

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLEN ALÜMİNYUM KAPLAMALARIN
KARAKTERİZASYONU VE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enver TERZİ

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fatih ÜSTEL

Mart 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİLEN ALÜMİNYUM KAPLAMALARIN
KARAKTERİZASYONU VE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enver TERZİ

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 29/03/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Fatih ÜSTEL
Jüri Başkanı

Prof. Dr.
Ahmet TÜRK
Üye

Yrd. Doç. Dr.
Ekrem ALTUNCU
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Enver TERZİ

31.01.2017

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanması ve tamamlanmasında danışmanım olarak tecrübeleri ve bilgileriyle beni yönlendiren, tüm yoğunluklarına rağmen benden hiçbir yardımı esirgemeyen değerli hocam sayın Prof. Dr. Fatih ÜSTEL'e çok teşekkür ederim. Aynı şekilde bilgi ve tecrübeleri ile yolumu aydınlatan tezimin oluşmasında yardımını ve desteğini esirgemeyen değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Merkezi çalışanları Uzm. Murat Cihan ÇALIŞKAN, teknisyen Semih YÜCEL ve danışman Ahmet TUNCA'ya teşekkürü bir borç biliyorum.

Ayrıca çalışmalarım boyunca her türlü fikir alışverişinde bulunduğum değerli arkadaşım Metalurji ve Malzeme Mühendisi Ahmet Sefa ATALAY'a, maddi ve manevi her zaman yanımda olan değerli dostlarım Metalurji ve Malzeme Mühendisi Alperen Refik Bilal ÖZSARI, Burak BULUT, Semih DUMAN, Esat ÖZDEMİR ve Yunus Emre ANTİKA'ya çok teşekkür ederim.

Son olarak en büyük teşekkürü bana sonsuz güveni olan ve yüksek lisansım boyunca bana sabırla yaklaşan nişanlım Gülşen TERZİ'ye yüksek lisansa başlamama vesile olan abim Mehmet TERZİ'ye ve maddi, manevi her konuda büyük desteklerini gördüğüm aileme özellikle abim Mesut TERZİ'ye göndermek istiyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER ...	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
 BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
 BÖLÜM 2.	
TERMAL PÜSKÜRTME KAPLAMALAR	4
2.1. Giriş	4
2.2. Termal Püskürtme Kaplamaların Tarihçesi	7
2.3. Termal Püskürtme Kaplama Yöntemleri	8
2.3.1. Alev püskürtme yöntemi	9
2.3.1.1. Tel alev püskürtme yöntemi	10
2.3.1.2. Toz alev püskürtme yöntemi	10
2.3.2. Plazma püskürtme yöntemi	11
2.3.3. Elektrik ark sprej prosesi (EAS)	12
2.3.4. Yüksek hızlı oksijen yakıtlı sprej (HVOF) prosesi	14
2.3.5. Detonasyon tabancası (Detonation Gun)	14
2.4. Termal Püskürtme Kaplamaların Mikroyapısı	16
2.4.1. Porozite ve yoğunluk özellikleri	16
2.5. Termal Püskürtme Kaplamaların Karşılaştırılması	18

BÖLÜM 3.

ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME PROSESİ	20
3.1. Giriş	20
3.2. Elektrik Ark Püskürtme Teknolojisi	20
3.2.1. Elektrik ark püskürtme teknolojisinin avantajları	22
3.2.2. Elektrik ark püskürtme teknolojisinin dezavantajları	23
3.3. Elektrik Arkının Karakteristik Özelliği	23
3.4. Elektrik Ark Püskürtme Kaplama Malzemeleri	25
3.5. Elektrik Ark Püskürtme ve Endüstriyel Kullanım Alanları	28
3.5.1. Korozyon koruma uygulamaları	28
3.5.1.1. Çinko (Zn), alüminyum (Al) ve çinko/alüminyum (Zn/Al 85/15) kaplamalar	28
3.5.1.2. Nikel (Ni) ve nikel alaşımları	29
3.5.2. Parça tamirâtı	30
3.5.2.1. Uçak parçalarının tamirâtında	31
3.5.3. Aşınma	31
3.5.4. Elektriksel uygulamalar	32
3.5.5. Kalıp yapma	32
3.6. Yüksek Hızlı Ark Püskürtme (HVAS)	33

BÖLÜM 4.

ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTMEDE KAPLAMA KALİTESİNE ETKİ EDEN	
FAKTÖRLER	36
4.1. Giriş	36
4.2. Püskürtme Mesafesinin Etkisi	36
4.3. Püskürtme Gaz Basıncının Etkisi	37
4.4. Püskürtme Gaz Cinsinin Etkisi	41
4.5. Nozul Ve İkincil Gaz Basıncının Etkisi	45
4.6. Amperin ve Voltajın Etkisi	51
4.7. Altlık Sıcaklığının Etkisi	53
4.8. Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi	58

BÖLÜM 5.

DENEYSEL ÇALIŞMA	59
5.1. Deney Amacı ve İşleyişi	59
5.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler	60
5.2.1. Altlık malzemesi	60
5.2.2. Kaplama teli	60
5.3. Deneyde Kullanılan Cihazlar	60
5.3.1. Kumlama cihazı	61
5.3.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı	61
5.3.3. Elektrik ark püskürtme cihazı	61
5.3.4. Kesme makinesi	62
5.3.5. Bakalite alma cihazı	62
5.3.6. Otomatik parlatma cihazı	62
5.3.7. Optik mikroskop	62
5.3.8. Mikro sertlik cihazı	62
5.3.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	63
5.3.10. Çekme cihazı	63
5.4. Kaplamaların Üretilmesi	64
5.4.1. Altlık yüzeyinin hazırlanması	64
5.4.2. Elektrik ark püskürtme yöntemiyle kaplama uygulaması	65
5.4.2.1. Akım değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar	65
5.4.2.2. Voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar	66
5.4.2.3. Basınç değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar	67

BÖLÜM 6.

DENEYSEL SONUÇLAR	68
6.1. Giriş	68
6.2. Alüminyum Kaplama Telinin Analizi	68
6.3. Akımın Kaplama Mikroyapısına Etkisi	69
6.4. Voltajın Kaplama Mikroyapısına Etkisi	74
6.5. Amper/Voltaj Değişimlerinin Kaplama Sertliğine ve Yapışma Mukavemetine Etkisi	77

6.6. Atomizasyon Gaz Basıncının Etkisi	79
6.7. Atomizasyon Gaz Basıncının Kaplama Sertliğine ve Yapışma Mukavemetine Etkisi.....	81
BÖLÜM 7.	
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
7.1. Genel Sonuçlar	85
7.2. Öneriler	87
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	93

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Amper
AP	: Atmosferik plazma püskürtme
ASTM	: Amerikan standardı
EAP	: Elektrik ark püskürtme
EDX	: Enerji dispersif x-ray spektroskopisi
HVAS	: Yüksek hızlı ark püskürtme
HVOF	: Yüksek hızlı oksijen - yakıt püskürtme
Hv	: Vickers sertlik
MPa	: Mega paskal
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
V	: Voltaj

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kaplamaların fonksiyonel görevleri .	4
Şekil 2.2. Kaplanabilir malzemeler .	5
Şekil 2.3. Yüzey kaplama yöntemleri .	5
Şekil 2.4. Termal püskürtme prensibi genel görünümü .	6
Şekil 2.5. Termal püskürtme prosesleri .	8
Şekil 2.6. Tel alev sprej yöntemi .	9
Şekil 2.7. Alev sprej kaplama uygulaması .	10
Şekil 2.8. Plazma sprej sistemi .	12
Şekil 2.9. Elektrik ark sprej tekniği şematik görünümü .	13
Şekil 2.10. Yüksek hızlı oksijen-yakıt yanma tip sprej tekniği şematik görünümü	14
Şekil 2.11. Patlatma tabancası yönteminin şematik görünümü .	15
Şekil 2.12. a) Çarpma etkisiyle partikülün levha şeklini alması b) Kaplama mikroyapısı .	17
Şekil 2.13. Termal sprej kaplamalarda oluşan porozite tipleri .	18
Şekil 2.14. Termal püskürtme yöntemlerinde sıcaklık-hız kıyaslaması ...	19
Şekil 3.1. Ark püskürtme sisteminin şematik görünümü .	21
Şekil 3.2. Elektrik ark sprej sistem bileşenleri .	22
Şekil 3.3. Katot ve anot arasında oluşan ark sütunu .	24
Şekil 3.4. (a) Tel elektrotların asimetric ergime davranışlarının gösterilmesi ilk olarak 1966'da Steffens tarafından yapılmıştır (b) Her iki elektrotun levhasal formlarının stroboskopi (strobe) fotoğrafları 1995'de Wang tarafından ölçülmüştür .	25
Şekil 3.5. Özlü tel yapımı .	26
Şekil 3.6. Korozyona karşı kaplama uygulamaları .	29
Şekil 3.7. Parçaya elektrik ark spreyle tamirat uygulaması .	30

Şekil 3.8. a) İş parçası yüzeyinde kullanım sırasında oluşan aşınma. b) Elektrik ark spreyle kaplanarak tamir edilmiş iş parçası	30
Şekil 3.9. Uçak motorunun tamir amaçlı kaplama uygulaması	31
Şekil 3.10. Ağır sanayide kullanılan bir silindirin elektrik ark spre prosesi yardımıyla çelik kaplanması	31
Şekil 3.11. Ark spre yöntemiyle kaplanmış (a) varistör (b) elektronik devre	32
Şekil 3.12. Elektrik ark spre yöntemiyle hızlı prototip kalıp üretimi ve üretilmiş kalıplar	32
Şekil 3.13. HVAS ve AS aşınma seviyeleri	34
Şekil 4.1. Püskürtme mesafesinin ortalama a) partikül çapı ve b) partikül hızı üzerindeki etkisi	37
Şekil 4.2. Atomize gaz olarak hava kullanıldığında kaplama yapısı a) Düşük hızda $94 \text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{h}^{-1}$ b) Orta hızda $110 \text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{h}^{-1}$, c) Yüksek hızda $144 \text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{h}^{-1}$	38
Şekil 4.3. a) Hava atomizasyonunun düşük gaz atım hızındaki partikül görünümü; ortalama çap $760 \mu\text{m}$ (güç 3100 W , hava atım hızı $94 \text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{h}^{-1}$) b) Hava atomizasyonunun yüksek gaz atım hızındaki partikül görünümü; ortalama çap $122 \mu\text{m}$ (güç 3100 W , hava atım hızı $144 \text{ N} \cdot \text{m}^3/\text{h}^{-1}$)	38
Şekil 4.4. Püskürtme hızının mikrosertlik ve oksit içeriğine etkisi	39
Şekil 4.5. Püskürtme hızının porozite içeriğine etkisi	39
Şekil 4.6. Tel boşanımı esnasında anot ve katotta ergime davranışı	40
Şekil 4.7. Al partikül boyut dağılımı a) Gaz basıncı $0,31 \text{ MPa}$ b) Gaz basıncı $0,45 \text{ MPa}$ c) Gaz basıncı $0,59 \text{ MPa}$	41
Şekil 4.8. Farklı atomizasyon gazları ile yapılan işlem sonucu kaplamanın oksit içeriğindeki değişim	42
Şekil 4.9. a) Her iki gaz içinde sertlik ve oksit birikim yüzdesi grafiği b) GDS değeriyle kaplamadaki karbon yüzdesi	43
Şekil 4.10. Azotun atım hızı ve oksit birikimine göre elastik modül grafiği	44
Şekil 4.11. Elastik modülü – gaz atım hızı grafiği	44
Şekil 4.12. Elektrik ark püskürtmede kullanılan bazı nozul tipleri	46
Şekil 4.13. Değişik nozullarda gaz akış şekli a) düz standart nozul b) CD nozul	47

Şekil 4.14. İki farklı nozul tipi için partikül boyut dağılımı a) Standart nozul b) CD nozul .	47
Şekil 4.15. Elektrik ark püskürtmede sisteminde hava, azot ve CO ₂ kullanılarak püskürtülmüş paslanmaz telin kaplamadaki Cr içeriği .	49
Şekil 4.16. Değişik uygulamalarla üretilmiş kaplamaların oksit içeriği .	50
Şekil 4.17. a) Birincil gaz b) Birincil / İkincil gaz .	50
Şekil 4.18. Ark voltajının sprej hızı ve sıcaklığına etkisi .	52
Şekil 4.19. Voltajın pürüzlülük ile ilişkisi .	53
Şekil 4.20. Atomize gaz basıncı ile partikül hızları arasındaki ilişki .	53
Şekil 4.21. Elektrik ark spreyle biriktirilen kaplamalardan elde edilen splat morfolojileri: (a) ön ısıtmasız (b) ön ısıtma ile .	55
Şekil 4.22. 25 – 300°C sıcaklıklarda paslanmaz çelik üzerine Al kaplamanın splat formasyonları .	56
Şekil 4.23. Altlık sıcaklığı ile % verim ilişkisi .	57
Şekil 4.24. Altlık sıcaklığı ile yapışma mukavemeti ilişkisi .	58
Şekil 4.25. Partikülün taban malzemeye mekanik bağlanması .	58
Şekil 5.1. Deneyde kullanılan altlıklar .	60
Şekil 5.2. Elektrik ark püskürtme cihazı .	61
Şekil 5.3. Metalografik incelemede kullanılan optik mikroskopun resmi .	62
Şekil 5.4. Kullanılan sertlik cihazının resmi .	63
Şekil 5.5. Çekme cihazı kullanım şekli ve şeması .	64
Şekil 5.6. Kaplamada kullanılan altlıklardan bazılarının; a) yüzey hazırlığından önceki, b) yüzey hazırlığından sonraki görüntüleri .	64
Şekil 5.7. Altlıkların a) kaplama öncesi, (b) ve (c) kaplama sonrası görüntüleri .	65
Şekil 6.1. Kaplama telinin a) 250x’de SEM görüntüsü b) EDX analizi .	69
Şekil 6.2. 25 V, 4 bar atomize gaz basıncında a) 120 A b) 140 A c) 150 A d) 160 A’de üretilen kaplamaların optik görüntüleri .	70
Şekil 6.3. 25 V, 4 bar atomize gaz basıncında a) 120 A, b) 150 A’de üretilen kaplamaların kalınlık ölçüm görüntüleri .	71
Şekil 6.4. a) A21, b) A22, c) A23, d) A24 kaplamalarının genel SEM görüntüleri .	71
Şekil 6.5. a) A21, b) A23, c) A24 kaplamalarının 250x’deki SEM görüntüleri .	72

Şekil 6.6. 25 V, 4 bar basınçda; a) 120A, b) 170 A’de üretilen kaplamaların 500X’deki SEM görüntüleri	72
Şekil 6.7. a) A21 b) A25 nolu kaplamaların yüksek büyütmede detay görüntüleri	73
Şekil 6.8. a) A21 b) A25 nolu kaplamaların EDX analizleri	73
Şekil 6.9. 140 A ve 170 A akım seviyelerinde 25 V ve 28 V olan iki farklı voltaj değerinde üretilen kaplamaların genel SEM görüntüleri	74
Şekil 6.10. a) V11, b) V12, c) V21, d) V22 nolu kaplamaların yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri	75
Şekil 6.11. a) V11, b) V12, c) V31, d) V32 nolu kaplamaların üst yüzey SEM görüntüleri	77
Şekil 6.12. Amper/voltaj değerlerindeki değişimin mikro sertliğe etkisi	78
Şekil 6.13. Amper/voltaja bağlı olarak yapışma mukavemeti değişimi	79
Şekil 6.14. 160 A, 25 V’da a) 3 bar (P11) ve b) 4 bar (P12) da üretilen kaplamaların optik görüntüleri	80
Şekil 6.15. 160 A, 28 V’da a) 4 bar (P21) da b) 5 bar (P22) da üretilen kaplamaların SEM görüntüleri	80
Şekil 6.16. 200 A, 30 V’da a) 3 bar (P31) da b) 5 bar (P33) da üretilen kaplamaların üst yüzey SEM görüntüleri.....	81
Şekil 6.17. Atomize gaz basıncı mikro sertlik etkileşim grafiği	82
Şekil 6.18. 170 A, 28 V’da; a) 4 bar (A34), b) 5 bar (A43) da üretilen kaplamaların SEM görüntüleri	82
Şekil 6.19. Atomize gaz basıncı – mikro sertlik – yapışma mukavemeti diyagramı	83

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Termal spreY metodlarının bazı karakteristiklerinin kıyaslanması	19
Tablo 3.1. EAP’de kullanım amacına göre kaplanabilir tel malzemeler	27
Tablo 3.2. EAP’de kullanılan özlü teller ve endüstrideki kullanım alanları	27
Tablo 3.3. İki farklı teknikle üretilen tel kaplamanın kimyasal kompozisyonlar ve % oksit içeriğı	33
Tablo 3.4. HVAŞ ve AS cihazlarının yapışma mukavemeti ve mikrosertliğı karşılaştırması	34
Tablo 5.1. Akım değışimine bağı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri	66
Tablo 5.2. Voltaj değışimine bağı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri	67
Tablo 5.3. Gaz basıncı değışimine bağı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri	67
Tablo 6.1. Basınç değışimine bağı olarak üretilen P11, P12, P21 ve P22 kaplamalarının mikro sertlik ve yapışma mukavemeti değıerleri	83

ÖZET

Anahtar kelimeler: Elektrik ark püskürtme, alüminyum tel, kaplama, karakterizasyon

Çalışan metale koruyucu kaplamalar yapmak önemlidir. Termal sprej hızla büyüyen bir pazar ve elektrik ark sprejde düşük işletim ekipman maliyetleri, yüksek birikme oranları ve verimliliğinden dolayı bu pazarda önemli bir paya sahip. Elektrik ark püskürtme metalik malzemelerin bir altlık yüzeyine biriktirilmesi prosesidir.

Üretilen kaplamalarda mikroyapı kalitesi kaplama parametreleri ve püskürtme sistemi kontrolüne önemli ölçüde bağlıdır. Endüstride kullanımı yaygınlaştırmak ve kaplama kalitesini yükseltmek için, kullanılan parametrelerin etkisinin çok iyi araştırılması ve bu değişkenlerin kaplama özelliklerine etkilerinin bilinmesi gereklidir.

Bu çalışmada elektrik ark püskürtme yöntemiyle farklı parametrelerde alüminyum tel kaplamalar üretilip, bu parametre etkilerinin kaplama özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Üretilen kaplamaların optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesi ile EDS analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda, alüminyum tel için uygun kaplama parametreleri belirlenmiştir.

CHARACTERIZATION AND OPTIMIZATION OF ALUMINUM COATINGS PRODUCED BY ELECTRIC ARC SPRAY METHOD

SUMMARY

Keywords: Electric arc spraying, aluminum wire, coating, characterization

Protective coatings are important to metal working. Thermal spray is a rapidly growing market, and electric arc spraying is gaining a significant share of this market because of its low operating/equipment costs and high deposition rates and efficiency. Electric arc spraying is a process of depositing metallic materials on a substrate.

Coating microstructure depends very much on spray system and parameters employed. The investigation and improvement of coating properties subjected to different wire arc spray parameters requires the knowledge of coating properties of the industry on high quality coatings.

In this study, aluminum coatings were produced by electric arc spray with different process parameters and investigating the effect of spray parameters on coating characteristics. The coatings were investigated optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) with EDS analysing methods. After this study, it was found that process parameters affected on coating characterization. As a result of these experiments suitable the spray parameters can be determined according to the requirements of the aluminum wire coatings.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Malzemelerin çevreyle olan tüm etkileşimleri yüzey üzerinden olmaktadır. Bu etkileşimlerin kiminde malzemenin tümüne mâl olan özellikleri büyük ölçüde yüzey tarafından belirlenmektedir.

Malzemelerin yüzeyi tarafından belirlenen kimi özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- a) Sürtünme ve aşınma özellikleri
- b) Korozyon davranışları
- c) Yüzeye bağlı mekanik özellikler (yorulma)
- d) Dış görünüm ve renkleri
- e) Optik özellikleri (yansıtma katsayısı vb.)
- f) Fotoelektrik özellikleri (ışığa reaksiyonları) vb.

Bu özellikler açısından malzemenin davranışı aslında onun yüzeyinin davranışı tarafından belirlenir. Bu tür özelliklerin arzulandığı malzemelerde, malzemenin tümünü iyileştirmek yerine sadece yüzeyini iyileştirmek yeterli olabilmektedir. Kimi durumlarda yüzeyden beklenen özellikler malzemenin kütlesinden beklenen özelliklerle tamamen zıt olabilir. Örneğin aşınma dayanımı istenen malzemelerin sert olması zorunludur ancak sert malzemelerin de kırılganlıkları o derece yüksektir. Aşınma, yüzeye ilgili bir olgu olduğundan malzemenin sadece yüzeyinin sertliğinin arttırılması yani sadece yüzeyinin aşınma direncinin yükseltilmesi malzemenin tamamına bu özelliği kazandırmaktadır. İç kısım ise yumuşak bırakılarak kırılma tokluğu yüksek tutulur. Bu gibi durumlarda tüm kütleyi iyileştirmek veya değiştirmek yerine sadece yüzeydeki malzemeyi değiştirmek büyük bir kaynak tasarrufu sağlamaktadır.

Bazı hallerde ise yüksek nitelikli malzemeyi kütleli olarak üretmek teknolojik veya ekonomik olarak mümkün olmayıp, aynı malzemeyi yüzeye yapıştırmak, kaplamak vb mümkün olabilmektedir.

Yüzeyde yapılan iyileştirmeler tüm kesitin sadece çok küçük bir oranını tutmaktadır oysa elde edilen iyileştirmeler malzeme ömrünü 10-100 kat arttırabilmektedir. Bu açıdan malzemelerin yüzeylerinin iyileştirilmesi teknolojik ve ekonomik olarak çok önemlidir [1].

Yukarıda sayılan yüzey işlemleri içerisinde yüzey üzerine başka bir malzemenin yerleştirilmesiyle elde edilen kaplamalar önemli bir yer tutmaktadır. Yüzeylerin kaplanması için değişik yöntemler mevcuttur. Endüstriyel ihtiyaca göre uygulanan bu kaplamalar çok çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Termal püskürtme kaplama uygulamaları 1900'lü yılların başlarında ortaya çıkmış yüzey kaplama uygulamalarından bir tanesi olmakla beraber endüstrinin uzun servis ömrü ihtiyacının karşılanması açısından önemli bir alternatiftir. Diğer kaplama uygulamalarına göre nispeten kolay uygulanabilir ve düşük maliyetli yöntemler grubudur. Bu sebeple endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir. Termal püskürtme yöntemi ile kaplama türüne bağlı olarak mikron seviyelerinden mm mertebelerine kadar kaplamalar üretilebilmektedir. Termal püskürtme teknolojileri bir çok alt gruptan meydana gelir. Bu teknikler; ark sprey, alev sprey plazma sprey, HVOF, detonasyon ve soğuk sprey olarak gruplara ayrılırlar.

Elektrik ark püskürtme yöntemi; düşük işletim ekipman maliyetleri, yüksek birikme oranları ve verimliliğinden dolayı diğer termal püskürtme yöntemlerine nazaran daha ekonomik ve avantajlıdır. Bu yöntem kaplama malzemesi olarak sadece elektrik iletkenliği olan tel veya tel formunda üretilebilen sert partikül takviyeli özlü tel diye tabir edilen malzemelerin kullanıldığı bir kaplama prosesidir. Farklı tür tel kombinasyonları, nozul tasarımları ile son yıllarda sensör imalatından kalıp üretimine kadar uygulamalarda geniş ölçüde çeşitliliğe sahip bir yöntem olmaktadır. Kaplama parametreleri, genel olarak bütün termal püskürtme tekniklerinde kaplama karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. Deneysel uygulamalarda ve deneylerde

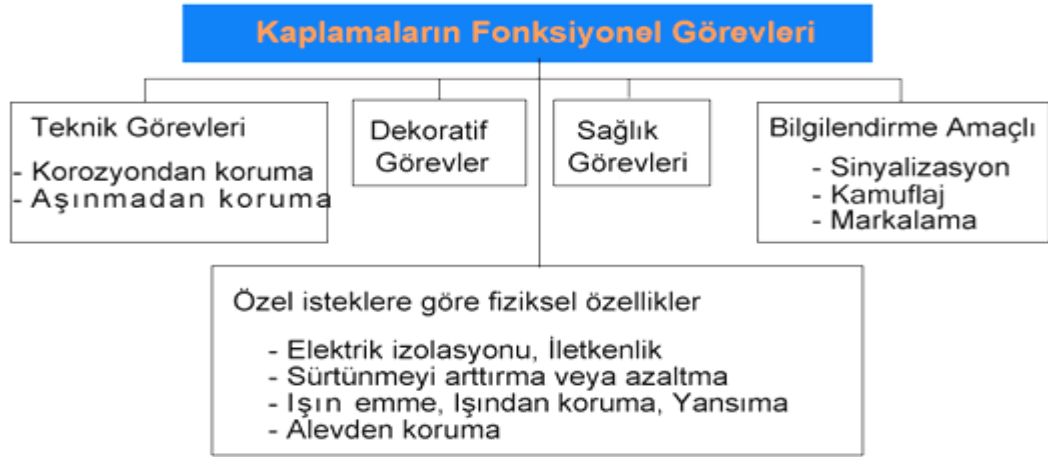
doğru kaplama parametrelerinin belirlenmesi hem uygulanacak kaplamaların kalitesini arttıracak hem de zamandan ve malzemedan tasarruf sağlanacaktır. Bu sebeple elektrik ark püskürtme tekniğinde başarılı kaplamaların üretilmesi için kaplama parametrelerinin etkisinin incelenmesi ve değerlendirilmesi büyük önem kazanmaktadır.

Bu sebeple bu çalışmada endüstride ve deniz atmosferinde korozyondan koruma, 800°C ve yukarısındaki sıcaklıklarda yüksek sıcaklık korozyon dayanımında ve gıda endüstrisinde kullanılan alüminyum tel (Speedmet 100) için EAP yöntemiyle farklı parametrelerde kaplamalar üreterek uygun kaplama parametresini saptamak amaçlanmıştır.

BÖLÜM 2. TERMAL PÜSKÜRTME KAPLAMALAR

2.1. Giriş

Malzemelerin yüzeylerine süsleme ya da koruma amacıyla başka bir malzemenin biriktirilmesi işlemine kaplama denir. Kaplamalar kullanılacak malzemeye ve isteğe göre değişik avantajlar sağlamaktadır. En çok yüzeyin erozyon-korozyondan korunması ve yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılır [2]. Şekil 2.1.'de ki şemada kaplamaların fonksiyonel görevleri verilmiştir.

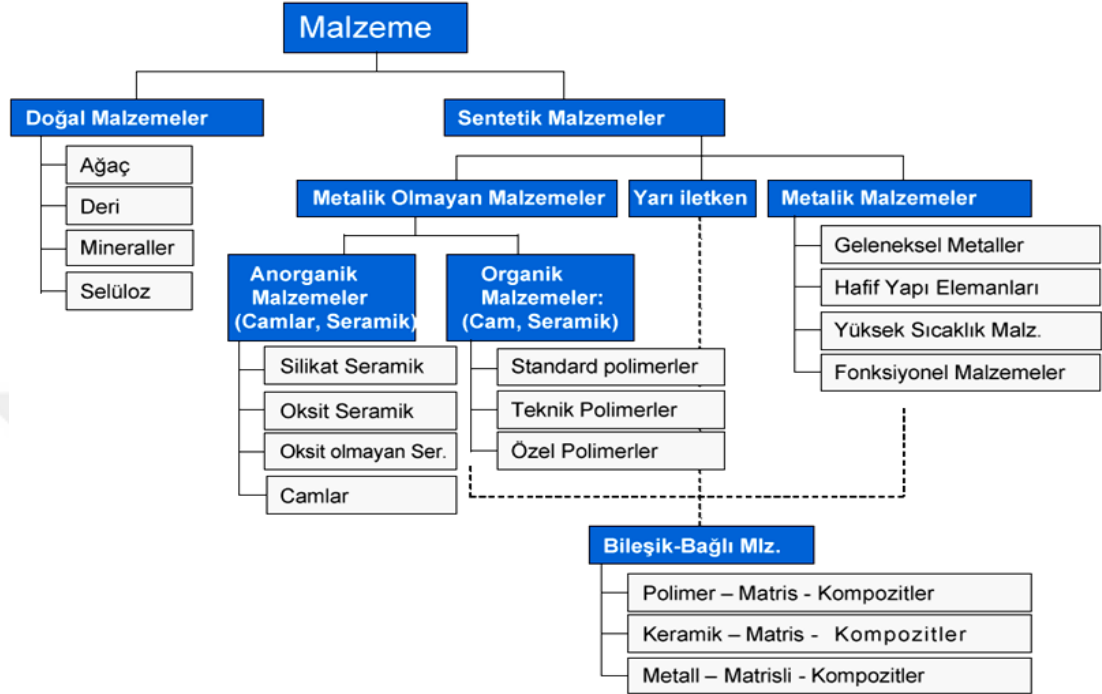


Şekil 2.1. Kaplamaların fonksiyonel görevleri [3].

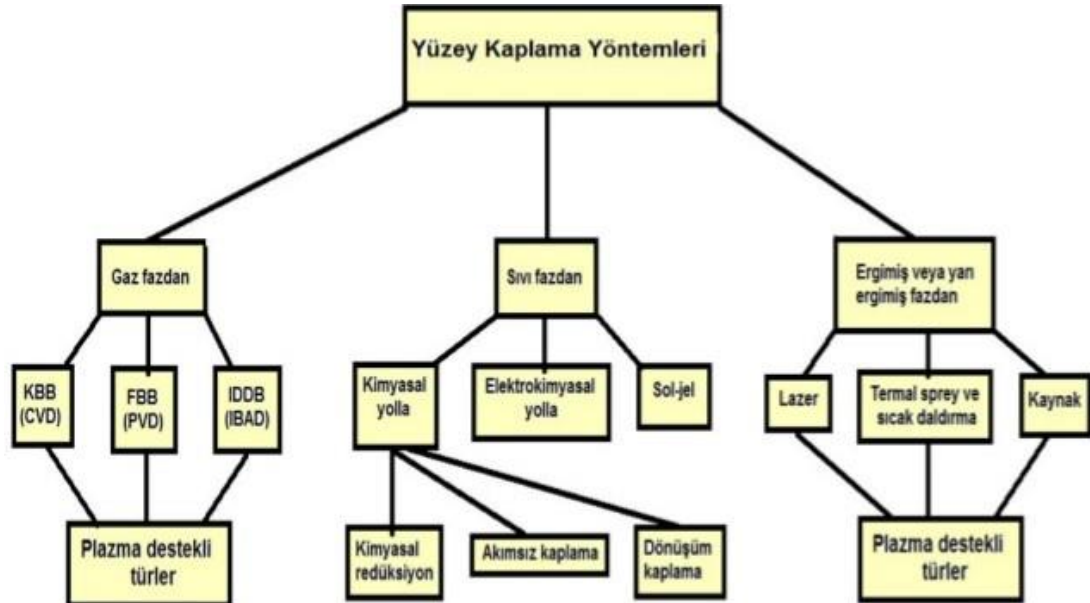
Şekil 2.2.'de kaplanabilir malzemelerin şeması verilmiştir. Yüzeylerin kaplanması için endüstriyel uygulamada önem kazanmış değişik kaplama yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler Şekil 2.3.'de verilmiştir.

Kullanılan bu yüzey biriktirme teknikleri kullanıcılar tarafından farklı alanlarda değerlendirilip kullanılır. Kullanılacak sistemin uygulanabilirliği; fiyat, uygulama

kolaylığı, boyutu, avantajları – dezavantajları, çevreye ve çalışanlara etkisi vs. birçok etkiye bağlıdır [2].



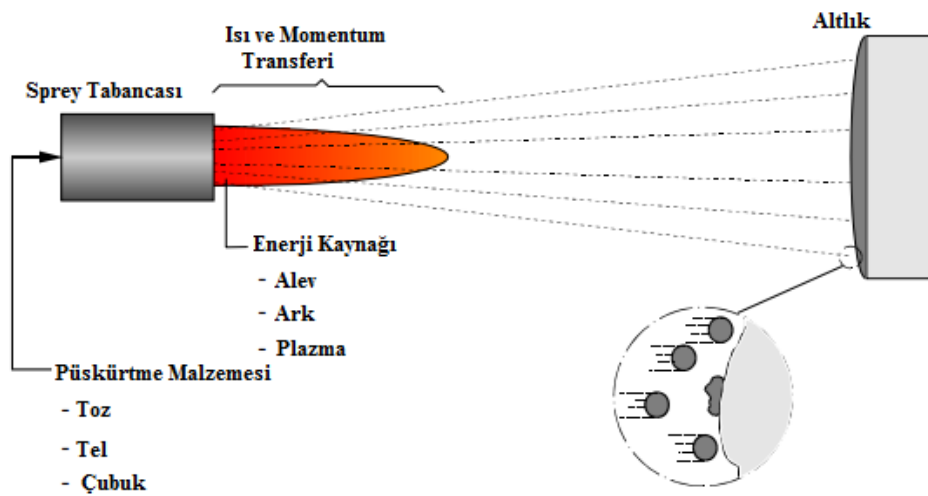
Şekil 2.2. Kaplanabilir malzemeler [3].



