

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Cu MATRİSLİ Al_2Cu İNTERMETALİK TAKVİYELİ KOMPOZİT
KAPLAMALARIN SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Valbona DYLMISHI

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Cu MATRİSLİ Al_2Cu İNTERMETALİK TAKVİYELİ KOMPOZİT
KAPLAMALARIN SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Valbona DYLMISHI
(506101428)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506101428 numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi **Valbona DYLMISHI**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ **Cu MATRİSLİ Al_2Cu İNTERMETALİK TAKVİYELİ KOMPOZİT KAPLAMALARIN SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU** ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç.Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sakin ZEYTİN
Sakarya Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **22 Ocak 2015**

Aileme ve eşıme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarımın her aşamasında yardımlarını esirgemeyip değerli fikir ve katkılarıyla ışık tutan ve yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Yine deneysel çalışmalarım süresince yardımlarından ötürü Araş. Gör. Onur TAZEGÜL'e, Araş. Gör. Faiz MUHAFFEL'e ve mekanik metalurji laboratuvarlarında çalışan bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim. Son olarak maddi ve manevi desteklerini benden hiç esirgemeyen aileme ve eşime sonsuz saygılarımı sunarım.

Ocak 2015

Valbona Dylmishi
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİK KONTAK MALZEMELERİ.....	5
2.1 Bakır ve Bakır Alaşımları	6
2.2 Cu-Al Denge Diyagramı ve Al ₂ Cu İntermetalik Oluşumu	6
3. SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ.....	11
3.1 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminde Birikme Verimi	15
3.1.1 Yüzey özelliklerinin birikme verimine etkisi.....	15
3.1.2 Malzeme özelliklerinin birikme verimine etkisi	15
3.1.3 Sıcaklığın birikme verimine etkisi	16
3.2 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminde Kullanılan Parametreler	16
3.2.1 Püskürtülen tozun özellikleri	16
3.2.2 Nozül geometrisi	18
3.2.3 Gaz türü.....	20
3.2.4 Gaz sıcaklığı.....	21
3.2.5 Gaz basıncı.....	22
3.3 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminin Termal Püskürtme Yöntemleri İle Karşılaştırılması	23
3.3.1 Avantajları.....	24
3.3.2 Dezavantajları	26
3.4 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminin Uygulamaları	26
3.5 Literatürde Bulunan Benzer Çalışmalar	27
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	31
4.1 Kaplamada Kullanılan Tozların Hazırlanması	31
4.2 Kaplama Parametrelerinin Belirlenmesi	33
4.3 Kaplama Üretimi	36
4.4 XRD Analizi.....	37
4.5 Mikroyapı İncelemeleri	37
4.6 Sertlik Ölçümleri	38
4.7 Elektrik İletkenliği Ölçümleri	38
4.8 Aşınma Testleri	38
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	41
5.1 Faz Analizleri	41
5.2 Mikroyapı İncelemeleri	43
5.3 Sertlik Ölçümleri	46

5.4 Elektrik İletkenliği Ölçümleri.....	47
5.5 Aşınma Testleri	47
6. GENEL SONUÇLAR	53
KAYNAKLAR.....	55
EKLER.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	63

KISALTMALAR

SGDP	: Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
XRD	: X-ışınları Difraksiyonu (X-Ray Diffractometer)
HV	: Vickers Sertlik Birimi (Hardness Vickers)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yaygın olarak kullanılan elektrik kontak malzemelerinin elektrik iletkenlik değerleri.....	6
Çizelge 3.1 : Taşıyıcı gazların özellikleri.....	20
Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan tozların özellikleri.....	31
Çizelge 4.2 : Patern kaplamalarda kullanılan tozlar ve kaplama parametreleri	36
Çizelge 4.3 : SGDP yöntemi ile kaplamada kullanılan parametreler	37
Çizelge 4.4 : Aşınma deney parametreleri.....	39
Çizelge 5.1 : Patern kaplamaların kaplama kalınlık değerleri.....	45
Çizelge 5.2 : Kaplama yapılarında bulunan % intermetalik ve porozite miktarları ..	45

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Alüminyum-Bakır denge diyagramı [14].	8
Şekil 3.1 : Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin şematik gösterimi.	11
Şekil 3.2 : Laval tipi nozülün şematik gösterimi [17].	12
Şekil 3.3 : Toz boyutu ile çarpma hızının kaplama malzemesinin altlık üzerine çarpması sırasında gerçekleşecek olan mekanizmaya etkisi [19].	13
Şekil 3.4 : Birikme verimliliği ile toz hızının ilişkisi [20].	14
Şekil 3.5 : Partikül çapının farklı koşullarda partikül hızına etkisi [28].	17
Şekil 3.6 : Toz boyutunun poroziteye etkisi [29].	17
Şekil 3.7 : Nozül içerisinde proses gaz, parçacık hızları ve sıcaklıklarının değişimi CFD (Computational Fluid Dynamics) programı kullanılarak değişimi [32].	19
Şekil 3.8 : SGDP yönteminde nozül geometrisinin parçacık hızına ve birikme verimine etkisi [32].	20
Şekil 3.9 : Kaplama verimliliği ile proses gaz tipi ilişkisi [34].	21
Şekil 3.10 : Kaplama verimliliği ile proses gaz sıcaklığı ilişkisi [34].	22
Şekil 3.11 : Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile termal püskürtme yöntemlerinin yaklaşık işlem sıcaklıklarının ve partikül hızlarının karşılaştırılması.	24
Şekil 3.12 : Alüminyum altlık üzerine SGDP yöntemi ile yapılan bakır kaplama görüntüsü.	27
Şekil 4.1 : Hazırlanan peletler.	32
Şekil 4.2 : Al ₂ Cu intermetalik tozunun XRD paterni.	32
Şekil 4.3 : Isıl işlem sonrası peletlerin mikroyapı görüntüleri.	33
Şekil 4.4 : Hacimce %10 Al ₂ Cu içeren toz karışımı ile farklı hızlarda ve farklı paso sayısında yapılmış kaplamaların optik mikroskop görüntüleri (x100).	34
Şekil 4.5 : %10 Al ₂ Cu takviyeli bakır matrisli kompozit kaplamaların hız, paso sayısı ve kaplama kalınlığı ilişkisi.	35
Şekil 4.6 : %10 Al ₂ Cu takviyeli bakır matrisli kompozit kaplamaların hız, paso sayısı ve sertlik ilişkisi.	35
Şekil 5.1 : Kaplamaların XRD paternleri.	42
Şekil 5.2 : Kaplamaların optik mikroskop görüntüleri (x100), (a) takviyesiz Cu kaplama, (b) %5 Al ₂ Cu takviyeli, (c) %10 Al ₂ Cu takviyeli ve (d) %15 Al ₂ Cu takviyeli.	43
Şekil 5.3: Kaplamaların SEM görüntüleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al ₂ Cu takviyeli, (c) %10 Al ₂ Cu takviyeli ve (d) %15 Al ₂ Cu takviyeli kaplama.	44
Şekil 5.4 : Cu tozuna ilave edilen Al ₂ Cu intermetalik miktarının kaplama sertliğine etkisi.	46
Şekil 5.5 : Değişik intermetalik miktarı içeren kaplamalara ait ortalama elektrik iletkenliği değerleri.	47
Şekil 5.6 : Kaplamaların 3 N yük altında elde edilen aşınma profilleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al ₂ Cu takviyeli, (c) %10 Al ₂ Cu takviyeli ve (d) %15 Al ₂ Cu takviyeli kaplama.	48

Şekil 5.7 : Kaplamaların uygulanan yüke göre göreceli aşınma oranları.	49
Şekil 5.8 : Kaplamaların 3 N yük altında zaman - sürtünme katsayısı grafikleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al ₂ Cu takviyeli, (c) %10 Al ₂ Cu takviyeli ve (d) %15 Al ₂ Cu takviyeli kaplama.	50
Şekil 5.9 : Kaplamaların 3 N yük altında elde edilen aşındırıcı bilyalarda oluşan izlerin optik mikroskop görüntüleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al ₂ Cu takviyeli, (c) %10 Al ₂ Cu takviyeli ve (d) %15 Al ₂ Cu takviyeli kaplama.	51
Şekil 5.10 : Kaplamaların 3 N yük altında oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan SEM görüntüleri (x), (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al ₂ Cu takviyeli, (c) %10 Al ₂ Cu takviyeli ve (d) %15 Al ₂ Cu takviyeli kaplama.	52
Şekil A.1 : Kaplamaların 1 N yük altında zaman - sürtünme katsayısı grafikleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al ₂ Cu takviyeli, (c) %10 Al ₂ Cu takviyeli ve (d) %15 Al ₂ Cu takviyeli kaplama.	60
Şekil A.2 : Kaplamaların 1 N yük altında elde edilen aşınma profilleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al ₂ Cu takviyeli, (c) %10 Al ₂ Cu takviyeli ve (d) %15 Al ₂ Cu takviyeli kaplama.	61

Cu MATRİSLİ Al_2Cu İNTERMETALİK TAKVİYELİ KOMPOZİT KAPLAMALARIN SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, yüzey geliştirme tekniği olarak kullanılan soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile bakır altlık üzerine bakır matrisli intermetalik partikül takviyeli kompozit kaplanabilirliği incelenmiştir. Elektrik kontak malzemelerinin sahip olması gereken en önemli özelliklerden biri olan elektrik iletkenlik değerini mümkün olduğunca koruyarak bakırın aşınma direnci, sertlik gibi mekanik özelliklerini geliştirmek hedeflenmiştir. Böylece elektrik kontak malzemesi olarak kullanılan bakırın servis ömrü uzatılacak ve bakım maliyetleri azaltılacaktır.

Deneyisel çalışmalarda öncelikle en uygun parametrelerin bulunması için optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu optimizasyon çalışmaları çerçevesinde hacimce %10 Al_2Cu takviyeli bakır tozları saf bakır altlık üzerine püskürtülmüş ve oluşan kaplamaların mikroyapı ve sertlik gibi özellikleri değerlendirilmiştir. Uygun parametrelerin belirlenmesinin ardından takviye oranının yapıya etkisini görmek amacıyla; aynı matris malzemesinde %5, %10 ve %15 takviye oranları denenmiştir.

Kaplamaların kesitlerinden alınan taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop görüntüleriyle arayüzey kalitesi, porozite, kaplama kalınlığı ve intermetalik dağılımı gibi yapısal özellikler incelenmiş ve bütün kaplamaların başarılı bir şekilde yeterli kaplama kalınlıklarında üretildiği gözlenmiştir. Karakterizasyon işlemleri sonucunda, sertlik değerlerinde Al_2Cu miktarının artırılması kaplamaların sertlik değerlerinde gelişme sağlamıştır. Elektrik iletkenliği değerlerinin intermetalik faz miktarının artışı ile azaldığı gözlenmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda, 1 N yük altında yapılan aşınma test sonuçlarında rölatif aşınma oranlarında belirgin bir farklılığın olmadığı, 3 N yük altında yapılan testlerin sonuçlarında ise %5 ve %10 intermetalik katkı kaplamalarda saf kaplamaya kıyasla aşınma miktarının azaldığı, %15 intermetalik katkı kaplamanın aşınma miktarının ise saf kaplamaya kıyasla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, aşınma deneylerinin sonuçları, elektrik iletkenlik ve sertlik değerleri ışığında elektrik kontak malzemesi olarak kullanılan bakır malzemesinin yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla hacimce %5 ve %10 Al_2Cu takviye ile yapılmış kaplamalar tercih edilebilir.

THE PRODUCTION OF Al_2Cu INTERMETALLIC REINFORCED COPPER MATRIX COMPOSITE COATING BY COLD GAS DYNAMIC SPRAYING PROCESS AND ITS CHARACTERIZATION

SUMMARY

Copper is an attractive material for electrical applications (such as welding electrodes, conductors and etc.) because of its high electrical and thermal conductivities. Not only it provides the requirements for being used as electrical contacts such as electrical and thermal conductivity but it also has some additional properties like easy workability and low cost. As well as the the good properties of copper, they have some poor proproties such as low hardness and low wear resistance. Its mechanical properties, including hardness, strength and wear resistance should be improved in order to extend its service life and decrease maintenance costs.

Lots of coating and deposition techniques are used for this purpose. Thermal spraying and cold gas dynamic spraying can give examples for these techniques. Because of very high working temperatures, thermal spray coating methods are encountered some problems such as melting of the metal matrix. In case the melting of the metal matrix, ceramic particles in the structure can not be dispersed properly, so it is difficult to provide homogenization. In addition, it is difficult to obtain coating with low porosity and protect the coating from oxidation. Cold Gas Dynamic Spray process is developed in order to solve these thermal spraying problems.

Cold-Gas Dynamic Spray (or simply Cold Spray) is a relatively new coating process of applying coatings by exposing a metallic or dielectric substrateto a high velocity (300 to 1200 m/s) jet of small (1 to 50 μm) particles accelerated by a supersonic jet of compressed gas. This process is based on the selection of the combination of particle temperature, velocity and size that allows spraying at the lowest temperature possible. In the Cold Spray process, powder particles are accelerated by the supersonic gas jet at a temperature that is always lower than the melting point of the material, resulting in coating formation from particles in the solid state. As a consequence, the deleterious effects of high-temperature oxidation, evaporation, melting, crystallization, residual stresses, gas release, and other common problems for traditional thermal spray methods are minimized or eliminated.

In this study, it is investigated that of the coatability of intermetallic particle reinforced copper matrix composite coatings to the copper substrate which is used for electrical contacts. The target is the improvement mechanical properties of copper without any decrease of electrical conductivity of copper.

The experimental studies were started with creating the intermetallic powder. Copper powder (53 wt.%) and of aluminium powder (47 wt.%) were mixed and compacted under 100 bar pressure. Then, the compacted powders were held at 550 oC for 6 hours. After cooling to the room temperature, compacts were broken into pieces, ball

milled and sieved by 325 mesh sieve to collect the powders having particle sizes below 44 μm .

Then, optimisation studies were performed. Firstly, mixture of 10 vol.% Al_2Cu and 90 vol.% copper were used during the optimisation processes. Two different (2.5 and 5) traverse speed and two different (2 and 4) number of pass were tried to choose the optimum parameters. Optimum parameters were determined with respect to the coating thickness, hardness and oxidation behaviour. In optimisation process, it is seen that oxidation of coatings increases with decreasing traverse speed and increasing number of pass. The coating thickness increases with increasing number of pass at constant traverse speed and the higher coating thickness values obtained with lower traverse speed at a constant number of pass. According to results obtained from the coatings produced with the feedstock which contains 10 vol.% Al_2Cu and 90 vol.% copper, traverse speed of 5 mm/sec and 4 pass were chosen as optimum process parameters.

After optimization process, coatings were prepared with determined parameters by cold gas dynamic spray equipment. In order to determine the effect of reinforcement amount on structure of the coatings; the feedstock for the cold spray process was prepared by mixing pure copper powder with Al_2Cu powder at different volume ratios (0% to 15 vol.%).

Characteristics of the composite coatings were made by microscopic examinations, X-ray diffraction analysis, hardness measurements, electrical conductivity measurements and wear tests. The microstructures of samples which were prepared with metallographic procedure were investigated with optical and scanning electron microscopes. Typical cross sectional interface views of coatings show that the coatings are dense and adhere to the substrate without any discontinuity.

According to the XRD patterns, cold sprayed coatings and Cu powder have the same phases. No phase transformation was observed from the XRD patterns of all coatings. The intermetallic particles in the coatings could not be detected by XRD analysis due to their very low contents which are proven by the image analysis results.

Image analyses performed on the optical microscopic images of composite coatings show that there are always less intermetallic particles retained in composite coatings than those of the original feedstock powder mixtures. Intermetallic particles are surrounded by metal particles due to the plastic deformation and locked up in the structure so that a lot of portion of intermetallic particles rebound from the surface of substrate. For this reason, the efficiency of deposition is very low. Because of this poor efficiency the Al_2Cu phase could not be determined on the XRD patterns.

As a general trend addition of Al_2Cu particles into the feedstock caused a reduction in the porosity concentration while providing composite coatings thicker than the monolithic copper coating. However, increasing volume fraction of Al_2Cu particles in the feedstock to 15% deteriorated the cold spraying characteristics and caused deposition of relatively thin and porous composite coating. Thus, addition of Al_2Cu into the copper powder positively affected the cold spray coating performance of the feedstock up to a specific level.

As expected, reinforcement of the coating with Al_2Cu particles imposed higher hardness values. Hardness of the cold sprayed coatings when compared with that of

Cu substrate can be explained with strain hardening of the spray particles which undergo severe plastic deformation upon impact.

When the results of the electrical conductivity measurements are of concern, the worst results were obtained from the coatings deposited by Al₂Cu free and 15 vol.% Al₂Cu added feedstock, whose porosity concentrations were the highest. Thus, low porosity concentrations favoured higher electrical conductivity

While the worn surfaces of the coatings deposited by using 5 vol.% and 10 vol.% Al₂Cu containing feedstock exhibited rough and oxidised appearance, smooth and delaminated nature were the characteristics for the worn surfaces of the coatings deposited by Al₂Cu free and 15 vol.% Al₂Cu containing feedstock. It is therefore suggested that the coatings deposited from the 5 vol.% and 10 vol.% Al₂Cu containing feedstock were protected from the destructive action of the counterface upon oxidation of the contact surface, which also caused a sharp drop on the friction curve after the running in period. 5 vol.% and 10 vol.% Al₂Cu reinforced composite coating shown a lubrication effect in wear tests and this lubrication effect decreased the wear rate and the friction coefficient. Heavy fluctuations on the friction curves of the coatings deposited by Al₂Cu free and 15 vol.% Al₂Cu containing feedstock can be attributed to the stick-slip mechanism taking place throughout the testing period.

As a result of all process, addition of Al₂Cu into copper powders up to 10 vol.% positively affected the cold spray performance of the feedstock. 10 vol.% Al₂Cu intermetallic reinforced copper matrix composite coating can be produced for improvement of the surface properties of copper with respect to the results of wear tests, hardness and electrical conductivity measurements.

1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamaları için tasarımda kullanılan parçanın yüzey özellikleri en az kütsel mekanik özellikleri kadar önem taşımakta ve yüzey hasarları sistemin güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir. Gerek ekonomik gerekse teknik yönden istenen kütsel özellikler ile yüzey özelliklerini bir arada bulunduran malzeme üretiminin zorluğundan dolayı da mühendislik malzemelerinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ilgi odağı olmuş ve yüzey modifikasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemlerde ucuz ancak istenen kütsel özelliklere sahip altlık parça yüzeyinde hedeflenen özellikleri karşılayacak uygun malzeme ile kaplanır.

Günümüzde, yaşamın ve iş hayatının vazgeçilmez bir unsuru olan elektriğin bulunduğu her yerde elektrik ile çalışan cihazları kontrol etmek amacıyla elektrik kontak malzemeleri kullanılmaktadır. Kontak malzemelerinde karşılaşılan en büyük sorun; açılıp-kapanma sırasında oluşan ark ile aşırı şekilde ısınmaları sebebiyle erime ve buharlaşma yolu ile önemli miktarlarda malzeme kaybına uğramalarıdır. Buna ek olarak kontakların yüzeyleri bozulmakta ve bir kontakten diğerine malzeme transferi meydana gelmekte ve bu sebeple kontaklar bir süre sonra birbirine yapışarak çalışmaz hale gelmektedirler. Bu sebeple elektrik kontak malzemelerinin aynı zamanda iyi mekanik özelliklere de sahip olmaları gerekmektedir [1].

Bakır yüksek elektrik ve termal iletkenliğe sahip olduğundan dolayı ve bakır matrisli kompozitlerin üretilmesiyle tribolojik özellikleri gelişmiş olan malzemeler üretildiğinden dolayı aşınmaya maruz kalan elektrik malzemelerinde Cu esaslı kompozitler umut vericidir. Yapılan birçok çalışmada takviye malzemesi olarak kullanılan intermetallikler yüksek akma ve kırılma gerilmesine sahip olup mukavemetini yüksek sıcaklıklar üzerinde koruma eğilimindedirler. Yüksek mukavemet ve modül ile kullanıldığı yapının çok iyi özelliklere sahip olmasını da sağlamaktadırlar [2].

Bakır (Cu) yüksek elektrik ve ısı iletkenliği sayesinde gümüş ve altının yanı sıra elektrik kontak malzemesi olarak kullanılmaya uygundur. Ayrıca gümüş ve altına göre daha düşük fiyata sahiptir ve işlenebilirliği daha kolaydır. Ancak bakırın bu gibi avantajları yanında, zayıf aşınma özelliğinin olması yüzey özelliklerini geliştirme teknikleri kullanılarak bakırın bu gibi kötü özelliklerinin iyileştirilmesini gerekli kılmaktadır.

Bakırın yüzey özelliklerini geliştirmek maksadıyla uygulanan tekniklere fiziksel ile kimyasal buhar biriktirme, termal püskürtme, kutu sementasyon, iyon yerleştirme ve lazer kaplama örnek gösterilebilir. Uygulamalarda geleneksel termal püskürtme prosesleri ile püskürtülen metalik kaplama malzemeleri yüksek sıcaklık etkisi ile oksitlenerek kaplama yapısında belirli oranda oksit oluşturmakta ve bu durum kaplamanın performansını dolayısıyla ömrünü azaltmaktadır [3]. Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi termal püskürtme yöntemlerinde ortaya çıkan kaplamadaki porozite, oksitlenme ve düşük yapışma mukavemeti gibi problemlerin çözülmesi amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir.

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi, katı haldeki partiküllerin ergime olmaksızın metalik veya dielektrik bir altlık üzerinde biriktirme yöntemidir. Küçük toz boyutundaki (genellikle $<50\mu\text{m}$) partiküller sıkıştırılmış gaz ile sağlanan yüksek hıza sahip gaz akımına beslenir ve ses üstü hızlara ulaştırılması sağlanır. Yüksek hızlara (300-1200m/sn) sahip gaz akışı, sıkıştırılmış gazın daralan-genişleyen nozül içerisinde geçirilmesiyle elde edilir. Yüksek basınca sahip gaz, basıncı ve sıcaklığı aniden düşürülerek ses üstü hızlara ulaştırılır. Aynı zamanda ayrı bir gaz akımı ile taşınan partiküller nozüle beslenir ve nozüldeki ses üstü hıza sahip ana gaz akımı ile hızlanarak nozülü terkeder ve altlık yüzeyine çarpar. Bu parçacıklar altlık malzemeye ve kendi kendilerine çarpmaları sayesinde kaplama yapısını oluştururlar. Yüksek hızlardaki çarpışmalar sayesinde parçacıkların ve altlık malzemenin yüzeyindeki oksit tabakalar bozulur ve yüksek arayüzey basınç ve sıcaklık değerleri sayesinde atom yapıları birbirleri üzerine baskı yaparak yakın temasa geçerler ve yapışma işlemini gerçekleştirirler [4]. Sonuç olarak altlık malzemesine iyi yapışmış, homojen ve düşük poroziteli istenen kalınlıkta kaplama elde edilir. Günümüzde soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi güvenilir ve çevre dostu bir teknoloji olup, özellikle metalik esaslı kaplamaların endüstriyel uygulamalarında birçok açıdan önemli fırsatlar sunmaktadır [5].

