammadde tozu kullanılarak iki farklı püskürtme işlemiyle (plazma püskürtme ve soğuk püskürtme) biriktirilen bakır kaplamaların karşılaştırması gösterilmektedir [23]. Şekil 12(a)’da gösterilen plazma püskürtme kaplamadaki gözenekliliğin (~%5) nedeni, ergimiş metal damlacıkların yüzeye çarpması sonucunda sıçraması ve yüzeyde birikmesi sırasında boşluk gibi düzensizlikleri tamamen doldurmamasıdır. Şekil 12(b)’de gösterilen soğuk püskürtme malzemedeki düşük gözeneklilik seviyesi (<%1) ise, soğuk püskürtmenin katı hal işlemi olduğu gerçeğinden kaynaklanır ve bu nedenle sıçrama yoktur. Benzer şekilde, plazma püskürtme kaplamasının oksit içeriği bakır hammaddesi tozunda bulunan oksitten neredeyse altı kat daha fazladır. Bunun nedeni plazma püskürtme yüksek sıcaklıklarda uygulandığından havadaki bakır tozunun ergimesi ve bu esnada önemli ölçüde oksidasyona uğramasıdır. Bununla birlikte, ölçüm belirsizliği dahilinde, soğuk püskürtme kaplamasının ölçülen oksit içeriği, hammadde tozuyla tamamen aynıdır. Soğuk püskürtme işlemi çok daha düşük işlem sıcaklıklarında gerçekleştirildiğinden, püskürtme ortamında metallerin oksijen ile reaksiyonu büyük ölçüde azaltılır veya ortadan kaldırılır [23].



**Şekil 12.** Aynı Hammadde Tozundan Hava Ortamında Püskürtülen İki Bakır Kaplamanın Karşılaştırılması: (a) %5 Gözeneklilik (siyah alanlar) ve %1,7 Oksit (koyu gri şeritler) İçeren Plazma Püskürtme Bakır (b) <%1 Gözeneklilik ve Sadece %0,3 Oksit İçeren Soğuk Püskürtme Bakır [23]

Geleneksel termal püskürtme işlemleri genellikle tane büyümesi, kimyasal reaksiyonlar, çatlaklar, buharlaşma, termal artık gerilme, termal büzülme, faz dönüşümü ve oksidasyona yol açar; ancak bunlar soğuk püskürtme işleminde gözlenmemektedir [4]. Soğuk püskürtme nispeten düşük gaz sıcaklıkları kullandığı için ısı radyasyonu ve metal buharları oluşması açısından işlevsel olarak daha güvenlidir [20]. Diğer bir avantajı, altlık hasarı olmadan 1 mm'den düşük kalınlıktaki altlıkları kaplama kabiliyetidir. Ayrıca, soğuk püskürtme kaplamalar basma gerilmeleri altında üretildiği için yapışma mukavemeti yüksek kalın kaplamalar veya çok katmanlı kaplamalar üretilebilir [20]. Diğer bir avantaj ise püskürtme yapılan alanın soğuk püskürtmede nispeten küçük olması (1–25 mm<sup>2</sup>) ve bu sayede hassas kaplamaların yüksek verimle biriktirebilmesidir [24]. Ayrıca biriktirme verimi püskürtülen toz tipine göre değişir.

Soğuk püskürtme yönteminde çok sayıda farklı hammadde ve altlıkların kullanılmasının yanı sıra, kaplanabilen malzeme türleri nispeten sünek metal tozları veya sünek metallerle karıştırılmış sert malzemeler ile sınırlandırılmıştır. Bu yöntemde seramik gibi sert tek türde parçacıkların biriktirilmesi zordur. Çünkü, parçacıklar arası bağın meydana gelmesi için plastik deformasyona uğramaları gereklidir. Yapılan bir çalışmada, TiO<sub>2</sub> gibi seramik parçacıkların yapışmasını sağlamak için gerekli olan kayma kararsızlığı olayının, ancak yeterli sünekliğe sahip altlık malzemelerin kullanılmasıyla mümkün hale geldiği belirtilmiştir [25]. Seramik parçacık hızı arttıkça altlığın daha fazla deformasyona uğradığı ve birikme veriminin arttığı ifade edilmiştir. Benzer şekilde, seramik altlıklar üzerine püskürtme yapılması, düşük kaplama-altlık arayüzey bağ mukavemeti sebebi ile zordur. Ayrıca, taşıyıcı gaz tüketimi 1–2 m<sup>3</sup>/dak civarındadır ve termal püskürtme işlemlerine kıyasla yüksektir [22].



Soğuk püskürtme yönteminde püskürtme alanının küçük ve püskürtme mesafesinin kısa olması nedeniyle geniş yüzey alanlı altlıkların kaplanmasında zorluk yaşanmaktadır. Buna ek olarak soğuk püskürtme, sünekliği çok düşük olan kaplamalar oluşturur, çünkü yoğun plastik deformasyon sonucu yapı çok sertleşebilir ve parçacıklar arası bağlar nispeten zayıf olabilir [26,27]. Kaplama işlemi sonrasında yapılan ısı işlemleri ile çekme mukavemetinin ve sünekliğin arttığı belirlenmiştir [28].

Son yıllarda soğuk püskürtme, bağımsız metal bileşenler üretmek ve hasarlı metal bileşenleri yenilemek için eklemeli imalat teknolojisi olarak başarıyla geliştirilmiştir [29,30,31]. Soğuk püskürtmeyle eklemeli imalat (CSAM) soğuk püskürtme teknolojisinin tüm avantajlarını beraberinde getirmektedir. Tablo 4’te, CSAM ve diğer mev-

**Tablo 4.** Soğuk Püskürtmeyle Eklemeli İmalat ve Diğer Füzyon Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması [32]

	CSAM (Soğuk püskürtmeyle eklemeli imalat)	SLM (Lazer ışını ile ergitme)	EBM (Elektron ışını ile ergitme)	LMD (Lazer metal birikimi)
Toz besleme modu	Doğrudan biriktirme	Toz yatağı	Toz yatağı	Doğrudan biriktirme
Hammadde sınırlamaları	Yüksek sertlikteki mukavemetli metalleri işlemede zorluk	Yüksek yansıtıcılık ve zayıf akışkanlığa sahip metalleri işlemede zorluk	İletken olmayan ve düşük ergime sıcaklığına sahip metaller için uygun değildir	Yüksek yansıtma özellikli metallerle ilgili zorluk
Toz ergitme		✓	✓	✓
Ürün boyutu	Geniş	Sınırsız	Sınırsız	Geniş
Boyutsal hassasiyet	Düşük	Yüksek	Yüksek	Orta
Mekanik özellikler (Üretim hali)	↓↓	↑↑	↑↑	↑↑
Mekanik özellikler (Isıl işlemler hali)	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Üretim süresi	Kısa	Uzun	Uzun	Uzun
Ekipman esnekliği	↑↑	↓↓	↓↓	↓↓
Onarım için uygunluk	✓			✓

cut eklemeli imalat teknolojileri karşılaştırılmaktadır. CSAM’ın diğer eklemeli imalat süreçlerine göre en önemli avantajları, daha kısa üretim süreleri, sınırsız ürün boyutu, üretim esnekliği ve hasarlı parça onarımı için uygunluğudur. Ayrıca, CSAM özellikle lazer esaslı eklemeli imalat işlemleri kullanılarak üretilmesi çok zor olan bakır ve alüminyum gibi yüksek yansıtma özellikli metaller için uygundur. Bununla birlikte, CSAM’ın dezavantajları da vardır. CSAM genel olarak pürüzlü bir yüzeye sahip yarı mamul bir ürün üretir ve bu üretim sonrasında ek bir işlem gerektirir. Buna ek olarak, bu yöntemle elde edilen birikintiler, doğal kusurlar nedeniyle imal edildiği haliyle zayıf mekanik özelliklere sahiptir. Sonuç olarak, mekanik özellikleri geliştirmek için yaygın olarak ısıl işlemler uygulanır [32].

## 6. TOZ VE ALTLIK MALZEMELER

Soğuk püskürtme kaplama, elektrik iletkenliği, ısı yalıtımı, korozyon direnci, oksidasyon direnci, aşınma direnci vb. bir dizi özellikler ile karakterize edilmektedir ve tüm bu özellikler başlangıç tozu ve soğuk püskürtme işlemi parametreleri ile yakın bağlantı içerisinde. Ayrıca hammadde tozunun püskürtme sırasında kimyasal olarak büyük ölçüde değiştiği diğer termal püskürtme yöntemlerinin aksine, soğuk püskürtme işlemi sırasında hammadde tozu özelliklerinin korunması ihtiyacı söz konusudur. Dolayısıyla bu durum soğuk püskürtme kaplamalarda hammadde tozlarının seçimini kritik bir faktör haline getirmektedir.

Toz imalat endüstrisi, ticari soğuk püskürtme donanımlarının piyasada kullanıma başlaması ile toz boyutu aralıkları ve kompozisyon bakımından soğuk püskürtmeye uygun toz bileşimleri üretmeye doğru gelişim kaydetmeye başlamıştır. Bunun sebebi, soğuk püskürtme yönteminin normal bir termal püskürtme besleme stoku ile karşılaştırıldığında daha dar aralıkta boyut dağılımına sahip ve daha ince bir besleme stokuna ihtiyaç duymasıdır. Bu noktada gerekli parçacık boyutu aralıklarının, farklı soğuk püskürtme donanımı tasarımlarının her biri için özel olduğu görülmektedir [20]. Buna bağlı olarak en yaygın kullanılan parçacık boyutu aralıklarının 5–25 ve 15–45 µm arasında olduğu söylenebilir. Günümüzde atomizasyon, mekanik alaşımlandırma, sinterleme ve püskürtme kurutma gibi bir dizi iyi bilinen teknik soğuk püskürtme için besleme stoku üretmek amacıyla kullanılmaktadır.

### 6.1 Toz Özellikleri ve Karakterizasyonu

Soğuk püskürtme işlemindeki toz besleyicinin temel gereksinimi, toz parçacıklarının nozulun yakınsak (yüksek basınç-düşük hız) veya iraksak (alçak basınç-yüksek hız) bölümlerine taşınmasıdır. Tozun akma kabiliyeti ya da endüstride “toz besleme sorunu” olarak da bilinen durum tozun püskürtülebilirliği ile ilgili bir husustur. Soğuk püskürtme yönteminde toz malzemesi seçimi için birincil kıstas toz akışıdır. Toz bes-



leme sorunları veya nozul boğazında yaşanabilecek tıkanmalar püskürtme işlemlerinin kesilmesine ve kalitesiz kaplamaların meydana gelmesine neden olabilmektedir. Tozun akışkanlığını ölçmek için nicel bir test yöntemi olan Hall akış ölçer hunisi kullanılmakta ve ASTM B213 standardı takip edilerek gerçekleştirilmektedir [33]. Hall debimetresi, önceden kalibre edilmiş bir huni kullanarak metalik ve serbest akışlı ince tozların akış hızını belirleyen basit bir cihazdır. Hall debimetresi ayrıca ASTM B212'ye göre test tozunun görünür yoğunluğunu da belirleyebilmektedir [34].

Tozun akış hızı, tozun soğuk püskürtme işlemi için uygunluğunun belirlenmesinde temel bir özelliktir. Bu bağlamda akış hızları değerlendirmeye alındığında çok yüksek bir akış hızı nozulun yakınsak bölümündeki boğazın tıkanmasına sebep olurken; zayıf bir akışkanlık ise aralıklı besleme ve tutarsız kaplama hadiselerinin meydana gelmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla kaliteli bir kaplama için en uygun toz akış hızının belirlenmesi gerekir.

Ham madde tozunun özellikleri genel olarak fiziksel ve kimyasal olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. Kaplama oluşumunda etkili olan bu özellikler aşağıda detaylıca verilmektedir.

