DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SERAMİKLERİN YÜZEYLERİNİN METALLEŞTİRİLMESİ

Muhammet Furkan NAR

Eylül, 2022
İZMİR

SERAMİKLERİN YÜZEYLERİNİN METALLEŞTİRİLMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Programı

Muhammet Furkan NAR

Eylül, 2022
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MUHAMMET FURKAN NAR, tarafından **DOÇ. DR. FATİH KAHRAMAN** yönetiminde hazırlanan **"SERAMİKLERİN YÜZEYLERİNİN METALLEŞTİRİLMESİ"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Fatih KAHRAMAN

Yönetici

Doç. Dr. Uğur ÇAVDAR

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi. Gökçe Mehmet GENCER

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisansımın her aşamasında tecrübesi ve bilgisi ile desteğini esirgemeyen ve çalışmalarımın tamamlanmasında büyük katkı sunan danışman hocam Doç. Dr. Fatih KAHRAMAN'a teşekkürü borç bilirim.

Kaplamaların oluşturulması işlemlerinde yardımcı olan Özener Metal firmasına ve firma sahibi Sn. Tayfun ÖZENER'e, kaplamanın bağlanma mukavemeti ölçümlerinde yardımcı olan Kansai Altan Boya SAN. TİC. AŞ.'ye ve Kimya Mühendisi Deniz KAYA'ya, deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Coşkun YOLCU'ya, değerli arkadaşım Fatih GÜNDOĞDU'ya ve yüksek lisans eğitim sürecinde çalıştığım firma yöneticim Serkant PAKSOY'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Son olarak, bugünlere gelmemde bana karşı maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Muhammet Furkan NAR

SERAMİKLERİN YÜZEYLERİNİN METALLEŞTİRİLMESİ

ÖZ

Günümüzde metal ve alaşımlarının ağırlaşan çalışma şartlarında istenilen özellikleri sağlayamadığı durumlarda, plastikler, kompozitler ve seramikler gibi yeni malzeme grupları devreye girmektedir. Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte yüzeyi metalize edilmiş malzemelere başta savunma sanayi, güneş enerjisi üretimi, uzay ve uçak endüstrisi, biyomedikal, haberleşme, bilgisayar ve elektronik, vakum elektroniği, yarı iletkenler ve optik gibi pek çok endüstriyel alanda ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Bu çalışma kapsamında seramik malzeme yüzeyinde ince bir metal kaplama oluşturularak metal-seramik bir yapı elde edilmesi sağlanmıştır.

Seramik malzemenin metalleştirilmesi işleminde bir termal sprey yöntemi olan soğuk püskürtme (cold-spray) yöntemi kullanılmıştır. Soğuk püskürtme yüksek parçacık hızı ve düşük çalışma sıcaklığını temel alan bir yöntem olup, bu yöntem ile oluşturulan kaplamalarda oksijen içeriği ve gözeneklilik minimum seviyede olmaktadır, ayrıca altlık malzemesine ısı girdisi minumum seviyededir. Bu özellikleri sayesinde soğuk püskürtme yöntemi ile seramik malzemeler üzerinde kaplama oluşturulabilmektedir.

Çalışma kapsamında kaplanılacak altlık malzemesi olarak alümina seramik malzeme seçilmiştir. Altlık üzerinde bakır ve alüminyum içerikli tozlar ile kaplamalar oluşturulmuştur. Numuneler metalografik muayeneye, sertlik, bağlanma mukavemeti ve elektrik iletkenliği deneylerine tabi tutularak elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Metalizasyon, seramik, soğuk püskürtme, seramik yüzeylerin kaplanması

SURFACE METALLIZATION OF CERAMICS

ABSTRACT

Nowadays, when metal and alloys cannot provide the desired properties under heavy working conditions, new material groups such as plastics, composites and ceramics needed. With the advancing technology in recent years, surface metallized materials are needed in many industrial areas such as defense industry, solar energy production, space and aircraft industry, biomedical, communication, computer and electronics, vacuum electronics, semiconductors and optics. Within the scope of this study, a metal-ceramic structure was obtained by forming a thin metal coating on the ceramic material surface.

Cold-spray method, which is a thermal spray method, has been used in the metallization process of ceramic material. Cold spraying is a method based on high particle velocity and low operating temperature, oxygen content and porosity are minimal in coatings created by this method, and the heat input to the substrate material is at a minimum level. Due to this feature, a coating can be formed on the ceramic materials by cold spraying method.

In the scope of the study, alumina ceramic material was chosen as the substrate material to be coated. Coatings with copper and aluminum-containing powders were formed on the base. The results obtained by subjecting the samples to metallographic examination, harness measurement, bond strength test and electrical conductivity measurement were examined.

Keywords: Metalizations, ceramic, cold spray, coating of ceramic surfaces

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT vi
ŞEKİLLER LİSTESİ x
TABLOLAR LİSTESİ xii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ 1

BÖLÜM İKİ - METALİZASYON 4

2.1 Yüzey Kaplama Yöntemleri 4
2.1.1 Termal Püskürtme Kaplamalar 5
2.1.1.1 Ark Püskürtme 8
2.1.1.2 Plazma Püskürtme 9
2.1.1.3 Oksi-gaz Püskürtme 12
2.1.1.4 Yüksek Hız Oksijen Yakıtlı Püskürtme(HVOF) 12
2.1.1.5 Detonation Gun (D-Gun) 13
2.1.1.6 Soğuk Püskürtme 14
2.1.1.6.1 Yüksek Basınçlı Soğuk Püskürtme (HPCS) 16
2.1.1.6.2 Düşük Basınçlı Soğuk Püskürtme (LPCS) 18

BÖLÜM ÜÇ - SOĞUK PÜSKÜRTME KAPLAMALAR 20

3.1 Soğuk Püskürtmenin Diğer Termal Püskürtme Yöntemlerinden Farklılıkları 20
3.2 Soğuk Püskürtmede Kritik Hız Kavramı 22
3.3 Kaplamanın Oluşumu 24
3.4 Soğuk Püskürtme Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları 27

BÖLÜM DÖRT - MATERYAL VE YÖNTEMLER 31

4.1 Kaplama İşleminde Kullanılan Altlık ve Kaplama Tozları 31
4.2 Soğuk Püskürme ile Kaplama İşlemi 32
4.3 Test ve Analiz Yöntemleri 34
4.3.1 Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM) İncelemeleri .34
4.3.2 Bağlanma Mukavemeti Ölçümleri 36
4.3.3 Mikro Sertlik Ölçümleri 37
4.3.4 Elektrik İletkenliğinin Ölçümü 37

BÖLÜM BEŞ - BULGULAR VE TARTIŞMA 39

5.1 Makro İnceleme.....39
5.2 Optik Mikroskop ve SEM İncelemeleri.....43
5.3 Bağlanma Mukavemeti Ölçüm Sonuçları.....52
5.4 Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları.....56
5.5 Elektrik İletkenliği Ölçüm Sonuçları.....57

BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR.....59

KAYNAKLAR.....62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Yüzey kaplama yöntemleri 4
Şekil 2.2 Kaplama yöntemine göre; a) oluşturulabilen kaplama kalınlığı b) işlem sıcaklığı 5
Şekil 2.3 Termal püskürtme işlemi şematik görünüşü a) Tel veya toz kaplama malzemesi b) Elektrik veya gaz ısı kaynağı c) Hızlandırılan ergimiş tanecik d) Esas metal yüzeyine çarpan ve düzleşen tanecikler e) Tamamlanmış kaplama 6
Şekil 2.4 Termal püskürtme yöntemlerinin sınıflandırılması 6
Şekil 2.5 Termal püskürtme yöntemlerinin parçacık sıcaklığı ve hızı bakımından çalışma aralığı 7
Şekil 2.6 Ark püskürtme yönteminin şematik olarak gösterimi 8
Şekil 2.7 Sıvı formdaki metal damlalarının yüksek hızlı fotoğrafları 9
Şekil 2.8 Plazma püskürme sistemi 10
Şekil 2.9 Plazma püskürtme yönteminin şematik olarak gösterimi 11
Şekil 2.10 Oksi-gaz püskürtme yönteminin şematik olarak gösterimi 12
Şekil 2.11 HVOF yönteminin şematik olarak gösterimi 13
Şekil 2.12 D-Gun yönteminin şematik olarak gösterimi 14
Şekil 2.13 Soğuk püskürtme yönteminin şematik olarak gösterimi 16
Şekil 2.14 HPCS yönteminin şematik olarak gösterimi 17
Şekil 2.15 De Laval nozulunun şematik olarak gösterimi 18
Şekil 2.16 LPCS sisteminin şematik olarak gösterimi 19
Şekil 3.1 Termal püskürtme işlemlerinde gaz sıcaklıklarına karşı parçacık hızları ... 21
Şekil 3.2 Termal püskürtme ve soğuk püskürtme ile oluşturulan kaplamalardaki oksijen içeriği ve porozite oranı 22
Şekil 3.3 Parçacık hızının biriktirme verimliliğine etkisi 23
Şekil 3.4 25µm boyutundaki metal tozları için hesaplanan kritik hız değerleri 24
Şekil 3.5 Soğuk püskürtme yönteminde kaplamanın oluşumu 25
Şekil 3.6 Al_2O_3 üzerine soğuk püskürtme ile oluşturulan Al kaplama a) parçacıkda oluşan iz b) altlık-parçacık arasındaki mekanik kenetlenme 26

Şekil 3.7 Cu altlık üzerine soğuk püskürtülmüş 25 μm'lik Cu parçacıkların çarpması a) darbeden önce b) 2ns sonra c) 5 ns sonra d) 18ns sonra 26
Şekil 3.8 Bakır altlık üzerine bakır tozu ile oluşturulan kaplamada, parçacığın 500 m/s hız ile altlığa çarpmasından 24 ns sonra plastik gerinim ve sıcaklık değişimi 27
Şekil 3.9 Soğuk püskürtme kaplamaların avantajları 29
Şekil 4.1 Kaplamalarda kullanılan alümina seramik altlık 31
Şekil 4.2 Şekil 4.2 DYMET 423 Soğuk püskürtme cihazı 32
Şekil 4.3 Kaplama öncesi seramik altlıkların sıcaklık ölçümü 33
Şekil 4.4 Kaplamaların oluşturulması 34
Şekil 4.5 Mikroyapı incelemelerinde kullanılan SEM mikroskobu 35
Şekil 4.6 Sertlik ölçümünde kullanılan cihaz 35
Şekil 4.7 Defelsko Positest AT-A bağlanma mukavemeti ölçüm cihazı 36
Şekil 4.8 Bağlanma mukavemeti ölçümü için hazırlanan numune 36
Şekil 4.9 Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop 37
Şekil 4.10 Elektrik iletkenliği ölçümünde kullanılan cihaz 38
Şekil 5.1 Saf bakır tozu ile oluşturulan kaplama 40
Şekil 5.2 Cu+Zn+Al2O3 Tozu ile 5 cm/sn ilerleme hızında oda sıcaklığındaki altlıkda oluşturulan kaplama 41
Şekil 5.3 Cu+Zn+Al_2O_3 Tozu ile 15 cm/sn ilerleme hızında oda sıcaklığındaki altlıkda oluşturulan kaplama 42
Şekil 5.4 Cu+Zn+Al_2O_3 Tozu ile soldan sağa oda sıcaklığı, 100 °C, 200 °C ve 300 °C altlık sıcaklıklarında oluşturulan kaplamalar 42
Şekil 5.5 Cu+Zn+Al_2O_3 Tozuna ait SEM görüntüsü 43
Şekil 5.6 Cu+Zn+Al_2O_3 Tozuna ait EDS analizi 44
Şekil 5.7 Cu+Zn+Al_2O_3 Tozuna ait EDS analizi 44
Şekil 5.8 Cu+Zn+Al_2O_3 Tozu ile oluşturulan kaplamalara ait optik mikroskop görüntüleri a) 15 cm/sn ilerleme hızında b) 5 cm/sn ilerleme hızında 45
Şekil 5.9 Altlık kaplama arayüzeyinde mekanik kilitlenmenin oluşumu 46
Şekil 5.10 Altlık sıcaklığına bağlı olarak kaplama yapısındaki çinko miktarının artışı a) altlık oda sıcaklığında oluşturulan kaplama b) 300 °C altlık sıcaklığında oluşturulan kaplama 47

Şekil 5.11 15 cm/sn ilerleme hızında oluşturulan kaplamaya ait SEM görüntüsü 48
Şekil 5.12 15 cm/sn ilerleme hızında oluşturulan kaplamaya ait SEM görüntüsü 48
Şekil 5.13 5 cm/sn ilerleme hızında oluşturulan kaplamaya ait SEM görüntüsü 49
Şekil 5.14 5 cm/sn ilerleme hızında oluşturulan kaplamaya ait SEM görüntüsü 50
Şekil 5.15 Kaplamaya ait eds analizi sonucu (Al_2O_3 bulunan bölge).....50
Şekil 5.16 Kaplamaya ait eds analizi sonucu (Cu bulunan bölge) 51
Şekil 5.17 Kaplamaya ait eds analizi sonucu (Zn bulunan bölge).....51
Şekil 5.18 5 cm/sn ilerleme hızında oluşturulan kaplamanın bağlanma mukavemeti ölçümü sonrası kopma yüzeyleri 52
Şekil 5.19 15 cm/sn ilerleme hızında altlık oda sıcaklığında oluşturulan kaplamanın bağlanma mukavemeti ölçümü sonrası kopma yüzeyleri 53
Şekil 5.20 15 cm/sn ilerleme hızında 100 °C altlık sıcaklığında oluşturulan kaplamanın bağlanma mukavemeti ölçümü sonrası kopma yüzeyleri 53
Şekil 5.21 15 cm/sn ilerleme hızında 200 °C altlık sıcaklığında oluşturulan kaplamanın bağlanma mukavemeti ölçümü sonrası kopma yüzeyleri 54
Şekil 5.22 15 cm/sn ilerleme hızında 300 °C altlık sıcaklığında oluşturulan kaplamanın bağlanma mukavemeti ölçümü sonrası kopma yüzeyleri 54
Şekil 5.23 Oluşturulan kaplamaların Vickers sertlik değerleri 56

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 HPCS ve LPCS sistemlerine ait püskürtme parametreleri 19
Tablo 3.1 Farklı termal püskürtme yöntemlerinde kaplamaların gözenekliliği ve oksijen içeriği 22
Tablo 4.1 K-01-01 kimyasal kompozisyonu. 29
Tablo 4.2 K-01-11 kimyasal kompozisyonu 29
Tablo 4.3 DYMET 423 teknik özellikleri 30
Tablo 4.4 Oluşturulan numuneler ve işlem parametreleri 31
Tablo 5.1 Numunelere göre çekme testi sonuçları 49

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

Kaplama teknolojisi maliyetleri azaltıp servis ömrünü arttırarak malzemenin korozyon direncini, iletkenliği ve diğer özelliklerini iyileştirmedeki önemli rolünden dolayı her geçen gün büyümekte ve kullanımı artmaktadır. Başlıca kullanım alanı malzemelerin korozyon direncinin arttırılması, malzemelere ısıl iletkenlik kazandırılması ve hasarlı malzemelerin onarımı gibi uygulamalar olsa da günümüzde kaplama teknolojisinin kullanımının artmasıyla polimer ve seramik gibi metalik olmayan malzemelerin metalizasyonu ile ilgili çalışmalar da yürütülmektedir (Koivuluoto, 2010).

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte yüksek güç elektroniği (Klassen ve diğer., 2010), (Zheng ve diğer., 2014), (Kosarev ve diğer., 2018),elektrikli araçlar (Klassen ve diğer., 2010), uçak endüstrileri (Klassen ve diğer., 2010), piller (Zheng ve diğer., 2014), elektronik güç modülleri (Rastjagaev ve Wilde, 2012), yalıtılmış kapılı bipolar transistörler ve metal oksit yarı iletken alan etkili transistörler gibi elektronik devre elemanları (Drehmann ve diğer., 2018), enerjide sektöründe yüksek gerilimde kullanılan bileşenler (Drehmann ve diğer., 2013), elektrikli tahrik mühendisliği (Wielage ve diğer., 2010), elektro vakum cihazları (Kolesnik ve diğer., 2017), ortopedik implantlar (Imbriglio ve diğer., 2018), gibi birçok alanda metalize edilmiş malzemelere ihtiyaç duyulmuştur.

Elektronik modüllerin tasarımında, altlık elektriksel olarak izole edilmiş olmalı ve ısıyı altlıkdan soğutuculara ve radyatörlere aktarmalıdır (Kosarev ve diğer., 2018). Cam-epoksi gibi en yaygın kullanılan altlıkların özellikleri, güç elektroniği alanında yetersiz kalmaktadır (Hromadka ve diğer., 2013). Seramik altlıklar, mekanik özellikleri ve yüksek ısı iletkenlikleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Bu amaçla seramik yüzeylerinin metalizasyonuna yönelik birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır. Kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD), doğrudan bakır bağlama (DCB) ve sinterleme (Screen Printing), seramik alt tabakalar üzerine metalik kaplama üretmek için kullanılan geleneksel işlemlerdir

(Ernst ve diğer., 2013), (Kromer ve diğer., 2018). Ancak yüksek termal etkiye neden olan bu işlemlerde, altlık ve kaplama malzemelerinin farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle birçok zorluk oluşmaktadır (Chmielewski ve diğer., 2019). Özellikle metallerin ısıl genleşme özellikleri seramik malzemelere göre çok yüksektir ve bu farklılık nedeniyle ara yüzeylerde çok yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Dolayısıyla bu yüksek gerilimler, birleştirme alanında birçok kusura neden olmaktadır (Donner ve diğer., 2011).

Metal-seramik bileşikler, çok çeşitli gündelik ürünlerde ve aynı zamanda üst düzey uygulamalarda, örneğin enerji ve bilgisayar teknolojisinde ayrıca sürücülerde ve yüksek gerilim uygulamalarında kullanılmaktadır (Drehmann ve diğer., 2013). Bu amaçla seramiklerin yüzeylerinin metalleştirilmesi için pek çok araştırmacı çalışma yürütmektedir. Wielage ve diğer. (2012) DCB (Direct Copper Bonding) yöntemine alternatif olarak soğuk püskürme yönteminin kullanılmasıyla Al_2O_3 altlık üzerinde alüminyum ve bakır kaplamalar oluşturarak elektronik güç devreleri uygulamaları için soğuk püskürmenin kullanılabilirliğini incelemiştir. Donner ve diğer. (2011) elektronik güç devreleri için Al_2O_3 altlık üzerine termal kaplama yöntemleri olan yüksek hızlı oksi-yakıt (HVOF) ve detonation gun (D-Gun) yöntemlerini kullanarak Al ara katman oluşturmuş, bu katman üzerine soğuk püskürtme yöntemi ile Cu kaplama oluşturarak kaplamanın bağlanma mukavemeti ve elektriksel iletkenliği üzerinde çalışmalar yapmış ve oluşturulan bu çok katmanlı kaplamanın güç devrelerinde kullanılabilirliğini incelemiştir. Literatürde seramik malzemeler üzerine kaplama oluşturulmasıyla ilgili bu çalışmalara benzer birçok çalışmada bulunmaktadır. Fakat nispeten yeni bir uygulama olan soğuk püskürtme yönteminde özellikle metal dışı malzemeler üzerinde kaplama oluşturulması ile ilgili birçok anlaşılamayan konu bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında seramik altlığın metalizasyonu işlemi için bir termal sprey yöntemi olan düşük basınçlı soğuk püskürtme yöntemi kullanılarak, Al_2O_3 seramik altlıklar üzerinde Al_2O_3, Cu ve Zn içerikli tozlar ile kaplamalar oluşturulmuştur. Elde edilen numuneler üzerinde çekme deneyi ve mikro sertlik deneyi uygulanarak kaplamanın bağlanma mukavemeti ve kaplamanın sertlik değerleri ve elektirik

iletkenliği testi uygulanarak kaplamaların iletkenlikleri ölçülmüştür. Ayrıca kaplama optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilip, kaplamanın yapısı incelenmiştir. Değişken parametrelere bağlı olarak kaplamanın özelliklerindeki değişim incelenmiştir.

BÖLÜM İKİ
METALİZASYON

Metalizasyon (metalleştirme), bir metal kaplamanın başka bir metalik olmayan yüzeye uygulanmasını ifade eden genel bir terimdir. Metalizasyon işlemi, uygulanacağı malzemenin korozyon ve aşınmaya karşı direncinin arttırılması, malzemelere ısıl veya elektriksel iletkenlik kazandırılması ve hasarlı malzemelerin onarımı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

Bu bölüm altında metalizasyon işleminde kullanılan yüzey kaplama yöntemlerinden kısaca bahsedilip, bu çalışmada kullanılan, bir termal püskürtme yöntemi olan soğuk püskürtme ve diğer termal püskürtme yöntemleri anlatılacaktır.

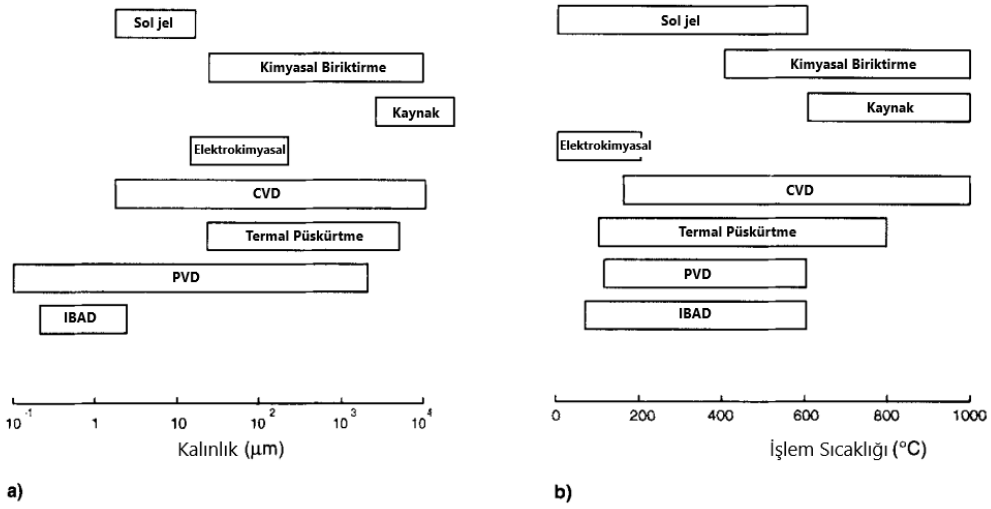
2.1 Yüzey Kaplama Yöntemleri

Yüzey kaplama yöntemleri, genel olarak kaplama malzemesinin bulunduğu fiziksel hale göre; gaz halden, çözeltiden, sıvı veya yarı sıvı halden yapılan kaplamalar olmak üzere üç ana başlığa ayrılmaktadır. Bu üç ana başlık ve bunların alt başlıkları Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Holmberg ve Matthews, 1994).