Şekil 2.3. Yüzey kaplama yöntemleri [3].

Termal sprey kaplama teknolojisi, mevcut kaplama teknolojileri arasında kendisine en yaygın endüstriyel kullanım alanı bulmuş bir teknolojidir ve çok sayıda farklı yöntemin oluşturduğu kaplama teknolojisi ailesinin genel bir adıdır [4]. Teknoloji yüzeyde mikron seviyesinden mm derecesine kadar tabaka oluşturmaya imkân sağlar ve çok geniş bir yelpazede üretim imkânı sunar [5]. Termal sprey kaplama teknolojisinin genel amacı malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi veya bu özelliklerin çevresel etkilere karşı korunabilmesi için malzemelerin yüzeylerinin koruyucu bir tabaka ile kaplanması esasına dayanmaktadır [6].

Termal püskürtme tekniği, metalik veya metalik olmayan kaplama uygulamalarında kullanılabilir. Bu kaplama uygulamaları üç ana gruptan oluşur. Alev püskürtme, elektrik ark püskürtme ve plazma ark püskürtmedir. Kullanılan kaplama malzemesini (toz, tel, çubuk) ergimiş veya yarı ergimiş hale bu enerji kaynakları kullanılarak getirilirler. Ergimiş ve/veya yarı ergimiş hale gelen partiküller, proses gazları ve atomize jetler ile önceden hazırlanmış yüzeye doğru hızla yönlendirilirler. Ergimiş veya yarı ergimiş partiküllerin yüzeye çarpması ile birlikte arayüzeyde mekanik bir bağlanma meydana gelir. Yönlendirilmiş partiküllerin üst üste çarpması ve birbirine bağlanması ile lamelar bir kaplama yapısı oluşur. Bu ince yapılmış partiküller çok hızlı bir soğuma rejimi göstererek ani bir şekilde katılaşırlar [7]. Şekil 2.4.'de termal püskürtme tekniğinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 2.4. Termal püskürtme prensibi genel görünümü [8].

2.2. Termal Püskürtme Kaplamaların Tarihçesi

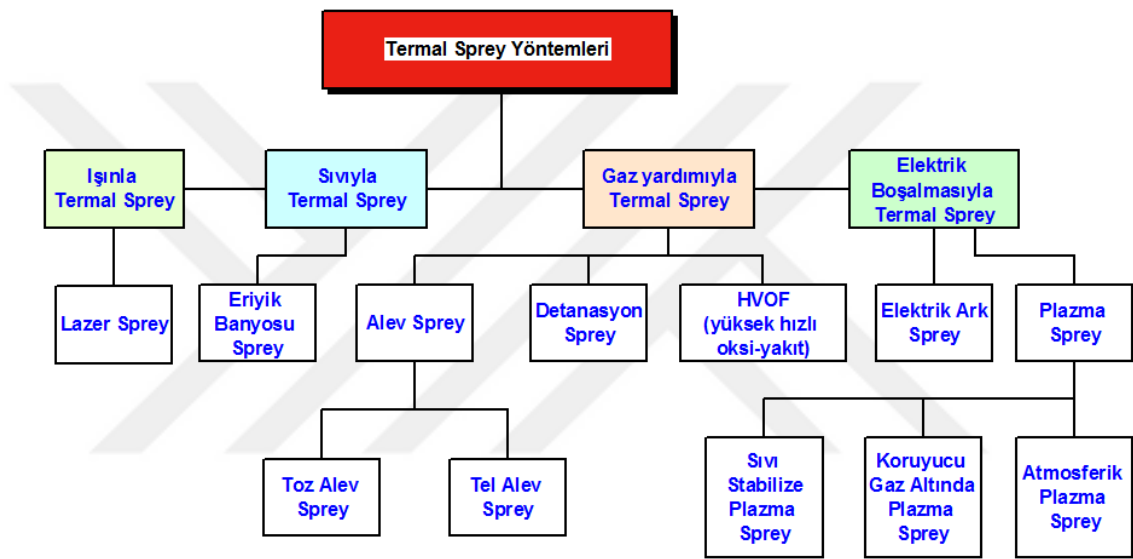
Termal spreyci kaplama teknolojisinin temelleri 1900'li yılların başında yaşayan Dr.M. Schoop tarafından atılmıştır. Dr.M. Schoop ilk olarak sıvı kurşunu oyuncak bir top yüzeyine püskürtmüş ve kurşunun bütün yüzeye yayınarak yapıştığını görmüştür. Dr. Schoop ve çalışma arkadaşları patentli olan termal püskürtme sisteminin püskürtme ekipmanını ilk olarak üretildiği Almanya'ya satmışlardır. Bu patent daha sonra Fransa'ya satılmıştır. Daha sonra 1920'li yılların başlarında ise termal püskürtme sistemleri Avrupa'nın birçok ülkesine ve Amerika'ya satılmıştır. Toplam kaplama pazarının (30 milyar dolar) yaklaşık %15 i tescil edilmiş olup çevresel basınçlara ve akımlara uygun kaplama operasyonlarının 5000'den fazlası Kuzey Amerika'da yapılmıştır. Termal spreyci kaplama teknolojisi, kaplama tozları çeşidinin artmasıyla da en hızlı büyüyen pazarlar içerisinde yerini almıştır.

Buradan esinlenerek kaplama proseslerinin icat edilmesi ve kaplama uygulamalarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar başlanmıştır. 1900'li yılların başından günümüze kadar hammadde fiyatlarındaki artışlar, daha iyi performans beklentileri, aşınma ve korozyon gibi etkilerin yanı sıra teknolojiye meydana gelen hızlı değişimler, malzemelerin özelliklerinin her zamankinden daha yüksek özellikte performans göstermelerini zorunlu kılmıştır. Artık birçok işletmede tamir, bakım veya yeni malzeme maliyetlerinden ziyade üretim kaybına yönelik maliyetler ön plana çıkmaktadır. Günümüzde artık kullanıcıların hemen hemen hepsi hizmet sektörlerinden malzeme performansları için garantili kullanım ömrü talep etmeleri üreticileri daha teknolojik çalışmalara sevk etmektedir. Bu durum, malzemelerin kullanım sınırlarını ve malzeme üreticilerini daha da zorlamaktadır. Bu nedenle artık tek bir malzeme kullanımı devamlı yükselen talepleri karşılamak konusunda yetersiz kalacağından uygulamalar mono – multi sistemlere geçiş göstermesi kaçınılmaz olmuştur.

Kaplama için tel, toz ya da solüsyon olarak kullanılan malzemeler genellikle metaller ve seramikler iken gelişen teknoloji ile birlikte plastiklerin ve kompozitlerin de kaplanabilmesi ile kaplama sektörünün önemi gün geçtikçe artmaktadır [9].

2.3. Termal Püskürtme Kaplama Yöntemleri

Termal püskürtme kaplamaların sınıflandırılması yöntemdeki farklılıklara göre yapılmaktadır. Termal sprej prosesi kullanılan enerji kaynakları (yanma, elektrik, gaz ve dinamik olarak) besleme malzemesi (toz, tel veya çubuk) ve çevreyi saran (hava, düşük basınç, vakum, inert gaz veya sualtı) etkilere göre çeşitli gruplara ayrılmıştır [10]. Termal püskürtme kaplamaların genel olarak sınıflandırılması Şekil 2.5.'de verilmiştir.



Şekil 2.5. Termal püskürtme prosesleri [3].

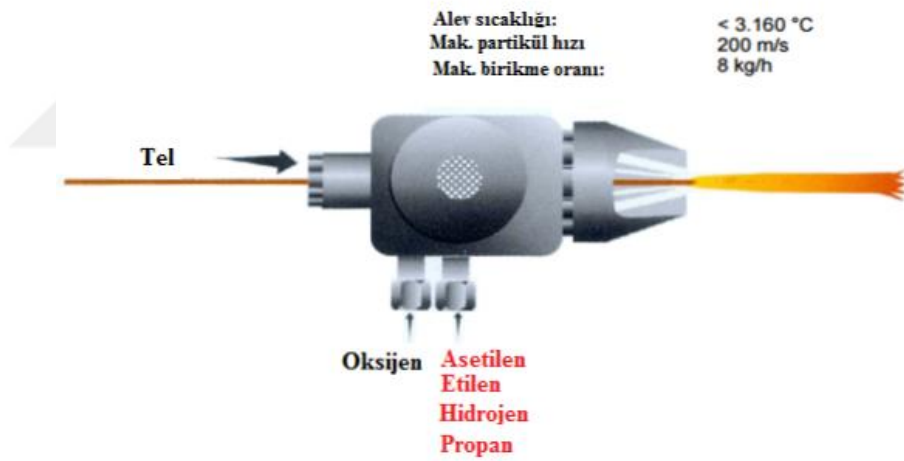
Püskürtme yöntemlerinde püskürtme hızı ve sıcaklık operasyon aralığı, kaplama karakterini etkileyen iki önemli faktördür. Termal püskürtme yönteminin seçimi genellikle şu faktörlere bağlıdır [11].

- Bir pasodaki kaplama alanı,
- Maliyet etkili kaplamalar
- Taşıyabilir kaplama sistemleri
- Püskürtme kaplamaların mekanik özellikleri
- Çevresel zorluklar
- İş güvenliği

Günümüzde termal püskürtme kaplamalar üretmek için en yaygın olarak kullanılan termal sprej yöntemleri; alev sprej, ark sprej, plazma sprej, HVOF, detonasyon ve soğuk sprej prosesleri olarak göze çarpmaktadır.

2.3.1. Alev püskürtme yöntemi

Alev püskürtme, toz, tel veya çubuk halindeki kaplama malzemesinin oksijenin asetilen, propan, propilen vb. bir yakıtla alev kaynağı oluşturularak ergitilip, basınçlı bir hava yardımıyla yüzeye püskürtülmesi işlemidir. Püskürtme prosesi genel olarak alevle toz püskürtme ve alevle tel püskürtme olarak ikiye ayrılmaktadır. Yaklaşık olarak 2480°C'nin altında ergime derecesine sahip olan bütün malzemeler bu sistem ile kaplanabilmektedir. Alev kaynağının sıcaklığı seçilecek yakıtla göre değişmektedir [12]. Şekil 2.6.'da tel alev sprej yöntemi 2.7.'de de uygulaması görülmektedir.



Şekil 2.6. Tel alev sprej yöntemi [8].

Alev sıcaklığının düşüklüğü ve yüksek porozite içermesine rağmen alevle püskürtme yöntemleri günümüzde hala sıklıkla kullanılmaktadır. Bakımı kolay ve kullanımı basittir. Ayrıca uygulamadaki malzeme çeşitliliği büyük bir avantaj sağlar. Cihazının taşınabilirliği kaplama yapımında avantajlardan bir tanesidir. Parçayı yerinde kaplama imkânı veren bir sistemdir. Diğer proseslere nazaran daha ucuz olması, endüstride kullanımının sebebini açıklamaktadır [12].



Şekil 2.7. Alev sprej kaplama uygulaması [8].

2.3.1.1. Tel alev püskürtme yöntemi

Tel alev püskürtme tekniği; tel halinde üretilmiş ve ergime sıcaklığı oksii-asetilen alev sıcaklığının altında olan herhangi bir metalin kaplanacak yüzeye püskürtülmesi olayıdır. Kapanacak metal tel, sürücü ile püskürtme tabancasının nozuluna beslenmektedir. Tel nozul içinden geçerken oksijen ve yanıcı gaz karışımı yardımı ile ergitilmektedir. Ergimiş metal yüksek basınçlı hava ile atomize edilerek kaplanacak yüzeye püskürtülmektedir. Bu yöntemde alevin fonksiyonu metalin ergitilmesini sağlamaktır. Kapanma uygulandıktan sonra yüzeyin sıcaklığı 95 - 200°C arasında değişmektedir [13].

2.3.1.2. Toz alev püskürtme yöntemi

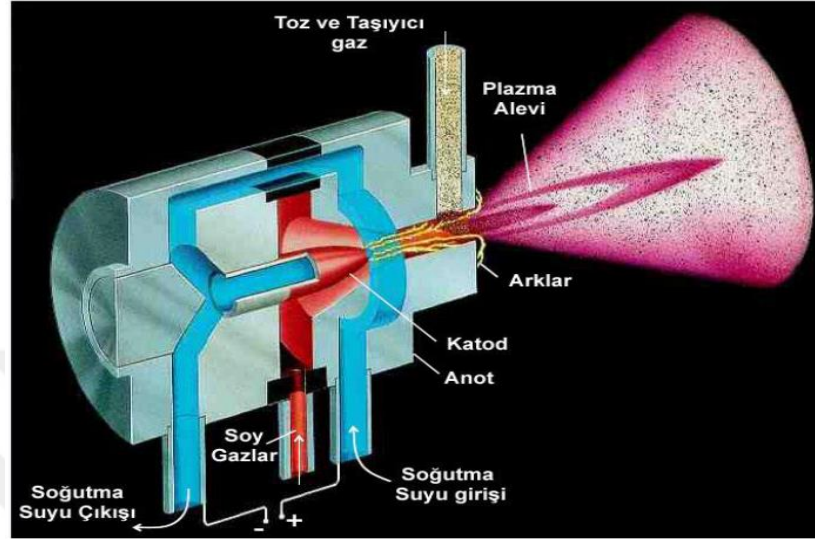
Toz alev püskürtme prosesinde toz malzeme alev sprej tabancasının üzerindeki bir besleyiciden yerçekiminin etkisiyle beslenmekte ve bir taşıyıcı gazın yardımı ile toplanıp ergitilmek üzere tabancanın nozuluna taşınmaktadır. Burada ergitilen tozlar kaplamayı oluşturmak üzere ana malzeme üzerine gönderilmektedir. Bu yöntem genellikle seramik tozlarının kullanılması için uygundur. Bunun yanında oksidasyona karşı dirençli metal ve alaşımlar da bu yöntem ile püskürtülebilmektedir. Alümina, zirkonya, alümina-titanya, nikel ve kobalt esaslı alaşımlar gibi malzemeler bu yöntem kullanılarak püskürtülebilir [14].

2.3.2. Plazma püskürtme yöntemi

Yüksek enerjili bir kaplama prosesi olan plazma püskürtme yöntemi, özellikle seramik esaslı malzemelerin kaplanmasında başarıyla uygulanmaktadır. Plazma sprej kaplama işleminde taban malzeme üzerine biriktirilmek istenen metalik, seramik veya bunların karışımı şeklindeki tozların plazma enerjisi ile ergitilmesi esastır. İşlemin temel enerji kaynağı oluşturulan plazmadır. Sisteme verilen elektrik ile tabanca içerisinde bir plazma oluşturulur. Plazma kavramı için birçok değişik tanım yapılmıştır. Fizik ve kimya için plazma iyonize olmuş gaz anlamındadır. Plazma en yalın anlamıyla maddenin dördüncü hali olarak tanımlanan, içerisinde eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon barındıran yüksek enerjili bir gazdır denebilir. Plazmanın en önemli iki avantajı çok yüksek sıcaklığa çıkabilmesi ve maddelere iyi ısı transferi sağlamasıdır.

Plazma ile yüksek ısı elde edilebilmesi yüksek ergime noktasına sahip seramik ve metal esaslı alaşım tozlarının kaplama uygulamalarında kullanılmasını mümkün kılar. Seramikler, yüksek aşınma ve sertlik özellikleri, hammaddesinin yaygınlığı ve ucuzluğu, korozyon, oksitlenme ve düşük termal iletkenlikleri ve yüksek termal çevrim sayısı özelliklerinin avantajıyla önemli bir kaplama malzemesi konumundadırlar. Ancak yüksek ergime noktaları sebebiyle, örneğin zirkonya 2715 °C, bu malzemelerin kaplama uygulamalarında kullanılabilirliği/ergitilebilirliği ancak çok yüksek sıcaklık derecelerinde mümkündür. Plazma enerjisi kullanımına bağlı olarak plazma sprej kaplama teknolojisi, yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin kaplama maddesi olarak işlenebilirliğine (kaplanabilirliğine) imkan sağlar. Plazma, kaplama tabancası içerisinde su soğutmalı bakır anot ile toryumlu tungsten katot arasında oluşturulan yüksek voltaj arkı (doğru akım) ile oluşturulur. Tabanca içerisinden genellikle argon ve düşük miktarda hidrojen gazı geçirilir. Anot ve katot arasındaki elektrik arkı bu gaz içerisinde plazma arkı yaratır. Bu sırada toz beslemeyle beraber plazmada ergitilen tozlar yüzeye püskürtülür ve kaplama yapısı elde edilir. Oluşan plazma sıcaklığının yüksek olması (15.000-25.000) partikülleri iyi ergimiş yüksek yoğunluklu kaplamalar elde edilmesine imkan sağlar. Uzun sanayiden, tekstil sanayine, kağıt sektöründen tel çekmeye kadar geniş bir kullanım

alanı vardır. Bunların yanında yatırım ve bakım maliyetleri oldukça yüksektir. Ayrıca prosesin taşınma zorluğu ve yüksek maliyeti önemli dezavantajlarıdır [15, 16, 17, 18].

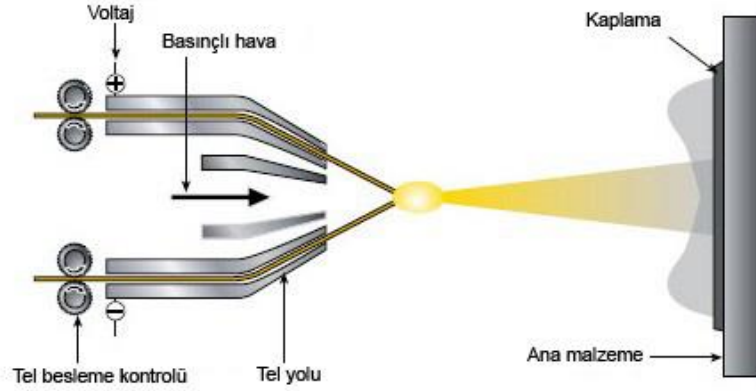


Şekil 2.8. Plazma sprej sistemi [19].

2.3.3. Elektrik ark sprej prosesi (EAS)

Elektrik ark püskürtme eski bir püskürtme tekniği olmasına rağmen günümüzde hala kullanılmaktadır ve önemini yitirmemiştir. Bunun en büyük sebebi gelişmiş termal püskürtme tekniklerine nazaran hala daha ekonomik olmasıdır. Ark sprej diğer kaplama proseslerinden daha fazla birikme verimine sahiptir. Ayrıca düşük işletim maliyeti sağladığı için hala vazgeçilmez kaplama proseslerinden bir tanesidir [20].

Bu yöntemde kullanılan malzemeler tel formundadır. Diğer termal sprej tekniklerinden farklı olarak dıştan gelen, gaz alevi ya da plazma gibi herhangi bir ısı kaynağı yoktur. Isıtma ve ergitme işlemi için elektrik arkı kullanılır ve bu arkın üretimi için elektrod olarak iki metalik tel kullanılmaktadır. Ergimiş metal basınçlı hava ya da diğer gazlar tarafından atomize edilir ve yine bu gazlar tarafından substrat yüzeyine hızlandırılır [21, 22].



Şekil 2.9. Elektrik ark sprey tekniği şematik görünümü [23].

İşlem sırasında substrat malzemeye sıcak gaz jeti teması olmadığı için, substrat sıcaklıkları alev sprey tekniğine nazaran oldukça düşüktür. Bu yöntem aynı zamanda inert gazlar ya da kontrollü atmosfer ortamlarında da gerçekleştirilebilir. Alev sprey kaplamaya nazaran birçok avantajı vardır. Mesela 69 MPa'a kadar yüksek yapışma kuvvetleri bu yöntemle elde edilmiştir. Bazı nikel bazlı alaşımlarda kaplama oranları 55 kg/saat oranlarına kadar çıkabilir. Bu tarz sistemler diğer yöntemlere nazaran daha az maliyete sahiptir. Elektrik güç gereksinimleri azdır ve pahalı gazlara ihtiyaç yoktur [21, 22].

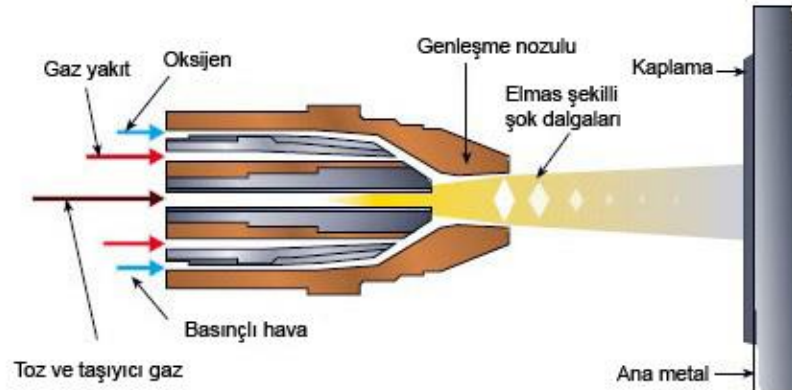
Bu sistem bir alasım kaplama üretmek için iki farklı malzeme telinin püskürtülebilmesine olanak vermektedir. Ark püskürtme sistemi kompresörlü hava olduğu sürece substrata çok az bir ısı akısını sağlamaktadır. Bu yüzden substrat malzemeye hasar vermeksizin veya çarpılmaya uğramadan kalın kaplama oluşturmak için uygun bir yöntemdir. Yüksek korozyon dayanımına sahip çinko, alüminyum ve çinko/alüminyum alasımları sıklıkla çeliklerin korozyona karşı korunmasında kullanılan kaplama malzemeleridir. Bu sistem taşınabilir olduğundan herhangi bir yerde kullanılmaya uygundur [7].

Fakat bu yöntemle elde edilen kaplamalar yüksek porozite, oksit ve erimemiş partiküller içermektedir. Yüzey pürüzlülüğü diğer yöntemlere nazaran oldukça fazladır. Sadece tel formundaki iletken teller kullanılabilir. Asimetrik damla

oluşumu ve atomizasyonu kaplama mikroyapısında belirgin bir homojensizlik yaratır. Bu durumlar kaplama özellikleri açısından çok zararlıdır [24].

2.3.4. Yüksek hızlı oksijen yakıtlı sprey (HVOF) prosesi

Bu spreyleme tekniğinde, yakıt gaz ve oksijen bir hazneye iletilir, burada oluşan yanma sonucunda oluşan süpersonik alev hızının daha da artırıldığı bir nozula yönlendirilir. Kaplama malzemesi toz halinde bu akımın içine beslenir. Toz taneciklerinin kazandığı aşırı yüksek hız, yüzeye çarptığında yüksek yoğunlukta ve güçlü bir kaplama oluşturur. Parçacıkların yüzeye çarpma anındaki yüksek kinetik enerjisi, taneciklerin tam erimemesi halinde bile kuvvetli bir mekanik bağ oluşmasına yol açar. Bu durum, HVOF tekniğini gaz türbin parçaları ve valflerde tungsten karbür ve nikel krom kaplamalarda yaygın olarak kullanılmasına yol açmaktadır. Şekil 2.10.'da HVOF tekniği görülmektedir [25].

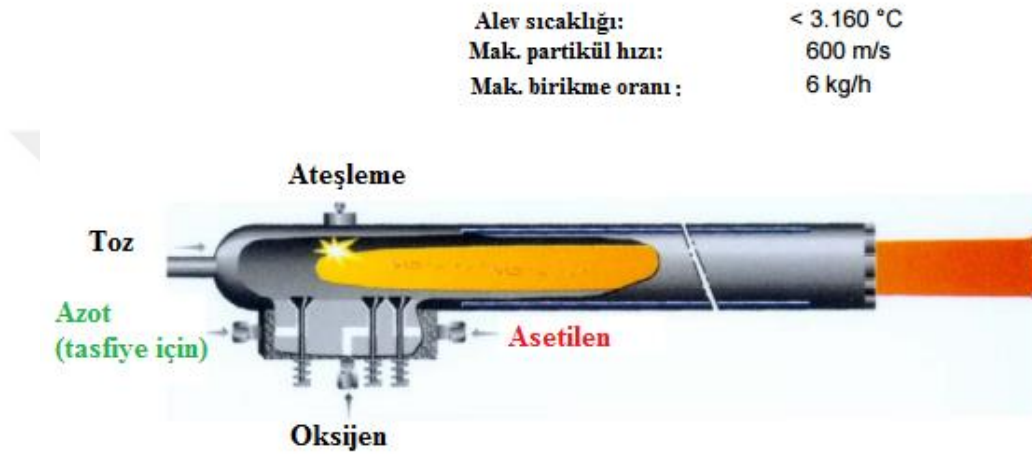


Şekil 2.10. Yüksek hızlı oksijen-yakıt yanma tip sprey tekniği şematik görünümü [25].

2.3.5. Detonasyon tabancası (Detonation Gun)

Oksijen-asetilen gaz karışımı ve toz partikülleri bir kovan içerisine gönderilir ve bu kovan içerisinde bir kıvılcım vasıtasıyla tutuşturulup kontrollü olarak patlatılır. Yüksek sıcaklık ve basınca sahip patlama dalgası, kovanın içerisinde hareket ederek partikülleri ergime noktası ve üzerindeki bir sıcaklığa ısıtıp ertirir ve onları hızlandırarak (750 m/s' lik bir hızla) substrat yüzeyine gönderir. Yakıtı ya da diğer

parametreleri de değiştirerek partikül hızları 1000 m/s gibi yüksek değerlere arttırılabilir (Super D-Gun). Bu patlatma tabancası prosesi bir çevrim içerisindedir, her bir patlatma işleminden sonra kovanın içi azot ile temizlenir ve bu proses saniyede yaklaşık 10 kez tekrarlanır. Tipik kaplama kalınlıkları 0.05-0.50 mm aralığında değişmektedir. Fakat daha ince ve daha kalın kaplamalarda elde edilebilir. İşlemin şematik görünümü Şekil 2.11.'de verilmiştir.



Şekil 2.11. Patlatma tabancası yönteminin şematik görünümü [8].

Bu yöntemle elde edilen kaplamaların yapışma dayanımları son derece iyidir ve porozite miktarı son derece düşüktür (metalografik olarak ölçülen en düşük porozite miktarı %2 civarındadır). Dikkatli gaz kullanımı sonucu metallerin ve karbürlerin oksidasyonu engellenebilir. Partiküllerin kaplama prosesi sırasındaki aşırı yüksek hızı (1000 m/s), kaplamalarda kalıntı gerilimlere neden olabilmektedir. Bu durum kaplamanın yorulma özelliklerine etki edebilir. Hemen hemen bütün metalik, seramik ve sermet malzemeler bu yöntemde kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Bu yöntemle yüzey ve korozyon direncinin yüksek olduğu kaplamalar elde edilir [26]. Yöntem çok gürültülü olup ses şiddeti 150 dB'den fazladır. Bundan dolayı işlem, ses izolasyonlu bir odada yapılmaktadır [27].

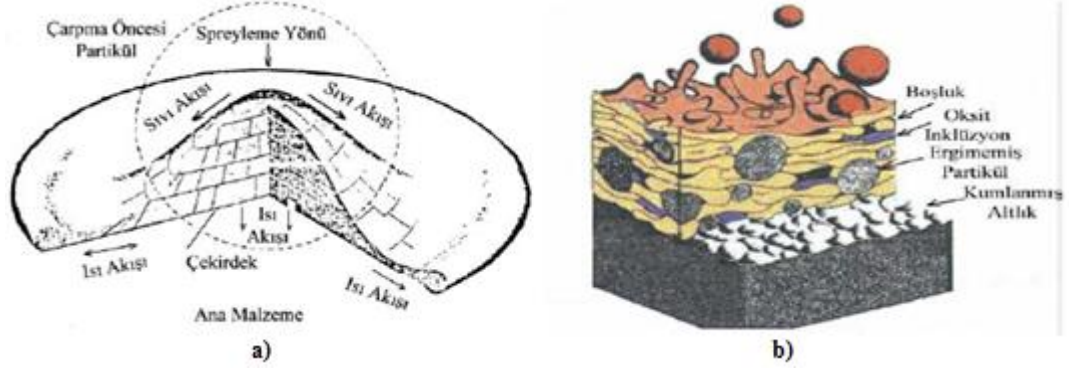
2.4. Termal Püskürtme Kaplamaların Mikroyapısı

Termal püskürtme tekniğinde tel, toz ve çubuk halindeki malzemelerin bir şekilde ergitilip bir püskürtme gazı vasıtasıyla yüzeye gönderildiğini söylemiştik. Kaplama malzemesi ergitilip parçacıklar halinde hızla altlık yüzeyine yapışırlar. Partiküller yüzeye çarptıklarında dışa doğru yayılırlar, ısıları düşer ve son derece yüksek hızda katılaşırlar [28].

Hızla ısılarını kaybeden bu partiküller yaklaşık bir disk görünümüne sahiptirler. Peş peşe gelen yapışma ile de kaplama yapısı oluşturulur. Termal püskürtme kaplamalarda mikroyapı levhasal katmanlar şeklinde meydana gelmektedir. Yapının içerisinde poroziteler, ergimemiş partiküller, oksit ve yarı ergimiş partiküller oluşacaktır. Bu yapıların miktarları termal püskürtme tekniklerine ve kullanılan cihaz parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Partiküllerin mikroyapı görünümü ve ergimiş partikülün yüzeye çarptığındaki splat formasyonu Şekil 2.12.'de görülebilir [29].

2.4.1. Porozite ve yoğunluk özellikleri

Porozite, püskürtme yoluyla üretilen kaplamaların karakteristik özelliğidir. Püskürtme proseslerinde porozite birincil olarak hızla yönlendirilmiş ergimiş partiküllerin yeterli derecede birbirine bağlanamamalarından dolayı kaplamada bulunan hava boşlukları nedeniyle oluşur. Porozite ve oksit inklüzyonları bağ mukavemetinde önemli iki faktördür. Minimum porozite ve inklüzyon kaplamada yüksek bağ mukavemeti sağlayacaktır. Bazı durumlarda poroziteli yapılar tercih edilirken (örneğin termal bariyer uygulamalarındaki düşük termal iletkenlik için) bazı uygulamalarda ise (örneğin yüksek aşınma direnci için) yüksek yoğunluğa ihtiyaç duyulmaktadır Sprey kaplamalarda porların dağılımı ve geometrisi üniform değildir. Meydana gelen porozitelerin çapları 20 μm ila 100 μm arasında değişmektedir [30, 31].



Şekil 2.12. a) Çarpma etkisiyle partikülün levha şeklini alması b) Kaplama mikroyapısı [29].

Termal spreycaplamalarda oluşan poroziteler şu şekilde sınıflandırılabilir (Şekil 2.13.).

Tip 1: Lameller ile partiküllerin istiflenmesi sonucu oluşur.

Tip 2: Termal spreycaplaması sırasında gaz türbülansından kaynaklanan gaz sıkışması sonucu oluşur ve yapıdaki görünümü son derece ayırt edilebilir bir formdadır.

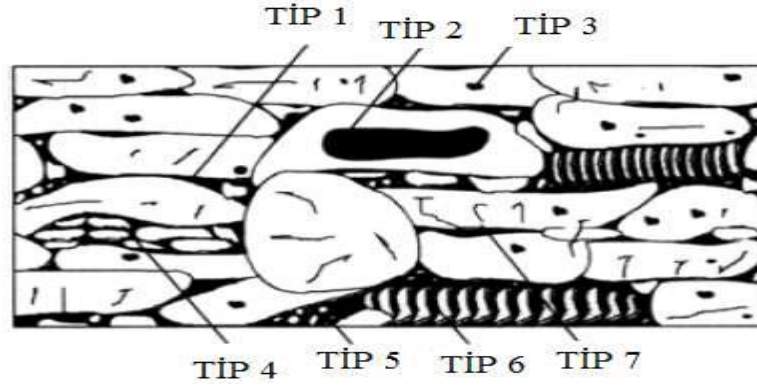
Tip 3: Ergimiş metal içerisinde çözünen gaz kabarcıklarından kaynaklanmaktadır.