Fiziksel özellikler:

- Parçacık boyutları ve tane boyutları
- Dış morfoloji (küresel, eliptik, açılı yüzeyler vb.) ve iç morfoloji (gözeneklilik)
- Akışkanlık ve görünür yoğunluk
- Termal özellikler
- Elektriksel iletkenlik

Kimyasal özellikler:

- Kimyasal bileşim (saflık, oksijen/azot gibi istenmeyen bileşenlerin seviyesi)
- Çökeltilerin ve fazların dağılımı
- Kristalografik bilgi (katı çözeltiler)

## 6.2. Toz Malzeme Türleri

Araştırmalara göre soğuk püskürtme yöntemi ile ilgili hazırlanan bilimsel çalışmaların %40'ından fazlasını metal ve alaşımları oluşturmaktadır. Ayrıca metal takviyeli veya metalik matristen yapılmış kompozitler dikkate alındığında bu oranın daha da üst seviyelere çıktığı görülebilmektedir. Soğuk püskürtme kullanılan toz malzeme türleri ve birikme mekanizmaları Tablo 5'te paylaşılmıştır. Buna göre yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahip metallerin (alüminyum, bakır, gümüş, altın, platin, nikel, ç demir) soğuk püskürtme için oldukça uygun şartlar sağladığı ifade edilmektedir. Bunun sebebi ise söz konusu metallerin iyi deforme olabilen çok sayıda kayma düzlemi sunmasıdır. Magnezyum, çinko, kobalt, kadmiyum ve titanyum gibi hekzagonal

**Tablo 5.** Soğuk Püskürtmeyle Eklemeli İmalat Ve Diğer Füzyon Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması [32].

Toz Besleme Stoku	Başarılı Birikintiler	Birikme Mekanizması
Metaller	Al, Ag, Cu, Ni, Ta, Ti, Zn, Fe, Sn, Nb, Mg	Plastik Deformasyon
Metalik Alaşımlar	TiAlV, CuCrAl, CuAgCe, CuAgZr, AlCoCe, Paslanmaz Çelik	Plastik Deformasyon
Metal cam	NiTiZrSiSn, FeCoCrMoBC, Cu-50Ti20Ni30	Viskoz Deformasyon
Metal Esaslı Sistemler	CoNiCrAlY, MAICrRe, WC-Co, CrCo stelite,	Plastik Deformasyon
Seramik Esaslı Fazlar	SiC, B <sub>4</sub> C, WC, TiN	Mekanik Kilitleme
Oksitler	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , WO <sub>3</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , NiO	Mekanik Kilitleme
Polimerler	PPA, PE	Deformasyon+Termal Difüzyon

yapılı metaller daha düşük sayıda kayma düzlemlerine ve dolayısıyla daha az deformasyon kabiliyetine sahiptir. Tungsten, tantal, molibden, niyobyum, vanadyum, krom,  $\alpha$ -demir ve  $\gamma$ -titanyum gibi hacim merkezli kübik metallerin ise deformasyon kabiliyeti en düşüktür. Diğer taraftan trigonal veya tetragonal kristal yapıya sahip metal esaslı bileşikler yetersiz süneklikleri nedeniyle soğuk püskürtme için yeterli uygunluğa sahip değildir [35].

Yirmi birinci yüzyılın başlarında ise ticari soğuk püskürtme donanımlarının kullanımına başlanması ile ticari olarak saf titanyum kaplamaların geliştirilmesi üzerine önemli Ar-Ge çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmaları köşeli/sünger titanyum ve titanyum alaşımlı tozlar (Ti-6Al-4V gibi) izlemiştir. Soğuk püskürtme üzerine çalışan araştırmacıların şu anki ilgisi ise In 718, MCrAlY ve karışımlarından oluşan kompozit alaşım tozlarının püskürtülmesi üzerine gelişim göstermektedir. Geçmişte soğuk püskürtme yöntemi kullanılarak biriktirilemeyen seramik esaslı sert metal kaplamalar şimdi yeni toz tasarımı ve yeni üretim yolları kullanılarak başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Ayrıca soğuk püskürtme donanımlarındaki gelişmelerin daha yüksek gaz basıncı ve daha yüksek işlem sıcaklığını mümkün kılmasıyla birlikte, püskürtülmesi zor malzemelerin kaplanabileceği sonucunu da ortaya çıkarmaktadır. Soğuk püskürtme yöntemi kullanılarak metaller (Cu, Al, Ni, Zn, Ti), ısıya dayanıklı metaller (Zr, Ta), alaşımlar (316 Paslanmaz çelik, Al Alaşımları, MCrAlY), oksitler (TiO<sub>2</sub>), sermetler (Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> karışımları, WC-12Co ile Ni karışımı, Cu-MoS<sub>2</sub> ve Cu-MoS<sub>2</sub>-



WC karışımları ve Al–12Si kompozitleri), intermetalikler (Fe/Al) başarılı bir şekilde altlık üzerine kaplanabilmektedir [36,37,38,39,40].

### 6.3 Altlık Malzeme Türleri

Mevcut durumda metallere seramiklere geniş bir yelpazedeki malzemelere uygulanabilen geleneksel termal püskürtme işlemlerinin aksine, soğuk püskürtme yöntemi yeterli derecede düşük sıcaklıkta sünekliğe sahip metallere veya kompozitlerin altlık olarak kullanımı ile sınırlıdır. Al, Cu, Ni, Ti, Ag, Zn gibi metaller ile bu metallere seramiklerle veya diğer sünek olmayan malzeme türlerinin karışımları ile ortaya çıkan altlık malzemeler örnek olarak verilebilmektedir [33].

Soğuk püskürtme yönteminde kullanılabilen altlık malzemeler genel bir değerlendirilmeye alındığında, yelpazenin bir tarafında yer alan aşırı yumuşak altlıklarda (polietilen gibi), gelen parçacıklar herhangi bir birikme olasılığı olmadan yüzeyde derin çukurların oluşmasına sebep olur. Yelpazenin diğer tarafında kolayca ayrılan (karbon gibi) yapılara sahip son derece kırılabilir altlıklarda ise toz parçacıkları tarafından erozyon meydana gelir. Elde edilen bu tespitler yüzeylerin kaplanması için altlık malzemelerin elastik ve sağlam olması gerektiği sonucunu ortaya çıkarmaktadır [41]. Başka bir ifadeyle, kabul edilebilir bir bağ yapısı için altlık malzemenin toz malzemesine göre yeterli plastik deformasyonu destekleyecek kadar sert olması gereklidir. Bu durum altlık malzeme ve toz ikilisi seçiminin oldukça önemli olduğunu ve birbiriyle ilişkili bir tasarım parametresi olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte soğuk püskürtme kaplamaların metaller (alüminyum, bakır, titanyum, nikel vb.), alaşımlar (Inconel, çelikler, vb.) ve kompozitler (metal matrisli kompozitler, karbon kompozitler, vb.) gibi birçok altlık malzeme üzerinde çok yüksek yapışma mukavemeti sergilediği bilinmektedir. Ayrıca camın altlık malzeme olarak kullanıldığı soğuk püskürtme uygulamalarında dahi, alüminyum vb. toz malzemeleri ile kaplamanın mümkün olabileceği ifade edilmiştir [42].

## 7. KOMPOZİT KAPLAMALARIN YAPIŞMA ÖZELLİKLERİ VE AŞINMA DAVRANIŞI

Soğuk püskürtme kaplamaların yapışma özelliklerinin incelenmesi, bu tür malzemelerin yapısal ve işlevsel kaplamalar olarak yaygın şekilde kullanımı nedeniyle oldukça yüksek öneme sahiptir. Toz karışıma takviye parçacıkların eklenmesi, kaplamanın altlığa yapışmasına hem pozitif [43, 44] hem de negatif [45] yönde etki etmektedir. Nispeten az miktarda takviye parçacığın ilavesi altlık yüzeyini pürüzlendirerek ve oksit filmi altlık yüzeyinden temizleyerek kompozit kaplamanın yapışma mukavemetini arttırmıştır [46]. Her iki etki de altlık ve matris arasında metalurjik bağların oluşumunu kolaylaştırır. Aynı zamanda seramik takviye parçacıkların püskürtme sırasında



metal parçacıkların yüzeyindeki oksit filmini çarpmanın etkisiyle kaldırdığı önerilmektedir. Bu sayede kimyasal/metalurjik aktivitenin arttığı ve dolayısıyla kaplamanın yapışma mukavemetinin iyileştiği belirtilmiştir [46].

AZ91D-SiC kompozit kaplamada hacimce %15 SiC parçacığı ilave edildiğinde takviye edilmemiş duruma göre yapışma mukavemetinde 12 MPa'dan 22 MPa'a bir artış görülmüştür [47]. Bunun sebebi olarak SiC parçacıkların püskürtülen ilk kaplama tabakasının üzerinde yarattığı sıkıştırma etkisi gösterilmiştir. Al 6061 altlık üzerine Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit kaplamada, besleme tozuna ağırlıkça %70 seramik parçacık ilavesiyle yapışma mukavemeti artmış ve yapışma testinde kullanılan yapıştırıcının yapışma mukavemetine (70 MPa) ulaşılmıştır [44]. Takviye içermeyen kaplamada 20 MPa'ın altında bir yapışma mukavemeti elde edilirken, kompozit kaplamalardaki yüksek yapışma mukavemetinin sebebi olarak seramik parçacıkların yüzeyde mikro-pürüzler oluşturması ve mekanik kenetlenmeyi artırması gösterilmiştir. Ayrıca, yüzeydeki oksit tabakasının giderilmesi parçacıklar ve altlık arasındaki metalurjik bağlanmayı teşvik ederek yapışma mukavemetini arttırmaktadır.

Nispeten daha yüksek takviye miktarında, metal matris ile altlık yüzeyi arasındaki azalan temas alanı nedeniyle yapışma mukavemetinde azalma olabileceği dikkat edilmesi gereken bir konudur. Ayrıca, genellikle daha büyük hacim oranlarındaki takviyede bulunan fazla sayıda kusur ve gözenekler, yapışma mukavemetini olumsuz yönde etkiler. Örneğin, AA 2024-T3 altlık üzerindeki Al 2024-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit kaplamalarda, ağırlıkça %20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıkların eklenmesi yapışma mukavemetinin 20 MPa'dan 50,68 MPa'a yükselmesine neden olurken, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının %20'den %60'a artışı yapışma mukavemetinde önemli bir artışa neden olmamıştır [48]. İlk durumdaki artış, takviye parçacıklar tarafından altlık yüzeyin pürüzlenmesi ve bu sayede mekanik kenetlenmenin artmasıyla ilişkilendirilmiştir. Diğer taraftan, 6061-T6 altlık üzerine uygulanan Al-12Si kaplamada, SiC takviyesi miktarının hacimce %0'dan %15'e çıkarılmasıyla yapışma mukavemeti biraz azalmıştır [45]. Arayüzeyde SiC parçacıkların büyük miktarlarda varolması nedeniyle kaplama ile altlık arasındaki bağlanma bölgelerinin sayısının azaldığı belirtilmiştir. Al altlık üzerinde Co-WC kaplama uygulanan diğer bir çalışmada, Co içeriğinin ağırlıkça %12'den %17'ye yükseltilmesi sonucunda yapışma mukavemeti 19 ± 1 MPa'dan 26 ± 10 MPa'a artmıştır [49].