Şekil 2.1 Yüzey kaplama yöntemleri (Pinto ve diğer., 2018)

Kaplama işleminde kalınlık ve sıcaklık iki önemli parametredir. Kullanılan yüzey kaplama yöntemine göre kaplama kalınlığı 0.1µm ile 10 mm arasında değişmekte olup, kaplama sıcaklığı oda sıcaklığı ile 1000 °C arasında değişmektedir (Holmberg ve Matthews, 1994). Yöntemlere göre bu değişken iki parametre Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

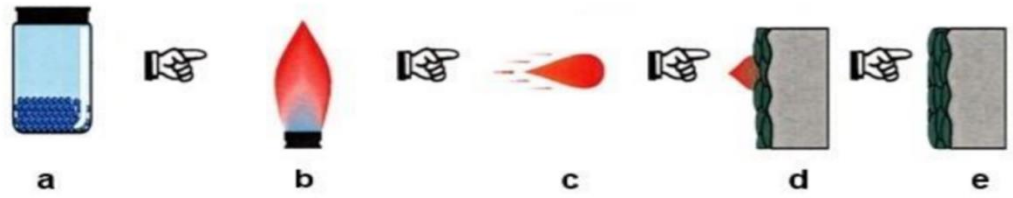


Şekil 2.2 Kaplama yöntemine göre; a) oluşturulabilen kaplama kalınlığı b) işlem sıcaklığı (Holmberg ve Matthews, 1994)

2.1.1 Termal Püskürtme Kaplamalar

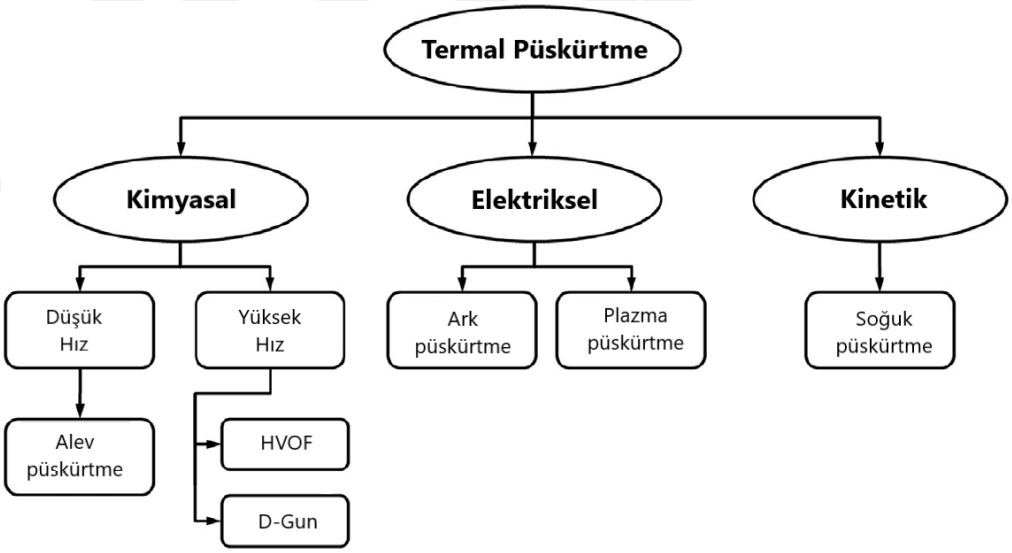
Termal sprey, metalik veya metalik olmayan kaplamaların uygulanabildiği, ark sprey, plazma sprey, alev sprey, yüksek hız oksijen yakıtlı püskürtme (HVOF), soğuk püskürtme gibi bir grup kaplama teknolojisinin genel adıdır. Termal püskürtme yöntemleri, kendi aralarında belirli konularda farklılıklar göstersede tüm bu yöntemlerin temel özellikleri aynı olup, 1911 yılında M.A.Schoop tarafından patenti alınan alev sprey yöntemine dayanmaktadır (Champagne, 2007).

Termal püskürtme, toz veya tel hammaddeden alt tabaka üzerine erimiş, yarı erimiş veya katı haldeki parçacıkların püskürtülerek kaplamanın oluşturulması temel alan yöntemlerdir (Koivuluoto, 2010). Kaplama işlemlerinde kullanılan malzeme (toz/tel) bir enerji kaynağı yardımıyla ısıtılılır ve ergimiş/yarı ergimiş forma dönüştürülür, ardından ısıtılan partiküller oluşturulan gaz jetiyle hızlandırılır. Isıtılan ve hızlandırılan partiküller altlık üzerine hızla çarptırılır ve splat (yassı tanecik) şeklini alarak altlık ile birbirlerine bağlanırlar. Termal püskürtme işlemi şematik olarak Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Termal püskürtme işlemi şematik görünüşü a) Tel veya toz kaplama malzemesi b) Elektrik veya gaz ısı kaynağı c) Hızlandırılan ergimiş tanecik d) Esas metal yüzeyine çarpan ve düzleşen tanecikler e) Tamamlanmış kaplama

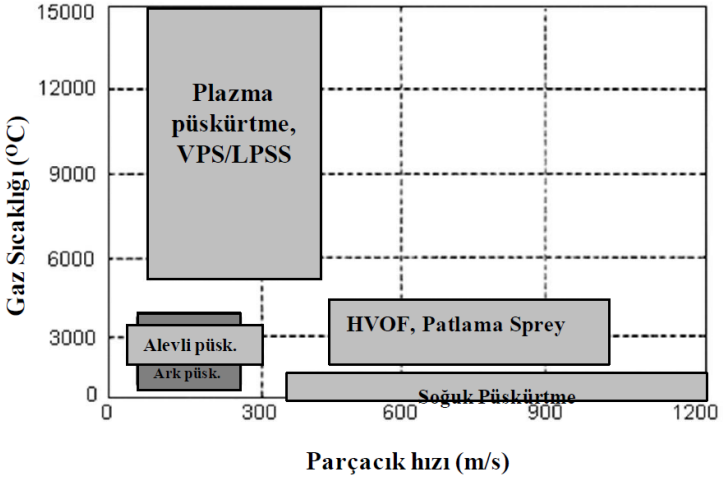
Termal püskürtme yöntemleri, kaplama işlemlerinde kullanılan toz/tel malzemenin erigimiş, yarı ergimiş veya katı formda hızlandırılıp püskürtülmesi için kullanılan enerji kaynagına gore kimyasal (yanma), elektriksel ve kinetik olarak 3 katagoride sınıflandırılmaktadır. Termal püskürtme yöntemlerinin sınıflandırılması Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Termal püskürtme yöntemlerinin sınıflandırılması (Wen., 2015)

Termal püskürtme yöntemlerinde hız ve sıcaklık iki önemli kaplama parametresidir. Parçacık hızının artışına bağlı olarak, yüksek bağlanma mukavemeti, yüksek yoğunluk ve düşük oksijen içeriği elde edilebilmektedir. Bu nedenle günümüzde eğilim parçacık hızlarının yüksek olduğu termal püskürtme yöntemlerinin kullanımına yöneliktir (Malachowska, 2016).

Kaplama özellikleri, kaplama malzemesi ve çok sayıda proses parametresi tarafından belirlenir. Altlığın elde edilen kaplama tabakasına olan etkisi bir yana bırakıldığında, kaplama özellikleri üzerinde en güçlü etkiye sahip olan iki parametre çarpma anında partikül/damlacık sıcaklığı ve hızıdır. Bu partikül özellikleri öncelikle gaz sıcaklıklarına ve hızlarına bağlıdır (Fauchais ve diğer., 2014). Termal sprey yöntemleri çalışma prensiplerine bağlı olarak bu iki parametrede farklılıklar göstermektedir. Şekil 2.5'de termal püskürtme yöntemlerinin parçacık sıcaklığı ve hızı bakımından çalışma aralığı gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Termal püskürtme yöntemlerinin parçacık sıcaklığı ve hızı bakımından çalışma aralığı (Champagne., 2007)

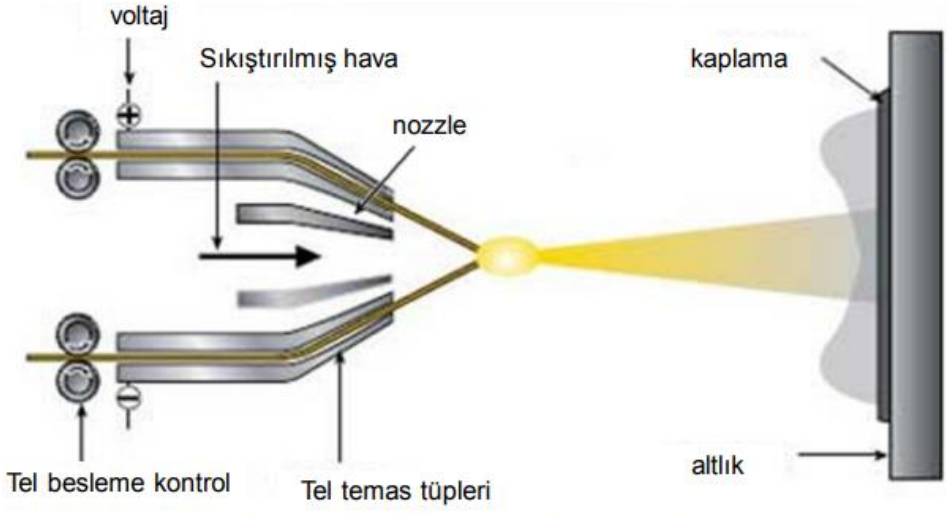
Termal püskürtme yöntemlerinin en önemli avantajları şunlardır (Malachowska, 2016) ;

- Malzeme çeşitliliği – neredeyse her türlü kaplama malzemesi kullanılabilir (metaller, seramikler, plastikler)
- Altlık üzerinde düşük termal gerilme oluşumu
- Neredeyse her türlü altlık malzemesi üzerinde kaplama oluşturulabilir
- Yüksek biriktirme oranı (kaplama kalınlığı 20 µm il birkaç milimetre arasında olabilir.)
- Bölgesel kaplama imkânına sahip olması
- Ekipmanlar taşınabilir olduğundan saha kullanımına uygun olması

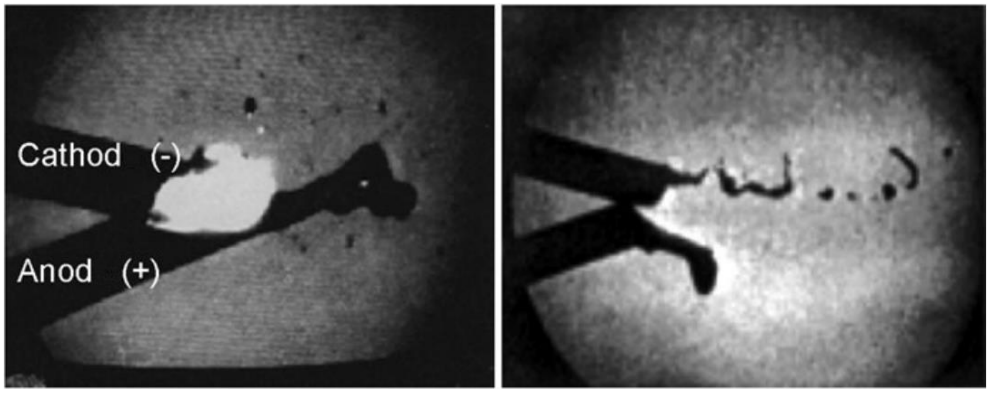
2.1.1.1 Ark Püskürtme

Ark püskürtme en eski termal püskürtme yöntemlerinden biri olup, yöntem ile ilgili ilk patent 1915 yılında Dr.Schoop tarafından alınmıştır. Yöntem 1960'lar ve sonrasında bir çok çalışmada kullanılması ile gelişme katetmiş ve kullanımı artmıştır. Ekipman ve yöntemdeki gelişmelere bağlı olarak son 20 yılda bu kullanım hızlanarak artmıştır (Fauchais ve diğer., 2014).

Ark püskürtme yöntemi temel olarak iki zıt kutup ile yüklenen tellerin birlikte beslenirken iki farklı elektriksel kutup yardımıyla (anot ve katot) ark oluşturulması ve tel formundaki kaplama malzemesinin ortaya çıkan enerji ile ergitilip damla formunda basınçlı gaz ile altlık üzerine püskürtülmesi işlemidir (Akçay, 2018). Şekil 2.6'da ark püskürtme yöntemi şematik olarak gösterilmiştir. Tabanca üzerindeki daralan formdaki nozzle yardımı ile anot ve katot tellerin beslendiği yani ark'ın oluştuğu bölgeye sıkıştırılmış gaz (genellikle hava) gönderilmektedir. Bu yüksek hızlı gaz, teller ve ark bölgesini geçerek ergimiş haldeki büyük damlacıkları daha küçük damlacıklara bölerek altlık üzerine doğru iter (Fauchais ve diğer., 2014). Tel formundaki hammaddenin ergiyerek damlacık formuna geçme işlemi Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Ark püskürtme yönteminin şematik olarak gösterimi (http://www.advanced-coating.com, 2021)



Şekil 2.7 Sıvı formdaki metal damlalarının yüksek hızlı fotoğrafları (Fauchais ve diğer., 2014)

Yöntemin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Grainger ve Blunt, 1998).

Avantajlar;

- Katı veya tüp formunda her türlü metal tel kaplama malzemesi olarak kullanılabilir.
- Kaplamalar hızlı bir şekilde oluşturulabilir (yüksek kaplama oranı).
- İki farklı tel hammadde kullanılarak kompozit ve alaşımlı kaplamalar oluşturulabilir.

Dezavantajlar;

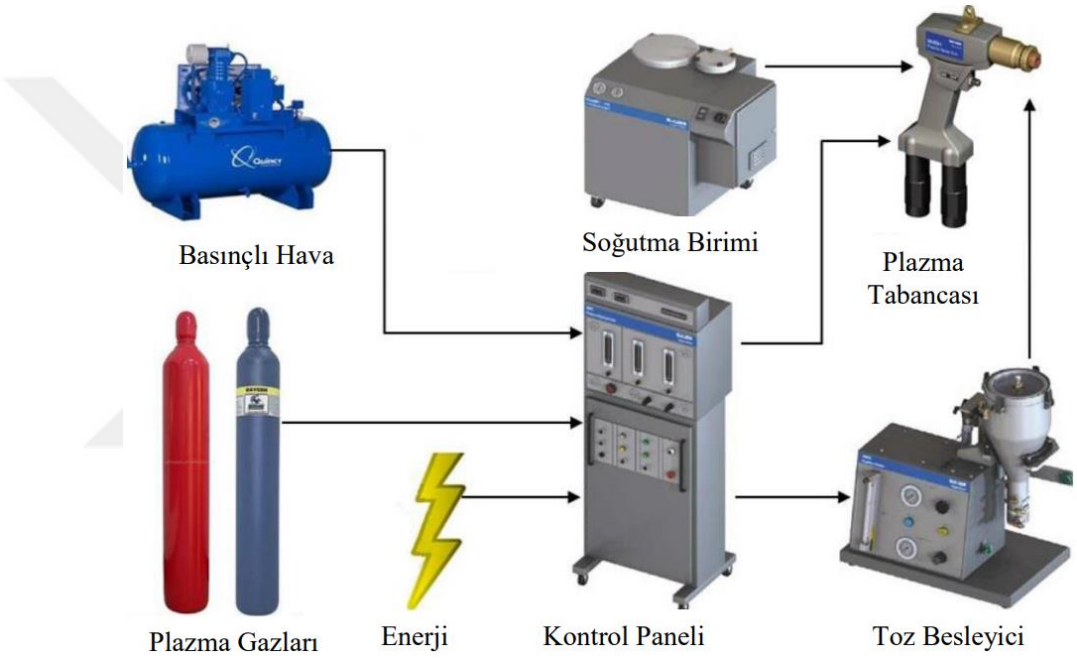
- Tel formunda hammaddenin sınırlı olması
- Yüksek hızlı yöntemlere göre, kaplama yoğunluğunun ve bağlanmanın düşük olması

2.1.1.2 Plazma Püskürtme

Katı haldeki bir malzemenin atomları arasındaki bağ enerjisi, atomların sahip oldukları enerjiden çok yüksektir ve atomların hareketleri minimum seviyededir. Atomlara bir şekilde enerji verildiğinde, atomların enerjisi bağ enerjisinin üstüne yükselerek hareketleri artar. Bunun sonucu olarak malzeme once sıvı faza ardından gaz faza geçerek faz değiştirir. Gaz haline geçen atomların enerjisi yükselmeye devam eder ise elektronlar çekirdekten kurtularak serbest kalır, bu durumda pozitif yüklü iyonlar ve negatif yüklü elektronları içeren plazma fazı ortaya çıkar. Sonuç olarak plazma, iyonize gazlara verilen bir isim olup ve genellikle maddenin dördüncü hali olarakda adlandırılırmaktadır. Plazma püskürtme tekniği biriktirilecek

malzemelerin oluşturulan plazma içerisinde ergitilmesine dayanmaktadır (Akçay, 2018).

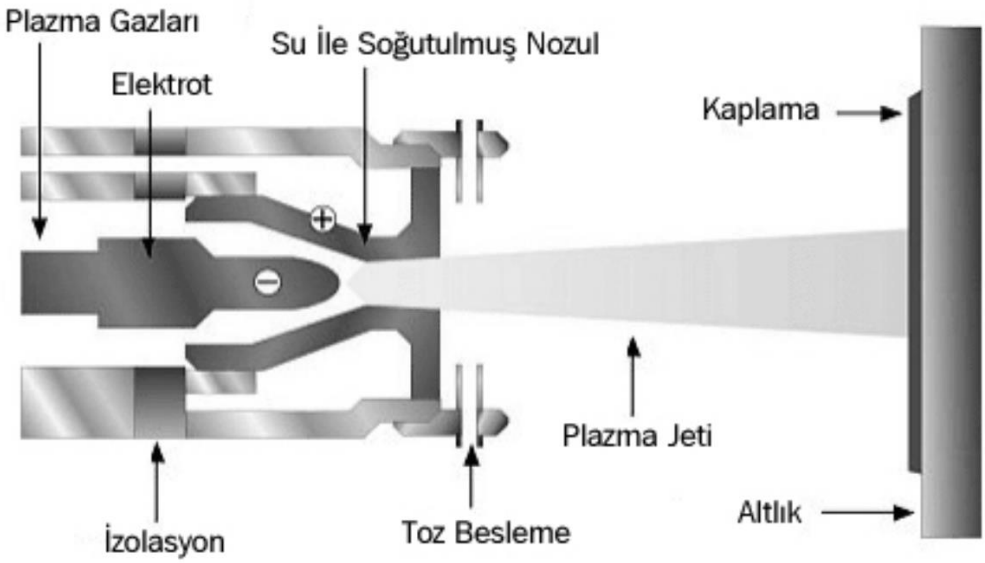
Plazma püskürtme kaplama sistemi Şekil 2.8'de görüldüğü gibi genel olarak; plazmayı oluştururken kullanılacak olan elektrik akımının ve plazma gazlarının miktarının ayarlandığı "kontrol paneli", plazma alevinin oluşturulduğu ve püskürtme işleminin yapıldığı "plazma tabancası", ayarlanan miktardaki tozun sürekli ve sabit bir hızda plazma tabancasına iletilmesinin sağlayan "toz besleme" birimi, tabancanın soğutulmasını sağlayan "soğutma birimi"nden meydana gelmektedir (Bal, 2019).



Şekil 2.8 Plazma püskürme sistemi (Bal, 2019)

Plazma püskürtme yönteminde kullanılan tabanca genel olarak tungsten katot ve bakır anotdan oluşmaktadır. Her iki elektrot da suyla soğutulur ve ark odası görevini gören bir yalıtım gövdesi ile çevrelenmiştir. Torç içinde yüksek akım arkı üretilir ve anot ile katot arasındaki bu bölgeye plazma gazı gönderilir. Plazma gazı ark çemberinde ısınıp daralan yapıdaki nozzldan geçerek kaplanacak parçanın üzerine püskürtülür. Kaplama tozu nozzle çıkışında plazma gazına dik olacak şekilde gönderilir ve plazma içerisinde ergimesi sağlanır (Grainger ve Blunt, 1998). Nozzle çıkışında tabanca tasarımına, kullanılan gazlara ve püskürtme parametrelerine bağlı olarak sıcaklık 12,000 – 15,000 K ve parçacık hızı 500 ile 2500 m/s arasında

değişmektedir (Fauchais ve diğer., 2014). Şekil 2.9'da plazma püskürtme tabancası şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Plazma püskürtme yönteminin şematik olarak gösterimi (Advanced-coating, 2021)

Yöntemin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Grainger ve Blunt, 1998).

Avantajlar;

- Plazma hüzmesinde elde edilen yüksek sıcaklık sayesinde neredeyse tüm malzemeler püskürtülebilir.
- Kaplama yoğunluğu yüksektir ve altlığa güçlü bir şekilde bağlanır.
- Altlığa ısı girişi çok düşük seviyededir.

Dezavantajlar;

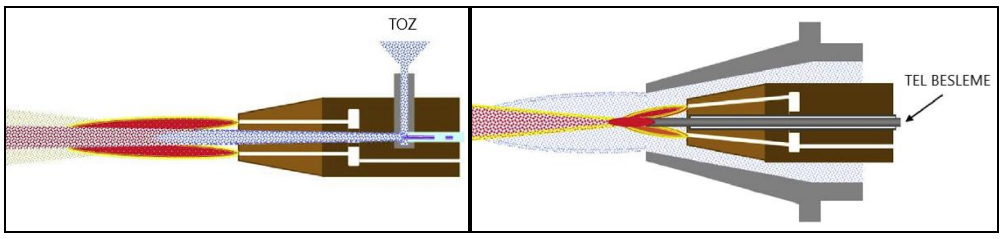
- Ark ve alev püskürtme yöntemlerine göre ilk yatırım maliyeti daha yüksektir.
- Toz partiküllerinin ortam ve plazma gazları ile reaksiyonu sonucu kaplama tabakalarında oksit oluşmaktadır.

2.1.1.3 Oksi-gaz Püskürtme

Oksi-gaz püskürtme yöntemi günümüzde kullanılan en temel ve uygulaması en kolay olan termal püskürtme yöntemi olup, 1910 yılından bu yana kullanılan oksi-gaz püskürtme geliştirilen ilk termal püskürtme yöntemidir (Espallargas, 2015).

Uzun yıllar boyunca uygulama kolaylığı, düşük ekipman ve işlem maliyeti ile yaygın olarak ve çok geniş kullanım alanı bulan oksi-gaz püskürtme yönteminin, daha gelişmiş olan plazma püskürtme ve HVOF püskürtmenin yaygınlaşması ile kullanımı azalmıştır (Vuoristo, 2014).

Kaplama hammaddesi olarak toz, çubuk ve tel kullanılabilir. Toz veya tel formundaki malzeme asetilen, propan veya hidrojen ile oksijenin karıştırılarak elde edilen alev içinde ergitilerek artan yüksek ısı ve basınç ile altlık üzerine püskürtülür. Kullanılan kaplama hammadesinin çeşidine gore besleme eksenel veya radyal olabilir (Vuoristo, 2014). Şekil 2.10'da oksi-gaz püskürtme tabancası şematik olarak gösterilmiştir.