Tip 4: Kaplama prosesi sırasında yüzeye çarpan partiküllerin parçalanması sonucu oluşan porozite tipidir.

Tip 5: Buharlaştıran partiküllerin yoğunlaşması sonucu meydana gelir.

Tip 6: Dendritler arasındaki katılma sırasında meydana gelen büzülmeden kaynaklanır.

Tip 7: Mikroçatlakların sonucudur [32].



Şekil 2.13. Termal sprej kaplamalarda oluşan porozite tipleri [32].

Kaplamalarda poroziteyi azaltmak için alınabilecek bazı önlemler mevcuttur bunların başlıcaları;

- Altlık yüzeyini önceden ısıtarak temas sıcaklığını arttırmak ve yüzeye çarpan ergimiş damlacıkların viskozitelerini azaltmak,
- Düşük basınçlı (LPPS) plazma sprej sistemi kullanarak partiküllerin çarpma hızlarını dolayısı ile kinetik darbe enerjilerini arttırmak,
- Kaplama sonrası bazı işlemler uygulamak (tavlama yaparak katı hal difüzyonu ile mikroporozitelerin azaltılması, kaplamalara sıcak izostatik press uygulanması, lazer ile yüzey yoğunlaştırma işlemleri, düşük sıcaklık uygulamaları için kaplamaların polimerle infiltrasyonu vb.).

2.5. Termal Püskürtme Kaplamaların Karşılaştırılması

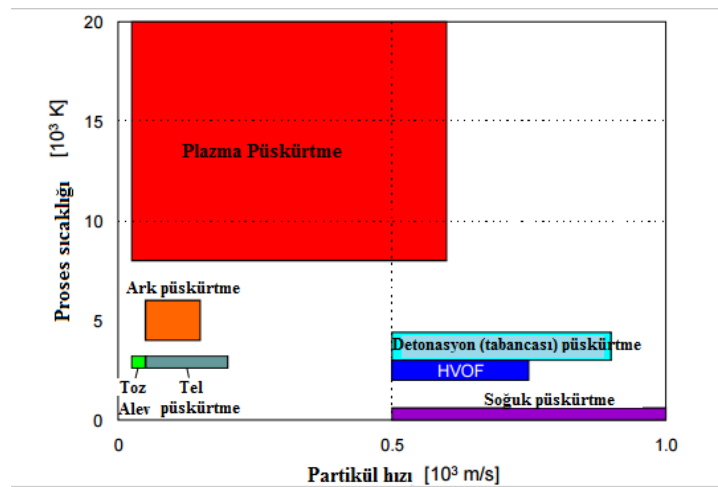
Termal püskürtme kaplamaları kendi aralarında farklı açılardan kıyaslayacak olursak aşağıdaki sonuçları elde ederiz;

- Yüksek Hız → Detonasyon Tabancası, HVOF, Soğuk Sprej
- Yüksek Sıcaklık → Plazma Spreyi
- Maliyet → Alev – Elektrik Ark – Plazma, D-Gun, HVOF
- Kaplama Kalitesi → Parçacık Hızı ↑ [33].

Tablo 2.1. ve Şekil 2.14.'de termal sprey yöntemlerinin bazı karakteristiklerinin kıyaslanması verilmiştir.

Tablo 2.1. Termal sprey metodlarının bazı karakteristiklerinin kıyaslanması [22].

Proses	Malzeme	Besleme Malzemesi	Substrat Sıcaklığı, °C	Partikül Hızı m/s
Toz alev sprey	Metaller, seramikler	Toz	105-160	65-130
Tel alev sprey	Metalik kaplamalar	Tel	95-135	230-295
Ark sprey	Metalik kaplamalar	Tel	50-120	240
HVOF	Metaller, sermetler ve bazı seramikler	Toz	95-150	100-150
Patlatma tabancası (D-Gun)	Metaller, sermetler, seramikler	Toz	95-150	850-1000



Şekil 2.14. Termal püskürtme yöntemlerinde sıcaklık-hız kıyaslaması [8].

BÖLÜM 3. ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTME PROSESİ

3.1. Giriş

Elektrik Ark Sprey (EAS) teknolojisi, termal sprey ailesinin bir üyesidir. Özelliği, termal sprey proseslerinin en ekonomik olanıdır. EAS, muhtelif taban malzeme yüzeyine aşınmaya ve korozyona dirençli, metalik esaslı kaplama üretmeye imkan sağlar. Özellikle, klasik çinko kaplamaya alternatif korozyon uygulamalarda kullanılır. Bu sebeple daha çok Zn, Al, Cr benzeri malzemeler veya alaşımları kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, aşınmaya maruz kalan parçaların tekrar kullanılabilir hale getirilmesine kadar bir çok değişik uygulamalarda kullanılmaktadır. Kullanılacak kaplama malzemesinin iletken olması gerektiği için seramik esaslı malzemeler ancak özlü tel formunda kullanılabilirler. Bu proses ile çok geniş alanlar hızlı bir şekilde kaplanabilmektedir. Uygulaması diğer proseslere nazaran daha kolaydır.

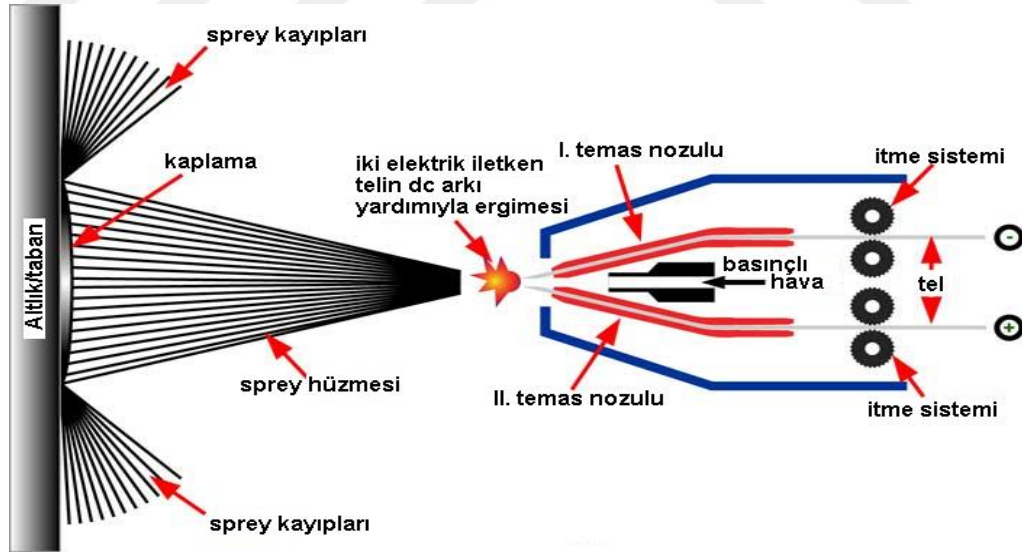
3.2. Elektrik Ark Püskürtme Teknolojisi

Bu yöntemde taban malzemeyi kaplamak için tel şeklinde çeşitli kaplama malzemeleri kullanılabilir. Bir elektrik arkının içerisinde iki metal telinin ergitilmesi ve bu ergimede oluşan partiküllerin önceden hazırlanmış yüzeye doğru yönlendirilmesi ile bir kaplama tabakası oluşturulur. Ark sprej sistemi eş zamanlı ve devamlı bir şekilde iki metal teli aynı hız oranıyla besleyen ekipmandan oluşur. (+) ve (-) yükle yüklenmiş olan teller kesişme noktasında temas ettiğinde 4000-5000 °C civarında sıcaklığa sahip bir ark meydana gelir. Bu sıcaklık telleri eritmeye yeterlidir. Daha sonra eriyik haldeki malzeme yüksek basınçlı hava ile atomize edilerek yüzeye püskürtülür. Ark sprej sistemi için sünek ve elektriksel olarak iletken malzemeler kullanılabilir. Eğer teller farklı malzemeden ise alaşım kaplaması

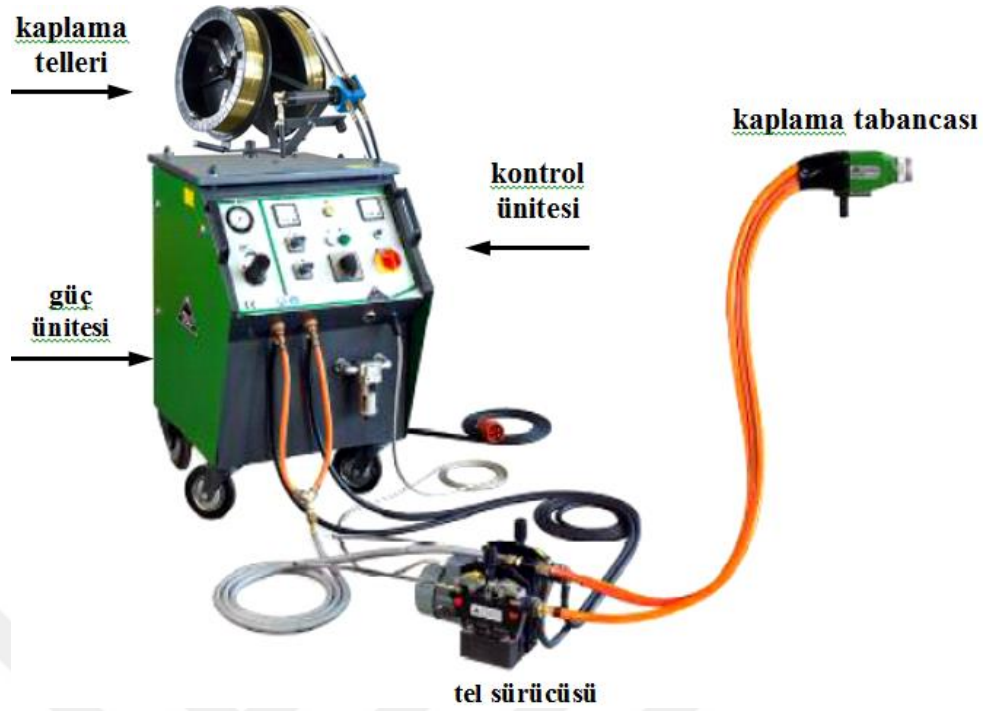
üretilebilir [34]. Şekil 3.1.'de tipik bir ark püskürtme sisteminin şematik görünümü görülebilir.

Elektrik ark sprej kaplama sistemi genel olarak kontrol ünitesi, güç ünitesi, tel besleme ve tabancadan meydana gelmektedir. Tipik bir EAS için gerekli ekipmanlar Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. Sistemin en önemli parçası kaplama tabancasıdır. Tellerin birbirine temas ederek arkın oluşturulduğu ve kaplama malzemelerinin düzenli olarak eritildiği yer kaplama tabancasıdır.

Kaplama prosesinde iki sprej teli arasına bir elektrik potansiyeli uygulanır. Kısa temas noktası diye isimlendirilen yerde karşılaşan teller birbiri ile temas ederler ve bu noktada her bir telin 1 mm^2 'sine düşen 100 amperin üzerindeki yüksek akım yoğunluğu nedeniyle hızlı bir ergime gerçekleşir. Ergiyen teller, basınçlı hava akımı yardımıyla metal damlacıkları şeklinde tabanca/nozul ucunda ileri püskürtülür. Bu sayede ergimiş metal partikülleri 80 ila 200 mm uzaklıkta bulunan altlık yüzeyine yaklaşık 100 ila 150 m/sn'lik bir hızla taşınır [35].



Şekil 3.1. Ark püskürtme sisteminin şematik görünümü [35].



Şekil 3.2. Elektrik ark sprey sistem bileşenleri [35].

3.2.1. Elektrik ark püskürtme teknolojisinin avantajları

Elektrik ark sprey öğrenmesi ve kullanılması kolay, taşınabilir ve kolayca tamir edilebilir bir teknolojidir. EAS, termal sprey proseslerinin en ekonomik olanıdır. EAS'in avantajları olarak;

- a. Yatırım maliyetinin düşük olması,
- b. Geniş bir yelpazede kaplama üretilebilmeye imkan sağlaması,
- c. Yüksek püskürtme oranı/verimi,
- d. Kontrol parametrelerinin az olması,
- e. Lokal kaplama uygulamasına izin vermesi,
- f. Altlığın deforme olmaması ve yeterli kaplama kalitesinin yakalanması,
- g. Üretilen kaplamalarda yüksek birikme oranlarında en düşük maliyette kaplama üretimine imkan sağlaması gibi özellikleri elektrik ark spreyin avantajları olarak sayabiliriz [35].

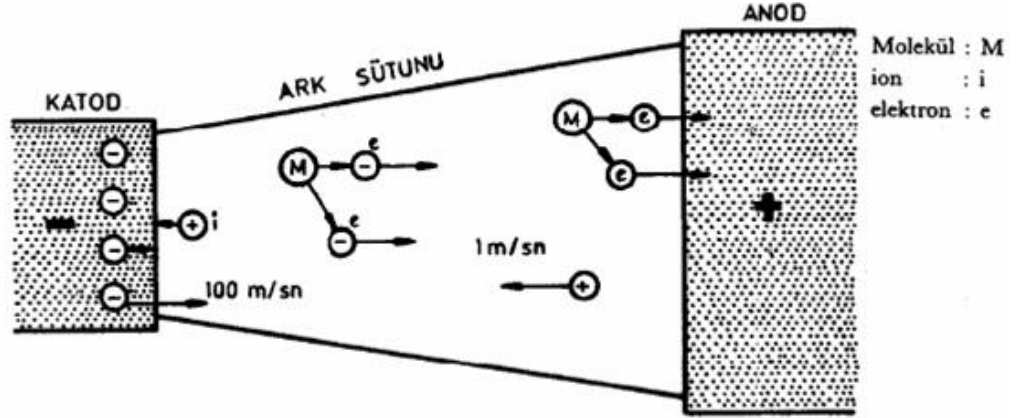
3.2.2. Elektrik ark püskürtme teknolojisinin dezavantajları

Genel olarak elektrik ark spreynin dezavantajları yüksek oranda porozite, oksit ve erimemiş partikül içermesidir. Elektrik ark spreynin kaplama diğer proseslere göre daha pürüzlüdür. Elektrik ark spreynin prosesi için kullanılan malzemeler iletken katı teller, etrafı metal ile çevrili tozlardan oluşmuş özlü teller ile sınırlıdır. Ayrıca elektrik ark spreynin prosesinde damlacıkların asimetric oluşu ve atomizasyonel kaplamada homojen olmayan bir mikro yapı oluşur. Buda kaplamanın özelliklerini doğrudan etkiler [24].

3.3. Elektrik Arkının Karakteristik Özelliği

Elektrik ark spreynin kalbi iki elektrot arasındaki ark ve bu arkın iki telin ergitilmesi için ısı kaynağı olarak kullanılmasıdır. Elektrik arkı, kolaylıkla elde edilebilen yüksek şiddetli bir enerji kaynağı olması itibariyle en önemli ısı kaynaklarından biridir [5].

Ark, iyonlaşmış gaz arasında yer alan, iki elektrot arasındaki elektrik deşarjıdır. Ark üç temel bölümden meydana gelir. Ark sütunu; içinde kararsız gerilim farkı bulunur. Katot ve anot bölgeleri; elektrotların soğutucu etkisinin hızlı gerilim düşmesine götürdüğü bölgelerdir. Ark sütunu şarj dengesine, düşük elektrik alanına ve ısı kaynağı olarak kullanılan yüksek sıcaklığa sahiptir. Elektrik ark spreynin oluştuğu elektrik arkı iyonize gaz vasıtasıyla elektrik akımından oluşturulur. İyonize gaz (+) ve (-) elektrik yüklü iki telin ilerleyip birleşme noktasında birbiri ile temas edip ark alevi meydana getirmesi ile oluşturulur. Yüksek elektrik akım yoğunluğu gerekli güç desteğinin devamlılığını iyonize olmuş bölge sağlar. Ark içinde elektronlarını kaybetmiş pozitif yüklü iyonlar bulunur. Bu da anottan katotta pozitif gaz iyon akışıdır [2].

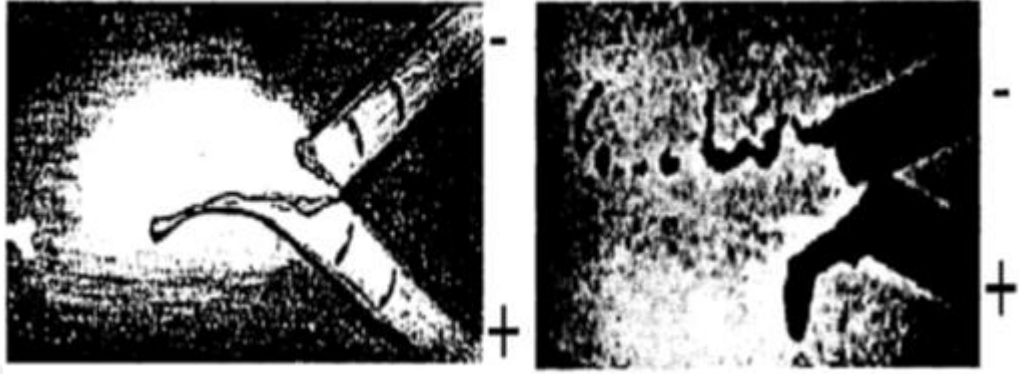


Şekil 3.3. Katot ve anot arasında oluşan ark sütunu [5].

Ark sütunu nötr ve uyarılmış bir gaz atomları karışımıdır. Şekil 3.3.'de katot ve anot arasında oluşan ark sütunu gösterilmektedir. Bu merkez sütunda elektronlar, atomlar ve iyonlar devamlı hareket ederler ve sürekli çarpışma halindedirler. Ark sütununun en sıcak bölümü burası olmakla beraber parçacıkların hareketi en şiddetli durumdadır. Dış bölüm ya da ark alevi bir ölçüde daha soğuktur ve merkezi sütunda ayrılmış gaz moleküllerinin yeniden birleşmesinden ibarettir.

Elektrik ark oluşumunda kullanılan gazların (argon, helyum, azot, hidrojen) molekülleri bir elektron kaybederek pozitif iyonlar oluştururlar. Böylece, çarpışmadan sonra iki elektrot anoda doğru gider, bu arada pozitif iyon katotta doğru hareket eder ve katot bu şekilde bombardımana uğrar. Buna karşılık oksijen bir elektron yakalayıp anoda doğru giden negatif iyonlar oluşturabilir. Bu durumda üç tip yer değiştirme olayı görünmektedir. Bunlar katottan çıkan ve anodu bombardıman eden elektronlar, katoda doğru geri dönen pozitif iyonlar ve anoda doğru giden negatif iyonlardır. Anodun katottan farklı ısınması asimetrik bir ergime davranışının oluşmasına neden olur. Bu durumda tellerin ergime davranışları farklılık gösterebilir. Şekil 3.4a. ve 3.4b.'de tel elektrotların farklı asimetrik ergime davranışları gösterilmiştir. Bu durum elektrik ark ergitmenin baskın bir özelliğidir. Anodun katoda göre daha soğuk olması telin daha yavaş ergimesine neden olur. Bunun sonucu olarak oldukça büyük dropletler meydana gelir. Bazı büyük dropletler atomize gaz ile parçalanırlar ve daha küçük dropletlere ayrılırlar. Bu asimetrik ergime davranışı püskürtme paternini ve kaplama yapısını da etkiler. Katotta çok

sınırlandırılmış bir ergime görülür ve bunun neticesinde oluşan dropletler daha küçüktür. Bu küçük dropletler hemen atomize gaz ile katot uçtan bölünerek ayrılırlar. Böylelikle katot yüksek ergime oranına sahiptir [5].



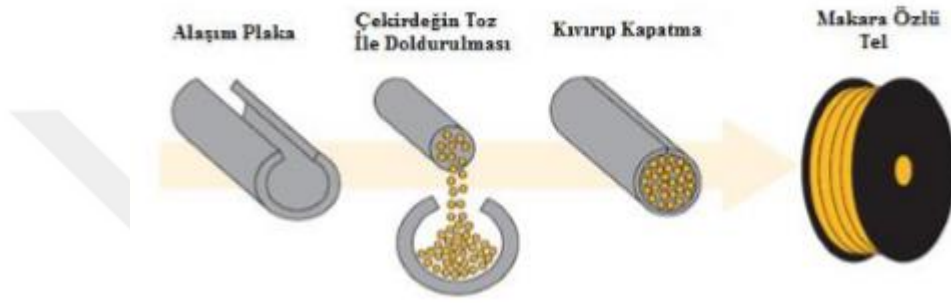
Şekil 3.4. (a) Tel elektrotların asimetrik ergime davranışlarının gösterilmesi ilk olarak 1966'da Steffens tarafından yapılmıştır [31]. (b) Her iki elektrotun levhasal formlarının stroboskopi (strobe) fotoğrafları 1995'de Wang tarafından ölçülmüştür [5].

Elektrik ark oluşumu içerisinde katot elektron vermektedir. Katot alanında meydana gelen ısı başlıca, katodun yüzeyine çarpan pozitif iyonlardan kaynaklanmaktadır. Katot pozitif gaz iyonlarının çarpışması ile yüksek derecede ısınır. Bu durum, ısınan yüzeyden elektron gibi elektriksel yüklü parçacıkların serbest kalmasına sebep olur. Katot yüzeyinden elektron aktığı için, onların enerjisinin büyük bir bölümü iyonize gazlara verilir. Bu nedenle anot katottan daha soğuk olmaktadır. Anot daha soğuk olduğu için ergime oranı düşüktür ve katotta oluşan partiküllerden daha büyük partiküller oluşur [28].

3.4. Elektrik Ark Püskürtme Kaplama Malzemeleri

Elektrik ark püskürtme kaplama malzemesi olarak, genel olarak elektriksel iletkenlik gösteren metalik esaslı teller kullanılır. Tel beslemeli termal sprey prosesleri, toz beslemeli olanlara göre enerji kullanımı, ergimiş partikül formasyonu, birikme oranı ve kullanım açısından daha verimlidir. Telin ucundan partiküller atomize olarak tamamen ergirler, böylece birikme verimliliği genellikle yüksektir. Bunlara ek olarak tel beslemenin kullanılmasının en önemli nedeni aynı şekilde toz beslemeden daha ucuz olmasıdır, ama her malzemenin tel olarak bu işlem için üretilmesi de mümkün

olmamaktadır. İletken olmayan veya tel haline getirilemeyen malzemeler dış yüzeylerine iletken tellerin kaplanmasıyla EAP için kullanılabilir hale getirilir. Özlü tel olarak adlandırılan bu tip malzemeler ile daha iyi korozyon ve aşınma dayanımı sağlanabilmektedir. Artırılmak istenen servis ömrü ve gelişen teknoloji artık parçaların daha sağlam ve uzun süre kullanımını istemektedir. Özel olarak üretilen bu teller ile istenen koruma mükemmel bir şekilde sağlanabilmektedir. Şekil 3.5.'de özlü tel yapımı görülmektedir [18, 36].



Şekil 3.5. Özlü tel yapımı [36].

Endüstriyel alanda yapılan kaplamalarda kullanılacak tel malzemeleri kullanım yeri ve amacına göre değişiklik gösterirler. Tablo 3.1.'de EAP'de kullanım amacına göre kaplanabilir tel malzemeler ve Tablo 3.2.'de de özlü teller ve endüstrideki kullanım alanları verilmiştir.

Tablo 3.1. EAP’de kullanım amacına göre kaplanabilir tel malzemeler [35].

Kaplanabilir Tel Malzeme	Kullanım Amacı ve Yeri
Çinko (Zn)	Genel amaçlı korozyondan koruma, açık atmosfer şartlarında
Zn/Al (85/15)	Endüstri ve deniz atmosferinde korozyondan koruma, SO ₂ ’li ortamlarda yüksek direnç
Aluminyum (Al)	Endüstri ve deniz atmosferinde korozyondan koruma, 800°C ve yukarısındaki yüksek sıcaklık korozyon dayanımı ve gıda endüstrisinde
AlMg5 alaşımı	Deniz atmosferinde korozyon dayanımı
NiTi	Mükemmel bağ tabakası kaplaması
%13 Cr’lu çelik	Aşınma direnci yüksek, zayıf korozyon direnci
FeCrAl	Yüksek sıcaklık korozyon dayanımı
Mo	Kazımalı korozyona karşı dayanım
NiCr 80/20	Korozyon dirençli kaplamalar ve seramik üst kaplama için ara tabaka kaplaması
SnSbCu 7 4	Yatak alaşımı, rulman kaplamaları

Tablo 3.2. EAP’de kullanılan özlü teller ve endüstrideki kullanım alanları [35].

Özlü tel tipi	Endüstriyel uygulama alanı
FeCMnSi	Kuru atmosferde yüksek aşınma dayanımlı
FeCrBSi	Aşınma dayanımlı kaplamalar, iyi korozyon direnci, yüksek bağ Mukavemeti
FeCrBSi+WcCoCr	Mükemmel aşınma dirençli kaplamalar, iyi korozyon direnci, yüksek bağ mukavemeti
FeCrSi	Aşınma ve yüksek sıcaklık korozyon dayanımı (900°C üstü)
NiCr 50 50	Yüksek sıcaklık korozyon dayanımı (900°C üstü)
NiBSi+WC	Yüksek abrasif aşınma direnci, iyi korozyon direnci
NiCrBSi	Yüksek korozyon dayanımı (ıslak atmosfer), iyi aşınma direnci

3.5. Elektrik Ark Püskürtme ve Endüstriyel Kullanım Alanları

3.5.1. Korozyon koruma uygulamaları

3.5.1.1. Çinko (Zn), alüminyum (Al) ve çinko/alüminyum (Zn/Al 85/15) kaplamalar

Çinko (Zn), alüminyum (Al) ve alaşımlarından oluşan kaplama türleri otomotiv, uçak, ulaşım endüstrilerinde, denizlerde kullanılan yapılarda, köprülerde korozyona karşı başarı ile uygulanmaktadır. Özellikle her ikisinin alaşımı (Zn/Al 85/15) korozyona karşı çok iyi direnç göstermektedir. Bu malzemeler termal sprey yöntemleri ile kolaylıkla demir ve çelik yüzeylerin üzerine kaplama olarak uygulanabilmektedir. Bu şekilde elde edilen kaplamalar ile çinko ve alüminyum sert atmosfer ortamlarında ve deniz atmosferi şartlarında 30 yıldan daha fazla sürelerde malzemeyi katodik olarak koruyabilmektedir [23, 37, 38].

Teoride, metal yüzeyine uygulanan metalik kaplama sürekli bir bariyer oluşturur ve oluşan bu yapı ana metali ortamdan tamamen izole eder. Ancak, yapıda ki porlar, çukurcuklar, çatlaklardan dolayı sürekli bir bariyer görevi görecektir homojen kaplamayı pratikte elde etmek oldukça zordur. Bunun dışında kaplamalı yapılar bir yerden bir yere taşınma esnasında zarar görmeye meyillidir. Bu olumsuz şartlar altında kaplamanın galvanik özelliği önemli bir etken hale gelmektedir. Çinko, alüminyum ve alaşımlarından elde edilen kaplamalar bu sebeplerden dolayı malzemeyi korozyona karşı korumak adına çok sık olarak kullanılmaktadır. Kaplama türünün seçimi, servis ömrü, ortam koşulları, işletme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Ana metal çelikten ve kaplama malzemesi ise bu iki malzeme ya da alaşımlarından meydana gelmektedir. Ayrıca bu ikisi ya da ikisinden elde edilen (Zn/Al 85/15) kaplamalar düşük maliyetli, mekanik rijitliğe sahip ve korozyona dirençli koruyucu yapılardır [39]. Şekil 3.6.'da ark püskürtmeyle korozyona karşı kaplama uygulamaları örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Korozyona karşı kaplama uygulamaları [35].

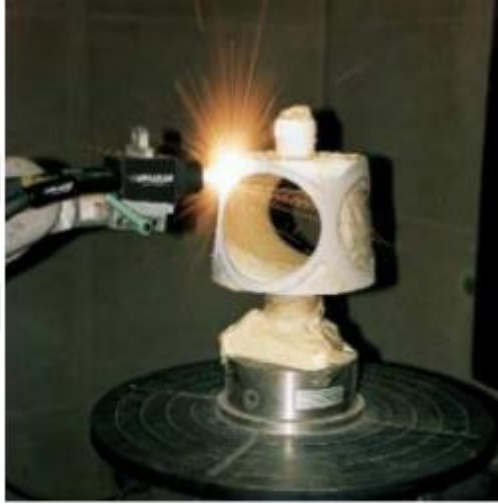
3.5.1.2. Nikel (Ni) ve nikel alaşımları

Nikel ve nikel alaşım kaplamaları deniz atmosferindeki ve desalinasyon alanlarındaki komponentlerin korozyona karşı koruma sağlanması için uygulanır. Özellikle ark sprey NiCu30Fe kaplamalar indirgeyici ortamlarda ve oksitli akışkanlarda mükemmel korozyon koruma sağlamaktadır. Elektrik ark püskürtme ile üretilen NiCr 80/20 kaplamalar ıslak ortamdaki korozyona karşı koruma için uygulanan bir diğer nikel alaşım kaplamadır.

Mükemmel bir korozyon koruması sağlayan NiCr 80/20 alaşım kaplamaların üretilmesinde atomize gaz olarak atmosferik hava yerine argon kullanılması gerekmektedir [36].

3.5.2. Parça tamirati

Elektrik ark spreyle kaplamaların dövme ve şekillenme kabiliyeti sayesinde kayda değer bağ mukavemeti kaybolmadan ekonomik olarak kalın kaplamalar yapılmasına olanak verir. Bundan dolayı taşıma maliyetinin yüksek olduğu ve parçaların sökölmediğı durumlarda ark spreyle başvurulun yöntemdir [40]. Şekil 3.7.'de parçanın elektrik ark spreyle tamirat uygulaması gösterilmiştir. Şekil 3.8.'de kullanım sırasında iş parçası yüzeyinde oluşan aşınmanın elektrik ark spreyle kaplanarak tamir edilmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Parçaya elektrik ark spreyle tamirat uygulaması [40].



Şekil 3.8. a) İş parçası yüzeyinde kullanım sırasında oluşan aşınma. b) Elektrik ark spreyle kaplanarak tamir edilmiş iş parçası [35].

3.5.2.1. Uçak parçalarının tamiratında

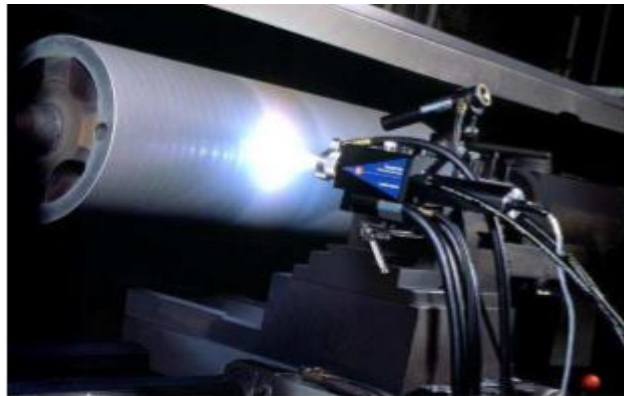
Bir çok uçak motoru üreticisi uçak motorunun tamiratında ve restorasyonunda ark sprey yöntemi kullanmaktadır. Ayrıca ark sprey kaplamalar yüksek sıcaklıkta aşınma, boyutsal restorasyon ve bağ kaplama olarak uygulanabilir [40]. Şekil 3.9.'da uçak motoruna tamir amaçlı kaplama uygulaması görülmektedir.



Şekil 3.9. Uçak motorunun tamir amaçlı kaplama uygulaması [40].

3.5.3. Aşınma

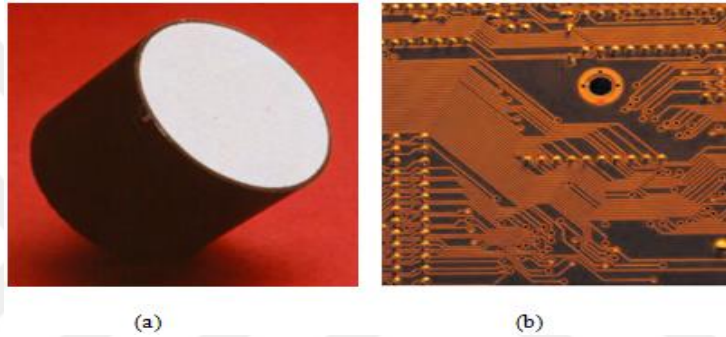
Özlü tel teknolojisi ile elektrik ark sprey kaplamalarının kullanım alanları genişlemiştir. Bu yöntem ile içinde karbür bileşimli partiküller bulunan kaplamalar yapılabilir ve bu kaplamalar mükemmel aşınma direnci sağlar [40]. Şekil 3.10.'da ağır sanayide kullanılan bir silindirin elektrik ark sprey prosesi yardımıyla kaplanması verilmiştir.