Nispeten az sayıda takviye parçacıkları sıkıştırma etkisiyle kohezyon mukavemetini artırabilirken, daha fazla miktarlarda seramik parçacıkların kullanımı metal parçacıkların yakın temasını engelleyebilir. Dolayısıyla, metalik parçacıklar arasındaki yük transferi azalarak daha düşük bir kohezyon mukavemeti ile sonuçlanır [50]. Besleme tozundaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğinin ağırlıkça %0'dan %30'a yükseltilmesiyle CuSn5-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamaların kohezyon mukavemetinde 11,2'den 32,5 MPa'a varan bir artış gözlenmiştir [51]. 316L matrisine SiC parçacıkların eklenmesi, kohezyon mukavemetinde



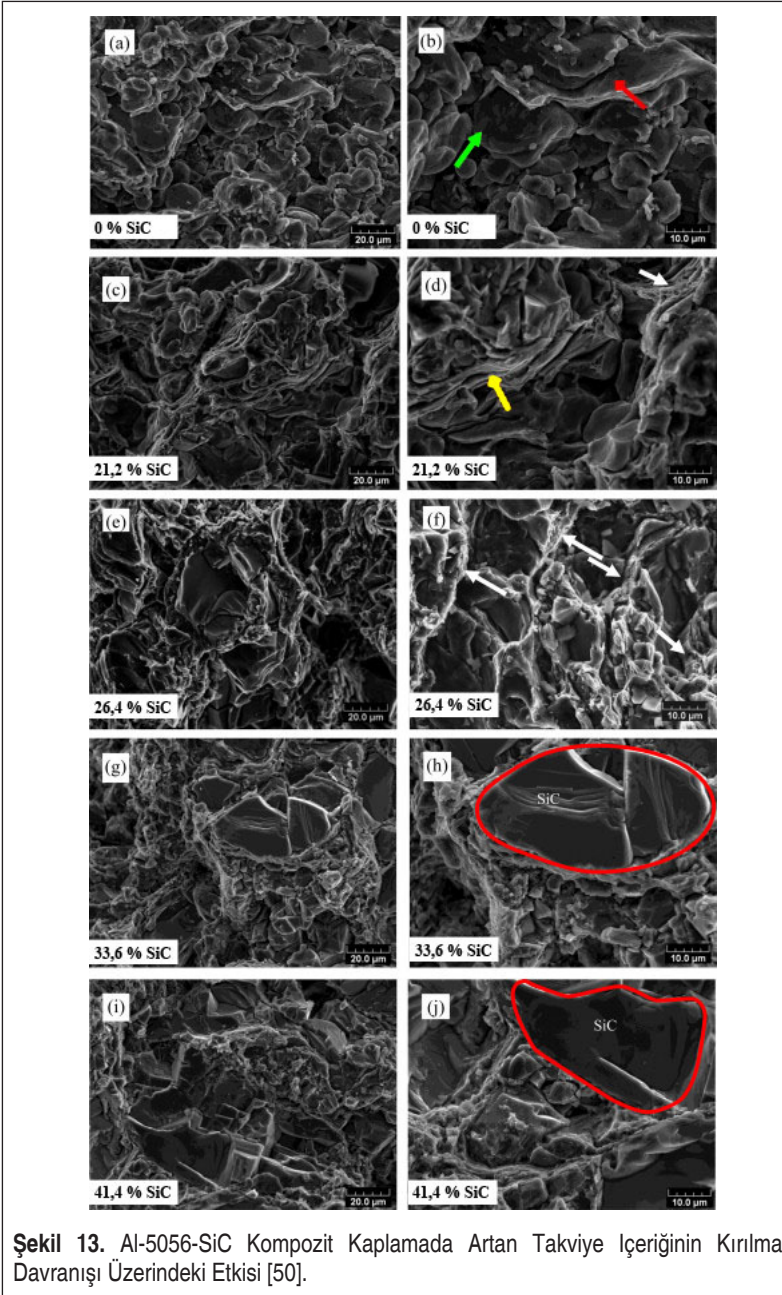


$48 \pm 7$  MPa'dan  $53 \pm 9$  MPa'a bir artışla sonuçlanmıştır [52]. Al5056 / SiC kaplamada, kaplamanın kohezyon mukavemeti, SiC içeriğindeki hacimce %0'dan %26,4'e bir artışla beraber 107.1 MPa'dan 146.9 MPa'a yükselmiştir [50]. Bununla birlikte, takviye içeriğinin hacimce %41,4'e yükselmesi, kohezyon mukavemetinin 112.7 MPa'a düşmesine neden olmuştur.

Şekil 13, kohezyon testlerinde başarısız olan Al5056-SiC kaplamanın kırılma yüzey analizini göstermektedir [50]. Şekilde takviye içeriği yukarıdan aşağıya doğru artmaktadır. Her satırda aynı kırık yüzeyin farklı büyütmelelerdeki mikro görüntüleri verilmiştir. İlk gözleme göre, SiC parçacıkları Al5056 parçacıkların deformasyonunu önemli ölçüde iyileştirmektedir. Takviyesiz kaplamada, Al5056 parçacıkları genellikle küreseldir (Şekil 13b'de yeşil okla gösterilmiştir) ve SiC takviye parçacıkları mevcut olduğunda daha düz bir hal alarak yassı şekillere dönüşür (Şekil 13d'de sarı okla gösterilmiştir). İkinci gözlem, takviye içermeyen kaplamada bulunan ve Şekil 13(b)'de kırmızı okla gösterilen zayıf bağlanmış parçacıklar arasındaki çatlakların, seramik takviye eklendiğinde artık mevcut olmadığı şeklindedir. Üçüncü gözlem olarak, hacimce %21,1 SiC ilave edilen kaplamada çukurlar ve sünek kırılma bulguları ortaya çıkmaya başlamıştır (Şekil 13d'de beyaz okla gösterilmiştir). Bu etkilerin sonucunda 107 MPa olan takviyesiz kaplamanın kohezyon mukavemeti hacimce %21,1 SiC takviye edilerek 129 MPa'a çıkarılmıştır. Kırılma yüzeylerindeki çukurlar takviye içeriği hacimce %26,4'e yükseltildiğinde daha belirgin hale gelmiştir (Şekil 13f'deki beyaz oklar) ve kohezyon mukavemeti 147 MPa'a çıkmıştır. Son gözlem ise, SiC içeriğinin %33,6-41,4 aralığındaki değerlere artırılması neticesinde takviye parçacıklarının Al5056 parçacıkları arasındaki etkin temas alanını azaltması şeklindedir (Şekil 13h ve j'de işaretli parçacıklar). Ayrıca çatlak sayısının da arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak kohezyon mukavemeti 147 MPa'lık maksimum değere ulaştıktan sonra, hacimce %33,6 ve %41,4 SiC ilavesi yapıldığında sırasıyla 122 MPa ve 113 MPa'a düşmüştür [50].

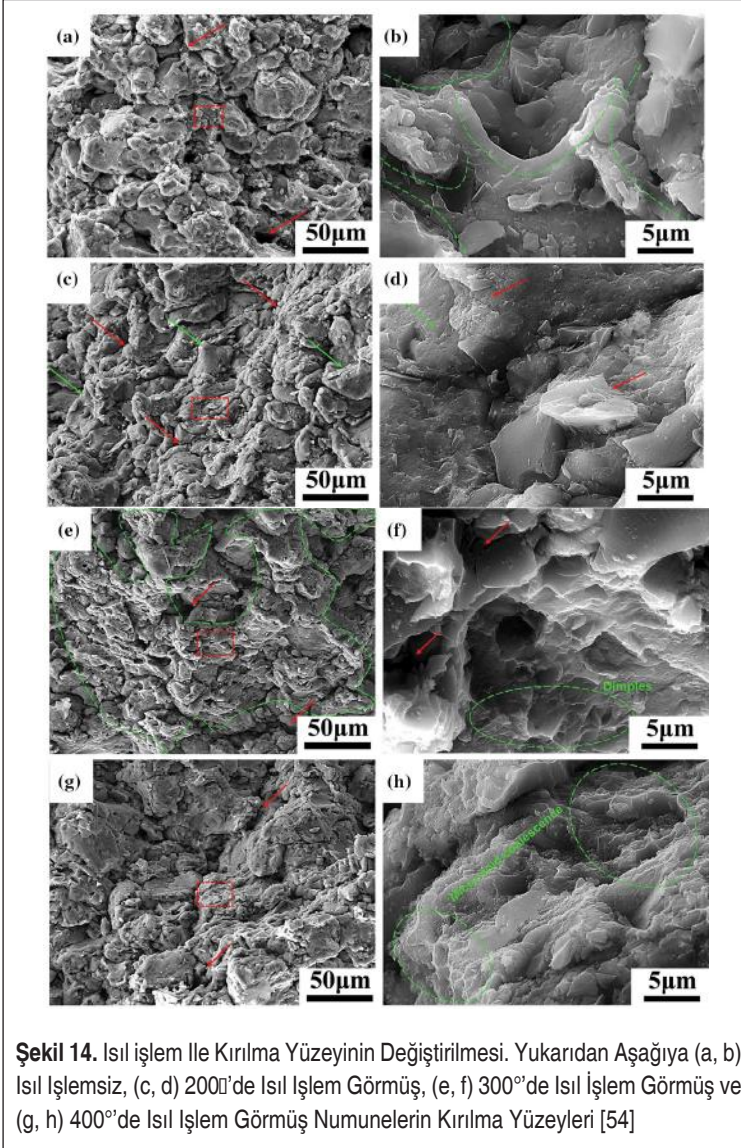
Kohezyon hasarı, kayma gerilmesi altında da meydana gelebilir ve parçacık takviye miktarına ek olarak, parçacık morfolojisi de kompozit kaplamaların kohezyon kayma mukavemetini etkiler. Köşeli ve küresel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıkları içeren farklı Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit kaplamaların basınçlı burulma testi sırasında benzer basınç gerilme-gerinim davranışları sergilediği tespit edilmiştir [53]. Bununla birlikte, köşeli parçacık içeren kompozit kaplamanın deformasyonu için daha düşük bir tork değerine ihtiyaç duyulmuştur ve neticede küresel parçacık içeren kaplamaya kıyasla kohezyon mukavemetinin daha düşük çıktığı önerilmiştir. Köşeli parçacıkların keskin köşelerindeki artan gerilim konsantrasyonunun, matriste mikro çatlakların oluşmasını desteklediği bulunmuştur.

Kırılma mekanizmaları, püskürtme sonrası ısı işlemlerin uygulanmasıyla da değişebilir. Örnek olarak hacimce %23 B4C içeren Al kompozit kaplamaların Ar gazı ortamında 4 saat boyunca 200, 300, 400 ve 500°C farklı sıcaklıklarda ısı işlemden geçirilmesinden sonra yapılan çekme testleri verilmiştir [54]. Isıl işlemsiz durumda maksimum



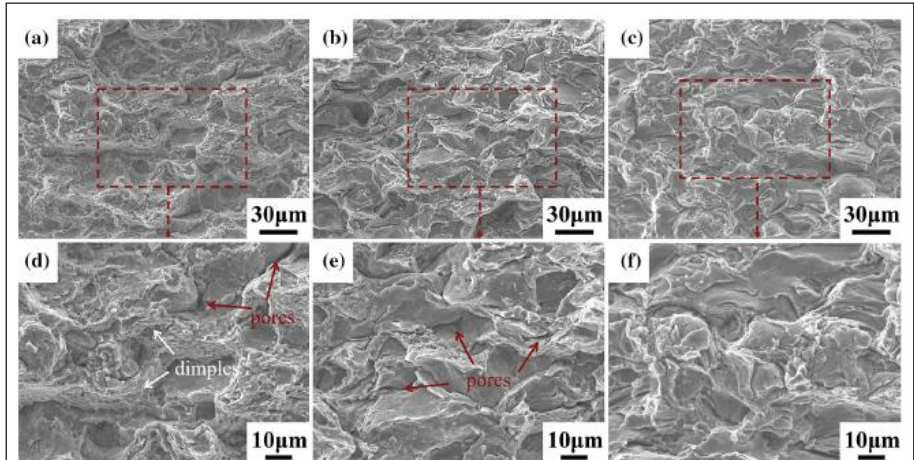
çekme mukavemeti 38 MPa iken bahsedilen ısıt işlemlerden sonra bu değer sırasıyla 44, 56, 58 ve 60 MPa'ya yükselmiştir. İşlem görmemiş ve ısıt işlem görmüş numuneler-

de kırılma hasarının son aşaması kaplamada meydana gelmiştir. Şekil 14(a) ve (b)'de gösterilen ısılsız işlemsiz kaplamanın kırılma analizinde, parçacıkların zayıf bağlandığı ve parçacıklar arasında çok sayıda aralık olduğu için bu bölgelerin çatlak başlatıcı olarak işlev gördüğü ortaya çıkarmıştır. 200°C'deki ısılsız işlem sonucunda bazı parçacıkların kısmen bağlanmış olduğu tespit edilmesine rağmen, zayıf bağlanmış bölgelerin halen önemli miktarda bulunması sebebiyle ısılsız işlemsiz durumda olduğu gibi



aynı çatlak başlangıcı mekanizmasının aktif olduğu bulunmuştur (Şekil 14c ve d). 300°C'de ısıtılma işlemi görmüş numuneler daha güçlü metalurjik bağa sahip olduğu için çukur benzeri yapılar ve sünek kırılmaya ait izler bulunmuştur. Bununla birlikte, kırılma hasarında çatlak başlangıcı olarak işlev gören parçacıklar arası boşluklar ve gözenekler halen mevcuttur (Şekil 14e ve f). 400 °C ve 500 °C sıcaklıkta ısıtılma işlemi tabii tutulmuş numuneler için gevrek kırılmadan tamamen farklı bir hasar bulunmuştur. Tüm kırılma yüzeyleri, sünek kırılmayı işaret eden mikro boşluk oluşumu ve bunların birleşmesine ait görüntüleri içermektedir (Şekil 14g ve h).