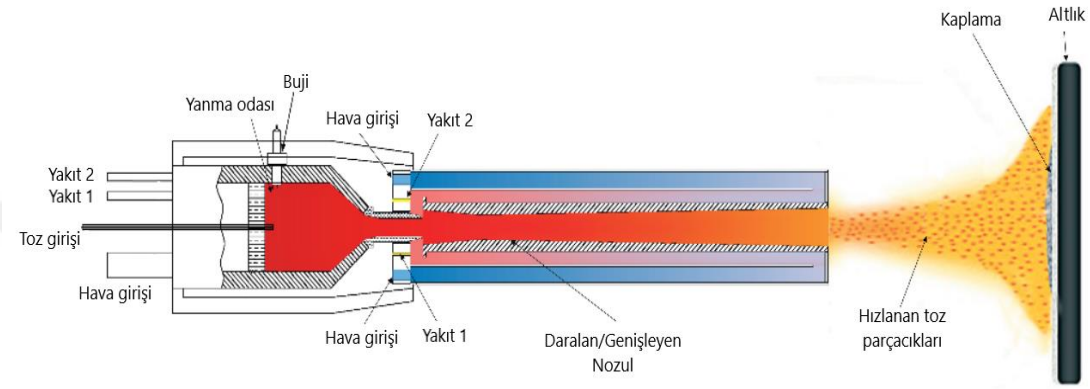


Şekil 2.10 Oksi-gaz püskürtme yönteminin şematik olarak gösterimi (Vuoristo, 2014)

2.1.1.4 Yüksek Hız Oksijen Yakıtlı Püskürtme(HVOF)

HVOF yöntemi ilk olarak 1958 yılında Union Carbide (şuanda Praxair Surface Technology) tarafından tanıtılmış olmasına karşın 1980'lerde James Browing tarafından Jet Kote sistemi tanıtılana kadar ticari olarak kullanımı olmamıştır (Fauchais ve diğer., 2014).

Şekil 2.11'de HVOF tabancası şematik olarak gösterilmiştir. Yöntemde yanıcı gaz olarak genellikle propan, propilen yada hidrojen kullanılmakta olup oksijen ile birlikte yanması sağlanıp de laval nozuldan geçirilerek supersonik gaz hızı elde edilir. Toz genellikle eksenel olarak nozula iletilerek ısıtılır ve hızlandırılarak altlık üzerine püskürtülür. Parçacıklar tamamen veya kısmen ergiyip 550 m/s hıza kadar ulaşır (Tucker, 1994).



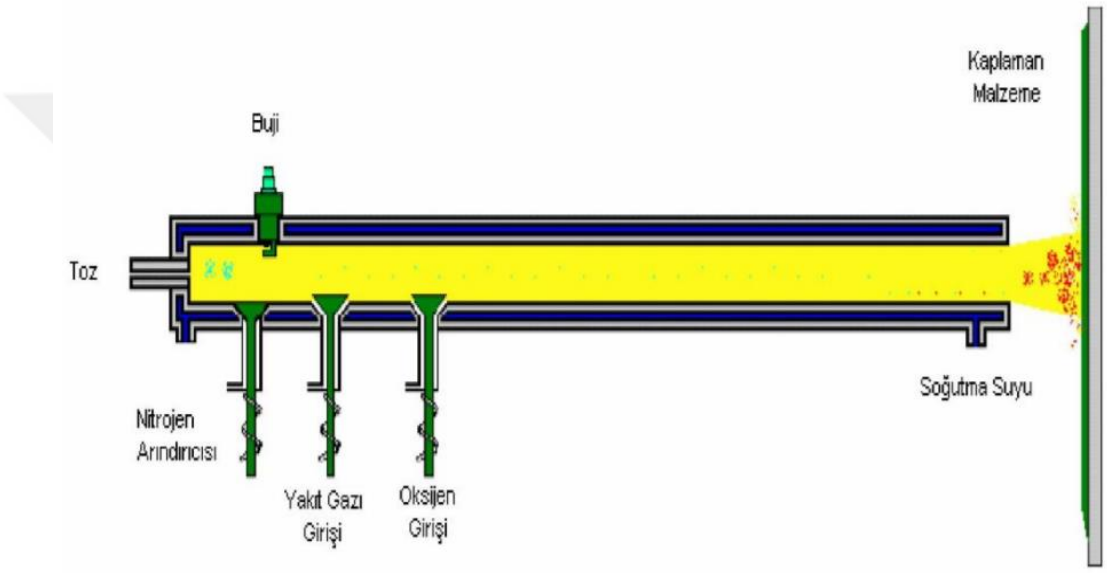
Şekil 2.11 HVOF yönteminin şematik olarak gösterimi (Sadeghi, 2016)

Bu yüksek kinetik enerjili yöntemin en büyük avantajı yüksek yoğunlukta kaplamaların oluşturulmasına izin vermesidir. Diğer avantajları; yüksek kalınlıkta kaplamaların oluşturulabilmesi, yüksek kalitede yüzeylerin oluşturulabilmesi (diğer termal kaplama yöntemlerine göre), düşük oksit içeriği ve çevreye minimum zarar olarak sıralanabilir (Dorfman, 2018).

2.1.1.5 Detonation Gun (D-Gun)

Detonasyon tabancalı püskürtme kaplama bir diğer adıyla D-Gun yöntemi, endüstride patlamalı alev püskürtme olarak da bilinmektedir. Detonasyon tabancalı püskürtme yöntemi, kaplama işleminin aralıklı olduğu bir püskürtme yöntemidir. Yönteme özel olarak tasarlanmış bir tabanca ile kaplama işlemi yapılmaktadır. Asetilen, oksijen ve sprey tozu karışımı, tabanca içerisindeki yanma odasına gönderilir ve kıvılcım oluşturularak patlatılır. Patlama sonrasında boruda oluşan şok dalgası ile parçacıklar hızlanır. Hızlanan bu parçacıklar patlama sonucu oluşan alevin önünde ısıtılır ve altlık yüzeyine yüksek hızda püskürtülür (Kılıç, 2019).

Şekil 2.12'de şematik olarak görüldüğü gibi yanma odasına patlayıcı, oksijen, asetilen ve toz karışımı gönderilir. Kaplama tozları, yanma odasında oluşan patlamanın etkisiyle uzun borudan püskürtülür. Saniyede dört kez patlama gerçekleşerek tanecikleri ergitecek sıcaklık ve yüksek hızlı gaz akışı elde edilir. Bu ergimiş tanecikler altlık yüzeyine çarparak oluşan mikroskobik kaynamanın etkisiyle hem kimyasal hem de mekanik türde bir bağlantı oluşur. Ard arda devam eden patlamalar ile kaplamanın kalınlığının istenilen seviyeye gelmesi sağlanır (Aytaç, 2014).



Şekil 2.12 D-Gun yönteminin şematik olarak gösterimi (http://www.advanced-coating.com, 2021)

2.1.1.6 Soğuk Püskürtme

Soğuk püskürtme (Cold Spray) nispeten daha yeni bir termal püskürtme yöntemi olup, farklı alanlarda Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme, Kinetik Püskürtme, Yüksek Hızlı Partikül Tavkviyesi (HVPC), Yüksek Hızlı Toz Biriktirme ve Süpersonik Partikül/Toz Biriktirme (SPD) gibi isimler ile bilinmektedir (Singh ve diğer., 2012).

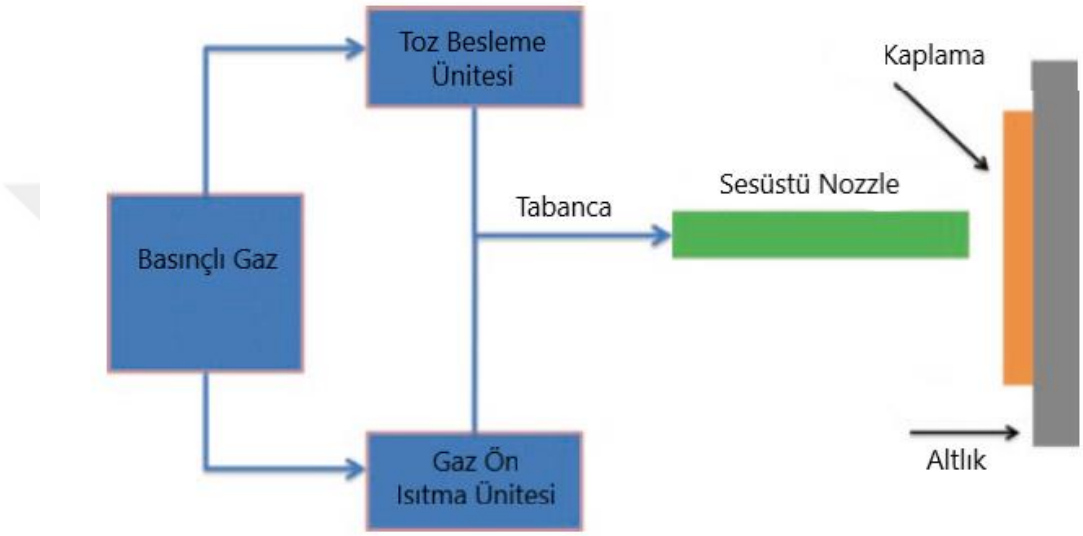
Soğuk püskürtme yöntemi 1980'li yılların ortalarında Rusya Bilimler Akademisi Sibirya Şubesi Teorik ve Uygulamalı Mekanik Enstitüsü'nde, (ITAM SB RAS, Novosibirsk, Russia) eski Sovyetler Birliği'nde geliştirilmiştir. Rus bilim adamları birçok metal, metal alaşımı, polimer ve kompozit malzemeler ile farklı altlıklar

üzerinde yüksek verimlilikte başarılı kaplamalar oluşturmuşlardır (Champagne, 2007).

Son yıllarda; Rusya'da Rus Bilimler Akademisi Teorik ve Uygulamalı Mekanik Bilimler Enstitüsü, Amerika Birleşik Devletleri'nde Pennsylvania Devlet Üniversitesi, Sandia Ulusal Laboratuarı, ASB, General Electric, Ford Motor, General Motors, Pratt & Whitney, Dartmouth Üniversitesi, Rutgers Üniversitesi, Amerikan Ordu Araştırma Laboratuarı, Delphi Araştırma Laboratuarında, Almanya'da Federal Silahlı Kuvvetler Üniversitesi, Avrupa Hava Savunma ve Uzay Araştırma Kurumu, Linde AG Soğuk Gaz Teknolojileri, Siemens, İngiltere'de Cambridge, Nothingham, Liverpool Üniversiteleri'nde, Yasaki Avrupa ve BOC Gaz şirketlerinde, Kanada'da Windsor Üniversitesi ve Ulusal Araştırma Kurulu'nda, Japonya'da Shinshu Üniversitesi ve Plasma Giken Şirketlerinde, Avustralya'da CSIRO, Brezilya'da Mahle Metal, Güney Kore, Çin ve Hindistan gibi daha birçok ülkede, şirketlerde, kurum ve kuruluşlarda soğuk püskürme prosesi üzerinde yoğun çalışmalar yürütülmektedir (Meydanoğlu, 2012).

Soğuk püskürtme, toz formundaki parçacıkların yüksek hızlarda altlık yüzeyine çarptırılıp şekil değiştirmesi ile altlık/parçacık parçacık/parçacık arasında oluşan bağlanma ile kaplamanın oluşturulması işlemidir. Boyutları 5 ile 100 µm aralığında olan parçacıklar yüksek hızdaki gaz akışına enjekte edilerek hızlandırılırlar. Basınçlandırılmış ve ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş gazın daralan-genişleyen yapıdaki De Laval nozuluna gönderilmesi ile yüksek hızlı gaz jeti elde edilir. Başıncı artırılmış olan gazın nozuldan çıkışında ses üstü hızlar elde edilirken, basınç ve sıcaklık düşürülmüş olur. Toz parçacıklar ayrı bir taşıyıcı gaz ile nozzla iletilir. Parçacıklar nozzlaki ana gaz akışı ile nozzulu terk eder ve altlık yüzeyine çarptırılır. Çarpışma esnasında katı haldeki bu parçacıklar şekil değiştirir ve altlık ile bağ oluşturur. İşlem aynı şekilde devam ederek ardı sıra gelen parçacıklar altlık yüzeyine çarparak kaplamayı oluşturur, oluşan uniform yapıdaki bu kaplamalarda porozite oluşumu çok düşük olup yüksek bağlanma mukavemetleri elde edilmektedir. Nozzle çıkışında genişleyen gazın -100 ile +100 C aralığında olması nedeni ile işlem soğuk püskürtme olarak isimlendirilmektedir (Champagne, 2007).

Şekil 2.13'de soğuk püskürtme işlemi şematik olarak gösterilmiştir. Soğuk püskürtme yöntemi uygulaması basit olmasına karşın değişken birçok parametrenin bulunması nedeniyle işlemin kontrolü zorlaşmaktadır. İşlemde kullanılan gaz, gaz basıncı, gaz sıcaklığı, kullanılan kaplama tozunun boyut ve şekli, nozzle tasarımı, püskürtme mesafesi, tabanca hareket hızı gibi birçok değişken parameter kaplamanın özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Cavaliere, 2018).

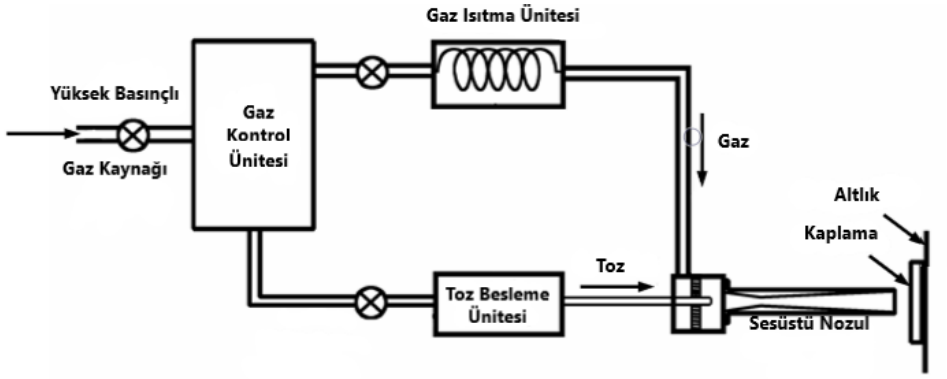


Şekil 2.13 Soğuk püskürtme yönteminin şematik olarak gösterimi (Cavaliere, 2018)

Soğuk püskürtme yöntemi kullanılan proses gazının basıncana bağlı olarak yüksek basınçlı soğuk püskürtme ve düşük basınçlı soğuk püskürtme olarak isimlendirilmektedir. Bu iki farklı basınçta çalışan sistemlerin ayrıntıları ayrı altbaşlıklarda anlatılacaktır.

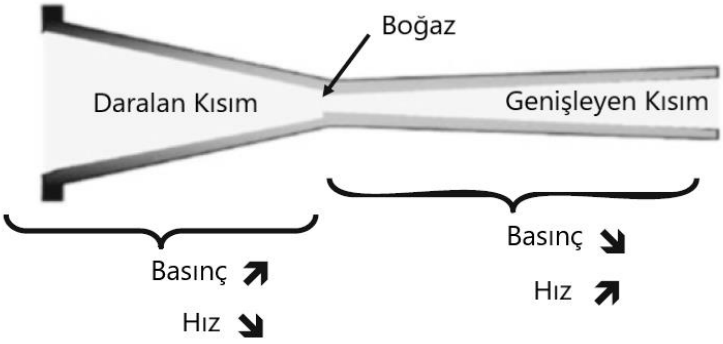
2.1.1.6.1 Yüksek Basınçlı Soğuk Püskürtme (HPCS). Yüksek basınçlı soğuk püskürtme işlemi, gaz basıncının 40 bar'a ve gaz ön ısıtma sıcaklığının 800 ° C kadar ulaştığı bir tür termal püskürtme yöntemidir. Genel olarak, HPCS işleminde kaplama hammaddesi olarak saf metal ve alaşımları kullanılmaktadır. Kullanılacak toz kaplama malzemesi seçenekleri, LPCS işlemine kıyasla HPCS işleminde daha fazladır. Genel olarak, metaller ve metal alaşımları, Cu, Al, Ta, Ni, Cu-Sn, NiCr ve Ni-Al toz malzeme olarak kullanılır (Kahraman, 2019).

Şekil 2.14'de, HPCS işlemi şematik olarak gösterilmiştir. Temel olarak, HPCS işleminde, yüksek basınçlı gaz (N_2, He veya bu gazların karışımı) ısıtılır ve tozun taşıyıcı gaz ile beslendiği tabancaya doğru akar. Tabancaya ulaşan toz, gaz akışı içinde yüksek hızın üretildiği nozula doğru beslenir. Toz akışı daralıp/genişleyen yapıdaki bu nozulda ilerleyerek yüksek hızda çıkar ve kaplamanın oluşturulacağı altlık yüzeyine hızla çarpar. HPCS işlemi bir kontrol ünitesi ile kontrol edilir (Kahraman, 2019).



Şekil 2.14 HPCS yönteminin şematik olarak gösterimi (Koivuluoto, 2010)

Soğuk püskürtmede, parçacıkların süpersonik hıza ulaştığı süpersonik gaz akışının elde edilebilmesi için daralıp-genişleyen tipte nozul kullanılır. Süpersonik hız, nozul boğazında nozulün genişleyen kısmında oluşturulur. Toz, eksenel yönde taşıyıcı gaz ile beslenir ve daha sonra, ana gaz ile karıştırılarak nozulden önce bir parçacık gazı akışı meydana gelir. De Laval tipi daralıp / genişleten tipdeki nozul en sık kullanılanıdır (Koivuluoto, 2010). Şekil 2.15'de De Laval nozullu şematik olarak gösterilmektedir. Nozulun daralan kısmında hız düşürülüp basınç artarken genişleyen kısmında basıncın düşürülmesiyle 1200 m/sn parçacık hızları elde edilir (Fauchais ve diğer., 2014).

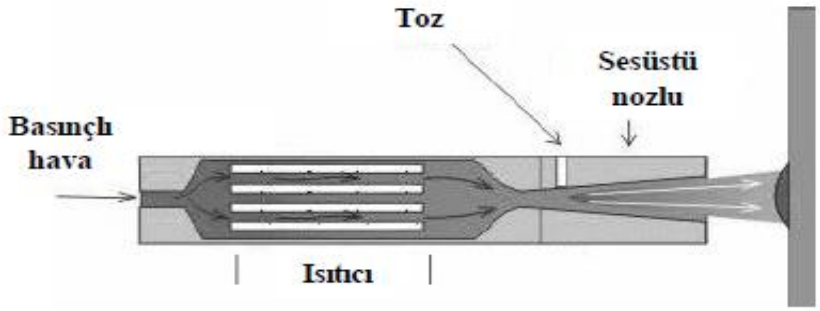


Şekil 2.15 De Laval nozulunun şematik olarak gösterimi (Fauchais ve diğer., 2014)

2.1.1.6.2 Düşük Basınçlı Soğuk Püskürtme (LPCS). Düşük basınçlı soğuk püskürtme yöntemi (LPCS), basıncın genellikle 1 MPa'yı geçmediği ve ön ısıtma sıcaklığının ise oda sıcaklığı ile 600 ° C arasında değiştiği işlemdir. Sprey gazı olarak genellikle hava veya nitrojen kullanılır. HPCS'ye göre partikül hızının düşük olması nedeniyle, genellikle püskürtme malzemesi olarak Sn, Zn, Al, Cu ve Ni gibi düşük mukavemetli malzemeler kullanılmaktadır. Genellikle, işlemin biriktirme verimliliğini ve ayrıca bağlanma mukavemetini arttırmak için kaplama tozuna seramik parçacıklar (Al_2O_3 veya SiC) eklenir (Malachowska, 2016).

Seramik tozunun üstlendiği görevlerin başında, yüzeyi aktifleştirmek ve tabanca içerisindeki nozulu temiz tutmak gelmektedir. Ayrıca toz karışımındaki seramik parçacık ilavesi, oluşturulan kaplama yüzeyine çarpması esnasında sıkıştırıcı bir etkiye sahiptir. Metal kaplamaların kaplama özelliklerini iyileştirirerek biriktirme verimliliğini büyük oranda arttırır. LPCS işlemlerinde bu sert yapıdaki parçacıklar takviye elemanı olarak da görev yapar ve metalik matrisi mukavemetlendirir (Kahraman, 2019).

LPCS ve HPCS sistemleri arasında kullanılan işlem gazınındaki basınç farkı dışındaki farklılıklar temel olarak şunlardır; HPCS de gaz ön ısıtma işlemi ayrı bir ünitede yapılırken LPCS sistemlerinde gazın ön ısıtma işlemi tabanca içerisinde yapılır, HPCS sistemlerinde toz parçacıklar toz besleme ünitesinde basınçlandırılarak tabancaya eksenel yönde iletilir iken, LPCS sistemlerinde toz basıncın yüksek olduğu nozulun genişleyen kısmına radyal olarak gönderilir. Şekil 2.16'da düşük basınçlı soğuk püskürtme sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.16 LPCS sisteminin şematik olarak gösterimi (http://en.dymet.net/coating-technology.html)

2.1.1.6.1 ve 2.1.1.6.2 numaralı alt başlıklarda tanımlanan HPCS ve LPCS sistemlerine ait işlem parametreleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 HPCS ve LPCS sistemlerine ait püskürtme parametreleri (Champagne, 2007).

Püskürtme parametresi	HPCS	LPCS
İşlem gazı	N22,He, karışım	Sıkıştırlımış hava
Basınç (bar)	7-40	6-10
Ön ısıtma sıcaklığı (ºC)	20-550-800	20-650
Gaz debisi (m3/min)	0.85-2.5(N2), maks. 4.2 (He)	0.3-0.4
Toz besleme debisi (kg/h)	4.5-13.5	0.3-3
Püskürtme mesafesi (mm)	10-50	5-15
Elektrik gücü (kW)	17-47	3.3
Partikül boyutu (µm)	5-50	5-30

Her iki soğuk püskürtme işlemi HPCS ve LPCS'nin kendine göre avantajları bulunmaktadır ve her iki yöntemde birbirlerini destekler. HPCS işleminin temel avantajları, önemli ölçüde daha büyük bir malzeme seçim yelpazesi ve oluşturulan kaplamaların daha kaliteli olmasıdır; buna karşı LPCS ekipmanının ilk yatırım maliyetleri HPCS işleminin maliyetlerinden daha düşüktür. Ek olarak, LPCS ekipmanının taşınabilir olmasından kaynaklı, yerinde püskürtme yapmak da mümkündür. Her iki soğuk püskürtme işlemi de, yüksek kaliteli kaplamaların oluşturulmasında optimal püskürtme parametreleriyle birlikte kendine özgü toz özelliklerine sahiptir (Koivuluoto, 2010).

BÖLÜM ÜÇ
SOĞUK PÜSKÜRTME KAPLAMALAR

3.1 Soğuk Püskürtmenin Diğer Termal Püskürtme Yöntemlerinden Farklılıkları

Termal püskürtme, malzemelerin ergimiş veya yarı-ergimiş fazda altlık malzemeleri üzerinde biriktirildiği, soğuk püskürtme yöntemininde dahil olduğu bir grup püskürtme işlemlerine verilen isimdir (Champagne, 2007).