Bu çalışmanın amacı Cu altlık üzerine soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile farklı hacim oranlarında Cu matrisli Al_2Cu intermetalik takviyeli kompozit kaplamaların üretilmesi ve bakırın elektrik iletkenliğinden feragat etmeden mekanik özelliklerinin geliştirilmesidir. Bu alışma kapsamında, besleme toz karışımlarının üretilmesi için intermetalik partiküller farklı hacim oranlarında bakır tozları ile karıştırılmıştır. Mikro yapı, sertlik, elektrik iletkenliği ve aşınma dayanımı açısından optimum özellikleri sağlayan toz karışımları ve kaplama parametreleri belirlenmiştir.

2. ELEKTRİK KONTAK MALZEMELERİ

Geniş bir kullanım alanına sahip olan elektrik kontak malzemeleri, elektrik devresi içerisinde iki alt sistemin kabul edilemeyecek herhangi bir hasara sebep olmadan birbirinden ayrılmasını sağlayan elektromekanik parçalardır [6]. Bu malzemelerin sahip olması gereken en önemli özellikler aşınma dayanımı ve gerektiğinde elektrik akımını kesebilmeleridir. Çalışma esnasında meydana gelebilecek herhangi bir hasar sistemin durmasına hatta üretimin aksamasına yol açabileceğinden dolayı bu gibi kötü problemlerle karşılaşmamak için sistemin içerisinde kullanılan elektrik kontak malzemelerinin, çalışma koşullarını göz önünde bulundurarak seçilmesi gerekmektedir.

Kontak malzemeleri açma-kapama ve kısa devre esnasında elektrik, termik, mekanik ve kimyasal yönden çok zorlanırlar. Kontaklar sürekli açılıp kapandığı için oluşan elektrik atlamaları (ark) zamanla kontakların oksitlenmesine ve iletkenlik özelliklerini kaybetmesine neden olur. Ark, kontakların çalışması esnasında akımın akmaya başlaması veya kesime geçmesi esnasında olur ve ark sütunundaki yüksek akım yoğunluğuna bağlı yüksek sıcaklık ile karakterize edilmektedir. Elektrik kontak malzemelerinin sürekli açılıp kapanma esnasında oluşan akım yoğunluğu, yüksek sıcaklıkla birleşince malzeme yüzeyi üzerinde korozyona sebep olmaktadır [7]. Korozyona uğrayan malzemenin hareket esnasında daha kolay aşınmaya uğraması sebebiyle malzemenin ömrü çok kısalmaktadır. Bu sebeple yüksek korozyon dayanımına sahip malzemelerin kullanılması, sistemin çalışması esnasında meydana gelen açma-kapama sayısını ve malzemenin yenilenme süresini artırmaktadır. Kullanılan malzeme-zaman oranının azalması ile birlikte, kullanıcının ekonomik olarak kazancı artmaktadır. Bu kazanımın sağlanması için çalışma koşullarına uygun malzeme seçilmesinin yanı sıra, kullanılan malzemenin yüzey özellikleri de geliştirilebilir.

2.1 Bakır ve Bakır Alaşımları

Kimyasal simgesi “Cu” ile gösterilen bakır, kırmızımsı renkli, ince tel ve levha haline getirilebilen, ısı ve elektrik iletkenliği yüksek ve kullanım sahası çok geniş olan bir metaldir [8]. Bakırın yüksek elektriksel iletkenliği, onu enerji ve telekomünikasyon kabloları, mıknatıslı teller, iletkenler ve çok sayıdaki elektriksel uygulamalarda tercih edilen bir metal haline getirmiştir. Bakırın ve bazı metallerin elektrik iletkenlik değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Yaygın olarak kullanılan elektrik kontak malzemelerinin elektrik iletkenlik değerleri [9].

Malzeme	Elektrik iletkenliği (S\m) 20°C
Gümüş	6.21×10^7
Bakır	5.85×10^7
Altın	4.42×10^7
Alüminyum	3.69×10^7

Bakır ve bakır alaşımları sahip oldukları bu yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, iyi mukavemet ve süneklik değerleri, yüksek korozyon dayanımı, kolay işlenebilme ve düşük fiyat gibi özellikleri nedeni ile gümüş ve altının yanı sıra elektrik kontak malzemesi olarak tercih edilmektedirler. Fakat bakırın yukarıda sayılan iyi özelliklerine karşı sertliğinin düşük olmasından dolayı adhezif ve abrezif aşınma dayanımı zayıftır. Bu sebeple daha uzun ömürlü bir çalışma süresi için bakırın yüzey özelliklerinin geliştirilmesine olan ilgi her geçen gün artmaktadır [10]. Bu noktada, bakırın zayıf aşınma özelliğinin geliştirilebilmesi amacı ile malzeme sertleştirme veya yüzey özelliklerini geliştirme tekniklerinden yararlanılmaktadır.

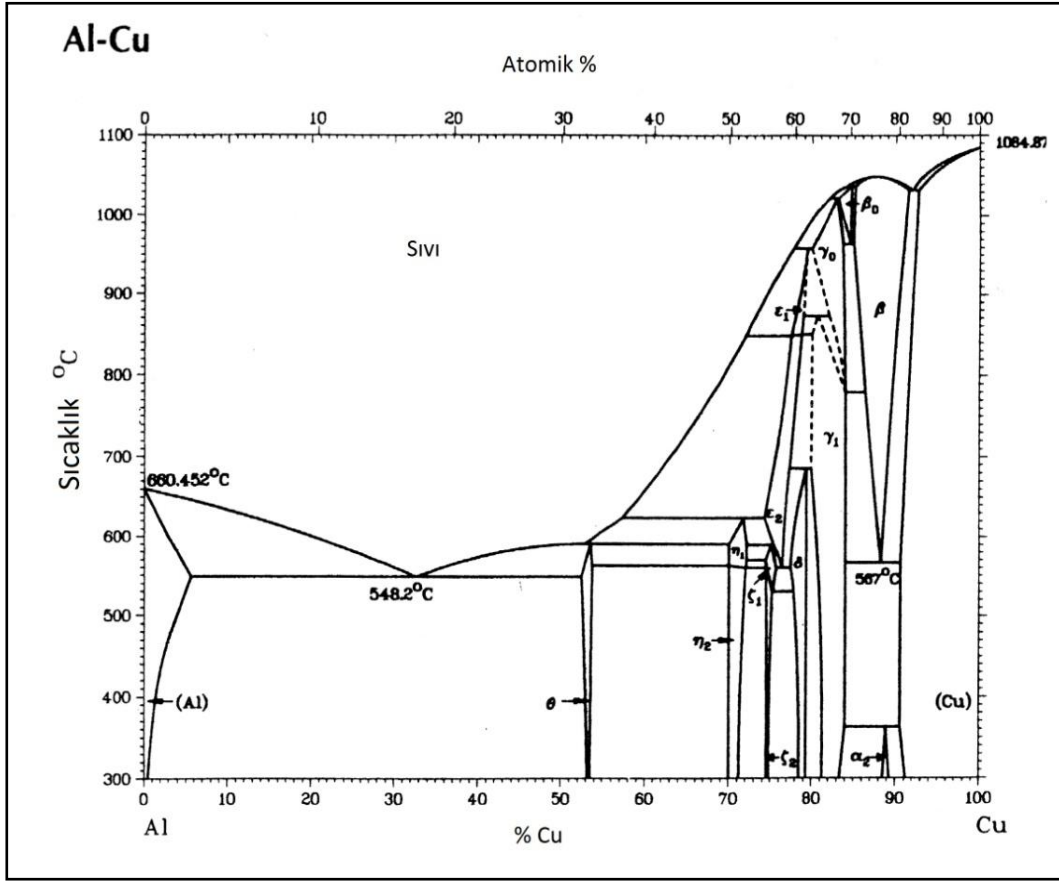
2.2 Cu-Al Denge Diyagramı ve Al₂Cu İntermetalik Oluşumu

İleri teknolojik malzemeler, ergime sıcaklıkları 2000 °C’nin üzerinde olduğundan dolayı özellikle yüksek sıcaklık ve aşınmaya dayanıklı yerlerde kullanılan ve saf bileşiklerden oluşan malzemelerdir. Bu nedenle ileri teknolojik malzemeler genel itibari ile özel uygulamalarda kullanılmak amacıyla tasarlanmaktadır. Bu ihtiyaçları karşılamak için fiziksel ve kimyasal özellikleri bilinen malzemelerden yararlanılarak yeni birçok malzemelerle birlikte ileri teknoloji malzemeleri grubunda yer alan metal matrisli kompozitler üretilmiştir [11].

Günümüzde en çok kullanılan kompozitlerden biri olan metal matrisli kompozitlerin üretilmesinin başlıca sebebi ekonomik ve yüksek kaliteye sahip malzeme üretim yöntemlerinin geliştirilmesidir. Metalik kompozit malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar özellikle yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir, mukavemetli, rijit malzemelerin geliştirilmesi yönünde yoğunlaştırılmıştır. Bu özellikleri elde etmek amacıyla metal matrisli kompozitlerde metallerarası bileşikler takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Birçok metallerarası bileşiklerde mevcut bulunan düzenli yapılar, yüksek mukavemet, sertlik ve çevre direnci gibi değişik özelliklere sahip malzeme tasarımına yardımcı olmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında ve makine tasarımında büyük önem taşıyan yüksek mukavemet ve kırılma tokluğu metallerarası bileşiklerden elde edilebilir. Metallerarası bileşikler, yüksek mukavemet, yüksek elastisite modülü ve iyi çevresel kararlılık gibi aşınma direnci için gerekli birçok niteliğe sahiptir. İyi çevresel kararlılıkları sebebi ile metallerarası bileşikler, sıcaklığın değiştiği, saldırgan, tribolojik ortamlarda kullanım alanları için ideal özellikler taşımaktadır [11]. Genellikle bir katı eriyiğin özellikleri, sistemde fazla miktarda mevcut olan metalin özelliklerine benzer. Fakat bu özellikler, sistemde çözünmüş olan metal miktarına bağlı olarak değişir. Bu bileşmelerin kimyasal bileşimleri muhakkak surette sabit değildir ve belirli limitler arasında değişebilir. Böylece Cu ve Al, Al_2Cu takribinde olan bu cins metaller arası bileşik meydana getirir. Fakat alaşımın içinde dağılmış vaziyette bulunduklarından, sistemin mukavemetini yükseltirler. Böyle bir alaşımın ısıl işleminde metaller arası bileşiklerde mevcut elementler, ana kütle tarafından katı eriyik bünyesinde dâhil edilebilirler. Böylece bir işlem sonucunda farklı ve çoğu zaman son derece değerli özellikleri haiz bir alaşım meydana getirirler [12].

Al-Cu sistemi uzunca bir süredir bilimsel ve teknolojik olarak ilgi odağı olmuştur (Şekil 2.1). Sistem, tam olarak çözümlenemeyen fazları, soğuma hızlarına ve uygulanan manyetik ve elektrik alanlarına, bağlı olarak değişen mikroyapısal özellikleri, martensitik dönüşümleri ve yarı kararlı Guinier Preston alanları göz önüne alındığında bilimsel anlamda ilgi çekicidir. Bunlara ek olarak, Al-Cu alaşımları, yüksek iletkenlik özellikleri ve kolay işlenebilir olmaları sayesinde entegre devrelerde bağlantı hattı olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca, literatürde bu sistemin yarı iletken cihazların yapımında da kullanılabileceği bildirilmiştir. Özellikle bakırca zengin alüminyum alaşımları yüksek elektrik ve termal

geçirgenlikleri ve kolay şekil verilebilir olmalarından dolayı yaygın bir şekilde mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadırlar [13].



Şekil 2.1 : Alüminyum-Bakır denge diyagramı [14].

Al-Cu Denge Diyagramına göre bakırın alüminyum içinde eririliği oda sıcaklığında %0.5, 548°C ötektik yatayında ise %5.65'dir. %33 bakır oranı alüminyuma ötektik bileşimi verir. Alüminyum içinde %0.5 - 5.7 erir. Bakırlı alüminyum alaşımlarına ısıtılma işlemi uygulanabilir. Isıl işlemde Al₂Cu çöker. Teknolojik önemi olan θ (Al₂Cu) intermetalik fazı %53.2 - 53.9 Cu içerir [14].

Bakırın, alüminyum içinde katı fazdan çözünürlüğü artan sıcaklıkla beraber artar (Ötektik sıcaklığının altında bakırın alüminyum kafesindeki çözünürlüğü azalır). Böylece çökeltme sertleşmesi mümkün olur. Çökeltme için gerekli zaman alaşımların bileşimine ve sıcaklığına bağlıdır. Çökeltmenin mekanik özelliklere yapacağı etki, fazın miktarına, boyutlarına ve dağılımına bağlıdır [14].

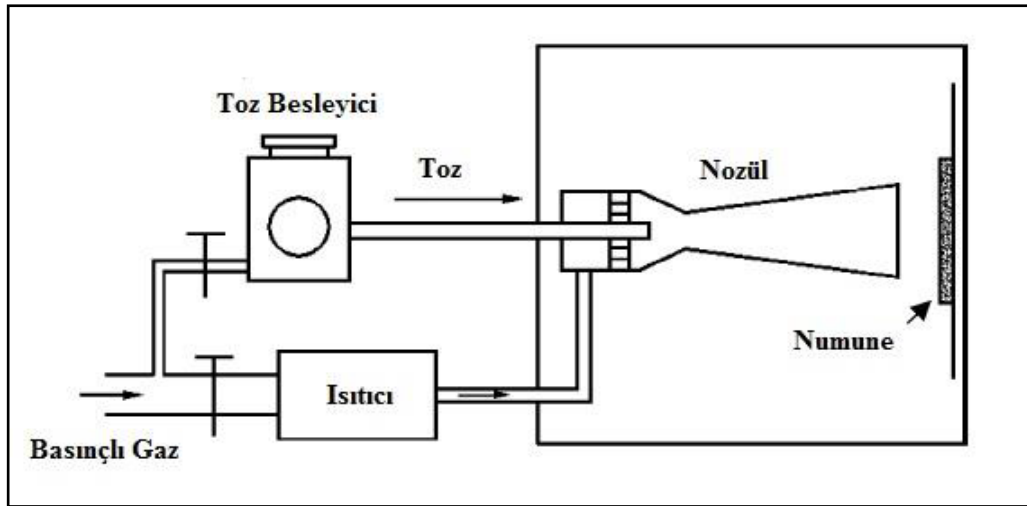
Malzemeyi gevrekleştirmeden dayanım artışı sağlayan çökeltme sertleşmesi ilk kez bu tür alaşımlarda bulunmuştur. Bakır düşük sıcaklıklarda ısıtılma işlemi, yüksek

sıcaklıklarda ise diğ er alaşım elementleri ile oluşturduğu ara fazlar dolayısı ile malzemenin mukavemetini artırır. Al-Cu sisteminde, bakır miktarının %5.5'e kadar artışı ile mukavemet artmakta, s uneklik azalmaktadır. Daha y uksek değerlerdeki bakır mekanik  zelliklerde d şmeye yol a ar [15].

3. SOĞUK GAZ DİNAMİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ

Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme yöntemi, 1980'lerin ortalarında Novosibirsk'te Rus Bilimler Akademisi Teorik Ve Uygulamalı Mekanik Bilimler Enstitüsü'nde, Profesör Anatolii Papyrin ve meslektaşları tarafından iki fazlı sistemlerin (gaz + katı partikül) ses üstü rüzgar tünelineki davranışlarının incelenmesi sırasında geliştirilmiştir. Söz konusu bilim adamları bu yöntemle birçok farklı malzeme üzerine metal, metal alaşımları ve kompozitten oluşan birbirinden farklı kaplamaları gerçekleştirerek soğuk gaz dinamik püskürtme tekniğinin birçok alanda uygulanabilirliğini kanıtlamışlardır [16].

Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme (SGDP) yöntemi temelde, yüksek basınçlı sıkıştırılmış gaz içinde depolanan enerjinin, ince taneli toz partiküllerinin (1-50 μm) yüksek hızlarda (300-1200 m/s) püskürtülmesi için kullanılmasıdır. SGDP yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.1'de gösterilmektedir [17].

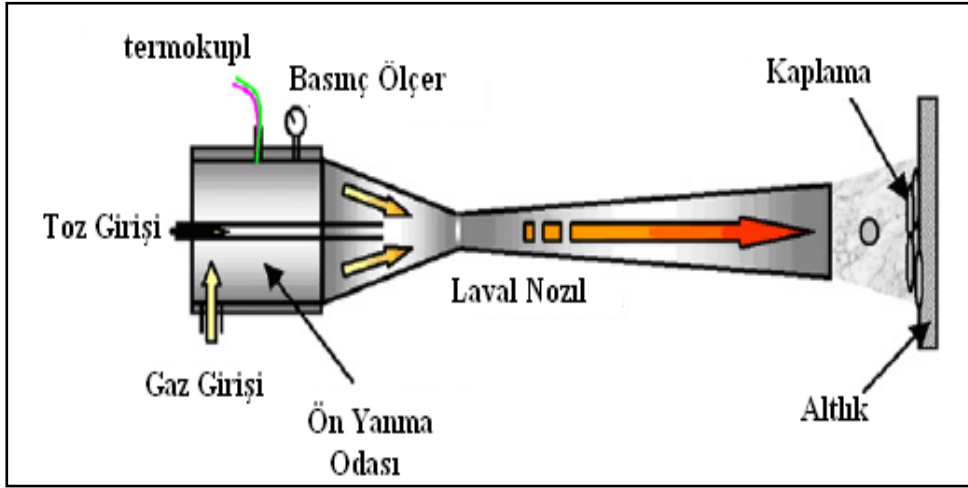


Şekil 3.1 : Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin şematik gösterimi.

SGDP yönteminin önemli cihazlarından toz besleme ünitesi, tabancaya toz tükenene kadar toz beslemesi yapan kısımdır. Tabanca, toz ve gazın birleştiği üzerinde bir tetik bulunan ve bu tetiğe basıldığında söz konusu karışımı nozüle ileten kısımdır. Nozül ise tabancanın uç kısmına monte edilen ve yüzeye gönderilen tozların cihazdan çıktığı son noktadır. Helezonik girinti ve çıkıntılardan oluşan bir iç çepere sahiptir.

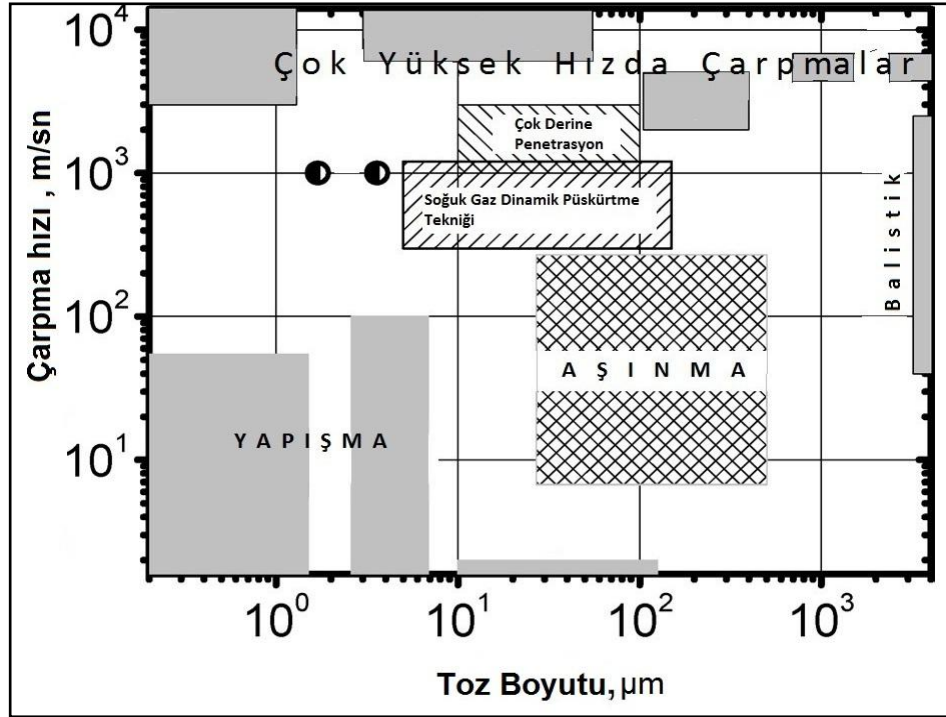
Tozun ilk girdiği yerde daralan, çıkış noktasına doğru da genişleyen kesiti sayesinde yüksek basıncın etkisiyle gelen tozlar süpersonik hızlara ulaşır [18].

SGDP yönteminde yüksek hızda (300-1200 m/s) gaz akışı basınçlı gazın Şekil 3.2’de gösterilen Laval (daralan-genişleyen) tipi nozül içerisinden geçirilmesi ile elde edilir. Başlangıçta ayrı bir gaz akımı ile taşınan tozlar nozüle beslenir. Nozüle beslenen tozlar nozüldeki ana gaz akımı ile hızlanır ve nozülü terk ettikten sonra altlık yüzeyine çarpar. Ses üstü hıza (300-1200 m/s) ulaştırılan toz partiküllerin altlık üzerine çarpması sonucu plastik deformasyona uğrayarak altlık yüzeyine yapışması sağlanır [17]. Kaplama süresince tozlar altlık yerine yüzeye yapışan malzeme (kaplama) ile bağ oluşturmaya sürdürür. Sonuç olarak altlık malzemesine iyi yapışan, homojen ve düşük poroziteli istenen kalınlıkta kaplamanın oluşumu sağlanır.



Şekil 3.2 : Laval tipi nozülün şematik gösterimi [17].