Şekil 3.10. Ağır sanayide kullanılan bir silindirin elektrik ark sprey prosesi yardımıyla çelik kaplanması [35].

3.5.4. Elektriksel uygulamalar

Ark sprej kaplamalar elektriksel iletkenlik ve direnç için kullanılır. Elektronik endüstrisinde, metalik olmayan parçalarda çoğu kez lehimlenebilme özelliğini geliştirebilmek için kalay gibi kaplamalar yapılır. Ark spreyle kaplanmış alüminyum, titanyum, çinko ve diğer malzemeler iyi elektriksel iletkenlik gerektiren uygulamalarda kullanılır. Alüminyum kaplanmış metal oksit varistörün temas yüzeyinde elektriksel iletkenlik oluşur [40]. Şekil 3.11.'de kaplanmış varistör ve elektronik bir devre gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Ark sprej yöntemiyle kaplanmış (a) varistör (b) elektronik devre [40].

3.5.5. Kalıp yapma

Elektrik ark sprej kalıp endüstrisinde kalıbı yaparken kalın kaplama oluşturulmasında kullanılır. Kaplamanın karakteri kalıptan çıkmasına izin verir. Bu prosesteki başarı hızlı prototip oluşturmayı sağlar [40]. Şekil 3.12.'de elektrik ark sprej yöntemiyle hızlı prototip kalıp üretimi ve üretilmiş kalıplar gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Elektrik ark sprej yöntemiyle hızlı prototip kalıp üretimi ve üretilmiş kalıplar [35].

3.6. Yüksek Hızlı Ark Püskürtme (HVAS)

1945'lerin sonlarına doğru teknik ve proseslerdeki ilerlemeler ile ark sprey daha da dikkat kazanmıştır. HVAS, yeni gelişen termal sprey tekniğiyle beraber daha fazla araştırmacının dikkatini çekmiştir. Araştırmalar göstermiştir ki gelişmiş atomize gaz basıncının kullanımı, kaplamalarda çok iyi yapı ve özelliklerin ortaya çıkmasını sağlamışlardır. Atomize gazın hızı 600 m/sn gibi çok yüksek hızlara çıkabilmektedir.

Yapılan bir çalışmada HVAS ile geleneksel ark püskürtme kaplamalar ile elde edilemeyen kaplama kalitesinin yakalandığı ortaya konmaktadır.

HVAS ile elde edilen kaplamadaki porozite miktarı yarı yarıya daha düşüktür. Sonuçlara göre HVAS'taki kaplama kalitesi HVOF veya plazmayla eşdeğer bir kalite sergilemektedir. Tablo 3.3.'de iki farklı teknikle üretilen tel kaplamaların kimyasal kompozisyonu ve oksit içerikleri verilmektedir.

Tablo 3.3. İki farklı teknikle üretilen tel kaplamanın kimyasal kompozisyonlar ve % oksit içeriği [41].

Ark Püskürtme Cihazı	Kaplama malzemesi	Fe (%)	Cr (%)	O (%)	Oksit (%)
HVAS	3Cr13	80.905	13.745	5.341	16.9
AS	3Cr13	81.750	15.061	3.189	10.1

HVAS kaplamada AS kaplamaya nazaran daha fazla oksit içeriği görülüyor. Oksit içeriğin artmasının sebebi atomize partiküllerin fazlalığıdır. HVAS ile yüksek hızda, AS'ye nazaran çok daha küçük partiküller üretilip püskürtülür. Buda daha fazla oksit içeriği getirir. Oksit içeriğinin artması da daha sert ve aşınma dayanımı daha yüksek bir kaplama elde edilmesini sağlar. HVAS ve AS için kaplamaların yapışma dayanımı ve mikrosertlikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 3.4.'de görülebilir.

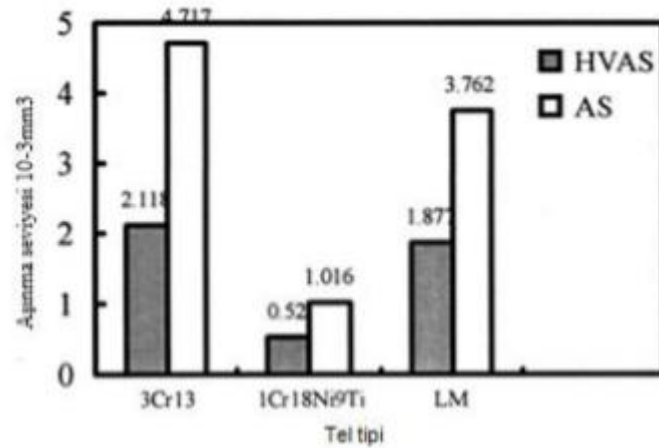
Tablo 3.4. HVAS ve AS cihazlarının yapışma mukavemeti ve mikrosertliği karşılaştırması [41].

Ark püskürtme cihazı	Kaplama malzemesi	Yapışma kuvveti (MPa)	Mikrosertliği (HV)
HVAS	Al	35.1	69.7
HVAS	3Cr13	42.8	460
AS	Al	16.4	55.8
AS	3Cr13	28.2	380

HVAS, daha iyi bir yapışma mukavemeti göstermiştir. Sonuçları birleştirirsek HVAS ile üretilen çok yüksek hızlı partiküller yüzeye oldukça yüksek hızda çarparlar ve buda yapışma mukavemeti için anahtar rolü oynamaktadır.

Mikrosertlikte ise Al için %25, 3Cr13 için %21 dolaylarında daha sert kaplamalar elde edilmiştir. Burada yüksek oksit içeriği ve çarpışma hızı etkili olmuştur. Sonuçta çok yüksek yoğunlukta, sert ve porozitesiz kaplama elde edilmiştir.

Şekil 3.13.'de HVAS ile AS kaplamaların aşınma seviyeleri verilmiştir. Dikkat edilirse AS'in bütün aşınma seviyelerinde daha fazla aşındığı görülebilir.



Şekil 3.13. HVAS ve AS aşınma seviyeleri [41].

HVAS kaplamaların yüzeyleri düz, uniform ve yoğundur. AS'e göre daha yoğun ve az porozitelidir. Ayrıca oksit içeriği daha fazladır. Sebebi artan partikül hızıdır.

Partiküller daha hızlı olduğu için daha iyi bir yapışma mukavemeti sergilemiştir. Yine oksit içeriğinden dolayı daha sert kaplama yapısı elde edilmiş ve daha iyi aşınma dayanımı elde edilmiştir [41].



BÖLÜM 4. ELEKTRİK ARK PÜSKÜRTMEDE KAPLAMA KALİTESİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

4.1. Giriş

Elektrik ark püskürtme kaplama yönteminde kaplama kalitesine etki eden birçok faktör vardır. Bu faktörler;

- a. Püskürtme mesafesi
- b. Püskürtme gaz cinsi
- c. Püskürtme gaz basıncı
- d. Amper ve voltaj
- e. Nozul ve ikincil gaz
- f. Tel besleme hızı
- g. Altlık sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü gibi faktörleri elektrik ark püskürtmede nihai kaplama yapısını etkileyen faktörler olarak sıralayabiliriz.

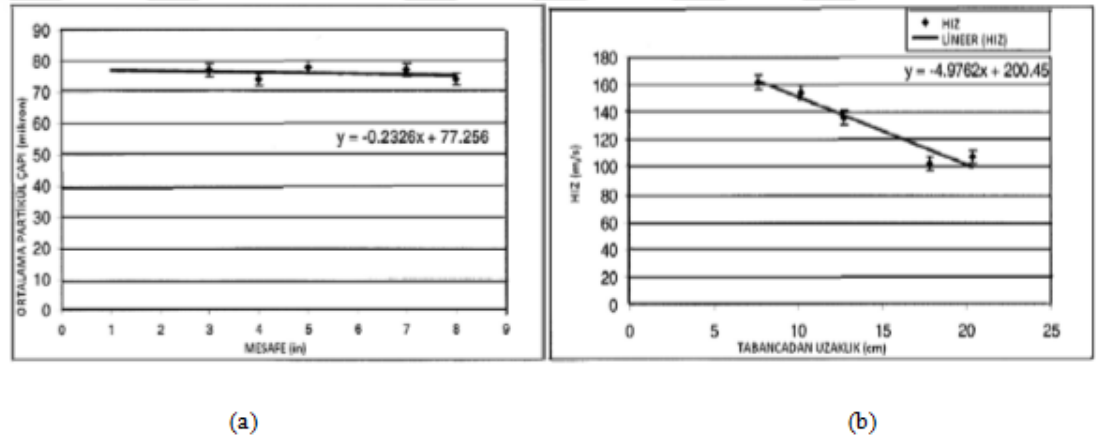
Bu parametreler oluşan partikülleri ve buna bağlı olarak da kaplama kalitesini etkilemektedir.

4.2. Püskürtme Mesafesinin Etkisi

Püskürtme mesafesi kaplama yapısını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Püskürtme mesafesi kaplamadaki oksit miktarını ve kaplamanın yüzeye yapışma mukavemetini etkiler. Tavsiye edilen sprej mesafeleri 125 mm ila 200 mm'dir. Standart olan ise 150 mm' dir. Sprej mesafesinin kısa olması oluşan dropletlerin hava ile temas zamanını düşüreceğinden oksit içeriği de düşük olacaktır. Sprej mesafesinin artması ile de hem oksit oranı artacak ve hem de dropletlerin hızı

düşeceği için yüzeye iyi yapışma ve dağılma olmayacağından porozite içeriği yükselecektir.

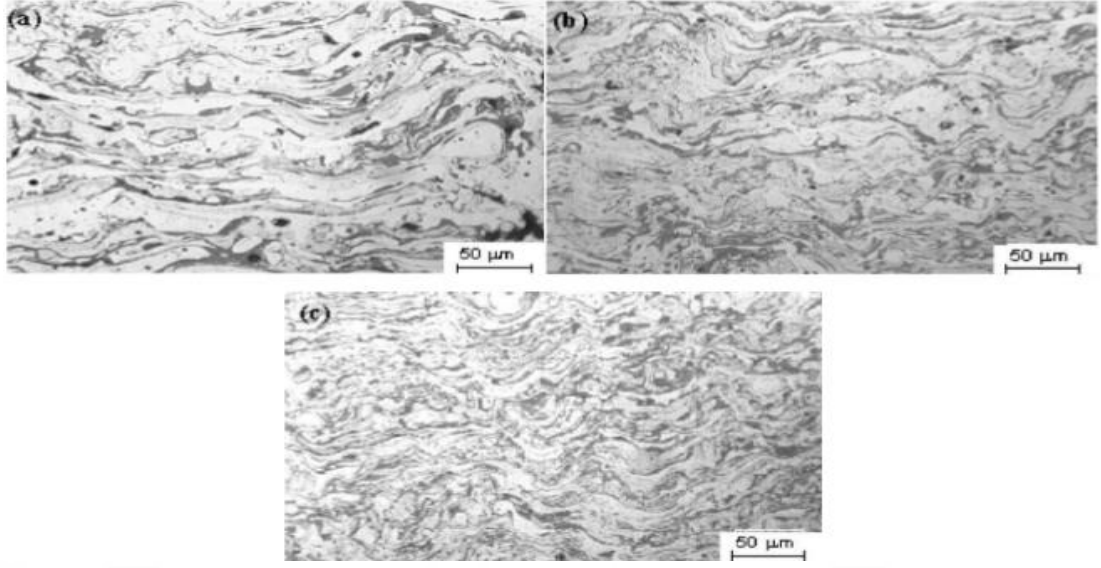
Artan mesafe ile gaz hızı düşmektedir. Gazın tabanca ağzındaki çıkış hızı 255 m.s^{-1} iken 150 mm 'lik eksenel bir mesafede hızı 75 m.s^{-1} 'e düşmektedir. Eksenel mesafeyi 95 mm 'ye düşürdüğümüzde gazın hızı yaklaşık 120 m.s^{-1} olmaktadır ve sonra bu hız 135 m.s^{-1} ve 150 m.s^{-1} e kadar daha da hızlanmaktadır [42]. Püskürtme mesafesinin partikül çapı partikül sıcaklığı üzerine çok fazla etkisi yoktur [43]. Şekil 4.1. (a)'da püskürtme mesafesi ve partikül çapı arasındaki ilişki, (b)'de de püskürtme mesafesinin partikül hızına olan etkisi verilmiştir.



Şekil 4.1. Püskürtme mesafesinin ortalama a) partikül çapı ve b) partikül hızı üzerindeki etkisi [43].

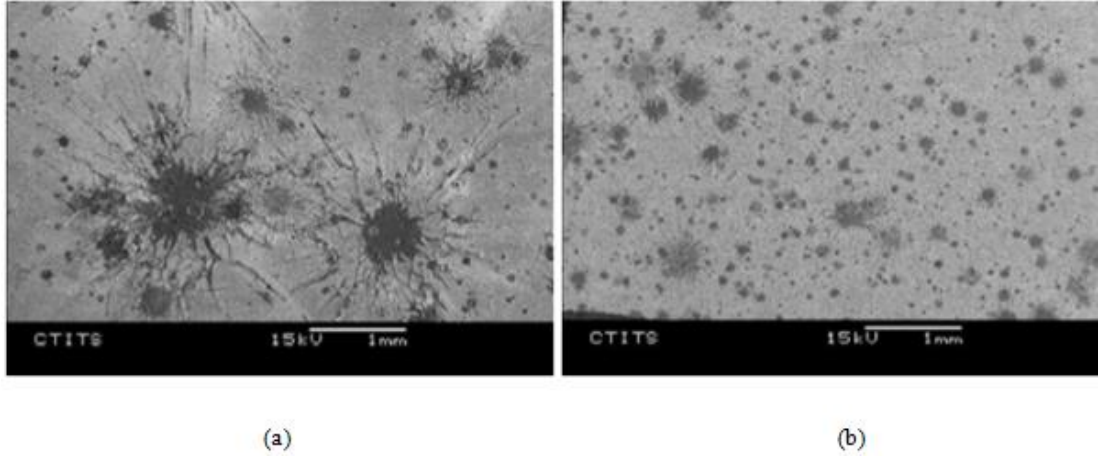
4.3. Püskürtme Gaz Basıncının Etkisi

Atomize gaz basıncının lamel kalınlıklarına etkisi oldukça yüksektir. Genel olarak elektrik ark püskürtme kaplamalarda yüksek gaz basıncı kaplamadaki porozite miktarını düşürmektedir [44]. Farklı atomize gaz basınçlarında üretilen kaplamaların mikroyapıları Şekil 4.2.'de verilmektedir.



Şekil 4.2. Atomize gaz olarak hava kullanıldığında kaplama yapısı a) Düşük hızda $94 \text{ N.m}^3/\text{h}^{-1}$ b) Orta hızda $110 \text{ N.m}^3/\text{h}^{-1}$, c) Yüksek hızda $144 \text{ N.m}^3/\text{h}^{-1}$ [44].

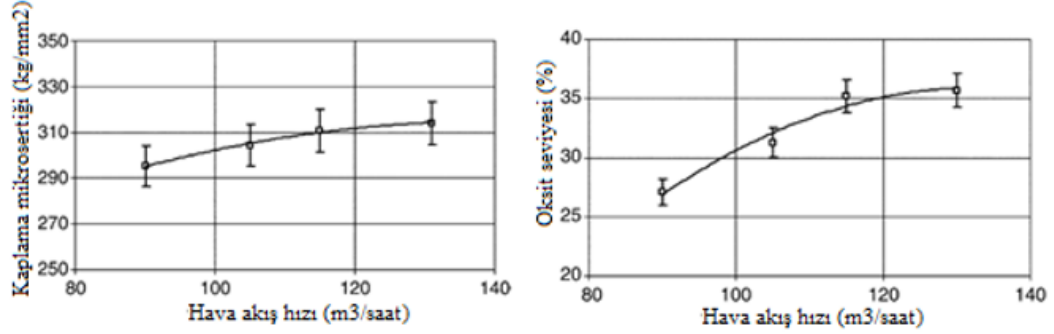
Şekil 4.3.'de farklı gaz akış hızlarında meydana gelen çelik üstüne şiddetle çarpan partiküllerin SEM mikroskopundaki görüntüleri verilmiştir. Düşük gaz basıncının kullanıldığı kaplama uygulamalarında çok büyük splatlar oluşmakta olup bu durum Şekil 4.3.'de görülebilmektedir [44].



Şekil 4.3. a) Hava atomizasyonunun düşük gaz atım hızındaki partikül görünümü; ortalama çap $760 \mu\text{m}$ (güç 3100 W , hava atım hızı $94 \text{ N.m}^3/\text{h}^{-1}$) b) Hava atomizasyonunun yüksek gaz atım hızındaki partikül görünümü; ortalama çap $122 \mu\text{m}$ (güç 3100 W , hava atım hızı $144 \text{ N.m}^3/\text{h}^{-1}$) [44].

Yüksek püskürtme hızlarında kaplamaların daha sert olduğu görülebilir. Bunun sebebi daha küçük partiküllerde yüksek yüzey alanlarına bağlı olarak daha fazla

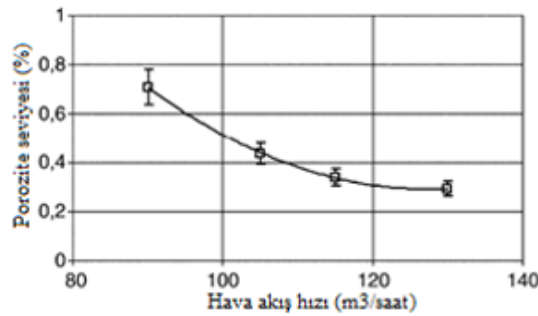
oksitlenmenin meydana gelmesidir. Şekil 4.4.'de püskürtme hızının mikrosertliğe ve oksit içeriğine olan etkisi verilmiştir [28].



Şekil 4.4. Püskürtme hızının mikrosertlik ve oksit içeriğine etkisi [28].

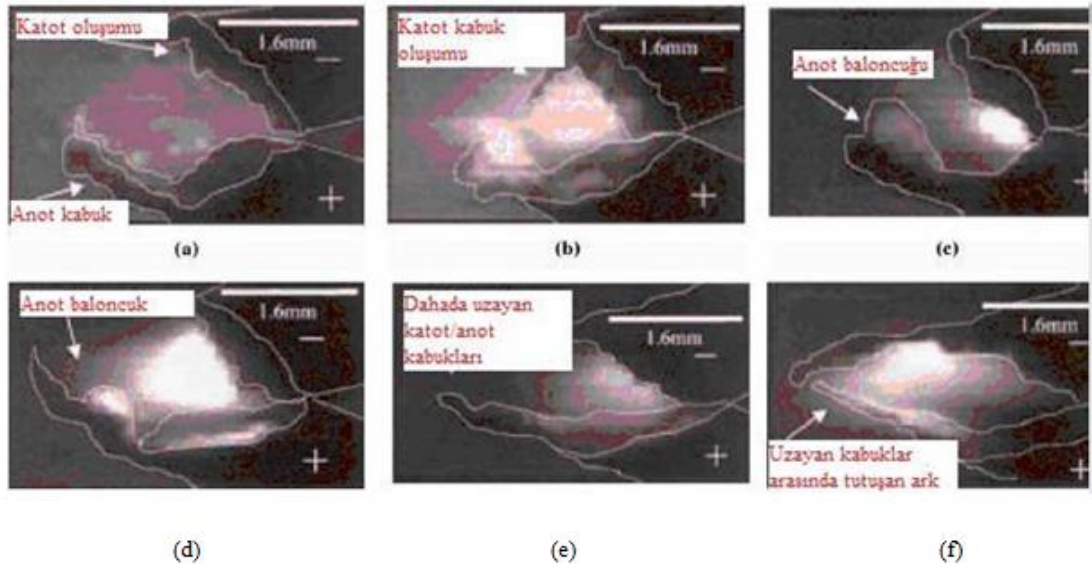
Püskürtme sırasında, püskürtülen ergimiş partiküller etrafındaki havayla temas ederek okside olur. Arttırılan atomize gaz basıncı ve yüksek hızlarda bu temas daha fazla olur. Küçük partiküller, büyük partiküllere nazaran daha fazla oksitlenir. Çünkü daha büyük yüzey alanları vardır. Sonuçta yüksek atomize hava basıncı, yüksek oksit oluşumunu meydana getirir. Hızlı partiküller yüksek kinetik enerjiye sahip olarak saçılır. Böylece yoğunluk artar ve porozite azalır. Partikül hızı ve partikül sıcaklığı kaplama yapısını belirler [28].

Partiküller hızları arttıkça daha iyi viskozite göstermektedir. Yüksek kinetik enerji ile hareket eden küçük partiküllerin oluşturduğu kaplama yapısında daha az porozite bulunmaktadır (Şekil 4.5.). Bu şekilde meydana gelen kaplama daha yoğun olmaktadır [45].



Şekil 4.5. Püskürtme hızının porozite içeriğine etkisi [45].

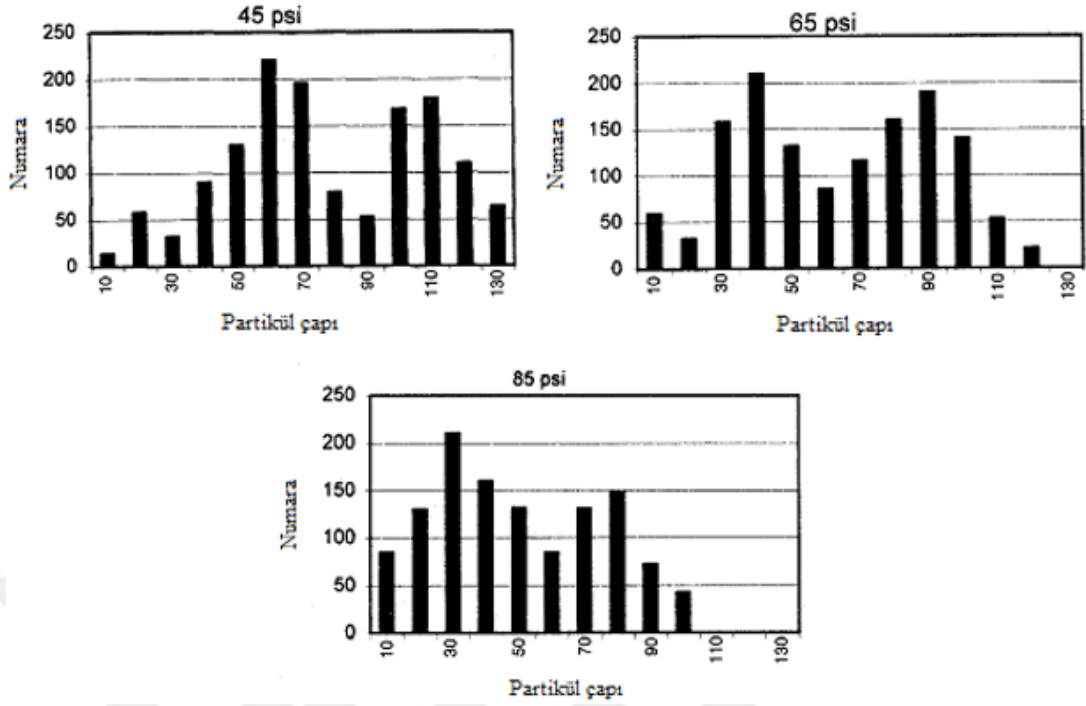
Gaz basıncının bir diğer etkisi anot ve katotta ergime davranışını değiştirmesidir. Gaz basıncı arttığında anotta tel ucunda metal aglomerası (topaklanması) meydana gelmektedir (Şekil 4.6.). Anot ucunda baloncuk bir katman oluşacaktır. Baloncuk büyür ve bir noktada parçalanarak dağılır (Şekil 4.6.d). Ara basınçlarda bu etki en üst seviyededir (345 kPa / 50 psi). Daha yüksek basınçlarda baloncuk oluşumu ve kabuk gerilimi azalır hatta yok olur (Şekil 4.6e., Şekil 4.6f.). Katottaki kabuk daha uzun olmasına rağmen hala anottakinden kısadır. Şekil 4.6a.-Şekil 4.6b ile Şekil 4.6e - Şekil 4.6f karşılaştırılırsa, basınç arttırıldığında ve değişik nozullar ile çalışıldığında (daralan-genişleyen) daha uzun boyutlarda eşit kabuk oluşumu elde edilebilecektir [20].



Şekil 4.6. Tel boşanımı esnasında anot ve katotta ergime davranışı [20].

Düşük gaz basıncında da iki elektrotta ergime mekanizmasının kontrolü yapılabilir. Bu da anot kabukta minimum oluşum ve katot kabuk oluşmadan meydana getirilecektir [20].

Yüksek hızlı atomize gaz basıncının daha küçük partiküller ürettiği Şekil 4.7.'de görülebilmektedir [28].



Şekil 4.7. Al partikül boyut dağılımı a) Gaz basıncı 0,31 MPa b) Gaz basıncı 0,45MPa c) Gaz basıncı 0,59 MPa [28].

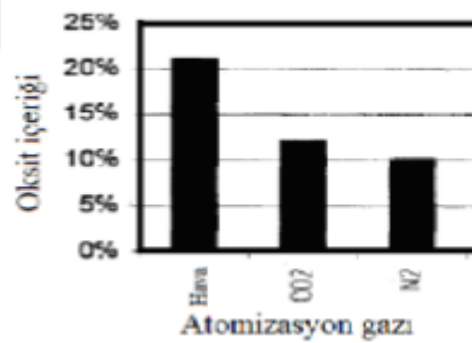
Elektrik ark püskürtme kaplamalarda azalan şekilde sırasıyla %27 (± 4), %18 (± 4) ve %12 (± 3) porozite değerleri, 0,31 Mpa, 0,45 MPa ve 0,59 MPa gaz basınçlarında elde edilmiştir. Görülebileceği gibi gaz basıncı, porozite için çok önemli bir parametredir. Yüksek atomize gaz basınçlarında küçük partiküller yüksek çarpma hızlarında kaplamayı oluştururlar. Hızlı partiküller yüksek kinetik enerji yayılımları ile çarpmada daha kolay deforme olur. Bu şekilde düşük miktarda porozite meydana getirirler ve kaplama yoğunluğu artar [28].

4.4. Püskürtme Gaz Cinsinin Etkisi

Elektrik ark püskürtme uygulamalarında ergitilen tel bir atomize gaz ile yüzeye püskürtülür. Kullanılan gazın cinsi kaplama yapısını oldukça etkilemektedir. Uygulamanın cinsine ve önemine göre atomize gaz tipinin seçimi oldukça önem taşımaktadır. Konu üzerinde yapılan araştırmalar bunun önemini ortaya koymaktadır.

Elektrik ark püskürtme kaplamalarda atomize gaz olarak genelde hava kullanılır. En büyük avantajı kolay bulunur ve ucuz olmasıdır. Atomize gaz olarak hava kullanılan

proseslerde, oksit içeriği yüksek kaplamalar üretilir. Bu sayede yüksek abrazyon ve aşınma dayanımı sağlanır. Bunun yanında oksit oranı yüksek kaplamalar, kaplamanın mekanik ve yapışma özelliklerine zarar verebilir. Püskürtme ve birikme sırasında meydana gelen oksitler kaplama-altlık malzeme arasındaki yapışma kuvvetini düşürür. Bu sebeple sertliği yüksek oksitli kaplama üretiminde adhezyon problemi ile karşılaşılabilir. Ayrıca hava kullanarak üretilen kaplamalarda porozite oranı da yükselmekte ve kaplamanın mekanik özelliklerinin düşmesine sebep olmaktadır. Bundan dolayı oksidasyonu azaltmak için atomizasyon gazı olarak azot, karbondioksit ve argon da kullanılır (Şekil 4.8.). Püskürtme prosesinde atomize gaz olarak azot kullanılmasının en temel etkisi, damlacık yüzeylerindeki ekzotermik reaksiyonları ve oksidasyonu engelleyerek püskürtme sıcaklıklarını düşürmesidir. Böylelikle kaplamalardaki oksit miktarı azalır. Fakat buna bağlı olarak kaplamanın sertliği düşer. Partikül soğuma hızı da hava kullanılmasına göre daha yüksek olacaktır [28].

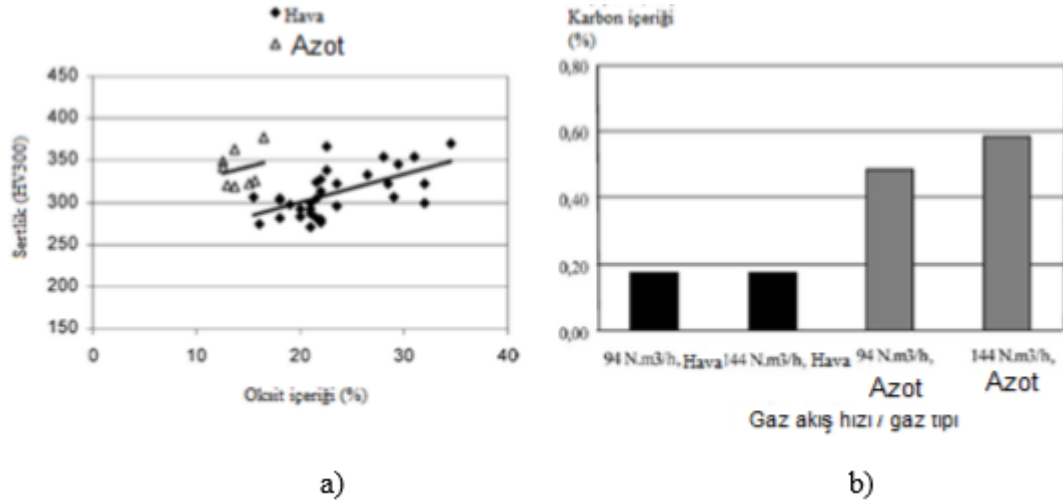


Şekil 4.8. Farklı atomizasyon gazları ile yapılan işlem sonucu kaplamanın oksit içeriğindeki değişim [28].

Yapılan araştırmalarda, çelik kaplamalarda atomize gaz olarak azot kullanıldığında, oksidasyon yoğunluğunun düzenli bir şekilde azaldığı görülmüştür. Püskürtme parametre değişiminin, kaplamaların mikroyapı, mekanik özellik ve mikrosertliğe etki ettiği de tespit edilmiştir [44].

Farklı gazların kullanımı ile sertlik ve oksit birikimi benzer özellikler göstermekte ve kaplamalardaki oksit birikimi - sertlik arasında bağlantı kurabilmek mümkün olmaktadır. Buna göre atomize gaz olarak azotun kullanılması ile kaplamadaki oksit

miktarı azalmaktadır. Şekil 4.9.a’da görülebileceği gibi azot kullanılan uygulamalardaki kaplama sertliği hava kullanımına göre yüksek olmaktadır. Kaplama bünyesindeki karbon miktarı da yüksetir (Şekil 4.9. b). Azot kullanılarak yapılan kaplama ile hava kullanarak yapılan kaplama arasında % 0,2 – 0,5 C fark vardır. Bu da oksidasyon nedeniyle karbon yanmalarının azot kullanıldığında düştüğünü açıklamaktadır.



Şekil 4.9. a) Her iki gaz içinde sertlik ve oksit birikim yüzdesi grafiği b) GDS değeriyle kaplamadaki karbon yüzdesi [20].