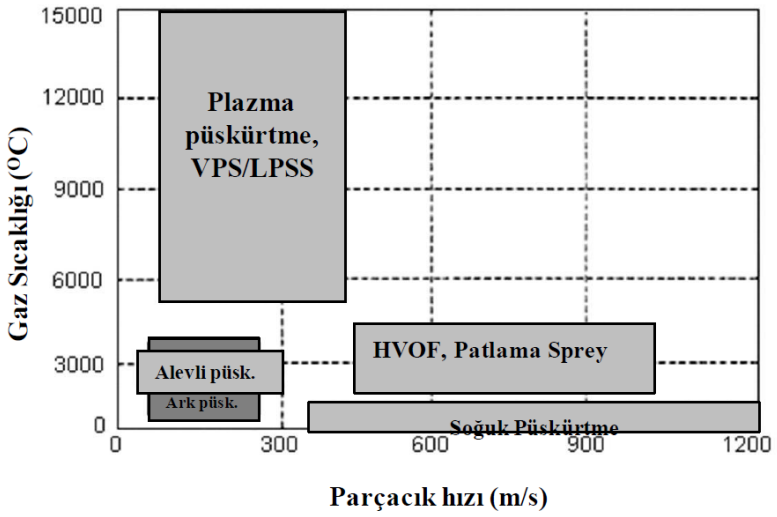
Termal püskürtme işlemileri temel olarak ergimiş veya yarı-ergimiş formda toz veya tel hammaddenin altlık malzemesi üzerine püskürtülerek kaplamaların oluşturulmasına dayanmakta olup, yöntemler arasında kullanılan işlem sıcaklığı, gaz basıncı, işlem gazı, toz besleme oranları gibi değişken parametreler dolayısıyla farklılıklar oluşmaktadır.

Termal püskürtme yöntemleri, artık fiziksel buhar biriktirme ve kaynak ile oluşturulan kaplamaların yanı sıra önde gelen yüzey teknolojilerinden biri haline gelen ve yüzyılı aşkın bir süredir kullanılan bir yöntem olup, yaklaşık 6,5 milyar dolarlık tahmini bir endüstrisi ile kaplama işlemlerinde başlıca kullanılan yöntemlerdir (Dorfman ve Sharma, 2013). Soğuk püskürtme teknolojisi, son otuz yılda ortaya çıkan nispeten yeni bir malzeme biriktirme tekniğidir (Smith 2007). Muhtemelen en yoğun geliştirme alanı olan soğuk püskürtme teknolojisi uygulamaları, genellikle geleneksel sıcak metal püskürtme teknolojisinin başarıyla kullanılamadığı durumlarda ortaya çıkar (Champagne 2007). Kaplamalar ve alt tabakalar üzerinde termal spreyden kaynaklanan yüksek sıcaklıkların zararlı etkilerini ortadan kaldırmak, soğuk spreyi çok çeşitli endüstriyel parçaların üretimi ve onarımında kullanılmasını sağlamaktadır (Papyrin, 2006).

Fiziksel olarak soğuk püskürtme yöntemi ile diğer termal püskürtme yöntemleri arasındaki en büyük farklılık, soğuk püskürtme işleminde kaplamanın altlık üzerinde ergime olmadan katı fazda gerçekleştirilmesidir (Papyrin, 2007).

Şekil 3.1'de farklı termal püskürtme işlemlerinde gaz sıcaklıklarını ve parçacık hızını göstermektedir. Geçmişte, termal enerjinin kullanımı daha yaygın olmasına

karşın günümüzde kinetik enerjinin kullanımı giderek artmaktadır. Termal enerji yerine kinetik enerjinin kullanılması (soğuk püskürtme yönteminde) gözenekliliğin ve kaplamadaki oksijen içeriğinin minimum seviyeye düşürülmesini sağlamıştır. Soğuk püskürtme yönteminde altlık malzemesine ısı girişi belirgin şekilde düşüktür, bu sayede ana malzemenin özellikleri değişmez ve püskürtme sırasında minimum seviyede oksidasyon oluşur. Diğer avantajları ise şunlardır, diğer yöntemlerde erimenin ve gözenekliliğin neden olduğu katılaşmadan dolayı oluşan faz değişimleri, soğuk püskürtme yöntemi kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Soğuk püskürtme yönteminde gaz sıcaklığı, püskürtülen malzemenin erime noktasının çok altındadır bu nedenle gaz akışında parçacıklarda ergime oluşmaz (Koivuluoto, 2010).



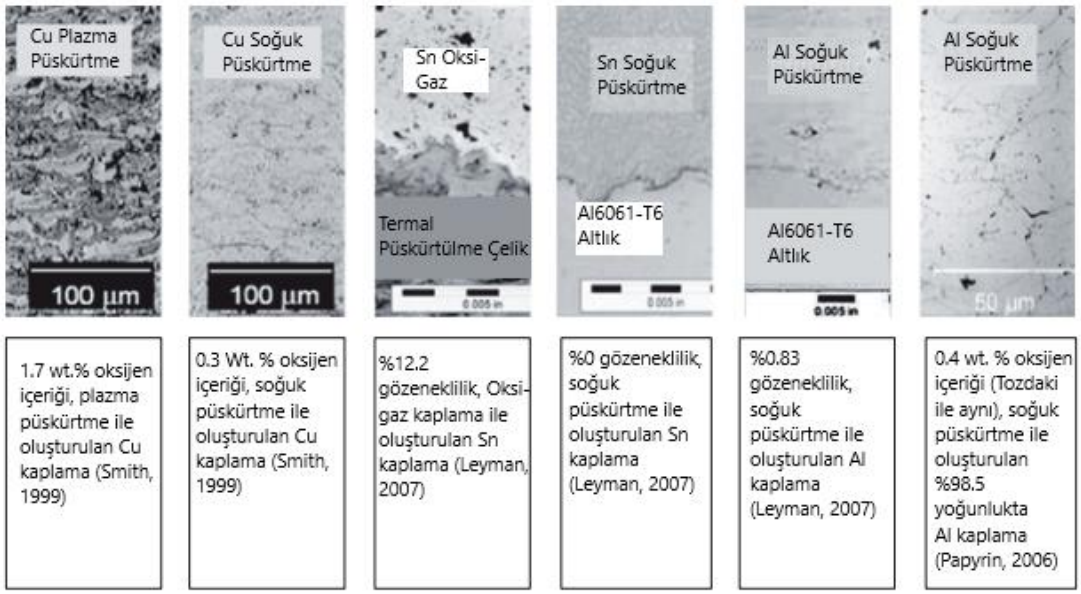
Şekil 3.1 Termal püskürtme işlemlerinde gaz sıcaklıklarına karşı parçacık hızları (VPS vakum plazma spreyi ve LPPS düşük basıç plazma spreyi işlemi) (Champagne., 2007)

Soğuk püskürtme yönteminde kullanılacak kaplama tozu seçiminde malzemenin şekil değiştirebilme kabiliyeti büyük önem taşırken, termal püskürtme yöntemleri kullanılarak hemen hemen tüm malzemeler püskürtülebilir fakat termal püskürtme yöntemlerinde toz parçacıklar neredeyse tümüyle erir. Bu eriyip yeniden katılaşma sonucu büyük artık gerilmeler, kaplamalarda veya altlıklarda çatlaklar, yüksek oranda oksidasyon, gözenek oluşumu ve faz değişimi, oluşturulan kaplamanın fiziksel, elektrokimyasal ve mekanik özelliklerinde düşüş meydana gelmektedir (Cavaliere, 2018).

Soğuk püskürtme katı hal yöntemi olması nedeniyle, oksit kalıntıları ve boşluk oluşumu diğer termal püskürtme yöntemlerine göre minimun seviyededir. Farklı termal püskürtme yöntemleri ile oluşturulan kaplamalardaki gözeneklilik ve oksijen içeriği Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Şekil 3.2'de porozite ve oksijen içeriği açısından soğuk püskürtme ve termal püskürtme ile yapılan kaplamalara ait çalışmalardan örnekler gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Farklı termal püskürtme yöntemlerinde kaplamaların gözenekliliği ve oksijen içeriği(Koivuluoto, 2010).

Metot	Gözeneklilik(%)	Oksijen içeriği (%)
SOĞUK PÜSKÜRTME	0.1	Tozdakiyle aynı
HVOF	1	0.2
ALEV	10-20	4-6
ARK	10-20	0.5-3
PLAZMA	1-7	0.5-1

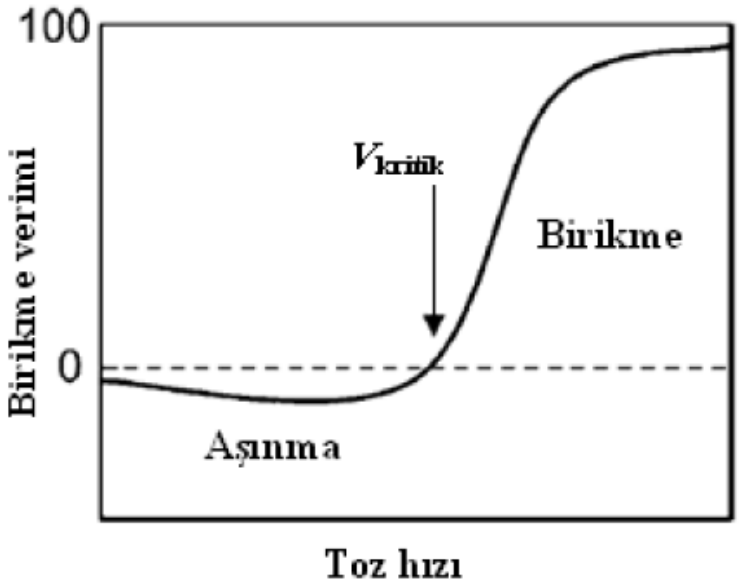


Şekil 3.2 Termal püskürtme ve soğuk püskürtme ile oluşturulan kaplamalardaki oksijen içeriği ve porozite oranı (Papyrin., 2006)

3.2 Soğuk Püskürtmede Kritik Hız Kavramı

Soğuk püskürtme işleminlerinde en önemli kavram kritik hızdır. Belirli bir toz için kritik hız, altlık ile çarpışmadan sonra bağlanmanın oluşabilmesi için parçacığın ulaşması gereken hızdır (Champagne, 2007). Şekil 3.3'deki grafikde görüldüğü üzere eğer parçacık hızı kritik hızdan düşük ise, parçacıklar altlığa çarptıkdan sonra geri seker ya da atlıkda aşınmaya neden olur. Eğer parçacık hızı gereken kritik hıza

ulaşmış ise altlık ile parçacıklar arasında bağlanma oluşur. Kritik hız değeri, altlık ve kaplama tozu, proses parametreleri, parçacık boyutu ve altlık yüzey özellikleri gibi birçok faktöre gore değişkenlik göstermektedir (Cavaliere, 2018).



Şekil 3.3 Parçacık hızının biriktirme verimliliğine etkisi (Gartner ve diğer. 2006)

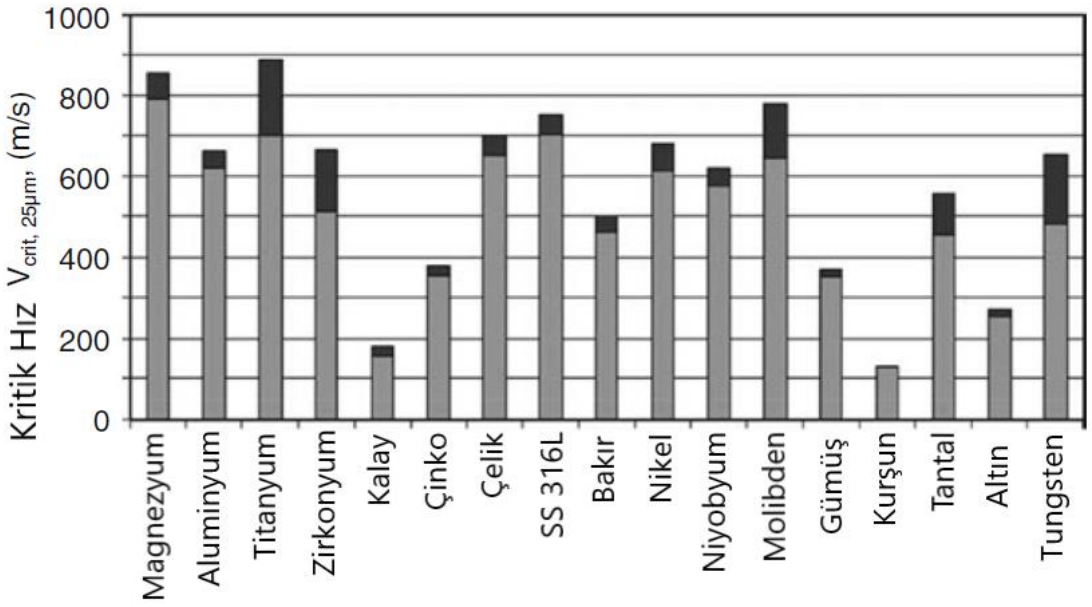
Assadi ve diğer. (2003) kritik hızın hesaplanması için aşağıda verilen denklemi geliştirmiştir. Denklem 3.1'de ρ = yoğunluk, σ_u = akma dayanımı, T_m= erime sıcaklığı, T_i= çarpma sıcaklığı, T_R= referans sıcaklığını (293 K) ifade etmektedir.

$$v_{crit} = 667 - 0.014\rho + 0.08(T_m - T_R) + 10^{-7}\sigma_u - 0.4(T_i - T_R) \qquad (3.1)$$

Schmidt ve diğer. (2006) kritik hızın hesaplanması için özgül ısı, çekme dayanımı, mekanik ve ısıl kalibrasyon faktörlerini de ekleyerek daha gelişmiş bir denklem ortaya atmışlardır. Denklem 3.2'de ρ = yoğunluğu, σ_{TS} = çekme dayanımını, T_m= erime sıcaklığını, T_i= çarpma sıcaklığını, T_R= referans sıcaklığını (293 K), c_p= özgül ısıyı, F_1= mekanik kalibrasyon faktörünü (soğuk püskürtme için 1.2), F_2= Isıl kalibrasyon faktörünü (soğuk püskürtme için 0.3) ifade etmektedir.

$$v_{crit} = \sqrt{\frac{F_1 * 4 * \sigma_{TS} * \left(1 - \frac{(T_i - T_R)}{(T_m - T_R)}\right)}{\rho} + F_2 * c_p * (T_m - T_i)} \qquad (3.2)$$

Schmidt ve diğer. (2006) tarafından 25 µm boyutundaki farklı metal tozları için hesaplanan kritik hız değerleri Şekil 3.4'de verilmiştir. Partikül büyüklüğü kritik hızı etkileyen önemli faktörlerdendir. Partikül boyutunun azalmasıyla birlikte kritik hız artmaktadır, küçük parçacıklar daha yüksek empürite içeriği (oksit içeriği) nedeniyle bağlanmanın oluşabilmesi için daha yüksek parçacık hızına ihtiyaç duyarlar. Ek olarak malzemenin mukavemetine bağlı olarak kritik hız artmaktadır. Her iki denklemdende görüldüğü üzere, akma ve çekme dayanımının artması ile malzemenin deformasyona uğraması için gereken kritik hız değeri yükselmektedir. Kritik hız artan sıcaklıkla azaltılabilir, yüksek sıcaklığa sahip olan parçacıklar yumuşayarak plastik deformasyon için gereken kinetik enerji miktarının düşmesini sağlar. Bu nedenle artan sıcaklık ile birlikde kritik hız düşmektedir (Koivuluoto, 2010).

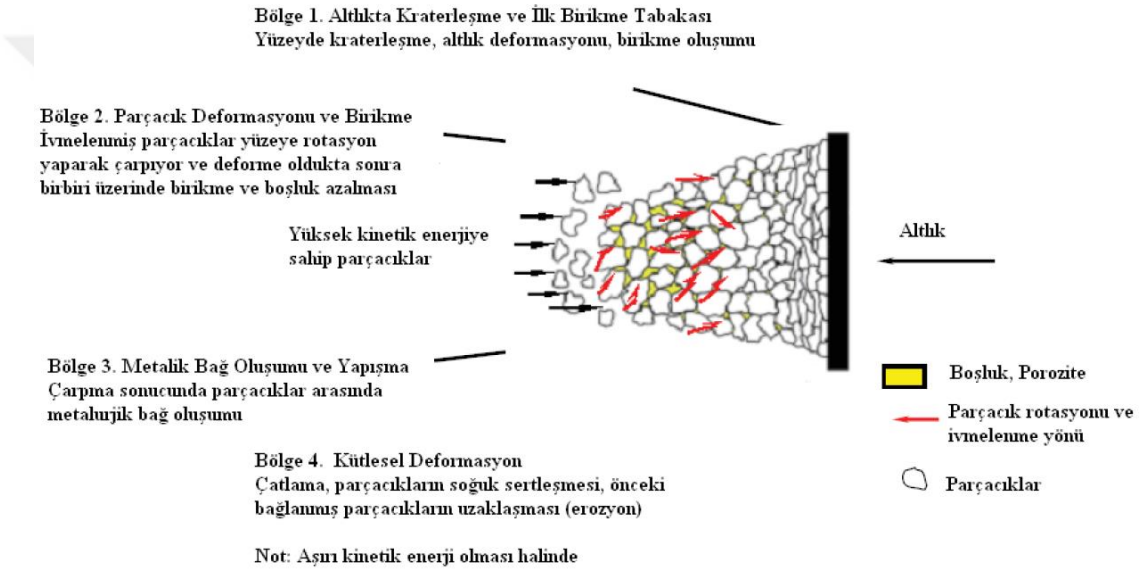


Şekil 3.4 25 µm boyutundaki metal tozları için hesaplanan kritik hız değerleri (Schmidt ve diğer. 2006)

3.3 Kaplamanın Oluşumu

Bir kaplama oluşturmak için ön koşul, toz parçacıkları tarafından kritik hızı aşmaktır (Malachowska, 2016). Parçacık hızı kritik hızın üstünde ise, parçacıklar yüzeye yapışır ve kaplamayı oluşturur. Soğuk püskürtülmüş kaplamanın oluşumu Şekil 3.5'de sunulmaktadır. İlk parçacıklar, altlık üzerinde ilk kaplama kraterinin oluşturulmasını sağlar. Soğuk püskürtmeli kaplamanın oluşumu iki aşamaya dayanır:

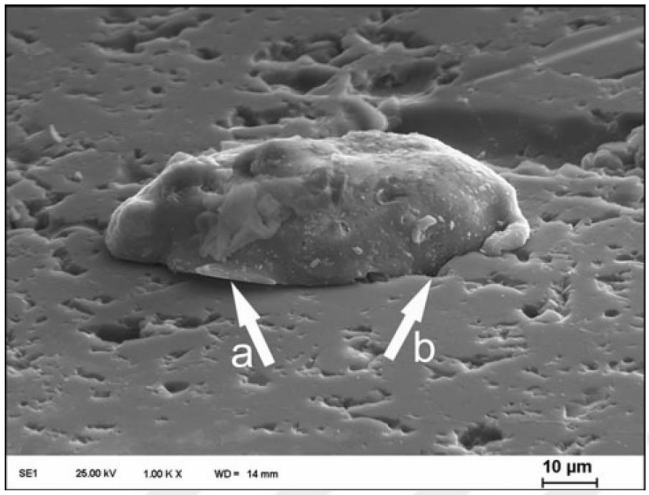
birinci katmanın (parçacık-alt tabaka etkileşimleri) birikmesi ve kaplamanın biriktirilmesi (parçacık-parçacık etkileşimleri). İlk adımda, kaplama ile alt tabaka arasındaki adezyon kuvveti tanımlanırken, 2. aşamada kaplamanın kohezyon kuvveti tanımlanır. Yüzeyin hazırlanmasıyla birlikte alt tabaka ve kaplama materyalleri etkileşir ve parçacık-alt tabaka kesişimi meydana gelir. Bundan sonra, yeni gelen parçacıklar önceki parçacıklara yapışır, deforme olur ve yeniden sıralanırlar. İkinci aşamada, parçacıklar birbirleriyle etkileşime girer ve kaplama yapısını oluşturur. Püskürtme sırasında metalik bağlanma ve boşluk azalması meydana gelir ve bundan sonra, kaplama yapısı yoğunlaştırılır ve pekleştirilir (Malachowska, 2016).



Şekil 3.5 Soğuk püskürtme yönteminde kaplamanın oluşumu (Altuncu ve Üstel 2010)

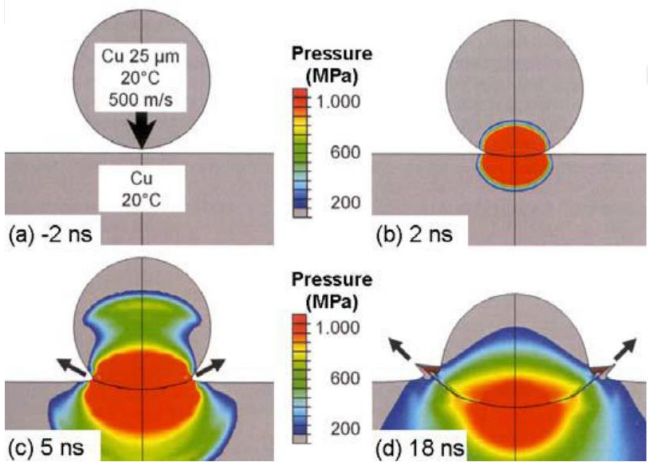
Soğuk püskürtme işleminde partikül çarpışmasının temeline bakıldığında, ilk olarak alt tabaka ile püskürtülen parçacık çarpışır. Çarpışan parçacık yüksek oranda deforme olur ve parçacık-altlık temas bölgesi boyunca parçacığın üst yüzeyine doğru dalgalı formda izler oluşur. İlk parçacığın ardından gelen parçacıklar, üst üste binme nedeniyle birinci parçacığın deformasyonunu arttırır ve gözenek oluşumunu da azaltmış olur. Son durumda, çarpışma esnasında ortaya çıkan yüksek basınç ile birlikte düzleşmiş hale gelen parçacıklar, yüksek oranda deforme olarak kaplama tabakasını oluşturmuş olur. Şekil 3,6'da plazma püskürtme ile oluşturulan Al_2O_3 üzerine soğuk püskürtme ile oluşturulan Al kaplamada, deformasyonun etkisiyle

parçacık üzerinde oluşan iz (Şekil 3.6 a) ve püskürtülen parçacığın altlık ile oluşturduğu mekanik kenetlenme (Şekil 3.6 b) gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Al_2O_3 üzerine soğuk püskürtme ile oluşturulan Al kaplama a) parçacıkda oluşan iz b) altlık-parçacık arasındaki mekanik kenetlenme (Drehmann ve diğer., 2013)

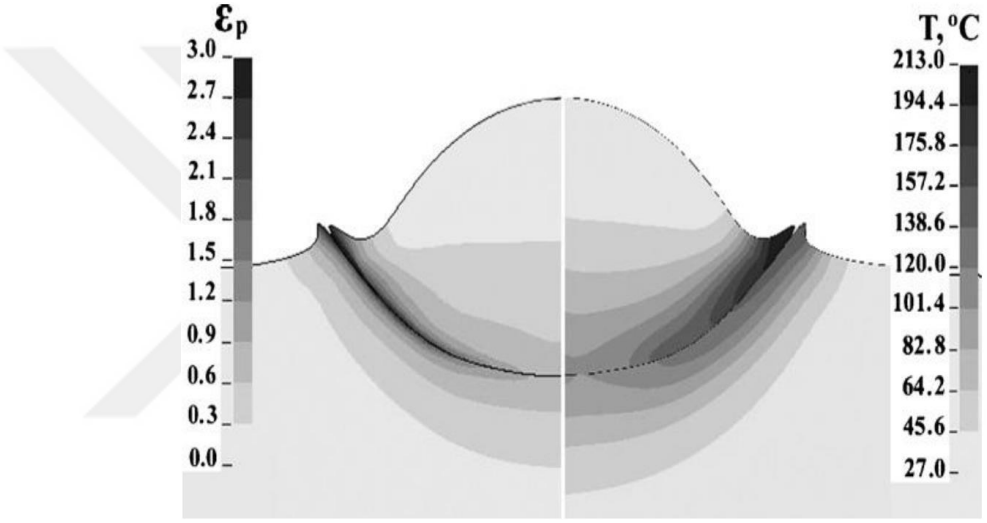
Soğuk püskürtme kaplamalarda toz parçacıklarının altlıkla çarpışmaları esnasında, parçacık-altlık temas bölgesinde çok yüksek miktarda basınç ve oluşan bu basınç ile birlikte yüksek oranda plastik deformasyon oluşmaktadır (Kahraman, 2019). Çarmışma esnasında oluşan basınç Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Cu altlık üzerine soğuk püskürtülmüş 25 µm'lik Cu parçacıkların çarpması a) darbeden önce b) 2ns sonra c) 5 ns sonra d) 18ns sonra (Schmidt, 2007)

Partikülün altlık ile çarpışma anı simüle edildiğinde, plastik deformasyonun daha çok altlık-parçacık ara yüzeyinde oluştuğu ve maksimum deformasyonun ilk temas

noltasından ziyade temas bölgesinin çevresinde oluştuğu gözlemlenmiştir. Jet oluşumu ile birlikde çok yüksek şekil değişimleri meydana gelmektedir. Ayrıca yüksek basınç ve şekil değiştirmeye ek olarak özellikle partiküllerin çarpma yüzeyinde, çarpışma anında sıcaklıkta yükselmektedir. Plastik deformasyon sonucu anlık olarak oluşan bu ısı sıcaklığı arttırarak malzemenin bir miktar yumuşamasını sağlar. Bu yumuşama plastik deformasyonu ve bağlanmayı kolaylaştırmaktadır (Çetin, 2015). Şekil 3.8'de bakır altlık üzerine bakır tozu ile oluşturulan kaplamada, parçacığın 500 m/s hız ile altlığa çarpmasından 24 ns sonra plastik gerinim ve sıcaklık değişimi verilmiştir.