Diğer bir çalışmada, gaz atomizasyon tekniğiyle üretilmiş hacimce %4,2 nano-TiB<sub>2</sub> içeren 7075Al kompozit toz malzeme 7075Al-T6 altlık üzerine kaplanmıştır [55]. Bu çalışmada, taşıyıcı gaz olarak azot ve helyum kullanılmıştır. Gaz sıcaklığı, basıncı ve nozul tipinde de birtakım değişiklikler yapılmıştır. Çekme testi sonrası kırılma yüzeyleri farklı büyütme oranlarında Şekil 15'te gösterilmektedir. İşlem koşullarında yapılan değişiklikler biriktirme sırasında farklı deformasyon seviyelerine neden olmuştur. Şekil 15 (a)'da kırılma yüzeyi, tipik bir klivaj özelliği gösterir. Daha fazla plastik deformasyonun ve toparlanmanın meydana geldiği parçacıklar arası sınırlarda bazı çukurlar bulunmaktadır. Taşıyıcı gaz olarak azotun kullanıldığı kaplamada, Şekil 15 (b)'de gösterilen kırılma hasarı tercihen parçacıkların arayüzeyleri boyunca meydana gelmiştir. Kırılma yüzeyinde hemen hemen hiçbir çukur görülmemiş ve gevrek bir kırılma olmuştur. Helyumun taşıyıcı gaz olarak kullanıldığı Şekil 15 (c)'deki kırılma yüzeyi, deforme olmuş parçacıkların içerisinde geçen çatlakları içeren kıvrımlı bir yapı sergilemektedir. Gözlemlenen parçacık içi kırılmanın sebebi, malzeme jeti ve adyabatik kayma kararsızlığı nedeniyle arayüzey bölgelerinde aşırı deformasyo-



**Şekil 15.** İşlem Koşullarının Kırılma Yüzeylerine Etkisi. Soğuk Püskürtmede Taşıyıcı Gaz Kullanımı Soldan Sağa (a, d) Hava, (b, e) Azot ve (c, f) Helyumdur. (d, e, f), (a, b, c)'nin Daha Yüksek Büyütmeleridir [55]





nun meydana gelmesi ve sonuçta parçacıklar arasında daha güçlü metalik bağların oluşmasıdır. Hasar mekanizmasındaki değişiklik, Şekil 15 (a), (b) ve (c)'deki plastik deformasyon seviyesindeki değişikliklerle uyumludur. Ayrıca, Şekil 15 (a), (b) ve (c)'de gösterilen mikroyapılar için çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 325 MPa, 280 MPa ve 350 MPa elde edilmiş ve uzama değerleri sırasıyla %1,2, %0,6 ve %1,2 olarak bulunmuştur. Şekil 15 (d) ve (e)'deki mikroyapıların yakından görünümünde, çekme testleri sırasında kırılma hasarını hızlandırarak mukavemet ve uzamayı azaltan iç kusurlar ve gözenekler gözlemlenebilir [55].

Özetle, kaplama/altlık yapışma mukavemeti, takviye parçacık oranı yükseltilerek sıkıştırma etkisinin artması sonucunda geliştirilebilir. Ara yüzeydeki artan yapışma mukavemeti nedeniyle, hasar mekanizması adezyondan kaplamanın kendi içinde hasara uğradığı koheziona doğru değişebilir. Bununla birlikte, aşırı takviye parçacık kullanılması, etkin metalurjik bağlantı alanlarını azaltabilir ve daha düşük yapışma mukavemeti ile sonuçlanabilir. Kaplamanın kohezyon mukavemeti için de benzer bir etki mevcuttur. Parçacık morfolojisi, kaplamanın kohezyon mukavemetini etkileyebilir. Küresel parçacıklarla takviye edilmiş kaplamalar, keskin köşeli parçacıklara kıyasla daha az gerilim konsantrasyonu oluşturacağından daha yüksek kayma mukavemeti sunar. Isıl işlem, kaplama içindeki bağlanmayı önemli ölçüde iyileştirebilir ve sonuç olarak kompozit kaplamaların kırılma mekanizmasını değiştirebilir.

Aşınma, göreceli hareket esnasında yüzeyde meydana gelen malzeme kaybı olup düşük, orta ve şiddetli olmak üzere 3 farklı rejimde sınıflandırılmaktadır [56]. Düşük aşınma rejiminde talaş kaldırma durumu, belirgin talaş parçacıkları oluşmaksızın bölgesel yüzey deformasyonu ve kazıma mekanizmaları tarafından yönetilir [56]. Temasin hâlihazırda pürüzlülük seviyesinde olduğu orta aşınma rejiminde, birincil mekanizma yüzeyde mikro çatlakların oluşumudur. Bu rejimdeki bölgesel kopma, toz benzeri aşınma kalıntılarının oluşumuna yol açar [56]. Şiddetli aşınma rejiminde ise büyük yüzey altı çatlakları ve makroskopik kopma meydana gelir ve ince bir tabaka halinde aşınma kalıntılarının oluşumuna yol açar [56]. Yürütülen çalışmalarda matriste oluşan plastik deformasyon ve kazıma ile takviye malzemedeki kırılmanın, özellikle seramik takviyeli soğuk püskürtme kaplamalarda aşınma davranışını yöneten önemli süreçler arasında olduğu ifade edilmiştir [50, 57, 58, 59]. Ayrıca bazı çalışmalar arayüzey bağlantısının kuvvetli olması durumunda, takviye parçacıklarının kompozitin yük taşıma kapasitesine önemli ölçüde katkıda bulunabileceğini ve aşınma hızını azaltabileceğini göstermiştir [60, 61, 62]. Öte yandan kusurlu ara yüzey bağlanması, takviye edici parçacıkların kopmasına, kırılmasına ve parçalanmasına yol açabilmekte olup, bu da çeşitli mekanizmalar yoluyla ciddi aşınmaya neden olabilmektedir [60, 63]. Bu mekanizmalardan birincisi, kırılan parçacıklar uygulanan yükü taşıma yeteneklerini kaybeder. Sonuç olarak, matris malzemesindeki kayma gerinimlerinin miktarı önemli ölçüde artar ve bu da deformasyonun belirli bir bölgede yoğunlaşmasına ve yüzey altı tabakalarının ayrılmasına yol açar. İkinci olarak, kırılmış veya kopmuş takviye par-

çacıkları, tabakaların ayrılma hızını artırabilir. Üçüncü olarak, kırılmış veya yerinden sökülen parçacıklar abrazyon aşınması yoluyla ilave malzeme kaldırma mekanizmaları sağlayabilir.

Aşınma, kayma hareketi sırasında kaplamanın mikroyapısı değiştiğinde mekanizmaların gelişebileceği dinamik bir süreçtir. Yapılan bir çalışmada, Ti ve Ti-TiC kompozit kaplamaların kaymalı aşınması sırasında aşınma yüzeyleri doğrudan gözlemlenmiş olup, önerilen mevcut sürtünme ve aşınma mekanizmalarıyla kıyaslanabilir olduğu belirlenmiştir [64]. Sonuçlar incelendiğinde, saf Ti kaplamanın kaymalı aşınma testi sırasında Ti metalin karşı yüzeye transferinin başlangıç aşamasında meydana geldiği ortaya çıkmıştır. Sonraki çevrimlerde ana aşınma mekanizmaları, transfer filmlerinin çatlaması ve oksitlenmiş kalıntıların oluşması olarak değişiklik göstermiş olup, bu durumda ortaya çıkan aşındırıcı parçacıklar daha fazla aşınmaya yol açmıştır. Oksitlenmiş kalıntıların mekanik olarak aşınma yüzeyine kenetlenmesi sonucunda meydana gelen katmanların koruyucu olmadığı görülmüştür. Ti kaplamaya ilave edilen TiC parçacıkların sürtünme davranışını çift yönlü olarak önemli ölçüde değiştirdiği bulunmuştur. İlk olarak, test başlangıcında TiC parçacıkların yerinden çıkması ve sürtünme katsayısında gözlenen artış sebebiyle Ti'nin karşı yüzeye transfer olduğu ve yapıştığı bulunmuştur. İkincisi, TiC içeren kaplamalarda yüzeyden kopan üçüncül parçacıkların arayüzeyde kompakt ve yağlayıcı tribo filmleri oluşturduğu ve daha yüksek çevrimlerde kararlı ve düşük sürtünmeye yol açtığı gözlenmiştir [64].

Dinamik bir süreç olmanın yanı sıra, aşınma ve malzeme kaldırma mekanizmaları malzeme türüne, kompozit kaplamadaki takviye içeriğine ve test koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Düşük oranda seramik takviyesi yapılan WC-Co-Ni kompozit kaplamalarda malzeme kaybına sebep olan baskın mekanizmanın düşük devirli yüzey yorulması olduğu bulunmuştur [65]. Ayrıca düşük seramik içerikli kaplamaların aşınmış yüzeylerinde, kaldırılan aşınma kalıntılarının aşınma izi boyunca sıvanması nedeniyle tribofilm oluşmuştur. Tribofilmin kaplamanın aşınma direncini geliştirmede yararlı bir rol oynadığı ve kaplamanın karşı parça tarafından daha fazla aşınmasını önlediği görülmüştür. Bununla birlikte en yüksek seramik içeriği hacimce %62 olan kaplama yüzeyinde hiçbir tribofilmin üretilmediği tespit edilmiş olup, karakterize edilen aşınma yüzeylerindeki WC çıkıntılarının Ni matris fazının aşınmasını etkin bir şekilde önlediği görülmüştür [65]. Saf Ni ve %10,5 Ni-WC kompozit kaplamaların katı parçacık erozyonu karşılaştırılmış ve akışkanın geliş açısı 30° olduğunda benzer aşınma direnci elde edilmiştir. Ancak normal 90° geliş açısında kompozit kaplamanın daha düşük bir erozyon hızına sahip olduğu ortaya çıkmıştır [60]. Açık değeri 30° olduğunda ana aşınma mekanizmaları kesme ve kazıma şeklinde iken normal geliş açısında deformasyonun belirli bir bölge ile sınırlandırıldığı, çıkıntı oluşumunun ve WC kırılmasının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Açık değeri 90° olduğunda ise her iki kaplamanın göstermiş olduğu yüksek aşınma direncinin sebebi olarak aşındırıcı  $Al_2O_3$  parçacıkların kaplamaya gömülmesi ve ardından mekanik olarak modifiye edil-



miş katmanın oluşumu olarak ifade edilmiştir. Bununla birlikte, kompozit kaplamadaki WC parçacıklarının varlığı,  $Al_2O_3$  parçacıklarının gömülmesini ve mekanik olarak modifiye edilmiş katmanın oluşumunu önlemiş, bu durum ise daha düşük erozyon direncine katkıda bulunmuştur. Sonuç olarak 300 açıda WC parçacıkları Ni'yi yüzeyin bazı bölgelerinde aşınmadan koruyabilmiştir. Bununla birlikte kayda değer bir gelişim için WC içeriğinin oldukça düşük olması gerektiği bulunmuştur [60].

Özetle, matris fazındaki plastik deformasyon ve kazıma ile takviyedeki kırılma, soğuk püskürtme kompozit kaplamalardaki ana aşınma mekanizmalarıdır. İlave olarak, zayıf matris/takviye arayüzey bağlanmasının parçacık kopmasına neden olduğu görülmektedir. Aşınma dinamik bir süreçtir, çünkü aşınma sırasında malzemenin kaybı ve sürtünme katmanlarının oluşumu yoluyla sürekli gelişir. Aşınma mekanizmaları ve süreçleri, bir malzeme sisteminden diğerine önemli ölçüde farklılık gösterebilir ve farklı koşullar altında duruma göre incelemeler gerektirebilir. Aşınma mekanizmaları, kayma kuvvetini azaltmaya yönelik olarak yükü dağıtan ve/veya katı yağlayıcıların dahil edilmesini sağlayan sert takviye ilavesiyle daha düşük aşınma kaybı elde etmek için modifiye edilebilir.