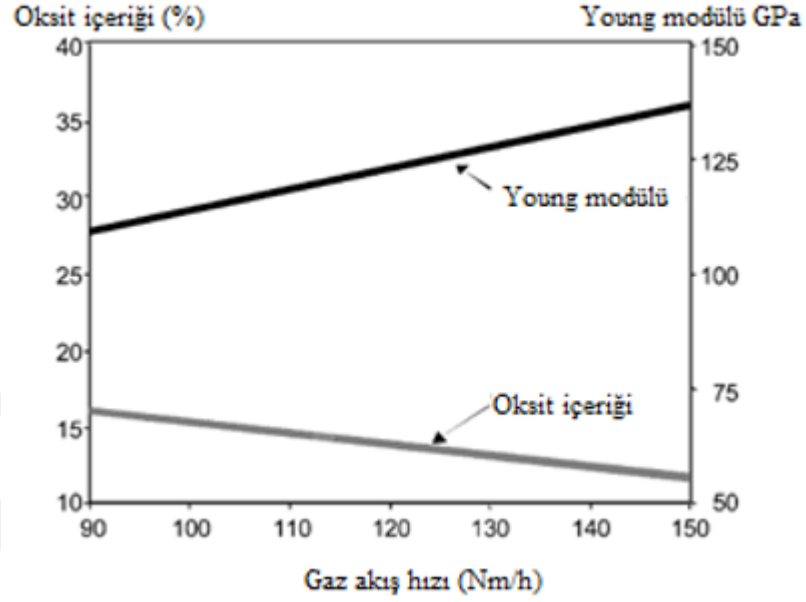
Basıncılı gaz olarak hava kullanıldığında ortalama elastik modülü 100 ± 10 GPa, azot kullanıldığında ise ortalama elastik modülü 120 ± 10 GPa olarak elde edilmiştir. Azot gazı akış hızının oksit birikimi ve buna bağlı elastik modülü değerindeki değişimler Şekil 4.10.’da gösterilmiştir.

Şekil 4.11.’de ise her iki gaz içinde elastik modül – gaz akım hızının değişik güçlerde davranışı gösterilmiştir.

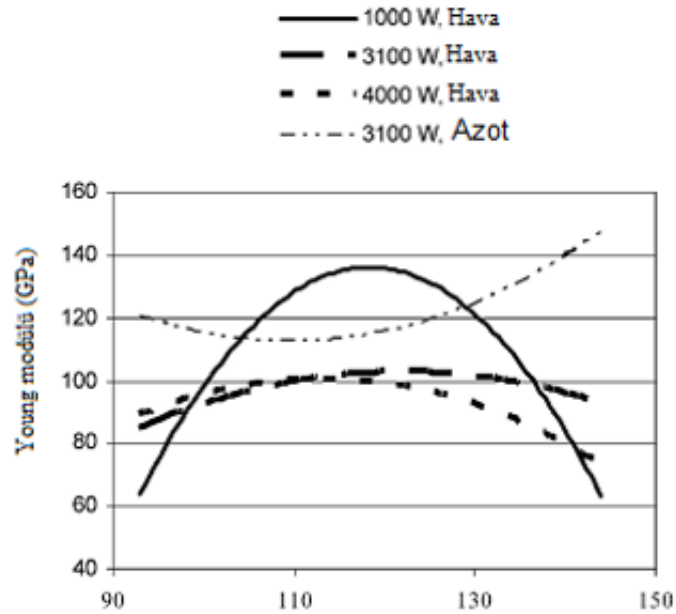
Azot kullanıldığında, gaz akış hızı arttıkça elastik modül bir miktar düşmekte, ancak gaz akışındaki artış devam ettikçe elastik modül artmaktadır.

Hava kullanıldığında ise tam tersine bir durum söz konusudur. Doğrusal olmayan bir davranış gözlenmiştir. Elastik modül hız arttıkça maksimum değere ulaşmış (120 N

$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ de) ve ilerledikçe tekrar azalmaya başlamıştır. Bu olay büyük olasılıkla iki mekanizmadan kaynaklanmıştır;



Şekil 4.10. Azotun atım hızı ve oksit birikimine göre elastik modül grafiği [44].



Şekil 4.11. Elastik modülü – gaz atım hızı grafiği [44].

Birincisi, partiküller çok iyi düzleşmiş ve mikroyapısal olarak daha homojen bir kaplama yapısı meydana getirmiştir. Elektrik ark püskürtme ile üretilen kaplamalarda

yüksek elastik modül, yüksek gaz hızlarında yüksek ince lamel oluşumuyla sağlanabilir. Ayrıca kaplamada homojenlikte bu şekilde sağlanabilir. İkincisi, metal püskürtme kendi doğası sebebiyle oksit oluşumdur. Oksit oluşumu düşük homojenlikte kaplama yapısının meydana gelmesine sebep olmaktadır. Yüksek oksit birikimi, düşük elastik modül anlamına gelmektedir. Atomize gaz olarak hava kullanıldığında yüksek oksit birikimi yaşanmaktadır. Bu nedenle havada yüksek püskürtme hızları ve havanın yoğunluğu, kaplamanın elastik modülünü düşürmektedir.

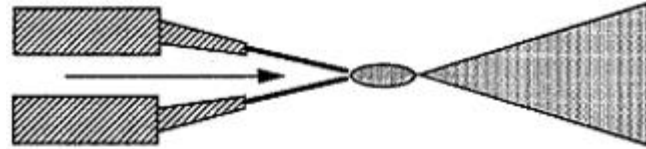
Sonuçta, atomize gaz tipinin oksit birikimine ve dolayısıyla sertlik ve elastik modülüne etki ettiği aşıkardır. Atomize gaz olarak hava kullanıldığında düşük gaz hızlarında ve atomize gaz olarak azot kullanıldığında yüksek gaz hızlarında düşük oksit birikiminin meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca, her iki gaz tipinde de yüksek oksit birikimi sert bir kaplama yapısını meydana getirmektedir. Kaplamanın elastik modülü, splat kalınlığı ve oksit birikimi püskürtme parametrelerine göre değişmektedir. Proses parametreleri en çok kaplamanın elastik modülünü etkilemektedir. Azotla kullanıldığı zaman elastik modül değerleri yüksek elde edilmiştir [44].

4.5. Nozul Ve İkincil Gaz Basıncının Etkisi

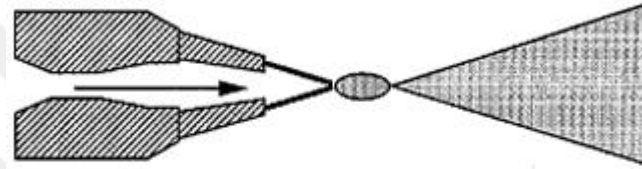
Elektrik ark püskürtmede atomize gaz akımının görevi ergiyen ilk damlacıklarla beraber ergimiş metali ve atomize olmuş partikülleri yüzeye çok hızlı bir şekilde taşımaktır. Yüksek gaz atım hızlarında genellikle küçük damlacık oluşumu gözlenmiştir [28].

Tel ergitmedeki önemli bir gelişmede kapalı nozul sisteminin dizaynıdır. Böylece daha küçük partiküller elde edilir. Buda bize yüksek oksit içeriği sağlar [46]. Şekil 4.12.'de nozul tipleri verilmiştir. Şekil 4.12.'de verilen nozullardan 4.12a. standart nozul, 4.12b. birleşip ayrılan tip nozuldur. Şekil 4.12c. ve 4.12d. ikincil gaz akışıyla kullanılan nozullardır fakat 4.12d. nozulu dış ağzı kapalı tip nozuldur.

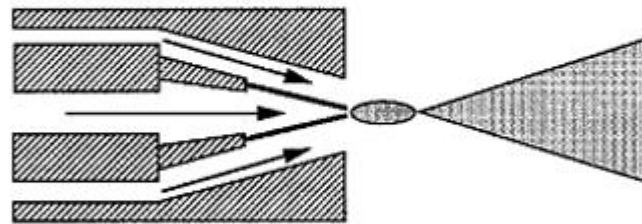
Standart nozulla üretilen kaplama büyük oranda yüksek porozite ve düşük yapışma mukavemeti gösterir. Mükemmel korozyon ve aşınma koruması sağlamak için kaplamanın minimum poroziteli ve yüksek yoğunlukta olması gerekir. Birleşip ayrılan tip nozul kullanımı ile çok yüksek hızlarda, yoğun ve yüksek yapışma mukavemetine sahip kaplamalar elde edilebilir [28].



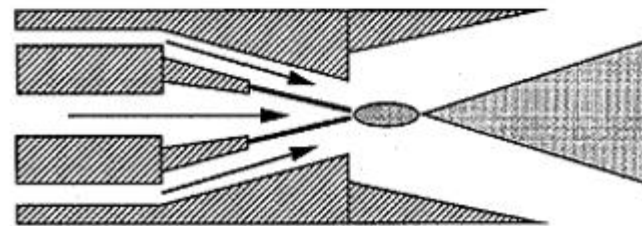
A: Standart düz nozul



B: Daralan-genişleyen nozul



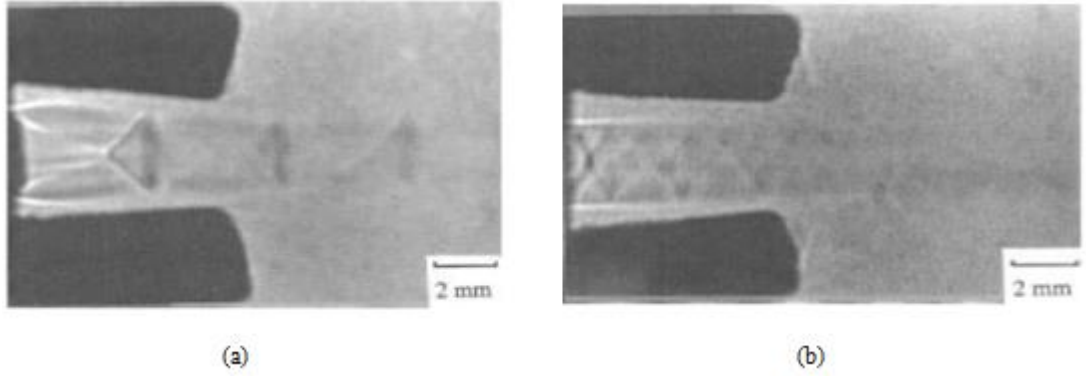
C: Korumalı-inert gazlı düz standart nozul



D: İkinci gazla beraber düz standart nozul

Şekil 4.12. Elektrik ark püskürtmede kullanılan bazı nozul tipleri [28].

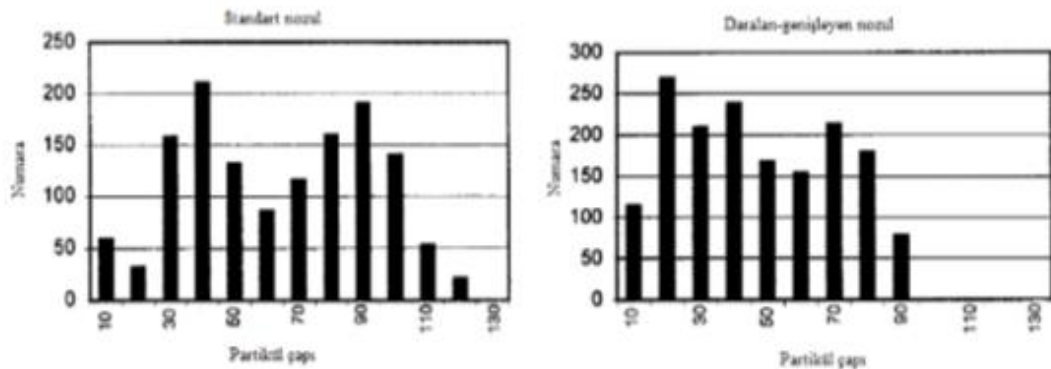
Şekil 4.13.'de normal nozul ile CD (birleşip-ayrılan nozul) nozulun gaz akışı görülebilir.



Şekil 4.13. Değişik nozullarda gaz akış şekli a) düz standart nozul b) CD nozul [28].

Standart nozulda gaz akımı bir şok yapısında ve düzensizdir. Bu sebeple yüksek hızlarda bozunma olur. Ergimiş partikülleri altlığa taşıyan gaz akımı, düşük şok yapısında olan ve yüksek hızlarda çalışmaya imkân veren CD nozulda daha uygun bir şekilde meydana getirilebilir. Ayrıca yüksek atomize gaz akış hızlarında, ergimiş partiküller yüksek hızlara ulaşırlar. Çarpışmada hız tek etken değildir. Partikülün sıcaklığında çok önemlidir. CD nozul ile yapılan kaplamalarda yüksek sıcaklık sonucunda düşük viskozite ve yüksek yapışma açısı sağlanarak daha iyi kaplamalar elde edilebilir.

Şekil 4.14.'de standart nozul ve CD nozulda elde edilen partikül boyut dağılımı verilmiştir. Açıkça görülebilir ki yüksek atım hızlarında CD nozulda standart nozula nazaran daha küçük partiküller meydana gelmiştir.



Şekil 4.14. İki farklı nozul tipi için partikül boyut dağılımı a) Standart nozul b) CD nozul [28].

Kaplama yoğunluğu ve yapışma mukavemetinin iyi olması için partiküllerin yüksek hızlara ulaştırılması gerekir. Geleneksel ark sprey sistemlerinde bu hız genelde düşüktür ve yapışma mukavemeti ile kaplama yoğunluğu sınırlıdır. İkinci atomize gaz ile yapılan püskürtmelerde daha üniform partikül boyut dağılımı, yüksek partikül hızları ve gelişen kaplama özellikleri elde edilir. Bu sayede ikincil gaz ilavesiyle yüksek yoğunluklu, düşük poroziteli ve yüksek yapışma mukavemetli kaplamalar üretilecektir.

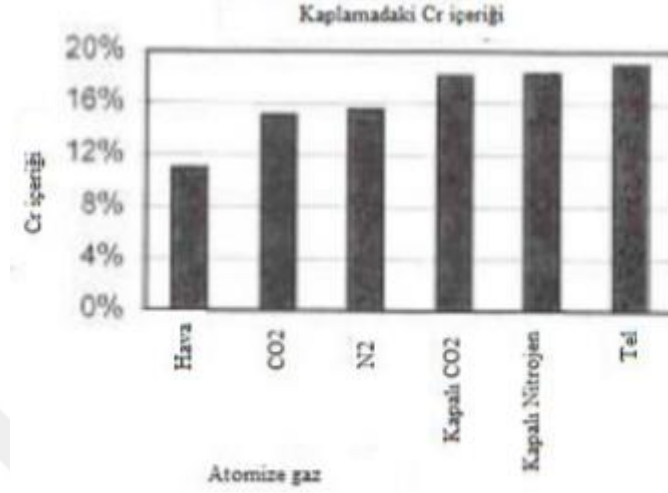
Ölçülen değerlere göre birincil gaz kullanılan (Şekil 4.12b.) nozulda gaz hızı 530 ± 15 m/sn, ikincil gaz ile kullanılan nozulda ise (Şekil 4.12c.) gaz hızı 610 ± 22 m/sn ölçülmüştür. Atomize olarak ikincil gazın kullanılması ergimiş partikülleri hızlandırdığı gibi küçük partikülleride peşinden götürür. Çarpma esnasında ortalama partikül hızı yaklaşık 105m/sn (± 10) civarındadır. Tek atomize gaz kullanan sistemde ise bu hız 70 m/sn (± 8)'dir.

Porozite içeriği hava atomizesi kullanıldığında %17(± 3), CO₂ kullanıldığında %12(± 2), N₂ kullanıldığında ise %13(± 2) çıkmaktadır. Örtülü olarak yapılan kaplamalarda CO₂ ile porozite %6(± 2) çıkarken N₂'ta ise %8(± 2) çıkmaktadır. Bu iki faktör tarafından meydana gelebilir;

- a. Etrafı kapatılarak (örtülü) yapılan kaplamada düşük oksit birikimi oluşmakta, ayrıca splatların daha üniform oluşu kaplamanın daha yoğun ve az poroziteli olmasını sağlar.
- b. Etrafı çevrilmiş (örtülmüş) ikincil gaz kullanarak yapılan kaplama daha hızlı partiküllerin eldesine olanak verir ve partikülleri daha az soğutur. Kaplama yapısı yüksek hız ve sıcaklık ile yoğun ve porozitesiz olur. Arayüzeyde hata daha az olur ve daha iyi bir kaplama elde edilir.

Hava kullanılan kaplamalarda, birçok mikroçatlak oluşumu gözlenmekte ve buda oksitlerin kaplama içerisine iyice yerleşmesini sağlamaktadır. Birçok SEM fotoğrafında hava kullanılan kaplamalarda, inert gaz kullanılan kaplamalara nazaran daha çok çatlak görülmüştür.

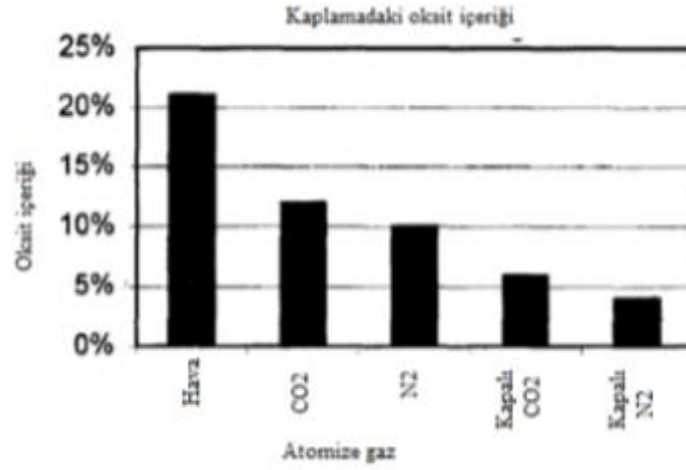
Şekil 4.15., AES’de hava, azot ve CO2 kullanılarak püskürtülmüş paslanmaz telin kaplamadaki Cr içeriğini veriyor.



Şekil 4.15. Elektrik ark püskürtmede sisteminde hava, azot ve CO2 kullanılarak püskürtülmüş paslanmaz telin kaplamadaki Cr içeriği [28].

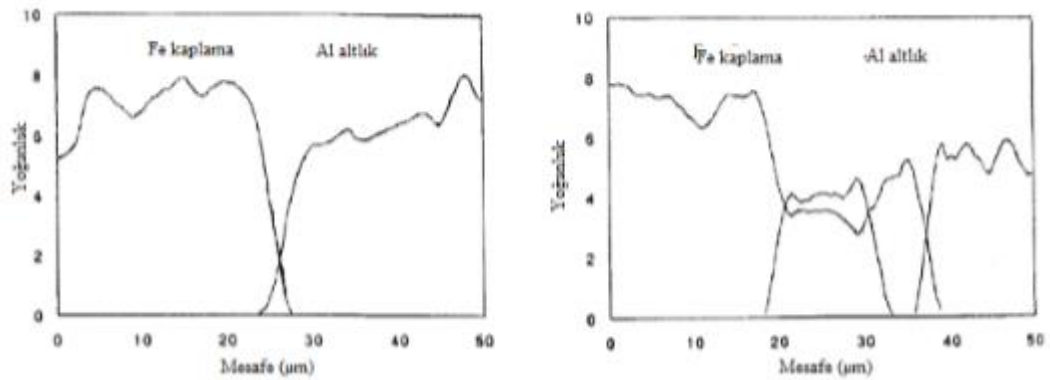
Sonuçlar gösteriyor ki hava kullanıldığında Cr içeriği düşük olmaktadır. Cr içeriği %12 ile %19 arasında değişmektedir.

Şekil 4.16.’da değişik çalışmalarla yapılmış kaplama uygulamalarındaki oksit birikimi gösterilmiştir. Hava kullanımında oksit birikimi çok yüksek çıkmıştır. Azot ise en az oksit birikimini göstermiştir. Kapalı ve ikincil gazla yapılan kaplamalarda hava türbilansı engellendiği için oksit birikimi azdır.



Şekil 4.16. Değişik uygulamalarla üretilmiş kaplamaların oksit içeriği [28].

Püskürtme kaplamalarda ergimiş partiküller hızla altlığa çarptıkları zaman deforme olur ve çabucak ısılarını kaybederler. Böylece üst üste lamel şeklinde gelen damlacıklarla yapı oluşur. Yapışma kaplama ve altlık yüzey arasında olan önemli bir parametredir. Düşük yapışma mukavemeti, yapılar arasında kötü bağlantı yapabilir ve buda düşük metalürjik bağ sonucunda yapıda yüksek iç stresler oluşturur. Yapılan çalışmalar ikincil gaz kullanarak yapılan kaplamalarda yapışma mukavemetinin mekanik bağa değil, metalürjik bağda bağlı olduğunu göstermiştir. Şekil 4.17.'de kaplama ve arayüzey arasındaki ayrılmalar görülebilir.



Şekil 4.17. a) Birincil gaz b) Birincil / İkincil gaz [28].

İkincil gaz kullanıldığında ise partiküller çok hızlı ve yüksek sıcaklıkta püskürtüleceği için yüzeye çarptıklarında yüksek deformasyona uğrayacaklardır.

Kuvvetli yapışma mukavemeti altlık ile film arasındaki ilişkiye bağlıdır. Bununla birlikte Al kaplamalarda partiküller arası ısı transferi olabilmektedir. Sonuçta poroz yapı ergimiş partiküllerin yüzeye çarpmasından sonra meydana gelebilir. Ergimiş partiküller birbiri üzerine yapışır ve birikir. Buda metalürjik yapışmaya katkıda bulunur.

İkincil gaz ile üretilen kaplamaların yapışma mukavemetinin daha yüksek çıktığı açıktır. Burada üç tip yapışma mekanizması önemli rol oynar;

- a. Fiziksel yapışma; kaplama ve altlık arasında Van Der Waals bağı vardır.
- b. Mekanik yapışma; ergimiş partiküller çok sert bir şekilde yüzeye çarpar ki buda kaplamanın topografisini belirler. Yüksek hız ve sıcaklık ikincil gaz kullanıldığında kaplamanın mekanik yapışmasını kuvvetlendirir.
- c. Metalürjik yapışma; ikincil gaz kullanarak metalürjik yapışma, ergime konveksiyonu, interdifüzyon ve intermetalik faz formasyonu sağlanabilir [28].

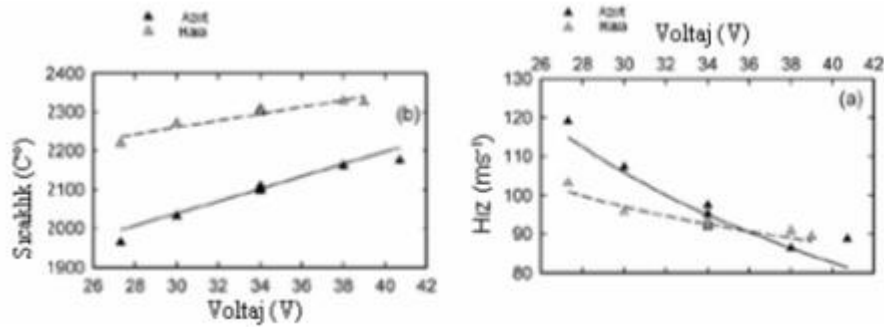
4.6. Amperin ve Voltajın Etkisi

Elektrik ark sprej prosesinde, kaplama malzemesinin ergimesi için gerekli ısı kaynağı tellerin uçlarında oluşan elektrik arkından temin edilir. İstenilen özelliklerde kaplama üretilmesi için tel uçlarında oluşacak arkın kararlı olması gereklidir. Amper ve voltaj değerlerindeki değişim partikül oluşumu, partikül yoğunluğu, partikül boyutu ve partikül sıcaklığını etkilediği için kaplama yapısını direkt etkilemektedir [47].

Düşük voltaj değeri ark sıcaklığını düşürecektir. Düşük voltajda akımın artması ergime sıcaklığı azaltır. Yüksek akım değerinde tel besleme hızı yüksek olmakta ve ergime için yeterli ısı girişi oluşmamaktadır. Telin hızlı bir şekilde doğru hareket etmesi ile ergime gereken tel miktarı artacak, düşük voltaj sebebiyle oluşan kısa arka meydana gelen partiküllere yeteri kadar ısı girişi sağlanamayacaktır. Sadece küçük partiküller düşük viskoziteyle hızlanıp yüzeye saçılacaktır.

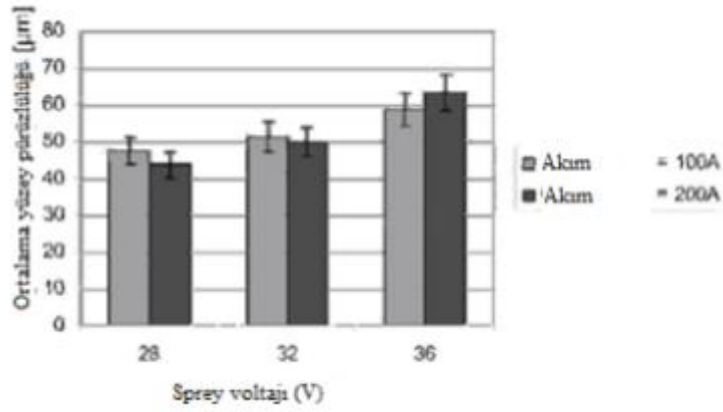
Yüksek voltaj ergitme için yeterli ark enerjisi meydana getirir. Bu sebeple büyük partiküllerin tel uçlarından kopmasına rağmen yüksek vizkozite gösterir. Bu partiküller diğerlerine nazaran kısmen atomize olurlar ve bu şekilde yüzeyde iyi bir tutunma gösterir.

Düşük voltajda oluşan partiküllere nazaran daha büyük yapışma mukavemetine sahip olur. Partikül sıcaklığı yüksek voltajda yüksek, düşük voltajda ise düşüktür. Püskürtme süresince ark sıcaklığının artması püskürtme sıcaklığını da arttıracaktır. Fakat ark voltajındaki artış püskürtme hızını düşürmektedir. Şekil 4.18’de bu etki görülebilir [48, 49].



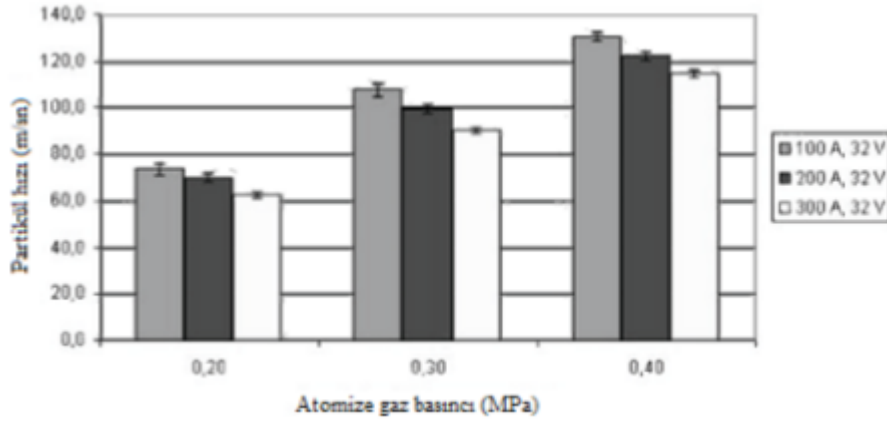
Şekil 4.18. Ark voltajının spray hızı ve sıcaklığına etkisi [48].

Şekil 4.19.’da görüleceği gibi kaplama voltaj değeri arttıkça büyük partiküller oluşmakta ve kaplamada pürüzlülük de artmaktadır. Voltaj 28 – 36 V’da pürüzlülük %12 artmıştır. Sadece yüksek voltaj, düşük akımda daha düşük porozite çıkmış, diğerlerinde akım değerinin artmasıyla kaplamaların pürüzlülüğü düşmüştür [49].



Şekil 4.19. Voltajın pürüzlülük ile ilişkisi [49].

Akımın artması ile partikül hızı azalır. Akım ile besleme hızı orantılıdır. Besleme hızı, yüksek akım değerlerinde artmaktadır. Bu da fazla malzemenin ergimesine olanak sağlayıp, ergime akışının değişimine sebebiyet verir ve sonuçta partikül hızı azalır, bir miktarda partikül sıcaklığı artar [49]. Şekil 4.20.'de akımın artması ile partikül hızının azaldığı görülebilir.



Şekil 4.20. Atomize gaz basıncı ile partikül hızları arasındaki ilişki [49].

4.7. Altlık Sıcaklığının Etkisi

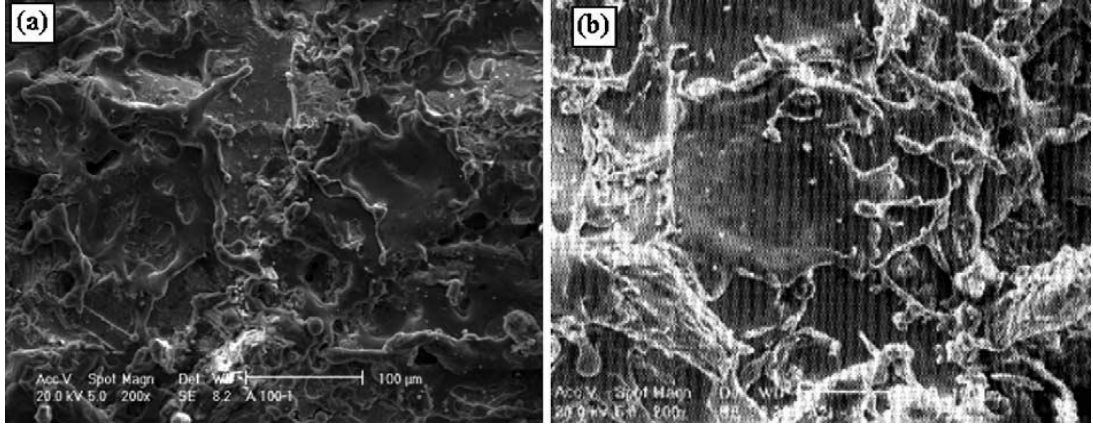
Termal sprej kaplamalarda kaplanacak altlık malzemenin sıcaklığı kaplama özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Elektrik ark püskürtmede yüzeye püskürtülen partiküller belli bir ısıya sahiptirler. Yüzeye belli bir ısıda ve hızla çarpan bu partiküller hem deforme olup saçılacaklar, hem de içlerindeki ısıyı çok hızlı bir

şekilde altlık malzemeye ileteceklerdir. Bu sebeple kaplama altlığının çok soğuk olması kaplama-altlık arasında bir termal gerilme yaratabilir. Bu termal gerilmeler kaplama işlemi esnasında kaplamanın çatlamasına veya ana malzemeden ayrılmasına yol açan basma ve çekme iç gerilmeleri şeklinde meydana gelmektedir. Bunu engellemek için termal sprej ile kaplama yapılacak malzemeler teorik olarak yaklaşık 200°C'ye ısıtılır. Yapılan bu tavlama işlemi altlık malzemenin hem kaplama sırasında hem de kaplama sonrasında termal gerilme uğramasını engellemek için yapılmakla beraber, ayrıca parça içerisindeki yağ, kir ve diğer istenmeyen yapıların uzaklaştırılması için yapılmaktadır. Tavlama yapılan parçanın ergime sıcaklığının bu sıcaklıklara yakın olmaması mutlaka dikkate alınmalıdır. Aksi durumlarda parçada çatlama, burulma veya yamulma meydana gelebilir.

Altlık sıcaklığındaki değişim partiküllerin yüzeye çarptığındaki soğuma hızını ve yapışma mukavemetini değiştirecektir. Ayrıca splatların görünüşü ve katılma şeklide değişime uğrayacaktır [2, 49].

Yüzey pürüzlendirme ve ön ısıtmanın splat morfolojileri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için, ön ısıtmalı ve ısıtmasız farklı pürüzlülükteki, alev sprej, HVOF ve elektrik ark sprej yöntemiyle alüminyum kaplanmış numuneler test edilmiş, farklı splat morfolojilerinden elde edilen sonuçlar ön ısıtılmış yüzeylerdeki pürüzlülüğün literatürde belirtilenden daha düşük olabileceğini göstermiştir.