Şekil 3.8 Bakır altlık üzerine bakır tozu ile oluşturulan kaplamada, parçacığın 500 m/s hız ile altlığa çarpmasından 24 ns sonra plastik gerinim ve sıcaklık değişimi (Çetin, 2015)

Çetin (2015) "Soğuk püskürtme yönteminde altlık üzerinde kaplamanın birikebilmesi için gereken bağlanma mekanizması kritik hızda veya ötesinde sağlanan adyabatik ısınmanın sebep olduğu ve püskürtülen tozların yumuşamasıyla sonuçlanan, toz-altlık ara yüzeyinde meydana gelen bölgesel yüksek plastik deformasyon ve adyabatik kayma kararsızlıklarına dayandırılabileceğini" ifade etmiştir.

3.4 Soğuk Püskürtme Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

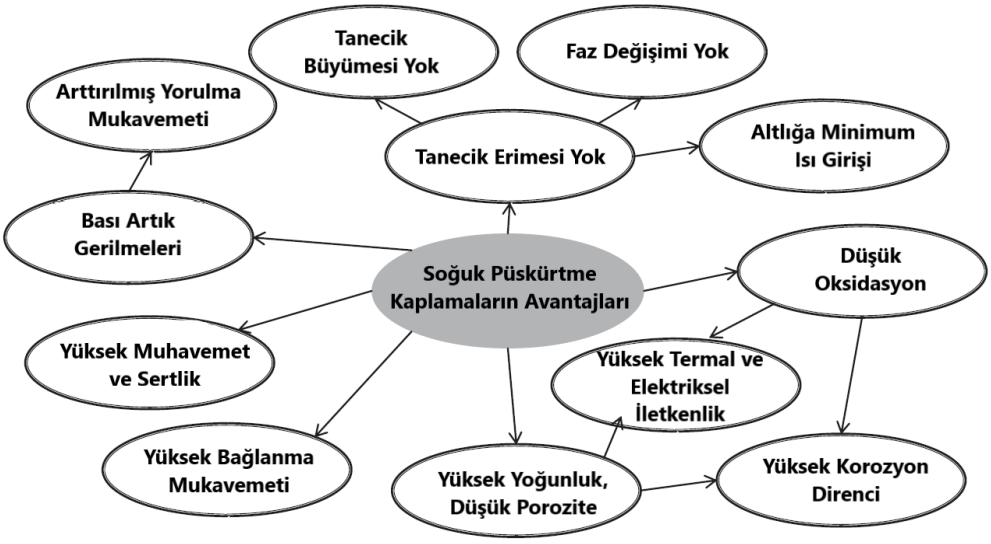
Diğer tüm malzeme işleme tekniklerinde olduğu gibi, soğuk püskürtme işleminin de kendi avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Soğuk püskürtme işleminin ana

avantajı, birçok farklı kaplama özelliğinin elde edilmesini sağlayan bir katı hal işlemi olmasıdır. Ana dezavantaj ise kaplamanın oluşturulması için yüksek miktarda plastik deformasyonun meydana gelmesi gerekmektedir, bu nedenle oluşturulan kaplamalarda süneklik kaybı ortaya çıkmaktadır (Karthikeyan, 2007).

Geleneksel termal püskürtme işlemleri sırasında (oksi-gaz, plazma, HVOF) toz parçacıkları ısıtıldığı ve eridiği için birçok istenmeyen yüksek sıcaklık reaksiyonları meydana gelmektedir. Soğuk püskürtme işleminde bu sıcaklık etkileri olmadığından ve kaplama esnasında taneciklerde herhangi bir ergime olmaksızın doğrudan yüksek deformasyonla tanecikler ve altlık arasında bağlanma gerçekleştiğinden, bakır veya titanyum gibi oksijene duyarlı malzemelerden oksijen içeriği düşük kaplamalar oluşturulmasında cazip bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Dykhuizen ve Smith, 1998), (Stoltenhoff ve diğer., 2001).

Soğuk püskürtme yönteminde parçacık hızını süpersonik değerlere yükselterek ve sıcaklığını çarpma noktasında veya yakınında yakın çevre sıcaklığına düşürerek, parçacıkların saf katı haldeki plastik deformasyonu ile damlacık benzeri bir morfolojinin oluşmasına yol açar. Parçacık veya altlık malzemesi yüksek sıcaklıklara maruz kalmadığından, faz değişiklikleri, buharlaşma, altlık malzemesine yüksek oranda etki gibi zararlı yüksek sıcaklık reaksiyonları meynada gelmez ve bu birçok avantaja yol açar (Karthikeyan, 2007).

Bu avantajların başında yüksek kaplama verimliliği, düşük artık gerilmeler, altlığa minimum ısı girişi ve düşük oksijen içerikli yoğun kaplamaların elde edilebilme gelmektedir. Soğuk püskürtme yönteminin avantajları Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 Soğuk püskürtme kaplamaların avantajları (Villafuerte, 2015)

Genellikle, yeni teknolojilerin geliştirilme, kabul edilme ve benimsenme hızı mühendislik problemlerine yeni çözümlere duyulan ihtiyaçla orantılıdır. Mevcut durumunda, soğuk püskürtme teknolojisi geri dönüşüm ve tamir-onarım işlemleri için bir araç haline gelmiştir. Kaynakların aşırı kullanımı, kirlilik ve sera gazı emisyonları gibi günümüzün üretim süreçlerinin olumsuz çevresel etkilerini azaltma günümüzde yükselen bir trend haline gelmiştir. Soğuk sprey, elektrokaplama, lehimleme ve boyama gibi teknolojilere göre daha çevre dostu bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Villafuerte, 2015).

Yukarıda belirtilen avantajlarına karşın soğuk püskürtme işleminin başlıca dezavantajları aşağıda verilmiştir (Karthikeyan, 2007).

- Kaplama sonrası ısıl işlem uygulandığında süneklik değeri dökme malzeme ile aynı olmasına karşın, sadece püskürtülmüş kaplamalarda süneklik sıfıra yakındır.
- Kompozit malzemelerin püskürtülebilmesine karşın, saf seramik ve bazı alaşımlar ile (sünekliği düşük malzemeler) kaplama oluşturulamaz.
- Soğuk püskürtmede bağlanmanın iyi olduğu kaplamaların oluşturulabilmesi için altlık malzemesinin belli bir oranda sünekliğe sahip olması gerekir. Bu sebeple seramik gibi altlıklar üzerine oluşturulan kaplamaların bağlanma mukavemeti sınırlıdır.

- Yüksek kalitede MCrAlY gibi kaplamaların oluşturulabilmesi için gereken yüksek hızın elde edilebilmesinde maliyeti yüksek olan helyum proses gazının kullanılması gerekmektedir.
- Soğuk püskürtme işleminde diğer termal püskürtme yöntemlerinde de olduğu gibi kompleks yapıdaki parçaların ve iç yüzeylerin kaplanması zordur.

BÖLÜM DÖRT
MATERYAL VE YÖNTEMLER

4.1 Kaplama İşleminde Kullanılan Altlık ve Kaplama Tozları

Çalışmada altlık malzemesi olarak Şekil 4.1'de gösterilen 122x117x4 mm ölçülerinde Al_2O_3 alümina seramik plakalar kullanılmıştır. Kaplamalar seramik plakaların üzerine iki farklı toz kullanılarak, önceden belirlenen işlem parametreleri ile oluşturulmuştur. Kaplamalar Saf Bakır (DYMET K-01-01 / Obninsk Center for Powder Spraying, Rusya) ve Bakır-Çinko karışımı (DYMET K-01-11 / Obninsk Center for Powder Spraying, Rusya) ticari tozları kullanılarak üretilmiştir. Tozların kimyasal dağılımı Tablo 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Kaplamalarda kullanılan alümina seramik altlık

Tablo 4.1. K-01-01 kimyasal kompozisyonu.

Kimyasal Adı	Wt, %
Alüminyum Oksit (%99.4 saflık)	45
Bakır (%99.5 saflık)	55

Tablo 4.2. K-01-11 kimyasal kompozisyonu.

Kimyasal Adı	Wt, %
Alüminyum Oksit (%99.4 saflık)	30
Bakır (%99.5 saflık)	30
Çinko (%96 saflık)	40

4.2 Soğuk Püskürtme ile Kaplama İşlemi

Çalışmada seramik plakalar üzerine kaplama oluşturulması işleminde Şekil 4.2'de verilen DYMET 423 (Obninsk Center for Powder Spraying, Rusya) düşük basınçlı soğuk püskürtme cihazı kullanılmıştır. Cihaza ait teknik özellikler Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.2 DYMET 423 Soğuk püskürtme cihazı

Tablo 4.3. DYMET 423 teknik özellikleri.

Parametre	Değer
İşlem gazı	Sıkıştırılmış Hava
Basınç (Bar)	5-8
Ön ısıtma sıcaklığı (°C)	200-600
Gaz debisi (m3/dak)	0.3
Toz besleme debisi (g/s)	0.1-0.8
Elektrik gücü (kW)	3.3

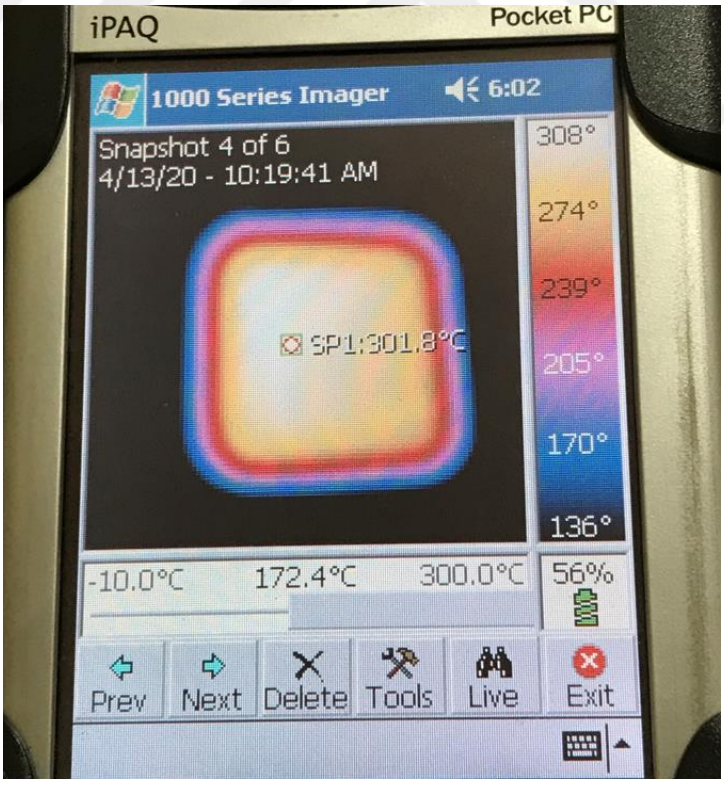
Kaplamaların tümü yaklaşık ~15 mm mesafeden sabit gaz basıncı (7 bar) ve toz besleme debisi (0,4 g/s) ile oluşturulmuştur. Proses gazı olarak hava seçilmiş ve gaz ön ısıtma sıcaklığı 600 °C olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında Cu-Zn içerikli toz ile altlığın farklı sıcaklıklara ısıtıldıktan sonra (Oda sıcaklığı (RT), 100°C, 200°C, 300°C) kaplanmasına bağlı olarak 4 farklı numune, Cu-Zn içerikli toz ile ilerleme

hızına bağlı olarak (5 cm/s ve 15 cm/s) 2 farklı numune, saf bakır içerikli toz ile de 1 adet numune oluşturulmuştur. Oluşturulan numuneler ve kullanılan işlem parametreleri Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4 Oluşturulan numuneler ve işlem parametreleri

Numune	Kaplama Tozu	İlerleme Hızı	Altlık Sıcaklığı	Gaz Basıncı	Toz Debisi	Gaz Ön Isıtma Sıcaklığı
N01	K-01-01	5 cm/s	RT	7 Bar	0,4 g/s	600 °C
RT5	K-01-11	5 cm/s	RT	7 Bar	0,4 g/s	600 °C
RT15	K-01-11	15 cm/s	RT	7 Bar	0,4 g/s	600 °C
T100 °C	K-01-11	15 cm/s	100 °C	7 Bar	0,4 g/s	600 °C
T200 °C	K-01-11	15 cm/s	200 °C	7 Bar	0,4 g/s	600 °C
T300 °C	K-01-11	15 cm/s	300 °C	7 Bar	0,4 g/s	600 °C

Altlık farklı sıcaklıklara ısıtıldıktan sonra oluşturulan kaplamalarda, önce altlıklar yaklaşık 400 °C'ye ısıtılmış, sıcaklıkların 100 °C, 200 °C, 300 °C değerlerine düşmesi sonrasında kaplamalar oluşturulmuştur. Sıcaklık ölçümleri Şekil 4.3'de gösterildiği gibi termal kamera ile yapılmış olup, sıcaklık istenilen değere geldiğinde kaplamalar Şekil 4.4'de gösterildiği gibi kaplama tezgahı üzerinde oluşturulmuştur.



Şekil 4.3 Kaplama öncesi seramik altlıkların sıcaklık ölçümü



Şekil 4.4 Kaplamaların oluşturulması

4.3 Test ve Analiz Yöntemleri

4.3.1 Optik Mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM) İncelemeleri

Oluşturulan kaplamalara mikroyapı incelemeleri öncesi standart metalografik hazırlıklar uygulanmıştır. Oluşturulan her bir kaplamadan mikro yapı incelemeleri için çıkarılan parçaların kesitleri, kum büyüklükleri sırasıyla 400-800-1200-1500 olan SiC su zımparaları ile zımparalanmış ve parlatılmıştır. Mikro yapı incelemelerinde optik mikroskop (OM, Nikon Epiphot 200, Japonya) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM, Quanta FEG 250, ABD) kullanılmıştır. Kullanılan cihazlar sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5 Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop



Şekil 4.6 Mikroyapı incelemelerinde kullanılan SEM mikroskobu

4.3.2 Bağlanma Mukavemeti Ölçümleri

Çalışma kapsamında, seramik plakaların üzerinde oluşturulan kaplamaların bağlanma mukavemeti ISO 4624 standartlarına göre Şekil 4.7'de gösterilen Defelsko Positest AT-A cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler Ø20 mm alüminyum test çubuklarının Loctite 415 yapıştırıcısı ile kaplama yüzeyine yapıştırılıp 24 saat kürlenme süresi sonrası yapılmıştır. Şekil 4.8'de balanma mukavemeti ölçümü için hazırlanan numune örneği gösterilmiştir. Bağlanma mukavemeti ölçümü kaplama üzerinde üç ayrı noktada yapılarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7 Defelsko Positest AT-A bağlanma mukavemeti ölçüm cihazı



Şekil 4.8 Bağlanma mukavemeti ölçümü için hazırlanan numune

4.3.3 Mikro Sertlik Ölçümleri

Kaplamaların sertlikleri EMCO-Test DuraScan20 G5 mikrosertlik test cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler Vickers ucu kullanılarak 10 g yük ve 10 s bekleme süresi sonrası her kaplama için 5 tekrar olacak şekilde yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan cihaz Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Sertlik ölçümünde kullanılan cihaz

4.3.4 Elektrik İletkenliğinin Ölçümü

Oluşturulan kaplamaların elektrik iletkenlikleri dört nokta iletkenlik ölçüm yöntemi ile Lucas Labs özdirenç ölçüm standı kullanılarak her bir numuneden 3 ölçüm olacak şekilde yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan cihaz Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Elektrik iletkenliği ölçümünde kullanılan cihaz

BÖLÜM BEŞ
BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 Makro İnceleme

Çalışmada Tablo 4.4'de verilen parametreler ile (yaklaşık ~15 mm mesafeden sabit gaz basıncı (7 bar), gaz debisi (0,3 m3/dak), toz besleme debisi (0,4 g/s) ve 600 °C gaz ön ısıtma sıcaklığı ile farklı altlık sıcaklıkları ve ilerleme hızı kombinasyonlarında) toplamda 2 farklı kaplama tozu kullanılarak alümina seramik altlık üzerinde 6 farklı kaplama oluşturulmuştur. Bu kaplamalardan saf bakır ile oluşturulan N01 isimli numunede, düşük basınçlı soğuk püskürtme yönteminin kullanımıyla seramik altlık üzerinde saf bakır tozu ile kaplama oluşturulabilirliği incelenmiştir. Bakır-çinko içerikli toz ile oluşturulan kaplamalarda, toz içeriğine şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olan çinkonun eklenmesiyle seramik plaka üzerine doğrudan (herhangi bir ara katman uygulaması olmadan) bakır-çinko içerikli kaplamanın oluşturulabilirliği incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan saf bakır (Cu-Al_2O_3) tozu ile oluşturulan kaplama Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Düşük basınçlı soğuk püskürtme yöntemiyle seramik altlık üzerinde saf bakır tozu içerikli kaplamanın oluşturulması, seramik altlığın çatlamasına neden olmuştur (Şekil 5.1'de siyah oklar ile gösterilmiştir.). Oluşturulan tabaka içerisinde sadece bakır olması ve bakırın da yüksek termal genleşme katsayısı nedeni ile kaplama işlemlerinden sonra altlık malzeme yüzeyindeki bakır tabaka yüksek oranda büzülmüş ve esnemeyen seramik altlık, büzülme sonucunda meydana gelen yüksek gerilmeler nedeniyle kırılmıştır. Seramik altlık üzerinde kaplamanın bağlanmasının zayıf olduğu gözlemlenmiş, kaplamanın birçok bölgede yüzeyden attığı görülmüştür. Şekil 5.1'de saf bakır tozu ile oluşturulan kaplama gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Saf bakır tozu ile oluşturulan kaplama

Şekil 5.1'de gösterilen saf bakır kullanılarak oluşturulan tabaka kaplama işleminden sonra çatlamıştır. Bunun nedeni altlığın şekil değiştirme kabiliyetinin düşük, oluşturulan tabakanın ise şekil değiştirme kabiliyetinin yüksek olmasıdır. Soğuk püskürtme yönteminde kullanılan altlıkların ve kaplama tozlarının belirli bir oranda şekil değiştirebilme kabiliyetinin olması beklenmektedir. Seramik malzemelerin şekil değiştirme kabiliyetinin düşük olmasından kaynaklı olarak yüzeye çarpan bakır parçacıklar yüzeyde yeterli miktarda deformasyon oluşturamadığından mekanik kilitlenme (mechanical interlocking) oluşmamaktadır.

Literatürde saf bakır tozları ile seramik plakalar üzerinde oluşturulan kaplamalarda araştırmacılar daha yumuşak bir malzeme olan alüminyum ile ara katman uygulayarak daha sonrasında bu katman üzerinde saf bakır kaplama oluşturabilmişlerdir (Donner ve diğer., 2011). Bu şekilde çok katmanlı bir yapının oluşturulması daha fazla zaman harcanmasına, uygulaması kolay olarak görünen soğuk püskürtme işleminin kısmen zorlaştırılmasına ve üretim maliyetleri yüksek olan toz hammaddenin daha fazla kullanımına sebep olmaktadır. Bu sebeple çok katmanlı bir uygulama yerine şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olan çinko içerikli

bakır tozlar kullanılarak tek katmanda seramik plaka üzerinde bakır içerikli kompozit bir kaplama oluşturulması amaçlanmıştır.