## 8. ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR

Son yıllarda soğuk püskürtme işlemi elektronik sistemlerin tamiri, eklemeli imalat, kaynak, sert lehimleme, yüzey koruma, tıbbi cihazlar ve malzemeler gibi uygulama alanlarına yönelik olarak kullanılmaktadır. Bu doğrultuda soğuk püskürtme yönteminin uygulandığı sektörler değerlendirildiğinde savunma sanayi, otomotiv, havacılık ve medikal endüstrileri daha fazla öne çıkmaktadır [66, 67]. Soğuk püskürtme yöntemi bazı endüstriyel uygulamalarda kullanılan parçaların, kullanım sahasındayken onarımı için devrim yaratacak nitelikte etkiye neden olmuştur. Özellikle havacılık, petrokimya ve nükleer enerji endüstrisinde bakım maliyetlerinin düşürülmesine yönelik olarak ciddi tasarrufların ortaya çıkarılmasını sağlamıştır. Söz konusu işlevsel özellikler ve uygulama alanları ile ilgili soğuk püskürtme yönteminin mevcut potansiyeli Tablo 6'da toplu olarak özetlenmiştir.

### 8.1 Eklemeli İmalat ve Onarım

Yüksek yoğunluk, üstün yapışma, yüksek birikme hızı ve birikme verimi gibi özellikler soğuk püskürtme teknolojisini net şekle yakın parça üretimi ve onarım için cazip hale getirmektedir. Soğuk püskürtme yöntemi kullanılarak temel malzeme preformları üzerindeki flanşlar, çıkıntılar ve direkler gibi yapıların üretimi için bir yöntem patenti alınmıştır [68]. Burada son parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek için sıcak izostatik presleme, ısı işlemi, yaşlandırma, su verme, germe ve tavlama işlemleri imalat sürecine dâhil edilmiştir. Heinrich ve arkadaşları, içi boş bir boru üretmek için soğuk püskürtme işleminin kullanılabileceği bir yöntem patentini almıştır [69]. Bu yöntemde içi boş bir borunun birikmesi için düşük yapışma özelliğine sahip silindirik bir altlık kullanılmıştır. Burada düşük yapışma özelliğine sahip soğuk püskürtme



Tablo 6. Soğuk Püskürtme Yönteminin Mevcut Potansiyeline Yönelik Genel Bakış [42]

İşlevsel Özellikler	Metal ve Alaşımları	Metal/Polimer	Meta/Seramik (MMC)	Meta/Metal (MMC)	İntermetalikler	Oksitler	Seramikler	WC Sermetler	MMC/Sermetler	MALCer	MCrAlY	Stelitelere	Karbürler	Polimerler	Ternitler	Nanomalzemeleler	Uygulama Alanı
Korozyon Direnci	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Havacılık, otomotiv, elektronik, savunma, petrokimya, enerji
Oksidasyon Direnci	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Havacılık, deniz, elektrik-elektronik uygulamaları
Erozyon (Elektrik, kaviteasyon ile) Direnci	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Çeşitli endüstri sektörleri
Yüksek Özgül Mukavemet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Otomotiv, havacılık, işleme, dekorasyon
Aşınma Direnci	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Çeşitli endüstri sektörleri
Aşındırıcı	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Otomotiv, havacılık, denizcilik, inşaat mühendisliği
Sürtünme Önleyici	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Çeşitli endüstri sektörleri
Özel Bağlayıcı Tabaka	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Havacılık, savunma, petrokimya
Restorasyon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Çeşitli endüstri sektörleri
Yığın Matzeme	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Biyomedikal (dış ve ortopedik implantlar)
Biyoyumluluk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Biyomedikal
Anti-bakteriyel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Elektronik, havacılık, enerji depolama, elektrik kontak uygulamaları
İletkenlik/Yalıtım (Elektriksel-Termal)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Enerji üretim endüstrisi
Fotovoltaik Performans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Enerji üretim endüstrisi
Fotokatalitik Performans	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Enerji üretim endüstrisi, enerji depolama
Enerji Yüklü Malzemeler	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	





kaplama, taslak kalıbın kaplamadan ayrılabilmesi bakımından kritik öneme sahiptir. Bu durum püskürtme uygulama açısının  $0^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye değiştirilmesiyle sağlanmıştır. Payne ve Garland'ın soğuk püskürtme işlemiyle ince duvarlı muhafazaların onarımı için aldığı patent, alüminyum döküm parçalar gibi aşınmış iç ve dış yüzeylere sahip malzemelerin onarımını kapsamaktadır [70]. İnce duvarlı bileşenler, genellikle ağırlığın kritik öneme sahip olduğu havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılmaktadır. İnce duvarlı muhafazalar kullanım şartlarında korozyon, erozyon ve mekanik aşınmaya maruz kalmaktadır. Son yıllarda soğuk püskürtme yöntemi, havacılık ve otomotiv bileşenlerinin onarımı ve imalatına uyarlanmıştır. Bunun ile ilgili yürütülen bir patent çalışmasında türbin rotorunun üretimi ve onarımına yönelik olarak soğuk püskürtme yöntemi kullanılmıştır [71]. Diğer bir patentte türbin kanatlarının tamir edilmesi için soğuk püskürtme yöntemine başvurulmuştur. Buradaki tamirin amacı türbin kanatlarında görülen aşınma, çatlama ve mikro yapısal bozulmaların önüne geçmektir [72].

## 8.2 Kaynak ve Lehimleme

Soğuk püskürtme yönteminin düşük işlem sıcaklığı, düşük oksijen içeriği ve yüksek birikme hızına sahip olmasının yanı sıra işlem hızı ile birikmenin çok iyi şekilde kontrol edilmesi sayesinde kaynak ve lehim uygulamalarında kullanımının önü açılmıştır. Schmid ve Doesburg tarafından Sn-Ag-Cu, Sn-Ni-Cu, Sn-Cu, Sn-Zn ve diğer düşük erime noktasına sahip kompozit malzeme karışımlarıyla lehimler üretmek için soğuk püskürtme işleminin kullanıldığı bir yöntem patenti alınmıştır [73]. Miller ve arkadaşları giydirmeye yapılar da bağlantı oluşturulması ile ilgili soğuk püskürtme yönteminin kullanımına yönelik patent çalışması gerçekleştirmiştir [74]. Burada sürekli bir bağlantı oluşturmak için kaplama malzemesinin iki bağlantı arasına püskürtülmesi söz konusudur. Ayrıca bağlantıların tantaldan yapılabileceği ve korozyona dayanıklı bağlantılar üretmek için çelik kenarları tantal kaynaklarla kaynaklamak için kullanılabilmesi ifade edilmiştir. Soğuk püskürtme uygulamaları yarı iletken centalara kadar uzanmaktadır. Ohno, Cu gibi metalik tozdan yapılmış bir reçine bağlantı kaplamasını iki yarı iletken altlık arasına biriktirmek için soğuk püskürtme işleminin kullanıldığı bir yöntemin patentini almıştır. Soğuk püskürtme işlemi geleneksel kaynak ve lehimleme tekniklerinden farklı olarak, mikroyapısal bozunmayı ve aşırı ısıdan etkilenen bölgenin oluşumunu sınırlandıran düşük işlem sıcaklıkları altında gerçekleştirilir [75]. Schaeffer ve diğerleri, türbin kanatları ve braketleri gibi havacılık bileşenlerinin kaynaklanması ve lehimlenmesinde, titanyum alüminit tozunun soğuk püskürtme işlemiyle biriktirilmesini içeren bir yöntemin patentini almıştır [76].

## 8.3 Koruyucu Kaplamalar

Ajdelsztajn ve arkadaşları, soğuk püskürtme yöntemiyle kobalt ve mangan alaşımını içeren korozyona dayanıklı kaplamaların üretilmesi için bir patent almıştır [77]. Benzer şekilde Raybould ve arkadaşları magnezyum bileşenlerinin korozyon ve aşınmadan korunması ve onarımı için bir yöntem patentini almıştır [78]. Bu amaç doğ-

rultusunda korozyona dayanıklı soğuk püskürtme kaplamalar içerisinde alüminyum, alüminyum alaşımları, titanyum ve alaşımları ile sert parçacık içerikli kompozitler kullanılmıştır. Koruyucu kaplama olarak korozyondan korumak için alüminyum katman ve erozyon aşınmasından korumak için dış katmanda titanyum veya sert parçacık içeren kompozit malzemelerin kullanıldığı belirtilmiştir. Bunting ve arkadaşları, korozyon hasarına uğramış bir gaz türbini bileşeninin aslına uygun ölçülerde ve düşük oksidasyon hızına sahip olacak şekilde onarılmasıyla ilgili bir yöntem geliştirmiştir [79]. Bu yöntem, ana malzemeye kıyasla üstün korozyon direncine sahip alüminyum, magnezyum, silisyum ve bunların karışımlarından oluşan malzemelerin soğuk püskürtme yöntemi ile kaplanmasını içermektedir. Bu noktada malzeme oksidasyonunu azaltmak için düşük biriktirme sıcaklıkları ve azot veya helyum gibi oksitleyici olmayan taşıyıcı gazlar seçilmektedir. Miyamoto ve Hirano, kalay içeren alüminyum esaslı alaşımı soğuk püskürtme yöntemiyle rulmanların kayma yüzeyine kaplamıştır [80]. Termal püskürtme kaplamalara kıyasla farklı fazların soğuk püskürtülmüş yapıda daha iyi dağılması ve daha düşük oksit içeriğine sahip olması sayesinde performansta iyileşme tespit edilmiştir.

#### 8.4 Havacılık Sanayi

Havacılık endüstrisinde soğuk püskürtme yönteminin yeni uygulamaları ortaya çıkmaktadır. Haynes ve arkadaşları, gaz türbinlerindeki dönen ve sabit bileşenler arasında aşınabilir bir conta oluşturmak amacıyla, bir sızdırmazlık destek malzemesi üzerine aşınabilir kaplamalar uygulayan yöntemin patentini almıştır [81]. Titanyum veya nikel esaslı alaşımdan üretilen soğuk püskürtme kaplamanın istenilen yapısal sertliğe, sızdırmazlığa ve daha fazla aşınabilirliğe sahip olması için işlem parametreleri değiştirilerek kaplama içerisinde değişen seviyelerde gözeneklilik oluşturulmuştur. Soğuk püskürtme işleminin başka bir uygulaması, türbin motoru bileşenleri üzerine bağlayıcı astarların biriktirilmesidir [82]. Bu amaç doğrultusunda patenti alınan yöntemdeki en önemli yenilik, taşıyıcı gazın bir kısmının kaplama içerisinde hapsedilmesidir. Bir sonraki ısıl işlem sırasında içeride hapsedilen gaz yayılarak daha büyük gözenekler oluşturmaktadır. Seçilen malzemeler arasında MCrAlY, alüminyum, titanyum, paladyum ve diğer geçiş metalleri bulunmaktadır. İşlem sonucunda %25-%50 arasında gözenekliliğe sahip bağlayıcı astar üretildiği ve böylece türbin motorunun çalışma sıcaklığının artırıldığı ifade edilmiştir.

#### 8.5 İmalat Sanayi

Barker ve arkadaşları tarafından yüksek saflıktaki elektrokatalitik malzemelerin bir elektrot üzerine kaplandığı bir yöntem patentlenmiştir. Bu çalışmada soğuk püskürtme yönteminin toz malzeme özelliklerini değiştirmediği ifade edilmiştir [83]. Soğuk püskürtme yöntemi, biriktirme sırasında metalik toz oksidasyonunu önleyebildiğinden ve soğuk püskürtme kaplamaların yüksek termal iletkenlik göstermesinden



dolayı güç modülleri gibi ısı transfer cihazlarında da uygulama alanları bulmaktadır [84,85]. Kruger ve Ullrich, bakır indiyum selenid veya YBaCuO gibi güneş pili materyallerinin, tekstürlü altlıklar üzerine birikmesini önermiştir. Burada tekstürlü altlık malzemelerin güneş pillerinin verimliliğini arttırdığı iddia edilmiştir [86]. Doye ve arkadaşları, reaktif gazları kaplama yapısına dahil ederek fotokatalitik özelliklerini geliştirmek için bir yöntem önermiştir. Söz konusu patent çalışmasında soğuk püskürtmeyle yüzeye biriktirilen titanyum dioksit, kaplama işlemi sürerken UV ışığı ile aktive edilmiştir. Bu sayede taşıyıcı gaz olan reaktif azot molekülleri kaplama yüzeyinde parçalanmıştır. Daha sonra kemisorpsiyon mekanizmasıyla azot atomları, oksijen atomlarını titanyum dioksit kristal yapısının dışına iterek titanyum oksinitrür oluşturmuştur. Kaplamaların, kataliz için uygun yüzeyi arttıran değişik oranlarda gözeneklilik içerdiği tespit edilmiştir [87].