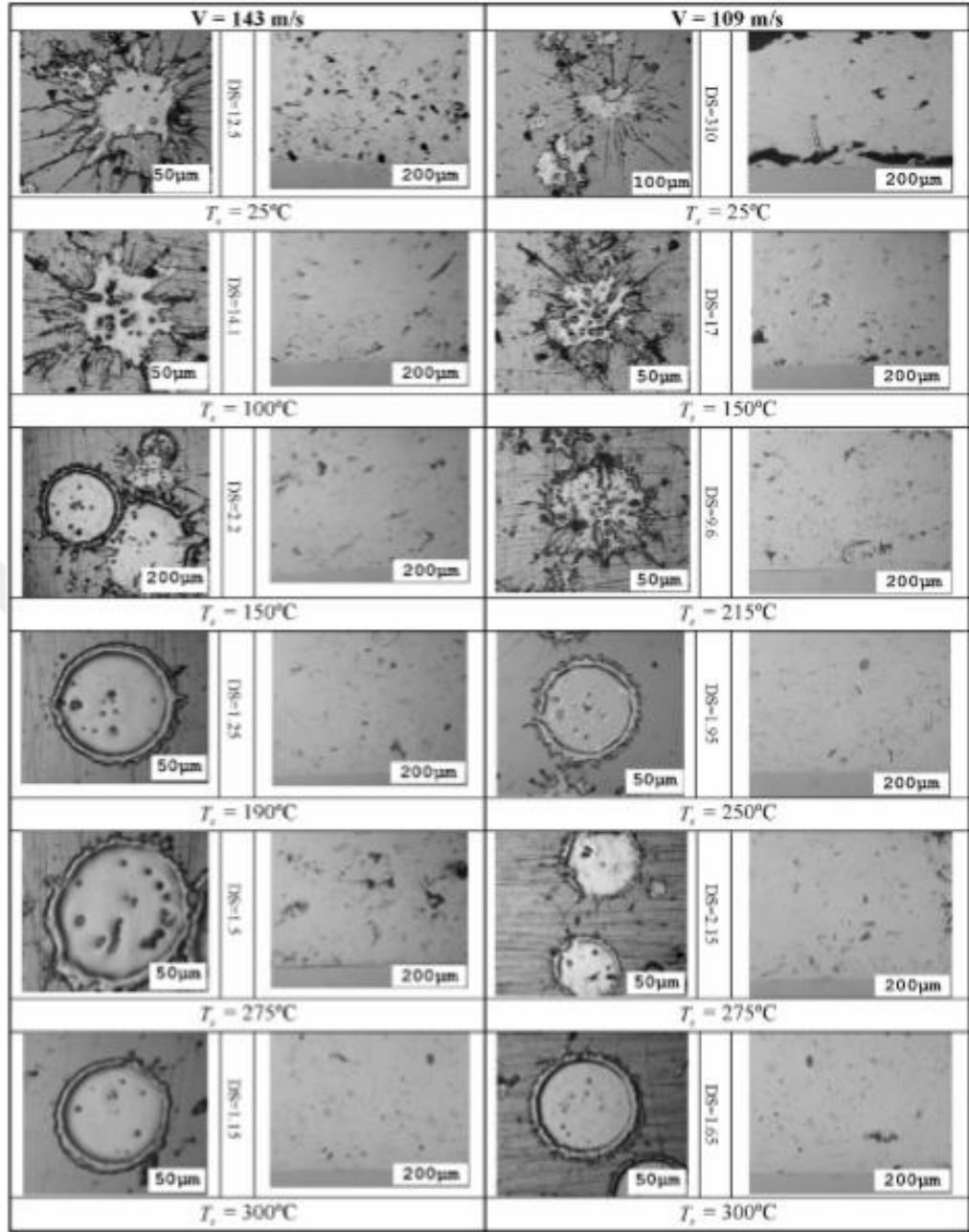
Şekil 4.21.'de EAS ile ön ısıtma olmadan ve 120°C'ye ısıtılmış yüzey üzerine püskürtülen alüminyum kaplamalardan elde edilen splat morfolojileri verilmiştir. Şekil 4.21a. splat şeklinde olmayan birçok küçük alüminyum damlacıklarla kaplanmış bölgeleri, Şekil 4.21b. ise yüzey yapısına çarpan gözeneksiz ve daha az damlacıklı, daha homojen splatları göstermektedir [51].



Şekil 4.21. Elektrik ark spreyle biriktirilen kaplamalardan elde edilen splat morfolojileri: (a) ön ısıtmasız (b) ön ısıtma ile [51].

Yapılan bir çalışmada elektrik ark püskürtme ile farklı sıcaklıklarda ısıtılan (25–450°C) paslanmaz çelik altlık üzerine, farklı püskürtme hızlarda (109–143m/sn) yapılan Al kaplamanın özellikleri incelenmiştir.

Şekil 4.22.'de 25 – 300 °C sıcaklıklarda paslanmaz çelik üzerine Al kaplamanın splat formasyonları görülebilir. Yüzey sıcaklığı 100 °C olan splatlar büyük derecede saçılıma uğramıştır. Splatların merkezden dışarıya doğru parmak uzantılar şeklinde yapı meydana getirdiği görülebilir. Şekle göre katılaşma damlanın çevresinde başlamıştır. Splat merkezi ile uzantılar arasındaki boşluklar kaplama içerisindeki porozları meydana getirirler. 25 °C'de de büyük boşluk ve porozlar görülebilir. Düşük yapışma hızlarında boşluklar daha fazladır. Özellikle bu boşluklar altlık-kaplama ara yüzeyinde görülür. Yapışma hızı arttıkça porozların azaldığı görülebilir. Yüksek hızda sıcaklık 100 °C'ye yakinken yuvarlaklaşma ve parmaklaşmanın azaldığı, hatta yok olduğu görülebilir [50].



Şekil 4.22. 25 – 300°C sıcaklıklarda paslanmaz çelik üzerine Al kaplamanın splat formasyonları [50].

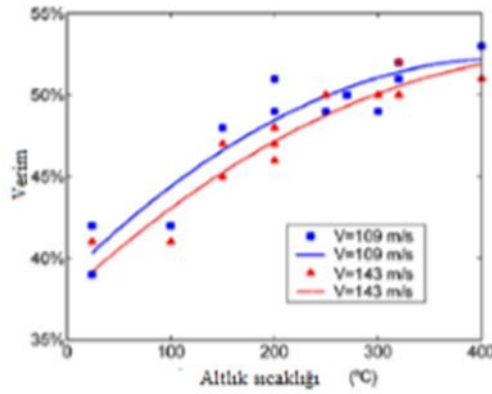
Tam geçiş sıcaklığı 143 m/sn püskürtme hızında $100^\circ\text{C} < T_s < 250^\circ\text{C}$, düşük püskürtme hızında ise (109 m/sn) $215^\circ\text{C} < T_s < 250^\circ\text{C}$ olduğu görülmüştür. Altlık sıcaklığı yükseldiğinde boşluk sayısı azalmış, yoğunluk artmıştır.

Bütün kaplamalarda %5'den daha az porozite olduğu görülmüştür. Düşük basınçlarda kaplama-altlık ara yüzeyde sık sık boşluk görülmüştür. $T_s > 100^\circ\text{C}$

olduğunda bu sayı önemli bir ölçüde azalmıştır ve bu durum 200°C'ye kadar devam etmiştir. Fakat 200°C'den sonra tersi bir etki söz konusu olmuştur ve poroz yapı artmıştır.

500 gr yükle yapılan mikro sertlik testlerinde 109 m/sn hızda ortalama $51,2 \pm 4,2$ Rc, 143 m/sn hızda ise ortalama $52,1 \pm 4$ Rc sertlik değeri bulunmuştur.

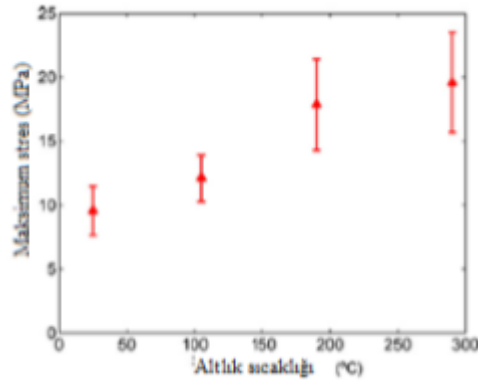
Birikme verimi altlık sıcaklığının artmasıyla artmaktadır. Şekil 4.23., birikme veriminin kuponların kaplama öncesi ve sonrası ağırlığını farklı sıcaklıklarda vermiştir. Oda sıcaklığında verim en düşük oranındadır (% 40). Altlık sıcaklığının artmasıyla (max %52 T 300°C) verimde yükselmiştir.



Şekil 4.23. Altlık sıcaklığı ile % verim ilişkisi [50].

Şekil 4.24. değişik yüzey sıcaklıklarında, 143 m/sn hızda üretilen kaplamaların yapışma mukavemetini vermektedir. Oda sıcaklığındaki kaplamalarda ortalama 9,5 MPa ve 100°C'de 12,1 MPa olarak artış göstermiştir. 200°C'de ise yapışma mukavemeti %86 (17,9 MPa) artmıştır.

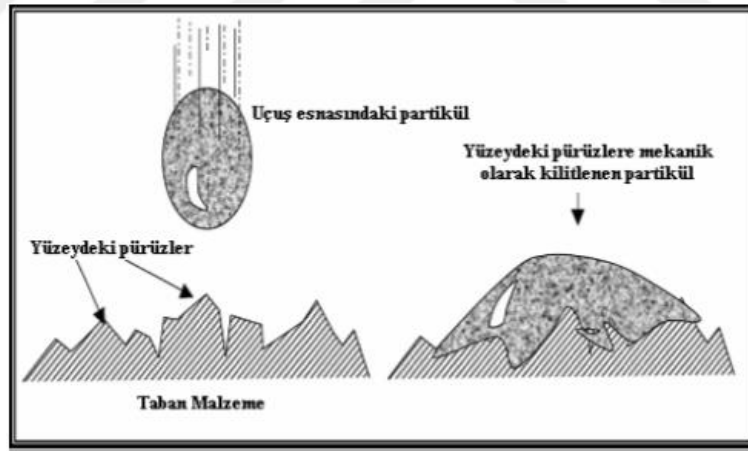
Yapılan araştırmada görüldüğü gibi altlık sıcaklığı ark püskürtmede her ne kadar pürüzlük ve sertliği çok fazla etkilemese de yapışma mukavemeti ve yoğunluk açısından önemli bir parametredir. Kaliteli bir kaplama yapısı için altlığın belli bir sıcaklığa kadar yükseltilip tavllanması, uzun ömürlü yoğun bir kaplama elde edilmesini sağlayacak ve parça kullanımının ömrünü uzatacaktır [50].



Şekil 4.24. Altlık sıcaklığı ile yapışma mukavemeti ilişkisi [50].

4.8. Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi

Yapışma mukavemetini etkileyen en önemli faktör yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzeye çarpan eriyikler bu boşluklar arasını doldurarak taban malzemeyle kenetlenir (Şekil 4.25.).



Şekil 4.25. Partikülün taban malzemeye mekanik bağlanması [34].

Yüzey pürüzlülüğü arttıkça yapışma mukavemetinin de belirli bir oranda arttığı gözlenmiştir. Ancak yüzey pürüzlülüğünü aşırı miktarda arttırmak yapışma mukavemeti açısından üstün özellikler gösteren bir kaplama elde edileceği anlamına gelmez. Yapışma mukavemeti belli bir pürüzlülük değerine kadar artar ve sonra yeniden düşmeye başlar [34].

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Deney Amacı ve İşleyişi

Bu çalışmanın amacı %99.99 yüksek safiyette, 1.6 mm çapındaki alüminyum teli elektrik ark püskürtme yöntemiyle atomizasyon gazı olarak hava kullanılarak farklı püskürtme parametrelerinde kaplamalar üretmek ve parametrelerin kaplama kalitesi üzerine olan etkisini ortaya koymaktır. Bu sayede saf alüminyum tel için optimum kaplama parametreleri belirlenmiş olacaktır.

Çalışmada St 37 çelik sac üzerine farklı kaplama parametrelerinde %99.99 Al tel püskürtülmüştür. Üretilen kaplamaları karakterize etmek için genel olarak aşağıdaki çalışmalar yapılmış ve konuyla ilgili sonuçlar elde edilerek, kaplama özellikleri analiz edilmiştir.

- a. Metalografik çalışma (hassas kesme, bakalite alma, zımpara ve parlatma vb.)
- b. Optik mikroskop incelemesi
- c. Kaplama kalınlığı ölçümü
- d. Mikrosertlik ölçümü (Hv)
- e. Taramalı elektron mikroskobu incelemesi (SEM)
- f. Yapışma mukavemeti testi

Metalografik çalışmadan sonra lamel yapısını daha iyi görebilmek için numuneler keller ayracı (2 ml HF, 3 ml HCl, 5 ml HNO₃, 190 ml su) ile dağlanmıştır.

5.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler

5.2.1. Altlık malzemesi

Bu çalışmada altlık malzemesi olarak 1.95 mm kalınlığında 3,04x4,97 cm boyutlarında, boyutlarında St 37 çelik sac kullanılmıştır. Deneyde kullanılan altlık malzemelerinden bir kısmı Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Deneyde kullanılan altlıklar

5.2.2. Kaplama teli

Kaplama üretimi 1.6 mm çapında %99.99 saflıkta alüminyum tel ile yapılmıştır. Ticari olarak Speedmet 100 olarak adlandırılan bu tel endüstride ve deniz atmosferinde korozyondan koruma, 800°C ve yukarısındaki sıcaklıklarda yüksek sıcaklık korozyon dayanımında ve gıda endüstrisinde kullanılmaktadır.

5.3. Deneyde Kullanılan Cihazlar

- a. Kuşlama cihazı
- b. Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı
- c. Elektrik ark sprej cihazı
- d. Kesme makinesi
- e. Bakalite alma cihazı
- f. Otomatik parlatma cihazı
- g. Optik mikroskop
- h. Mikro sertlik cihazı

- i. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)
- j. Çekme cihazı

5.3.1. Kumlama cihazı

Numunelerin kumlanma işleminde Sapi marka basınçlı kumlama cihazı kullanılmıştır. Kumlama işlemi 36 gritlik alümina kullanılarak optimum yüzey pürüzlülüğü elde edebilmek için kumlama tabancası numune yüzeyine 90°'lik bir açı ile tutularak kumlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

5.3.2. Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı

Kumlanan altlık malzemelerinin yüzey pürüzlülüğü Mahr M1 model yüzey pürüzlülüğü cihazı ile ölçülmüştür.

5.3.3. Elektrik ark püskürtme cihazı

Kaplama uygulamaları Sulzer Metco Smart Arc elektrik ark püskürtme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.2.'de ark püskürtme cihazı görülmektedir.



Şekil 5.2. Elektrik ark püskürtme cihazı.

5.3.4. Kesme makinesi

Yapılan kaplamalar Struers Labotom 3 marka cihaz ile hassas olarak kesilmiştir.

5.3.5. Bakalite alma cihazı

Numunelerin bakalite alma işlemi Struers Citopress-10 marka bakalite alma cihazı ile yapılmıştır.

5.3.6. Otomatik parlatma cihazı

Bakalite alınan kaplanmış numuneler Struers Tegrapol-21 marka otomatik parlatma cihazı ile zımparalanıp daha sonra parlatılmıştır.

5.3.7. Optik mikroskop

Kaplamaların metalografik incelemesi Zeiss AX10 marka optik mikroskop cihazı ile yapılmıştır. Kullanılan optik mikroskop cihazı Şekil 5.3.'de görülmektedir.



Şekil 5.3. Metalografik incelemede kullanılan optik mikroskopun resmi

5.3.8. Mikro sertlik cihazı

Üretilen kaplamaların sertlikleri Shimadzu-HMV marka mikro sertlik cihazı ile ölçülmüştür. Kullanılan sertlik cihazı Şekil 5.4.'de verilmiştir. Belirlenen parametrelerle üretilen kaplamalara Shimadzu-HMV cihazı ile 10 saniye boyunca

300 gramlık yük uygulanarak sertlik ölçümleri yapılmıştır. Üretilen her bir kaplama numunesinden 6 farklı noktadan mikrosertlik ölçümü alınıp kaplama sertliği olarak bu değerlerin ortalaması alınmıştır.



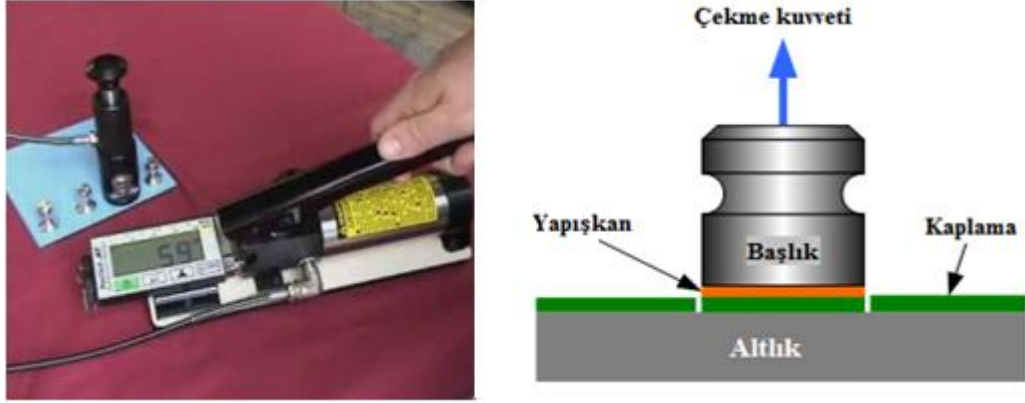
Şekil 5.4. Kullanılan sertlik cihazının resmi

5.3.9. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Üretilen kaplamaların mikroyapı ve kaplama üst yüzey SEM görüntüleri VEGA TESCAN marka taramalı elektron mikroskobuyla alınmış, EDX analizleride yine bu cihazla yapılmıştır.

5.3.10. Çekme cihazı

Üretilen kaplamaların yapışma mukavemetleri Defelsko marka, Posi Test AT-M model çekme cihazıyla ASTM D4541 standartlarına göre ölçülmüştür. Yapıştırıcı olarak ticari olarak satılan acrylic yapıştırıcı kullanılmıştır. Şekil 5.5.'de çekme cihazının kullanım şekli ve şeması verilmiştir.

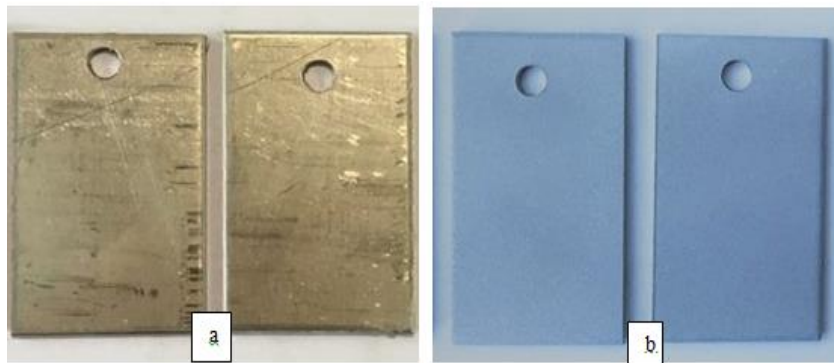


Şekil 5.5. Çekme cihazı kullanım şekli ve şeması.

5.4. Kaplamaların Üretilmesi

5.4.1. Altlık yüzeyinin hazırlanması

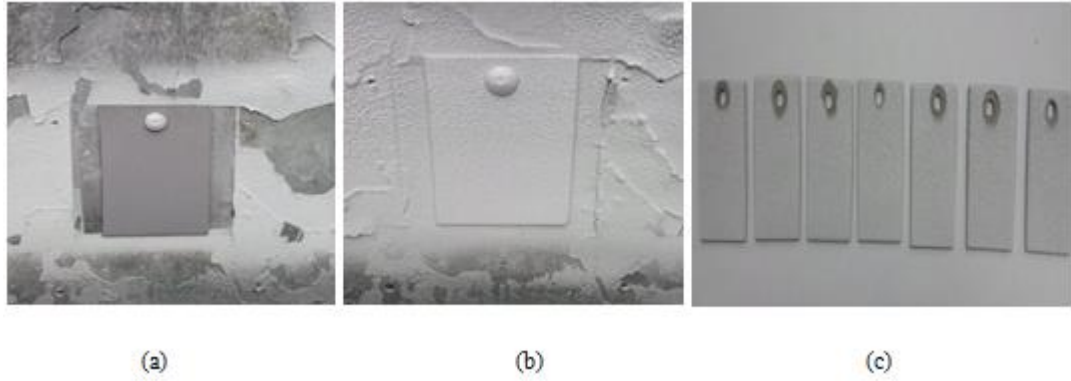
Üretilen kaplamaların yüzeye iyi bir şekilde yapışması ve mekanik bağlanmanın gerçekleşmesi için kaplama işleminden önce altlık yüzeyindeki yağ, pas ve kirin giderilmesi gerekmektedir. Bunun için altlıklar önce alkol ve aseton kullanarak silinmiş daha sonra 36 gritlik alümina kullanılarak 90°'lik açı altında kumlanmıştır. Şekil 5.6.'da bazı altlıkların yüzeylerinin hazırlanmadan önceki ve temizlenip kumlandıktan sonraki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.6. Kaplamada kullanılan altlıklardan bazılarının; a) yüzey hazırlığından önceki, b) yüzey hazırlığından sonraki görüntüleri.

5.4.2. Elektrik ark püskürtme yöntemiyle kaplama uygulaması

Yüzeyleri temizlenip kumlanarak pürüzlendirilen numunelerin önce yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş yeterli yüzey pürüzlülüğü elde edildiğinde numuneler tepelerine açılan deliklerden civata ile metal bir platform üzerine sabitlenmiştir. Sabitlenen numune üzerine belirlenen parametrelerde %99.99 saf alüminyum tel Sulzer Metco Smart Arc elektrik ark sprey tabancası ile ergitilerek manuel olarak 15 cm mesafeden altlık yüzeyine püskürtülerek kaplamalar üretilmiştir. Kaplama işleminde atomize gaz olarak hava kullanılmış her bir numuneye 4 paso kaplama yapılmıştır. Şekil 5.7.'de numunelerin kaplama öncesi ve sonrası görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.7. Altlıkların a) kaplama öncesi, (b) ve (c) kaplama sonrası görüntüleri.

Elektrik ark püskürtme kaplama üretim parametrelerin üretilen kaplamalara olan etkisinin araştırılması amaçlı üç parametresi değişken olarak seçilmiştir. Bu seçilen temel parametreler akım, voltaj ve gaz basıncıdır.

5.4.2.1. Akım değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar

Elektrik ark püskürtme prosesiyle üretilen kaplamalarda akım değeri değişiminin kaplama yapısı ve yapışma mukavemetine etkisini araştırmak için voltaj ve gaz basıncını sabit tutarak farklı akımlarda kaplamalar üretilmiştir. Kaplamalarda voltaj değerleri 25 V ve 28 V'da basınç değerleri ise 3, 4, 5 bar da sabit tutularak farklı

akım değerleri kullanılmıştır. Akım değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların kaplama parametreleri Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Akım değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri.

Numune	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz Basıncı (bar)	Mesafe (cm)
A11	120	25	3	15
A12	140	25	3	15
A13	160	25	3	15
A21	120	25	4	15
A22	140	25	4	15
A23	150	25	4	15
A24	160	25	4	15
A25	170	25	4	15
A31	140	28	4	15
A32	150	28	4	15
A33	160	28	4	15
A34	170	28	4	15
A41	150	28	5	15
A42	160	28	5	15
A43	170	28	5	15

5.4.2.2. Voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar

Elektrik ark püskürtme prosesiyle üretilen kaplamalarda voltaj değeri değişiminin kaplama yapısı ve yapışma mukavemetine etkisini araştırmak için akım ve gaz basıncını sabit tutarak farklı voltaj değerlerinde kaplamalar üretilmiştir. Voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların kaplama parametreleri Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Voltaj değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri.

Numune	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz Basıncı (bar)	Mesafe (cm)
V11	140	25	4	15
V12	140	28	4	15
V21	160	25	4	15
V22	160	28	4	15
V31	170	25	4	15
V32	170	28	4	15
V33	170	30	4	15

5.4.2.3. Basınç değişimine bağlı olarak üretilen kaplamalar

Elektrik ark püskürtme prosesiyle üretilen kaplamalarda basınç değeri değişiminin kaplama yapısı ve yapışma mukavemetine etkisini araştırmak için akım ve voltaj sabit tutularak farklı basınçlarda kaplamalar üretilmiştir. Basınç değişimine bağlı olarak üretilen kaplamaların kaplama parametreleri Tablo 5.3.'de verilmiştir.

Tablo 5.3. Gaz basıncı değişimine bağlı olarak üretilen kaplama numunelerinin üretim parametreleri.

Numune	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz Basıncı (bar)	Mesafe (cm)
P11	160	25	3	15
P12	160	25	4	15
P21	160	28	4	15
P22	160	28	5	15
P31	200	30	3	15
P32	200	30	4	15
P33	200	30	5	15

BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR

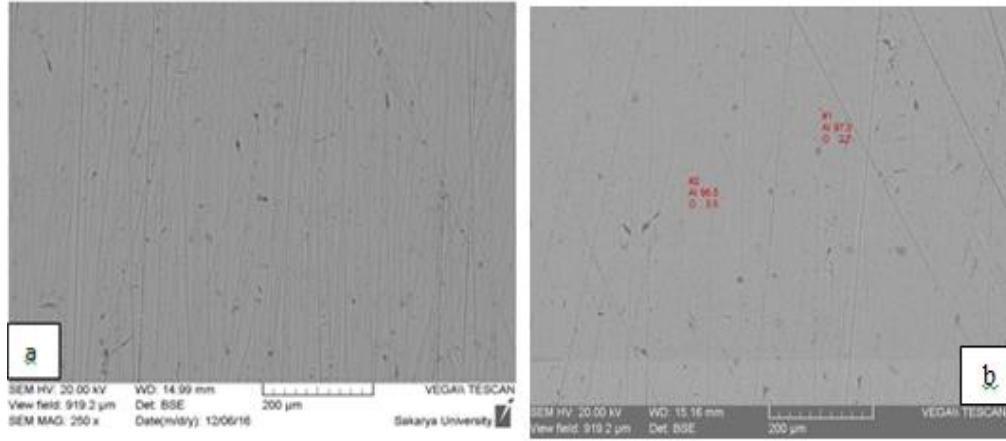
6.1. Giriş

Bu çalışmada endüstride ve deniz atmosferinde korozyondan koruma ve gıda endüstrisinde kullanılan %99.99 saflıkta ticari adı Speedmet 100 olan alüminyum tel ile elektrik ark sprey prosesiyle akım, voltaj ve gaz basıncı değiştirilerek farklı proses parametrelerinde kaplamalar üretilmiştir. Üretilen kaplamalar elektrik ark püskürtme proses parametre değişiminin nihai kaplama yapısına olan etkisini incelemek ve optimum püskürtme parametrelerin belirlenmesi amacıyla karakterize edilmiştir.

Bu amaçla ilk olarak kaplama teli karakterize edilmiş, sonra üretilen kaplamalara metalografik numune hazırlama işlemleri yapılarak optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikroyapı incelemeleri, kaplama üst yüzey SEM görüntüleri incelemeleri, kaplamaların sertlik ölçümleri ve yapışma mukavemeti testi yapıp sonuçlar değerlendirilmiştir.

6.2. Alüminyum Kaplama Telinin Analizi

Kaplamaların üretilmesinde kullanılan 1,6 mm çapında %99.99 safiyetdeki alüminyum (Speedmet 100) telin SEM görüntüsü ve farklı 2 noktadan alınan EDX analiz sonuçları Şekil 6.1.'de görülmektedir. Ticari olarak %99.99 alüminyum olan kaplama telinin EDX analizi sonucunda %97 oranında Al ve % 3 oranında oksijen elementi tespit edilmiştir. Kaplama telinin sertliği 35 ± 5 Hv olarak ölçülmüştür. Tel üzerinde yapılan sertlik ölçümlerinde sonuçlar tel kesiti boyunca homojen bir sertlik göstermektedir. Tel kesitinde porozite gözlenmemektedir.

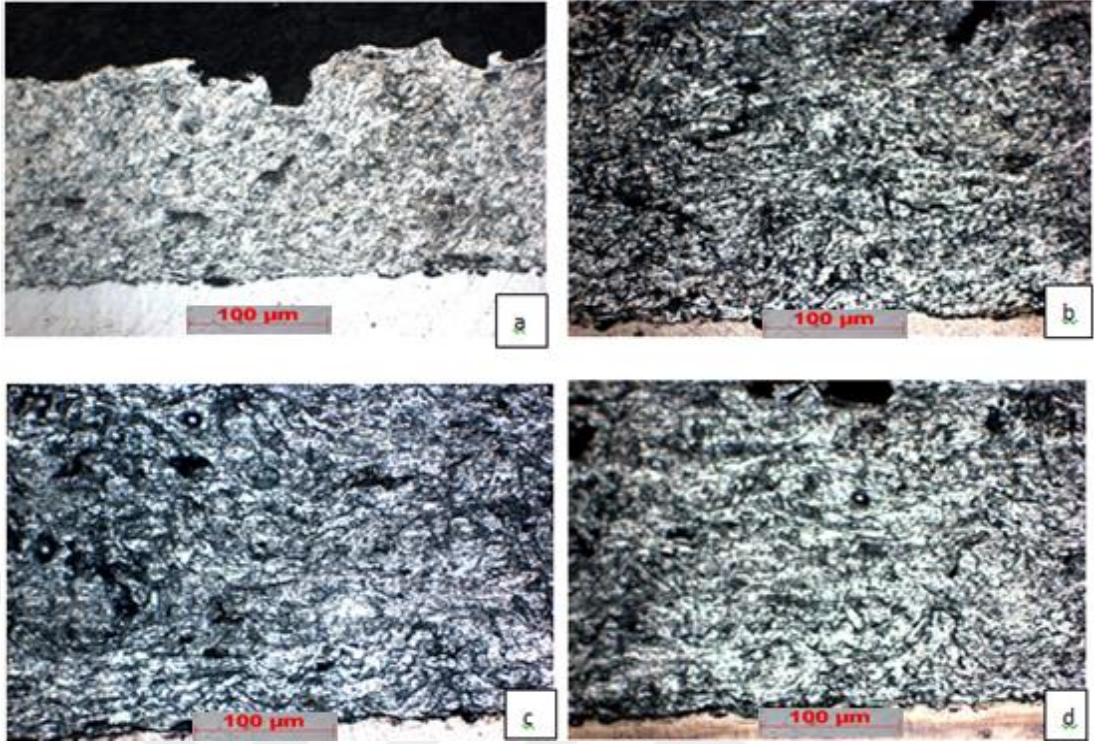


Şekil 6.1. Kaplama telinin a) 250x’de SEM görüntüsü b) EDX analizi.

6.3. Akımın Kaplama Mikroyapısına Etkisi

Elektrik ark püskürtme kaplama proses parametrelerden biri olan akımın değişimi partikül oluşumu, partikül boyutu ve partikül sıcaklığını doğrudan etkilemektedir. Akımın artması ile tel besleme hızı artar, buna bağlı olarak kaplamanın birikme verimi artar. Diğer taraftan akımın artması fazla malzeme ergimesine olanak sağlar, buna bağlı olarak partikül hızı azalırken partikül sıcaklığı bir miktar artış gösterir. Sabit voltaj (25 V) ve atomize gaz basıncında (4 bar) 120 A, 140 A, 150 A, 160 A olmak üzere dört farklı akım değerinde (A21, A22, A23, A24) üretilen kaplamaların optik mikroyapı görüntüleri Şekil 6.2.’de verilmiştir.

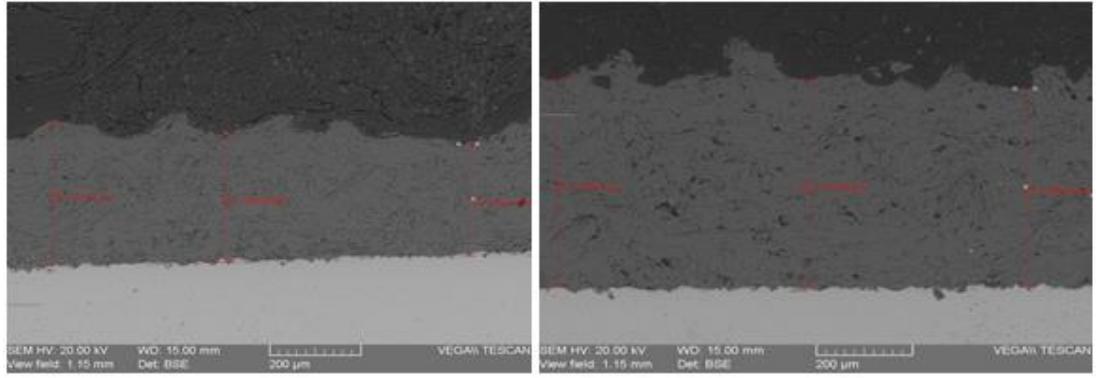
Kaplamaların mikroyapıları optik mikroskopunda incelendiğinde benzer heterojen özelliklerde kaplama yapısı elde edildiği görülmüştür. Mikroyapılarda porozite ve ergimemiş partiküller gözlenmiştir.



Şekil 6.2. 25 V, 4 bar atomize gaz basıncında a) 120 A b) 140 A c) 150 A d) 160 A’de üretilen kaplamaların optik görüntüleri.