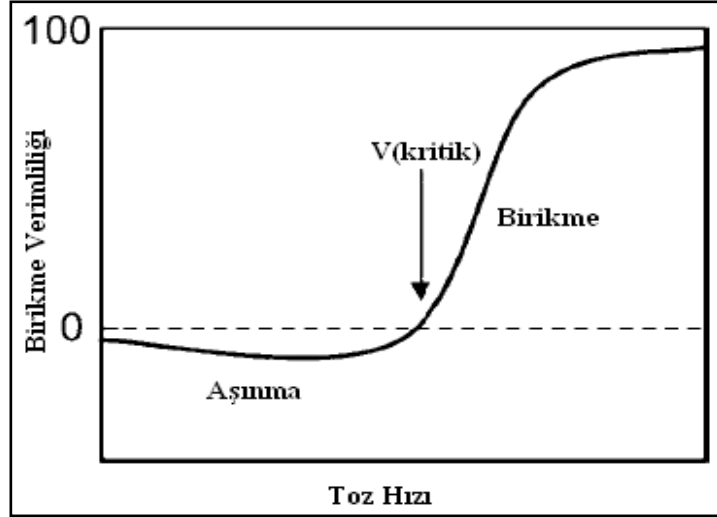
Küçük toz parçacığının katı bir yüzeye çarpması esnasında birçok olay gözlemlenebilir. Bu olaylar düşük hızlarda yapışma veya erozyon, yüksek hızlarda balistik ve orta hızlarda soğuk püskürtme birikmesi olarak sınıflandırılabilir. Dolayısıyla küçük toz parçacıklarının tüm çarpışmaları plastik deformasyon sonucu yüzeyde birikme ile sonuçlanmaz. Şekil 3.3 toz boyutu ile çarpma hızına bağlı olarak altlık yüzeyinde hangi mekanizmanın etkin olacağını göstermektedir.



Şekil 3.3 : Toz boyutu ile çarpma hızının kaplama malzemesinin altlık üzerine çarpması sırasında gerçekleşecek olan mekanizmaya etkisi [19].

Şekil 3.3'den açıkça görüldüğü gibi yaklaşık 1200 m/s hıza ve 10-100 μm aralığında partikül boyutuna sahip tozlar altlık yüzeyine biriktirilebilir. Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde tozların altlık yüzeyine çarptığında plastik deformasyona uğraması ve altlık yüzeye tutunması için belirli bir hıza ulaşması gerekmektedir. Bu hız kritik hız olarak adlandırılmakta ve kullandığımız toz malzemenin özelliklerine göre değişim göstermektedir. Toz ve altlık ikilisi için kritik partikül hızı söz konudur ve ancak bu hıza veya daha yüksek hıza sahip tozlar yeteri kadar plastik deformasyona uğrayarak verimli bir şekilde altlık yüzeyine birikir. Kritik hızdan daha düşük hıza sahip tozlar ise plastik deformasyona uğrayabilmek için yetersiz kinetik enerjiye sahiptir ve altlık yüzeyinde kumlama veya erozyona neden olur. Görüldüğü gibi, tozun altlık yüzeyine çarpması esnasındaki hızı birikmenin ya da erozyonun gerçekleşeceğini belirlemesi nedeniyle tozun çarpışma öncesindeki hızı önemli bir parametredir.

Kritik hız kaplama veriminde ani artışın gözlendiği eşik hız olarak da ifade edilebilir. Kaplama verimi biriken kaplama ağırlığının püskürtülen tozun ağırlığına oranıdır. Şekil 3.4'den görüldüğü gibi kritik hızın altında birikme verimi sıfırdır. Ortalama toz hızı kritik bir değeri aştığında birikme düşük verimle başlar, ardından bu verim ortalama toz hızı arttıkça artar [20].



Şekil 3.4 : Birikme verimliliği ile toz hızının ilişkisi [20].

Bu ilişki verimli bir kaplamanın elde edilebilmesi için kullanılan tozların kritik hızlarının hesaplanmasının bir ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır. Yöntem parametreleri ve farklı malzeme özelliklerinin kritik hıza olan etkisi göz önünde bulundurularak elde edilmiş olan kritik hız denklemi Denklem 3.1 de verilmiştir [21].

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

Bu denklemde; ρ toz yoğunluğu, T_m tozun ergime sıcaklığı, T_R referans sıcaklığı (genellikle oda sıcaklığı), σ_u tozun akma mukavemeti ve T_i tozun çarpma sıcaklığıdır.

Denklem 3.1 püskürtülen malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri ile yöntem parametrelerine (referans ve çarpma sıcaklıkları) bağlıdır. Ancak bazı araştırmacılar kritik hızın bu özelliklerle beraber püskürtülen tozun boyut dağılımı ile tozun ve altlığın yüzey oksit durumundan da etkilendiğini belirtmişlerdir [22].

Yukarıda bahsedildiği üzere soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde en önemli parametre püskürtülen tozun altlık yüzeyine çarpma öncesi hızı olduğundan yöntem parametrelerinin püskürtülen tozun hızlanmasındaki rollerinin kavranması önem kazanmaktadır.

SGDP yöntemi ile kaplama üretiminde biriktirme işlemi, parçacıkların yüksek sıcaklıktan ziyade yüksek hıza sahip olması temeline dayanmaktadır. Bu sayede

işlem sıcaklıkları diğer termal püskürtme yöntemlerine göre çok daha aşağılara çekilebilmektedir.

3.1 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminde Birikme Verimi

Birikme verimi soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin en önemli niteliklerinden biri olup püskürtülen tozların altlık yüzeyindeki birikme oranını ifade etmektedir. Birikme verimi kritik hız, tozların altlık yüzeyine karşı geliş açısı, püskürtülen tozun morfolojisi ve altlık malzemenin yüzey özellikleri gibi birçok faktörden etkilenir. Birikme verimini etkileyen en önemli faktörlerden biri kritik hızdır çünkü sadece kritik hızdan yüksek hıza sahip partiküller altlık yüzeyinde birikme oluşturlar. En büyük boyuta sahip tozlar en düşük partikül hızlarına (V_{min}), en düşük boyuta sahip tozlar en yüksek partikül hızlarına (V_{max}) sahiptirler. V_{min} kritik hızdan daha yüksek olduğunda partiküller yüzey üzerinde %100 birikme verimi ile kaplanır. V_{max} 'ın kritik hızdan daha düşük olduğu durumda partiküller yüzey üzerinde birikme oluşturmazlar ve birikme verimi %0 olur [23].

3.1.1 Yüzey özelliklerinin birikme verimine etkisi

Üzerine kaplama yapılacak olan malzemenin yüzey özellikleri birikme verimi için önem taşımaktadır. Partiküller, yüzey pürüzlülüğü yüksek olan malzemelerin üzerine daha kolay tutunurlar. Kaplama yapılacak numune yüzeyinin kumlanması gerek daha iyi bir bağlanma kuvveti sağladığı gerekse daha pürüzlü bir yüzey elde edildiği için termal püskürtme ve SGDP yönteminde birikme verimini arttırmak için kullanılan bir yöntemdir [23]. Ghelichi ve arkadaşları [24] yaptıkları çalışmada aynı malzemenin farklı pürüzlülük değerlerine sahip yüzeylerine (parlatılmış yüzeyden kumlanmış yüzeye kadar) metal tozları püskürtmüş ve yüksek pürüzlülüğe sahip olan yüzeylerde birikme veriminin daha yüksek olduğunu göstermişlerdir.

3.1.2 Malzeme özelliklerinin birikme verimine etkisi

Altlık yüzeyden daha yüksek plastisiteye sahip tozlar ile SGDP yöntemi sonrasında başarılı kaplamalar elde edilebilir [24]. Yüzey merkezli kübik yapıdaki metaller sahip oldukları fazla kayma düzlemi sayesinde en yüksek plastisiteye sahiptirler. Onları yine kayma düzlemi sayısına göre hekzagonal yapıdaki ve hacim merkezli kübik yapıdaki metaller izlemektedir.

3.1.3 Sıcaklığın birikme verimine etkisi

Birikme verimini etkileyen bir diğer faktör partikül ve numune sıcaklığıdır. Taşıyıcı gazın sıcaklığı ne kadar artarsa partikül hızı ve partikül ve numune sıcaklığı da o kadar yükselir. Bu parametrelerin artması da birikme verimini artırır. Li ve arkadaşlarının [25] yaptıkları çalışmada taşıyıcı gazın sıcaklığının artması ile birikme veriminde artış görülmüştür.

3.2 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminde Kullanılan Parametreler

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemindeki en önemli parametre olan toz hızı, püskürtülen tozun yoğunluğu, boyutu ile morfolojisi gibi karakteristik özelliklerine ve ana gaz akım hızına dolayısıyla nozül geometresine, kullanılan gazın türüne, sıcaklığına ve basıncına bağlıdır.

3.2.1 Püskürtülen tozun özellikleri

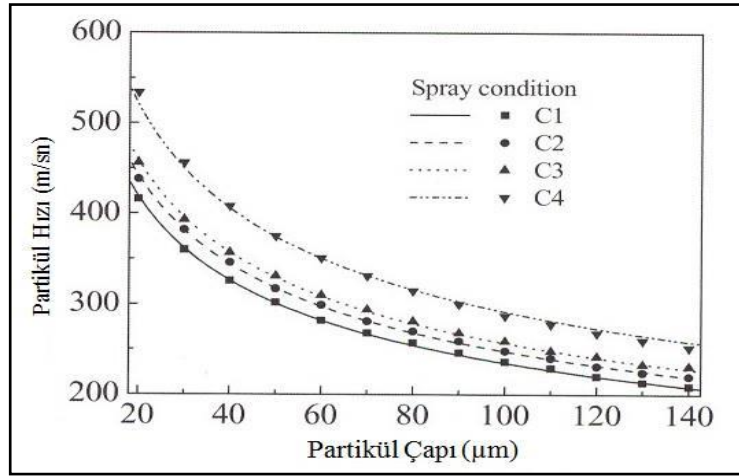
Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde kullanılan toz boyutları yaklaşık olarak 1-50 μm aralığında değişmektedir. Püskürtülecek tozların seçiminde en önemli unsur yüksek hızla çarpma esnasında deformasyon kabiliyetine sahip olmasıdır. Al, Cu, Ag, Au, Pt, Ni ve γ -Fe gibi yüzey merkezli kübik kristal kafas yapısına sahip metaller hacim merkezli kübik kristal (W, Ta, Mo, Nb, V, Cr, α -Fe, β -Ti) ve sıkı paket hegzagonal (Cd, Zn, Co, Mg, Ti) kafes yapısına sahip metallere göre daha fazla deformasyon kabiliyetine sahip olmalarından dolayı bu yöntemde öncelikli olarak Al, Fe, Cu, Ni esaslı kaplamalar üzerinde çalışmalar sürdürülmüştür [26].

Toz boyutu ve toz yoğunluğu toz ağırlığını belirlediği için hızlanma davranışı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Partikül hızı partikül çapıyla ters orantılı bir şekilde değişir. Küçük tozlar büyük tozlara göre daha yüksek hızlanma ivmesine ve daha yüksek püskürtme hızına sahiptir [19,27].

Kaplama verimliliği yüksek sıcaklıkta gaz kullanılarak artırılır, bu durumda altlık yüzeyine çarpan tozun hızı da artırılmış olur. Gaz sıcaklığının artırılması ile birlikte metal tozların yüzey oksijen değeri artabilir. Bununla birlikte azot ve hava ile ekzotermik reaksiyona girme riski ortaya çıkabilir. Bu tür gelişmeler partiküllerin sıcaklığını yükseltmektedirler. Yüksek sıcaklık değerleri metal tozların sünekliliğini artırırken, reaktif metallerde nitrür ve oksit tabakalarının oluşmasını da

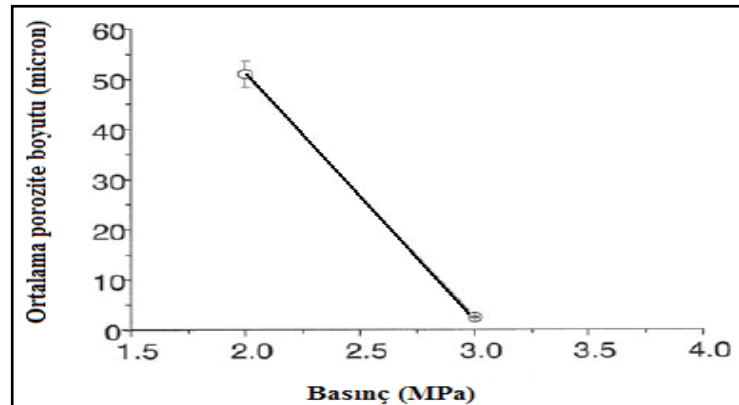
sağlamaktadır. Hava ve azot gibi çalışma gazları ile reaksiyona girebilecek Ti, Al, Si, Mg, Hf, Zr, Ta gibi metallerin kaplama işlemleri esnasında sıcaklık değerlerinin dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Bu sebeple başlangıç hammaddelerinin seçiminde toz boyutlarının seçimi önem kazanmaktadır.

Partikül boyutunun partikül hızıyla olan ilişkisi Şekil 3.5'te verilmiştir. Şekilde görülen grafikte farklı gaz sıcaklığı, farklı gaz basıncı ve farklı gaz türü altında uygulanan SGDP sırasında partikül hızının partikül boyutuyla beraber düştüğü görülmektedir [28].



Şekil 3.5 : Partikül çapının farklı koşullarda partikül hızına etkisi [28].

Farklı boyutlarda (18-28µm) Cu esaslı tozlar Al altlık üzerine 300 °C'de 3 MPa basınç ile kaplama işlemi sonrasında porozite miktarı incelendiğinde (Şekil 3.6) toz boyutu azaldıkça kaplama yapısında porozite oranı ve por boyutu azalmaktadır [29].



Şekil 3.6 : Toz boyutunun poroziteye etkisi [29].

3.2.2 Nozül geometrisi

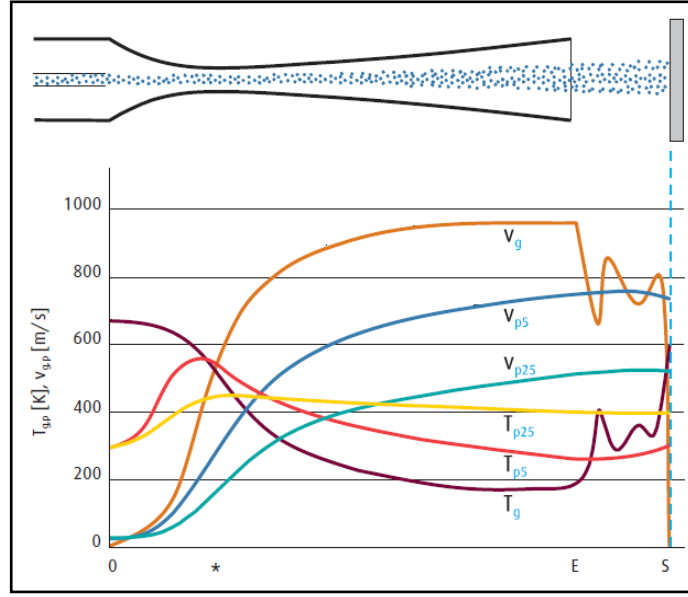
Nozül geometrisinde en önemli unsur olan genişleme oranı, nozülün çıkış alanının (A) nozülün minimum kesit alanına (boğaz, A^*) oranı olarak tanımlanmakta ve nozülün Mach sayısını belirlemektedir. Mach sayısı gazın akış hızının (V) o gazdaki ses hızına (c) oranıdır (Denklemler 3.2) [30].

$$\frac{A}{A^*} = M = \frac{V}{c} = \frac{V}{\sqrt{\gamma RT}} \quad (3.2)$$

Bu denklemden; γ gazın öz ısılarının oranını (C_p/C_v), R öz gaz sabitini (universal gaz sabitinin gazın molekül ağırlığına oranı) ve T gazın sıcaklığını ifade etmektedir.

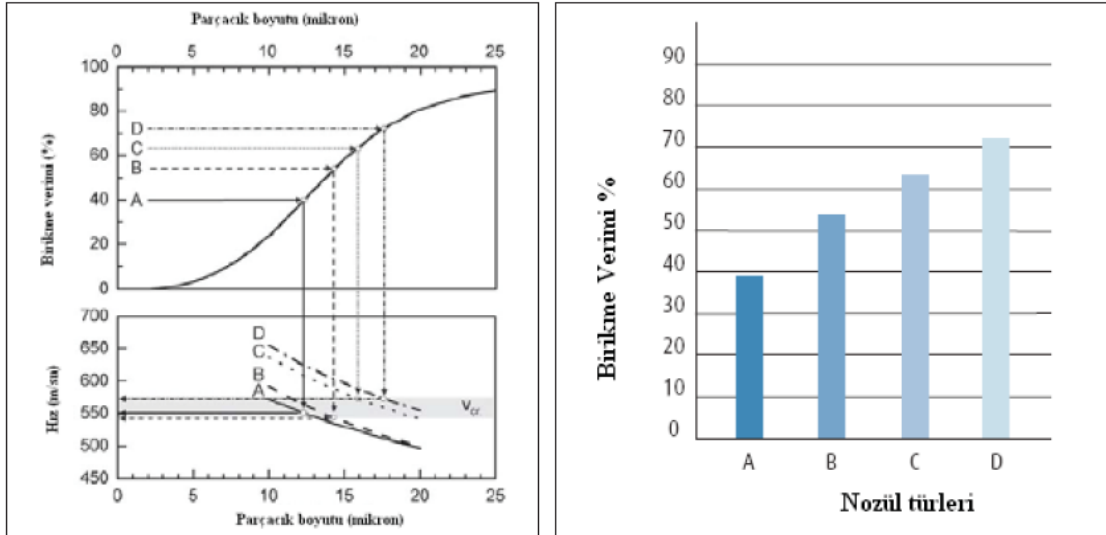
Gaz basıncı, sıcaklığı, türü, püskürten tozun boyutu sabit tutulduğunda teorik olarak ana gaz akım hızının sürekli artmasına rağmen belli bir genişleme oranına kadar genişleme oranı arttıkça püskürtülen tozun hızının arttığı ve maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Bu genişleme oranından daha yüksek genişleme oranlarında püskürtülen tozun yavaşladığı belirlenmiştir [31]. Bu durum tamamen nozülün kesit alanındaki gaz miktarı ile ilişkili olup kesit alanı arttıkça gaz yoğunluğunun ve dolayısıyla püskürtülen toz üzerine etki eden çekim kuvvetinin azalmasıyla açıklanmaktadır.

Standart trompet şeklinde bir nozül içerisinde proses gaz, parçacık hızları ve sıcaklıklarının değişimi CFD (Computational Fluid Dynamics) programı kullanılarak Şekil 3.7’de gösterilmektedir. V_{p5}, T_{p5} : 5µm boyutlu bakır toz hız ve sıcaklığı, V_{p25}, T_{p25} : 25µm boyutlu bakır toz hızı ve sıcaklığı, T_g ve V_g ise sırasıyla gaz sıcaklık ve hızları olarak belirtilmektedir. Yapılan hesaplamalara göre farklı boyutlardaki bakır parçacıklar arasında küçük boyutlu olanların daha yüksek hıza sahip olduğu ortaya konmuştur. Parçacık sıcaklıkları küçük boyutlularda divergent bölgesinden çıkışta hızla artmakta ve ardından hızla düşmektedir. Gaz sıcaklıkları nozül boyunca azalma gösterirken, gaz hızları nozül çıkışına kadar artmakta sonrasında serbest jet akışında basınç şokları nedeniyle düzensiz bir forma girmektedir [32].



Şekil 3.7 : Nozül içerisinde proses gaz, parçacık hızları ve sıcaklıklarının değişimi CFD (Computational Fluid Dynamics) programı kullanılarak değişimi [32].

5 ve 25µm boyutunda bakır tozlar ile yapılan deneysel çalışmalarda nozül geometrisine (A,B,C,D) bağlı olarak 30 bar basınçta N₂ gazı 300 °C'de ısıtılmak suretiyle parçacık hızı ve birikme verimi Şekil 3.9'da gösterilmektedir. A tipi nozül: trompet şeklinde, en küçük çapı 2.7 mm, dışa açılan boyun uzunluğu 70 mm, genişleme oranı:5.8, B tipi nozül:trompet şeklinde en küçük çapı 2.7 mm, dışa açılan (divergent) uzunluğu 70 mm, genişleme oranı:8.8 (standar nozül), C tipi nozül: çan şeklinde en küçük çapı 2.7 mm, dışa açılan (divergent) uzunluğu 100 mm, genişlem oranı:5.8, D tipi nozül: en küçük çapı 2.7 mm, dışa açılan (divergent) uzunluğu 100 mm, genişleme oranı:8.8 tasarlanan nozül geometrileri arasında temel farklılık genişleme oranı ve divergent uzunluğudur. Proses koşullarına bağlı olarak bakır tozların yapışması için yaklaşık 550 m/sn hızlarda püskürtülmesi gerektiği kabul edilmiştir. Buna bağlı olarak Şekil 3.8'den görüleceği üzere çan tipi nozül ile parçacıklar daha yüksek hızlara çıkarılabilmektedir. Dolayısıyla birikme verimi de artmaktadır. Gaz sıcaklığının artması da parçacık hızını artırmaktadır [32].



Şekil 3.8 : SGDP yönteminde nozul geometrisinin parçacık hızına ve birikme verimine etkisi [32].

3.2.3 Gaz türü

Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde kullanılan gazlar proses içerisinde ses üstü hıza ulaşarak momentum transferi ile toz partiküllerin hızlandırılmasını sağlarlar. Bu yöntemde kullanılan beş farklı gaz türünün özellikleri Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Taşıyıcı gazların özellikleri [33].

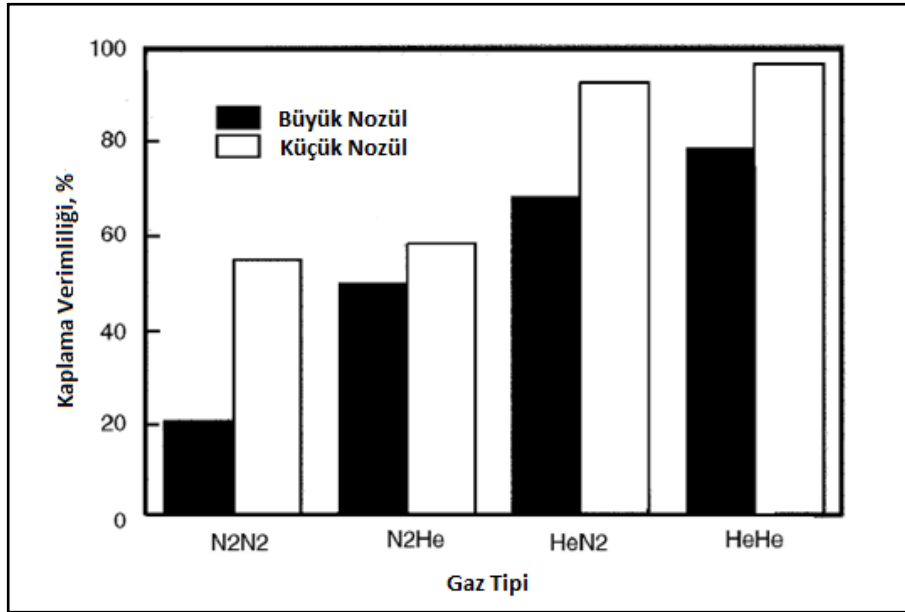
Gaz	Ses Hızı (m/sn)	Yoğunluk (kg/m ³)	Soy ya da reaktif	Fiyat
Hava(80% N ₂ + 20%O ₂)	343	1.225	Reaktif	Ucuz
Azot (N ₂)	349	1.185	Yarı reaktif	Ucuz
Hidrojen (H ₂)	1303	0.085	Reaktif	Pahalı
Argon (Ar)	319	1.69	Soy	Pahalı
Helyum (He)	989	0.168	Soy	Çok pahalı

Çizelge 3.1’de görüldüğü üzere ses hızının hidrojen gazı içinde en yüksek değere ulaşması düşük molekül ağırlığından kaynaklanmaktadır. Gaz dinamik kanunlarından (Denklem 3.2) aynı nozul içinden geçirilen gazın molekül ağırlığı düşürüldüğünde ve/veya öz ısı oranı (γ) arttırıldığında daha yüksek gaz akış hızları elde edildiği bilinmektedir. Bu noktada proses gazı olarak helyum seçildiğinde hava ve azota kıyasla daha yüksek gaz akış hızlarının elde edildiği literatürde bildirilmiştir [28]. Fakat düşük molekül ağırlığına sahip olan hidrojen patlama riski taşıyan bir gaz

olduğu için kullanılması ancak çok ciddi güvenlik önlemleri alınması koşulu ile önerilmektedir.