## 8.6 Medikal Uygulamaları

Soğuk püskürtmede gözenekliliğin kontrolü, tıbbi cihaz uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. Kramer tarafından stentler, anastomoz çipleri, embolik koruma filtreleri, doku/organ ekleri gibi tıbbi cihazlardaki uygulamalar için tüplerin, levhaların ve altlık tabakalarının net şekle yakın üretimi için soğuk püskürtme yöntemi patentlenmiştir [88]. Ayrıca, biyolojik olarak uyumlu polimer veya seramik içeren yüksek gözenekli soğuk püskürtme kaplamaların medikal cihazlardaki uygulamaları bulunmaktadır. Bu uygulamaların amacı cihaz biyouyumluluğunu artırarak ilaç ve tedavi edici ajanlar için ilaç salım sistemi işlevini görmektir. Gözenekli yapılar, gözenekli toz malzemelerin püskürtülmesiyle veya püskürtme işleminde uygun değerlere sahip parametreler seçilerek elde edilebilir. İlaçların doğrudan gözenekli tıbbi cihaza soğuk püskürtme ile biriktirilmesi de hedeflenmektedir.

## 8.7 Elektroiletken Parçalar ve Manyetik İletkenler

Soğuk püskürtme yönteminde kullanılan toz parçacıklar tercihen elektriksel olarak iletken malzemeler veya lehmlenebilir malzemelerdir. Bunlar Sn ve alaşımları, özellikle Sn-Ag alaşımları, Al ve alaşımları, Ag ve alaşımları, Au ve alaşımları, Pb ve alaşımları, Zn ve alaşımları ve bu malzemelerin kompozit karışımlarıdır. Elektrik iletken bir altlık üzerinde soğuk püskürtme ile elektrik temaslarının sağlanması bir avantajdır [89]. Genel olarak bu temasın oluşturulması için alt tabakanın önceden temizlenmesi gerekli olup, soğuk püskürtme yöntemi ile yüzeyin ilk temizliği olmadan da temas yaratılabilmektedir. İlk olarak parçacıklar altlık malzemeyi oksitlerden arındırır ve sonraki süreçte parçacıklar yakın elektrik teması gerçekleştirerek altlığa yapışır.

Elektronik bileşenlerin ve elektrik sistemlerinin modern motorlu taşıtlara daha fazla dâhil edilmesiyle, yüksek akım ve daha iyi sıcaklık yönetimi yeteneklerine sahip devreleri olan bileşenlere ve sistemlere daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür motorlu taşıtlarda yaygın olan yüksek güç uygulamalarını ve gereksinimlerini karşılamak için



bu tür yeteneklere sahip elektronik devreler gereklidir. Genel olarak, bir devrenin bu tür kriterleri karşılması için, ısı üretimini en aza indirmek ve devre soğutmaya yardımcı olmak amacıyla, ısıyı ileten veya termal enerjiyi yayan metal iletken yolunun yeterince kalın olması gereklidir. Söz konusu bir çalışmada yüksek akım uygulamalarında kullanım için bakır esaslı bir devre tercih edilmiştir. Bakır esaslı devre, elektriksel olarak yalıtkan bir altlığa, istenilen devre şekline göre oluşturulan gümüş içerikli bir bağ katmanına ve plastik deformasyona uğramış bakır parçacıklarını içeren elektriksel olarak iletken bir katmana sahiptir [90].

Çok hücreli pil yapılarında güvenli elektrik bağlantılarının elde edilmesi önemlidir. Lityum iyon çok hücreli pilleri için bu tür bağlantılar özellikle bazı kriterleri yerine getirmesi açısından önemlidir. Bu kriterler içerisinde, benzer olmayan metaller ile fiziksel bağ kurulması, bağlantının 0,2 mOhm'un altında elektrik direncine sahip olması, mekanik ve termal etkilere dayanıklı olması, yüksek korozyon direnci sergilemesi ve kaynaklama işlemi sırasında pil hücresinin sıcaklığını  $\sim 100$  °C'nin altında tutma kabiliyeti verilebilir. Bu amaçla iki parçanın birbirine fiziksel olarak bağlanması ve düşük dirence sahip elektrik bağlantısının oluşturulması için soğuk püskürtmeyi içeren bir işlem önerilmiştir [91].

Manyetik malzemeleri bir taşıyıcı altlık üzerine termal olarak püskürtmek mümkündür. Ancak termal püskürtme işleminden gelen yoğun ısı bazı metallerin oksitlenmesine veya oksit üretmesine neden olur. Oksitler kaynaklandıkları ana metallerden çok daha zayıf manyetik alanlar üretir. Bununla birlikte soğuk püskürtme işlemi mıknatıs üretimi için kullanılır. Bu nedenle manyetik malzeme yüksek sıcaklıklara maruz kalmaz. İstenmeyen oksitlerin oluşumunu azaltır ve mıknatısın nihai şekline uygun olarak malzemenin hassas bir şekilde birikmesini sağlar [92].

Gerçekleştirilen diğer bir çalışmada, elektrik devrelerinin üretimi için soğuk püskürtme yöntemi ve cihazı patentlenmiştir. Bu patent çok az maskeleme kullanarak veya maskeleme olmadan desenli bir elektrik devre kartı üretmeyi mümkün kılmaktadır. Ayrıca, bu buluş üç boyutlu olarak şekillendirilmiş bir altlık malzemeye uygulanabilmektedir. Sonuç olarak elektrik devresi hemen hemen her yüzeye püskürtülebileceği için birçok yeni kullanım alanını ortaya çıkarmaktadır [93]. Soğuk püskürtme yöntemi yeni elektroiletken ve manyetik cihazların üretimi esnasında lehimleme işlemi, yüzeyin onarımı ve korunması aşamalarında uygulama alanı bulmaktadır. Soğuk püskürtme işlemi ile ortaya çıkan kaplamaların mikron altı boyuta ve gözenekli yapıya sahip olması avantajlı sonuçlar doğurmaktadır [94].

## 8.8 Savunma Sanayi

Soğuk püskürtme yönteminin savunma sanayi uygulamaları daha çok tamir-onarım, bakım, eklemeli imalat, aşınma ve korozyon direncinin iyileştirilmesi çerçevesinde yoğunlaşmaktadır. Bu doğrultuda alüminyum ve magnezyum alaşımları başta olmak



üzere çelik, nikel bazlı süper alaşımlar ve pirinç/bronz alaşımları gibi yüksek mukavemetli malzemeler için çeşitli onarım süreçleri geliştirilmiştir. Dökme magnezyum ve alüminyum alaşımları hafifliği, yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve düşük üretim maliyetleri nedeniyle dişli kutuları ve şanzıman muhafazaları gibi havacılık ve savunma sanayi bileşenlerinde kullanılır. Şanzımanlar ve şanzıman mahfazaları özellikle korozyon, aşınma ve/veya darbe hasarlarına maruz kalmaktadır [53,95].

Magnezyum alaşımlarının boyutsal yenilenmesi ve korozyondan korunması için yüzeylerine soğuk püskürtme yöntemiyle alüminyum ve alüminyum alaşımları kaplanır. Soğuk püskürtülmüş alüminyumun korozyona karşı korumadaki en önemli görevi pasif film oluşumunu hızlandırmasıdır. Dünya geneline bakıldığında özellikle askeri hava araçlarında görülen magnezyum korozyonu için bakım/onarım maliyetleri oldukça yüksektir. Aynı zamanda ülkelerin askeri araç envanterine bakıldığında her biri magnezyum alaşımlarından üretilen ve genellikle şanzıman ve şanzıman muhafazalarından oluşan çok sayıda bileşene sahip binlerce uçak ve helikopter bulunmaktadır [53]. Helikopter iniş takımı amortisörlerinde ve uçak pervane kanatlarında kullanılan alüminyum alaşımlarının (AA2224, AA7075 vb.) onarımında soğuk püskürtme teknolojisinin potansiyeli gösterilmiştir [96]. Uluslararası Toz Metalurjisi ve Yeni Malzemeler Araştırma Merkezi tarafından, 6061 alüminyum fan gövdesi de dâhil olmak üzere yüksek seviyelerde hasara maruz kalan gaz türbini bileşenlerini onarmak için soğuk püskürtme işleminin çeşitli uygulamalarda kullanıldığı bildirilmiştir [53]. Başka bir uygulama, titanyum kompresör muhafazasının imalatında başlangıç malzemesi ve işleme atıklarını en aza indirmek için belirli alanların soğuk püskürtmeyle titanyum kaplanmasıdır. Benzer bir yaklaşım ile bakır, alüminyum ve çinko gibi diğer malzemelerin kullanıldığı difüzörler, yakıcılar, türbinler ve egzoz nozulları gibi parçalarda da başarı sağlandığı rapor edilmiştir. Ayrıca alüminyum ve magnezyum havacılık bileşenlerinin onarımına yönelik pervane kanadı tamiri gerçekleştirilmiştir. Askeri uçaklarda görülen bir başka sorun dış panel üzerinde yer alan panel sabitleme delikleri etrafında sürtünme nedeniyle meydana gelen aşınmadır. Panel 2024-T6 alüminyum alaşımından imal edilmiş olup, alüminyum alaşımı tozun soğuk püskürtülmesiyle onarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Menteşe bağlantı parçaları, uçuş sırasında aşınma ve korozyon hasarına maruz kalmaktadır. Menteşe bağlantı parçalarının hasarını uçaktan sökmeden onarmak için Al-7075 tozunu kaplayan bir soğuk püskürtme işlemi geliştirilmiştir. Uçaklarda yer alan iniş takımları aksları 2024 alüminyum alaşımından imal edilmektedir. Bu parçalar ile yaşanan en büyük sorun aşınma hasarıdır. Dolayısıyla iniş takımları akslarının aşınma performanslarını arttırmak için nikel esaslı tozlar seçilerek soğuk püskürtme kaplamalar kullanılmıştır [95].

## 9. SONUÇLAR

Soğuk püskürtme, toz metal parçacıklarını ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda parça yüzeylerine biriktirmek için termal enerji yerine kinetik enerji kullanan bir kaplama işlemidir. Biriktirilen kaplamalar, parçacıkların orijinal faz yapısını korurken



geleneksel termal püskürtme işlemleriyle ilişkili oksit oluşumunu ve artık gerilmeleri en aza indirerek altlık yüzeylerine gelişmiş aşınma ve korozyon koruması sağlar.

Son yıllarda soğuk püskürtme sistemindeki nozul tasarımına yönelik birtakım çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde, biriktirme hızı ve biriktirme verimliliğinin artırılabilceği tespit edilmiştir. Nozul tasarımındaki gelişmeler, nispeten daha yüksek biriktirme hızlarının yanı sıra daha büyük parçacıkları biriktirme kabiliyetini de teşvik etmiştir. Akışkanlar dinamiği modelleri ile geliştirilen yüksek parçacık hızlarına sahip nozullar, daha yoğun kaplamaları ve daha yüksek biriktirme verimliliğini sağlamıştır. Nozul uzunluğunun artırılmasının parçacık hızını önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Örneğin, merkezi nozul uzunluğunun arttırılmasıyla, taşıyıcı azot gazıyla püskürtülen bakır parçacıkların hesaplanan hızı ciddi oranda yükseltilmiştir.

Soğuk püskürtme işlemi birçok sektöre yönelik uygulama alanına sahiptir. Son zamanlardaki gelişmeler neticesinde havacılık, medikal ve eklemeli imalat ön plana çıkmaktadır. Yakın zamanda gelecek vaat eden bir çalışma, havacılık endüstrisi için umut verici olan düşük ağırlıklı ve yüksek mukavemetli karbon fiber kompozitlerin metalle kaplanması işlemidir. Geleneksel üretim proseslerinin fiber kompozit malzemelerin kaplanması işleminde uygulanması zordur çünkü zaman alır, emek gerektirir ve oldukça pahalıdır. Bununla birlikte, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerin metalle kaplanması, havacılık ve uzay mühendisliğinde uçak gövdesinin iletkenliğini arttırmaya yardımcı olur. Soğuk püskürtme işlemleri, CFRP yapılarındaki oksidasyon ve ağırlık artışı sorunlarını çözmede etkili olmuştur.