Uygulanan parametre değerlerinde amper değerinin yükseltilmesiyle artan enerjiyle beraber ark içerisindeki sıcaklık artmış, böylece partikül sıcaklığı artmış ve altlık yüzeye çarptıklarında daha iyi bir yayılma göstermişlerdir. Akımın 170 A’e arttırılmasıyla artan sıcaklık sonucu tel ucundan kopan partiküller daha kaba yapılı olur bunun sonucu olarak kaplamanın yapısında bir miktar bozulma gözlenmiştir (Şekil 6.2d).

A21 ve A23 numunelerinin SEM mikroskobuyla alınmış kalınlık ölçümleri Şekil 6.3.’de verilmiştir.

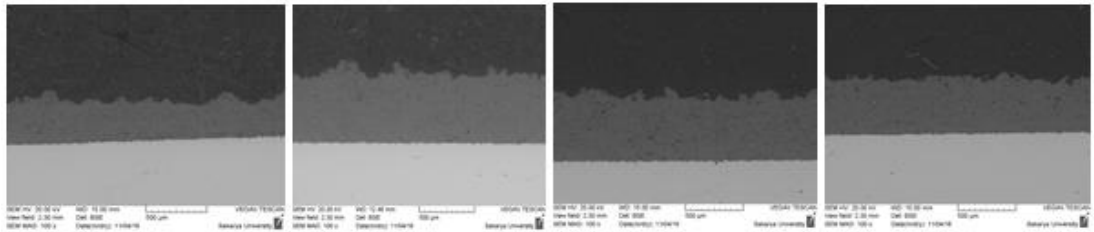


a)

b)

Şekil 6.3. 25 V, 4 bar atomize gaz basıncında a) 120 A, b) 150 A'de üretilen kaplamaların kalınlık ölçüm görüntüleri.

Artan akımla tel besleme hızı artmış buda fazla malzemenin ergimesine olanak sağlayıp birikme hızını artırmış ve kaplama kalınlığında artış meydana gelmiştir. 120 amperde üretilen kaplamanın ortalama kalınlığı yaklaşık $330 \pm 30 \mu\text{m}$, 150 A'de üretilen kaplamanın ortalama kalınlığı yaklaşık $510 \pm 30 \mu\text{m}$ ölçülmüştür. Kaplama manuel olarak yapıldığından aradaki farkın bir miktarı kaplama hızındaki düzensizlikten kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 6.4.'de A21, A22, A23 ve A24 kaplamalarının 100X büyütmede genel SEM görüntüleri verilmiştir.



a)

b)

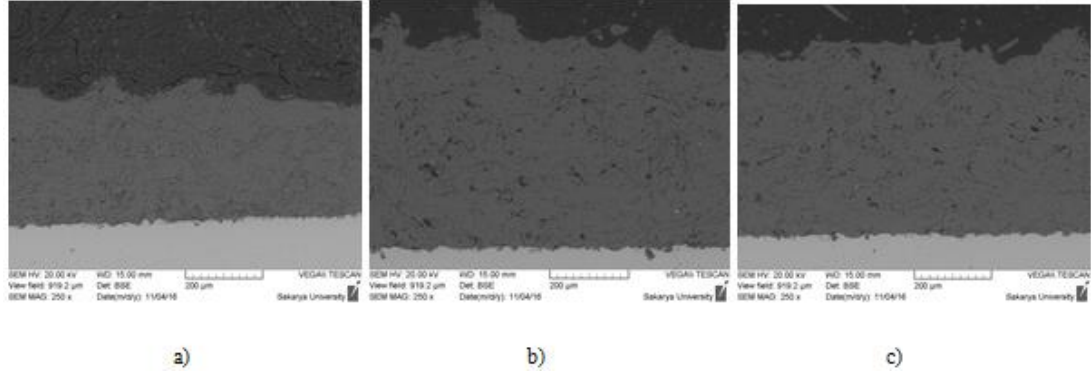
c)

d)

Şekil 6.4. a) A21, b) A22, c) A23, d) A24 kaplamalarının genel SEM görüntüleri.

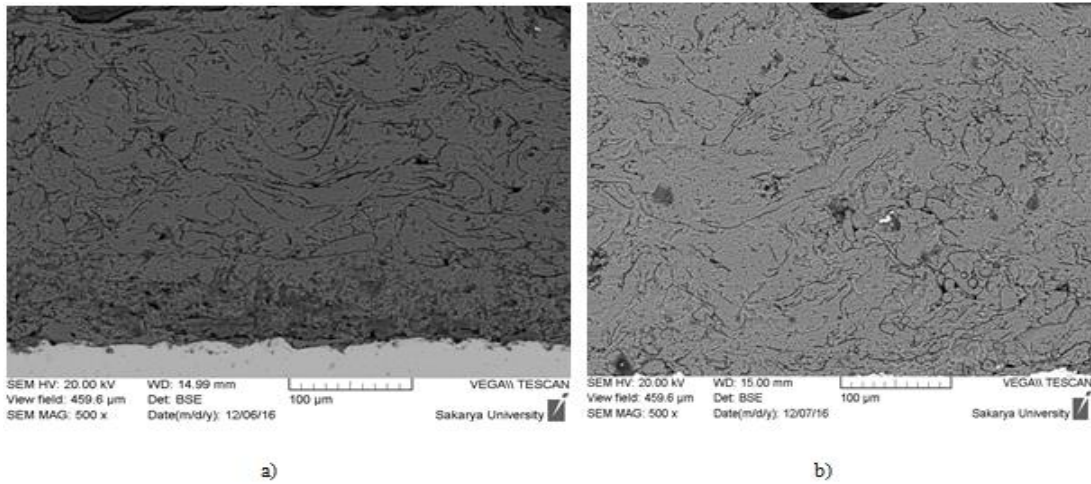
Şekil 6.4.'deki SEM görüntüleri incelendiğinde kaplama kalınlıkları genel itibari ile homojenlik göstermektedir. Kaplama altlık ara yüzeyindeki yapışmayı net görebilmek için numunelerin 250X büyütmede görüntüleri alınmıştır (Şekil 6.5.). SEM'de yapılan incelemelerde ara yüzey kalitesi oldukça memnun edici seviyededir.

Metalik splatlatlar kumlanmış yüzeye iyi bir tutunma sergilemiştir. Kaplama-altlık ara yüzeyinin boşluksuz ve yoğun bir kaplama tabakası olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5. a) A21, b) A23, c) A24 kaplamalarının 250x'deki SEM görüntüleri.

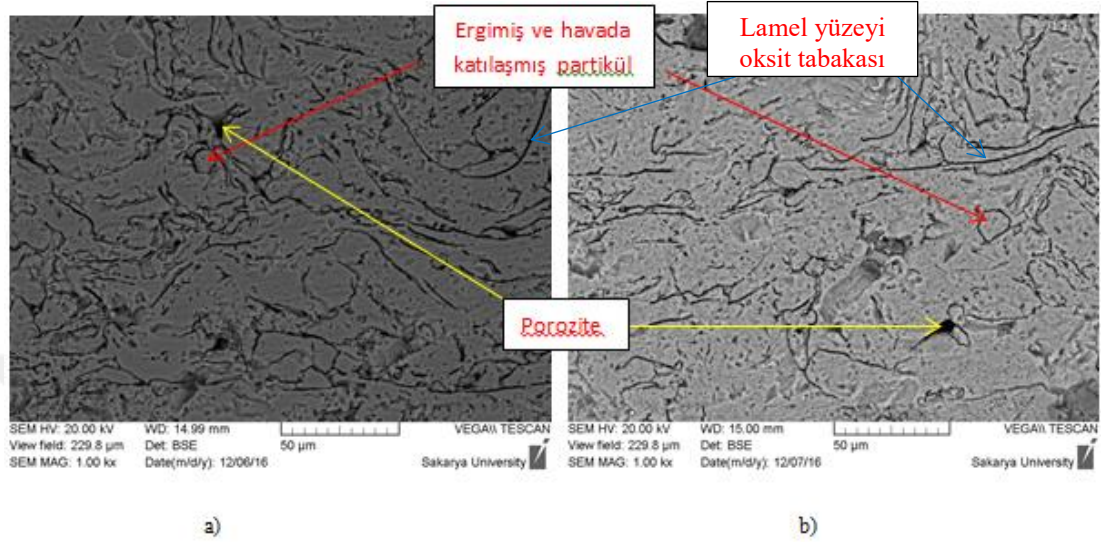
A21 ve A25 nolu kaplamalarının Şekil 6.6.'daki görüntülerine bakıldığında düşük akımda üretilen A21 nolu kaplamada çok sayıda ve büyük boyutta ergimemiş partiküller gözlenmişken, A25 nolu kaplamada artan akımla birlikte artan enerjiden dolayı daha az sayıda ve küçük çapta ergimemiş partiküller gözlenmiştir. Mikro yapı tipik termal spreyci kaplama yapısıdır.



Şekil 6.6. 25 V, 4 bar basınçta; a) 120A, b) 170 A'de üretilen kaplamaların 500X'deki SEM görüntüleri.

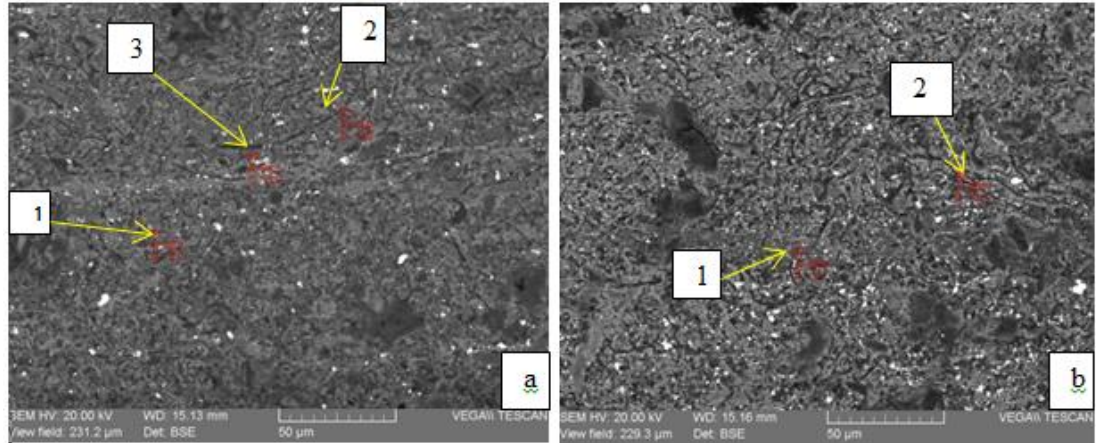
A21 nolu kaplamada, A25'e göre daha fazla sayıda ve daha büyük çapta poroziteler görülürken genel itibari ile her iki kaplamada da düşük miktarda porozite olduğu görülmektedir.

Şekil 6.7.'de A21 ve A25 nolu kaplamaların yüksek büyütmede detay görüntüleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi lameller arasında ayrılma gözlenmemiştir.



Şekil 6.7. a) A21 b) A25 nolu kaplamaların yüksek büyütmede detay görüntüleri.

Şekil 6.8.'de A21 ve A25 nolu kaplamaların EDX analizleri verilmiştir.



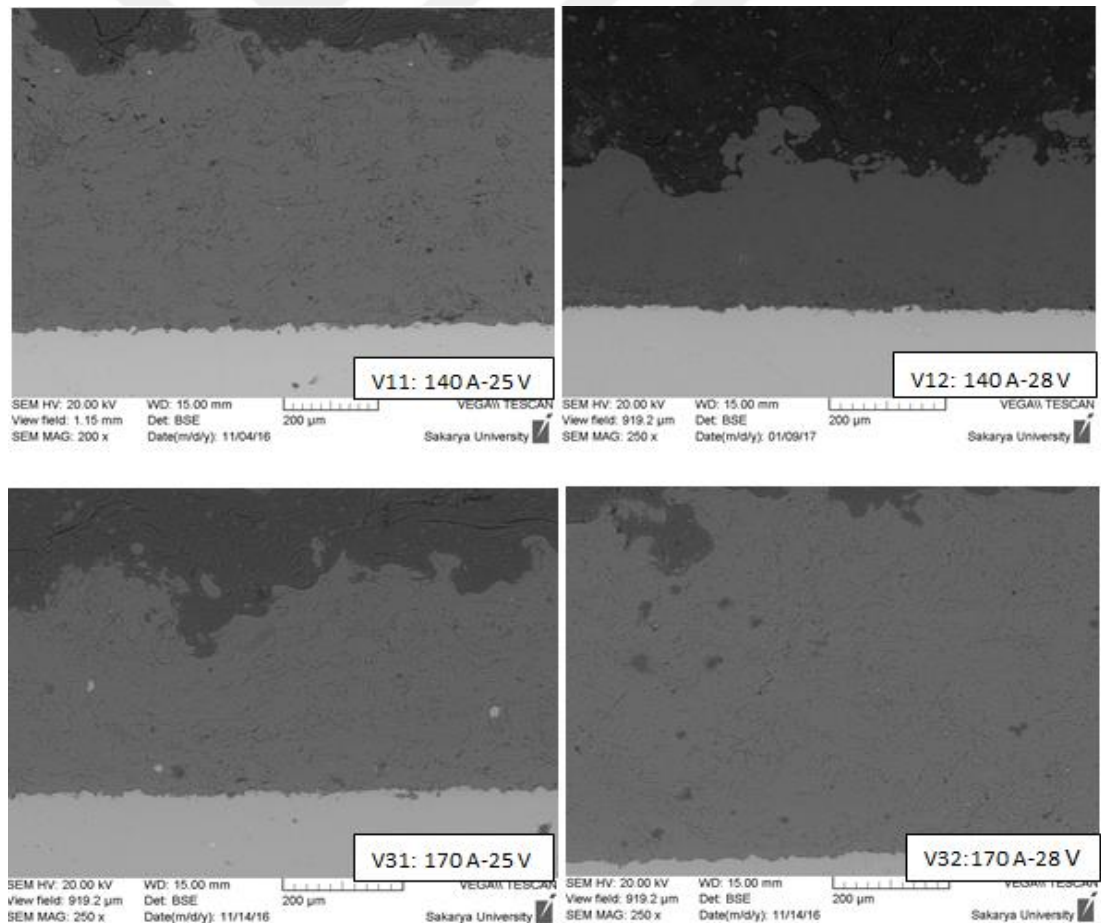
Şekil 6.8. a) A21 b) A25 nolu kaplamaların EDX analizleri.

Şekil 6.8.'de 120 A'de üretilen (A21) kaplamanın 1 ve 2 nolu noktalarından alınan EDX sonucunda % 92-94 Al, %6-8 oksijen, lamel yüzeyinden alınan 3 nolu noktada ise % 84 Al, %16 oksijen elementi tespit edilmiştir. 170 A'de üretilen (A25)

kaplamanın 1 nolu noktasından alınan EDX sonucunda % 93,9 Al, % 6,1 oksijen, lamel yüzeyinden alınan 2 nolu noktada %86 Al, %14 O elementi tespit edilmiştir.

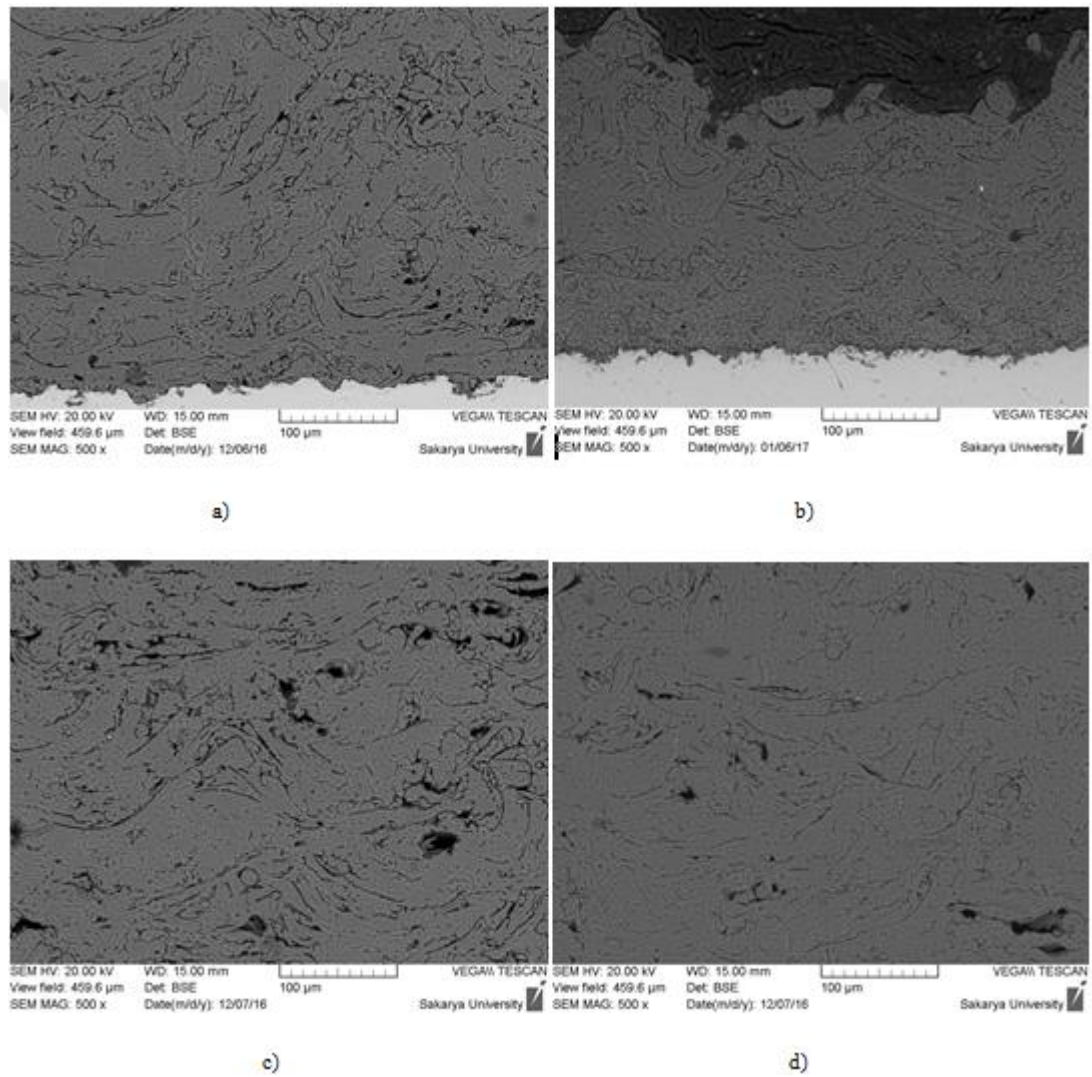
6.4. Voltajın Kaplama Mikroyapısına Etkisi

Elektrik ark püskürtme kaplama prosesi parametrelerinden biri olan voltaj kaplama teline etki eden ısı miktarı belirlemektedir. Özellikle kaplama prosesinde voltaj değerlerindeki artış partiküllerin sıcaklıklarının artmasına ve daha kaba tanelerin oluşmasına sebep olmakta ve partikül hızını düşürmektedir. 4 bar atomize gaz basıncında, 140 A akım değerinde 25 V (V11) ve 28 V'da (V12) ve 170 A akım değerinde 25 V (V31) ve 28 V'da (V32) üretilen kaplamaların genel SEM görüntüleri Şekil 6.9.'da verilmiştir.



Şekil 6.9. 140 A ve 170 A akım seviyelerinde 25 V ve 28 V olan iki farklı voltaj değerinde üretilen kaplamaların genel SEM görüntüleri.

Şekil 6.9.'daki SEM görüntüleri incelendiğinde kaplama kalınlığının genel itibari ile homojenlik gösterdiği görülmektedir. Kaplama altlık ara yüzündeki yapışmanın da iyi olduğu ve kaplamaların genel itibari ile düşük porozite içerdiği görülmektedir. Daha detaylı inceleme için 140 A akım değerinde 25 V (V11) ve 28 V'da (V12) ve 160 A akım değerinde 25 V (V21) ve 28 V'da (V22) üretilen kaplamaların detaylı SEM görüntüleri Şekil 6.10.'da verilmiştir. Şekil 6.10.'daki detaylı görüntüler incelendiğinde splatlar arası ayrılma olmadığı ve kaplamanın yoğun bir yapıda olduğu görülmektedir.

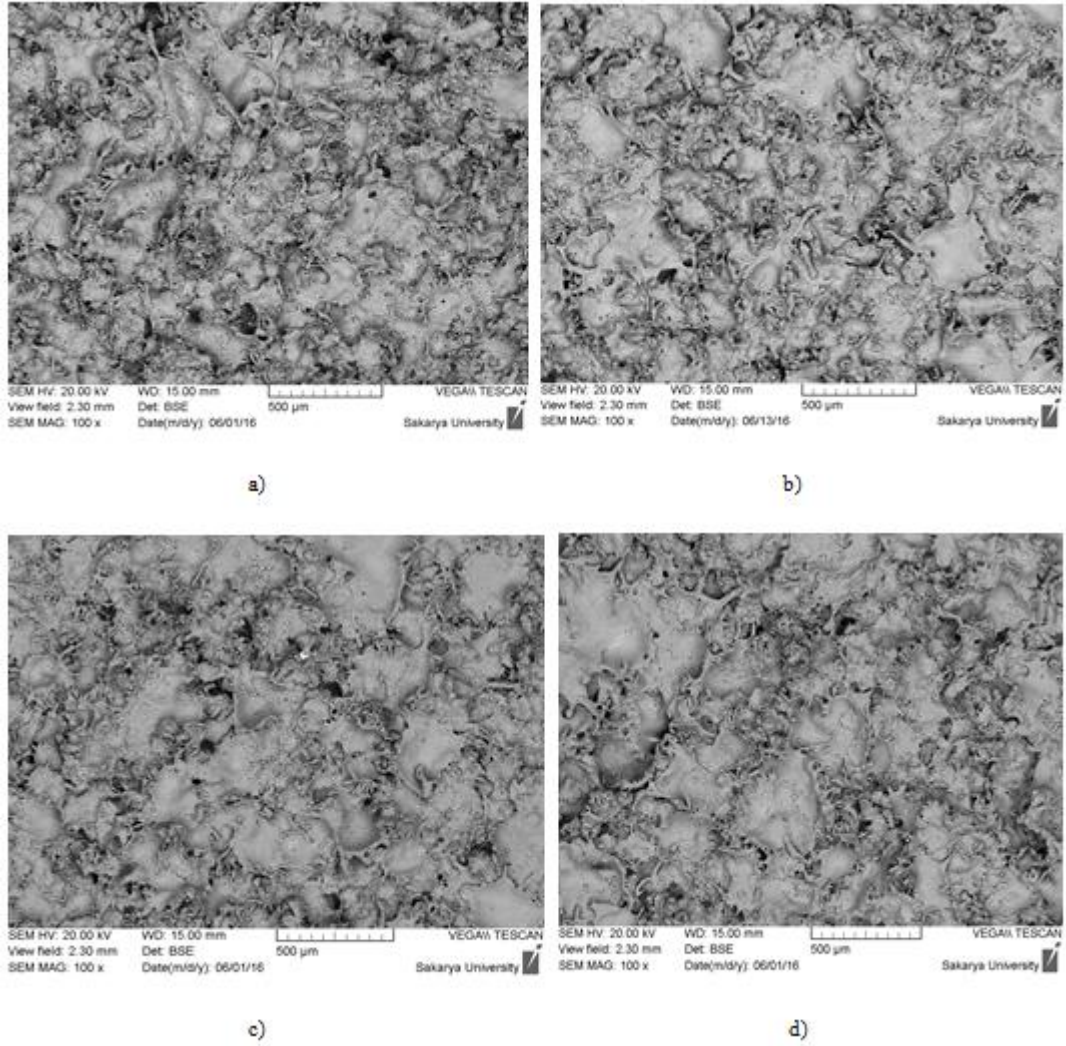


Şekil 6.10. a) V11, b) V12, c) V21, d) V22 nolu kaplamaların yüksek büyütmedeki SEM görüntüleri.

Düşük voltaj değerinde üretilen (V11, V21) numunelerin yapısında, yüksek voltajda üretilenlere (V12, V22) göre daha fazla miktarda ergimemiş partikül

gözlemlenmiştir. Yüksek voltajda üretilen kaplamalarda (V12, V22) ergimemiş partikül miktarı çok düşüktür. Bunun nedeni düşük voltaj seviyesinde çalışıldığında partiküllere yeterli ısı girdisi yapılamamış, yarı ergimiş halde olan partiküllerde altlığa doğru yol alırken tekrar havada katılaşmıştır, bu da yapı içerisinde daha fazla ergiyip katılan partiküllerin oluşmasına neden olmuştur. Voltaj değerinin artırılmasıyla tel uçlarının ergimesiyle oluşan damlacıklara daha fazla ısı girdisi olduğundan tam olarak bir ergime sağlanmıştır. Yine düşük voltajda üretilen kaplamalarda (V11, V21), yüksek voltajda üretilenlere (V12, V22) göre daha fazla sayıda ve büyük çapta porozite gözlenmektedir. Bunun nedeni düşük voltajda üretilen kaplamalarda partiküllere yeterli ısı girdisi olmadığı için yüzeye çarptıklarında tam bir yayılım gerçekleştiremediklerinden kaynaklanmaktadır. Voltaj değerini 25 V'dan 28 V'a çıkardığımızda ise tel ucunda oluşan damlacıkların sıcaklıkları artar ve yüzeye çarptıklarında daha iyi ve homojen bir saçılım gösterirler. Şekil 6.11.'de V11-V12 ve V31-V32 nolu kaplamaların üst yüzey SEM görüntüleri verilmiştir.

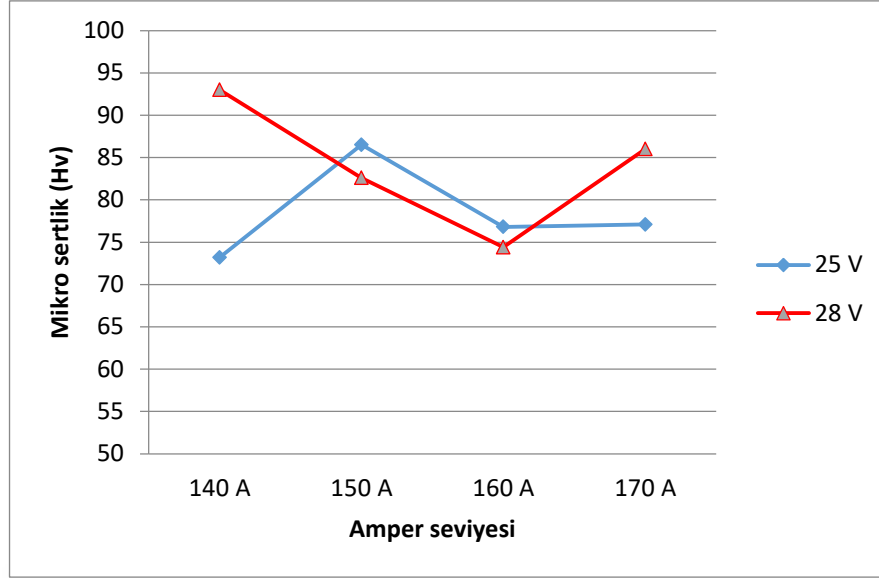
Şekil 6.11.'den de görülebileceği gibi 28 V da üretilen damlacıkların boyutu (Şekil 6.11. b, d) 25 V da üretilenlerin (Şekil 6.11. a, c) boyutlarından daha büyüktür. Yine aynı şekilde yüksek akımda 25 V, 170 A de (Şekil 6.11c) üretilen damlacıkların boyutları 25 V, 140 A de (Şekil 6.11a) üretilenden, 28 V, 170 A de (Şekil. 6.11d) üretilen partikül boyutlarında, 28 V, 140 A de (Şekil 6.11b) üretilenden büyüktür. Akım ve voltajın artırılması ergiyen madde miktarını arttırdığı için damlacık boyutlarında da artış meydana gelmiştir. Splatlar daha iri ve bloklar halindedir.



Şekil 6.11. a) V11, b) V12, c) V31, d) V32 nolu kaplamaların üst yüzey SEM görüntüleri.

6.5. Amper/Voltaj Değişimlerinin Kaplamanın Mekanik Özelliklerine Etkisi

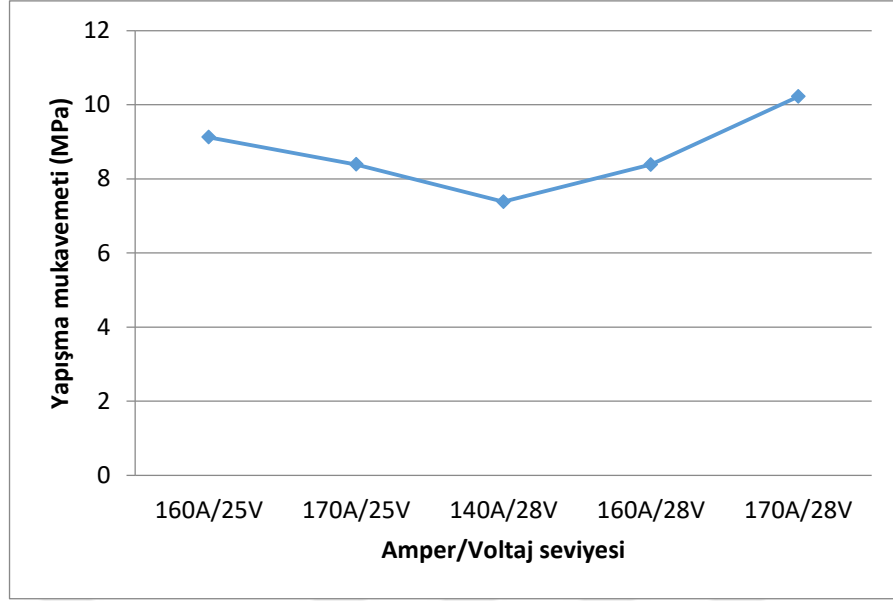
Elektrik ark püskürtme sistemiyle 15 cm mesafeden 4 bar atomize gaz basıncında 4 farklı akım ve 2 farklı voltaj değerlerinde üretilen A22, A23, A24, A25, A31, A32, A33 ve A34 nolu kaplamaların akım, voltaj değerlerindeki değişime bağlı olarak mikro sertlik değerlerindeki değişim grafiği Şekil 6.12.'de verilmiştir.



Şekil 6.12. Amper/voltaj değerlerindeki değişimin mikro sertliğe etkisi.

Şekil 6.12.'ye baktığımızda 25 voltda üretilen kaplamalarda akımın 150 ampere çıkarılması sertliği arttırdığı 150 A'den sonra tekrar düşüş yaşandığı görülmektedir. 28 voltda üretilen kaplamalarda ise akımın artmasıyla sertlik bir miktar düşmüş 170 amper seviyesinde tekrar artış göstermiştir. Genel ortalamada 28 volt da üretilen kaplamaların 25 volt da üretilen kaplamalardan nispeten daha sert olduğu görülmektedir. Ortalama sertlik 80 ± 10 HV'dir.

Şekil 6.13.'de 15 cm püskürtme mesafesinden 4 bar atomize gaz basıncında, değişen amper/voltaj değerlerinde üretilen A24, A25, A31, A33 ve A34 nolu kaplamaların akım/ voltaj değerlerindeki değişime göre yapışma mukavemetleri verilmiştir.



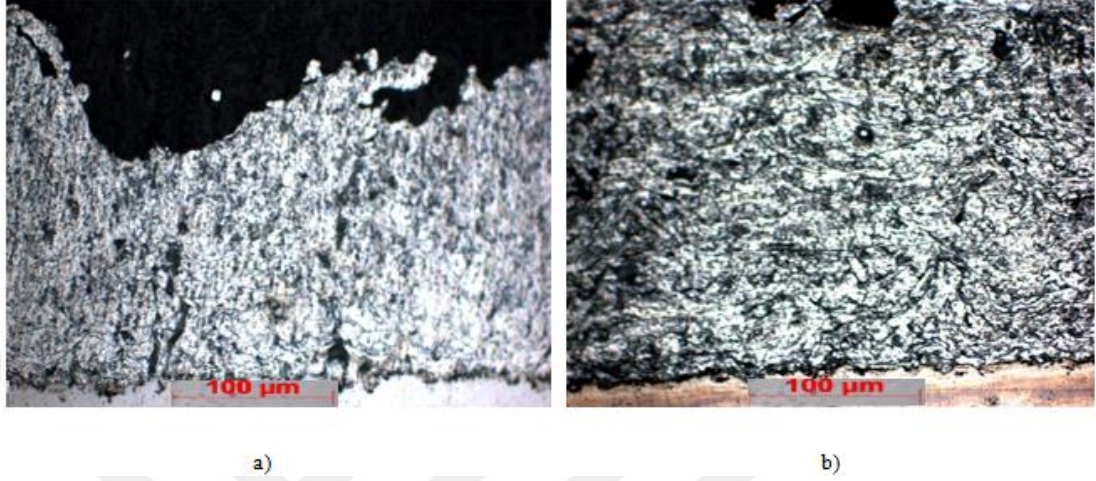
Şekil 6.13. Amper/voltaja bağlı olarak yapışma mukavemeti değişimi.