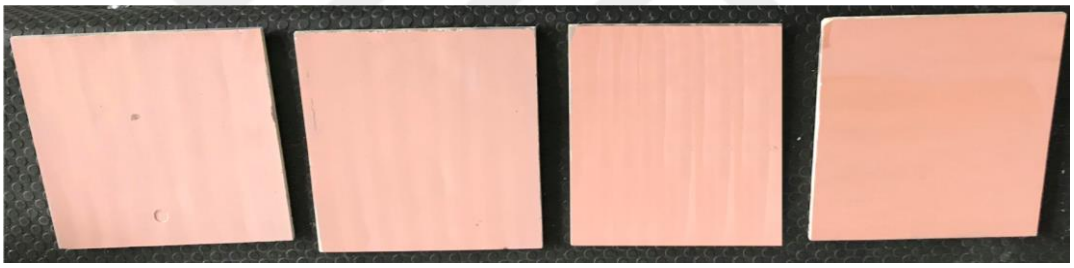
Tüm kaplama işlemleri Tablo 4.4'de verilen sabit parametreler (yaklaşık ~15 mm mesafeden sabit gaz basıncı (7 bar), gaz debisi (0,3 m3/dak), toz besleme debisi (0,4 g/s) ve 600 °C gaz ön ısıtma sıcaklığı ile.) kullanılarak oluşturulmuş olup, farklı ilerleme hızlarınana bağlı olarak iki farklı kaplama ve farklı altlık sıcaklıklarına göre kaplama oluşumu incelenmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de altlık ısıtılmadan oda sıcaklığında sırasıyla 5 cm/sn ve 15 cm/sn ilerleme hızları ile oluşturulan kaplamalar görülmektedir. Şekil 5.4'de 15 cm/sn ilerleme hızı sırasıyla oda sıcaklığı, 100 °C, 200 °C ve 300 °C altlık sıcaklıklarında oluşturulan kaplamalar gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Cu+Zn+Al_2O_3 Tozu ile 5 cm/sn ilerleme hızında oda sıcaklığındaki altlıkda oluşturulan kaplama



Şekil 5.3 $Cu+Zn+Al_2O_3$ Tozu ile 15 cm/sn ilerleme hızında oda sıcaklığındaki altlıkda oluşturulan kaplama



Şekil 5.4 $Cu+Zn+Al_2O_3$ Tozu ile soldan sağa oda sıcaklığı, 100 °C, 200 °C ve 300 °C altlık sıcaklıklarında oluşturulan kaplamalar

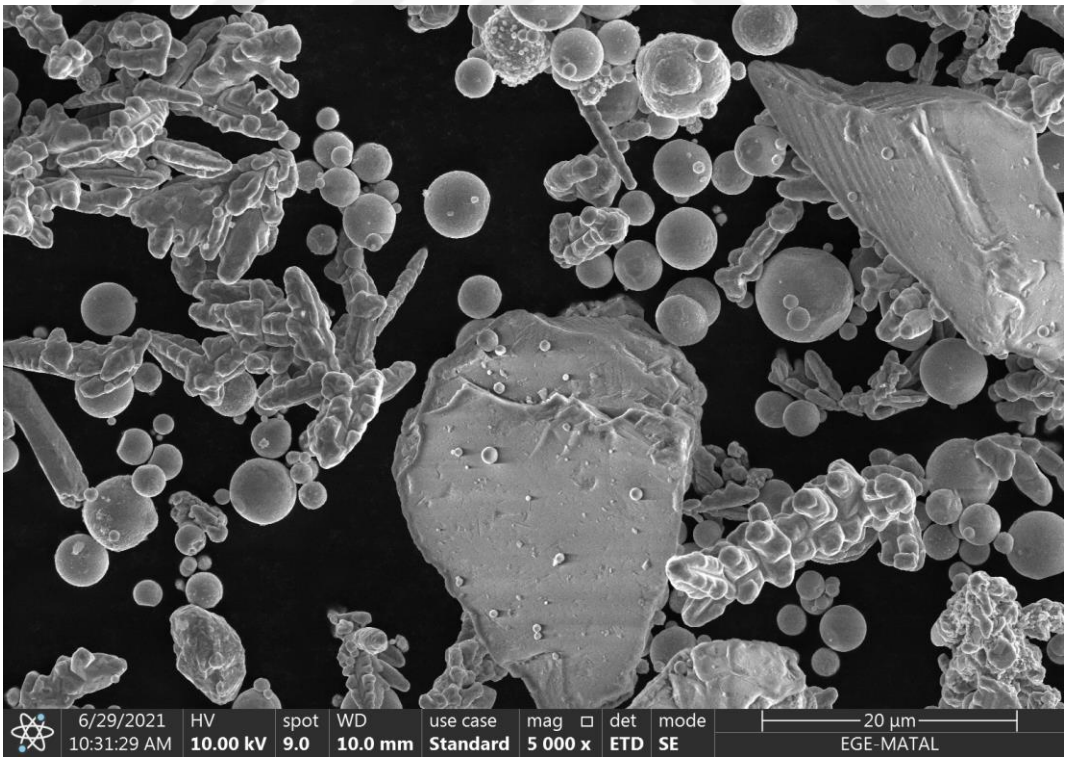
Şekil 5.4'de verilen $Cu+Zn+Al_2O_3$ içerikli toz ile oluşturulan kaplamalarda altlıklar önce 100°C, 200°C ve 300°C ısıtılıp kaplamalar oluşturulmuş, numuneler kaplama oluşturulduktan sonra oda sıcaklığında soğuması beklenmiştir. Bakır, çinko ve Al_2O_3 içerikli toz ile oluşturulan kaplamalarda, saf bakır ile oluşturulan kaplamadaki gibi yüzeyden atma veya altlıkda herhangi bir kırık veya çatlak gözlemlenmemiştir (Toz veya altlık seçimi kaynaklı olarak). Oluşturulan kaplamanın yüzey ile bağlanmasının yeterli düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. İlerleme hızının 5 cm/s olduğu numunede daha kalın bir kaplama tabakası elde edilmiştir. İlerleme hızının 5 cm/s olduğu numunede kaplama tabakasının rengi turuncu tonlarında, ilerleme hızının 15 cm/s olan numuneler gri-turuncu karışımında bir tonda olduğu

gözlemlenmiştir. Bu renk değişimine göre, ilerleme hızının düşük olduğu numunede çinkonun daha fazla biriktiği gözlemlenmiştir.

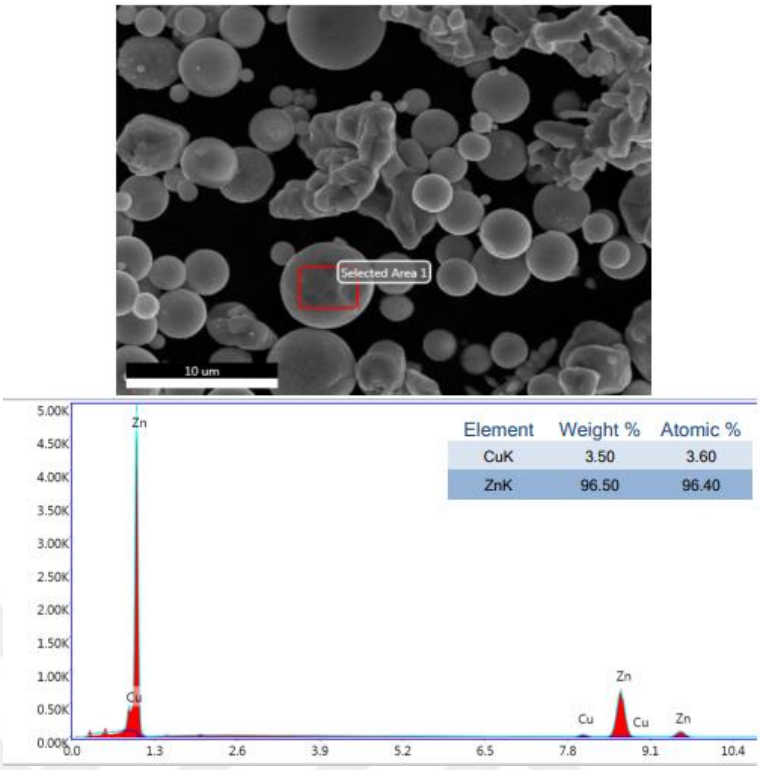
5.2 Optik Mikroskop ve SEM İncelemeleri

Çalışmada kapsamında oluşturulan 5 farklı kaplamanın mikroyapı incelemeleri için optik mikroskop ve SEM kullanılmıştır. Oluşturulan kaplamalar tabancanın ilerleme hızına göre ve altlığın farklı sıcaklıklarda ısıtıldıktan sonra kaplama oluşturulmasına göre iki ayrı grupda olacak şekilde incelenmiştir.

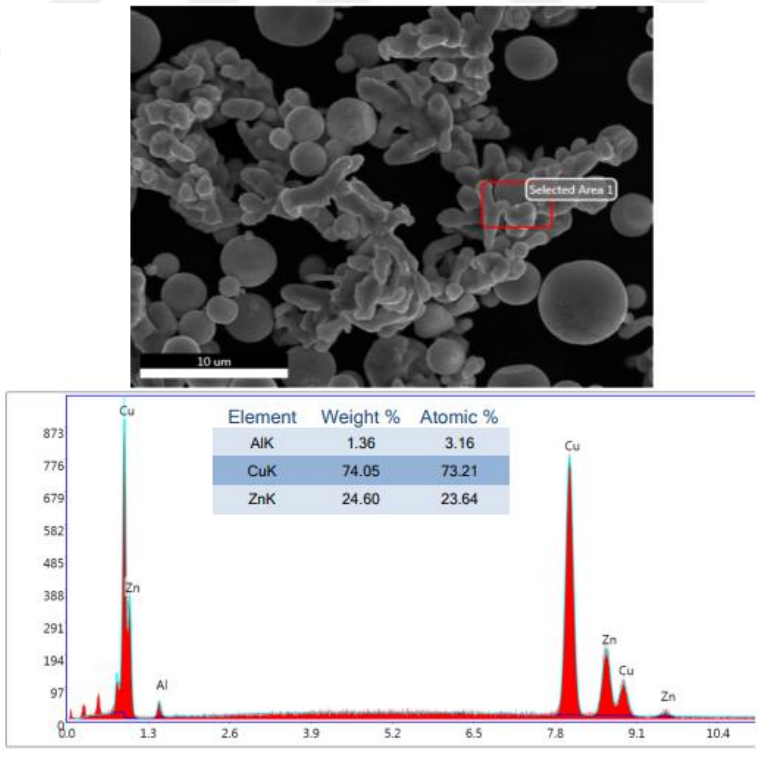
Kaplama işlemlerinde kullanılan kimyasal kompozisyonu Tablo 4.2'de verilen Cu+Zn+Al_2O_3 kaplama tozuna ait SEM görüntüsü Şekil 5.5'de verilmiştir. Toz içerisinde bulunan çinko parçacıkları yaklaşık 2,5-3,5 µm boyutlarında olup küresel bir yapıda iken, bakır parçacıkların farklı boyutlarda karmaşık şekilli bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Toz içerisindeki farklı büyüklüklerdeki Al_2O_3 parçacıkların boyutu yaklaşık 10-20 µm aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de Cu+Zn+Al_2O_3 tozuna ait eds analizi verilmiştir.



Şekil 5.5 Cu+Zn+Al_2O_3 Tozuna ait SEM görüntüsü

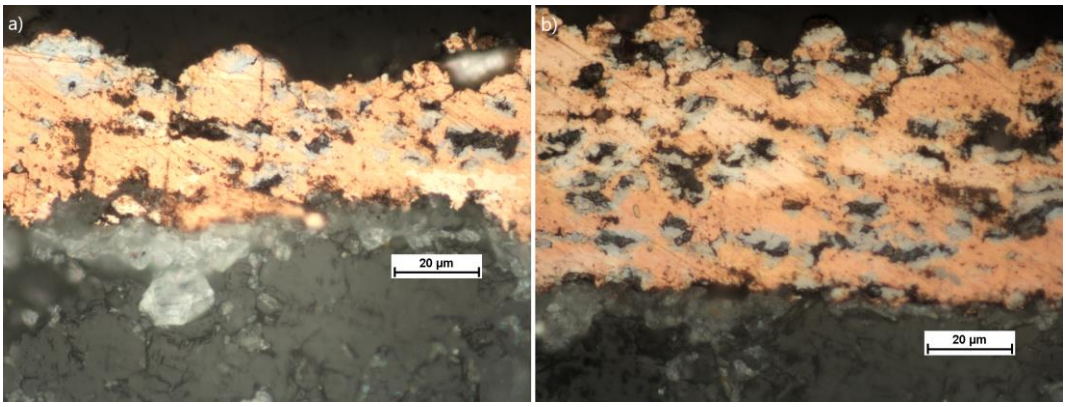


Şekil 5.6 $Cu+Zn+Al_2O_3$ Tozuna ait EDS analizi



Şekil 5.7 $Cu+Zn+Al_2O_3$ Tozuna ait EDS analizi

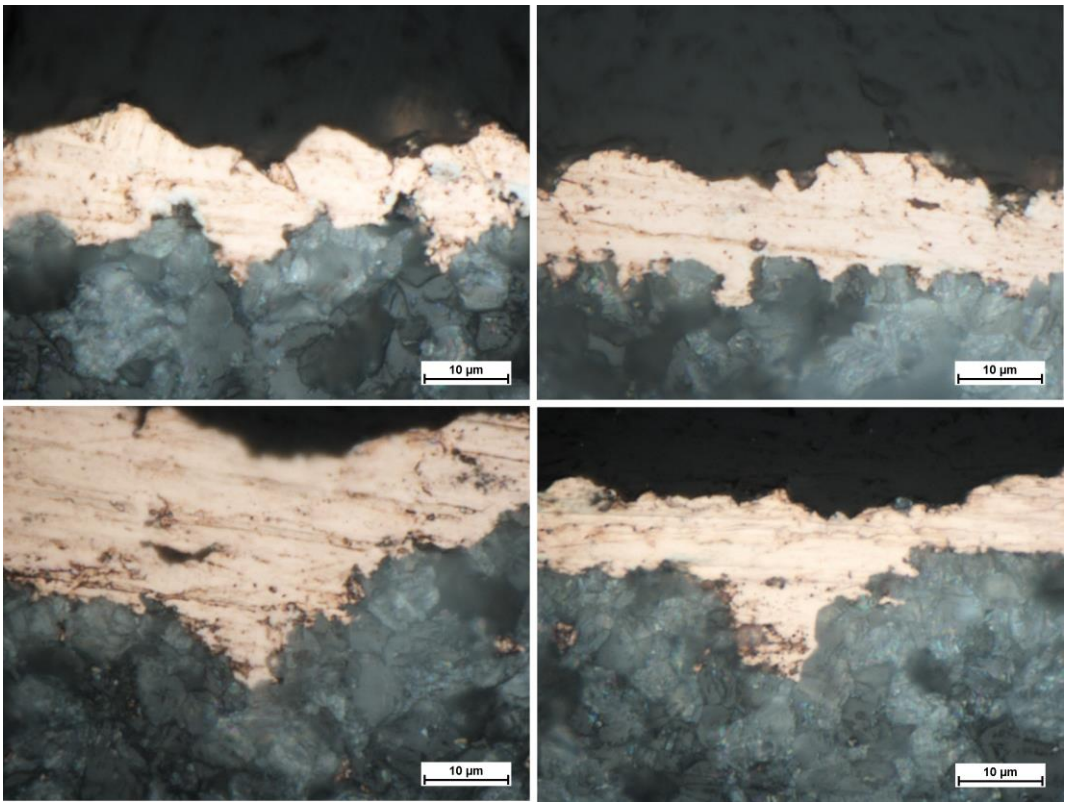
Farklı ilerleme hızı ile oluşturulan tabakalara ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.8'de verilmiştir. Beklendiği üzere ilerleme hızı düştükçe tabaka birikme hızı çok daha yüksek miktarlarda artmaktadır. İlerleme hızı 15cm/s de kaplama tabaka kalınlığı 20-30 µm aralığında iken, 5cm/s de kaplama tabaka kalınlığı 60-80 µm aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Birikme miktarındaki bu yüksek miktardaki artışın en önemli sebebi kaplama işleminin başlangıcında saçılma miktarının daha fazla ilerleyen aşamalarda saçılmanın oluşan daha yumuşak kaplama tabakası nedeniyle daha düşük olmasından ileri gelmektedir. Kaplama işleminde ilk aşamada, tozların birleşerek tabaka oluşturması büyük oranda altlık-kaplama malzemesi çiftine ve altlık malzemesinin sertlik, yüzey pürüzlülüğü gibi özelliklerine bağlıdır. Soğuk püskürtme kaplama işlemlerinde kaplama oluşumu için altlık-kaplama malzemesi çiftinde aranan tek özellik sünekliktir (Malachowska, 2016). Çalışmamızda altlık malzemesi sert bir seramik olan Al_2O_3 olduğundan, tozların bir kısmı başlangıçta bu sert seramik yüzeye çarparak saçılırlar. Altlık malzeme üzerine tabaka oluştukça yeni gelen tozlar daha düşük sertliğe sahip olan bu tabaka üzerine daha fazla birikmektedirler. Çünkü seramik altlık üzerinde oluşan bu yumuşak tabakada geri sekerek sıçrayan partikül miktarı daha düşüktür.



Şekil 5.8 Cu+Zn+Al_2O_3 Tozu ile oluşturulan kaplamalara ait optik mikroskop görüntüleri a) 15 cm/sn ilerleme hızında b) 5 cm/sn ilerleme hızında

Altlıkların farklı sıcaklıklara ısıtılması sonrasında oluşturulan tabakalara ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.9'da verilmiştir. Bu numuneler aynı ilerleme hızı (15 cm/sn) ile elde edildiği için kaplama tabakalarının kalınlığı hepsinde yaklaşık olarak 20-30 µm aralığındadır. Tüm numunelerde kaplama malzemesi ile altlık arasında

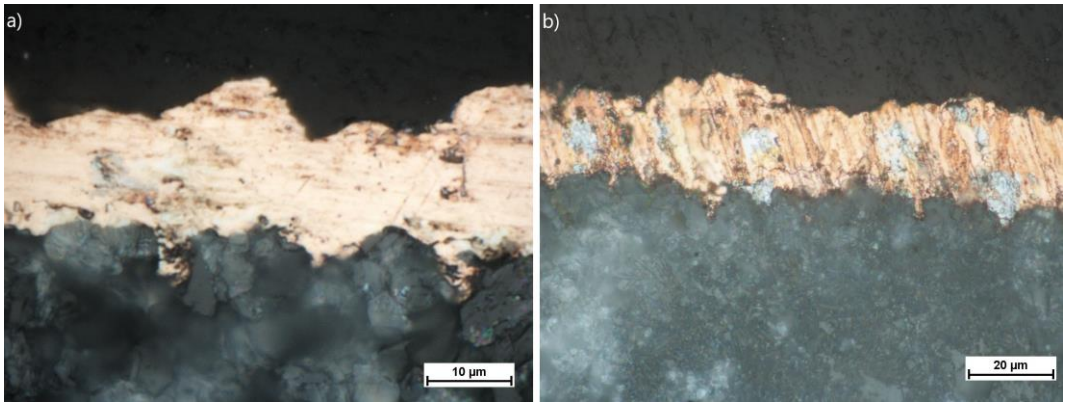
herhangi bir süreksizlik gözlenmemiş olup, oluşturulan kaplamaların seramik yüzeye tutunduğu tespit edilmiştir. Saf bakır tozu ile oluşturulan kaplamanın aksine bakır-çinko içerikli toz ile oluşturulan kaplamalarda parçacıkların yeterli düzeyde deformasyona uğrayarak altlık malzemesi yüzeyindeki boşlukları doldurup mekanik kilitlenmeyi oluşturduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin tabaka-altlık arayüzeylerinde meydana gelen mekanik kiletlenmeler 5.9'da açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.9 Altlık kaplama arayüzeyinde mekanik kilitlenmenin oluşumu

Altlık sıcaklığındaki değişime bağlı olarak kaplama içerisindeki çinko ve Al_2O_3 miktarlarında değişiklik Şekil 5.10'da gösterilmiştir, sıcaklığın artışı ile birlikte kaplama yapısındaki çinkoların yoğun olduğu bölgelerde artış gözlemlenmiştir. Bu artış, artan altlık sıcaklığının etkisi ile parçacıkların yüzeyden daha az sekmesi ve daha kolay deforme olarak bakır ile birlikte kaplama oluşturabildiği şeklinde yorumlanabilir. Altlık sıcaklığının artması ile birlikte parçacığın yüzeye çarpma sıcaklığında oluşacak artış, çinko parçacıklarının kritik hızının düşmesine neden

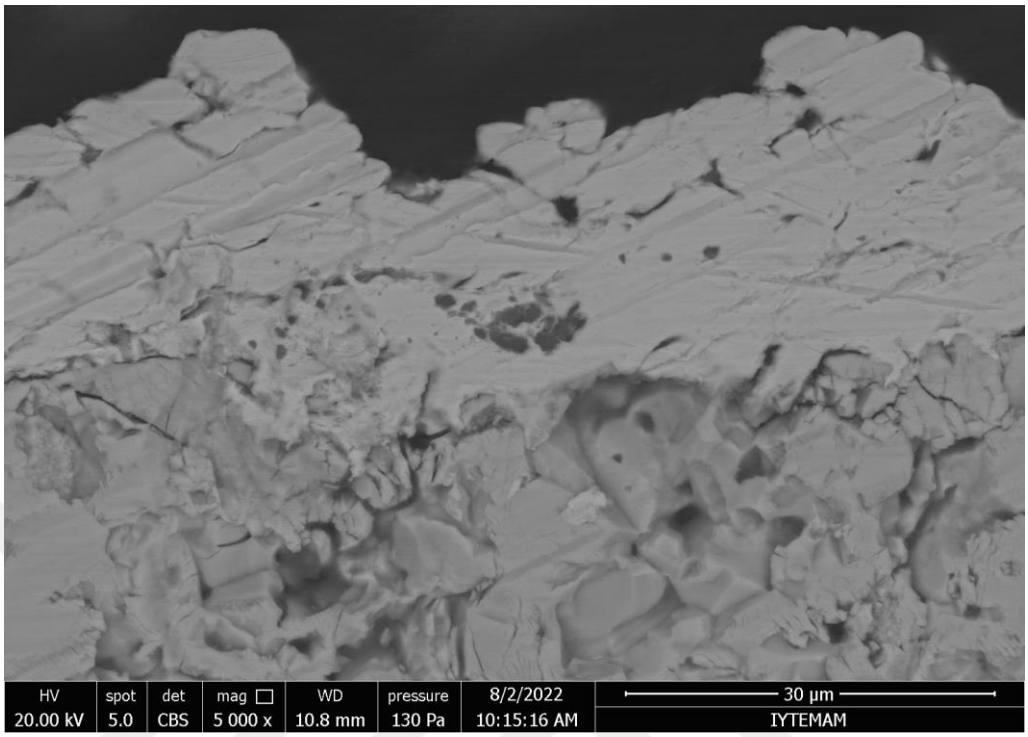
olmuş ve 300 °C altlık sıcaklığında oluşturulan numunede (Şekil 5.10 b) çinkonun daha fazla birikmesini sağlamıştır.