Buna ilaveten, kullanılan gazın reaktif olmaması tozların oksitlenmesi gibi problemlerin yaşanmaması açısından önemlidir. Hava, taşıyıcı gaz amaçlı kullanılan diğer gaz türüdür. Havanın hızı azota göre daha düşüktür ve hava mümkün olan en ucuz gazdır. İşlem esnasında büyük miktarda gazın tüketilmesi nedeniyle kullanılan gazın ucuz olması da diğer bir önemli husustur. Fakat hava içinde bulunan oksijen sebebi ile tozlar oksitleme riski taşımaktadır [33].

SGDP yönteminde genel olarak kullanılan iki gaz reaktif özellikte olmayan helyum ve azottur. Helyum ve azot gazları kullanılarak yapılan kaplamalardaki verimlilik değişimini Şekil 3.9'da görmekteyiz.



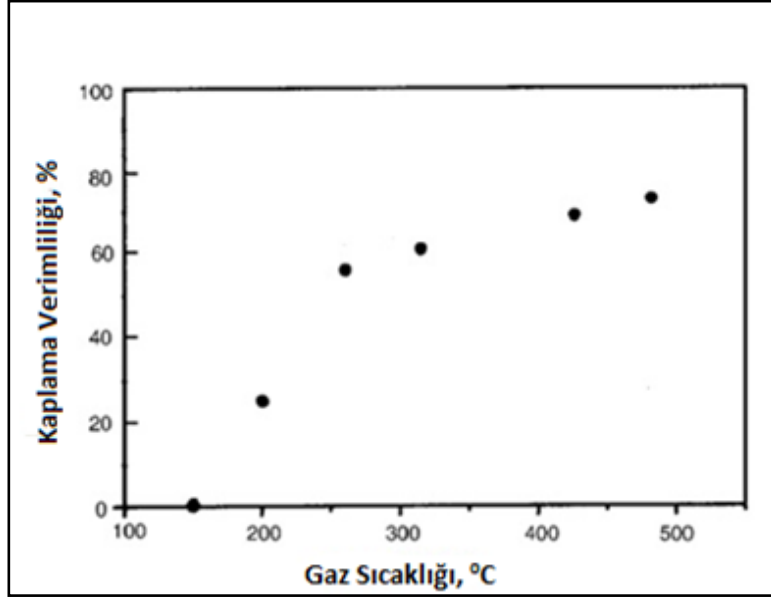
Şekil 3.9 : Kaplama verimliliği ile proses gaz tipi ilişkisi [34].

Proses gazı çeşitliliği ile kaplamanın verimliliğinin değişmesi yanında, kullanılan nozülün boyutları da kaplamanın özelliklerinde değişime sebep olmaktadır. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere küçük nozül kullanılarak yapılan kaplamaların verimliliği fazla olmaktadır. Bunun sebebi nozül alanının küçük olmasına bağlı olarak tozun hızının ve basıncının yüksek olmasıdır.

3.2.4 Gaz sıcaklığı

Smith ve arkadaşları [35] büyük toz boyutuna sahip alüminyum tozlarının farklı gaz giriş sıcaklıklarındaki hızlanma davranışlarını inceleyerek proses gazının nozül giriş

sıcaklığı arttıkça püskürtülen tozların nozül çıkışında daha yüksek hız değerlerine ulaştıklarını tespit etmişlerdir. Proses gazının sıcaklığının değişiminin tozların hızına olan etkisi, kaplamanın verimliliği ile doğru orantılıdır. Yapılan çalışmalarda değişik sıcaklıklar kullanılmış ve kaplama verimliliğinin değişimi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi kullanılan proses gaz sıcaklığının artmasıyla birlikte kaplama verimliliği artmıştır.



Şekil 3.10 : Kaplama verimliliği ile proses gaz sıcaklığı ilişkisi [34].

Önceden ısıtılmış taşıyıcı gaz nozül içerisinde sürekli hızlandığı için ısısının büyük bir kısmını kaybeder. Püskürtülen tozlar da nozül içinde çabuk hızlandığından dolayı sıcak proses gazı ile temas süreleri kısıtlıdır ve bu süre püskürtülen tozun sıcaklığını arttırmak için yeterli değildir [36].

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

3.2.5 Gaz basıncı

Yüksek nozül giriş basıncı, nozül boyunca yüksek basınç değerlerinin elde edilmesini sağlayarak nozül içi ile dışı arasında yüksek basınç farklarına neden olur. Bu yüksek basınç farkı daha yüksek gaz akış hızlarının ve püskürtme hızlarının oluşmasını sağlar. Yüksek basınç kullanılarak yapılan işlemlerde kaplama

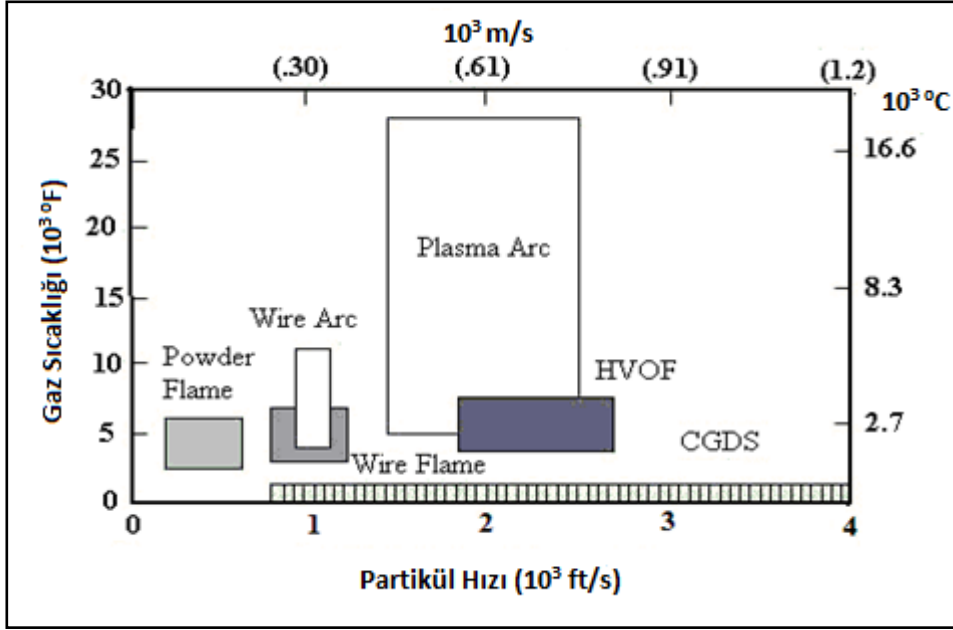
verimliliğinin artması, altlık üzerine püskürtülen tozun altlık üzerinden daha az miktarda geri sekmesi ile açıklanabilir.

Düşük basınç ile yapılan işlemlerde geri sekme işlemi fazla olduğundan, altlık üzerinde meydana gelen kumlama da fazla olacaktır. Bu da yüksek oranda deformasyonun meydana gelmesine sebep olarak, sünek kırılmalara yol açabilir. Yapılan çalışmalarda düşük basınçla yapılan kaplamaların deformasyon sertleşmesine maruz kalarak sertlik değerlerin yüksek çıktığı görülmektedir [38].

3.3 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminin Termal Püskürtme Yöntemleri İle Karşılaştırılması

Termal püskürtme ile kaplama teknolojisinin bir parçası olarak tanımlanan SGDP yönteminde kullanılan tabanca, termal püskürtme yönteminde kullanılanla birbirine benzemektedir. Sıkıştırılmış gaz genellikle elektrik enerjisi kullanılarak 300-800oC sıcaklıkları civarına ısıtılır ardından daralan genişleyen nozülünden geçirilerek süpersonik gaz oluşturulur. Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde kullanılan bu ısıtmanın amacı, termal püskürtme yönteminde olduğu gibi püskürtülen malzemeyi eritmek değildir. Önceden ısıtılan gaz, daralan genişleyen nozülün en küçük kesitindeki ses hızını arttırmakta ve bu da yüksek püskürtme hızlarını oluşturmakla birlikte, gaz kullanımını en aza indirmektedir [33].

Nozülde ilerleyen yüksek basınçtaki gaz, genişleyen kısma ulaştığında daha büyük bir hacimle karşı karşıya kalmaktadır. Hacmin artması ile birlikte genişleyen gaz hızlıca soğumakta ve bazı durumlarda nozülün ucuna gelen gazın sıcaklığı oda sıcaklığının altına kadar düşmektedir. Tabancanın içinde sıcak hava ile çok kısa bir süre temas eden toz partikülleri, kaplama yapılacak olan altlık malzemenin üzerine katı halde ulaşırlar. Şekil 3.11’de soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile termal püskürtme yöntemlerinin yaklaşık işlem sıcaklıklarının ve partikül hızlarının karşılaştırmaları görülmektedir [31].



Şekil 3.11 : Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile termal püskürtme yöntemlerinin yaklaşık işlem sıcaklıklarının ve partikül hızlarının karşılaştırılması.

Bu karşılaştırmadan da açıkça görüldüğü üzere, SGDP yöntemiyle diğer termal püskürtme yöntemlerine göre düşük işlem sıcaklıkları ile birlikte yüksek partikül hızları yakalanmıştır. Bu da SGDP yönteminin, yüzey özellikleri geliştirme yöntemleri arasındaki önemini göstermektedir.

3.3.1 Avantajları

Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde besleme stoğundaki oksijen miktarının en aza indirilmesi, tozlardaki gerilmelerin azaltılması, toz boyut dağılımının optimum duruma getirilmesi ve püskürtme şartlarının optimum durumda ayarlanması durumunda çok yüksek oranda birikme veriminin sağlanması mümkündür [33].

Proses sırasında püskürtülen tozların sahip oldukları kinetik enerjinin büyük bir kısmı plastik deformasyon için harcanır, enerjinin küçük bir kısmı da ısıya dönüşür. Bu ısının yardımıyla kaplamada proses sırasında meydana gelen porozite ve çatlakların doldurulması sağlanır [33]. Dolayısıyla SGDP yöntemi ile yüksek yoğunlukta kaplamalar elde edilebilmektedir.

SGDP yöntemi ile üretilen kaplamalar çok yüksek yoğunluğa ve yüksek bağ kuvvetine sahip oldukları için kaplama termal ve elektrik iletkenlik değerleri açısından çok iyi özelliktedir. Yapılan çalışmalarda SGDP yöntemi ile üretilmiş kaplamaların iletkenlik değerleri altlık malzemenin %92'sine kadar çıkabilirken, termal püskürtme tekniğinde bu değer %40-63 arasında kalmıştır [33].

Kaplama sırasında tozların altlık malzemeye çarpması esnasında oluşan plastik deformasyon sebebiyle kaplamalar ana malzemeden daha yüksek sertlik değerlerine ulaşmaktadır [33].

Kaplamaların düşük sıcaklıklarda üretilmesi sayesinde püskürtme prosesi esnasında termal püskürtme sırasında oluşan oksidasyon, dekompozisyon, farklı fazların oluşması gibi yüksek sıcaklığa bağlı olumsuz etkiler gözlenmemektedir. SGDP yönteminde partiküller arasında faz değişikliği söz konusu değildir [33].

SGDP yönteminin düşük sıcaklıkta ve katı halde gerçekleşen bir proses oluşu nanomalzemeler ve amorf malzemeler gibi proses sıcaklığına duyarlı malzemelerde de kullanımını mümkün kılmaktadır. Diğer toz ile üretim tekniklerinde (presleme, sinterleme, termal püskürtme, vb.) gözlenen kabul edilemez miktardaki tane büyümesi SGDP yöntemi esnasında oluşmaz.

Birçok uygulama sahasına alternatif ekonomik ve başarılı bir çözüm getirme olasılığı yüksek olan soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir [39]:

- İstenmeyen faz ve oksidasyon oluşumunun olmaması.
- Kaplanan ve kaplanacak malzemelerin işlem sonrası tüm özelliklerinin aynı kalması.
- Düşük kalıntı gerilme değeri.
- Kaplama boyunca elektrik ve ısıya kolaylıkla iletilebilmesi.
- Yüksek sertlik, yüksek kaplama yoğunluğu ve soğuk işlem görmüş bir yapı elde edilmesi.
- Isıya duyarlı malzemelerin kaplanabilmesi.
- 5-10 µm tane boyutundan daha küçük boyutlu toz partiküllerin püskürtülebilmesi.
- Altlık ve kaplanacak malzemelerin farklı malzeme grubunda olması halinde bile rahatlıkla çalışılabilmesi.
- Kaplanacak olan malzemenin yüzey hazırlama işlemlerinin minimize edilmesi.

- Yüksek hızda toz besleme ve buna bağlı olarak verimlilik artışı.
- Yüksek hızda ve yüksek verimde kaplama yapabilmek.
- Kaplama sırasında saçılan partiküllerin geri dönüşümünün yapılabilmesi.
- Kaplama sırasında altlık malzemede çok düşük sıcaklık artışı görülmesi.
- Yüksek sıcaklığa sahip gaz, radyasyon, patlayıcı gaz gibi tehlikeli unsurların işlem sırasında bulunmayışı nedeniyle uygulamanın güvenli oluşu.

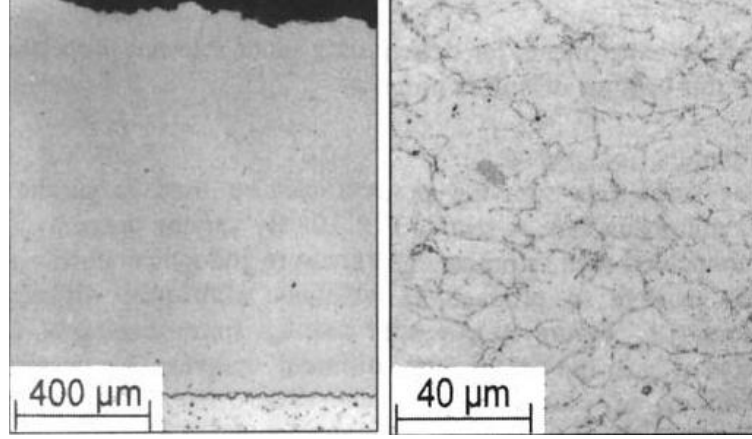
3.3.2 Dezavantajları

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamaların iyi bir yapışma mukavemetine sahip olabilmeleri için altlık malzemenin sünekliğinin belli bir değerin üstünde olmaması gerekmektedir. Çok sünek malzemelerde yapışma özelliği zayıflamaktadır, bu da kaplama yapılabilecek olan malzeme sayısını kısmen de olsa kısıtlamaktadır. Kompozitler püskürtülebilirken, saf seramikler ve bazı alaşımlar bu yöntemle püskürtülemezler. Yöntemin bir diğer dezavantajı, toz püskürtme tabancasının sadece gördüğü yerleri kaplaması nedeniyle karmaşık şekilli parçaların ve iç yüzeylerin kaplanması zorludur. [33]. Ayrıca bazı kaplama işlemlerinde helyum gazı kullanımı gerekebileceği için, üretim maliyetleri artabilmektedir.

3.4 Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme Yönteminin Uygulamaları

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi, proses olarak düşük sıcaklıkta ve ergime olmaksızın partiküllerinin başlangıçtaki faz ve bileşimlerinin korunması, yüksek biriktirme oranı, yüksek kaplama dayanımı, iş parçasına düşük ısı taşınımı ve soğutma ihtiyacının azaltılması, katılaşma geriliminin olmaması gibi özelliklerin elde edilmesine imkan sağlamaktadır [33]. Belirtilen bu özelliklerinden dolayı SGDP yöntemi ile üretilen kaplamalar günümüzde mekanik, ısı, elektriksel, korozyon ve aşınma dayanımı gibi özelliklerin ön plana çıktığı havacılık ve uzay, savunma, otomotiv, enerji, elektronik ve yarı iletken, kimya ve biyomedikal endüstrisi gibi birçok alanda kullanım olanağı bulmaktadır.

Bakır metali soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde en çok kullanılan malzemelerdendir. Şekil 3.12’de alüminyum üzerine kaplanmış bakır tozlarının mikroyapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.12 : Alüminyum altlık üzerine SGDP yöntemi ile yapılan bakır kaplama görüntüsü

Şekilde de kolayca görülebileceği üzere, kaplamanın yapısında çok az düzeyde porozite bulunmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmada kaplamanın oksijen miktarı yaklaşık olarak 0.1% düzeyindedir. Az miktarda olan oksijen miktarı ile düşük seviyedeki porozite oranının birleşmesi, soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemiyle yapılmış olan kaplamanın mükemmel elektrik özelliğine sahip olmasını sağlamaktadır [40].

3.5 Literatürde Bulunan Benzer Çalışmalar

C.Borchers ve arkadaşları [41] soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılacak bakır kaplamaların düşük poroziteye ve sıkı bağlara sahip olacağını hedefleyerek ürettikleri numuneleri soğuk haddelenmiş sac ve termal püskürtme yöntemleri ile yapılmış kaplamalar ile karşılaştırarak değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamada altlık malzemesi olarak alüminyum, nozül giriş basıncı olarak 25 bar ve kritik hız olarak 570 m/sn değeri kullanılmıştır. Kullanılan bakır tozlarının partikül boyutunun 5 ile 20 µm arasında olduğu çalışmada püskürtme işlemi 300 °C sıcaklığında yapılmıştır. Oda sıcaklığında yapılan öz direnç ölçümlerinde soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplama ve soğuk haddelenmiş bakır sac numunelerin değerleri birbirlerine yakın çıkmış olup, termal püskürtme ile yapılan kaplamanınkinden daha düşük değerdedir. Kullanılan hammaddenin oksijen oranı ağırlıkça %0.07 olarak bildirilmiştir. Soğuk dinamik gaz püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamadaki oksijen oranı ağırlıkça %0.08 değerinde, termal püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamada ise %0.4-0.6 değerleri arasında bulunmuştur.

M. Fukumoto ve arkadaşları [42] saf bakır tozlarını paslanmaz çelik ve alüminyum alaşımı üzerine soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile kaplayarak toz boyutu, proses gaz çeşidi, gaz hızı ve sıcaklığı, altlık malzemesinin sıcaklığı gibi parametrelerin yapışma davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışma gazı olarak hava ve helyum kullanılmış olup gaz basıncı 1MPa'a kadar değişik değerlerde ayarlanmıştır. 5 µm, 10 µm ve 15 µm ortalama boyutlara sahip saf bakır tozlarının kullanıldığı çalışmada kaplamalar oda sıcaklığındaki ve 673K'e kadar ısıtılmış altlık malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kaplama sonucunda altlık malzeme yüzeyinde yarım küresel şekle sahip bakır tozları gözlemlenmiştir. Bakır tozların altlık malzemesine çarpması sonucu plastik deformasyona uğramaları sayesinde beliren bu şekiller, deformasyon sertleşmesi sebebiyle sertlik artışını göstermektedir. Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamada, altlık sıcaklığın artırılması, altlık yüzeyinde oluşan ilk kaplama katmanının daha yüksek birikme verimi ile oluştuğunu göstermektedir. Bakır toz hızının, çalışma gazının sıcaklığından ziyade, çalışma gazının basıncından etkilendiği ve artan gaz basıncının tozların yüzeyde birikmesinde olumlu bir etki yaptığı saptanmıştır.

Peter C. King ve arkadaşları [43] soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile bakır tozlarını ticari saflıktaki alüminyum (CP) ve 7050 alaşımının üzerine püskürterek yapacakları kaplamalarda kullanılacak olan altlık malzemesinin sertliği ile yapışma özelliği arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Mukavemetli, homojen bir mikro yapıda olması ve intermetalik partiküllerin daha düşük konsantrasyonda bulunmasından dolayı karşılaştırma olarak 7050 alaşımının seçilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan küresel bir morfolojiye sahip bakır tozlarının ortalama boyutu 15.2 µm olarak bildirilmiştir. Nozül ucunun altlığa uzaklığı 20 mm, tabancanın hareket hızı 0.05 m/sn olarak belirlenmiştir. Kaplama çalışmalarında nozül giriş basıncı 25 bar olan azot tercih edilmiş olup gazın nozül giriş sıcaklığı 200°C, 400°C, 600°C olarak seçilmiştir. Bu sıcaklık değerlerinin arttıkça, bakır tozlarının hızlarında da bir artışın olduğu gözlenmiştir. Alüminyum 7050'nin üzerine yapılan kaplamalarda, ticari saflıktaki alüminyuma göre daha bölgesel bir deformasyon karakteristiği görülmüş olup, daha yüksek arayüzey sıcaklıkları elde edilmiştir. Birikme verimi, parçacıkların yüzeye gömülmesi ile açıklanarak daha yumuşak olan ticari saflıktaki alüminyumda 7050 alaşımına göre daha fazla gerçekleşmiştir.

Wen-Ya Li ve arkadaşları [44] soğuk gaz dinamik püskürtme tekniği ile bakır tozlarını çelik altlık üzerine püskürterek bakır tozların birikme veriminin kullanılan gazın sıcaklığına ve yüzey oksitlenmesine bağımlılığını ayrıca da yüzey oksit seviyesinin arayüzey mikroyapısına ve yapışma mukavemetine etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda kullanılan bakır tozlarının ortalama boyutunun 20,5 μm ve bu tozların oksijen içeriğinin de ağırlıkça %0,04 ve %0,38 olduğu bildirilmiştir. Nozül ucunun numuneye uzaklığı 20 mm, tabancanın hareket hızı ise 80 mm/sn olarak ayarlanmış olup çalışma gazı olarak helyum ve azot gazları kullanılmıştır. Artan gaz ve parçacık sıcaklığının birikme verimini arttırdığı buna karşılık başlangıçta kullanılan tozun oksijen miktarındaki artışın birikme verimini düşürdüğü tespit edilmiştir. Benzer mikroyapı ve mikrosertlik değerlerine sahip olmalarına rağmen, yüksek oksijen içeriğine sahip olan toz ile yapılan kaplamada bakır tozlarının arayüzeyinde daha çok oksit inklüzyonları görüldüğü bildirilmiştir. Başlangıç tozundaki yüksek oksijen içeriğinin yapışma mukavemetini önemli miktarda düşürdüğü tespit edilmiştir. Bunun gerekçesi olarak bol miktardaki oksit inklüzyonlar gösterilmiştir ki bu yapılar metallerin etkin bir bağ yapma yeteneğini engellemektedir. Bu gelişmelere rağmen biriken kaplamanın kırılma davranışı değişmemiştir.