Şekil 6.13.'e bakıldığında 160A/25V da yapışma mukavemeti 9,12 MPa iken akımın düşük (140A/28V) seçilmesi durumunda yapışma mukavemetinde tedrice bir azalma olmuş ve 7,38 MPa düştüğü gözlenmiştir. 140 A, 28 V'da voltaj yüksek olmasına rağmen akım düşük olduğu için yapışma mukavemeti düşük çıkmıştır. Akım ve voltaj değerlerinin her ikisinin birden artırılması durumunda (170A/28V) yapışma mukavemeti değeri 10,21 MPa çıkmıştır. 170 amper 28 volt da ark enerjisi yüksek olduğu için malzeme iyi bir ergime göstermiş ve yapışma mukavemetinde artış olduğu görülmüştür. Genel olarak kaplamaların yapışma dayanımı 7-10 MPa arasındadır. Bu değerler standartlara (ASTM D4541) göre kaplamadan beklenen yapışma dayanımı değerlerini karşılamaktadır. Standartlara göre 7 MPa'nın altındaki yapışma dayanımları yetersizdir.

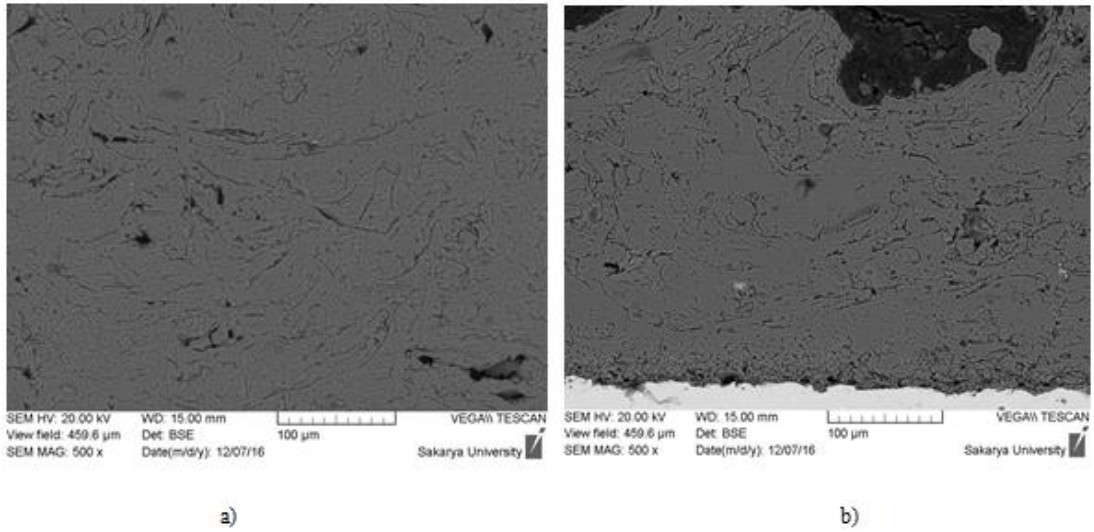
6.6. Atomizasyon Gaz Basıncının Etkisi

Elektrik ark püskürtme kaplama proses parametrelerinden biri olan atomizasyon gaz basıncı kaplama telinin ucunda ergiyen damlacıkları kopararak altlık yüzeyine taşıyan, oluşan partiküllerin hızlarını ve şekillerini belirleyen bir parametredir. Atomizasyon gaz basıncındaki değişim partiküllerin boyutunu ve altlığa doğru yol alma hızlarında etkiler.

Şekil 6.14.'de 160 A, 25 V'da 3 bar (P11) ve 4 bar (P12) da üretilen kaplamaların optik görüntüleri ve Şekil 6.15'de de 160 A 28 V'da 4 bar (P21) ve 5 bar (P22) da üretilen kaplamaların SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.14. 160 A, 25 V'da a) 3 bar (P11) ve b) 4 bar (P12) da üretilen kaplamaların optik görüntüleri.



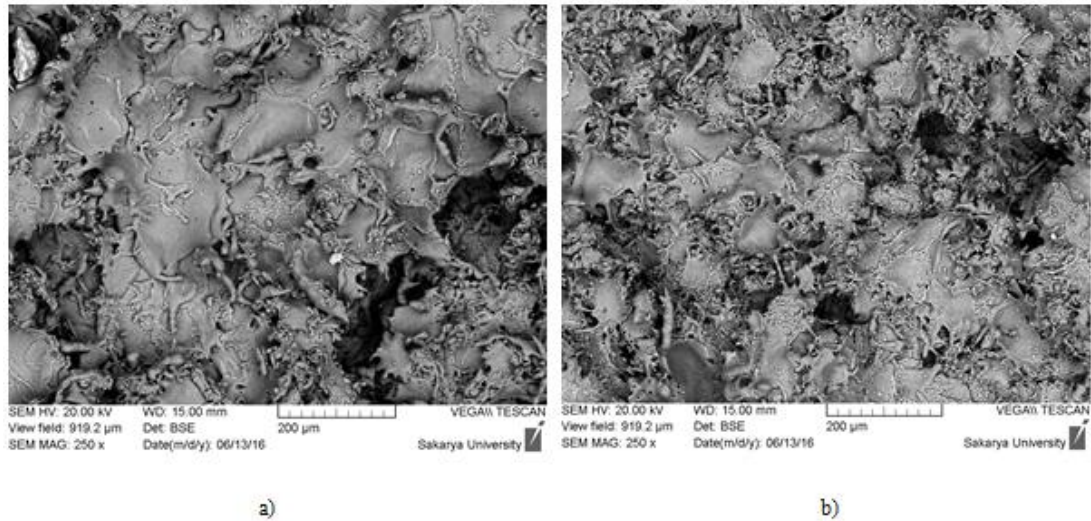
Şekil 6.15. 160 A, 28 V'da a) 4 bar (P21) da b) 5 bar (P22) da üretilen kaplamaların SEM görüntüleri.

Şekil 6.14.'deki optik mikroyapı görüntülerini incelediğimizde 3 bar atomize gaz basıncında üretilen P11 nolu numunenin, 4 bar da üretilen P12 nolu numuneden daha kısa ve kalın lamel yapısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca P12 nolu numune P11'den daha az poroziteli ve daha yoğun bir yapıya sahiptir. Artan atomize gaz basıncı partiküllerin altlık yüzeyine daha yüksek bir kinetik enerjiyle çarpmasını

sağlamış, bunun sonucunda splatların daha iyi yayılmasına neden olmuş ve daha yoğun bir yapı elde edilmiştir.

Şekil 6.15.'deki SEM incelemelerinde görüldüğü üzere kaplamaların porozite miktarında önemli oranda bir değişim gözlenmemiştir. Her iki kaplamada yoğun bir yapıya sahiptir.

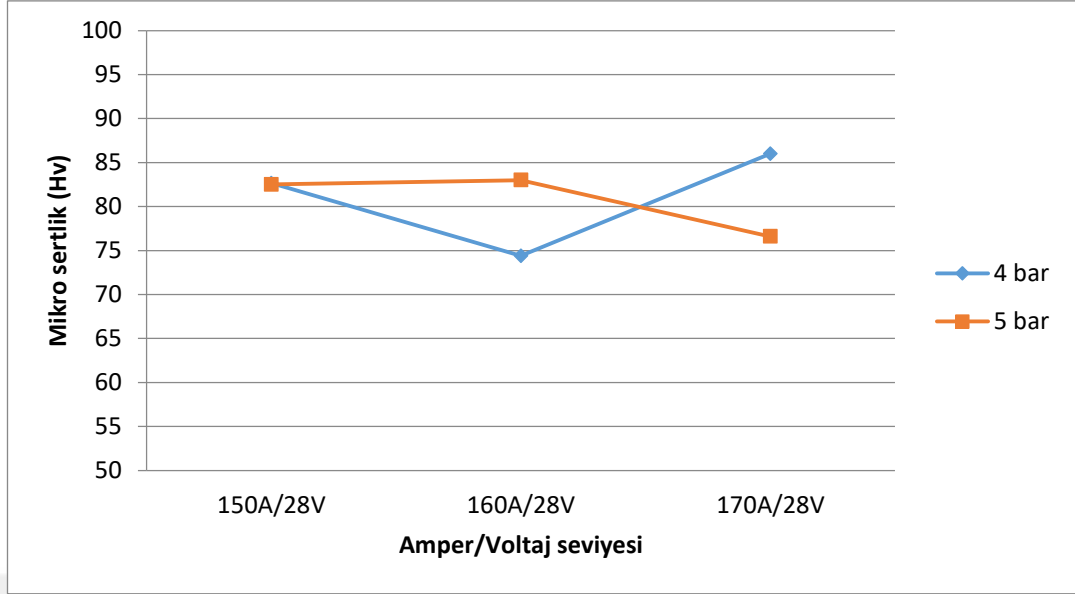
Şekil 6.16.'da 200 A, 30 V'da 3 bar (P31) ve 5 bar (P33) da üretilen kaplamaların üst yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Atomize gaz basıncının arttırılması telin ucunda ergiyen damlacıkları daha küçük partiküllere ayırmıştır. Şekil 6.16.'dan de görülebileceği gibi 5 bar da üretilen P33 nolu kaplama 3 bar da üretilen P31 nolu kaplamadan daha küçük partiküllerin olduğu splatlardan meydana gelmiştir.



Şekil 6.16. 200 A, 30 V'da a) 3 bar (P31) da b) 5 bar (P33) da üretilen kaplamaların üst yüzey SEM görüntüleri.

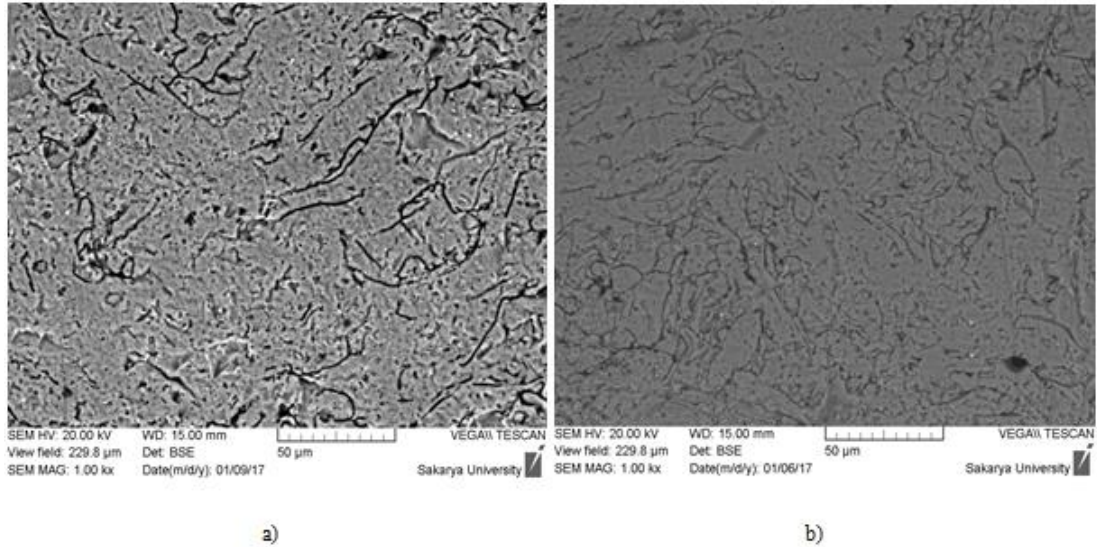
6.7. Atomizasyon Gaz Basıncının Kaplamanın Mekanik Özelliklerine Etkisi

Atomize gaz basıncının sertliğe olan etkisini incelemek amacıyla 15 cm mesafeden 28 volt da 150 A, 160 A ve 170 A'de 4 bar da üretilen A32, A33 ve A34 nolu kaplamalar ve 5 bar da üretilen A41, A42 ve A43 nolu kaplamaların sertlikleri ölçülmüş elde edilen değerlerle oluşturulan grafik Şekil 6.17.'de verilmiştir.



Şekil 6.17. Atomize gaz basıncı mikro sertlik etkileşim grafiği.

Şekil 6.17.'den de görülebileceği gibi 150 A, 28 V değerinde basınçtaki farklılığın sertliğe bir etkisi olmamıştır. Ortalama sertlik 80 ± 7 HV'dir. 170 A, 28 V değerinde 4 bar da üretilen A34 nolu kaplamanın sertlik değerinde artış olurken 5 bar da üretilen A43 nolu kaplamanın sertlik değerinde düşüş gözlenmiştir. Basıncın artmasıyla sertlikte artış beklenirken tersi bir sonuç çıkmıştır. Bunun nedeninin analizi için Şekil 6.18.'de A34 ve A43 nolu kaplamaların SEM görüntüleri verilmiş ve incelenmiştir.



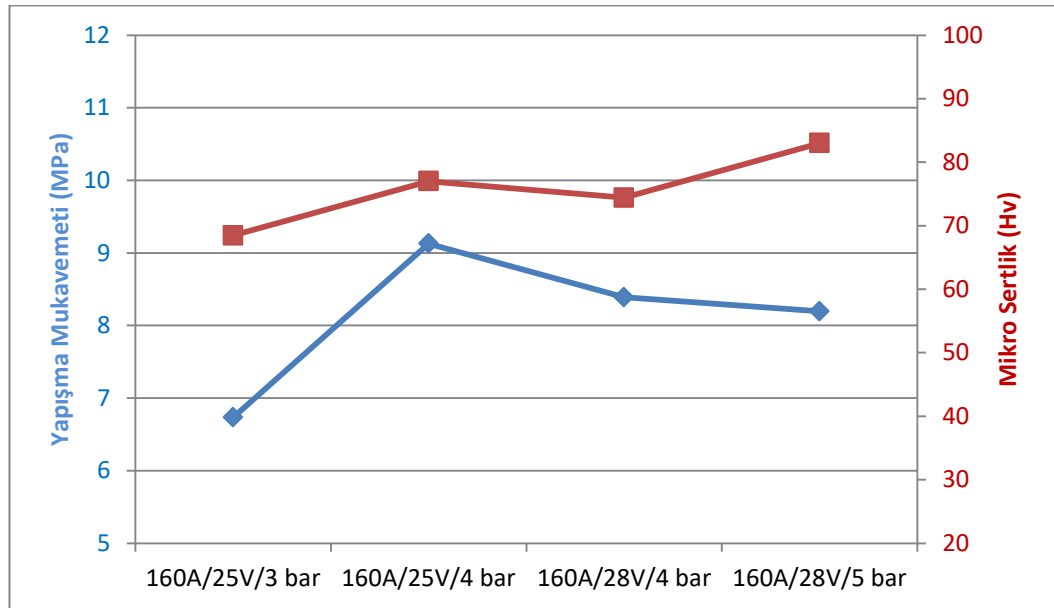
Şekil 6.18. 170 A, 28 V'da; a) 4 bar (A34), b) 5 bar (A43) da üretilen kaplamaların SEM görüntüleri.

Şekil 6.18.'den de görülebileceği gibi 4 bar atomize gaz basıncında sertliğin artıp, 5 bar da azalmasının nedeni 5 bar da üretilen kaplamanın mikroyapısında daha fazla miktarda ergimemiş partikül bulunması ve yüksek basınçta yapının homojenliğinin bozulmasıdır.

Atomize gaz basıncının yapışma mukavemetine olan etkisini ve yapışma mukavemetiyle mikro sertlik arasındaki bağıntıyı incelemek için 160 A, 25 V'da 3 bar (P11) ve 4 bar (P12) da ve 160 A, 28 V'da 4 bar (P21) ve 5 bar (P22) da üretilen kaplamaların yapışma mukavemeti ve mikro sertlik değerleri Tablo 6.1.'de ve bu değerlerle oluşturulan grafik Şekil 6.19.'da verilmiştir. 3 bar da üretilen kaplamanın yapışma dayanımı minimum kabul edilebilir (7MPa) değerinin altında çıkmıştır.

Tablo 6.1. Basınç değişimine bağlı olarak üretilen P11, P12, P21 ve P22 kaplamalarının mikro sertlik ve yapışma mukavemeti değerleri.

Numune	Akım (A)	Voltaj (V)	Gaz Basıncı (bar)	Sertlik (Hv)	Yapışma Mukavemeti (Mpa)
P11	160	25	3	68,5	6,732
P12	160	25	4	77	9,127
P21	160	28	4	74,5	8,389
P22	160	28	5	83	8,194



Şekil 6.19. Atomize gaz basıncı – mikro sertlik – yapışma mukavemeti diyagramı.

Şekil 6.19. incelendiğinde 160 A, 25 V’da 3 bar atomize gaz basıncından 4 bara çıkıldığında ve 28 V’da 4 bar dan 5 bara çıkıldığında atomize gaz basıncındaki artışla birlikte sertlikte artış gözlenmiştir. Genel olarak yapışma mukavemeti değerleride, değişen atomize gaz basıncı değerleriyle birlikte mikro sertlikle paralel bir değişim göstermiştir.



BÖLÜM 7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Genel Sonuçlar

- a) Üretilen kaplamaların metalografik incelemeleri sonucunda mikro yapıların tipik termal spreycaplamayapılarında olduğu görülmüştür. Tel besleme hızı ve paso sayısı kontrol edilerek arzulanan kaplama kalınlığı elde edilebilmektedir.
- b) Kaplamalarda; kaplama altlık arayüzeyinde herhangi bir kusur bir boşluk görülmemiştir. Kumlama seviyesinin kaplamanın tutunması için uygun olduğu gözlenmiştir. Splatlar arasında ayrılma çatlama ve ergimemiş parçacık kalıntılarının uygun proses parametreleri ile azaltılabileceği belirlenmiştir. Bu noktada özellikle ark spreycaplamasınasıcında voltaj, spreycaplamasınasın mesafesi ve gaz basıncı sırasıyla etkin parametrelerdir. Elde edilen arkın püskürtme esnasında kararlılığını koruduğu ve kesintisiz olarak ısı transferi sağlayarak ergime için yeterli ısı girdisi sağladığı gözlenmiştir.
- c) Sabit spreycaplamasınasın mesafesinde (15 cm) ve atomizasyon gaz basıncında (4 bar) üretilen kaplamaların sertliği; akım açısından değerlendirildiğinde, 25 V'da akımın 140 A'den 170 A'ye artırılması durumunda sertlik 73,2 Hv'den 77,1 Hv'ye artış göstermiştir. Voltaj açısından değerlendirildiğinde, 140 A'de voltajın 25 V'dan 28 V'a artırılması durumunda sertlik 73,2 Hv'den 93 Hv'ye artış göstermiştir. 170 A'de voltajın 25 V'dan 28 V'a artırılması durumunda sertlik 77,1 Hv'den 86 Hv'ye artış göstermiştir. Atomizasyon gaz basıncı açısından değerlendirildiğinde 160 A, 25 V'da basıncın 3 bar'dan 4 bar'a artırılması durumunda sertlik 68,4 Hv'den 76,8 Hv'ye artış göstermiştir. Genel olarak bakıldığında 35 ± 5 Hv tel sertliğine sahip alüminyumun ark spreycaplamasınasınasıyla püskürtülmesi sonrasında ortalama sertliği 83 ± 10 Hv'ye ulaşmıştır. Farklı deney parametreleri ile üretilen kaplamalarda sertlik değişiminde belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Bu durum deneylerde

kullanılan parametrik değerlerin kaplama sertliği üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

- d) Sabit sprej mesafesinde (15 cm) ve atomizasyon gaz basıncında (4 bar) üretilen kaplamaların yapışma mukavemeti; akım açısından değerlendirildiğinde 28 V'da akımın 140 A'den 170 A'e arttırılması durumunda yapışma mukavemeti 7,38 MPa'dan 10,21 Mpa'a artış göstermiştir. Voltaj açısından değerlendirildiğinde 170 A'de voltajın 25 V'dan 28 V'a arttırılması durumunda yapışma mukavemeti 8,40 MPa'dan 10,21 Mpa'a artış göstermiştir. Atomizasyon gaz basıncı açısından değerlendirildiğinde 160 A, 25 V'da basıncın 3 bar'dan 4 bar'a arttırılması durumunda yapışma mukavemeti 6,73 MPa'dan 9,12 Mpa'a artış göstermiştir. Yukarıda belirtildiği üzere farklı parametrelerle üretilen kaplamaların yapışma dayanımı ortalama 7 MPa'nın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Malek ve ark. [52] çalışmalarında elde edilen yapışma test sonuçları ile benzerlik gösterdiği görülmektedir.
- e) Üretilen kaplamalarda görüntü analiziyle yapılan çalışmalar sonucunda porozite oranının %5'in altında olduğu tespit edilmiştir. Düşük porozite kaplamaların korozyon ortamlarında daha uzun ömürlü olması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda daldırma kaplama yöntemlerine alternatif kaplamalar ark sprej prosesiyle tekno-ekonomik olarak elde edilebilmektedir.
- f) EAS yöntemiyle manuel olarak açık atmosferde lokal veya tüm yüzeylere korozyona karşı dirençli kaplamalar prosesde gaz sarfiyatı göstermemesi nedeniyle alev sprej prosesine göre daha ekonomik olarak üretilmektedir.
- g) EAS ile proses parametreleri etkin bir şekilde kontrol edilerek kaplama mikroyapısı iyileştirilebilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, çalışılan parametreler içinde 15 cm mesafede optimum kaplama parametresinin 28 V/170 A/4 bar olduğu tespit edilmiştir. 4 paso kaplama sonucunda kesitte kaplama kalınlığı 520 ± 30 μm ölçülmüştür. Dolayısıyla paso başına 130 mikron kalınlığında kaplama biriktirilebilmiştir. Çelik yüzeylerde korozyondan korunma amacıyla uygulanabilmektedir.

7.2. Öneriler

- a) Uygulanan operasyon parametreleri daha da genişletilerek havadaki partikül çapları, havadaki partikül hızları, ark ve çevresinde oluşan hava girdapları ve jet içerisindeki değişimler vb. etkiler incelenebilir.
- b) Üretilen kaplamaların tuz püskürtme ve potansiyostat korozyon performansı incelenebilir.
- c) Kaplanan altlık malzemesi farklı sıcaklıklarda ısıtılarak kaplama yapışma dayanımına altlık sıcaklığının etkisi incelenebilir.
- d) Farklı püskürtme mesafelerinde kaplamalar üretilerek mesafenin etkisi araştırılabilir.
- e) Kaplama işleminde hava haricinde ikincil bir inert gaz kullanılarak, ikincil gazın etkisi araştırılabilir.
- f) Farklı nozullarla kaplamalar üretilip, nozulların kaplama yapısına etkisi incelenebilir.
- g) Deneysel tasarım planı oluşturularak çok değişkenli çok faktörlü deney çalışmaları ile optimizasyon ve gürültü sinyal oranları istatistiksel olarak çalışılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Keleşoğlu, E., Sert Kaplamalar Üretim Teknikleri ve Özellikleri, İstanbul 2011.
- [2] Hussary, N., Investigations into the wire arc spraying process, Thesis of Doctor of Philosophy, Univesrsity of Minnesota, May 2003.
- [3] Özbek, Y., Y., Yüksek Teknolojik Kaplamalar Ders Notları, SAÜ, 2015-2016 Güz.
- [4] Dorfman, M.R., Sulzer Metco(US) Inc., Thermal Spray Processes, Advanced Materials&Processes, August 2002.
- [5] Yüksek, E., Ark sprej teknolojisi ile şekilli parça üretimi, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos 2008.
- [6] Bao, Y. and Gawne, D. T., Process modeling of Thermal Spray Deposition of Thermosets, Surface Engineering, 11(3), 215-222, 195.
- [7] Altuncu, E., “YSZ ve CSZ esaslı termal bariyer kaplamaların üretimi, karakterizasyonu ve termal çevrim performanslarının karşılaştırılması”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, 2011.
- [8] <http://www.gtv-mbh.com>. Erişim Tarihi: 21.03.2017.
- [9] Zağlı, M., “Alev Sprey Yöntemiyle Polimer Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos 2010.
- [10] George, M., Robert., Jack,R.,Merle, T., Second National Conference on Thermal Spray, 31 October-2 November, 1984.
- [11] Leong, C.,S., Repair/Strengthening of Steel Angles Using Thermal Spray Metallizing, Master of Science Thesis, University of Manitoba, Canada, August 2000.

- [12] Luh-Maan, C., Maged, E. G., Metalization of Steel Bridges: Research and Practice, Division of Construction Engineering and Management School of Civil Engineering, Purdue University, May 1999.
- [13] Çalışkan. O., Termal Sprey Teknolojisinde Alternatif Uygulamalar, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Müh. Fak. Metalurji Müh. Böl., 2004.
- [14] Serttaş, B., Termal Sprey Kaplama Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
- [15] Pawlowski, L., The Science and Engineering of Thermal Spray Coating, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [16] Robert, B., Heinman, Plasma Spray Coating, VCH Verlag, ISBN 3-527-29430-9, 1996.
- [17] Gabriele, Nutsch, Grundlagen der Oberflächentechnik, Physikalische Verfahren, TU Ilmenau, German, 2000.
- [18] Kruger, J., Knpper, M., Arc spray coating for industrial application, International Thermal Spray Conference, Essen, Germany, 4-6 March 2002.
- [19] Smolka K., Thermisches Spritzen, DVS-Verlag, 2002, 50-57.
- [20] Güleç, A., “Elektrik Arc Püskürtme Yöntemi ile Üretilmiş FeCrCMn Esaslı Kompozit Kaplamalarda Proses Parametrelerinin Abrasif Aşınma Performansına Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adapazarı, Eylül 2013.
- [21] Vyawahare, S.M., “Protective Thermal Spray Coatings for Polymer Matrix Composites”, Master Thesis, Pune University, Department of Mechanical Engineering, India, 2003.
- [22] Surface Engineering, ASM Handbook Vol.5, Cotell, C.M., Sprague, J.A., Smidt, F.A., (eds) ASM International, 1994.
- [23] Sulzer Metco Product & Services, www.sulzer-metco.com, Erişim Tarihi: 18.11.2015.
- [24] Tran, T. “ The Influence of Preparation on the Bond Strength of Zinc Twin-Wire Arc Spray Coating on Steel”, Master Thesis, San Jose State University, The Faculty of the Department of Chemical and Materials Engineering, San Jose, 2004.
- [25] Diltemiz, S.F., “Plazma Sprey Termal Bariyer Kaplamaların Isıl ve Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu”, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim 2010.

- [26] Kaya, A., “Ark sprey tekniği ile kaplanan dökme demir borularda yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ve korozyon davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [27] Bilgin, S. “Isıl püskürtme yöntemi ile oluşturulan martenzitik paslanmaz çelik kompozit toz kaplamanın mikro yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 2008.
- [28] Wang, X., Heberlein, J., Pfender, E., Geberich, W., Effect of nozzle configuration, gas pressure, and gas type on coating properties in wire arc spray, Journal of Thermal Spray Technology, Volume 8, pp. 565-575, December 1999.
- [29] Sacriste, D., Goubot, N., Dhers, J., Ducos, M., Vardelle, A., An Evaluation of the Electric Arc Spray and (HPPS) Processes for the Manufacturing of High Power Plasma Spraying MCrAlY Coatings, Journal of Thermal Spray Technology, ASM International, SF. 352-358, June 2001.
- [30] Heimann, R.,B., Plasma-spray coating, VCH Verlagsgesellschaft, 1996.
- [31] Yüksek, E., Altuncu, E., Şeker, İ., Y., Üstel, F., Plazma sprey kaplama yöntemi ve teknolojik uygulamaları, Galvanoteknik Dergisi, 06, 2006.
- [32] “Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection”, ASM Handbook Vol.13A, Cramer, S.D., Covino, B.S. (eds.), ASM International, 2003.
- [33] Parlakyiğit., A.,S., Termal Spreyleme Yöntemleri, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Medeniyet Üniversitesi.
- [34] Minisker., M.,A., “Termal sprey yöntemiyle oluşturulan kaplamaların mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eylül 2009.
- [35] Üstel, F., Termal Sprey Kaplama Teknolojileri ve Türkiye'deki Potansiyeli, Sunum, World of Industry Fuarı 2007.
- [36] Sampson, E.R., Thermal spray coating for corrosion protection: An Overview, Materials Performance, pp.27-30, December 1997.
- [37] Varacalle, D.J., Zeek, D.P., Zanchuck, V., Sampson, E., Couch, K.W., Benson., D., Cox, G.S., “Experimental Studies of Twin-Wire Electric Arc Sprayed Zinc/Aluminium Alloy Coatings”, Journal of Thermal Spray Technology, 7(4), 513-520, 1998.
- [38] Calla, E., Modi, S.C., “ Long Life Corrosion Protection of Steel by ZincAluminium Coating Formed by Thermal Spray Process”, International Conference on Corrosion Control - Corco= 2000, Mumbai, India, 2000.

- [39] Rincón, O., Rincón, A., Sánchez, M., Romero, N., Salas, O., Delgado, R., López, B., Uruchurtu, J., Marroco, M., Panosian, Z., “Evaluating Zn, Al and Al-Zn Coatings on Carbon Steel in a Special Atmosphere”, *Construction and Building Materials*, 23(3), 1465-1471, 2009.
- [40] <http://www.praxairsurfacetechologies.com//media/praxairsurface/us/documents/brochures/arc-spray-brochure.pdf>, Erişim Tarihi: 10.05.2016.
- [41] Binshi, X., Wei, Z., Shining, M., Baohong, T., Xiubing, L., Structure and Properties of Coatings Deposited by High Velocity Arc Spray Technique, *Journal of Tribology*, July 2000.
- [42] Şeker, İ.Y., “Ark Sprey Teknolojisi Yardımıyla Üretilen Krom İçerikli Kaplamaların Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2009.
- [43] Abeini, Ali., Splat and Coating Formation of Wire Arc Sprayed Aluminum, A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Masters of Applied Science, Graduate Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Toronto, 2004.
- [44] Jandin, G., Liao, H., Feng, Z.Q., Coddet, C., Correlations between operation condition, microstructure and mechanical properties of twin wire arc sprayed steel coatings, *Materials Science and Engineering*, 22 April 2002, pp: 298-305.
- [45] Planche M.P., Liao H., Coddet, C., Belfort, F., Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with a twin wire arc spray process and different working conditions, *Surface & Coating Technology*, 15 April 2003, pp: 215-2226.
- [46] Steffens, H.D., Nassenstein, K., Influence of spray velocity on arcsprayed coating structure, *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 8 (3), pp.454-560, September 1999.
- [47] Newbery, A.P., Rayment, T., Grant, P.S. A particle image velocimetry investigation of in-flight and deposition behaviour of steel droplets during electric arc spray forming, Department of Materials, University of Oxford, 27 January 2004.
- [48] Newbery A.P., Grant P.S., Neiser R.A., “The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying”, *Surface & Coatings Technology* 195, pp:91-101, 2005.
- [49] Wilden, J., Bergmann, J.P., Jahn, S., Knapp, S., Van Rodjinen, F., Fischer, G., Investigation about the chrome steel wire arc spray process and the resulting coating properties, *Thermal Spray 2007: Global Coating Solution* (Ed.) Marple B.R., 2007.

- [50] Abedini, A., Pourmoussa, A., Chandra, S., Mostaghimi, J., Effect of substrate temperature on the properties of coatings and splats deposited by wire arc spraying, Centre for Advanced Coatings Technology, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, 9 July 2006.
- [51] Paredes R.S.C., Amico S.C., D'Oliveria A.S.C.M., The effect of roughness and pre-heating of the substrate on the morphology of aluminium coatings deposited by thermal spraying, Mechanical Engineering Department, Federal University of Panama, 26 February 2005.
- [52] Malek, M.,H., Saad, N., H., Abas, S., Performance and Microstructure Analysis of % 99.5 Aluminium Coating by Thermal Arc Spray Technique, Procedia Engineering 68,558-565 (2013).



ÖZGEÇMİŞ

Enver TERZİ, 13.10.1989'da Akdağmadeni'nde doğdu. İlk orta ve lise eğitimini Akdağmadeni'nde tamamladı. 2007 yılında Akdağmadeni Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi'nden mezun oldu. 2009 yılında başladığı Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nü 2014 yılında bitirdi. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümün'de yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimi sırasında projelerde asistanlık yaptı.