Son zamanlarda yapılan araştırmalar, eklemeli imalatın soğuk püskürtme işlemlerinin uygulanması için ticari olarak en uygun seçenek olacağını öne sürmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, soğuk püskürtmenin uygulanabilirliğinin rüzgâr enerjisi, fotovoltaik enerji, mimari ve tıp gibi daha gelişmiş alanlara yayılması beklenmektedir. Örneğin, fotovoltaik uygulamalarda, güneş pillerindeki karmaşık iletken tasarımların imalatı için uygulanabilir. Rüzgâr enerjisi endüstrisinde, karmaşık polimer-matris kompozitlerden üretilen parçalarda yüzey performansını iyileştirmek için bu yöntem kullanılabilir. Diğer taraftan biyomedikal alanda, tıbbi implantların soğuk püskürtmeyle üretilmesi için Co-Cr ve paslanmaz çelik toz karışımlarının kullanılması önerilmiştir. Co-Cr, paslanmaz çeliğe göre korozyona karşı daha dayanıklıdır, ancak aynı zamanda üretimi daha zor ve daha pahalıdır. Soğuk püskürtme işlemi, paslanmaz çeliğin Co-Cr ile birleştirilerek ucuz ve kolay bir şekilde korozyon direnci ve mukavemet açısından üstün özellikler kazanmasını sağlar. Bunun neticesinde, gelecekte yeni biyomalzemelerin geliştirilmesi mümkün hale gelebilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. (BAP Proje no: 2020.KB.FEN.001).



## KAYNAKÇA

1. **Thurston, S.H.** Method of Impacting One Metal Upon Another, US706701, year of priority (issued): 1900 (1902).
2. **Thurston, S.H.** Process of Coating One Metal with Another Metal, US706702, year of priority (issued): 1901 (1902).
3. **Rocheville, C. F.** 1958. Device for Treating the Surface of a Workpeice. US3100724, year of priority (issued).
4. **Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkhimov, A., & Fomin, V.** 2007. Discovery of the cold spray phenomenon and its basic features, Editor(s): Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkhimov, A., Fomin, V., ISBN-13: 9780080451558, Cold Spray Technology, Pages 1-32, Elsevier.
5. **AlMangour, B.** 2018. Fundamentals of Cold Spray Processing: Evolution and Future Perspectives, P. Cavaliere (ed.), Cold-Spray Coatings. (pp. 3-24). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-67183-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-67183-3_1)
6. **Irissou, E., Legoux, J. G., Ryabinin, A. N., Jodoin, B., & Moreau, C.** 2008. "Review on cold spray process and technology: part I—intellectual property," Journal of Thermal Spray Technology, vol. 17, no. 4, 495-516. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9203-3>
7. M.F. Smith, Chapter 1: Introduction to Cold Spray, Editor(s): Kay, C. M., & Karthikeyan, J. In High Pressure Cold Spray: Principles and Applications, ASM International, 2016, Pages 1-16.
8. **Alkhimov, A. P., Papyrin, A. N., Kosarev, V. F., Nesterovich, N. I., & Shushpanov, M. M.** 1994. U.S. Patent No. 5,302,414. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
9. **Dykhuisen, R. C., & Smith, M. F.** 1998. "Gas dynamic principles of cold spray," Journal of Thermal spray technology, vol. 7, no. 2, p. 205-212. <https://doi.org/10.1361/105996398770350945>
10. **Dykhuisen, R. C., Smith, M. F., Gilmore, D. L., Neiser, R. A., Jiang, X., & Sampath, S.** 1999. "Impact of high velocity cold spray particles," Journal of Thermal spray technology, vol. 8, no. 4, p. 559-564. <https://doi.org/10.1361/105996399770350250>
11. **Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., & Kreye, H.** 2003. "Bonding mechanism in cold gas spraying," Acta Materialia, vol. 51, no. 15, p. 4379-4394. [https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(03\)00274-x](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(03)00274-x)
12. **Schmidt, T., Gärtner, F., Assadi, H., & Kreye, H.** 2006. "Development of a generalized parameter window for cold spray deposition," Acta materialia, vol. 54, no. 3, p. 729-742. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.10.005>
13. **Assadi, H., Kreye, H., Gärtner, F., & Klassen, T.** 2016. "Cold spraying—A materials perspective," Acta Materialia, vol. 116, p. 382-407. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.034>
14. **Schmidt, T., Assadi, H., Gärtner, F., Richter, H., Stoltenhoff, T., Kreye, H., & Klassen, T.** 2009. "From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying," Journal of Thermal Spray Technology, vol. 18, no. 5-6, p. 794-808. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9357-7>



15. **Li, W. Y., Li, C. J., & Liao, H.** 2010. "Significant influence of particle surface oxidation on deposition efficiency, interface microstructure and adhesive strength of cold-sprayed copper coatings," *Applied Surface Science*, vol. 256, no.16, p. 4953-4958. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.03.008>
16. **Vidaller, M. V., List, A., Gaertner, F., Klassen, T., Dosta, S., & Guilemany, J. M.** 2015. "Single impact bonding of cold sprayed Ti-6Al-4V powders on different substrates," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 24, no. 4, p. 644-658. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0200-4>
17. **Grujicic, M., Zhao, C. L., DeRosset, W. S., & Helfritsch, D.** 2004. "Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process," *Materials & design*, vol. 25, no. 8, p. 681-688. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.03.008>
18. **Grujicic, M., Saylor, J. R., Beasley, D. E., DeRosset, W. S., & Helfritsch, D.** 2003. "Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process," *Applied Surface Science*, vol. 219, no. 3-4, p. 211-227. [https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(03\)00643-3](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(03)00643-3)
19. **Hussain, T., McCartney, D. G., Shipway, P. H., & Zhang, D.** 2009. "Bonding mechanisms in cold spraying: the contributions of metallurgical and mechanical components," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 18, no. 3, p. 364-379. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9298-1>
20. **Champagne, V. K.** 2007. *The cold spray materials deposition process*, ISBN: 978-1-84569-181-3, Elsevier Science.
21. **Rokni, M. R., Nutt, S. R., Widener, C. A., Crawford, G. A., & Champagne, V. K.** 2018. *Structure-Properties Relations in High-Pressure Cold-Sprayed Deposits*. In *Cold-Spray Coatings* (p. 143-192), Editor: Cavaliere, P., ISBN: 978-3-319-67182-6, Springer, Cham.
22. **Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Schmidt, T., & Kreye, H.** 2006. "The cold spray process and its potential for industrial applications," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 15, no. 2, p. 223-232. <https://doi.org/10.1361/105996306x108110>
23. **Smith, M. F.** 2007. *Comparing cold spray with thermal spray coating technologies*. In *The cold spray materials deposition process* (p. 43-61), ISBN: 978-1-84569-181-3, Woodhead Publishing.
24. **Ghelihi, R., & Guagliano, M.** 2009. "Coating by the cold spray process: a state of the art," *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 3, no. 8, p. 30-44. <https://doi.org/10.3221/igfesis.08.03>
25. **Kliemann, J. O., Gutzmann, H., Gärtner, F., Hübner, H., Borchers, C., & Klassen, T.** 2011. "Formation of cold-sprayed ceramic titanium dioxide layers on metal surfaces," *Journal of thermal spray technology*, vol. 20, no. 1-2, p. 292-298. <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9563-3>
26. **Borchers, C., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., & Kreye, H.** 2005. "Formation of persistent dislocation loops by ultra-high strain-rate deformation during cold spraying," *Acta Materialia*, vol. 53, no. 10, p. 2991-3000. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.02.048>
27. **Sundararajan, G., Phani, P. S., Jyothirmayi, A., & Gundakaram, R. C.** 2009. "The





- influence of heat treatment on the microstructural, mechanical and corrosion behaviour of cold sprayed SS 316L coatings,” *Journal of materials science*, vol. 44, no. 9, p. 2320-2326. <https://doi.org/10.1007/s10853-008-3200-2>
28. **Murray, J. W., Zucconi, M. V., & Hussain, T.** 2018. “Heat treatment of cold-sprayed C355 Al for repair: microstructure and mechanical properties,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 27, no. 1-2, p. 159-168. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0665-z>
  29. **Raelison, R. N., Xie, Y., Sapanathan, T., Planche, M. P., Kromer, R., Costil, S., & Langlade, C.** 2018. “Cold gas dynamic spray technology: a comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date”, *Additive Manufacturing*, vol. 19, p. 134-159. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.07.001>
  30. **Li, W., Yang, K., Yin, S., Yang, X., Xu, Y., & Lupoi, R.** 2018. “Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: A review,” *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 34, no. 3, p. 440-457. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.09.015>
  31. **Yin, S., Aldwell, B., & Lupoi, R.** 2018. Cold Spray Additive Manufacture and Component Restoration. In *Cold-Spray Coatings* (pp. 195-224), Editor: Cavaliere, P., ISBN: 978-3-319-67182-6, Springer, Cham.
  32. **Yin, S., Cavaliere, P., Aldwell, B., Jenkins, R., Liao, H., Li, W., & Lupoi, R.** 2018. “Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications,” *Additive Manufacturing*, vol. 21, p. 628-650. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.017>
  33. **Davis, J. R. (Ed.)** 2004. *Handbook of thermal spray technology*. ASM international.
  34. **Pawlowski, L.** 2008. *The science and engineering of thermal spray coatings*, 2nd edition, ISBN: 978-0-471-49049-4, John Wiley & Sons.
  35. **Raelison, R. N., Verdy, C., & Liao, H.** 2017. “Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications,” *Materials & Design*, 133, 266-287. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.067>
  36. **Hussain, T., Yue, S., & Li, C. J.** 2015. Characteristics of feedstock materials. In *Modern Cold Spray* (pp. 73-105), Editor: Julio Villafuerte, ISBN 978-3-319-16771-8, Springer International Publishing, Switzerland.
  37. **Irissou, E., Legoux, J. G., Arsenault, B., & Moreau, C.** 2007. “Investigation of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Cold Spray Coating Formation and Properties,” *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 5, no. 16, p. 661-668. <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9086-8>
  38. **Melendez, N. M., & McDonald, A. G.** 2013. “Development of WC-based metal matrix composite coatings using low-pressure cold gas dynamic spraying,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 214, p. 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.11.010>
  39. **Zhang, Y., Epshteyn, Y., & Chromik, R. R.** 2018. “Dry sliding wear behaviour of cold-sprayed Cu-MoS<sub>2</sub> and Cu-MoS<sub>2</sub>-WC composite coatings: The influence of WC,” *Tribology International*, vol. 123, p. 296-306. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.015>
  40. **Yandouzi, M., Richer, P., & Jodoin, B.** 2009. “SiC particulate reinforced Al-12Si alloy composite coatings produced by the pulsed gas dynamic spray process: Microstructure and properties,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 203, issues 20-21, p. 3260-3270. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.04.001>