Hyun-Ki Kang ve arkadaşları [45] plazma püskürtme ve soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemlerini kullanarak çelik altlığın üzerine bakır ve topaklanmış tungsten kompozit tozunu kaplamışlardır. Tungsten toz boyutu 1 μm ve bakır toz boyutu 45 μm altı olacak şekilde seçilmiştir. Her iki tozun da saflığı %99.9 olarak belirlenmiş olup tozlar ağırlıkça %25 bakır ve %75 tungsten olarak karıştırılmıştır. Tozlar kaplamada kullanılmadan önce bilyalı öğütücüde 20 saat boyunca alaşımlandırılmıştır. Yapılan incelemelerde soğuk gaz dinamik püskürtme tekniği ile üretilen kaplamanın plazma püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamaya göre daha az porozite içerdiği ve bakırın oksitlenmediği tespit edilmiştir. Buna ek olarak soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamanın sonucunda ağırlıkça %40 tungsten kaybı olmuştur. Bu kaybın nedeni ise yetersiz plastik deformasyon olarak gösterilmiştir. Tungstence zengin olan bölgelerde çok fazla porozite görülmüştür. Kaplamadaki tungsten miktarı, artan proses gaz sıcaklığı ile artmıştır. Bu artış artan toz püskürtme hızı ile ilişkilendirilmiştir.

P. Sudharshan Phani ve arkadaşları [46] soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile nano boyutlardaki bakır ve alümina tozlarını bakır altlık üzerine püskürterek ısıtma işlem sıcaklığının değişiminin porozite oluşumuna, kaplamadaki tane boyutuna, mikrosertlik değerine ve elektrik iletkenliğine etkilerini incelemişlerdir. Bu kaplama ile kıyaslanmak üzere sadece bakır tozu kullanılarak bir kaplama çalışması daha gerçekleştirmişlerdir. Kaplama işlemleri 2 MPa basınç altında yapılmıştır. Kullanılan alümina ve bakır tozları mekanik olarak öğütülerek 22-45 µm aralığında hammadde üretilmiştir. Karşılaştırma yapılabilmesi için kullanılan bakır tozunun tane boyutu 10-45 µm aralığındadır. Altlık ile nozül ucunun arasındaki mesafe 15 mm ve toz besleme hızı 10 g/dakika olarak ayarlanmıştır. Deneylerdeki ısıtma işlem sıcaklıkları ise 300°C, 600°C ve 950°C olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda ısıtma işlem sıcaklığının artması tane boyutunun her iki kaplamada da artmasına neden olmuştur. Porozite oranındaki değişim bakır alümina kaplamasında değişmezken, bakır kaplamada keskin bir düşüş gerçekleşmiştir. İletenlik değeri ısıtma işlem sıcaklığı ile birlikte artış göstermiş olup bakır kaplamada 300°C'den sonra sabit kalmıştır. Isıtma işlem sıcaklığı sertlik değerinde her iki numune için de düşüşe neden olmakla birlikte sadece bakır kaplamada bu düşüş daha etkili görülmüştür.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın amacı Cu altlık üzerine soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile Cu matrisli Al_2Cu intermetalik takviyeli kompozit kaplama gerçekleştirmektir. Kaplamaların karakterizasyonu; faz analizleri, mikroyapı incelemeleri, sertlik ve elektrik iletkenliği ölçümleri, aşınma deneyleri ile gerçekleştirilmiştir.

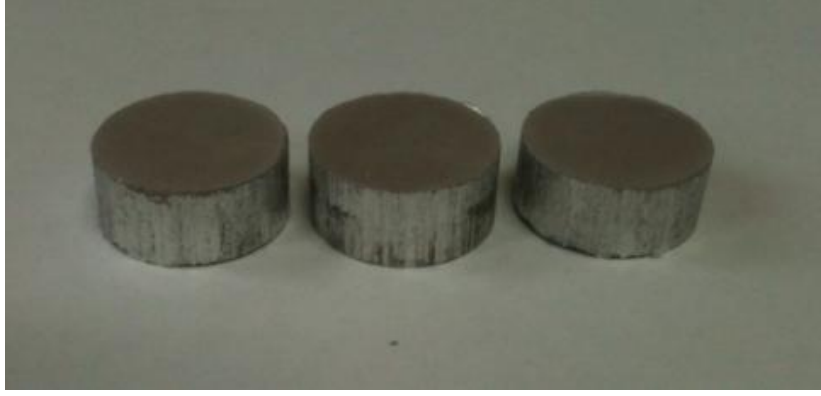
4.1 Kaplamada Kullanılan Tozların Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda altlık malzeme olarak kaynak elektrodu üretimine uygun kompozisyonda bakır metali kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan tozların özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Çalışmada kullanılan metal tozların özellikleri.

Toz	Firma	Bileşim	Boyut (μm)	Morfoloji
Cu	Alfa Aesar	%99,9	10	Küresel
Al	Alfa Aesar	%99,5	12	Küresel
Al_2Cu	-	%47 Al %53 Cu	<45	Düzensiz

Çizelge 4.1’deki Al ve Cu tozları ticari olarak temin edilmiş olup, Al_2Cu tozu bu tozlar kullanılarak üretilmiştir. Bu amaçla öncelikle ağırlıkça %47 Al ve %53 Cu içeren toz karışımlarından 100 bar soğuk presleme basıncı ile peletler oluşturulmuştur. Cu-Al ikili denge diyagramına göre Al_2Cu intermetalik fazını elde etmek için peletler hava atmosferinde $550^{\circ}C$ ’de 6 saat süre ile ısıtılma tabi tutulmuştur. Isıl işlem sonrasında peletlerin makro ölçekli görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir.

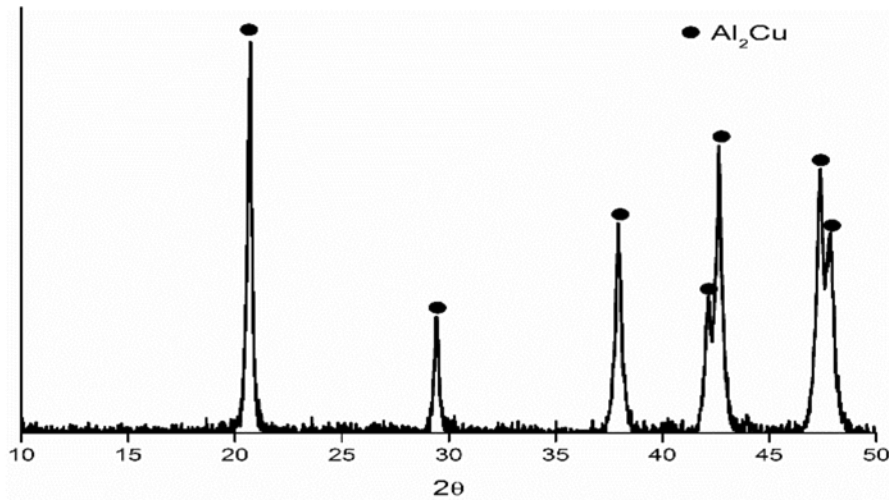


Şekil 4.1 : Hazırlanan peletler.

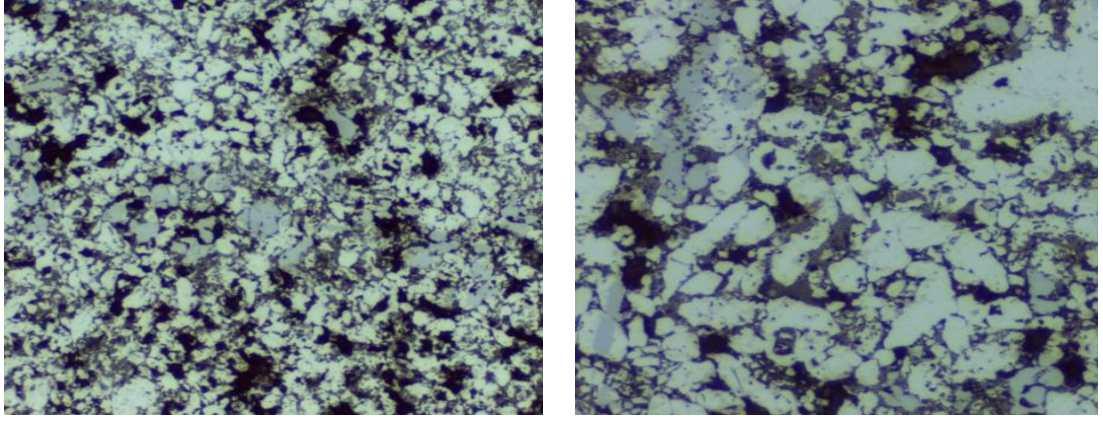
Bu çalışma kapsamında üretilecek kompozit kaplamalarda takviye amaçlı kullanılacak olan intermetalik tozlar, elde edilen peletlerin mekanik kırma yöntemi kullanılarak toz haline getirilmesi ile elde edilmiştir. Mekanik kırma işlemlerinde yatay ekseninde titreşim yapan RetschTM MM400 marka-model mekanik alaşımlama cihazı kullanılmıştır. Mekanik kırma işlemi, 20Hz’de, 30 dk süre ile gerçekleştirilmiştir. Kabaca kırılmış olan peletler çelik havan içerisinde argon ortamında konulmuştur, yine argon ortamında açılmıştır.

Takviye elemanı olarak kullanılan intermetalik tozun boyutunun tespiti için elek analizi yapılmış ve 45 µm boyutundan daha düşük tozlar elde edilmiştir. Kaplama işleminde kullanılacak olan toz karışımlarına eklenecek intermetalik miktarının hesaplanmasında teorik yoğunluk dikkate alınmıştır.

Laboratuvar şartlarında oluşturulan intermetalik malzemeye ait XRD paterni ve SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de yer almaktadır.



Şekil 4.2 : Al₂Cu intermetalik tozunun XRD paterni.



Şekil 4.3 : Isıl işlem sonrası peletlerin mikroyapı görüntüleri.

4.2 Kaplama Parametrelerinin Belirlenmesi

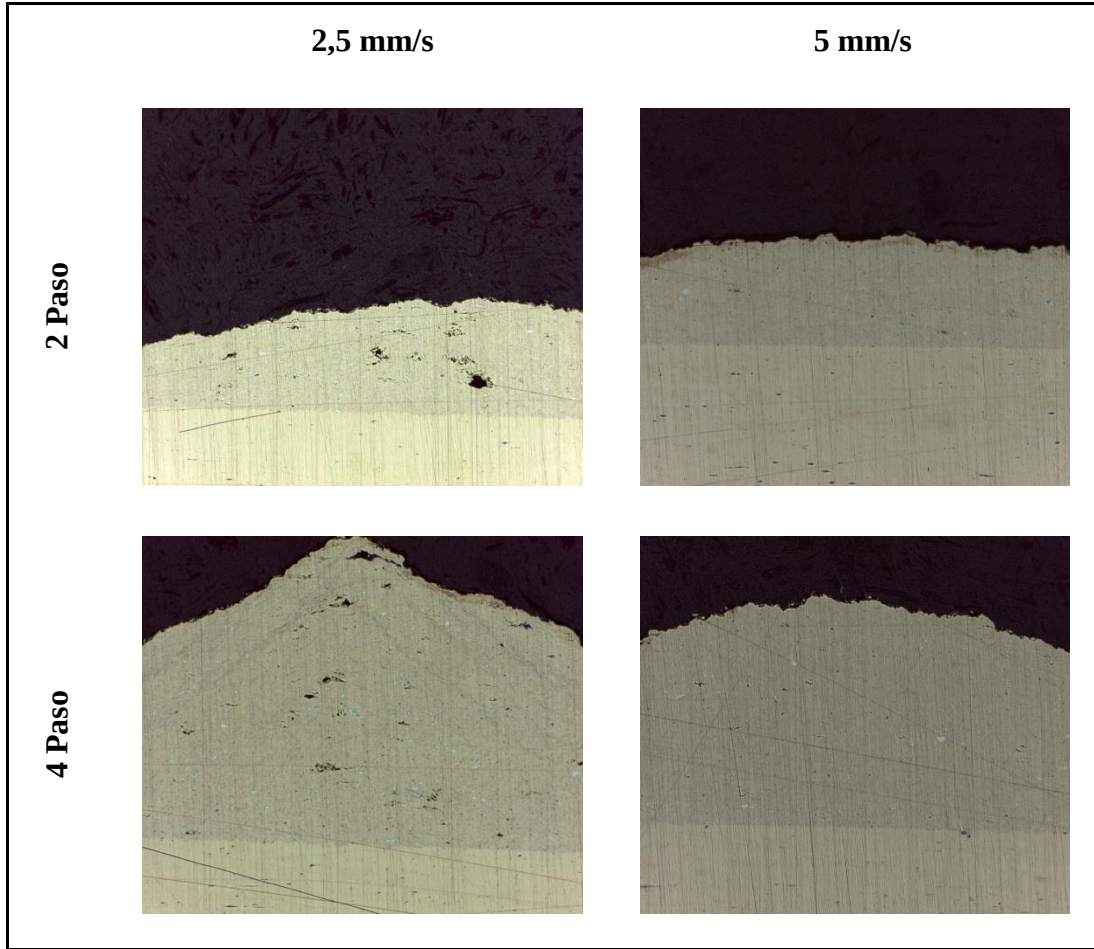
Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile yapılacak kaplamaların parametrelerinin belirlenmesi için toz karışımları hazırlandıktan sonra optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Böylelikle farklı hacim oranlarındaki intermetalik takviyeli kompozit kaplamalar için en yüksek verimliliğe sahip kaplama parametreleri belirlenmiştir.

En uygun kaplama parametrelerini tespit etmek amacıyla hacimce %10 Al_2Cu ve %90 Cu içeren toz karışımları RUSONIC™ marka soğuk gaz dinamik püskürtme cihazı ile saf bakır altlığa püskürtülmüştür. Çalışma gazı olarak 6 bar nozül giriş basıncına sahip hava kullanılmıştır. Kaplama çalışmalarında nozül çıkışı ile numune arası mesafe 10 mm olarak ayarlanmış ve sabit tutulmuştur. Toz besleme hızı olarak da 8 kademeli toz besleme ünitesinin 3. kademesi kullanılmıştır. Bakır altlık servo motor kontrollü bir tutucuya bağlanmış ve kaplama işlemleri bir çizgi boyunca farklı nozül hızlarında (2.5 mm/sn ve 5 mm/sn) ve paso sayılarında (2 ve 4) gerçekleştirilmiştir.

SGDP yöntemi ile üretilen numunelerin, kaplama kalitelerinin incelenmesi ve kaplama kalınlıkları hakkında bilgi sahibi olmak için mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Bunun öncesinde SGDP yöntemi ile üretilen numuneler, kaplanan yüzeye dik yöndeki kesit boyunca kesilerek sıcak bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler zımparalama ve parlatma işlemlerine tabii tutulmuştur. Ayrıca kaplama parametrelerinin sertlik değerleri üzerindeki etkilerini incelemek üzere sertlik değerleri alınmıştır.

Hacimce %10 Al_2Cu içeren toz karışımı ile farklı hızlarda ve farklı paso sayısında yapılmış kaplamaların optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.4’de verilmiştir. Bu

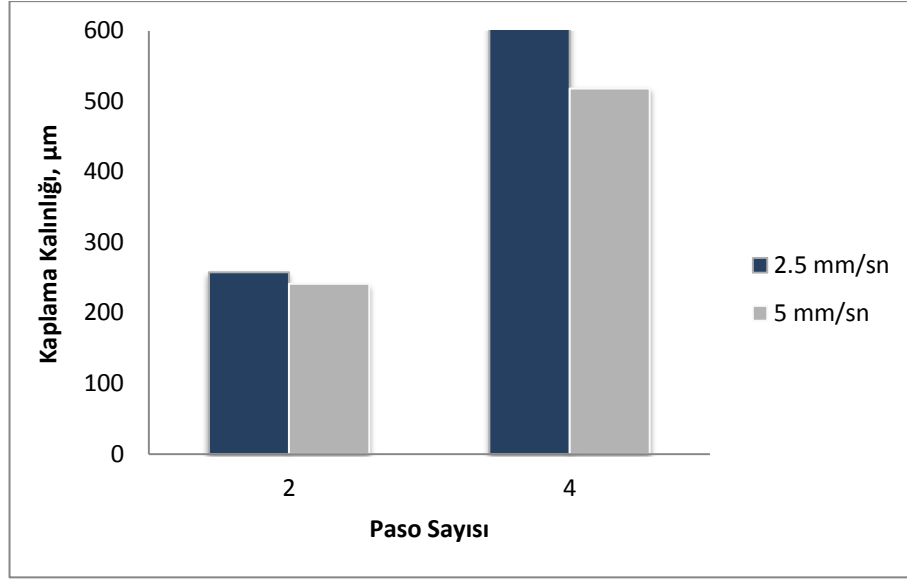
görüntüler göz önünde bulundurularak kaplamaların altlık malzeme yüzeyine yapışma kalitesi ve porozite miktarları belirlenmiştir.



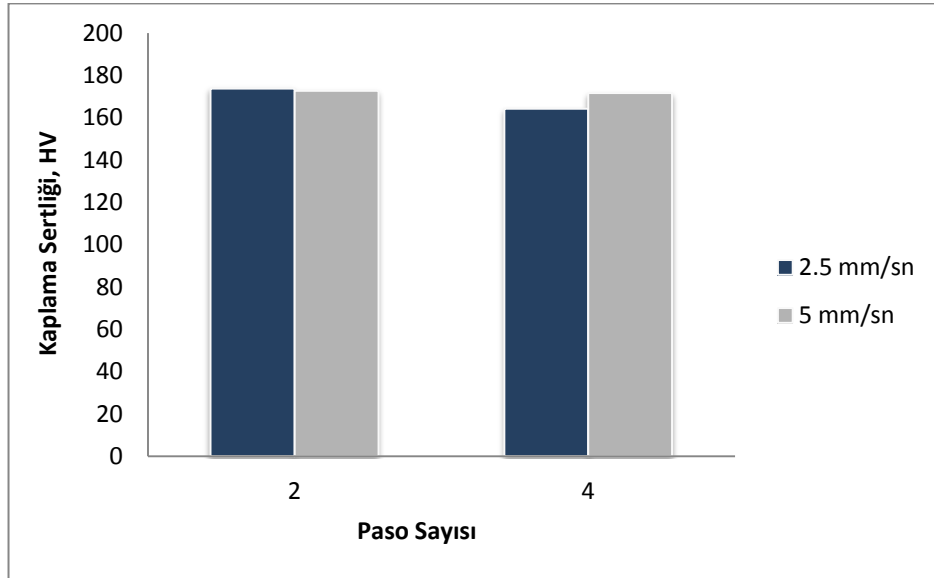
Şekil 4.4 : Hacimce %10 Al_2Cu içeren toz karışımı ile farklı hızlarda ve farklı paso sayısında yapılmış kaplamaların optik mikroskop görüntüleri (x100).

Optik mikroskop çalışmaları kaplamaların yoğun (düşük poroziteli) bir yapıya sahip olduğunu ve kaplama altlık arayüzeyinde herhangi bir süreksizlik oluşturmayacak şekilde sıkıca bağlandığını ortaya çıkarmıştır.

Kompozit kaplamaların kalınlık ve sertlik değerleri sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmiştir. Sabit işlem ve besleme hızlarında artan paso sayısı ile beraber kaplama kalınlıkları artmıştır. Diğer taraftan paso sayısı ile beraber kaplama sertlik değerlerinin çok fazla değişmediği görülmüştür.



Şekil 4.5 : %10 Al₂Cu takviyeli bakır matrisli kompozit kaplamaların hız, paso sayısı ve kaplama kalınlığı ilişkisi.



Şekil 4.6 : %10 Al₂Cu takviyeli bakır matrisli kompozit kaplamaların hız, paso sayısı ve sertlik ilişkisi.

Düşük hızlarda (2.5 mm/s) yapılan denemelerde kaplamaların yüzeyinde oksitlenmenin meydana geldiği gözlenmiştir. Yüksek basınçtaki havanın altlık yüzeyi ile düşük proses hızından dolayı daha çok süre temasta olması ve aynı yüzeye çarpan partikül sayısının çok olması ile birlikte lokal ısınmaların artması bakır tozlarının oksitlenmesine yol açmaktadır. İşlem sırasında oksitlenme bakır tozlarının birbirlerine sıkıca bağlanmalarını engelleyebileceği ve yapışmayı azaltabileceği düşünülmüştür.

Diğer taraftan oksitlenme problemi yüksek işlem hızlarında gözlenmemiştir. Bunun nedeni de yüksek işlem hızında oksitlenmenin birim zamanda aynı noktaya düşük işlem hızları ile yapılan işleme göre daha az toz karışımının çarpması sonucu altlık yüzeyinde lokal sıcaklığın daha az olmasından kaynaklanmasıdır. Yüksek işlem hızında gerçekleşen aynı noktaya daha az toz karışımının çarpmasının bir başka sonucu ise bu işlem sırasında yüzeyde daha düşük kaplama kalınlık değerlerinin elde edilmesidir.

2.5 mm/sn ve 5 mm/sn hızlarıyla yapılan kaplamaların kaplama kalınlığı ve sertlik değerleri karşılaştırıldığı zaman, SGDP yöntemi ile üretilecek olan kompozit kaplama için en uygun parametrenin 5 mm/sn hız ve 4 paso sayısında olmasına karar verilmiştir. Çizgi kaplamalar sonucunda elde edilen kaplama kalınlık ve sertlik değerleri, kaplama mikroyapıları ve işlem sırasında kaplama yüzeyinin oksitlenme davranışına bağlı olarak patern kaplamalar için en uygun parametreler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Patern kaplamalarda kullanılan tozlar ve kaplama parametreleri.