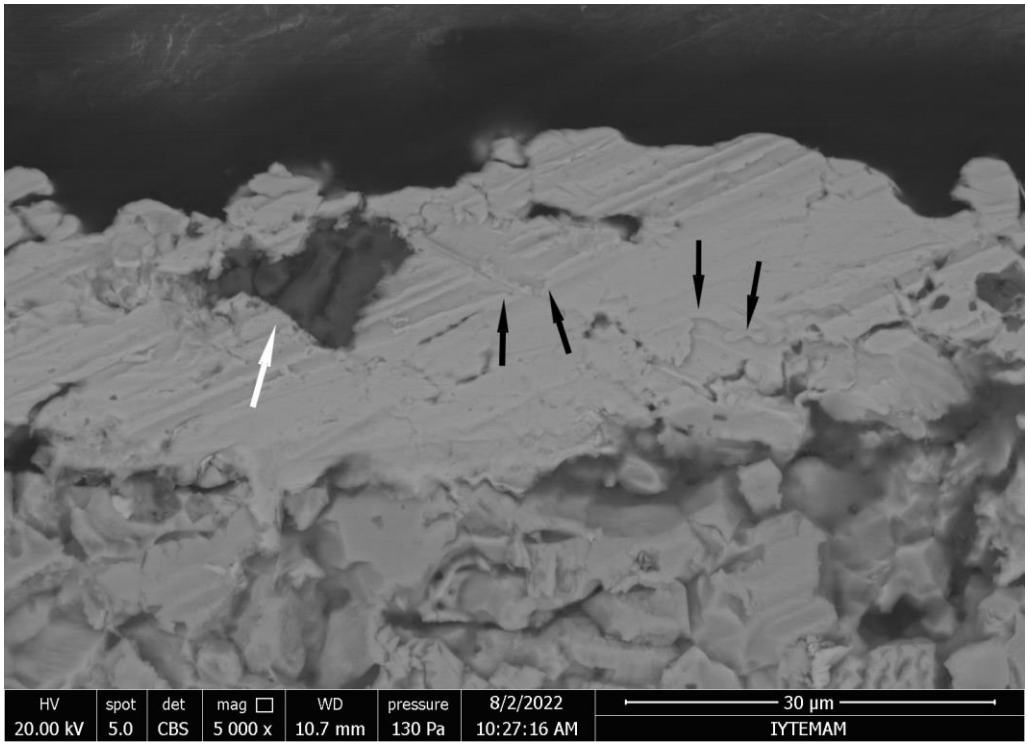
Şekil 5.10 Altlık sıcaklığına bağlı olarak kaplama yapısındaki çinko miktarının artışı a) altlık oda sıcaklığında oluşturulan kaplama b) 300 °C altlık sıcaklığında oluşturulan kaplama

İlerleme hızının düşük olduğu numunelerde ayrıca Al_2O_3 parçacıklarının da çinko parçacıkları gibi daha yoğun bir şekilde bulunduğu SEM incelemelerinde tespit edilmiştir. İlerleme hızının yüksek olduğu numunede ise bakır yoğunluğunun arttığı, Çinko ve Al_2O_3 yoğunluğunun ise düştüğü tespit edilmiştir. Bu durum yüksek ilerleme hızlarına sahip numunede (daha ince kaplama tabakası oluşan numune) püskürtme esnasında sert parçacıkların (Çinko ve Al_2O_3) yüksek sertliğe sahip seramik altlığa çarparak saçılması ile açıklanabilir. Düşük ilerleme hızına sahip (daha kalın tabaka oluşan) numunede sert altlığa çarparak saçılan partiküller arkadan gelen soğuk püskürtme jeti içerisindeki diğer partiküller tarafından durdurularak tabaka içerisinde tutulmaktadır. Püskürtme işlemi süresince arkadan gelerek çarpan bu partiküller hem geri seken parçacıkların kaplama içerisinde tutulmasına hem de deformasyonun daha fazla olmasına neden olmuştur (kalın tabakalı numunelerde partiküllerin yassılaşarak uzaması bunun bir göstergesidir). Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de yüksek ilerleme hızı ile oluşturulan kaplamaya ait SEM görüntüleri verilmiştir (Siyah oklar tane sınırlarını göstermektedir, beyaz ok ile kaplama esnasında çarpmanın etkisiyle kırılan Al_2O_3 parçacığı gösterilmiştir.). Kaplama içerisinde daha açık tonda görünen yapı bakırın yoğun olduğu bölgeler olup, açık gri tonrada kısımlar çinkonun yoğun olduğu bölgeleri göstermektedir. Kaplama içerisinde Al_2O_3 parçacıklar siyah renkle görünmektedir. Kaplama arayüzeyinde

seramik altlık ile oluşan mekanik kilitlenmeler SEM görüntülerinde açıkça görülmektedir.

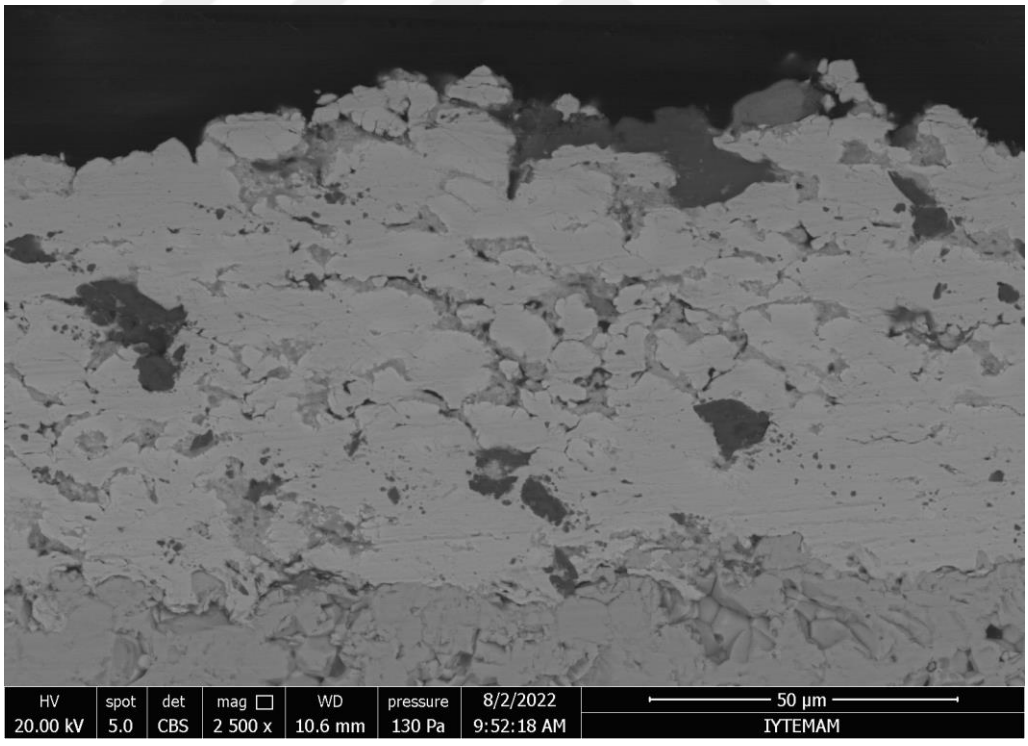


Şekil 5.11 15 cm/sn ilerleme hızında oluşturulan kaplamaya ait SEM görüntüsü

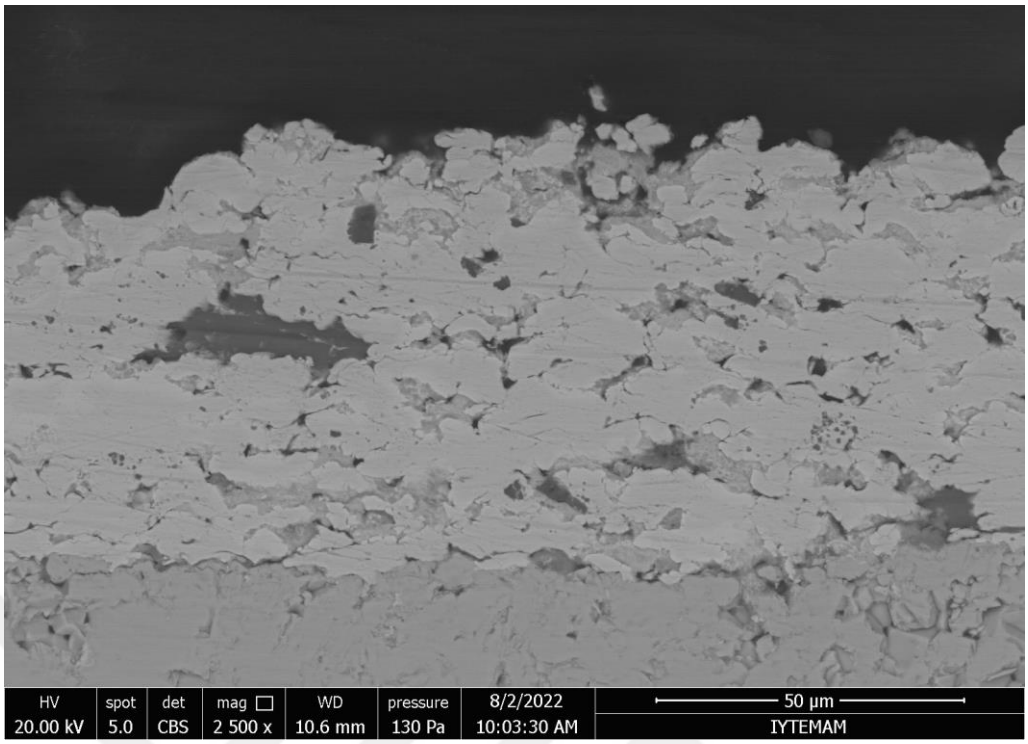


Şekil 5.12 15 cm/sn ilerleme hızında oluşturulan kaplamaya ait SEM görüntüsü

İlerleme hızının yüksek olduğu numunede çinko ve Al_2O_3 parçacıklarının daha az bulunmasından dolayı daha yoğun kaplama tabakası elde edilmiştir. Her iki ilerleme hızında oluşturulan kaplamada da porozite oluşumu bakır ve çinko parçacıklarının temas noktalarında gözlemlenmiştir. Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de de görüldüğü üzere, düşük ilerleme hızı ile oluşturulan tabakada çinko ve Al_2O_3 parçacıklarının artması ile birlikte porozitenin arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi çinko parçacıkların bakır ile aynı püskürtme parametrelerinde daha az deformasyona uğradığı, bu sebepden dolayı çinko-bakır tane sınırlarında porozite oluşumuna sebep olduğu olarak yorumlanabilir. Benzer durum Al_2O_3 parçacıklarınında yüksek sertliğe sahip olmasından ve deformasyona uğramamasından dolayı Al_2O_3 temas bölgelerinde de görülmektedir. Bakırın yoğun olduğu bölgelerde ise durum farklılaşmaktadır. Kaplama işleminde kullanılan işlem parametreleri ile bakır parçacıkları yüksek oranda deformasyona uğradığı, çarptığı yüzeylerin şeklini aldığı ve boşlukları doldurarak yoğun kaplama tabakası oluşturduğu gözlemlenmiştir.

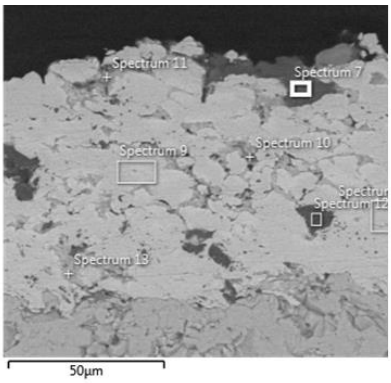


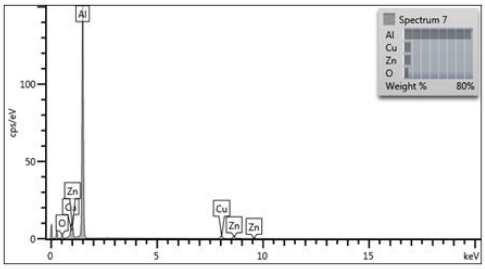
Şekil 5.13 5 cm/sn ilerleme hızında oluşturulan kaplamaya ait SEM görüntüsü



Şekil 5.14 5 cm/sn ilerleme hızında oluşturulan kaplamaya ait SEM görüntüsü

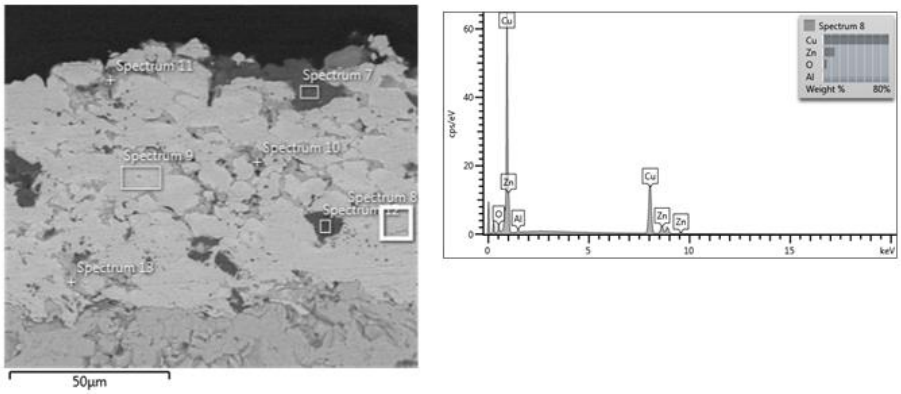
Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de eds incelemelerine ait sonuçlar gösterilmiştir. Bakırın yoğun olarak biriktiği bölgelerde ağırlıkça %80 e varan bakır oranı, çinkonun yoğun olarak biriktiği bölgelerde ise %63e varan çinko oranı tespit edilmiştir.





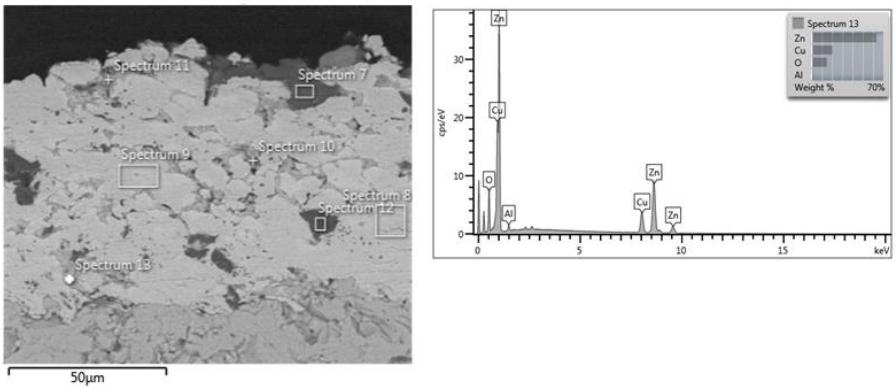
Element	Wt%	Atomic %
O	5.58	10.00
Al	77.82	82.63
Cu	8.32	3.75
Zn	8.27	3.63
Total:	100.00	100.00

Şekil 5.15 Kaplamaya ait eds analizi sonucu (Al_2O_3 bulunan bölge)



Element	Wt%	Atomic %
O	4.68	16.10
Al	1.36	2.77
Cu	79.88	69.25
Zn	14.09	11.87
Total:	100.00	100.00

Şekil 5.16 Kaplamaya ait eds analizi sonucu (Cu bulunan bölge)



Element	Wt%	Atomic %
O	14.79	40.73
Al	1.51	2.46
Cu	20.33	14.10
Zn	63.37	42.71
Total:	100.00	100.00

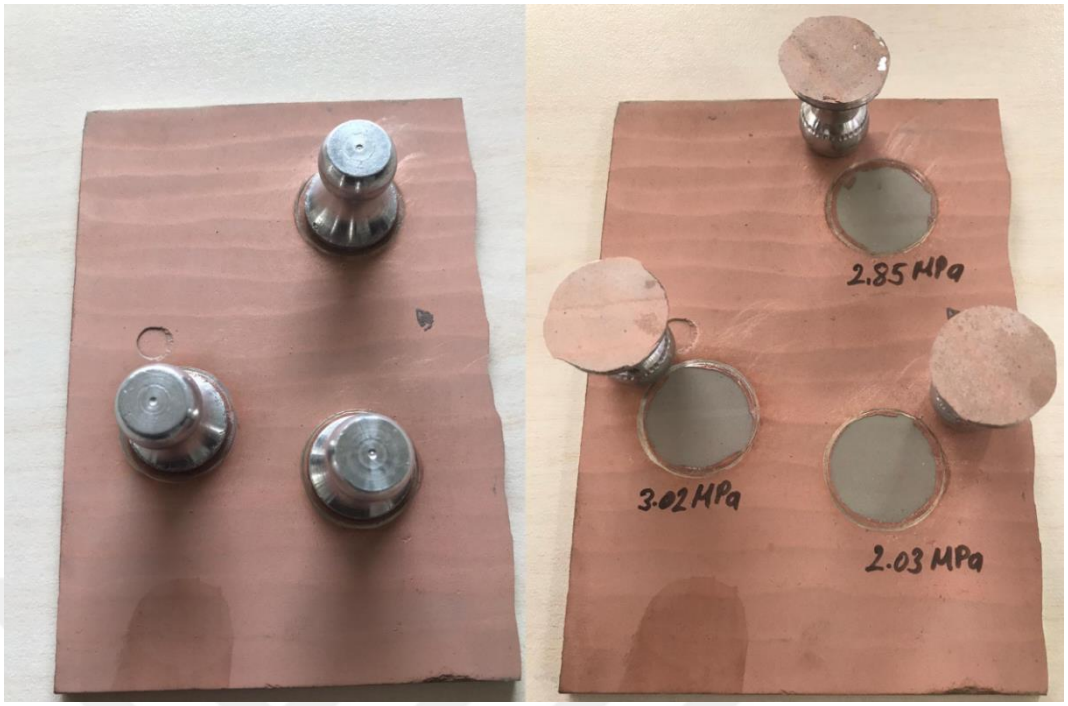
Şekil 5.17 Kaplamaya ait eds analizi sonucu (Zn bulunan bölge)

5.3 Bağlanma Mukavemeti Ölçüm Sonuçları

Çalışmada kapsamında oluşturulan 5 farklı kaplamanında bağlanma mukavemeti pull-off çekme test cihazı ile ölçülmüştür. Altlık sıcaklığı 200 °C olan numunede 2 diğer 4 numunede 3 tekrar olacak şekilde ISO 4624 standartlarına göre ölçümler yapılmıştır. Ölçüm için hazırlanan numuneler ve kopma yüzeyleri Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



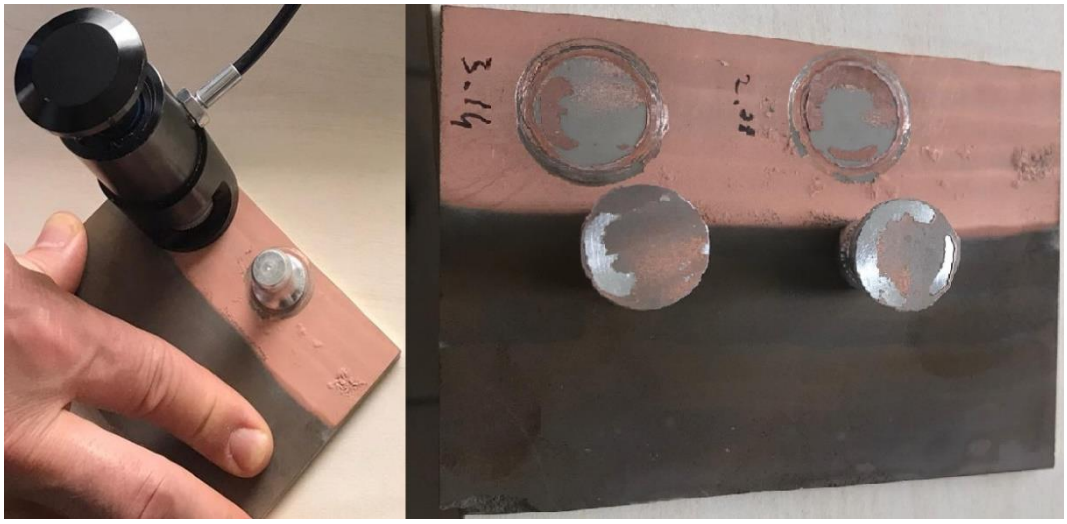
Şekil 5.18 5 cm/sn ilerleme hızında oluşturulan kaplamanın bağlanma mukavemeti ölçümü sonrası kopma yüzeyleri



Şekil 5.19 15 cm/sn ilerleme hızında altlık oda sıcaklığında oluşturulan kaplamanın bağlanma mukavemeti ölçümü sonrası kopma yüzeyleri



Şekil 5.20 15 cm/sn ilerleme hızında 100 °C altlık sıcaklığında oluşturulan kaplamanın bağlanma mukavemeti ölçümü sonrası kopma yüzeyleri



Şekil 5.21 15 cm/sn ilerleme hızında 200 °C altlık sıcaklığında oluşturulan kaplamanın bağlanma mukavemeti ölçümü sonrası kopma yüzeyleri



Şekil 5.22 15 cm/sn ilerleme hızında 300 °C altlık sıcaklığında oluşturulan kaplamanın bağlanma mukavemeti ölçümü sonrası kopma yüzeyleri

Her numune için bağlanma mukavemeti testinin uygulanması sonrasında elde edilen sonuçlar numunelere göre Tablo 5.1'de sınıflandırılmıştır. Numuneler altlığın kaplama öncesi ısıtıldığı sıcaklık değerine göre sırasıyla RT (oda sıcaklığı), 100 °C,200 °C, 300 °C olarak, tabanca ilerleme hızının 5 cm/s de olduğu numunede ise

RT5 olarak isimlendirilmiştir. Kopmanın seramik yüzey ile kaplama yüzeyi arasında gerçekleşme oranı % A/B (A seramik yüzey B oluşturulan kaplamanın yüzeyi kabul edilmiştir.), yapıştırıcı yüzey ile test çubuklarının yüzeyi arasında gerçekleşme oranı % Y olarak verilmiştir.

Tablo 5.1 Numunelere göre çekme testi sonuçları

Numune	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ortalama
RT5	2,94 MPa (%100 A/B)	1,94 MPa (%97 A/B %3 Y)	2,66 Mpa (%95 A/B %5 Y)	2,51 MPa
RT15	3,02 MPa (%100 A/B)	2,03 MPa (%100 A/B)	2,85 Mpa (%98 A/B %2 Y)	2,63 MPa
T100 °C	2,83 MPa (%70 A/B %30 Y)	3,13 MPa (%90 A/B %10 Y)	3,16 Mpa (%90 A/B %10 Y)	3,04 MPa
T200 °C	3,14 MPa (%80 A/B %20 Y)	2,78 MPa (%50 A/B %50 Y)	-	2,96 MPa
T300 °C	3,90 MPa (%55 A/B %45 Y)	2,37 MPa (%5 A/B %95 Y)	2,74 Mpa (%10 A/B %90 Y)	3,34 MPa

Tablo 5.1'de her bir numune için verilen bağlanma mukavemeti değerleri incelendiğinde, oda sıcaklığındaki altlıklar için oluşturulan kaplamalarda kopmaların altlık-kaplama ara yüzeyinde gerçekleştiği yani elde edilebilecek maksimum bağlanma mukavemeti değerlerinin belirlendiği görülmektedir. 200 °C ve 300 °C altlık sıcaklığında oluşturulan kaplamaların bağlanma mukavemeti ölçümlerinde ise yüksek oranda yapıştırıcı yüzeyinden kopmalar gerçekleşmiştir. Altlık sıcaklığının artışına bağlı olarak kopmanın yapıştırıcı-test çubuğu arayüzeyinden gerçekleşme oranının arttığı görülmektedir, buna bağlı olarak yapıştırıcı yüzeyinden gerçekleşen kopmalarda bağlanma mukavemetinin ölçülenden daha yüksek olduğu yorumu yapılabilir.