41. **Villafuerte, J.** 2015. Modern cold spray: materials, process, and applications, Editor: Julio Villafuerte, ISBN 978-3-319-16771-8, Springer International Publishing, Switzerland.
42. **Karthikeyan, J.** 2007. The advantages and disadvantages of the cold spray coating process. In *The cold spray materials deposition process* (pp. 62-71), ISBN: 978-1-84569-181-3, Woodhead Publishing.
43. **Wang, Q., Spencer, K., Birbilis, N., & Zhang, M. X.** 2010. "The influence of ceramic particles on bond strength of cold spray composite coatings on AZ91 alloy substrate", *Surface and Coatings Technology*, 205(1), 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.06.008>
44. **Fernandez, R., & Jodoin, B.** 2018. "Cold spray aluminum–alumina cermet coatings: effect of alumina content," *Journal of Thermal Spray Technology*, 27(4), 603-623. <https://doi.org/10.1007/s11666-018-0702-6>
45. **Sansoucy, E., Marcoux, P., Ajdelsztajn, L., & Jodoin, B.** 2008. "Properties of SiC-reinforced aluminum alloy coatings produced by the cold gas dynamic spraying process." *Surface and Coatings Technology*, 202(16), 3988-3996. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.02.017>
46. **Grigoriev, S., Okunkova, A., Sova, A., Bertrand, P., & Smurov, I.** 2015. "Cold spraying: From process fundamentals towards advanced applications," *Surface and Coatings Technology*, 268, 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.09.060>
47. **Suo, X.K., Suo, Q.L., Li, W.Y., Planche, M.P., & Liao, H.L.** 2014. "Effects of Sic Volume Fraction and Particle Size on the Deposition Behavior and Mechanical Properties of Cold-Sprayed AZ91D/SiCp Composite Coatings," *J. Therm. Spray Technol.*, 2014, 23(1–2), p 91-97. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9974-z>
48. **Zhang, Z., Liu, F., Han, E. H., Xu, L., & Uzoma, P. C.** 2019. "Effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the microstructures and corrosion behavior of low-pressure cold gas sprayed Al 2024-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings on AA 2024-T3 substrate," *Surface and Coatings Technology*, 370, 53-68. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.082>
49. **Couto, M., Dosta, S., Torrell, M., Fernández, J., & Guilemany, J. M.** 2013. "Cold spray deposition of WC–17 and 12Co cermets onto aluminum," *Surface and Coatings Technology*, 235, 54-61. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.011>
50. **Yu, M., Suo, X. K., Li, W. Y., Wang, Y. Y., & Liao, H. L.** 2014. "Microstructure, mechanical property and wear performance of cold sprayed Al5056/SiCp composite coatings: effect of reinforcement content," *Applied surface science*, 289, 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.10.132>
51. **Chen, W., Yu, Y., Tieu, A. K., Hao, J., Wang, L., Zhu, S., & Yang, J.** 2020. "Microstructure, mechanical properties and tribological behavior of the low-pressure cold sprayed tin bronze-alumina coating in artificial seawater." *Tribology International*, 142, 105992. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105992>
52. **Chen, J., Ma, B., Liu, G., Song, H., Wu, J., Cui, L., & Zheng, Z.** 2017. "Wear and corrosion properties of 316L-SiC composite coating deposited by cold spray on magnesium alloy," *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(6), 1381-1392. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0583-0>



53. **Michael Shockley, J., Desrayaud, C., Chromik, R.R., & Descartes, S.** 2017. "Significance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particle Morphology in the Microstructure Evolution of Cold-Sprayed Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> during Unconstrained High-Pressure Torsion," *Mater. Sci. Eng. A*, 2017, 684, p 510-516. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.078>
54. **Tariq, N. H., Gyansah, L., Wang, J. Q., Qiu, X., Feng, B., Siddique, M. T., & Xiong, T. Y.** 2018. "Cold spray additive manufacturing: A viable strategy to fabricate thick B4C/Al composite coatings for neutron shielding applications," *Surface and Coatings Technology*, 339, 224-236. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.007>
55. **Xie, X., Ma, Y., Chen, C., Ji, G., Verdy, C., Wu, H., Chen, Z., Yuan, S., Normand, B., Yin, S., & Liao, H.** 2020. "Cold spray additive manufacturing of metal matrix composites (MMCs) using a novel nano-TiB<sub>2</sub>-reinforced 7075Al powder," *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 152962. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152962>
56. **Aghababaei, R., Brink, T., & Molinari, J.F.** 2018. "Asperity-Level Origins of Transition from Mild to Severe Wear," *Phys. Rev. Lett.*, 120(18), p 186105. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.186105>
57. **Alidokht, S.A., Manimunda, P., Vo, P., Yue, S., & Chromik, R.R.** 2016. "Cold Spray Deposition of a Ni-WC Composite Coating and Its Dry Sliding Wear Behavior," *Surf. Coat. Technol.*, 308, p 424-434. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.089>
58. **Zhang, L., Yang, S., Lv, X., & Jie, X.** 2019. "Wear and Corrosion Resistance of Cold-Sprayed Cu-Based Composite Coatings on Magnesium Substrate," *J. Therm. Spray Technol.*, 28(6), p 1212-1224. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00887-9>
59. **Chen, J., Ma, B., Liu, G., Song, H., Wu, J., Cui, L., & Zheng, Z.** 2017. "Wear and Corrosion Properties of 316L-SiC Composite Coating Deposited by Cold Spray on Magnesium Alloy," *J. Therm. Spray Technol.*, 26(6), p 1381-1392. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0583-0>
60. **AhmadAlidokht, S., Vo, P., Yue, S., & Chromik, R.R.** 2017. "Erosive Wear Behavior of Cold-Sprayed Ni-WC Composite Coating," *Wear*, 376-377, p 566-577. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.052>
61. **Yan, X., Huang, C., Chen, C., Bolot, R., Dembinski, L., Huang, R., Ma, W., Liao, H., & Liu, M.** 2019. "Additive Manufacturing of WC Reinforced Maraging Steel 300 Composites by Cold Spraying and Selective Laser Melting," *Surf. Coat. Technol.*, 371, p 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.072>
62. **An, Q., Huang, L., Jiao, Y., Bao, Y., Zhong, B., & Geng, L.** 2019. "Intergrowth Microstructure and Superior Wear Resistance of (TiB+TiC)/Ti64 Hybrid Coatings by Gas Tungsten Arc Cladding," *Mater. Des.*, 162, p 34-44
63. **Peat, T., Galloway, A., Toumpis, A., McNutt, P., & Iqbal, N.** 2017. "The Erosion Performance of Particle Reinforced Metal Matrix Composite Coatings Produced by Co-Deposition Cold Gas Dynamic Spraying," *Appl. Surf. Sci.*, 396, p 1623-1634. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.10.155>
64. **Alidokht, S.A., Munagala, V.N.V., & Chromik, R.R.** 2017. "Role of Third Bodies in Friction and Wear of Cold-Sprayed Ti and Ti-TiC Composite Coatings," *Tribol. Lett.*, 65(3), p 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11249-017-0899-4>

65. **Yin, S., Ekoi, E.J., Lupton, T.L., Dowling, D.P., & Lupoi, R.** 2017. "Cold Spraying of WC-Co-Ni Coatings Using Porous WC-17Co Powders: Formation Mechanism, Microstructure Characterization and Tribological Performance," *Mater. Des.*, 126, p 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.040>
66. **Goldbaum, D., Poirier, D., Irissou, E., Legoux, J. G., & Moreau, C.** (2015). Review on cold spray process and technology US patents. In *Modern Cold Spray* (pp. 403-429), Editor: Julio Villafuerte, ISBN 978-3-319-16771-8, Springer International Publishing, Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16772-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16772-5_12)
67. **Champagne, V. K. Jr, Champagne, V. K. III & Widener, C.** 2018. Cold Spray Applications. In *Cold-Spray Coatings* (pp. 25-56), Editor: Cavaliere, P. , ISBN: 978-3-319-67182-6, Springer, Cham.
68. **Slattery, K. T.** (2008). Sprayed preforms to forming structural members. U.S. Patent No. 7,381,446 B2,3 June.
69. **Heinrich, P., Richter, P., Höll, H., & Bahr, E.** 2012. Method for producing a pipe. US Patent No. 8,316,916 B2, 27 November.
70. **Payne, D. A., & Garland, P. E.** 2008. Method of repair of thin wall housings. US Patent No. 7,367,488 B2, 6 May.
71. **Calla, E., Pabla, S., & Goetze, R.** 2012. Turbine rotor fabrication using cold spraying. US Patent No. 8,261,444 B2, 11 Sep.
72. **Jensen, J. D., Klingemann, J., Krüger, U., Körtvelyessy, D., Lüthen, V., Reiche, R., & Stier, O.** 2013. Method for repairing a component by coating. U.S. Patent No. 8,343,573 B2, 1 Jan.
73. **Schmid, R. K., & Doesburg, J. C.** 2010. Material and method of manufacture of a solder joint with high thermal conductivity and high electrical conductivity. US Patent No. 7,758,916 B2, 20 June.
74. **Miller, S. A., Shekhter, L. N., & Zimmerman, S.** 2011. Methods of joining protective metal-clad structures. US Patent No. 8,002,169, 23 Aug.
75. **Ohno, H.** 2013. Semiconductor device. US Patent No. 8,436,461 B2, 7 May.
76. **Schaeffer, J. C., Anand, K., Amancherla, S., & Calla, E.** 2013. Titanium aluminide application process and article with titanium aluminide surface. U.S. Patent No. 8,475,882 B2, 2 July.
77. **Ajdelsztajn, L., Ruud, J. A., & Hanlon, T.** 2013. Cold spray deposition method. US Patent No. 8,591,986 B1, 26 Nov.
78. **Raybould, D., Madhava, M. N., Chung, V., Duffy, T. R., & Floyd, M.** 2008. Methods for coating a magnesium component. US Patent No. 7,455,881 B2, 25 Nov.
79. **Bunting, B. W., DeBiccari, A., Vargas, C., Kinstler, M. D., & Anderson, D. W.** 2013. Corrosion protective coating through cold spray. US Patent No. 8,597,724 B2, 3 Dec.
80. **Miyamoto, N., & Hirano, M.** 2011. Bearing material coated slide member and method for manufacturing the same. US Patent No. 7,964,239 B2, 21 June.
81. **Haynes, J. D., DeBiccari, A., & Shubert, G.** 2012. Cold sprayed porous metal seals. U.S. Patent No. 8,192,792 B2, 5 June.



82. **Schlichting, K. W., & Freling, M.** 2012. Porous protective coating for turbine engine components. US Patent No. 8,147,982 B2, 3 April.
83. **Barker, M. H., Hyvärinen, O., & Osara, K.** 2011. Method for forming an electrocatalytic surface on an electrode and the electrode. U.S. Patent No. 7,871,504 B2, 18 Jan.
84. **Miyamoto, N., & Tsuzuki, Y.** 2011. Method of forming a metal powder film a thermal conduction member, power module, vehicle inverter, and vehicle formed thereof. US Patent No. 8,025,921 B2, 27 Sep.
85. **Tsuzuki, Y., & Miyamoto, N.** 2013. Method for manufacturing heat transfer member, power module, vehicle inverter, and vehicle. U.S. Patent No. 8,499,825 B2, 6 Aug.
86. **Kruger, U., & Ullrich, R.** 2011. Cold gas spraying method. U.S. Patent No. 8,012,601 B2, 6 Sep.
87. **Doye, C., Krüger, U., & Pyritz, U.** 2012. Method for producing a coating through cold gas spraying. U.S. Patent No. 8,241,702 B2, 14 Aug.
88. **Kramer, P. A.** 2009. Method and apparatus for spray processing of porous medical devices. U.S. Patent No. 7,514,122 B2, 7 Apr.
89. **Van Steenkiste, T. H., Drew, G. A., Gorkiewicz, D. W., & Gillispie, B. A.** 2004. Kinetic sprayed electrical contacts on conductive substrates. U.S. Patent No. 6,685,988 B2, 3 Feb.
90. **Elmoursi, A. A., Lautzenhiser, F. P., Campbell, A. B., & Smith, J. R.** 2009. Copper circuit formed by kinetic spray. U.S. Patent No. 7,476,422 B2, 13 Jan.
91. **Teets, R. E., VanSteenkiste, T. H., Kruger, D. D., Beer, R. C.** 2011. Secure physical connections formed by a kinetic spray process. U.S. Patent No. 7,900,812 B2, 8 Mar.
92. **Ginder, J., McCune, R., & Leonardi, F.** 2007. Method of manufacturing electromagnetic devices using kinetic spray. U.S. Patent No. 7,244,512 B2, 17 Jul.
93. **Ogilvie, W.** 2005. Method and Apparatus for the Manufacture of Electric Circuits. International Publication No. WO 2005/053367 A2, 9 June.
94. **Kosarev, V. F., Klinkov, S. V., & Sova, A. A.** 2007. "Recently patented facilities and applications in cold spray engineering," *Recent Patents on Engineering*, 1(1), 35-42. <https://doi.org/10.2174/187221207779814716>
95. **Eden, T. J., Wolfe, D. E., Champagne, V., & Widener, C.** 2016. "Cold Spray Applications in the Defense Industry," *J High Pressure Cold Spray: Principles and Applications*, 227-251. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.hpcspa.t54460227>
96. **Stoltenhoff, T., Zimmermann, F., Gorris, K., Burger, H.,** 2009. Process for the repair and restoration of dynamically stressed components comprising aluminium alloys for aircraft applications. Patent No. US 2009/0148622 A1, 11 June.