Toz karışımı (hacimce)	İşlem hız (mm/sn)	Paso sayısı	Besleme hızı	Pasolar arası mesafe (mm)
%100 Cu	7.5	4	3	2
%5 Al ₂ Cu + %95 Cu	5	4	3	1
%10 Al ₂ Cu + %90 Cu	5	4	3	1
%15 Al ₂ Cu + %85 Cu	5	4	3	1

4.3 Kaplama Üretimi

Çizelge 4.2’de yer alan optimum parametreler dikkate alınarak hazırlanan toz karışımları patern oluşturacak şekilde bakır altlık üzerine soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile püskürtülmüştür. Bakır altlık servo motor kontrollü bir tutucuya bağlanmış ve kaplama işlemleri tüm yüzeye uygulanmıştır.

Toz karışımı içerisindeki intermetalik miktarı hacimce %5, %10 ve %15 olarak değiştirilip aynı parametreler kullanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiş ve kaplama verimliliğinin, fiziksel ve mekanik özelliklerinin intermetalik miktarı ile değişimi incelenmiştir. Ayrıca takviyesiz kaplamanın intermetalik takviyeli kompozit kaplamalarla özelliklerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla hacimce %100 Cu tozu da saf bakır altlığına püskürtülmüştür.

Kaplama işleminde çalışma gazı olarak 6 bar nozül giriş basıncına sahip hava kullanılmıştır. Toz besleme hızı olarak da 8 kademeli toz besleme hızlarından 3. kademe kullanılmıştır. Nozül çıkışı ile numune arası mesafe 10 mm olarak ayarlanmış ve sabit tutulmuş olup, seçilen parametreler Çizelge 4.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.3 : SGDP yöntemi ile kaplamada kullanılan parametreler.

Çalışma Gazı (Hava)	Tabanca- Numune Arası Mesafe	Kaplama Hızı	Paso Sayısı	Besleme Hızı
6 bar	10 mm	5 mm/sn (Cu için 7.5 mm/sn)	4	3/8 kademe

4.4 XRD Analizi

Kaplamaların yapılarındaki fazların belirlenmesi için GBC, MMA 027 X ışınları difraktometresinde Cu K α ışınları altında 30°-90° tarama aralığında analizler yapılmıştır.

4.5 Mikroyapı İncelemeleri

Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile üretilen numuneler, kaplanan yüzeye dik yöndeki kesit boyunca BUEHLER Isomet hassas kesici ile kesilerek sıcak bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin ardından numuneler 3 μ m’lik elmas süspansiyon ile STRUERS MD Mol çuha kullanılarak parlatılmıştır.

Parlatılan numunelerin kesit mikroyapıları LeicaTM ICC50 HD optik mikroskobu ve Hitachi TM1000 masaüstü taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Kaplama kalınlıkları optik mikroskobun kendi yazılımı yardımıyla ölçülmüştür. Her bir kaplama için 5 farklı yerden kaplama kalınlığı ölçülmüş ve ortalamaları ile standart sapmaları hesaplanmıştır.

Kaplama içinde bulunan gerçek intermetalik ve porozite yüzdelerinin hesabı için Clemex görüntü analiz programı kullanılmıştır. Her bir numune için 5 farklı optik mikroskop görüntüsünden kaplamalardaki intermetalik ve porozite miktarları tespit edilmiş ve ortalamaları hesaplanmıştır.

4.6 Sertlik Ölçümleri

Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler kullanılarak kaplamaların sertlikleri kesitten ölçülmüştür. Hacimce %5, %10, %15 intermetalik ve saf bakır tozlarıyla üretilmiş kaplama numunelerin yüzey sertlikleri 25 gram yük altında ($HV_{0.025}$) 10 saniye uygulama süresiyle, Vickers batıcı uç kullanılarak ShimadzuTM HMV mikro sertlik cihazında ölçülmüştür. Numune başına değişik bölgelerden yaklaşık 20 ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak bir sertlik değerine ulaşılmıştır.

4.7 Elektrik İletkenliği Ölçümleri

Kaplama numunelerinin yüzeyinden HockingTM Auto Sigma 3000 electrical conductivity meter cihazı ile her numune için 5'er adet iletkenlik değerleri alınmış ve bu değerlerin ortalaması kullanılarak SGDP yönteminin, intermetalik miktarının kaplamanın elektrik iletkenliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ölçümler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

4.8 Aşınma Testleri

Numunelerin aşınma deneyleri, TribotechTM aşınma test cihazında, 6mm çapında çelik bilya kullanılarak yapılmıştır. Cihazın uygun bir şekilde çalışması için birkaç ön deney yapılarak aşınma deney parametreleri belirlenmiştir. Bu ön çalışmalar sonucunda Çizelge 4.4'de görüldüğü üzere 3 N ve 1 N yükte en uygun deneylerin yapılabileceği bulunmuştur.

Çizelge 4.4 : Aşınma deney parametreleri.

Uygulanan Yük	Toplam Kayma Mesafesi	Aşınma İzi Uzunluğu	Kayma Hızı	Çalışma Sıcaklığı	Çalışma Ortamı Nem Oranı
3 N	50 m	5 mm	10 mm\sn	25±1 °C	% 40±12
1 N	50 m	5 mm	10 mm\sn	24±1 °C	% 35±10

Deney süresince sürtünme katsayısı değerleri test cihazı ile grafik haline getirilmiştir. Her test sonrası, çelik bilyanın üzerinde oluşan izler ilk haliyle ve etil alkol ile temizlendikten sonra optik mikroskop ile görüntülenmiştir. Kaplamaların aşınma yüzeyleri ise hem optik hem de taramalı elektron mikroskoplarında incelenmiştir. Aynı deneyler alümina top kullanılarak da denenmiş fakat herhangi bir aşınma sonucu elde edilememiştir.

Aşınma deneyleri yapıldıktan sonra VEECO DEKTAK 6M profilometresi kullanılarak her bir numune için 5 adet aşınma izi topografik profilleri çıkarılmıştır. Profillerden aşınma iz alanları hesaplanarak her bir aşınma izi için ortalama alan değerleri belirlenmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurularak numunelerin aşınma davranışları tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak, numune yüzeylerinde oluşan aşınma izleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bu mikroskoba bağlı olan EDS ile incelenmiş ve ne tür bir aşınma davranışının elde edildiği aşınma izi fotoğrafları ile değerlendirilmiştir.

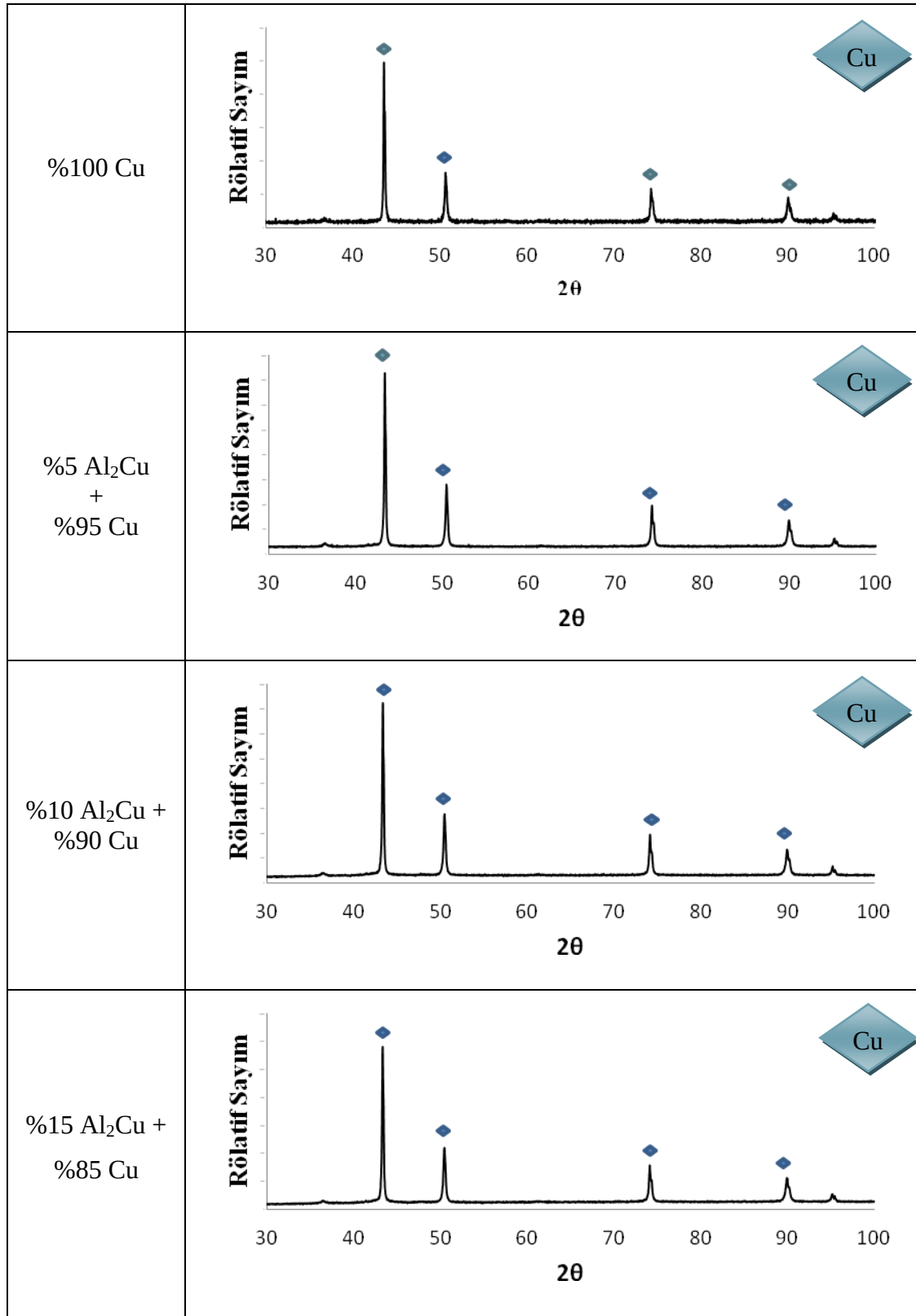
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 Faz Analizleri

Besleme tozlarının hazırlanmasında kullanılan Cu tozuna ait XRD paterni, takviyesiz Cu, ve Cu matrisli Al_2Cu intermetalik takviyeli kompozit kaplamaların XRD paternleri kıyaslama amacıyla Şekil 5.1’de verilmiştir.

Bakır tozuna ait XRD paterni ile kompozit kaplamalara ait XRD paternleri kıyaslandığında, besleme tozlarında bulunan bakır dışında herhangi bir faza ait pikin bulunmadığı görülmüştür. Bu durum püskürtme sırasında besleme toz bileşenleri (Cu, Al_2Cu) arasında kayda değer bir kimyasal reaksiyon olmadığını göstermiştir. Bu durumun soğuk gaz dinamik püskürtme prosesi gereği püskürtme işlemi sırasında tozların yüksek sıcaklıklara maruz kalmamasından kaynaklanmıştır.

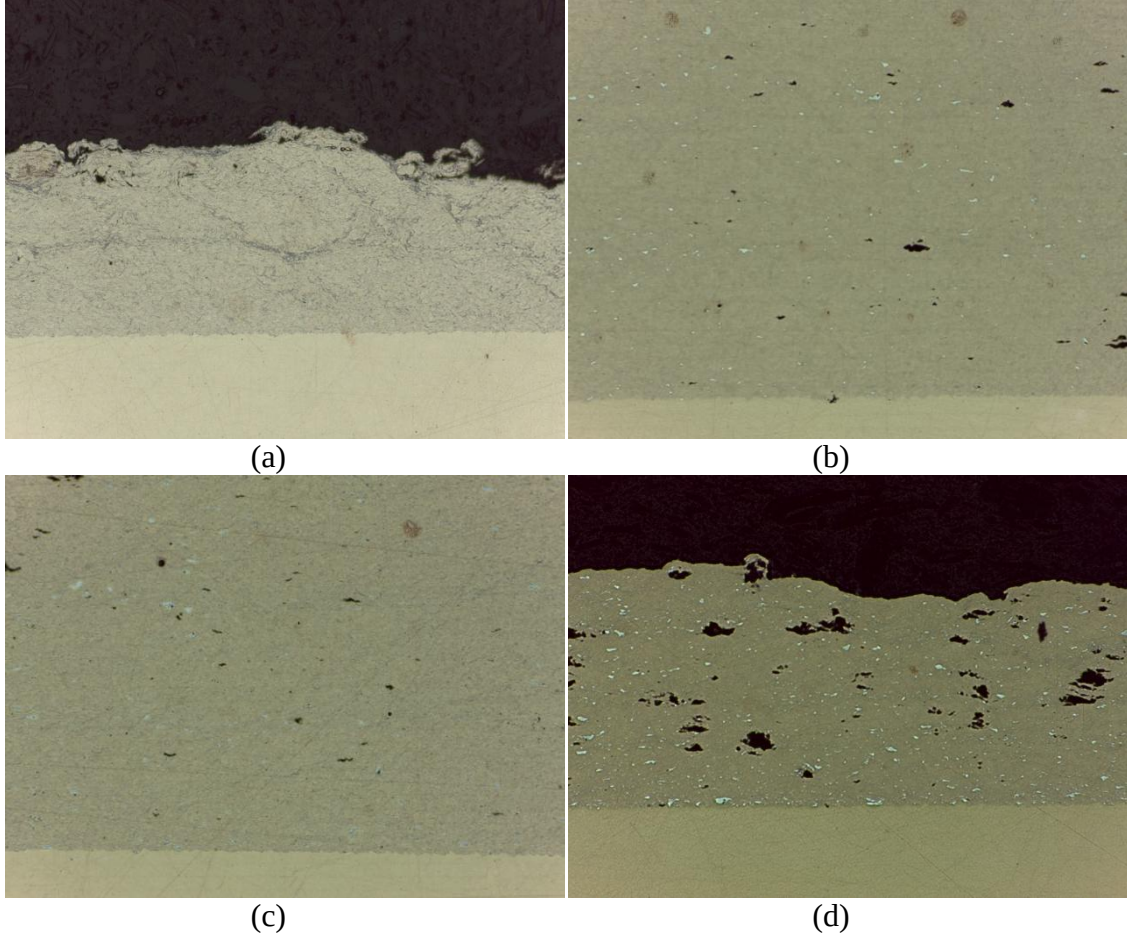
Buna ek olarak, kaplamaların kesit görünümünden gerçekleştirilen görüntü analiz çalışmalarında intermetalik toz miktarının %1.3 ile %3.4 arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu intermetalik miktarlarının XRD tekniği ile belirlenebilecek limitlerin altında olması nedeniyle intermetalik fazın XRD paternlerinde görülemediği düşünülmektedir.



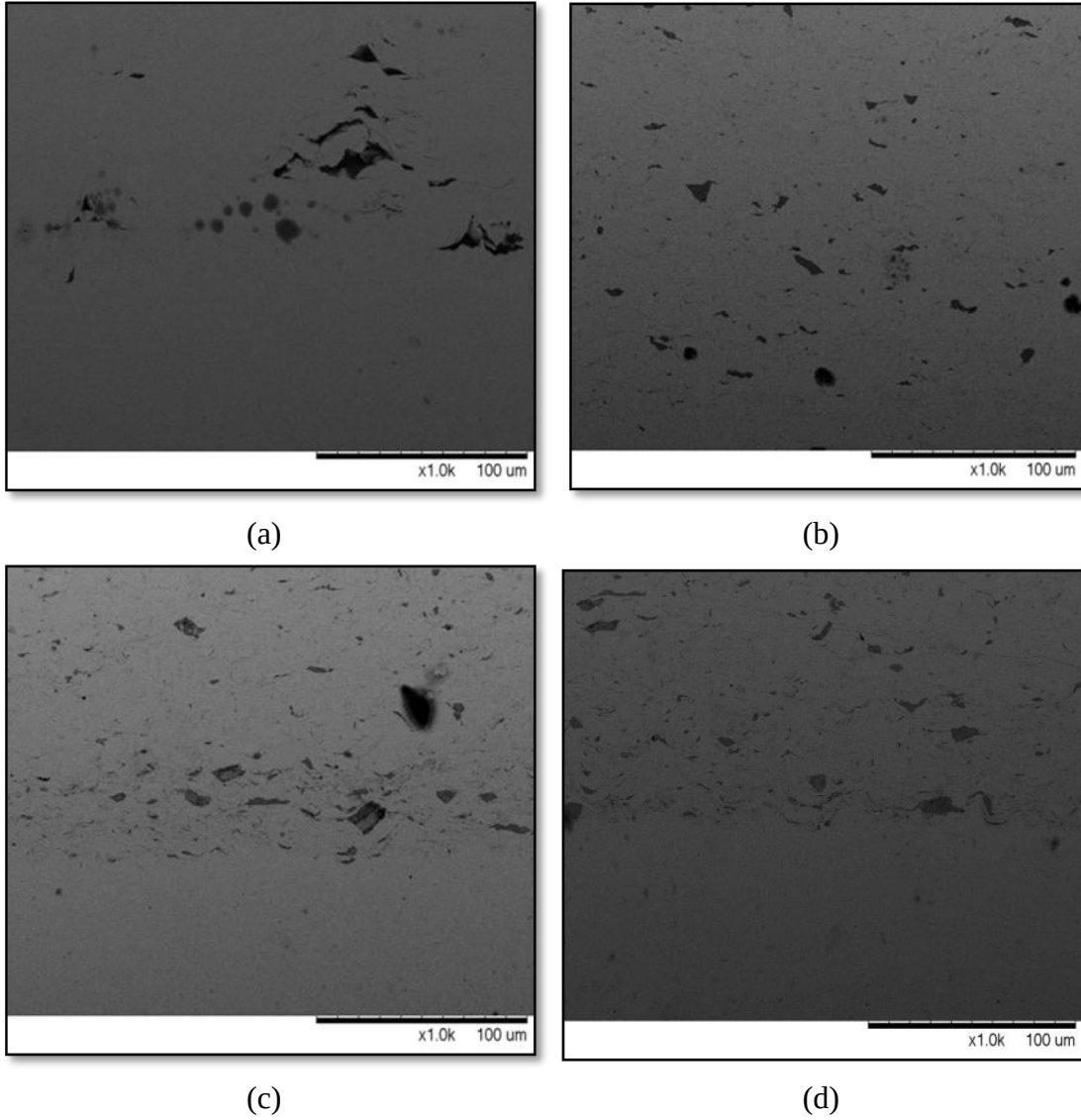
Şekil 5.1 : Kaplamaların XRD paternleri.

5.2 Mikroyapı İncelemeleri

Bakır altlık üzerine uygulanan bakır matrisli ve farklı hacim oranlarındaki intermetalik takviyeli kompozit kaplamalardan ve hacimce %100 bakır içeren kaplamadan elde edilen optik mikroskop ve SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.2 : Kaplamaların optik mikroskop görüntüleri (x100), (a) takviyesiz Cu kaplama, (b) %5 Al₂Cu takviyeli , (c) %10 Al₂Cu takviyeli ve (d) %15 Al₂Cu takviyeli.



Şekil 5.3: Kaplamaların SEM görüntüleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al_2Cu takviyeli, (c) %10 Al_2Cu takviyeli ve (d) %15 Al_2Cu takviyeli kaplama.

Şekil 5.2’deki optik mikroskop görüntüleri kaplamaların yoğun (düşük poroziteli) bir yapıya sahip olduğunu ve altlığa ara yüzeyde herhangi bir süreksizlik oluşturmayacak şekilde tutunduğunu ortaya çıkarmıştır. Kaplamalardaki açık renk partiküller intermetalik parçacıklarını, siyah renk partiküller poroziteleri göstermektedir. İntermetalik artışına bağlı olarak kaplamaların kalınlıkları artmış olup, değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Optimum koşullarda yapılan patern kaplamalarda çizgi kaplamalara göre daha yüksek kaplama kalınlıklarının elde edildiği görülmüştür. Patern çalışmalarında daha düz bir yüzey elde etmek için peş peşe gelen çizgilerin kaplama kalitesine göre belli oranlarda çakıştırılarak gerçekleştirilmesi yani ikinci çizginin bir kısmının bir önceki çizginin üstünden geçmesinin kaplama kalınlığında artışa neden olabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 5.1 : Patern kaplamaların kaplama kalınlık değerleri.

Toz Karışımı	Kaplama Kalınlığı (μm)
% 100 Cu	433
%5 Al ₂ Cu + %95 Cu	935
%10 Al ₂ Cu + %90 Cu	1133
%15 Al ₂ Cu + %85 Cu	513

Kaplama işlemlerinin ardından metalografik işlemlerden geçen numunelerin optik mikroskop ile alınan görüntüleri üzerinden görüntü analiz yöntemi kullanılarak yapı içerisinde bulunan gerçek intermetalik ve porozitelerin hacim oranları ölçülmüştür. Kaplamaların içinde kalan intermetalik hacim oranları ve porozite oranları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Kaplama yapılarında bulunan % intermetalik ve porozite miktarları.

Kaplama yapısındaki toz oranı (%)	Kaplama yapısındaki intermetalik oranı (%)	Kaplama yapısındaki porozite oranı (%)
% 100 Cu	-	2.4
%5 Al ₂ Cu + %95 Cu	1.3	0.2
%10 Al ₂ Cu + %90 Cu	2.3	0.3
%15 Al ₂ Cu + %85 Cu	3.4	5.2

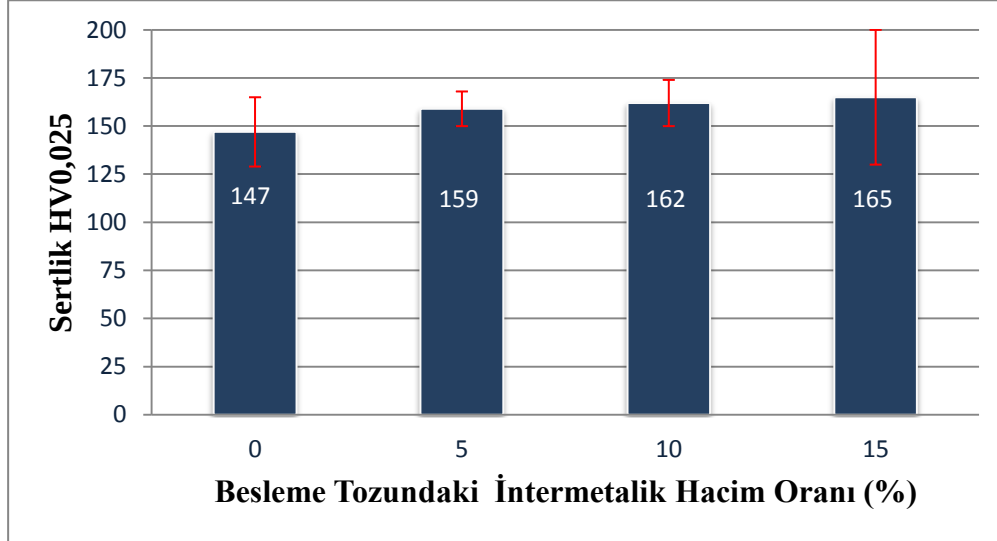
Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere ölçümler sonucunda kaplama mikroyapısında bütün intermetalik takviyeli kaplamalar için besleme tozuna oranla daha az intermetalik olduğu saptanmıştır. Soğuk gaz dinamik püskürtme yönteminde kaplama yapısının üretilmesi tozların plastik deformasyonu ile ilişkilidir. İntermetalik tozların plastik deformasyona uğramamasından dolayı kaplama içerisinde metal partiküllerin arasında kilitli kalırlar. Bu sebeple kaplama yapılmadan önce toz karışımına konulan intermetalikler püskürtme sırasında altlık malzemelerin yüzeylerinden geri sekebilirler. Bu da kaplamanın içindeki intermetalik miktarının başlangıç durumuna göre daha düşük çıkmasına neden olmaktadır.