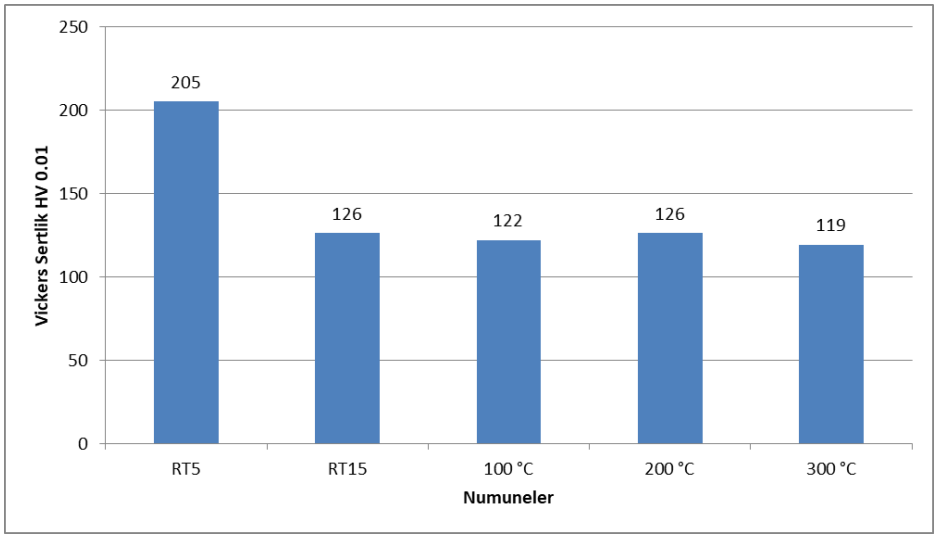
Ölçümleri iki ayrı grupda inceleyecek olursak tabanca ilerleme hızına göre yapılan kaplamalarda, tabanca ilerleme hızının artışı ile birlikte bağlanma mukavemetin bir miktar yükselmiştir. İlerleme hızının 5 cm/s olan numunede ortalama bağlanma mukavemeti 2,51 Mpa ölçülürken, 15 cm/s ilerleme hızında bağlanma mukavemeti 2,63 Mpa olarak ölçülmüştür. Altlık ısıtma sıcaklığına bağlı olarak bakıldığında ise en düşük ortalama değer 2,63 MPa ile oda sıcaklığında yani ısıtılmadan kaplamanın oluşturulduğu numunede elde edilmiş olup, en yüksek ortalama değer 3,34 MPa ile 300 °C'ye ısıtılıp oluşturulan kaplamada elde edilmiştir.

Drehmann ve diğer. (2018) altlık sıcaklığının artışının yeterli miktarda atomik hareketlilik sağladığını, ayrıca ince taneli mikro yapının yeniden kristalleşerek seramik alt tabakaya bitişik tanelerin yeniden sıralanmasına yol açıp bağlanma mukavemetini arttırdığını varsaymıştır. Bir diğer çalışmada, altlık sıcaklığının artmasıyla birlikte artan bağlanma mukavemeti, yüzeyde bulunan suyun buharlaşmasına ve $AL(OH)_3$ gibi maddelerin yüzeyden ayrılmasına ve doğrudan seramik metal temasının oluşmasına bağlanmıştır. Artan bir altlık sıcaklığı, difüzyonu ve kimyasal bağlanmayı da artırabilileceği varsayılmıştır (Ernst ve diğer., 2013). Al_2O_3 altlıklar üzerine soğuk püskürtme metalik kaplamaların altında yatan mekanizmalar hala net olmasa da, bu etkilerin bir sonucu olarak bağlanma mukavemetinin arttığı varsayılabilir.

5.4 Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları

Vickers mikrosertlik ölçümleri her bir numune için beş noktadan yapılmış olup artan altlık sıcaklığına göre sırasıyla elde edilen tabakanın ortalama sertlik değerleri; 126±7 HV 0.01, 122±11 HV 0.01, 126±5 HV 0.01, 119±9 HV 0.01 olup, tabanca ilerleme hızının 5 cm/s olduğu RT5 isimli numunede ise 205±7 HV 0.01 olarak ölçülmüştür. Bu değerler Şekil 5.23'de verilmiştir. Kaplama öncesi altlığın ısıtılmasına bağlı olarak kaplamalardaki en düşük ortalama sertlik değeri 300 °C'deki altlık sıcaklığında oluşturulan kaplamadan ölçülmüştür. Bu düşüş altlık sıcaklığının artmasıyla yüzeye çarpan parçacıkların daha fazla deformasyona uğrayabilmesi için ortam oluşmuş olmasına dayandırılabilir. Ernst ve diğer. (2013) çok katmanlı olarak yaptığı bir çalışmada da benzer sonuçlar elde etmiş ve kaplama öncesi altlığın ısıtılmasına bağlı olarak sertlikte düşüş gözlemlemiştir, fakat elde ettiği sertlik değerinin hala döküm bakır malzemeden oldukça yüksek olduğunu belirtmiştir.

İlerleme hızına bağlı olarak oluşturulan RT15 ve RT5 isimli numunelerde tabakaların ortalama sertlik değerleri sırasıyla 126±7 HV 0.01 ve 205±9 HV 0.01 olarak ölçülmüştür. İlerleme hızının düşmesiyle birlikte altlıkdan geri seken partiküller ve tabancadan gelen yeni partiküller hem deformasyonun daha fazla olmasına neden olmuş hemde çarpma sonucunda bir miktar deformasyon sertleşmesi de meydana gelmiştir. Bu nedenle en yüksek tabaka sertliği düşük ilerleme hızında kalın tabakanın oluştuğu RT5 isimli numunede 205HV olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.23 Oluşturulan kaplamaların Vickers sertlik değerleri

5.5 Elektrik İletkenliği Ölçüm Sonuçları

Çalışmada kapsamında oluşturulan 5 farklı kaplamadan her birinden yapılan direnç ölçümleri sonrasında kaplamaların özdirençleri hesaplanmış çıkan sonuç 20°C'deki bakırın IACS (The International Annealed Copper Standard) referans özdirencine göre karşılaştırma yapılmıştır.

Kaplamaların dört nokta direnç ölçüm standında ölçülen dirençleri denklem 5.1'de yerine konularak özdirençleri hesaplanmıştır. Denklem 5.1'de ρ = özdirenci, R = direnç (Ω), t = kaplama yüzey kalınlığını (cm), r = yüzeye dokunan probların genişliği (0,0041 cm), l = problar arası mesafeyi (0,1656 cm) ifade etmektedir.

$$\rho = R * \frac{t*r}{l} \tag{5.1}$$

Yapılan ölçümlerde, tüm kaplamaların direnç değeri yaklaşık 1.5 Ω olarak ölçülmüştür. Denklem 5.1'e göre 20-30 µm kaplama kalınlığındaki numunelerde kaplamaların özdirenç değerleri hesaplandığında, 20°C'deki bakırın özdirenç değerine göre ($1{,}72 \times 10^{-8}$ Ω metre) 15 kat daha fazla yaklaşık 25×10^{-8} Ω metre olarak bulunmuştur. 60-80 µm kaplama kalınlığındaki numunelerde bu değer doğrudan kaplama kalınlığına bağlı olarak 3 kat daha artarak 75×10^{-8} Ω metre olarak bulunmuştur.

Ernst ve diğer. (2013) çok katmanlı bir yapıda yüksek basınçlı soğuk püskürtme ile yaptığı kaplamalarda %77 IACS iletkenlik değerine ulaşmış, kaplama sonrası yapılan ısıl işlemlerle bu değeri %90 IACS olarak ölçmüştür. Klassen ve diğer. (2010) yaptıkları bir çalışmada, püskertme işleminde en önemli işlem paremetrelerinden biri olan basıncın arttırılması ve kaplama sonrası ısıl işlem ile iletkenlik değerinin arttığını belirtmiştir ve oluşturulan kaplamalarda %95 IACS iletkenlik değeri ölçmüştür. Literatürdeki yüksek basıçlı soğuk püskürtme ile yapılan bu çalışmalarda çok katmanlı yapı ile doğrudan bakırın kaplanabilmiş olması ve yüksek basınçlı sistemler ile daha yoğun kaplamaların elde edilebilmesi nedeni ile daha yüksek iletkenlik değerleri elde edilebilmiştir.

BÖLÜM ALTI
SONUÇLAR

Bu çalışmada Tablo 4.4'de verilen sabit parametreler (yaklaşık ~15 mm mesafeden sabit gaz basıncı (7 bar), gaz debisi (0,3 m3/dak), toz besleme debisi (0,4 g/s) ve 600 °C gaz ön ısıtma sıcaklığı ile.) kullanılarak toplamda 2 farklı kaplama tozu ile alümina seramik altlık üzerinde soğuk püskürtme yöntemiyle 6 farklı kaplama oluşturulmuştur.

Seramik malzemelerin yüzeylerinin metalizasyonunda bakır ve alümina karışımından oluşan bir toz ile seramik yüzey üzerinde doğrudan bir kaplama oluşturulmaya çalışılmış, yapılan kaplamada seramik altlık üzerinde çatlak meydana gelmiştir. Oluşturulan tabaka içerisinde sadece bakır olması ve bakırın da yüksek termal genleşme katsayısı nedeni ile kaplama işlemlerinden sonra altlık malzeme yüzeyindeki bakır tabaka yüksek oranda büzülmüş ve esnemeyen seramik altlıkda, büzülme sonucunda meydana gelen yüksek gerilmeler nedeniyle çatlak oluşmuştur. Bu toz ile oluşturulan kaplamanın seramik yüzeye tutunmasının zayıf olduğu, kaplamanın yüzeyden attığı gözlemlenmiştir.

Bakır alümina karışımı toz ile oluşturulan kaplamanın zayıf olması ve seramik altlığın çatlamasına neden olması sonrasında, termal genleşme katsayısı yüksek olan bakır ile mukavemeti düşük şekil değiştirme katsayısı yüksek olan çinko toz ve alümina karışımından oluşan kompozit bir toz karışımı kullanılarak 5 farklı kaplama oluşturulmuştur. Bakır çinko ve alümina içerikli bu toz ile oluşturulan kompozit kaplamada seramik altlıkda herhangi bir hasar veya oluşturulan kaplamanın yüzeye tutunmaması gibi sonuçlar gözlemlenmemiştir. Seramik malzemelerin yüzeylerinin kaplanmasında saf bakırın kullanılması durumunda meydana gelen yüksek gerilmeler nedeniyle seramik altlığın kırılması veya çatlaması problemi bu şekilde elemine edilerek başarılı kaplamalar oluşturulabilmiştir.

Bakır çinko ve alümina içerikli toz ile oluşturulan 5 farklı kaplama 2 ayrı parametrede değişiklikler yapılarak oluşturulmuş olup, bu parametrelerin kaplamanın yapısına etkileri incelenmiştir. Tabanca ilerleme hızına bağlı olarak (15cm/s–5 cm/s)

ve altlık sıcaklığının değişimine bağlı olarak (RT, 100 °C, 200 °C, 300 °C) oluşturulan kaplamalardan elde edilen sonuçlara bakıldığında;

- Tüm numunelerde kaplama malzemesi ile altlık malzeme yüzeyi arasında herhangi bir süreksizlik oluşmamış ve oluşturulan kaplamada püskürtülen tozların seramik yüzey boyunca deformasyona uğrayarak yüzeyin şeklini aldığı, yüzeydeki boşlukları doldurarak mekanik kilitlenmeyi oluşturduğu gözlemlenmiştir.
- Tüm numunelerde yüksek hız ve basınç ile oluşturulan kaplamalar sayesinde, yüksek oranda deformasyon oluşmuş ve parçacıklarda oluşan bu deformasyon gözenek miktarının düşük olmasını sağlamıştır. Özellikle ilerleme hızının yüksek olduğu numunelerde kaplama tabakasının düşük miktarda çinko ve Al_2O_3 içermesi sebebiyle porozite miktarında düşüş gözlemlenmiştir.
- Elde edilen numuneler metalografik incelemeye tabi tutulduğunda tüm numunelerde daha sert olan çinkonun sert seramik yüzeyden geri sıçradığı ve özellikle tabakanın iç kısımlarından itibaren yüzeye doğru yoğunlaşarak biriktiği tespit edilmiştir. Benzer davranış sert alümina partiküllerin tabaka içerisinde birikmesinde de tespit edilmiştir.
- İlerleme hızı düştükçe tabaka birikme hızı yüksek oranlarda artmış ve daha kalın tabakalar elde edilmiştir.
- İlerleme hızının artması ile birlikte elde edilen daha ince tabakalı kaplamanın bağlanma mukavemeti daha yüksek ölçülmüştür.
- Kaplama kalınlığının artmasına (ilerleme hızının azalmasına) bağlı olarak tabaka içerisinde çinko ve Al_2O_3 miktarı da artmıştır, aynı şekilde altlık sıcaklığının artmasınada bağlı olarak çinko ve Al_2O_3 miktarın da artış gözlemlenmiştir.
- Toz partiküllerin yüksek hızla çarpması sonucunda deformasyon sertleşmesi meydana gelmiştir, bu nedenle de en yüksek tabaka sertliği değerleri en kalın tabakada (205HV) oluşmuştur.
- Kaplama öncesi altlığın ısıtılmasına bağlı olarak kaplamaların sertlik değerinde düşüş meydana gelmiştir. Altlığın ısıtılmadığı RT15

numunesinde sertlik 126±7 HV 0.01, T300°C numunesinde 119±9 HV 0.01 olarak ölçülmüştür.

- Kaplama öncesi altlığın ısıtılması bağlanma mukavemeti açısından RT15 ile T300°C numuneleri arasında yaklaşık %27 oranında bir artış ile etki ettiği gözlemlenmiştir.
- Oluşturulan kaplamaların özdirençleri hesaplandında artan kaplama kalınlığı ile özdirencin arttığı, artan altlık sıcaklığı ile özdirençde herhangi bir değişikliğin oluşmadığı gözlemlenmiştir. Kaplamalardan ölçülen direnç değerine göre özdirenç hesaplandığında, 20°C'deki bakırın özdirenç değerine göre 15 kat daha fazla olarak bulunmuştur.

KAYNAKLAR

Advanced coatings, thermal spraying techniques. (14 Mayıs 2021), http://www.advanced-coating.com

Akçay, A. (2018). *Termal püskürtme teknikleri ile magnezyum üzerine TiSZ takviyeli HA kaplamalarının üretimi ve karekterizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Altuncu, E. ve Üstel, F (2010). Soğuk sprey (cold spray) teknolojisi ve uygulama alanları. *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odas, 157*, 29-40.

Assadi, H., Gartner, F., Stoltenhoff, T. ve Kreye, H. (2003). Bonding mechanism in cold gas spraying. *Acta Materialia, 51*, 4379-4394.

Aytaç, İ. (2014). *Termal püskürtme yöntemi ile üretilmiş kompozit esaslı kaplamalar ve karakterizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi.

Bal, E. (2019). *Eriyik cama (CMAS) dayanıklı uçak motoru kaplamalarının ğlazma ğüskürtme yöntemi ile üretilmesi* [Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Cavaliere, P. (2018). *Cold spray coatings recent trends and future perspectives* (1. Baskı). Lecce, Italy: Springer

Champagne, V. (2007). *The cold spray materials deposition process fundamentals and applications* (2. Baskı). Cambridge: Woodhead Publishing

Chmielewski, T., Hudycz, M., Krajewski, A., Salacinski T., Skowronska B. ve Swiercz R. (2019). Structure Investihation of Titanium Metallization Coating Deposited onto AlN Ceramics Subsrate by Means of Friction Surfacing Process., *Coatings*, 9 (12).

Çetin, Ö. (2015). *Altlık malzeme sertlik ve yüzey özelliklerinin soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamaların özelliklerine etkisi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Demirer Kahraman, A. (2019). *SDGP yöntemi ile üretilen kaplamaların mekanik özelliklerinin simülasyon destekli incelenmesi* [Doktora Tezi]. Celal Bayar Üniversitesi.

Donner, K.-R., Gartner, F. ve Klassen, T. (2011). Metallization of Thin Al_2O_3 Layers in Power Electronics Using Cold Gas Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology, 1-2(20),* 299-306.

Dorfman, M.R. ve Sharma, A. (2013). Challenges and strategies for growth of thermal spray markets: the six-pillar plan. *Journal of Thermal Spray Technology, 22(5),* 559-563.

Dorfman, M.R. (2018). Thermal spray coatings. *Handbook of environmental degradation of materials* (3. Baskı) içinde (469-488). Amsterdam: Elsevier

Drehmann, R., Grund, T., Lampke, T., Wielage, B., Manygoats, K., Schucknecht, T., vd. (2013). Splat Formation and Adhesion Mechanisms of Cold Gas-Sprayed Al Coatings on Al_2O_3 Substrates. *Journal of Thermal Spray Technology, 23(1-2),* 68-75.

Drehmann, R., Grund, T., Lampke, T., Wielage, B., Wüstefeld, C., Motylenko, M., vd. (2018). Essential Factors Influencing the Bond Strength of Cold-Sprayed Aluminum Coatings on Ceramic Substrates. *Journal of Thermal Spray Technology, 27,* 446-455.

Dymet Corporation. 30 Ekim 2021, http://en.dymet.net/coating-technology.html

Dykhuizen, R. ve Smith, M. 1998. Gas dynamic principles of cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology, 7(2),* 205-212.

Ernst, K.R., Braeutigam, J., Gaertner, F. ve Klassen, T. (2013). Effect of Substrate Temperature on Cold-Gas-Sprayed Coatings on Ceramic Substrates. *Journal of Thermal Spray Technology, 22,* 422-432.

Espargallas, N. (2015). *Future development of thermal spray coatings types, designs, manufacture and applications* (1. Baskı). Amsterdam: Elsevier

Fauchais, P., Heberlein, J. ve Bouslos, M. (2014). *Thermal spray fundamentals from powder to part* (1. Baskı). New York, ABD: Springer

Gartner, F., Stoltenhoff, T., Schmidt, T. ve Kreye, H. (2006). The cold spray process and its potential for industrial applications. *Journal of Thermal Spray Technology, 15 (2),* 223-232.

Holmberg, K. ve Matthews, A. (1994). *Coatings tribology* (2. Baskı). Amsterdam: Elsevier Tribology Series

Hromadka, K., Stulik, J., Reboun, J. ve Hamacek, A., (2013). DBC Technology for Low Cost Power Electronic Substrate Manufacturing. *Procedia Engineering, 69(2014),* 1180-1183.

Imbriglio, I.S., Brodusch, N., Aghasibeig, M., Gauvin R. ve Chromik R.R. (2018). Influence of Substrate Characteristics on Single Ti Splat Bonding to Ceramic Substrates by Cold Spray., *Journal of Thermal Spray Technology*, *27*, 1011-1024.

Karthikeyan, J. (2007). The advantages and disadvantages of the cold spray coating process. *The cold spray materials deposition process fundamentals and applications* (2. Baskı) içinde (62-71). Cambridge: Woodhead Publishing

Kılıç, M. (2019). *Detonasyon tabancası (D-Gun) ve sürep sonik plazma sprey (SAPS) kaplama yöntemleri ile üretilen MCrAlY içeriğine sahip kaplamaların mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Bartın Üniversitesi.

Klassen, T., Gartner, F., Schmidt, T., Kliemann, O.J., Onizawa, K., Donner, R.K., vd. (2010). Basic Principles and Application Potentials of Cold Gas Spraying. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 41(7),* 575-584.

Koivuluoto, H. (2010). *Microstructural characteristics and corrosion properties of cold-sprayed coatings* [Doktora Tezi]. Tampere University of Technology.

Kolesnik, L.L., Zhuleva, T.S., Predtechenskiy, O.P, Hlaing, M.K. ve Aung Z.P. (2017). Precessing of Metallization Technology Aluminum Oxide Ceramics for

Electro-Vacuum Devices Elements and Power Electronics Devices. 24th International Conference on Vacuum Technique and Technology.

Kosarev, V.F., Klinkov, S.V., Melamed, B.M., Nepochatov Y.K., Ryashin N.S. ve Shikalov V.S. (2018). *Cold Spraying for Power Electronics: Deposition of Thick Topologically Patterned Copper Layers on Ceramics*. International Conference on the Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk, Russia. https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5065141

Kromer, R., Danlos, Y. ve Costil, S. (2018). Cold Gas-Sprayed Deposition of Metallic Coatings onto Ceramic Substrates Using Laser Surface Texturing Pre-treatment., *Journal of Thermal Spray Technology*, *27*, 809-817.

Malachowska, A. (2016). *Analysis of the cold gas spraying process and determination of selected properties of metallic coatings on polymers* [Doktora Tezi]. Wroclaw University of Technology and University of Limoges.

Meydanoğlu, O. (2012). *Surface modification of metals by metals of cold gas dynamic technique* [Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkimov, A. ve Fomin, V. (2007). *Cold spray technology* (1. Baskı). Amsterdam: Elsevier

Papyrin, A. (2006). Cold spray: state of the art and applications. *European Summer University, Eylül,* 11-15.

Pinto, G., Francisco, S., Porteiro, J., Miguez, J. ve Baptista, A. (2018). Numerical simulation applied to PVD reactors: an overview. *Coatings, 8(410)*

Rastjagaev, E. ve Wilde, J. (2012). Development and Testing of Cold Gas Sprayed Circuit Boards for Pewer Electronics Applications, CIPS

Sadeghi, E. (2016). *Corrosion behavior of HVAF-Sprayed bi-layer coatings* [Lisans Tezi]. University West.

Schmidt, T., Gartner, F., Assadi, H. ve Kreye, H. (2006). Development of a generalized parameter window for cold spray deposition. *Acta Materialia, 54,* 729-742.

Schmidt, T. (2007). *Kaltgasspritzen eine analyse des materialverhaltens beim partikelaufprall und die daraus abgeleitete prozessoptimierung*. Hamburg: Shaker Verlag

Singh, H., Sidhu, T.S. ve Kalsi, S.B.S. (2012). Cold spray technology:future of coating deposition processes. *Frattura ed Integrita Strutturale,(22),* 29-84.

Smith, M.F. (2007). Comparing cold spray with thermal spray coating technologies. *The cold spray materials deposition process: fundementals and applications,* (2. Baskı) içinde (43-61). Cambridge: Woodhead Publishing

Stoltenhoff, T., Kreye, H. ve Richter, H. (2001). An analysis of the cold spray precess and its coatings. *Journal of Thermal Spray Technology, 11(4),* 542-550.

Tucker, R. (1994). Thermal spray coatings. *ASM International, 5,* 497-509.

Villafuerte, J. (2015). *Modern cold spray materials, precess, and applications* (1. Baskı). Switzerland: Springer International Publishing

Vuoristo, P. (2014). Thermal spray coating processes. *Comprehensive materials processing* (1. Baskı) içinde (229-276). Amsterdam: Elsevier

Zheng, Z., Zhang, Y., Yi, F., Chen, C. ve Song, X. (2014). Surface Metallization of Alumina Ceramics: Effects of Sintering Time and Substrate Etching. *Ceramics International, 40,* 12709-12715.

Wen, C. (2015). *Surface coating and modification of metallic biomaterials* (1. Baskı). Cambridge: Elsevier

Wielage, B., Grund, T., Rupprecht, C. ve Kümmel, S. (2010). New Method for Producing Power Electronic Circuit Boards by Cold Gas Spraying and

Investigation of Adhesion Mechanisms. *Surface Coating Technology, 4(205),* 1115-1118.