Kaplama yapısındaki porozite oranının ise, besleme tozundaki Al₂Cu partiküllerinin artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Buna karşın, Al₂Cu partikülleri hacimce %15 oranına çıkarıldığında nispeten daha ince ve poroziteli bir kaplama elde edilmektedir. Dolayısıyla bakır tozuna eklenen Al₂Cu intermetalik takviye,

kaplamanın performansını sadece belli bir seviyeye kadar olumlu yönde etkilemektedir.

5.3 Sertlik Ölçümleri

Bakır tozuna ilave edilen farklı hacim oranlarındaki Al_2Cu intermetaliklerin sertlik değişiminde kaplamaya etkisini gösteren grafik aşağıda verilmiştir (Şekil 5.4).



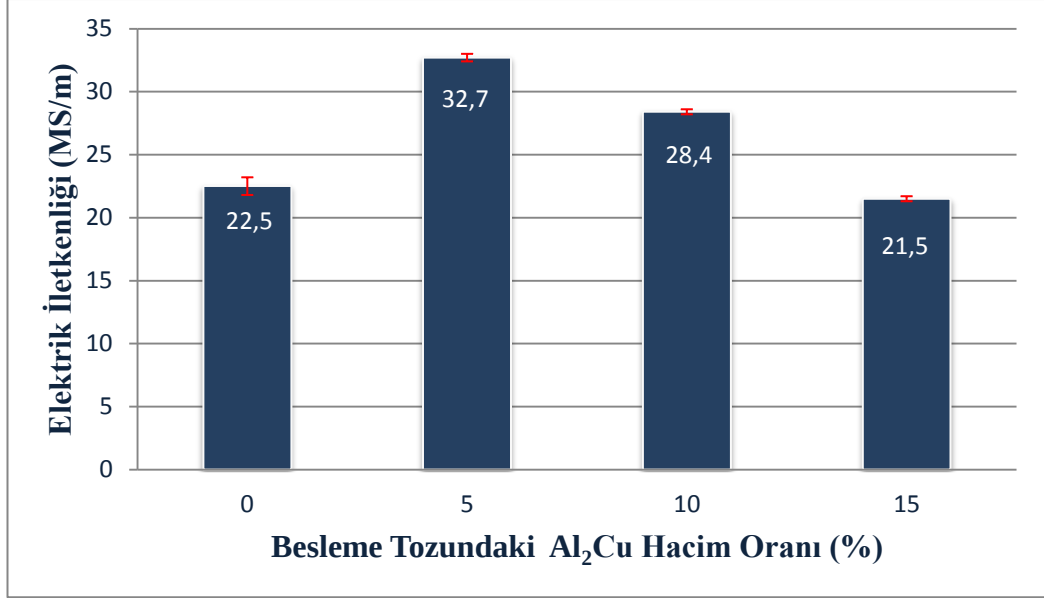
Şekil 5.4 : Cu tozuna ilave edilen Al_2Cu intermetaliklerinin kaplama sertliğine etkisi.

Şekil 5.4'e göre bakır matrisli Al_2Cu intermetalik takviyeli kompozit kaplamalarda en yüksek sertlik değeri, %15 Al_2Cu takviyeli kompozit kaplamaya aittir. Bakır matrise %5 Al_2Cu takviyesi ile sertlikte yaklaşık %8, %10 Al_2Cu takviyesi ile yaklaşık %9 ve %15 Al_2Cu takviyesi ile yaklaşık %11 oranında artış olmuştur.

Görüldüğü üzere, besleme tozunda bakır Al_2Cu intermetalik tozunun ilavesi ile kaplama sertliği artmaktadır. Soğuk gaz dinamik püskürtme yöntemi ile üretilmiş takviyesiz metal kaplamaların geleneksel yöntemler ile üretilen eşdeğer metal parçalara göre daha yüksek sertliğe sahip oldukları bilinmektedir. Bu durum metal tozlarının altlık yüzeyine çarpmaları sırasında aşırı plastik şekil değişimine uğrayarak deformasyon sertleşmesi ile açıklanmaktadır [47,48]. Sonuç olarak, takviyesiz Cu kaplamanın Cu altlığa (106 HV_{0.025}) göre daha yüksek sertliğe sahip olması, yapısının aşırı kalıcı şekil değiştirme sonucu soğuk işlem yapısında olmasından kaynaklanmaktadır. İntermetalik partikül ilavesi ile deformasyon sertleşmesinin yanında yapı içerisinde dağılmış intermetaliklerin varlığı sertliğe olumlu katkıda bulunmuştur.

5.4 Elektrik İletkenliği Ölçümleri

Saf bakır tozları ile değişik intermetalik oranlarında yapılan kaplamaların yüzeylerinden alınan elektrik iletkenlik değerlerinin ortalamaları Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.5 : Değişik intermetalik miktarı içeren kaplamalara ait ortalama elektrik iletkenliği değerleri.

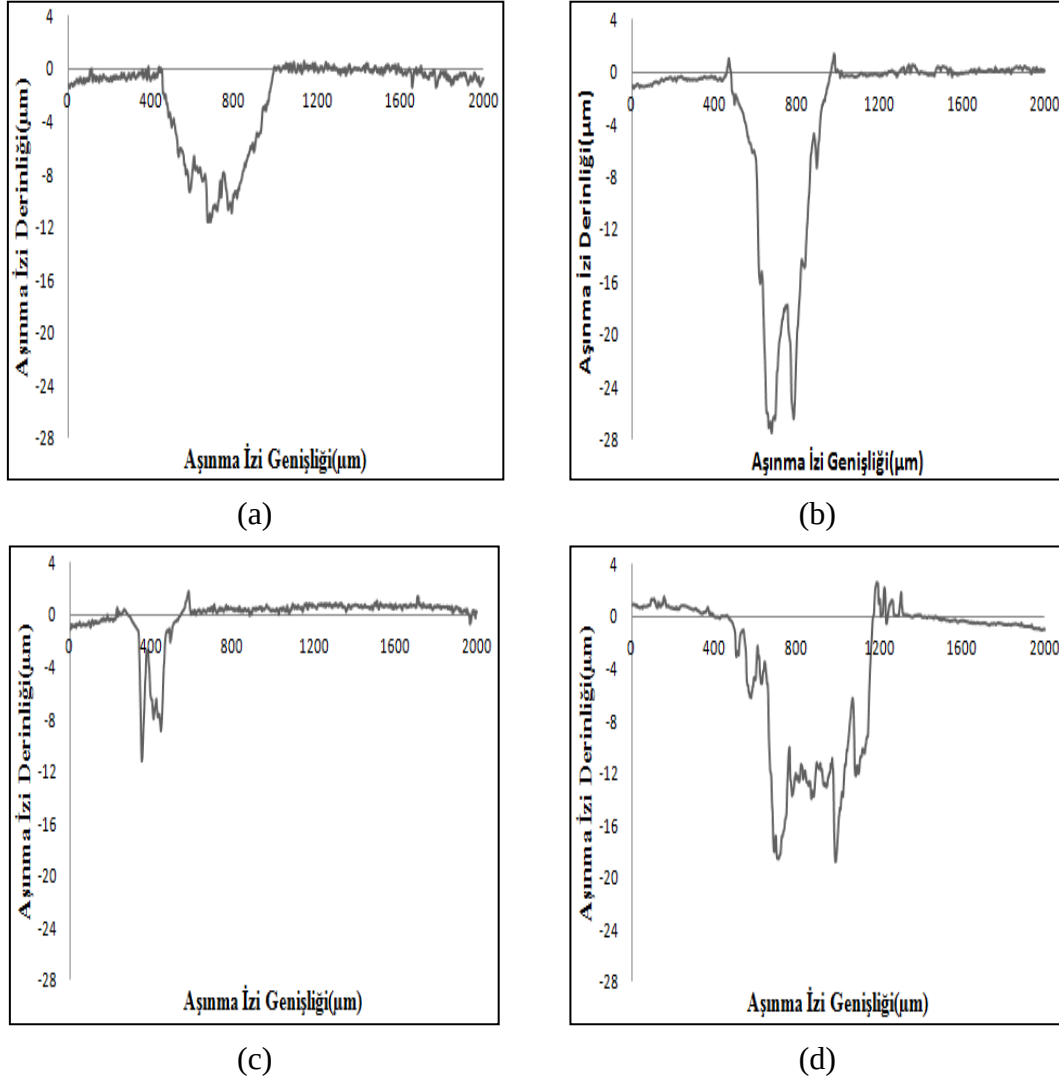
Sonuçlar incelendiğinde kaplama içerisinde intermetalik faz miktarının artışı ile elektrik iletkenlik değerinin düştüğü gözlenmektedir. Bu durum intermetalik fazın elektrik iletkenliğinin bakırın iletkenliğine göre daha düşük olması ve yapıdaki miktarının artışı ve kaplamaların mikroyapısı incelendiğinde intermetalik oranının artışı ile beraber açık şekilde görülen porozite artışı ile açıklanmaktadır. Saf bakır kaplamanın iletkenlik değerinin intermetalik katkılara kıyasla daha düşük değerde olması ise, mikroyapı incelemelerinde görülen yüksek porozite miktarı ve intermetalik katkılılarda kaplama yapısını daha yoğun hale getiren sert partiküllerin dövme etkisinin olmayışı mikroyapı resimlerinde göremediğimiz mikro porozitelerin katkılılara kıyasla daha fazla olması ile açıklanabilir.

5.5 Aşınma Testleri

Aşınma testleri sırasında kaplama yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin profilometre yardımı ile genişlik ve derinliği ölçülerek

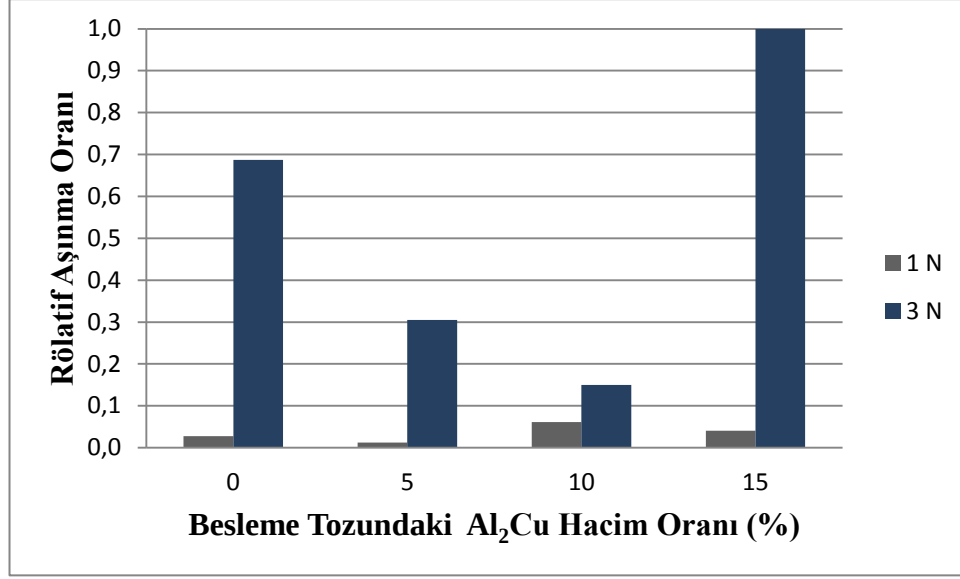
$$\text{Aşınma İzi Alanı} = \frac{\pi}{4} \times \text{Aşınma İzi Derinliği} \times \text{Aşınma İzi Genişliği}$$

bağıntısından aşınma izleri hesaplanmıştır. Şekil 5.6'da hacimce %5, %10 ve %15 Al₂Cu takviyeli kompozit kaplamalara ve %100 Cu kaplamaya 3 N yükün kuru ortamda uygulanması sonucu elde edilmiş aşınma izlerinin profil görüntüleri verilmiştir.



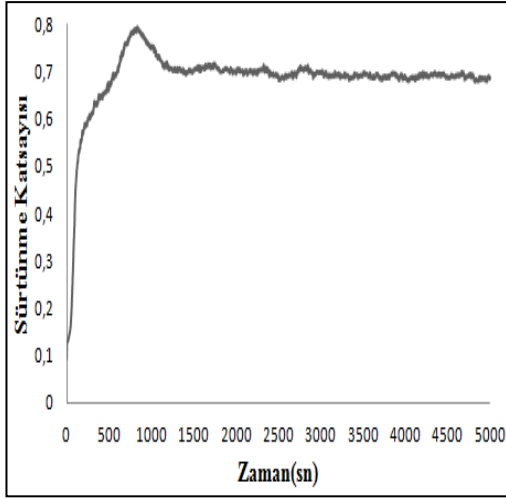
Şekil 5.6 : Kaplamaların 3 N yük altında elde edilen aşınma profilleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al₂Cu takviyeli, (c) %10 Al₂Cu takviyeli ve (d) %15 Al₂Cu takviyeli kaplama.

Şekil 5.6'ya göre en büyük aşınma iz alanının, 3 N yük altında hacimce %15 Al₂Cu içeren kaplamada olduğu görülmüştür. Bu kaplamanın aşınma oranı “1” kabul edilerek bir referans noktası oluşturulmuş ve diğer kaplamaların aşınma oranı bu değerlere göre hesaplanmıştır. Aşınma oranının 1 N ve 3 N yük altında besleme tozundaki intermetalik hacim oranı ile değişimi Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

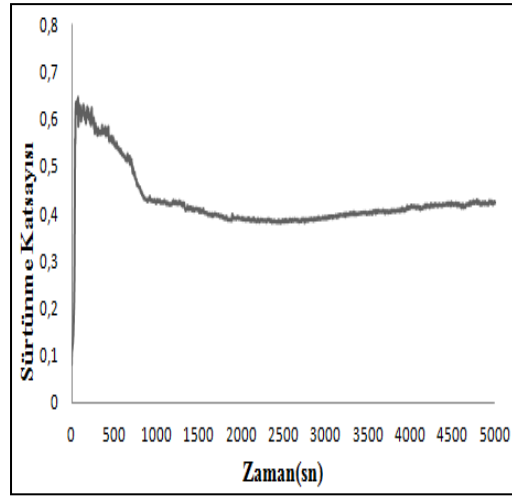


Şekil 5.7 : Kaplamaların uygulanan yüke göre göreceli aşınma oranları.

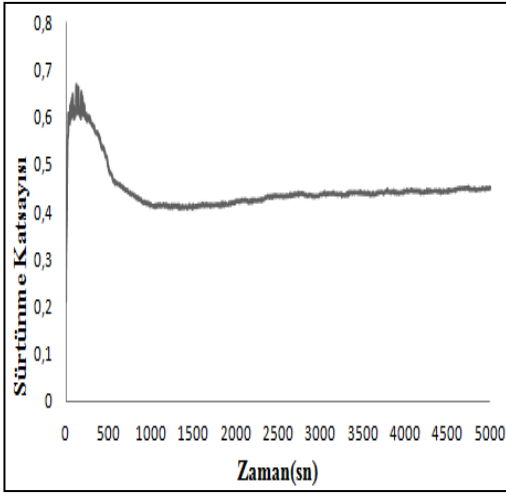
Buna göre, rölatif aşınma oranlarında 1 N yük altında yapılan aşınma test sonuçlarında belirgin bir farklılığın olmadığı anlaşılmaktadır. 3 N yük altında yapılan testlerin sonuçlarında ise %5 ve %10 intermetalik katkılı kaplamalarda saf kaplamaya kıyasla aşınma miktarının azaldığı, %15 intermetalik katkılı kaplamanın aşınma miktarının ise saf kaplamaya kıyasla daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Rölatif aşınma miktarları aşınma testi sırasında kaydedilmiş olan sürtünme katsayısı değerleri Şekil 5.8 ile uyumluluk göstermektedir. %5 ve %10 intermetalik katkılı kaplamalarda belirli bir çevrim sonunda sürtünme katsayısında azalma olduğu görülürken saf bakır ve %15 katkılı da sürtünme katsayısında herhangi bir düşüş gözlenmemiştir. Bu durum %5 ve %10 katkılı kaplamalarda aşınma testi sırasında yağlayıcı bir tabakanın oluştuğunu fakat saf bakır ve %15 katkılı kaplamada ise bu tabakanın oluşmadığını oluşan tabakanın kırıldığını göstermektedir. Saf kaplamaya göre %5 ve %10 intermetalik katkılı kaplamaların daha az aşınması ise bu kaplamaların saf kaplamaya göre daha yoğun bir yapıya sahip olması ile açıklanabilir.



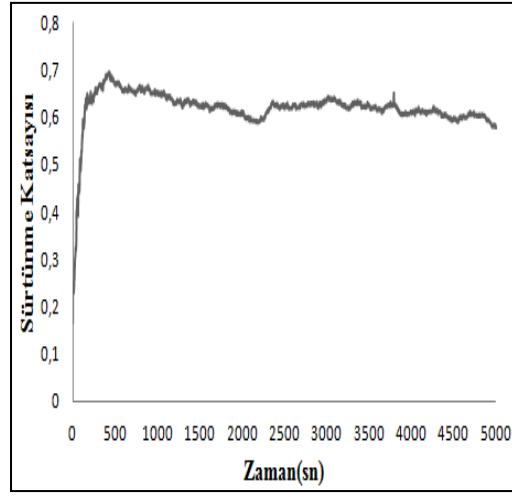
(a)



(b)



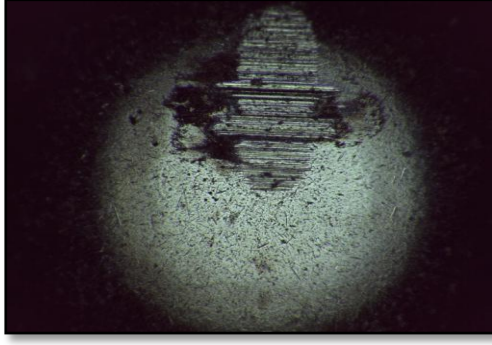
(c)



(d)

Şekil 5.8 : Kaplamaların 3 N yük altında zaman - sürtünme katsayısı grafikleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al_2Cu takviyeli, (c) %10 Al_2Cu takviyeli ve (d) %15 Al_2Cu takviyeli kaplama.

Aşınma deneylerinde kullanılan çelik topun Şekil 5.9'daki optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde yüzeylerin temiz olduğu ve aşınma çizgilerinin de bulunduğu görülmektedir. Çelik topun aşınma davranışının bu gözlemlere bağlı olarak abrasif olduğu söylenebilir. Kaplamaların aşınma izlerinden alınan EDS analizi sonuçlarından ise çelik toplardan madde kaybının olup, aşınma yüzeylerine yapıştığı görülmüştür. İntermetalik miktarının fazla olması çelik topun daha çok aşınmasına sebep olmuştur, bu sonuca aşındırıcı topun optik mikroskop görüntülerindeki aşınmış alanlarının büyümesinden varılmıştır.



(a)



(b)



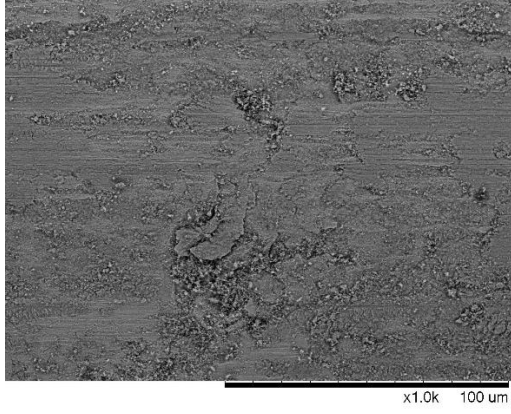
(c)



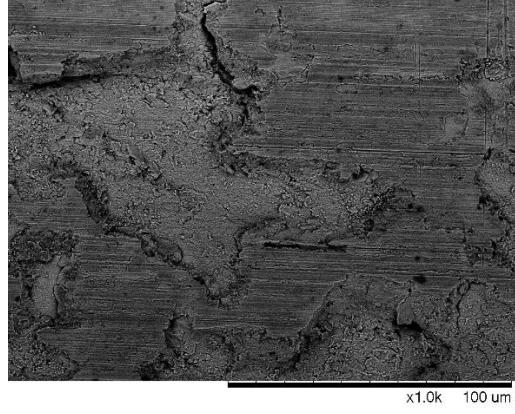
(d)

Şekil 5.9 : Kaplamaların 3 N yük altında elde edilen aşındırıcı bilyalarda oluşan izlerin optik mikroskop görüntüleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al₂Cu takviyeli, (c) %10 Al₂Cu takviyeli ve (d) %15 Al₂Cu takviyeli kaplama.

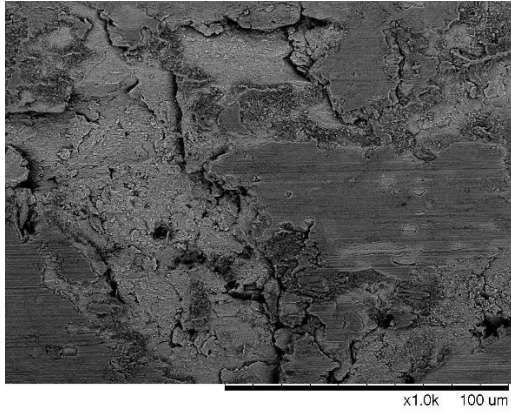
Farklı hacim oranlarındaki intermetalik takviyeli kompozit kaplamaların ve takviyesiz bakır kaplamanın 3 N yük altında aşındırılması sonucu elde edilen aşınma izlerinin, iz içinden çekilmiş 500x büyütmedeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri şekil 5.10’da verilmiştir.



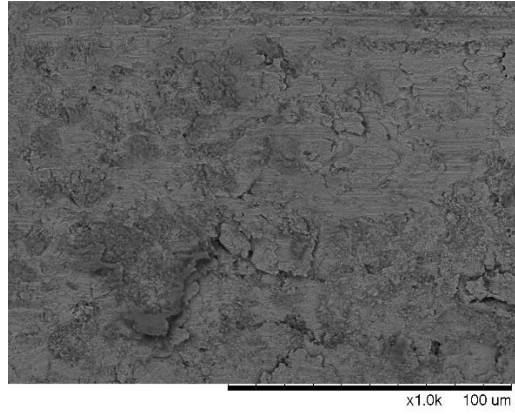
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.10 : Kaplamaların 3 N yük altında oluşturulan aşınma izlerinin, iz içinden alınan SEM görüntüleri (x), (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al₂Cu takviyeli, (c) %10 Al₂Cu takviyeli ve (d) %15 Al₂Cu takviyeli kaplama.

6. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada Soğuk Gaz Dinamik Püskürtme (SGDP) yöntemi ile hacimce “%5 Al₂Cu + %95 Cu”, “%10 Al₂Cu + %90 Cu” ve “%15 Al₂Cu + %85 Cu” kompozit kaplamalar bakır altlıklar üzerine başarıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Yapılan ilk kaplamalarda düşük poroziteli ve oksitlenmeye uğramamış yapıların varlığı istenmiştir. Bu sebeple yapılan ön deneylerde en uygun kaplama parametrelerinin 5mm/sn ilerleme hızında ve 4 paso sayısı olduğu belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler ile yapılan kaplamaların intermetalik miktarları değiştirilmiştir.
2. Söz konusu kaplamalar bakır altlık üzerinde iyi yapışma göstermiştir. Optik mikroskop ve SEM görüntülerinden kaplamaların genellikle yoğun (düşük poroziteli) bir yapıya sahip olduğu ve altlığa ara yüzeyde herhangi bir süreksizlik oluşturmayacak şekilde sıkıca bağlandığı gözlemlenmiştir.
3. Kaplamaların XRD paternlerinde besleme tozlarında bulunan bakır dışında herhangi bir faza ait pikin bulunmadığı görülmüştür. SGDP doğasına aykırı olacak herhangi bir difüzyon, faz dönüşümü, yeni ürün oluşumu, kimyasal reaksiyon, oksitlenme..vb gibi olaylar meydana gelmemiştir.
4. Kaplamaların yapısındaki gerçek Al₂Cu miktarları ilk toz karışımına göre çok az çıkmıştır. Hacimce %5 intermetalik malzeme ile yapılan kaplamada %1.3, hacimce %10 intermetalik malzeme ile yapılan kaplamada %2,3, hacimce %15 intermetalik malzeme ile yapılan kaplamada %3.4 intermetalik tespit edilmiştir. Yapılan XRD çalışmalarında Al₂Cu fazının görülmemesinin sebebi, %5’in altında bir miktarda bulunması olabilir.
5. %5 ve %10 Al₂Cu takviyeli kaplamaların yapısındaki porozite oranlarının takviyesiz Cu kaplamaya nazaran önemli derecede azaldığı (~%92 ve ~%88), %15 Al₂Cu takviyeli kaplamalarda ise arttığı (~%117) tespit edilmiştir.

Bu nedenle, bakır tozuna eklenen Al_2Cu intermetalik takviye, kaplamanın performansını sadece belli bir seviyeye kadar olumlu yönde etkilemektedir.

6. Matris içerisine Al_2Cu eklenmesi kaplamanın sertliğinin artmasına neden olmuştur. En yüksek sertlik değerinin $165 \pm 35 \text{ HV}_{0.025}$ ile hacimce %15 Al_2Cu takviyeli kaplamaya ait olduğu görülmüştür. Bakır matrise %5 Al_2Cu takviyesi ile sertlikte yaklaşık %8, %10 Al_2Cu takviyesi ile yaklaşık %9 ve %15 Al_2Cu takviyesi ile yaklaşık %11 oranında artış olmuştur.
7. Elektrik iletkenliği değerleri intermetalik miktarı ile ters orantılı olarak değişmiştir. %5, %10 ve %15 Al_2Cu takviyeli kaplamaların elektrik iletkenlik değerleri sırasıyla 32.7 MS/m, 28.4 MS/m ve 21.5 MS/m olarak belirlenmiştir. Bu durum intermetalik fazın elektrik iletkenliğinin bakırın iletkenliğine göre daha düşük olması ve yapıdaki miktarının artışı ve porozite artışı ile açıklanmaktadır. Saf bakır kaplamanın iletkenlik değerinin intermetalik katkılara kıyasla daha düşük değerde olması ise, mikroyapı incelemelerinde görülen yüksek porozite miktarı ve intermetalik katkılılarda kaplama yapısını daha yoğun hale getiren sert partiküllerin dövme etkisinin olmayışı mikroyapı resimlerinde göremediğimiz mikro porozitelerin katkılılara kıyasla daha fazla olması ile açıklanabilir.
8. 3 N yük altında yapılan aşınma test sonuçlarında, aşınma miktarının saf kaplamaya kıyasla hacimce %5 ve %10 Al_2Cu takviyeli kaplamalarda azaldığı, %15 takviyede ise arttığı görülmüştür. Bu durum %5 ve %10 Al_2Cu takviyeli kompozit kaplamaların aşındırıldığında yağlayıcı etki gösterdiğini ve bu etkinin, aşınma alanı ile sürtünme katsayısını düşürdüğünü göstermektedir.
9. Sonuç olarak; sertlik değerleri, elektrik iletkenliği değerleri ve aşınma deneylerinin sonuçları dikkate alındığında %5 ve %10 Al_2Cu takviyeli kompozit kaplamaların bakır altlık malzemesinin yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılmasının uygun olduğuna karar verilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Mu, Z., Geng, H. R., Li, M. M., Nie, G. L. ve Leng, J. F.** (2013). Effects of Y2O3 on the property of copper based contact materials, *Composites: Part B*.
- [2] **Muratoğlu M. ve Demirel M.,** (2009) Cu/Ni3Al Metal Matrisli Kompozitin Kuru Kayma Aşınma Davranışlarının Araştırılması, 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Türkiye.
- [3] **Kreye H., Gartner F., Richter H.J.,** (2003) High Velocity Oxy-Fuel Flame Spraying: State of the Art, New Developments and Alternatives, Proc. 6. Kolloqium Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen, P. Heinrich, Ed., Gemeinschaft Thermisches Spritzen e.V., Unterschleisheim, Germany.
- [4] **Dykhuzen, R.C., Smith, M.F., Gilmore, D.L., Neiser, R.A., Jiang, X. ve Sampath, S.,** (1999) Impact of High Velocity Cold Spray Particles, *J. Therm. Spray Technol.*, p 559–564.
- [5] **Klassen T., Kliemann J.O., Onizowa K., Donner K., Gutzman H., Binder K., Schimidt T., Gartner F., Kreye H.,** (2009) Cold spraying-new developments and application potential, 8. Kolloquium HVOF Spraying, Erding, Germany.
- [6] **Buggy, M. ve Conlon C.,** (2004) Material Selection in the Design of Electrical Connectors, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 213-8.
- [7] **Gök M.G. ve Kaplan M.,** (2011) Toz Metalurjisi Yöntemiyle Elektrik Kontak Malzemesi Üretimi ve Kontak Performansının Araştırılması, 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Turkey.
- [8] **Arslan O.,** (2006) Bakır Sektör Profili, İstanbul Ticaret Odası
- [9] **URL-1** <<http://www.tibtech.com/conductivity.php>>, alındığı tarih: 30.04.2012
- [10] **Batani, M. R., Ashrafizadeh, F., Szpunar, J.A. ve Drew, R.A.L.,** (2002) Improving the Tribological Behavior of Copper Through Novel Ti–Cu Intermetallic Coatings, *Wear*, **253**, 626-39.
- [11] **Demirel, M.,** (2007) Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Metal Matrisli Kompozitlerde Ni3Al Metallerarası Bileşik Takviyesinin Aşınma Davranışına Etkisinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Danışman Doç. Dr. M. Muratoğlu
- [12] **Dennis, W.H.,** (1987) Demirden Gayri Metaller Metalürjisi, İ.T.Ü. Kütüphanesi, Sayı: 848, İstanbul.
- [13] **Çorlu, B., Ürgen M.,** (2011) Saf bakır yüzeylerin katodik ark alüminyum plazma ile alaşımlandırılması, İTÜDERGİSİ/d, Cilt 10, Sayı 2

- [14] **Çavuş, Z.**, (2010) Susuzlaştırılmış Boraksın Alüminyum Bakır Alaşımının Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Danışman Prof. Dr. M. Niyazi Eruslu
- [15] **Eruslu, N. Altmışoğlu, A. Taptık, Y** Alaşımlar Ders notları İTÜ.
- [16] **Papyrin A.**, 2007, Cold Spray Technology, Chapter 1.
- [17] **Grujicic, M., Saylor, J.R., Beasley, D.E., DeRosset, W.S. ve Helfritch, D.** (2003). Computational analysis of the interfacial bonding between feed-powder particles and the substrate in the cold-gas dynamic-spray process, *Applied Surface Science*, **219**, 211–27.
- [18] **Sönmez, C.**, 2009, Al-12Si ve Al-12Si+Al Matrisli B₄C Partikül Takviyeli Kompozit Kaplamaların Soğuk Dinamik Gaz Püskürtme Tekniği ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Danışman Prof. Dr. H. Çimenoglu.
- [19] **Klinkov, S.V., Kosarev, V.F. ve Rein, M.**, (2005). Cold Spray Deposition: Significance of Particle Impact Phenomena, *Aerospace Science and Technology*, **9**, 582–91.
- [20] **Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Schmid, T. ve Kreye, H.**, (2006). The Cold Spray Process and Its Potential for Industrial Applications, *Journal of Thermal Spray Technology*, **15**, 223-32.
- [21] **Schmidt, T., Gartner, F., Assadi, H. ve Kreye H.**, (2006). Development of a Generalized Parameter Window for Cold Spray Deposition, *Acta Materialia*, **54**, 729–42.
- [22] **Li, W. Y., Liao, H., Li, C. J., Bang, H. S. ve Coddet, C.** (2007). Numerical Simulation of Deformation Behavior of Al Particles Impacting on Al Substrate and Effect of Surface Oxide Films on Interfacial Bonding in Cold Spraying, *Applied Surface Science*, **253**, 5084-91.
- [23] **Harminder, S., Sidhu, T. S. ve Kalsi S. B. S.** (2012). Cold spray technology: future of coating deposition processes, *Frattura ed Integrita Strutturale*, **22**, 69-84.
- [24] **Ghelicho, R. ve Guagliano, M.** (2009). Coating by the cold spray process: a state of the art, *Frattura ed Integrita Strutturale*, **8**, 30-44.
- [25] **Li, C. J. ve Li, W. Y.** (2003). Deposition characteristics of titanium coating in cold spraying, *Surface and Coatings Technology*, **167**, 278-283.
- [26] **Pawlowski L.**, (1995) The science and engineering of thermal spray coatings, Wiley NY.
- [27] **King, P. C., Zahiri, S. H. ve Jahedi, M. Z.**, (2007). Rare Earth/Metal Composite Formation by Cold Spray, *Journal of Thermal Spray Technology*, **17**, 221-27,
- [28] **Li, C. J., Li, W. Y., Wang, Y. Y., Yang, G. J. ve Fukanuma, H.** (2005). A theoretical model for prediction of deposition efficiency in cold spraying, *Thin Solid Films*, **489**, 79.

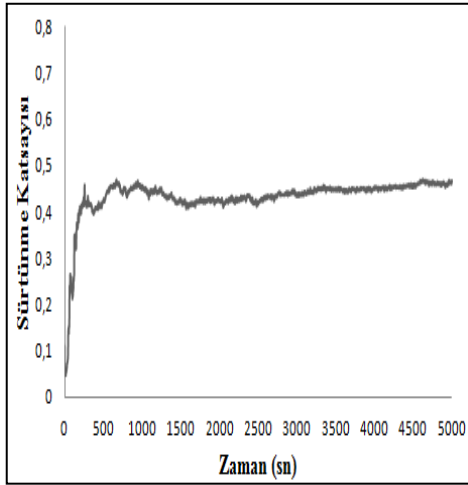
- [29] **Zahiri S.H., Fraser D., Gulizia S., Jahedi M.**, (2006) Effect of processing conditions on porosity formation in cold gas dynamic spraying of copper, *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 15(3), 422-430.
- [30] **John, J. E. A. ve Keith, T. G.** (2006). *Gas Dynamics*, Prentice Hall, New Jersey, United States,
- [31] **Li, W. Y., Liao, H., Douchy, G. ve Coddet, C.** (2007). Optimal Design of a Cold Spray Nozzle by Numerical Analysis of Particle Velocity and Experimental Validation with 316L Stainless Steel Powder, *Materials and Design*, **28**, 2129-37.
- [32] **Stoltenhoff T., Kreye H., Krommer W., Richter H. J. ()** Cold Spraying – from Thermal Spraying to High Kinetic Energy Spraying, Linde Gas, www.us.lindegas.com, 29.10.2010**
- [33] **Champagne V.K.** (2007), *The Cold Spray Materials Deposition Process Fundamentals and Applications*, Woodhead Publishing Limited, England.
- [34] **Lima, R.S., Kucuk, A., Berndt, C.C., Karthikeyan, J., Kay, C.M. ve Lindemann, J.** (2002). Deposition Efficiency, Mechanical Properties and Coating Roughness in Cold-Sprayed Titanium, *J. Mater. Sci. Lett.*, **21**, 1687–1689.
- [35] **Novoselova, T., Fox, P., Morgan, R. ve O'Neill, W.** (2006). Experimental Study of Titanium/Aluminium Deposits Produced by Cold Gas Dynamic Spray, *Surface and Coatings Technology*, **200**, 2775-83.
- [36] **Van Steenkiste, T.H., Smith, J.R. ve Teets, R.E.** (2002). Aluminum coatings via kinetic spray with relatively large powder particles, *Surface and Coatings Technology*, **154**, 237-52.
- [37] **Zahiri S.H., Fraser D., Gulizia S., Jahedi M.** (2006) Effect of processing conditions on porosity formation in cold gas dynamic spraying of copper, *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 15(3), 422-430.
- [38] **Lee, H., Shin, H., Lee, S., Ko, K.** (2008). Effect of gas pressure on Al coatings by cold gas dynamic spray, *Materials Letters*, **62**, 1579–1581
- [39] **Bartenev S., S., Fedko Y., P. and Grigirov A., I.**, 1982: “Detonation Coatings in Machine Building”, Leningrad: Mashinostroenie (in Russian).
- [40] **Voyer, J., Stoltenhoff, T. ve Kreye H.** (2003). Development of Cold Gas Sprayed Coatings, *Thermal Spray: Advancing the Science and Applying the Technology*, p 71–78
- [41] **Borchers, C., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Assadi, H. ve Kreye, H.** (2003). Microstructural and macroscopic properties of cold sprayed copper coatings, *Journal of Applied Physics*, **93**, 10064-70.
- [42] **Fukumoto, M., Wada, H., Tanabe, K., Yamada, M., Yamaguchi, E., Niwa, A., Sugimoto, M. ve Izawa, M.** (2007). Effect of substrate temperature on deposition behavior of copper particles on substrate surfaces in the cold spray process, *Journal of Thermal Spray Technology*, **16**, 643-50.

- [43] **King, P. C., Bae, G., Zahiri, S. H., Jahedi, M. ve Lee, C.** (2009). An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates, *Journal of Thermal Spray Technology*, **19**, 620-34.
- [44] **Li, W., Li, C. ve Liao, H.** (2010). Significant influence of particle surface oxidation on deposition efficiency, interface microstructure and adhesive strength of cold-sprayed copper coatings, *Applied Surface Science*, **256**, 4953-58.
- [45] **Kang, H. ve Kang, S.B.** (2003). Tungsten/copper composite deposits produced by a cold spray, *Scripta Materialia*, **49**, 1169-74.
- [46] **Sudharshan, P. P., Vishnukanthan, V. ve Sundararajan, G.** (2007). Effect of Heat Treatment on Properties of Cold Sprayed Nanocrystalline Copper Alumina Coatings, *Acta Materialia*, **55**, 4741-51.
- [47] **Jodoin, B., Ajdelsztajn, L., Sansoucy, E., Zuniga, A., Richer, P. ve Lavernia, E. J.** (2006). Effect of particle size, morphology and hardness on cold gas dynamic sprayed aluminum alloy coatings, *Surface & Coatings Technology*, **255**, 3822-28.
- [48] **Guo, X., Zhang, G., Li, W., Gao, Y., Liao, H. ve Coddet, C.** (2009). Investigation of the microstructure and tribological behavior of cold-sprayed tin-bronze-based composite coatings, *Applied Surface Science*, **255**, 3822-28.

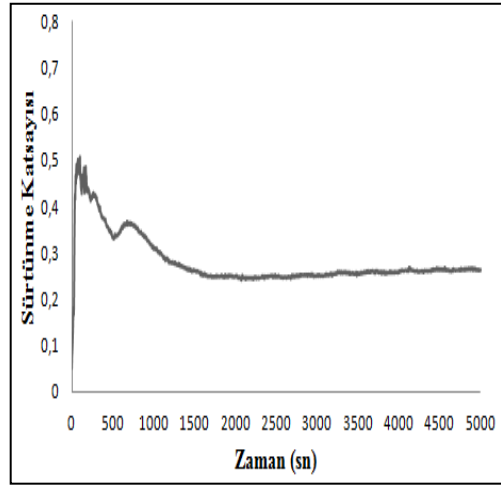
EKLER

EK A: Aşınma testleri

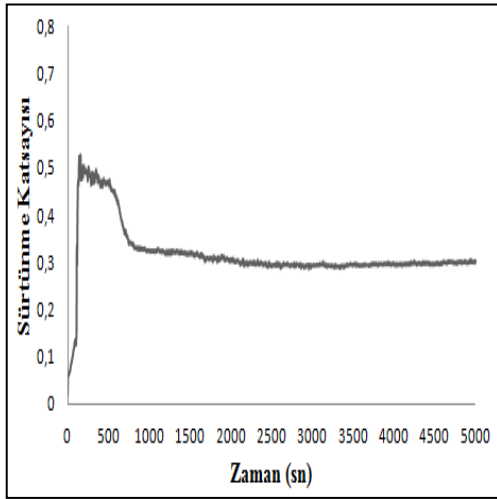
EK A



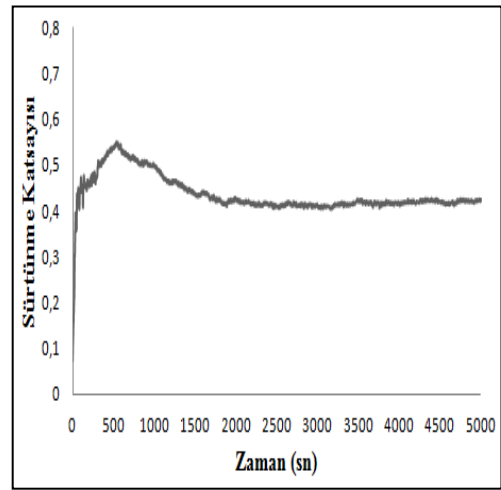
(a)



(b)

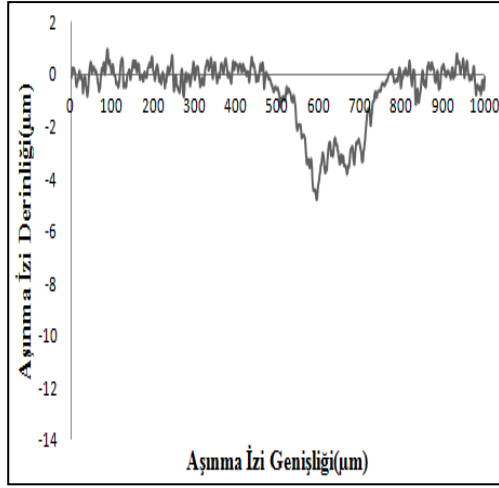


(c)

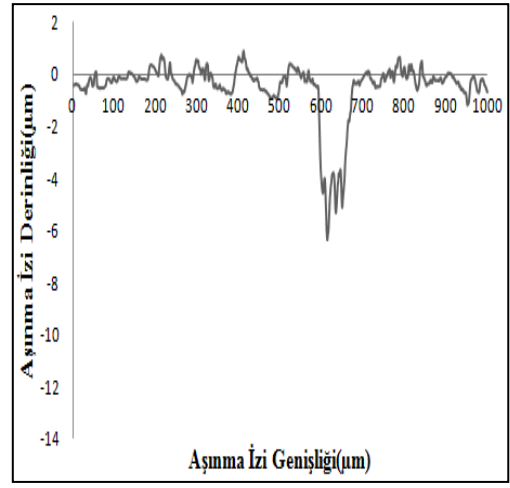


(d)

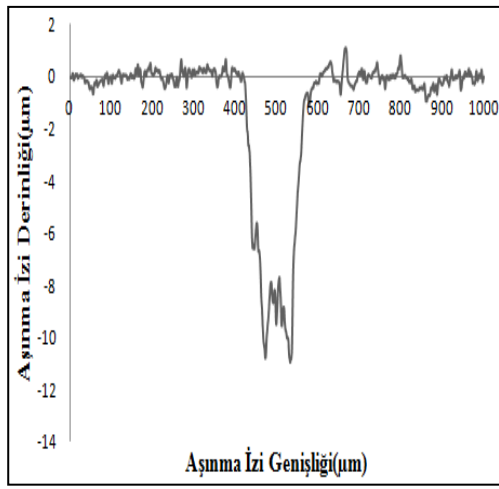
Şekil A.1 : Kaplamaların 1 N yük altında zaman - sürtünme katsayısı grafikleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al_2Cu takviyeli, (c) %10 Al_2Cu takviyeli ve (d) %15 Al_2Cu takviyeli kaplama.



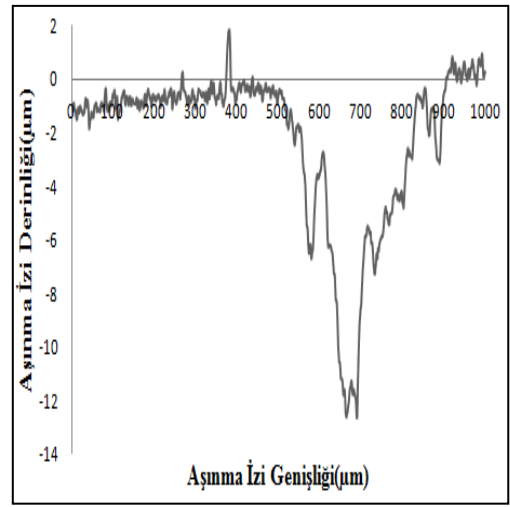
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil A.2 : Kaplamaların 1 N yük altında elde edilen aşınma profilleri (a) %100 Cu kaplama, (b) %5 Al₂Cu takviyeli, (c) %10 Al₂Cu takviyeli ve (d) %15 Al₂Cu takviyeli kaplama.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Valbona DYLMISHI

Doğum Yeri ve Tarihi : Arnavutluk - 1987

E-Posta : valbona.dylmishi@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyet Fakültesi, Fizik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- **Ar-Ge Proje Uzmanı** : Ekin Teknoloji San. ve Tic. A.Ş.